

기계 기술 정책

| 제2권 제1호 (2023) |

TECHNOLOGY POLICY
MECHANICAL ENGINEERING

| 논문 |

- 01 기술경쟁 시대 기계산업의 도전과제와 첨단제조
지능형 혁신(AIX)
- 02 우리나라 기계산업의 광역시·도별 효율성과
생산성 추이
- 03 기술창업 활성화를 위한 브리콜라주 전략
KAIST의 실리콘 포토닉스 기술을 중심으로
- 04 산업 디지털전환을 위한 5G
5G 기능과 3GPP 표준 참여 현황 및 시사점

기계 기술 정책

CONTENTS | 목차

제2권 제1호(2023)

I 논문 I

- 기술경쟁 시대 기계산업의 도전과제와 첨단제조 지능형 혁신(AIX) 1
김호철, 박문구, 심창섭
- 우리나라 기계산업의 광역시·도별 효율성과 생산성 추이 37
서호준
- 기술창업 활성화를 위한 브리콜라주 전략 77
KAIST의 실리콘 포토닉스 기술을 중심으로
권상집
- 산업 디지털전환을 위한 5G 101
5G 기능과 3GPP 표준 참여 현황 및 시사점
김동욱

기술경쟁 시대 기계산업의 도전과제와 첨단제조 지능형 혁신(AIX)

김호철

산업통상자원부 부이사관, KDIS 겸임교원, 법학전문박사

박문구

KPMG 전무

심창섭

한국산업기술평가관리원 첨단장비PD

TECHNOLOGY POLICY
MECHANICAL ENGINEERING

기술경쟁 시대 기계산업의 도전과제와 첨단제조 지능형 혁신(AIX)

김호철*, 박문구**, 심창섭***

- 초 록 -

우리 산업의 기반인 기계산업은 현재 글로벌 기술패권 경쟁, 디지털 전환과 탄소중립 요구, 공급망 재편의 변화와 도전에 직면해 있다. 이러한 기술경쟁 시대에서 생존하기 위해서는 디지털·그린 기술의 확보, AI 기반 자율형 공장 구현, 공급망 재편의 활용 및 고도화 등이 요구된다. 첨단기계와 제조로봇은 지능화 기술과 융합하여 자율형 공장을 구성할 핵심 요소가 될 것이며, 이는 반도체, 자동차 등 우리 주력산업의 경쟁력을 획기적으로 향상할 것이다. 이를 실현하기 위한 국가전략으로서, 본고는 '첨단제조 지능형 혁신(AIX)'을 목표로, 첨단제조 기술의 초격차, 지능형 혁신 내재화, 공급망 데이터 플랫폼, 첨단제조 글로벌 진출 등을 추진할 것을 제안한다. 디지털·그린 기술 혁신이 주도하는 한국형 첨단제조시스템은 기술경쟁 시대의 경쟁력 원천이 되어 국가 경제의 성장 동력을 창출할 것이다.

주 제 어 디지털 전환, 탄소중립, 첨단제조, 지능형 로봇, 지능형 혁신

논문접수일 2023년 4월 30일 수정논문 제출일 2023년 6월 9일 게재확정일 2023년 6월 15일

* 1저자, 산업통상자원부 부이사관, hocheol.geneva@gmail.com, KDIS 겸임교원, 법학전문박사; 본고는 필자의 개인적인 견해이며 정부의 공식적인 입장과는 무관함

** 공동1저자, KPMG 전무, mungupark@kr.kpmg.com

*** 교신저자, 한국산업기술평가관리원 첨단장비PD, caleb92@keit.re.kr

**** 이외에 한국산업기술평가관리원 전형호 前첨단기계PD, 박근석 前첨단기계PD, 우현수 로봇PD 등이 과제 토론 및 논문 작성에 참여함

I. 서론

기계산업¹⁾은 제조, 건설, 에너지 등 다양한 분야에 걸쳐 자본재를 제공하는 기반산업으로 한 국가의 제조 경쟁력 수준을 보여주는 핵심 척도이다. 우리나라 일반기계(제조 장비, 산업용 기계, 에너지설비)는 2022년 생산 112조원, 수출 604.5억 달러를 기록하였다. 열악한 환경에서도 헌신적인 땀과 노력으로 대한민국을 제조 강국으로 이끈 주역이었고, 반도체, 자동차에 이어 주력 수출산업으로 우리 경제의 버팀목이 되어왔다.²⁾

그런데 우리 기계산업이 지금 대내외적으로 커다란 변화와 도전에 직면해 있다. 첫째 중국이 세계 1위 기계 강국으로 부상함에 따라 거대 수요시장이라기보다는 강력한 수출국을 이웃한 경쟁환경으로 바뀌었다.³⁾ 둘째 기계산업 수요시장인 제조현장이 디지털 전환과 탄소중립으로 빠르게 변화하고 있다. 인공지능(AI), 사물인터넷(IoT), 빅데이터 등 4차 산업혁명 기술을 수용하고 사회적 요구를 반영한 고객가치 중심의 사업모델 혁신이 필요하다.⁴⁾ 셋째 미-중 패권경쟁으로 전략적 산업정책이 부활하고 첨단제조 기술 및 공급망 확보를 위한 리쇼어링, 니어쇼어링과 프렌드쇼어링이 확대되어, 공급망이 경제안보 차원에서 재편되고 있다. 우리 기계산업의 글로벌 경쟁전략을 근본적으로 재검토하여 미래 경쟁력 확충에 나서야 할 시점이다.⁵⁾

본고는 이러한 문제 인식에 기초하여, 기술경쟁 시대의 글로벌 산업 트렌드 및 경쟁 환경 변화를 거시적으로 조망하고, 우리 기계산업이 당면한 도전과제와 바람직한 미래상을 살펴본 다음, 기계산업 고도화를 위한 첨단제조 기반의 지능형 혁신(AIX) 전략과 추진과제를 모색해 보고자 한다.

1) '기계'는 강학상 다양한 형태의 에너지를 변환·전달하는 장비를 포괄적으로 의미하나, 표준산업분류로 수송기계, 전기기계 등을 제외한 '기타 기계 및 장비(C29)'가 '일반기계'이며, 우리가 말하는 기계산업에 해당한다. 기계산업은 크게 공작기계, 섬유기계, 제조로봇, 반도체 장비, 바이오 장비 등 제조 장비 분야, 건설기계, 농기계 등 산업용 기계 분야, 냉동공조, 펌프·압축기 등 에너지설비 분야가 있다.

2) 한국기계연구원, "기계산업 2022년 성과와 2023년 전망", 2023.2.27

3) 한국기계연구원 (2022), 「기계산업 발전방안」, 정책지원 보고서: 세계 기계산업 규모(2020년 수출 기준)는 약 1.5조 달러 수준이며, 세계시장 점유율은 중국(14.4%), 독일(14.3%), 미국(9.7%), 일본(7.7%) 순이고 우리나라는 8위로 집계됨.

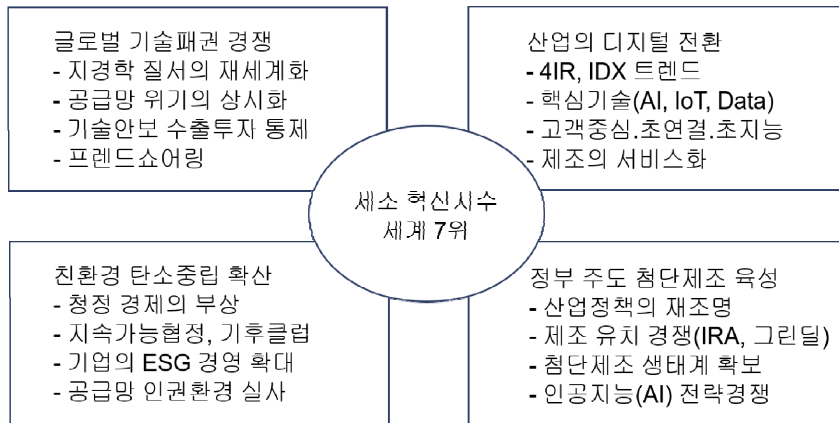
4) 김호철 (2023a), "산업의 디지털 전환, 글로벌 지정학과 통상협상 新의제 검토", 통상법률 제158호; 심우중·김종기 (2022), "한국 산업의 디지털 전환 실태와 정책적 시사점", KIET 산업경제: 국내 산업의 디지털 전환 실태를 보면, DX에 대한 인식 수준과 준비 정도가 전반적으로 낮고 DX 단계는 '초기 구축' 수준에 위치하고 있음.

5) 김호철 (2023b), "글로벌 공급망 재편의 지정학과 신통상전략 구상", 통상법무정책 제5호

II. 기술경쟁 시대 글로벌 환경

제조업의 미래 경쟁력을 보여주는 국가별 제조혁신지수(BCG MII)에서 우리나라가 미국, 중국은 물론이고 독일, 일본, 대만 등에도 뒤처진 7위로 평가되었다. 우리나라 GDP의 26%, 수출의 84%로 한국 경제를 떠받치는 제조업이 혁신에서 제자리걸음을 하면서 미래 준비에 뒤처져 있다는 의미이다.⁶⁾ 제조업은 광의의 기계산업에 해당하며 제조업의 변화가 기계산업과 직결되는바, 기계산업 정책을 검토함에 앞서 제조업 전반을 둘러싼 글로벌 경쟁환경의 흐름을 짚어볼 필요가 있다. 각국의 전략이 복잡하게 얽혀있고 다양한 관점이 혼재하고 있으나, 여기에서는 글로벌 기술패권 경쟁, 산업의 디지털 전환, 친환경 탄소중립 확산, 산업정책의 부상에 주목하여 전반적 흐름을 살펴보고자 한다.

[그림 1] 기술경쟁 시대 제조업의 글로벌 환경



1. 글로벌 기술패권 경쟁⁷⁾

세계 경제는 지금 기술패권의 미래를 놓고 국가 간의 경쟁이 가속화된 변곡점에 서있다.⁸⁾ 이에 따라, 그간 자유무역과 세계화를 이끌던 자유주의 국제질서가 쇠퇴하고 새로운 지경학

6) 매일경제, “[제조강국, G5 도약의 길] 도장·팩스 쓰는 ‘아날로그 일본’... 디지털공장 한일전에선 압승”, 2023.3.19

7) 주저자 논문을 일부 발췌하여 편집 인용: 김호철 (2023b), “글로벌 공급망 재편의 지경학과 신통상전략 구상”, 통상법무정책 제5호

8) The White House, Remarks by President Biden at the Virtual Munich Security Conference, 19 February 2021: “We are in the midst of a fundamental debate about the future and direction of our world. We’re at an inflection point between those who argue that autocracy is the best way forward and those who understand that democracy is essential.”

질서(geo-economic order)의 시대가 펼쳐지고 있으며, 그간 자유주의 국제질서를 지탱해오던 논리와 상황도 변화의 도전에 직면해 있다. 첫째 글로벌 경제를 보는 주요국 시각이 제로섬 게임으로 바뀌었다. 미국이 안정적인 패권국이던 시기에는 자유무역과 보편적 질서를 확산하는데 주력해 왔으나, 중국이 전략적 경쟁국으로 등장하고 경제적 격차가 좁혀지면서 미국 입장에서 자유무역에 따른 상호 이익 극대화보다는 제로섬 게임 하에서 상대적 경제 권력의 변동에 보다 관심을 두게 되었다. 둘째 글로벌 공급망으로 형성된 국가 간 상호의존에 대한 시각도 달라졌다. 안정적인 시기에는 경제적 상호의존이 효율성 증진과 국제적 평화의 수단으로 인식되었지만, 지금과 같은 전략경쟁 시기에는 경쟁국 기술·공급망에의 과도한 의존이 전략적 취약성으로 작용한다. 이에 미국은 우방국 연대를 통해 네트워크 우위를 확보하면서 자국의 취약성은 완화하려는 공급망 전략을 확대해가고 있다. 셋째 경제와 안보의 관계가 재설정되고 있다. 기존 WTO 체제에서 자유무역 가치를 우선하면서 안보 예외는 극히 제한적으로 허용하였으나, 지금은 미국의 대중국 견제조치에 안보 예외를 광범위하게 원용하면서 경제안보가 별개의 영역으로 분리되고 있다. WTO 자유무역 가치의 우월성이 도전받고 통상정책이 정치화되고 있는 것이다.⁹⁾

이러한 세계 경제 질서의 흐름에서 재세계화가 어떤 모습으로 펼쳐지게 될지 아직 확정적으로 말하기 이르지만, 정부와 시장, 효율성과 회복력, 경제와 안보, 힘과 규범 간의 관계에 있어 재균형을 모색하는 과정을 거치게 될 것임은 분명하다. 이와 관련, 미국내 영향력 있는 정치경제학자 Rodrik 교수는 초세계화를 이끌던 신자유주의 질서가 2008년 글로벌 금융위기를 계기로 약해지고 있었고, 경제 다변화, 분배 개선 등에 대한 정치적 요구와 지정학 경쟁의 본격화로 인해 새로운 질서로의 변화는 불가피한 상황이라고 하였다. 또한 앞으로 구현해나갈 더 나은 세계화(better globalization)에서는 고용, 소득, 분배 등 국내 경제목표와도 연계되도록 국제질서가 펼쳐지는 것이 중요하다면서, 브레튼우즈식 접근을 되살리고 국가안보의 정당한 추구를 폭넓게 인정할 것을 주장했다.¹⁰⁾ 이러한 주장의 보편적 타당성 여부와는 별개로, 미국이 다자적 규칙 합의와 이행 확보 보다는 일방적 무역제재를 통한 해결에 의존하는 경향을 보이고 WTO 상소기구 정상화를 지연시키면서 개혁방안으로 GATT 회귀를 염두에 두고 있는 작금의 시대적 분위기를 대변한다고 생각한다.

글로벌 기술패권 경쟁으로 자유주의 진영과 권위주의 진영 간의 대립을 심화하여 기술 및 안보 중심으로 공급망 권역이 분리되는 탈동조화(decoupling) 우려를 촉발하고 있다. 중국은

9) 김호철 (2023b), 전제논문: Robert, A., Moraes, H. and Ferguson, V. (2019), "Toward a Geoeconomic Order in International Trade and Investment", *Journal of International Economic Law* 22

10) Rodrik, D. (2022), "A Better Globalization Might Rise from Hyper-Globalization's Ashes", Project Syndicate

‘중국제조 2025’를 토대로 첨단제조 분야의 독자적 생태계 구축을 추진해왔고, 미국도 트럼프 시절부터 대중 견제조치를 도입하였으며 바이든 정부 들어서는 공급망 보고서에 기초하여 글로벌 공급망의 인위적 재편을 추진해가고 있다. 미국 국가안보전략 보고서는 ‘자유롭고 개방되며 번영하고 안전한 세계’라는 민주주의 비전이 중국, 러시아 등 권위적 국가의 현상변경 정책(침략 전쟁, 정치선거 개입, 공급망 무기화, 불법적 국제질서 등)으로 전략적 도전에 직면해 있다고 명시하고 있다.¹¹⁾ 다만 공급망 탈동조화를 이해하는 데 있어, 세계가 이미 초연결되어 각국 경제의 상호의존이 상당하기 때문에 글로벌 공급망을 완전히 분리하는 것은 현실적이지 않고 기업들도 공감할 수 없음에 유의할 필요가 있다. 여기서 말하는 탈동조화는 자유-권위 진영 간의 대립으로 인해 부분적 공급망 분리와 권역화가 이루어지고 있다는 의미이며, 미국 내부에서도 중국과의 경제 연계를 전략적으로 재편하는 ‘선택적 탈동조화’가 적지않은 지지를 얻고 있다. 이러한 공급망 탈동조화가 시도되는 분야로는 반도체, 인공지능(AI), 차세대 통신(6G), 양자과학, 바이오, 친환경 장비 등을 들 수 있으며, 미국은 이들 분야에서 일부 경제적 손실을 감수하더라도 중국의 기술굴기를 저지하기 위해 통상조치를 동원하게 될 것이다. 따라서 이러한 지정학적 갈등에 의한 공급망 불안정의 상시화가 예상된다.¹²⁾

공급망 권역 내에서는 수출통제, 기술보호, 외투심사 등 3대 기술안보 분야를 중심으로 우방국 간 정책 공조 요구가 점차 확대될 것으로 보인다. 미국은 2018년 트럼프 정부에서 수출통제개혁법(ECRA)에 근거하여 대중국 수출통제 조치를 본격화한 이래 확대하는 추세이다. 지난해 중국 SMIC가 7나노 반도체 공정 개발을 발표하자, 이에 놀란 미국은 수출통제규정(EAR) 통제품목리스트(CCL)에 반도체와 반도체장비 품목을 추가하였는데(10.7 규정), AI, 슈퍼컴퓨터 등에 활용되는 첨단 반도체, 16/14나노 이하 비메모리, 18나노 이하 D램, 128단 이상 낸드플래시 생산을 위한 제조장비를 망라한 포괄적 대중국 반도체 수출통제를 도입하였다.¹³⁾ 이러한 수출통제가 실질적 성과를 거두기 위해서는 우방국 공조가 필수적인데, 금년 1월에 바이든이 직접 나서 두루 다니며 일본과 네덜란드의 대중국 반도체 수출통제 동참을 끌어낸바 있다. 한편 2022년에는 러시아의 우크라이나 침공에 대응한 미국 주도 대러시아 경제제재에 우방국들이 동참하여

11) The White House, *National Security Strategy*, October 2022, pp.8-9

12) 김호철 (2023b), 전계논문: Segal, S. (2021), “Degrees of Separation: A Targeted Approach to U.S.-China Decoupling - Final Report”, A Report of the CSIS Economics Program, October 2021; 최계영 (2022), “미·중 기술패권 경쟁: 7개 戰線과 대응 전략”, KISDI Premium Report 22-05; 최계영 (2023), “글로벌 기술 패권 경쟁에 대한 한국의 대응”, Tech & Trade 창립세미나 발표자료, 2023.2.21

13) U.S. DoC, 15 CFR Parts 734, 736, 740, 742, 744, 762, 772 and 774, Docket No. 220930-0204; Covington, “U.S. Imposes Additional Export Controls Restrictions on Advanced Computing and Semiconductor Manufacturing Items”, 10 Oct 2022

러시아 경제활동에의 실질적인 압박 효과를 가져옴에 따라, 미국 내부에서는 이를 계기로 미국식 수출통제가 국제사회에 안착하고 있다는 평가도 나오고 있다. 이에 비추어, 미국이 우방국을 규합하여 폭넓은 경제제재를 담은 ‘신바세나르 체제’로의 전환을 본격화할 가능성도 점쳐진다.¹⁴⁾

한편, 지난해 4월 앨런 미 재무장관이 ‘프렌드쇼어링(friend-shoring)’을 언급하자 미국 정부가 중국 및 러시아 경제와의 탈동조화를 본격화한 것으로 읽히면서 각국 정부와 기업 사이에서 미국발 생산기지의 ‘탈중국’ 여부가 관심사가 되었다. 사실 이러한 정책적 지향을 현실적으로 구현하려면 적지 않은 제약이 따른다. 기업 입장에서 거대 수요시장이자 제조 경쟁력을 갖춘 중국과의 사업을 접고 나와야 하는지에 대한 의문이 들고, 경제적 측면에서도 권위주의 국가라고 해서 공급망에서 배척하면 그에 따른 비효율을 감당해야 한다. 대중국 견제에 동조하는 국가는 중국의 경제적 보복에 노출될 위험도 제기된다. 하지만 미국 입장에서 볼 때, 공급망 취약성을 독자적으로 해결하기 불가능하므로 가치를 공유하는 동맹국 간에 공급망 재편과 첨단기술 혁신에 협력하는 것이 전략적으로 반드시 필요하며 이에 대한 미국 정부의 의지도 상당하다. 이와 관련하여 G7, 미-EU 통상무역위원회(TTC) 등에서 ‘비시장 정책 및 관행(non-market policy and practice)’, ‘경제적 압박(economic coercion)’ 방식으로 논의가 이루어지고 있으므로 주목할 필요가 있다.¹⁵⁾

2. 산업의 디지털 전환¹⁶⁾

모든 산업에 걸쳐 디지털 전환이 빠르게 이루어지고 있다. Schwab은 이를 4차 산업혁명(The Fourth Industrial Revolution)으로 표현하였다. 산업혁명은 기술 혁신과 사회구조 변화를 의미하는데, 1차 증기기관 발명, 2차 전기와 석유 사용, 3차 정보기술 자동화에 이어 지금 우리는 디지털 혁신으로 인해 물리적 공간, 디지털 공간 및 생물학적 공간이 연결되고 지능화되는 4차 산업혁명을 맞이하고 있다는 것이다. AI, IoT, 로보틱스, 자율주행, 3D 프린팅, 바이오, 양자컴

14) 김호철 (2023b), 전개논문; Bown, C., “The Return of Export Controls: A Risky Tactic That Requires Cooperation From Allies”, Foreign Affairs, January 24, 2023; 정인교, “[정인교 칼럼] 미국의 신바세나르 체제 대비해야”, 서울경제 2022.4.13
 15) 김호철 (2023b), 전개논문; 코트라 (2022), “미국 프렌드쇼어링 정책 심층분석과 시사점”, Global market Report 22-024; Benson, E. and Kapstein, E. (2023), “The Limits of “Friend-shoring””, CSIS; Dezenski, E. and Austin, J. (2021), “Rebuilding America’s economy and foreign policy with ‘ally-shoring’”, Brookings; Tran, H. (2022), “Our guide to friend-shoring: Sectors to watch”, Atlantic Council
 16) 주저자 논문을 일부 발췌하여 편집 인용: 김호철 (2023a), “산업의 디지털 전환, 글로벌 지정학과 통상협상 신의제 검토”, 통상법률 제158호

퓨팅 등 디지털 기술이 급속도로 확산하여 새로운 부가가치를 창출하고 인류의 삶을 변화시키고 있다. 기업 활동에서도 신기술 도입으로 생산방식과 공급망의 혁신이 일어나고, 고객의 정보접근 및 참여 확대, 행동패턴 변화 등이 사업전략 전반에 영향을 미치고 있다. 이러한 4차 산업혁명의 혁신적 변화를 산업 현장에서 구현하는 것을 ‘디지털 전환(DX: digital transformation)’이라고 한다. 미국 산업 IoT 컨소시엄(IIC)은 산업의 디지털 전환을 “기업이 IoT, AI, 빅데이터 등으로 실시간 연결하고 기존의 운영방식과 서비스를 혁신하여 새로운 가치를 창출하는 것을 의미하며, 정보기술(IT)과 운영기술(OT)의 융합을 특징으로 한다”고 정의하였다. 개념적으로, 아날로그 형태를 디지털 형태로 변환하는 전산화(digitization) 단계, 산업에 IT기술을 활용하는 디지털화(digitalization) 단계와 구분하여, 디지털 전환(DX)은 IoT, AI, 빅데이터 등 디지털 기술을 활용하여 물리와 가상을 연결하여 지능화한 물리-가상 시스템(CPS) 단계라고 할 것이다. 우리 정부도 산업의 디지털 전환 속도를 높이기 위해 2022년 1월 ‘산업디지털전환촉진법(약칭: 산업디지털전환법)’을 제정하여 7월부터 시행하고 있다. 동 법률 제2조는 ‘산업 디지털 전환’을 “산업 데이터와 지능정보기술을 산업에 적용하여 산업활동 과정을 효율화하고 새로운 부가가치를 창출해 나가는 일련의 행위”라고 정의하였다.¹⁷⁾

디지털 전환을 이끄는 것은 IoT, AI, 빅데이터 등 혁신 기술이다. 특히 컴퓨터 및 통신 기술 발달로 폭넓은 데이터 확보가 가능해지면서 AI 학습능력이 고도화되고 기존 IoT 기술과 결합하여 물류 자동화, 공정 최적화, 예지보전, 원격제어 등에서 획기적인 진전이 이루어지고 있다. 이와 관련, 세계경제포럼(WEF)은 2018년부터 매년 전 세계의 주요 공장을 심사하여 등대공장(lighthouse factory)을 선정하고 있다. 마치 등대가 배를 안내하는 것처럼 IoT, AI, 빅데이터 등 디지털 기술을 도입하여 제조 혁신을 이끄는 공장을 지칭하는 용어로, BMW, 지멘스, 존슨앤존슨, 노키아, 르노, 타타스틸 등 세계 굴지 기업의 100여 개 공장이 선정되었고, 국내에서 포스코, LS일렉트릭, LG스마트파크가 이름을 올렸다. 이들 선도 기업은 디지털 기술을 제조 현장에 성공적으로 접목하여 생산성을 높이고 새로운 부가가치를 창출하는 모범 사례가 되고 있다. 이에 따라 다른 기업들도 시장 경쟁에서 도태되지 않기 위해 디지털 혁신 기술의 현장 적용에 나서고 있다. 전 세계 시가총액 상위 기업이 30년 전에는 IBM, 엑손모빌, GE, 도요타 등이었지만, 글로벌 경쟁 환경이 변화하면서 지금은 애플, MS, 아마존, 알파벳(구글), 테슬라, 엔비디아,

17) 김호철 (2023a), 전제논문; Klaus Schwab, “The Fourth Industrial Revolution: what it means, how to respond”, World Economic Forum, 2016.1.14; IIC (2020), Digital Transformation in Industry White Paper, Industrial Internet Consortium: “Digital transformation in industry leverages connected things to transform processes and operations to produce better outcomes.”

메타(페이스북) 등이 차지하고 있다. 미래에는 자사가 경쟁력을 가진 핵심 분야에 IoT, AI, 빅데이터 등 디지털 기술을 융합하여 새로운 혁신모델을 만들어낸 기업이 글로벌 시장을 주도하게 될 것이다.¹⁸⁾ 이러한 IoT, AI, 빅데이터가 플랫폼 기반으로 작동한다는 점에서 플랫폼에 콘텐츠가 축적되고, 이에 기반한 제조서비스 수요와 공급이 증가하고 있다. 즉, 플랫폼을 디지털 시장으로 활용하면서, 제조업의 생태계가 확장되고 있음을 뜻한다.

선도 사례를 통해 본 디지털 전환의 핵심적인 특징은 크게 세 가지로 요약된다. 첫째 고객중심(customer-centrality)이다. 고객을 프로세스 설계 및 운영의 최우선으로 놓고, 제품 전주기에 걸쳐 고객과의 접점을 강화하는 것이다. 제조 방식이 기존의 대량생산 체계에서 소비자 맞춤형 제품을 합리적 원가로 제공하는 유연생산으로 변화하고, 기존의 컨베이어 생산시설이 복합 작업을 수행하는 여러 셀로 구성된 ‘이동식 제조조직’으로 바뀔 것이다. 둘째 초연결·지능화(connectivity & intelligence)이다. 제조 시스템 내의 장비와 시설을 IoT 센서와 무선 네트워크로 연결하여 데이터가 실시간 교환되고 제어되어 다운타임이 줄고 최적화된 원격관리와 자율적 의사결정이 가능해진다. ICT 기술을 통한 생산관리 효율화를 넘어 IT와 OT를 융합한 프로세스의 지능화 혁신을 의미한다. 셋째 제조 가치사슬의 참여자 간에 끊임없이 소통하는 디지털 협업(data-driven collaboration)이다. 제품의 개발, 생산, 판매, 사후관리 등 전주기에 걸쳐 디지털 플랫폼 중심으로 네트워크가 통합되고 수많은 행위자가 참여하여 끊임없이 정보를 교환하면서 새로운 사업모델과 수익을 만들어낸다. 이러한 플랫폼 비즈니스는 네트워크 효과를 가지고 있어 시장을 먼저 진출하여 선점한 선도 기업의 지배력이 커지게 된다.¹⁹⁾

3. 친환경 탄소중립 확산²⁰⁾

환경친화적 지속가능 발전을 지향하는 ‘청정경제’에 대한 국제적 관심이 고조되고 있다. 특히 기후변화 대응 차원에서 탄소중립을 실현하는 친환경 에너지 전환 및 저탄소 기술 확산이 강조된다. ‘탄소중립’이란 인간의 활동에 의한 온실가스 배출은 최대한 줄이고 남은 온실가스는 흡수,

18) 김호철 (2023a), 전계논문; PwC (2022), Global Top 100 companies – by market capitalisation: WEF (2019), Global Lighthouse Network: Insights from the Forefront of the Fourth Industrial Revolution, White Paper, December 2019
 19) 김호철 (2023a), 전계논문; WEF (2019), Fourth Industrial Revolution: Beacons of Technology and Innovation in Manufacturing, January 2019; WEF (2021), Data Excellence: Transforming manufacturing and supply chains, White paper, January 2021; WEF (2022), The Data-Driven Journey Towards Manufacturing Excellence, White paper, January 2022
 20) 주저자 논문을 일부 발췌하여 편집 인용: 김호철 (2021), “탄소국경조정 도입의 WTO 합치성 쟁점: GATT 제2조, 제3조, 제20조”, 통상법률

제거해서 실질적인 배출량이 영(zero)이 되도록 한다는 개념이다. 국제사회는 2015년 파리협정을 통해 산업화 이전 대비 지구 평균온도 상승을 2℃ 보다 훨씬 아래로 유지하고 나아가 1.5℃로 억제하기 위해 노력한다는 목표를 설정하였는데, 이를 달성하려면 탄소 예산이 얼마 남지 않아 전지구적으로 2030년까지 최소 45% 이상 감축하고 2050년까지 탄소중립 사회로의 전환이 필요한 것이다. 이를 위해 각국은 국가별 감축목표(NDC)를 설정하고 자국내 탄소규제를 강화하는 한편 친환경 기술에 대한 지원정책을 확대해가고 있다.²¹⁾

통상조치 측면에서, 기후변화 정책의 대상 범위를 대외 교역으로 확장한 탄소국경조정이 EU CBAM을 시작으로 제도화 단계에 있다. 폰데 라이언 EU 집행위원장은 2019년 취임 직후부터 그린딜을 통해 2050년 기후중립 목표를 선언하고 역내 탄소규제를 강화해왔다. 이에 국가 간의 규제 격차로 인한 탄소누출 우려가 제기되었고 수입상품에 대한 탄소국경조정(CBAM) 도입으로 이러한 반발을 돌파하려는 것이다. 금년 10월부터 CBAM을 시범 운영하고 2026년 본격 시행할 예정이다. 미국도 2020년 대선 당시 바이든 후보가 선거공약으로 2050년 청정에너지 전환 및 넷 제로 달성을 제시하였고, 탄소배출 감축 의무를 다하지 않는 국가로부터 수입되는 상품에 탄소조정세(carbon border fee) 도입을 언급한 바 있다. 타이 美무역대표(USTR)도 WTO 체제가 기후변화를 포함한 환경적 요구를 반영하는 방향으로 개혁되어야 한다는 의견이다. 이러한 배경 하에, 지난해 G7 정상회의에서 ‘기후클럽(climate club)’을 논의하기 시작하였고 금년 하반기 정식 출범을 준비 중에 있다. 미국과 EU의 정치적 이해관계가 맞물리는 방식으로 주요국이 참여하는 선도국 클럽을 결성하여 국제 탄소가격을 도입하고 미참여국과의 교역에도 일정한 의무를 부과하여 탄소 감축을 압박하는 국제협상 레버리지로 활용할 것으로 전망된다.²²⁾

국제규범에 있어, 통상에 기후변화와 공급망을 연계한 새로운 형태의 친환경 통상질서가 시도되고 있다. 일례로, 2021년 미국과 EU는 ‘지속가능한 철강·알루미늄 글로벌 협정(Global Arrangement on Sustainable Steel and Aluminum)’ 협상을 개시하여, 글로벌 공급과잉을 유발하는 비시장 관행을 제한하면서 탈탄소화를 지지하는 형태의 새로운 규범을 협상 중이다.

21) 대한민국 정책브리핑, “2050 탄소중립”, 2021.11.8.; IPCC, *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, WMO & UNEP

22) 김호철 (2021), 전계논문: European Commission, Keynote speech by President von der Leyen at the World Economic Forum, 16 September 2020; The Biden Plan for a Clean Energy Revolution and Environment Justice, available at <https://joebiden.com/climate-plan>; USTR press release, “Remarks from Ambassador Katherine Tai on Trade Policy, the Environment and Climate Change”, 04/15/2021; W. Nordhaus, “Climate Clubs: Overcoming Free-riding in International Climate Policy”, *American Economic Review* 2015, 105(4) & “The Climate Club: How to Fix a Failing Global Effort”, *Foreign Affairs* 99(3), May/June 2020.

아직 공개된 사항은 없지만, 환경친화적 철강 생산국 간의 교역을 촉진하는 국제 컨소시움을 구성하여 중국 등 환경침해 방식으로 생산된 철강에 대해서는 수입관세를 부과하고, 글로벌 과잉생산 금지와 국영기업 활동 제한을 포함할 것으로 보인다.²³⁾ 인도태평양 경제프레임워크(IPEF) 협상에서도 청정경제(Pillar 3: Clean Economy)가 포함되었으며, 기후위기 대응과 탄소중립 달성을 위한 역내 협력방안으로 에너지 안보 및 전환, 우선부문의 온실가스 감축, 토양·수자원·해양 지속가능 해법, 온실가스 제거 혁신기술, 청정경제 전환 인센티브 등에 대한 규범화를 논의하고 있다.²⁴⁾

기업활동 차원에서, ESG 활동에 대한 투자가 증가하고 사회적 가치와 경제성장을 동시에 추구하는 지속가능성(sustainability)이 주목받고 있다. ESG는 환경(E), 사회(S), 지배구조(G)의 약자이며, ESG 경영이란 주주를 포함한 소비자, 근로자, 지역사회 등 이해관계자 편익 증진을 목적으로 하는 기업의 경영방침으로 재무실적 향상과 사회적 가치 창출을 함께 추구하는 것이다. 이와 관련, 2006년 뉴욕에서 책임투자원칙(Principles for Responsible Investment)이 출범한 이래 기업의 ESG 활동에 대한 투자라는 개념이 부상하였고 2009년 국민연금공단이 책임투자원칙에 서명하면서 우리나라에도 대기업 위주로 ESG 경영이 확산되는 추세에 있다. MSCI 설문조사에 따르면 밀레니얼 자산가 중 95%는 ESG 투자에 관심을 표명하였고, 블룸버그는 주식과 채권을 합하여 ESG 투자가 2025년에 53조 달러에 이를 것으로 전망하였다.²⁵⁾

한편 공급망 측면에서도, 각국의 인권, 환경 기준이 강화되고 있다. 미국은 2021.12월 위구르 강제노동방지법(UFLPA)을 발효시켜 중국 신장 자치구에서 생산되어 강제노동 연루가 추정되는 면화, 토마토, 폴리실리콘, 알루미늄 제품 등 수입을 제한하고 있다.²⁶⁾ 유럽 주요국도 기업 공급망 실사법을 도입하여 제품 및 서비스 생산 과정에서 발생하는 인권 등에서의 부정적 영향을 조사하고 필요한 조치를 취하도록 제도화하고 있으며, 2022.2월 EU 차원에서 기업 지속가능성

23) The White House, "FACT SHEET: The United States and European Union To Negotiate World's First Carbon-Based Sectoral Arrangement on Steel and Aluminum Trade", October 31, 2021; The New York Times, "U.S. Proposes Green Steel Club That Would Levy Tariffs On Outliers: A concept paper sent to the European Union suggests a new trade approach to tax metal made with higher carbon emissions in countries like China", December 7, 2022

24) Ministerial Statement for Pillar 3 of the Indo-Pacific Economic Framework for Prosperity, September 9, 2022; Benson, E. (2022), "The Indo-Pacific Economy Framework for Prosperity: Recommendations for Delivering a Decarbonization Agenda", CSIS

25) 김용·김한민·조재한·최민철 (2022), *기업 ESG 경영 확대 속 산업정책 과제와 시사점 연구*, KIET 연구보고서 2022-15; Bloomberg Intelligence (2021), "ESG Assets May Hit \$53 Trillion a Third of Global AUM", February 23, 2021

26) Uyghur Forced Labor Prevention Act: 지정된 지역에서 조달 또는 생산된 물품에 대해서는 강제노동에 연루되었다는 합리적 추정(rebuttable presumption)이 발생하며, 해당 기업이 그렇지 않음을 입증해야 한다; 2023.3월 현재까지 총 3, 237건의 수입선적이 미국 국경에서 억류되고 그 중 427건은 수입 거부되었다.

실사법(EU Corporate Sustainability Due Diligence Direction)을 발표하였다. 이에 따라, 적용대상인 국내외 대기업들이 협력업체에 ESG 지침 준수와 실사를 요구하는 사례가 늘고 있고, 실사 결과에 따라 고객사와 거래가 중단될 수도 있기에 기업들의 관심이 높다.²⁷⁾

4. 정부 주도 첨단제조 육성

정부가 주도하는 ‘산업정책(industrial policy)’이 재조명되고 있다. 1970년대 이래 신자유주의적 세계화 시기에는 정부의 개입이 시장을 교란하고 경제 효율성을 저해하는 반시장적 조치로 여겨졌으나, 2000년대 중반부터 주류 경제학에서 산업정책을 정당화하기 시작하고 글로벌 금융위기 이후에는 각국이 제조업 일자리의 중요성을 재인식하면서 미국과 EU를 중심으로 첨단 제조, 인더스트리 4.0 등의 산업정책을 본격화하였다.²⁸⁾ 특히 최근의 산업 트렌드는 정부의 적극적 개입을 정당화하고 있다. 디지털과 그린 이증전환, 미-중 경쟁에 따른 기술의 안보화, 공급망 불안요인 상시화 등은 정부가 시장 환경을 조성하는 소극적 역할에 머물러서는 대응하기 어렵고 민간에 변화의 방향을 제시하고 각종 지원 역량을 집중하는 적극적인 개입을 요구한다. 이제 산업정책의 정당성 여부는 논외가 되었고, 각국은 그 수준과 방식(how)에 초점을 맞추고 있다.²⁹⁾

자국 내 제조업 유치를 위한 전략경쟁이 치열하다. 미국은 핵심기술이나 공급망을 자국 또는 북미 인접국에 두도록 하여 자국의 첨단제조 기술혁신 생태계를 확보하려는 리쇼어링 정책을 강하게 펴고 있다. 글로벌 지경학의 경제적 책략이 기존의 경제제재를 넘어 산업정책으로 확대된 것이라고 할 수 있다.³⁰⁾ 대외 전략에 있어서도 이러한 국내 정책의 연장선으로 이해하며, 자유민주 우방국 간의 기술·안보 블록을 구축함으로써 글로벌 분업체계 효율성은 유지하면서 미국의 대중국 지정학 우위를 확보하려는 접근을 취하고 있다. 일례로, 인플레이션 감축법(Inflation Reduction Act)의 경우, 바이든 대통령의 ‘미국의 재건(Build Back Better)’ 공약에서 출발하

27) 임소영 (2022), “EU 주요국의 공급망 ESG 실사제도 현황 및 시사점”, KIET 산업경제; 대한상공회의소 보도자료, “수출장벽? ESG 공급망 실사법” <올해 ESG 현안>, 2023.2.6
 28) D. Rodrik (2009), “Industrial Policy: Don’t Ask Why, Ask How”, *Middle East Development Journal* 1:1; J. Stiglitz (2017), “Industrial Policy, Learning, and Development”, in J. Page and F. Tarp eds., *The Practice of Industrial Policy: Government-Business Coordination in Africa and East Asia*, Oxford University Press; A. Andreoni and H. Chang (2019), “The Political Economy of Industrial Policy: Structural Interdependencies, Policy Alignment and Conflict Management”, *Structural Change and Economic Dynamics* Vol.48
 29) 김석관 (2022), “산업정책의 부활”, *경제·인문사회연구회 글로벌 이슈 브리프* Vol.02
 30) Aggarwal, V. and Reddie, A. (2020), “New Economic Statecraft: Industrial Policy in an Era of Strategic Competition”, *Issues & Studies* 56:2

여 에너지 안보 및 기후변화 대응을 위한 인프라 투자를 핵심 내용으로 한다. 이때 자국 청정기술 혁신역량을 확충하고 일자리를 창출하는데 정책 우선순위를 두고 있으므로 전기차 구매 지원금 사례에서 보듯이 외국 기업에 불리한 차별적 조치도 개의치 않는다.³¹⁾ EU도 그린딜 산업계획, 탄소중립산업법 및 핵심원자재법을 내놓으며 친환경 기술과 그에 필요한 필수 원자재 공급 기반을 확보하려는 전략 경쟁에 적극 나서고 있다.³²⁾

산업정책의 핵심에 ‘첨단제조(advanced manufacturing)’가 있다. 미국은 금융위기 이후 국내 제조 경쟁력과 일자리 확보의 중요성을 인식하고 첨단제조 이니셔티브를 추진해왔다. 2011년 ‘첨단제조 파트너십(AMP)’을 발표하여 제조의 4차 산업혁명, 부가가치 확대, 일자리 창출 등을 내세웠다. 2014년 ‘미국 제조혁신 활성화 법안(RAMI Act)’³³⁾을 통과시켰고, 제조혁신 연구시설과 정부기관을 연결한 미국제조센터를 구축하여 반도체, 소재, 에너지·환경, 디지털, 바이오 등 기술혁신을 지원하고 있다.³⁴⁾ 중국은 제조 강국 도약을 목표로 2015년 ‘중국제조 2025’를 발표하여 10대 첨단제조 분야에 대한 지원을 확대하였고, 제조업과 디지털 기술을 결합한 ‘인터넷 플러스’ 정책도 실시하였다. 2016년에는 ‘13.5 전략적 신흥산업 발전규획’에서 디지털 제조 및 서비스로 정책지원 범위를 확장하였고, 2020년 ‘14.5 전략적 신흥산업 발전규획’에서는 9대 기간산업과 6개 미래 선도산업, 디지털 경제 7대 중점산업을 편성하였다. 이에 힘입어 중국의 제조업 경쟁력 지수는 우리나라를 추월하여 격차를 확대하고 있다.³⁵⁾ 우리 정부도 기술경쟁 대응을 위해 초격차 기술확보에 국가 역량을 집중하고자 ‘국가 전략기술 육성방안’(22.10)을 수립하였다. 경제·외교·안보 주도권 확보가 요구되는 국가전략기술을 선정하고, 선택·집중할 50개 세부 중점기술까지 도출하였다. 12대 국가전략기술에는 인공지능, 첨단 바이오, 반도체·디스플레이, 이차전지, 수소, 첨단로봇·제조, 양자, 사이버보안, 차세대 통신, 우주항공·해양, 차세대 원자력, 첨단 모빌리티 등이 포함되었다.

한편, 미래 제조의 핵심 경쟁력으로 ‘인공지능(AI)’이 떠오르고 있다. AI는 인간의 지적 능력을 컴퓨터 또는 컴퓨터로 제어되는 로봇으로 구현하는 기술을 통칭한다. AI는 고도화된 알고리즘으로, 패턴 인식, 자연어 처리, 컴퓨터 비전, 로봇공학 등에 응용되고 있다. 과거에는 어떤 문제를

31) Krugman, P., “Why America Is Getting Tough on Trade”, The New York Times, 12 Dec 2022

32) European Commission, “Net-Zero Industry Act: Making the EU the home of clean technologies manufacturing and green jobs”, 16 March 2023; “Critical Raw Materials: ensuring secure and sustainable supply chains for EU’s green and digital future”, 16 March 2023

33) The Revitalize American Manufacturing and Innovation Act of 2014

34) Manufacturing USA homepage, www.manufacturingusa.com

35) 최원석 외 (2021), 중국의 디지털 전환 전략과 시사점: 5G 네트워크 구축과 데이터 경제 육성을 중심으로, KIEP 연구보고서 21-12

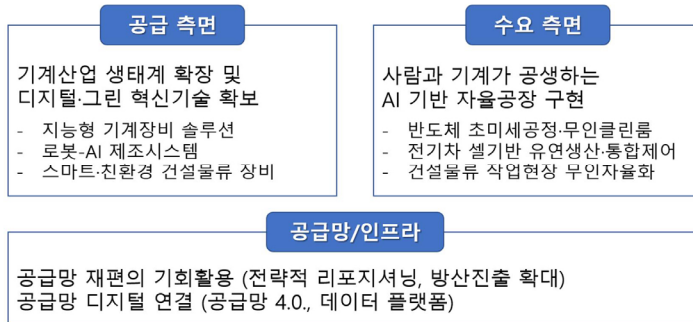
풀기 위해 사람이 설정한 규칙에 따라 작동하는 방식이었으나, 최근의 머신러닝 및 딥러닝 알고리즘은 받은 데이터와 문제의 정답 간의 관계를 컴퓨터가 스스로 학습하는 방식이다. 제조 현장에서도 불량품 판별, 물류 자율제어 및 최적화, 데이터 분석, 예지보전 등에 AI 기술을 활용하고 있다. 중국은 강력한 정부 지원과 다양한 테크기업 출현으로 AI 특허 1위국으로 도약하였고 디지털 실크로드와 연계하여 중국식 기술표준을 확장하고 있다. 미국도 2019년 인공지능국가안보위원회(NSCAI) 보고서를 토대로 AI 분야에서 중국의 추격을 견제하기 위한 강종 조치를 취하고 있다. 특히 수출통제 관련, 안면인식·음성인식 기업에서 슈퍼컴퓨팅 인프라 기업에 이르기까지 제재대상을 확대하고, 틱톡, 텐센트, 위챗페이 등 AI 플랫폼 기업도 포함하였다.³⁶⁾ 우리 정부도 디지털 전환의 핵심 수단으로 AI를 주목하고 지난 1월 '산업 AI 내재화 전략'을 발표하여 AI를 산업에 직접 적용하는 데에 초점을 두고 있다. 2030년까지 현재 AI 활용 기업이 1% 수준인 것을 30% 수준으로 확대하고, 글로벌 산업 AI 공급기업 100개를 육성하여 공급산업의 경쟁력을 강화하겠다는 것을 목표로 한다.

III. 기계산업이 당면한 도전과제

우리 기계산업은 탄탄한 전방산업과 기술력에 힘입어 세계 8위권에 올랐으나, 국내 시장규모가 협소하고 핵심 원천기술에서 선두그룹에 못 미치고 있어 성장의 한계에 봉착해있다. 코로나 19로 인한 국경 봉쇄로 시작된 우리 기계업종의 대중국 수출 부진은 최근 더욱 심화되어, 경쟁력 확보와 수출 다변화라는 숙제를 안겨 주었다. 그럼에도 불구하고 품목이 다양하고 업계 목소리가 흩어지다 보니 산업적 중요성에도 충분히 주목받지 못하고 있다. 산업정책 틀에 따라 기계산업의 공급 측면, 수요 측면, 공급망·인프라 측면을 나누고, 앞에서 살펴본 글로벌 경쟁 환경의 변화를 대입하여 우리 기계산업이 당면한 도전과제와 바람직한 미래상을 설정해 보고자 한다. 일반적인 정책에서는 산업기술 개발, 수요시장 확대, 인력 양성, 상생협력 등 기업 지원방안을 주로 과제로 검토하겠지만, 여기에서는 보다 거시적이고 근본적인 관점에서 기술경쟁 시대 전략적 자율성 확보와 미래 경쟁력 창출에 초점을 맞추어, 공급 측면의 기계산업 생태계 확장 및 디지털·그린 혁신기술 확보, 수요 측면의 사람과 기계가 공존하는 AI 기반 자율공장 확산, 공급망·인프라 측면에서 기업 간 디지털 데이터 연결과 협업체제 구축을 기계산업이 풀어야 할 필수적인 도전과제로 제시해 보았다.

36) 조은교 외(2021), 미·중 기술패권 경쟁과 우리의 대응전략: 반도체·인공지능을 중심으로, KIET 연구보고서 2021-13

[그림 2] 한국 기계산업의 도전과제



1. 기계산업 생태계 확장 및 디지털·그린 혁신기술 확보

기계산업의 공급 측면에서 기계산업 정체성에 대한 정의가 중요해졌다. AI, 디지털트윈, 고밀도통신(5G) 기반 원격제어 등이 제품과 서비스의 범위를 확장시키면서, 기계산업 생태계를 구성하는 구성원이 다양해졌고, 이들간 다양한 조합의 협업모델이 비즈니스모델로 생성되면서 기계산업과 ICT산업의 범위가 모호해지고, 융합된 조합을 진화된 기계산업으로 받아들이고 있다. 또한 생산성 향상과 환경 보호를 동시에 달성하는 디지털·그린 제조 혁신이 한창이다. 기존 제조공정은 대량생산과 경제성을 중시하였으나 미래에는 디지털 기술을 활용하여 환경을 보호하면서도 생산성과 효율성을 높이려고 한다. 우리는 미래 혁신의 핵심기술을 선제적으로 확보하여 글로벌 기술경쟁에서 전략적 자율성을 가지는 것이 중요하다. 일례로, 센서와 연결된 IoT 장치를 통해 데이터를 수집하고 빅데이터 분석과 AI 기술을 활용하여 제조 공정을 최적화하고 에너지 효율을 높일 수 있다. 지능형 로봇으로 인간이 수행하는 반복적이고 위험한 작업을 대체하여 노동력 부담을 줄이고 제조 과정에서 발생하는 오염물질과 에너지 소비를 최소화할 수 있다. 3D 프린팅 기술로 부품을 제조하면 재료 낭비를 줄이고 현지 생산으로 제품의 국제 이동에 따른 탄소배출도 줄일 수 있다.³⁷⁾

공작기계의 경우, 기계를 만드는 기계로서 제조 공정의 디지털 전환을 견인하는 핵심 분야이다. 일본 Mazak과 일·독 합작기업 DMG MORI가 첨단 공작기계 시장을 선도하고 일본 Fanuc이 수치제어기(CNC) 시장을 장악한 가운데, 화천기계, DN솔루션즈, 현대위아 등 우리 기업들

37) Bartekova, E. and Borkey, P. (2022), "Digitalisation for the transition to a resource efficient and circular economy", OECD Environment Working Paper No.192; McKinsey (2022), "Transforming advanced manufacturing through Industry 4.0", June 2022; WEF (2018), "Driving the Sustainability of Production Systems with Fourth Industrial Revolution Innovation", in collaboration with Accenture

이 제조기술을 기반으로 뒤쫓고 있다. 글로벌 선도 기업은 자사 공작기계에 IoT 자동화 솔루션을 결합한 패키지 상품을 내놓으며 제조 공정의 디지털 전환에 앞서가고 있다. 우리 기업도 이제는 기존 제품 중심의 사고에서 벗어나 제조 장비와 디지털 솔루션을 융합하여 새로운 가치를 창출해야 한다. 일례로, 절삭기계에 디지털트윈과 AI를 적용하면 전력소비를 최적화하고 오염물질인 절삭유의 공급량 능동제어가 가능할 것이다.

제조로봇의 경우, 과거에는 컨베이어 벨트에서 단순 작업을 반복하는 다관절 로봇 중심이었으나, 지금은 인간협업, 이송장치, 머신텐딩 등으로 광범위하게 활용되며 디지털 솔루션과 결합하여 시스템화되고 있다. 특히 로봇과 장비를 연결한 ‘로봇-장비 제조시스템’은 제조 공정의 지능화에 필수적이다. 독일 지멘스는 프라운호퍼와 협력하여 디지털트윈, AI, 클라우드를 적용한 제조시스템 플랫폼을 고도화하고 있고, 일본은 기계, 로봇, 계측기기 등에서 앞선 기술을 활용하여 개별 장비에 내장 가능한 엣지 기술을 적용한 지능화를 추진하고 있으며, 미국은 NIST를 중심으로 GE 등 선도업체들이 IIC 컨소시엄을 구성하여 IoT 산업플랫폼을 구축하고 있다. 우리나라는 제조업 로봇밀도 1위이지만 직교로봇이 대다수라서 혁신 경쟁력과는 거리가 있으며, 제조로봇 수요시장인 완성업체 공장이 야스가와, 가와사키 등 일본 로봇업체와 오랜 거래와 신뢰를 구축하고 있어 국내 업체가 신규 진입하기 어려운 구조이다. 새롭게 성장하는 자율이동물류로봇에서도 기술력이 있더라도 저가 경쟁력과 대량 생산을 앞세운 중국 업체와의 경쟁이 힘에 겨운 상황이다.

건설기계·농기계의 경우, 디지털 기술혁신과 친환경 에너지 전환이 가져올 작업현장 변화의 중심에 있다. 미국 존디어는 농기계에 위치정보와 IoT, 빅데이터 등 첨단기술을 접목하여 다양한 고객 가치를 창출하였고, 지금은 친환경 자율주행 기술개발을 선도하고 있다. 미국 캐터필러는 건설 중장비 관리, 생산성 유지, 안전, 지속가능성에서 디지털 기술로 원격 모니터링을 제공하는 Cat 커넥트 서비스를 선보였다. 일본 고마츠는 위성안테나와 각종 센서로 건설기계의 움직임을 실시간으로 파악하여 생산성을 높이는 MaxiFleet 등을 선보였고, 건설현장 작업에 필요한 건설장비와 통합관제 솔루션을 패키지로 제공하는 사업모델을 추진 중이다. 국내에도 중대재해법 시행, 탄소중립 요구로 작업현장의 변화 요구가 상당하고, HD현대인프라코어, HD현대건설기계 등은 디지털·그린 이종전환에 대응하여 건설중장비 자율주행 상용화와 에너지 전환 기술에 투자하고 사이트 클라우드 등 혁신제품 개발과 글로벌 시장 공략을 추진하고 있다. 하지만 아쉽게도 우리 건설기계는 신기술을 개발하더라도 국토부 수급조절이라는 낡은 규제에 얽매어 국내 판매가 제약되고 자율주행 장비의 등록관리도 미흡하다.

2. 사람과 기계가 공생하는 AI 기반 자율공장 구현

기계산업의 수요 측면에서 반도체, 자동차 등 제조공장이 자동화를 넘어 지능화·자율화로 진화되고 있다. 우리에게 익숙한 용어인 ‘스마트공장’은 독일 엔지니어 Zühlke 교수가 처음 개념화하면서 “모든 공정, 생산품, 생산요소를 디지털화하고 상호 네트워킹하는 공장”이라고 정의하였고, 4차 산업혁명 기술을 적용하여 기존 생산방식의 한계를 극복하고 새로운 성장동력을 창출하려는 인터스트리 4.0 전략의 핵심이 되었다. 그런데 국내에서 이를 정책화하는 과정에서 인간의 노동력을 기계로 대체하는 생산 자동화와 전사적 자원관리(ERP) 등 IT관리기법 보급에 치중하다보니, 정작 전략의 핵심인 IoT 초연결, 빅데이터와 AI 분석, 가상·증강현실 등 사이버-물리 시스템(CPS) 구현에는 크게 못미치는 상황이 되었다. 공장이라는 ‘3D 공간’ 내 사람과 오브젝트(공정, 생산품, 생산요소 등)를 디지털화하고 상호 네트워킹(의사소통, 의사결정, 액션)한다는 것은 결국 기계가 이해하고 행동할 수 있는 공간을 의미한다. 다양한 센서와 고해상도맵(HDM)을 갖춘 자율주행차가 운전행위에 역할변화를 주듯, IoT·비전과 디지털트윈(3D맵)을 갖춘 공장은 엔지니어링 업무의 역할을 변화시킬 것인바, 미래 수요자들이 기계산업에 무엇을 요구할지 예측할 수 있다. 본고는 스마트공장의 발전 단계를 전산화, 자동화, 지능화, 자율화의 4단계로 구분하고, 혁신기술로 무인 자율화된 최종 단계 스마트공장을 ‘자율공장 (autonomous factory)’으로 통칭하고자 한다.³⁸⁾

반도체의 경우 생산성 및 수율 향상을 위해 초미세 공정 개발과 함께 무인 클린룸 조성이 중요하다. 이에 웨이퍼 제조 및 첨단 패키징 공정이 AI와 디지털트윈, 자율이송장치를 활용하여 무인화되고 있다. 반도체 장비 업체도 품질 확보 및 성능 개선을 위해 다양한 공정 모니터링 센서를 내장하고 검사 장비와 데이터 연계, 머신러닝 공정분석이 가능한 스마트 장비로 개발하고 있다. 삼성전자 평택공장 생산라인이 대표적인 사례이다. 생산 공정의 무인 자율화를 통해 방진복을 착용하고 클린룸에서 24시간 상주하는 오퍼레이터가 사라졌다. 각 공정은 자동화 기계장비와 협동로봇(co-bot)을 통해 자율적으로 수행되고, 한차례 가공을 마친 실리콘 웨이퍼는 천장에 달린 무인이송장치(OHT)를 통해 다른 공정으로 옮겨진다. 삼성전자는 AI와 디지털트윈 기술을 더욱 고도화하여 2030년까지 완전한 ‘무인공장’을 실현하겠다고 밝혔다.³⁹⁾

38) Chakrabarti, G. (2021), “The autonomous plant: Entering a new digital era”, McKinsey & Company; Zühlke, D. (2010), “SmartFactory—Towards a factory-of-things”, Annual Reviews in Control 34(1); 박준희 (2022), 스마트 팩토리: 미래 제조 혁신, 울곡출판사

39) 삼성뉴스룸, “[포토에세이 1편] 첨단기술 진원지, 삼성의 반도체 생산기지를 들여다본다”, 2018.5.31; 한경닷컴, “[단독] ‘제조업 인력팽창 시대 지났다’... 삼성, 스마트공장으로 ‘미래준비’”, 2022.8.1.; 한경닷컴, “삼성전자 무인공장 도입 소식에 ‘로봇주’ 급등”, 2022.8.2

자동차의 경우 시장 트렌드가 내연기관차에서 자율주행, 공유경제, 친환경차로 전환되면서 사업전략이 완성차 조립생산에서 고객맞춤형 유연생산과 스마트 모빌리티 솔루션으로 변화하고 이를 뒷받침할 ‘자율공장’이 추진되고 있다. 현대차는 고객 주문에 따른 목적기반 전기차(PBV)를 생산할 모델공장으로 셀(cell) 단위 유연작업, 통합물류 솔루션, 디지털트윈 등 혁신기술을 적용한 싱가포르 글로벌 혁신센터(HMGICS)를 건립하였다. 이와 관련, 현대오토에버가 가상화, 유연화, 지능화, 동기화를 핵심 요소로 하는 SFaaS 제조혁신 지능형 플랫폼을 맡고, 현대위아는 공정자동화 경험을 바탕으로 협동로봇, AMR 등을 활용한 로봇제어 시스템과 제조·물류 솔루션을 구축하였다. 또한 현대차는 디지털 데이터와 ICT 기술을 결합하여 자동화를 구현한 제조 플랫폼으로 ‘이포레스트(E-FOREST)’를 공개하여, 조립·물류·검사 자동화(Auto-FLEX), AI 기반의 자율적인 제어시스템, 유해 작업환경의 자동화 및 co-bot 활용 등 사람-자연-기술의 유기적인 연결을 지향하고 있다. 자동차 부품 분야에서도 센싱 카메라, 라이더 등 자율주행 핵심부품과 배터리 등 전기차 부품에 대한 제조시설 투자가 증가 추세이다.⁴⁰⁾ 이에 더하여, 테슬라는 로봇을 활용한 생산성 무한 확장을 미래 제조의 승부처이자 신시장으로 보고, 전기차 생산에 투입할 2천만 원대 휴머노이드 ‘옵티머스’ 개발을 선언하였으며, 세계 최강 연산능력을 가진 슈퍼컴 ‘도조’로 기계학습 시키면서 로봇과 AI의 결합을 통한 물리 세계의 무인화 혁명을 시도하고 있다.⁴¹⁾

디지털트윈을 통해 현실공장과 실시간으로 연결한 가상공장으로 ‘메타팩토리’라는 용어가 등장하기도 한다. 가상공장에서 문제를 미리 해결하여 실제 공장에 적용할 수 있고, 실제 공장에서 발생한 문제는 가상공장에 동일한 환경을 조성해 해결책을 발견할 수 있다. 현실에서 실험하기에 비용이 많이 들거나 위험한 경우 가상공장에서 진행할 수 있다. 생산 전 가상 시뮬레이션을 거쳐 실제 공장에 적용하고 생산 중에도 발생하는 문제를 실시간 확인하여 해결할 수 있다. 가상 공간을 활용하면 공급-수요기업 간 원활한 거래 및 공급량 관리도 가능해진다. 예를 들어 수요기업 가상공장 제조 공정에서 요구되는 수요기업 부품 공급량, 시기 등을 사전에 파악하여 공급기업의 생산 시기, 생산량 등이 결정되어 수요-공급기업 간 물량조절, 불필요한 재고량을 최소화할 수 있다. 과거에도 3D 시뮬레이션은 존재했지만, 디지털트윈이 등장하며 진일보한 것은 공간에 존재하는 오브젝트의 위치와 속성에 대한 센싱정보를 기계학습으로 분석해 도출하는 물리 모델

40) 현대차 뉴스, “4대 미래사업 전략 및 수정 (2025 전략) 공개”, 2020.12.11

41) 한경닷컴, “테슬라, 인간형 로봇 ‘옵티머스’ 공개... ”2만달러 이하 판매””, 2022.10.2.; 조선경제, “테슬라 로봇이 하려는 일, 턱밑까지 다가온 로봇의 시대”, 2022.11.21.; 삼프로TV 경제의 신과함께 211화, “테슬라는 이미 로봇의 시대로 넘어가고 있습니다”, f.하이투자증권 고태봉 센터장, 2022.8.15

(physics model)의 존재이다. 물리 모델의 학습수준이 고도화될수록 자율공장 수준이 높아진다. 현대차는 3D 공간(공장)에 존재하는 사람과 오브젝트의 상호작용을 추적하고 분석할 수 있는 유니티(3D OS)를 통해 HMGICS 스마트공장을 디지털 세계인 메타버스에 그대로 옮긴 메타팩토리를 도입하고 고도화하고 있다.⁴²⁾ 유니티 등 3D OS를 활용해 공간에 존재하는 오브젝트의 3D 위치와 상태정보를 시계열로 축적한 ‘디지털트윈 데이터를 AI로 분석’(디지털트윈AI)함으로써, 지속적으로 자율공장의 수준을 높여가는 것이다.

그런데, 세계 최첨단 제조공장을 보유한 우리가 ‘자율공장’으로 전환하는데 필요한 핵심기술을 상당 부분 해외에 의존하고 있다. 수요 대기업 입장에서 글로벌 선도기업의 검증된 제조 솔루션을 선호하는 경향이 있고, 중소기업이 대다수인 국내 기계업계도 자율공장에 필요한 높은 기술 수준을 맞추기 벅거운 모습이다. 자동차 산업이 내연기관차에서 전기차로 전환되면서 부품과 장비에서 상당한 변화가 있는 것처럼, 디지털 기술로 자율공장이 산업 전반으로 확산하면 기계산업의 근간이 흔들릴 것이다. 우리가 주조, 성형, 용접 등에서 뛰어난 제조역량을 가지고 있다고 하더라도 모든 장비가 연결되고 실시간 원격 제어되는 미래 제조회장에서도 경쟁력을 가진다는 보장은 없다. 미래 자율공장에 맞추어 우리 기계산업의 경쟁력 창출을 위한 비전과 정책을 재설계해야 한다. 아쉽게도 기존의 스마트공장 정책은 제조의 지능형 혁신을 끌어내기 어려워 보인다. 정책 대상이 중소기업으로 한정되어 업계 전반의 인식 전환을 끌어내기 어렵고 자동화 설비 보급 지원이라는 틀에서 벗어나지 못하고 있다. 우리 제조강점이 세계적 수준의 전방산업에 있고 이들 기업이 디지털·그린 전환의 혁신기술 적용을 선도하고 있는 만큼, 수요-공급업체 간 소통과 협업으로 우리의 강점을 충분히 살린 ‘한국형 자율공장’을 만들어가야 한다.

3. 공급망 재편의 활용 및 고도화

기계산업의 동북아 지형을 보면, 일본은 소재·부품, 반도체 장비, 산업용 로봇 등에서 선도적인 기술력을 보유하면서 고객 맞춤형 제조와 고부가가치 생산을 선점하고 있고, 중국은 세계의 공장으로 기계산업 최대 수요시장이지만 선진 기술의 빠른 습득과 강력한 저가 경쟁력을 바탕으로 이제는 세계적 기계 강국으로 성장해있다. 과거 일본이 핵심 소재·부품·장비를 제공하고 한국은 고부가 제품을 주로 생산하며 중국이 저가 제품을 담당하던 동북아 분업구조에서 우리

42) 김호경, “[메타버스와 미래산업] 게임체인저, 애플 MR과 메타팩토리에 주목하라”, 파이낸셜뉴스 외부칼럼, 2023.4.15.; 정홍범 (2022), “메타팩토리 구축을 통한 제조혁신”, 로봇 미래전략 컨퍼런스, 2022.3.22., 한경닷컴, “해외공장 문제 생겨도 국내서 ‘뚝딱’... 현대차, 메타버스공장 만든다 [CES 2022]”, 2022.1.7

기계산업은 중국 수요와 안정적 공급망에 힘입어 특수를 누려왔다. 그런데 중국이 강력한 경쟁국으로 부상하고 일본 수출규제와 중국 코로나 봉쇄로 공급망이 흔들리면서 동북아 분업체계가 붕괴하고 수평적 경쟁과 공급망 재편의 격전지가 된 것이다. 특히 중국이 공작기계, 펌프·압축기, 엔진부품, 섬유기계 등에서 급격한 성장세를 보이면서 2020년에 세계 최대 수출국으로 올라섬에 따라 한·중 및 글로벌 교역에서 우리의 입지가 위협받고 있다.

지금의 난국을 타개하려면 우리 기계산업의 전략적 리포지셔닝이 시급하다. 우리가 중간제조 중심의 공급망 구조에 갇히면 선진국과 신흥국 사이에서 끼일 우려가 있다. 제조 이전(후방), 제조 공정, 제조 이후(전방) 단계로 구분해보면, 전방과 후방 영역의 부가가치는 높지만 중간 단계의 부가가치는 낮은 스마일 커브를 보인다. 글로벌 공급망 재편 시기를 우리 공급망의 전략적 자율성을 확대하는 기회로 활용하여, 디지털 기술로 중간 제조 단계의 부가가치를 높이는 한편 전·후방 공정을 연계한 통합관리에서 새로운 가치 영역을 창출해야 한다. 우리가 역내 공급망의 필수적인 부문에서 초격차 기술로 대체불가성을 확보할 수 있다면 이러한 전략자산 비대칭성을 기반으로 주변국과 유리한 협력관계를 주도할 수 있을 것이다.⁴³⁾ 한국은 기계산업을 비롯한 다양한 제조업들이 골고루 발달해 왔고, 이들의 밸류체인은 공통적으로 뿌리산업 인프라를 활용한다. 주조와 금형, 가공, 용접, 특수코팅, 사출, 프레스 등 숙련된 엔지니어에게 체화된 제조역량이 디지털 라이브러리화될 수 있다면 전세계 어디에서도 찾기 어려운 ‘대체불가’한 K-제조컨텐츠가 될 것이다. 가장 아날로그적인 것이 디지털화 될 때 가지는 잠재력에 눈을 돌려야 한다.

기계산업은 반도체, 자동차, 배터리 등 첨단·주력산업 공급망에서 필수적인 부품과 장비를 담당하므로, 전방산업 혁신공장의 부품·장비·솔루션 수요를 면밀하게 파악하고 수요-공급업체 협업 하에 우리가 확보해야 할 핵심 전략기술을 정해야 한다. 일례로 반도체 무인공장에서 천장 레일을 따라 웨이퍼를 옮기는 이송장치(OHT)의 경우 일본 다이후쿠가 글로벌 시장을 장악하였으나 몇 년 전 국산 장비가 개발되었으며 이제는 우리의 AI 기술력으로 고도화해야 한다.⁴⁴⁾ 공작기계의 두뇌이자 디지털 시대 공정 초연결 및 지능화에 필수적인 CNC 기술을 내재화하는 것도 시급한 과제이다. 산업데이터 확보 및 보안의 중요성이 늘어가는 상황에서 제조 공정의 두뇌를 외국에 맡기는 것은 기술안보 측면에서 취약성이 크다.⁴⁵⁾ 스마트공장을 통합 제어하는

43) 정은미 (2022), “최근 글로벌 공급망 변화 추세와 대응 과제”, Global Issue Brief, 경제·인문사회연구회; 김계환 외 (2021), *경제패권경쟁시대 전략적 자율성을 위한 산업통상 전략*, KIET 연구보고서 2021-15

44) 아시아경제, “[피스앤칩스] 반도체 생산 자동화 돕는 ‘OHT’... 日 독주서 韓 제품 확대”, 2023.2.6

45) 전자신문, “산업부, 스마트 제어기(CNC) 국산화 추진... 기계산업도 日 넘는다”, 2020.6.21

운영기술(OT)·산업제어(ICS)도 독일 지멘스, 일본 미쓰비시 등이 장악하였고 그 중 일부는 CC-Link와 같이 자사 PLC와 통합 가능한 부품 및 장비 관련 폐쇄적 네트워크를 운영하고 있어 이를 극복할 방안이 필요하다.⁴⁶⁾ 또한, 우리가 보유한 기계산업 숙련공의 암묵지를 기반으로 고유의 핵심기술 역량을 창출하는 것도 가능할 것이다. 주조와 금형, 가공, 용접, 특수코팅, 사출, 프레스, 정밀가공 등 제조업 전반에 걸쳐 적용되는 기반 공정 기술에서 오랜 작업 경험으로 기능 인력에 체화된 제조역량이 이탈 또는 소멸하지 않도록 정책적으로 보호하고 이를 디지털 기술과 결합한 산업데이터로 축적한다면 우리만의 대체불가 경쟁력이 될 수 있다.⁴⁷⁾

기술·안보 권역화에 따른 글로벌 방위산업 공급망 재편도 주목해야 한다. 바이든 정부가 자국 방위산업 공급망을 점검한 결과, 방위산업 수요 규모가 작고 생산 난도가 높아 안정적 수익을 내기 어려워 미국 기업의 이탈이 가속화되고 공급망의 대중 의존도가 높아진 것으로 나타났다. 이에 미 국방부는 민군 협력을 통해 자국 제조역량을 회복하고, 한국 등 동맹국과의 협력을 강화하여 대중 의존도를 완화하려는 움직임을 보인다. 미국 방위산업의 제조역량이 강화될 경우 우리 방산업체의 부품 수출이 감소하고 우리가 도입하는 미국산 무기 가격이 상승하는 부작용도 우려된다. 하지만 미국의 공급망 재편을 한-미 양국 간 방산 협력을 강화하고 국내 공급망을 내실화하는 계기로 활용한다면 우리 기계산업이 도약하는 기회가 될 것이다.⁴⁸⁾

한편, 기계산업 공급망 전반의 디지털 혁신이 병행되어야 한다. 독일 제조기업은 인건비 상승, 에너지 비용 상승, 인프라 노후화, 숙련노동자 부족 등 위기를 극복하기 위해, 2010년대 초반부터 ‘인더스트리 4.0’을 내세워 생산성과 부가가치를 높이는 혁신을 추구해왔다. 이를 통해 지멘스, 보쉬 등은 4차 산업혁명 솔루션의 공급자로 사업모델을 전환하고, 컨티넨털, 슬릭, 인피니온, SAP 등은 센서 기술의 선두주자가 되었다. 기술과 노하우는 유럽 역내에 두면서 서비스 수출을 확장하는 사업전략을 펴고 있다. 기업의 공급망도 ‘원자재-생산-유통-소비’의 단선적인 구조에서 모든 과정의 정보가 실시간으로 연결되어 디지털 플랫폼을 중심으로 전 과정이 소통되고 제어 가능한 통합형 구조로 발전하고 있다. 이와 함께, EU 차원에서 유럽내 데이터 협업을 통한 디지털 라이브러리 축적과 그 거래시장을 기반으로 한 디지털 생태계 구축을 위한 민관 프로젝트로 ‘Gaia-X’ 등도 활발하게 진행 중이다.⁴⁹⁾

46) 권대현 (2022), “산업용 제어시스템 개발 및 적용 사례: LS 일렉트릭 사례”, 디지털 기반 제조서비스 컨퍼런스 발표자료
 47) 뉴시스, “산업부, 숙련공 ‘노하우’ 디지털화 추진... 5년간 30억 투입”, 2021.5.6
 48) 심순형, 김미정 (2022), “미국 방위산업 공급망조사 보고서의 주요 내용과 시사점”, i-KIET 산업경제이슈 제134호 2022-8
 49) 김호철 (2023), “산업의 디지털 전환, 글로벌 지정학과 통상협상 신의제”, 통상법률 제158호

IV. 첨단제조 지능형 혁신(AIX) 구상

한국은 제조기술, 제조관리, IT기술 기반에 강점이 있고, 대기업 주도의 수출산업과 수직계열화 구조를 갖추고 있다. 산업의 디지털 전환이 이제 시작하는 단계이므로, 우리는 해외 선진 기업의 모방 수준을 넘어 독자적인 전략을 갖고 일어서야 한다. 한국공학한림원은 우리가 제조업의 디지털 전환에서 정체되어 있고 개인정보 활용에도 한계가 상당하다고 진단하고, 제조업의 디지털 전환(DX)을 넘어 기존 하드웨어 중심에서 ‘제조기반 지식산업’으로 전환하는 ‘한국형 지능형 혁신(AIX)’을 국가 미래전략으로 주문하였다.⁵⁰⁾ 이에 따라, 필자도 우리 기계산업 미래가 ‘첨단제조 지능형 혁신’에 있다고 보며, 제조에 IoT, 빅데이터, AI 등을 결합한 미래형 ‘자율공장’을 우리가 선도하는 데 기계산업 정책의 초점을 맞춰야 한다고 생각한다. 미국의 첨단제조 파트너십(AMP), 독일의 인더스트리 4.0, 일본의 소사이어티 5.0, 중국의 전략적 신흥산업 발전 계획 등 주요국 정책사례도 동일한 맥락으로 이해된다. 이를 위해, 첨단기계 기술 초격차, 지능형 혁신 내재화, 공급망 데이터 플랫폼, 첨단제조 글로벌 진출의 4개 분야에서 10개 추진과제를 추려보았다.

[그림 3] 첨단제조 지능형 혁신(AIX) 구상(요약)

1. 첨단기계 기술 초격차	① 첨단제조 초격차 프로젝트 ② 자율로봇 초격차 프로젝트 ③ 디지털 신기술 사실상 표준 선도
2. 지능형 혁신 내재화	① 앵커기업 주도 AIX 성공사례 창출 ② 디지털트윈AI 기반 新제조서비스 활성화
3. 공급망 데이터 플랫폼	① DT 기반 가상협업공장 실증 ② 통합형 공급망 데이터 플랫폼 구축 ③ 디지털 라이브러리 기반 시장생태계
4. 첨단제조 글로벌 진출	① 제조선진국 기술통상 모델 고도화 ② 동아시아 디지털 기반 GVC 확장 재편

1. 첨단기계 기술 초격차

첨단제조(로봇 포함) 분야에서 초격차 기술 확보가 필요하다. 과학기술부는 2022.10월 국가과학기술자문회의에서 12대 국가전략 기술 중 하나로 ‘첨단로봇·제조’를 명시하고 세계 로봇산

50) 미래산업정책포럼 (2021), *위기의 시그널을 깨트려라: 혁신, 그리고 리질리언스*, 산업통상자원 R&D 전략기획단, p.307; 한국공학한림원 (2021), *새로운 100년 산업혁명, '추월의 시대'로 가자*, 2022년 차기정부를 위한 정책총서 VI

업 3대 강국을 목표로 제시하였다. 산업통상자원부도 2023.4월 우리 산업의 초격차 성장을 견인하기 위한 11대 핵심투자 분야를 정하면서 ‘첨단제조’와 ‘지능형 로봇’을 포함하였고, 분야별로 핵심 미션과 중점추진 프로젝트를 제시하였다.⁵¹⁾

가. 첨단제조 초격차 프로젝트

첨단제조(advanced manufacturing)는 최신 디지털 기술과 공정을 활용하여 고부가가치 제품을 생산하는 제조혁신을 의미하며, 반도체, 자동차, 디스플레이, 가전, 항공 등 다양한 산업 분야에 활용될 수 있다. 산업부의 초격차 전략에서는 무인공장 실현을 위한 제조시스템 지능화와 제조·서비스 융합 新비즈니스 창출을 미션으로 정하고, ① 공장단위 디지털트윈(DT) 기반 공정 통합 최적화 AI솔루션 개발 및 실증, ② 자율기반 기계·장비 개발 및 첨단운영서비스(고장진단 등) 실증의 2개 프로젝트를 확정하였다. 첫 번째 프로젝트는 제조장비 지능화 기술 확보를 통해 제조현장의 첨단화를 견인하겠다는 것이다. 제조장비 디지털트윈 기술, 로봇·장비 협업 무인 자동화 기술, 제조 데이터 응용 AI 최적화 기술 등이 대상이다. 두 번째 프로젝트는 자율화된 기계·장비를 기반으로 제조와 서비스를 융합한 신사업모델을 확산하겠다는 것이다. 건설기계 자율주행, AI 기반 예지보전, 작업현장 원격통합제어 솔루션 등 디지털 기반 제조서비스 핵심 기술이 포함될 것이다.⁵²⁾

나. 자율로봇 초격차 프로젝트

로봇과 AI를 결합하여 자율로봇(autonomous robotics) 기반 다양한 플랫폼 및 솔루션을 고도화하고 로봇서비스(RaaS) 상용화를 확대하는데 초점이 있다. 산업부의 지능형 로봇 초격차 전략에서는, 스마트 제조로봇 강국 도약과 글로벌 히트 지능형 서비스 로봇 육성을 미션으로 정하고, ① 고난이도 비정형 제조작업 자율형 AI로봇 개발, ② 다중지능(영상·음성·언어·촉각)을 갖춘 인간생활지원(간병 등) 서비스 로봇 개발의 2개 프로젝트를 확정하였다. 이 중 첫 번째 프로젝트가 첨단제조 자율공장과 직접적으로 연계되며, AI, 빅데이터, 디지털트윈 기반으로 전문가의 기술 암묵지를 로보틱스로 전환하여 기존 자동화가 불가능했던 고난이도 공정까지 완전 자율화한 제조공정을 구현하겠다는 것이다. 고난이도 자율작업 이동-조작 로봇 플랫폼 개발(AMM), 이종·군집 로봇시스템(MRS), 인간-로봇 상호작용(C-HRI), 전문가 스킬 디지털

51) 산업통상자원부 보도자료, “산업부 연구개발, 34개 미션 40개 사업(프로젝트) 중심으로 전면개편”, 2023.4.10

52) 디지털 기반 제조서비스 컨퍼런스 (2022.10.20.), 산업 예지보전 솔루션 및 서비스(두산에너지빌리티 사례), 건설기계 무인화·자율화 통합관리 서비스(현대두산인프라코어 사례) 등 발표자료 참고

화 솔루션 등이 포함될 수 있을 것이다.⁵³⁾

다. 디지털 신기술 사실상 표준 선도

상기 첨단제조와 첨단로봇에 대한 초격차 수준의 달성은 글로벌 시장의 수요자와 공급자가 인정하는 컨텐츠와 수준을 갖추었을 때 가능하다. 첨단산업의 특성상 다양한 디지털 신기술을 융합해 사용해야 하므로 열린 협업을 기반으로 비즈니스모델을 실험해야 하고, 시장에서 통용되고 상업적인 채택이 빈번한 선도 비즈니스모델이 될 때까지 시장·고객과 지속적인 커뮤니케이션과 어자일 데브옵스(Agile DevOps) R&D 방법론을 전개해야 한다. 예를 들어, 사실상 표준을 선도하기 위해 첨단제조에 대한 인사이트를 갖춘 전문가와 글로벌 기업이 네트워킹하는 단체로 Industrial Internet Consortium(IIC)나 Digital Twin Consortium(DTC)가 존재한다. IIC는 Testbed, DTC는 Technology Showcase라는 실증프로젝트 제도가 존재하는데, 미래 비즈니스모델을 디자인한 선도기업들이 이 제도를 활용하여 비즈니스모델을 검증받고, 열린 협업을 통해 전략적 제휴 파트너를 모색하며, 글로벌 네트워크에서의 활동실적이 가시적으로 공개되는 점을 활용해 글로벌 시장에서 마케팅 효과(사실상 전시회 참가 효과)를 낼 수 있다. 열린 협업이 익숙치 않은 한국기업들이 디지털 전환 시대에 첨단제조와 첨단로봇 분야에서 초격차를 만들어 내기 위한 가장 첫 행보는 글로벌 사실상 표준단체를 활용하여 자신의 비즈니스모델을 적극적으로 검증받는 습관을 기르는 것이다.

2. 지능형 혁신(AIX) 내재화

인공지능(AI) 기술을 활용하여 디지털 전환의 3가지 키워드(고객중심, 초연결, 초지능)를 실제 기업의 제조현장에서 구현하는 ‘지능형 혁신(AIX)’ 전략이 필요하다. 앞에서 설명하였듯이, AIX가 국내적으로 정착된 개념이 아니라 우리만의 독자적인 전략으로 발전시켜 나가자는 취지에서 아이디어로 제시된 것이고 디지털 혁신 중에서도 제조 공정의 AI 내재화를 강조하여 미래 혁신을 선도하겠다는 구상이다. 본고에서 초점을 둔 자율공장 구현과도 맞닿아 있다.

가. 앵커기업 주도 AIX 성공사례 창출

우리의 경우 수요 대기업이 주도하는 공급망 협업체제를 활용하는 것이 유용한 방안이다. 반도체, 자동차, 철강, 가전 등 전략 산업을 중심으로 공급망 내 개별 기업이 참여하는 협업체를

53) 로봇산업 성장전략 세미나 (2022.10.26.), 로봇산업 기술로드맵(우현수), 로봇과 AI기술의 융합(서갑호) 등 발표자료 참고

구성하고 대기업 주도로 참여 중소기업의 AI 활용 역량을 끌어주는 앵커 프로젝트를 발굴하여 추진하는 것이다. 이를 통해 참여 기업은 AI 기술을 제조공정 전반에 적용하여 생산성을 높인 선도모델을 창출하고, 이를 공급망 내 다른 기업과도 공유하면서 자발적인 AI 내재화를 산업계에 확산할 수 있다. 민간 업계의 공감대를 전제로, 수요기업-공급기업-SI기업-협력업체가 참여한 한국형 산업제어시스템(K-ICS) 개발 컨소시엄을 발족하여 이를 중심으로 국내 업계 간의 소통과 협업을 통해 사업 대상 첨단공정을 선정하고 국산 장비와 자체 기술력으로 제조 공정의 AI 내재화를 단계적으로 추진하면 충분히 성과 창출이 가능하다고 생각한다.⁵⁴⁾

나. 디지털트윈AI 기반 新제조서비스 활성화

기계가 중심이 되어 제조시스템에 AI 솔루션을 결합한 新제조서비스 시장을 열어가는 새롭고 과감한 전략이 요구된다. ‘제조서비스’는 제조기업의 생산과정 혁신을 지원하거나 제품에 서비스를 부가 또는 융합하여 새로운 가치를 창출하는 활동 전반을 의미한다. 제조의 서비스화 또는 제조-서비스 융합은 오래전부터 있었지만, 최근에 다시 주목하는 것은 제조업에 AI 기술이 접목되어 다양한 사업모델이 활발하게 나타나고 미래 성장동력으로 기대되기 때문이다. 일례로 제조 현장에 IoT, AI, 디지털트윈 등 혁신기술을 접목하여 기계·장비의 진동, 전류 등을 측정해 실시간으로 이상 여부를 체크하고 데이터를 머신러닝 알고리즘으로 실시간 분석하여 이상 징후를 예지함으로써 필요한 시점에 유지보수하는 서비스가 활성화되고 있다. 이러한 글로벌 예지보전 시장은 '22년 88억불에서 '27년 320억 불 규모로 성장이 전망되고, GE, 슈나이더 일렉트릭, SAP 등 글로벌 기업들이 경쟁 중이다. 국내에서도 두산에너지빌리티가 발전소 장비의 원격관리 서비스를 선보이고 있다. 또한 CNC 선반, 머시닝센터 등 정밀가공기계의 경우에도 완제품 판매에서 스마트제조 솔루션 서비스로 패러다임이 바뀌고 있다. 장비에 센서를 부착하여 데이터를 수집하고 AI로 분석하여 NC 프로그램을 실시간 최적화하면 마모와 에너지 소비를 줄이고 품질 향상도 가능해진다.⁵⁵⁾

크게 두 단계로 구분된다. 첫째 디지털트윈AI가 가능한 환경을 구축하는 것이다. 센싱-엣지컴퓨팅-클라우드컴퓨팅-패턴분석-알고리즘-최적화액션-피드백-재센싱 등 연결된 디지털 기술들은 마치 살아있는 세포를 구성하는 세포기관과 같으며, 그 연결구조를 오가는 신호와 반응의 지속적 순환은 유기체가 신진대사를 하는 것과 같다. 지능형 혁신의 성공은 결국 살아있는 세포가 신진대사를 왕성하게 하는 상태를 AI로 분석해 패턴을 찾고, 필요한 동작을 취하기 위한 알고

54) 권대현 (2022), “산업용 제어시스템 개발 및 적용 사례: LS 일렉트릭 사례”, 디지털 기반 제조서비스 컨퍼런스 발표자료
55) 김호철 (2023a), 전계논문, p.15

리즘을 도출하는 것을 의미한다. 중요한 것은 살아있는 세포처럼 연결된 구조라야만 AI분석의 의미가 있다는 점이다. AI분석은 공장내 존재하는 하나의 오브젝트(장비)에 대해서만 진행되는 것이 아니다. 3D 공간(공장)에 존재하는 모든 오브젝트(고정형 설비, 이동형 로봇, 엔지니어(사람) 및 웨어러블)의 위치와 상태 정보를 교환하고 의사결정을 해야 하는데, 사람이 아니라 기계가 공간을 이해하고 액션을 취하려면, 공간좌표를 기반으로 정보체계를 갖춘 SW인 디지털트윈 OS를 활용해야만 한다. 게다가 실시간 현장연결해 대용량 정보를 교환하기 위해선 5G통신망 혹은 그 이상의 고밀도 통신을 활용해야만 단절없는 정보흐름을 보장할 수 있다. 둘째 이처럼 디지털트윈AI 제반여건을 갖추었다면, 다양한 물리 기반 제조컨텐츠를 결합하여 새로운 디지털 제조서비스 창출에 나서야 한다. 예를 들어, 디지털트윈AI는 앞서 언급했듯이 물리 모델을 축적하고 분석하는 것인데, 한국의 다양한 제조업에 속한 도메인별 물리 모델 라이브러리가 축적된다는 것은 마치 OTT 플랫폼에 K-드라마와 K-팝 컨텐츠가 쌓이는 것과 같기 때문이다. 한국은 디지털트윈 OS SW 자체에 대한 경쟁력은 약한 편이다. 비록, 디지털트윈 OS는 당장은 외국산을 쓰더라도, 한국이 다양한 제조업을 보유했다는 장점을 활용해 다양한 물리 모델 컨텐츠·라이브러리를 신속하게 축적함으로써 K-제조 경쟁력을 제고할 수 있다.

신제조서비스 시장은 디지털 도구를 활용해 상호운용적으로 재활용할 수 있는 제조컨텐츠 시장으로서 SW·HW만 존재하는 것이 아니라, 제조공간에 존재하는 사람, 기계, 통신, 관제, 분석, 비즈니스·오퍼레이션모델 등 핵심역량들의 다양한 조합들의 수요와 공급을 매칭하기 위해 플랫폼을 활용한다. 미국의 경우, 민간부인이 자발적으로 공개가능한 보급형 디지털 라이브러리를 Github에 등재함으로써 글로벌 수요와 공급을 매칭(거래)시키는 시장플랫폼을 확보했다. 독일 자동차산업의 디지털전환 중에 축적되는 제조컨텐츠는 Catena-X 시장플랫폼에 등재되고 있으며, 독일을 비롯한 EU 디지털경제 성장을 위한 발판 역할을 한다. 한편, 2022년 SIEMENS와 NVIDIA가 발표한 산업메타버스 관련 협업모델은 디지털트윈AI 기반 제조컨텐츠 시장이 열리고 있음을 뜻한다.⁵⁶⁾ 양사는 제품의 디자인 단계에서만 사용되던 3D OS를 작업자, 라인설비, 이동로봇이 공존하는 공간에서 제조 운영단계에서 사용하기 위한 다양한 제조컨텐츠를 축적 중이다. 조만간 상기 Github, Catena-X 등 시장플랫폼에서 거래되기 시작할 것이며, 그 선순환을 통해 글로벌 제조컨텐츠(제조서비스) 시장을 선점해 갈 확률이 높다. 한국의 기계산

56) <https://blogs.nvidia.com/blog/2022/06/29/siemens-nvidia-industrial-metaverse/>, The Metaverse Goes Industrial: Siemens, NVIDIA Extend Partnership to Bring Digital Twins Within Easy Reach, 2022.6.29., "The NVIDIA Omniverse 3D collaboration and simulation development platform delivers photorealistic rendering capabilities and advanced AI to the Siemens Xcelerator ecosystem, allowing the digital twin to be represented in full-design fidelity, and operating in real time."

업의 생태계 범위가 확장되어야 하는 이유가 여기에 있고, 디지털전환과 시장플랫폼을 염두에 둔 제조 및 제조서비스 정책을 수립하지 않으면 글로벌 시장에서 도태될 위험이 높아지고 있다.

3. 공급망 데이터 플랫폼

기존 공급망은 ‘원자재-생산-유통-소비’의 단선적 구조이고 단계별 대기시간과 투입비용 절감이 중요했지만, 디지털 기술이 적용되면 모든 과정의 정보가 실시간으로 연결되어 디지털 플랫폼을 중심으로 전 과정이 소통되고 제어 가능한 통합형 구조로 발전하며, 기업은 소비자 수요에 반응하여 생산과 유통을 유연하게 관리하면서 새로운 가치를 창출한다. 이를 위해서는, 공급망 참여기업 간의 디지털 상호운용과 협업 환경을 조성하고 공동 데이터 플랫폼을 구축하는 것이 중요하다.⁵⁷⁾

가. DT 기반 가상협업공장 실증

‘공급망 4.0’을 실현하려면, 기업은 공급망 내에서 단계별 흐름을 실시간 추적 가능하고 소비자가 입력하는 정보를 공급망 참여자와 공유할 수 있어야 한다. 그런데 공급망의 단계가 복잡하고 참여업체가 다양하다 보니 전방산업의 개별 기업이 후방산업 구조 전반에 대해 파악하는 것은 불가능하다. 후방산업 협력업체로서도 사업체 규모가 영세하고 자사와 관련된 제한된 정보만 전달받기 때문에 전방산업 기업의 디지털 전환 요구에 부응하기 어렵다. 공급망 내 업체 간에 디지털 연결이 안 된 상황에서 유의미한 산업데이터 축적을 기대하기는 어렵고 데이터 플랫폼 구축도 요원한 일이 된다. 산업의 디지털 전환에서 강조하는 데이터 플랫폼 추진이 어려운 이유이기도 하다. 그렇다면 우선적으로 공급망 참여기업 간의 디지털 연결과 협력이 가능한 가상공간 구축이 필요하므로, 최종 수요기업의 무인 자율공장을 모델로 하여 디지털트윈(DT) 기술로 가상화한 제조 디지털 플랫폼을 만들어 보자는 아이디어가 제시되었다. 이러한 배경하에, 새 정부의 국정과제에 ‘가상 협업공장’ 구축을 신규 사업으로 포함하게 되었다.⁵⁸⁾

장영재 교수가 제시한 ‘제조 무인화-자율화 디지털트윈(DUAM)’ 플랫폼은 제조 무인화-자율화를 구현하기 위한 가상공간의 플랫폼 환경으로, 국가 주도로 산업별 디지털트윈 플랫폼을

57) M. Ferrantino and E. Koten, “Understanding Supply Chain 4.0 and its potential impact on global value chains”, in WTO (2019), Technological innovation, supply chain trade, and workers in a globalized world, WTO global value chain development report 2019.

58) 윤석열 정부의 110대 국정과제, “23번 제조업 등 주력산업 고도화로 일자리 창출 기반 마련”; 전자신문, “[대한민국 대전환 ‘ON’] 장영재 KAIST 교수 ‘제조 디지털 플랫폼’ 구성해야”, 2022.4.20

구축하여 가상 환경에서 공동 기술개발 및 수요-공급기업 시너지 창출을 도모하고 표준데이터를 상호 개발하자는 것이다. 카이스트 첨단제조지능혁신연구센터 주도로 실제 환경과 유사한 가상 환경을 구축하여 데이터 표준을 만들고 실증 테스트를 지원하는 모델 플랫폼을 선보이기도 하였다. 일례로 삼성전자 반도체 공장을 모사하여 가상협업공장을 구축할 경우 OHT 통합제어를 위한 AI 알고리즘 테스트가 가능하고, 이를 통해 국내 중소기업이 디지털 전환을 촉진하고 자율공장에 적합한 장비 및 솔루션을 개발하는데 상당한 도움이 될 것이다. 다만 동 사업을 현실화하려면 수요 대기업의 주도적 참여와 자사 공장의 가상화 및 데이터 공유 허용이 전제되어야 한다는 문제가 있으며 정부 참여의 필요성에도 의문이 들 수 있다. 이를 감안, 가상협업공장이 아이디어를 정부 지원 배송로봇 실증사업에 시범적으로 적용하여 정책의 타당성 및 효과성을 검증해보고, 이를 토대로 여타 주력산업에 단계적으로 확산하는 접근이 유용해 보인다.

나. 통합형 공급망 데이터 플랫폼 구축

기술경쟁 시대에 공급망의 산업데이터 수집 및 활용이 제조 경쟁력에 필수적이다. 이에 EU는 민관이 협력하여 역내 자동차 산업의 데이터 플랫폼인 Catena-X 프로젝트를 본격화하는 한편, 자국의 환경규제를 역외 적용하면서 외국 기업의 공급망 데이터 확보에 나서고 있다. 일례로 EU 탄소국경조정(CBAM)이 도입되면 EU로 수입되는 상품의 생산과정 전반에 걸친 탄소배출량 정보가 수집되며 2026년 배터리 여권제도(Battery passport)가 시행되면 배터리의 생산·이용·폐기·재활용 정보도 요구하게 된다.

공급망과 산업데이터를 둘러싼 각국 전략경쟁이 치열해져 개별 기업 차원에서 감당할 수준을 넘어서는 만큼, 우리도 정부, 기업과 분야별 민간협회가 힘을 모아 공급망 데이터 플랫폼 구축에 나서야 한다. KTNET의 전자무역과 FTA 데이터, 관세청의 수출입 통관과 관세환급 정보 등을 연계하고, 민간주도적 거버넌스(업종별 협회 참여)가 주도하여 대·중소기업 협업을 유도하면 통합 데이터 플랫폼 구축이 충분히 가능하다고 생각한다.⁵⁹⁾ 앞서 언급한 독일 Catena-X는 독일 정부의 후원 아래, 벤츠·BMW·아우디와 같은 자동차 3사 및 보쉬·FESTO·SIEMENS·SAP 등의 대기업과 자동차산업 공급망에 속한 중소기업들을 연결하여 탄소배출과 순환경제 재활용을 정보를 추적하는 산업플랫폼으로 발전하고 있다. 눈여겨봐야 할 점은 동 산업플랫폼을 단지 제조산업에게 부과된 규제준수 의무를 수행하는 목적으로만 사용하는 것이 아니라, 수요예측, 품질제고, 디지털트윈 등 공급망(밸류체인) 기반 비즈니스모델을 창출할 목적으로도 활용한

59) 박문구 (2022), “공공 융합형 플랫폼 생태계 발전과 정책적 시사점”, DT quarterly, 한국산업기술진흥협회; 김희영·강노경 (2022), “EU 배터리 여권으로 살펴본 이력 추적 플랫폼의 필요성”, Trade Focus

다는 점이다. 미국의 CESMII⁶⁰⁾도 Catena-X의 탄소배출 추적 인프라 조성과 유사한 활동을 하고 있다. 이들은 탄소배출 추적 등 공급망 데이터의 유통속도가 결국 산업 경쟁력을 제고하고, 다양한 서비스 창출의 기초가 된다는 점을 인지하고 있다.

다. 디지털 라이브러리 기반 시장생태계

디지털 신기술의 적용과 새로운 비즈니스모델의 등장으로 기계산업의 생태계 범위가 확장되고 새로운 가치가 생성되었으며, 이에 대한 거래가 증가하고 있다. 기계산업이 축적할 수 있는 디지털 라이브러리의 유형은 도메인 지식이 반영된 HW/SW, 분석 모델링(시행착오 줄이는 실험설계 능력), AI분석과 피드백으로 도출한 패턴/알고리즘 가치, 고밀도통신 연결노하우, 네트워크 콘텐츠 가치(엔지니어링, ICT, 금융, 고객) 등이 존재한다.

동 디지털 라이브러리를 기반으로 지속가능한 시장생태계가 탄생하려면, 축적된 HW, SW, 고밀도 통신, AI, 관제센터, 알고리즘 등 디지털 라이브러리 각 상품별 카탈로그(브로셔), 정당한 가치평가 체계, 지식재산권 보호장치, 라이선스 비용, 민간의 자발적 참여 유인구조 등 수요자와 공급자가 안심하고 거래를 수행할 수 있는 거래시장 인프라의 제반요건을 갖춰야 한다. 일례로 독일은 Catena-X를 통해 디지털 라이브러리 카탈로그를 갖추고 Web 3.0 기반 시장생태계를 조성 중이다.

4. 첨단제조 글로벌 진출

한국은 중간재 수출 중심의 경제구조로 글로벌 공급망 참여도가 높고 중국과 공급망이 긴밀하게 연결되어 있다. 미-중 전략경쟁으로 공급망 분리가 가시화되고 중간재 교역이 줄어드는 방향으로 분업구조 재편이 이루어지면 국내 제조업 수출시장이 위축될 수 있다. 내수가 협소한 우리로서는 안으로 움츠리기보다는 시야를 밖으로 넓혀 첨단제조 중심으로 신시장 통상협력을 통해 글로벌 진출을 다변화하는 접근이 필요하다.

가. 제조선진국 기술통상 모델 고도화

미-EU TTC, 미-일 CoRe 등에서 보듯이 주요국은 공급망 재편에 대응하여 우방국간 파트너십을 강화하고 있다. 우리 제조업은 반도체, 자동차, 배터리, 조선, 철강 등에서 세계적 경쟁력을

60) Clean Energy Smart Manufacturing Innovation Institutue (CESMII), <https://www.cesmii.org/sustainable-manufacturing-cesmii-and-plattform-industrie-4-0/>

갖추고 있어 세계 각국의 협력 관심과 수요가 높다. 지난 1월 대통령의 UAE 방문 계기 첨단제조 이니셔티브 추진 합의가 좋은 사례이다. 첨단제조와 기술정책을 대외적으로 연결한 한국형 기술 통상 전략과 모델을 수립하고 이를 각국과의 FTA 협정문 및 산업통상 협력채널에 반영해나갈 필요가 있다. 또한, 중동, 중앙아, 남미 등 신시장을 대상으로 다각적인 통상협력에 정부가 발벗고 나서 우리 기업의 진출 기회를 만들어야 한다. 그러한 차원에서 정부가 새롭게 제시한 개도국 대상 무역투자프레임워크(TIPF) 추진과 공급망 협력이 가미된 新FTA(EPA) 전략도 그러한 취지로 보인다.⁶¹⁾

나. 동아시아 디지털 기반 GVC 확장 재편

동북아 역내 공급망 재편이 우리 제조업에 불리하게 전개되지 않도록 우리의 통상역량을 집중해야 한다. 특히 미국-일본과 중국-러시아 간의 대립 구도에서 우리가 어느 일방으로 치우쳐 오해와 갈등에 휘말리지 않도록 한-미 동맹관계와 한-중 협력관계의 구조적 차이를 반영한 전략적 소통과 실리적 접근을 취할 필요가 있다.⁶²⁾ 이러한 차원에서, 한-중-일 공급망 협력을 위한 채널을 새롭게 구축할 필요가 있다. 동북아 수직적 분업구조가 수평적 경쟁으로 재편되고 있고 자칫 동북아 지역이 글로벌 공급망 전략경쟁의 격전지가 되어 불안정성이 확대될 수 있기 때문에, 기계산업을 중심으로 동아시아 전반의 새로운 제조업 분업구조 형성을 위한 우리의 청사진을 그리고 역내 협력과 경쟁을 주도하는 산업통상을 전개해야 한다. 중국과 일본 사이에서 우리가 한-중-일 공급망 협력을 적극적으로 증대하며 구체적인 방안을 도출해야 한다.

이와 함께, 최근 지경학적 상황을 고려하여, 유사시 기존 한-중-일 밸류체인을 보완하고 탄력적인(resilient) 운영이 가능한 범 동아시아 공급망으로 확장 재편하는 글로벌 전략을 마련해야 한다. 예를 들면, 한국 가전산업의 경우 중국 의존도를 줄이고, 베트남에 거점을 마련하였고, 자동차산업의 경우 인도네시아 공장을 설립하고 ASEAN 시장을 공략하기 시작했으며, 반도체·배터리 등 첨단산업은 미국공장 설립을 실행했고, EU공장도 확장중이다. 최근 화해 무드에 힘입어 일본에 반도체 밸류체인을 다중화시키려는 노력이 엿보이는바, 이러한 GVC의 다중채널을 통해 한국 산업의 글로벌 경쟁력을 제고할 수 있다. 기계산업 역시 디지털트윈AI를 기반으로 확장 중인 미래형 기계산업 밸류체인을 지경학적 장단점을 고려하여 설계해야 할 것이다.

61) 김호철 (2023b), 전개논문

62) 강준영, “한·중관계 실용적 관점에서 새 기준점 만들어야”[중국 수출 해법]①, 이데일리 2023.3.14

V. 맺음말

우리 기계산업은 대내외적으로 커다란 변화와 도전에 직면해 있다. 중국이 세계 1위 기계 강국으로 부상함에 따라 강력한 수출국을 이웃한 경쟁환경으로 바뀌었고, 제조현장이 디지털 전환과 탄소 중립으로 빠르게 변화하면서 기계산업이 그 변화의 중심에 있으며, 미-중 패권경쟁으로 전략적 산업정책이 부활하고 공급망이 재편되고 있다. 우리 기계산업의 글로벌 경쟁전략을 근본적으로 재검토하여 미래 경쟁력 확충에 나서야 할 시점이다.

본고는 제조업 전반을 둘러싼 글로벌 경쟁환경의 변화로서, 글로벌 기술패권 경쟁, 산업의 디지털 전환, 기업의 ESG 경영 요구, 공급망 재편의 산업정책을 주목하였고, 기계산업이 당면한 도전과제로 디지털·그린 이중전환 선도, 첨단제조와 AI 융합 자율공장, 전략적 공급망 포지셔닝 등을 들었다. 이러한 분석을 토대로 '첨단제조 지능형 혁신(AIX)'을 미래상으로 설정하고, 산업정책의 틀에 따라 공급, 수요, 인프라, 그리고 대외전략 측면에서 첨단제조 기술 초격차, 지능형 혁신 내재화, 공급망 데이터 플랫폼, 첨단제조 글로벌 진출 등 4개 분야의 8개 추진과제를 제시하였다.

국내 수요 대기업들이 선진 기술과 고품질 서비스에 기반한 화낙 공작기계, 미쓰비시 제어시스템, 가와사키 로봇 등에 의존해 왔으나, 새롭게 들어설 첨단제조 자율공장에는 우리 기술로 만들어진 기계·장비, 제어시스템, 자율로봇이 사용되고 한국형 첨단제조가 글로벌 시장에 진출하게 되기를 기대한다.

참고문헌

- 김호철 (2023), “산업의 디지털 전환, 글로벌 지정학과 통상협상 新의제 검토”, 통상법률 제158호
- 김호철 (2023), “글로벌 공급망 재편의 지정학과 신통상전략 구상”, 통상법무정책 제5호
- 김호철 (2021), “탄소국경조정 도입의 WTO 합치성 쟁점: GATT 제2조, 제3조, 제20조”, 통상법률 제151호
- 미래혁신포럼 (2021), *위기의 시그널을 깨뜨려라! 혁신 그리고 리질리언스*, 산업통상자원 R&D전략 기획단
- 박문구 (2022), “공공 융합형 플랫폼 생태계 발전과 정책적 시사점”, DT quarterly, 한국산업기술진흥협회
- 이승주. (2020). 디지털 무역 질서의 국제정치경제: 디지털 무역 전략의 차별화와 갈등 구도의 복합성. *한국동북아논총*, 25(2), 53-80.
- 이승주 (2021), “세계 경제의 네트워크화와 미중 전략 경쟁: 복합 지정학의 부상”, *정치·정보연구* 24(3), 51-80
- 정은미 (2022), “최근 글로벌 공급망 변화 추세와 대응 과제”, *경제·인문사회연구회 Global Issue Brief*
- 최계영 (2022), “미·중 기술패권 경쟁: 7개 戰線과 대응 전략”, *KISDI Premium Report 22-05*, 정보통신정책연구원
- 최원석·정지현·김정근·이효진·최지원·김주혜·백서인 (2021), *중국의 디지털 전환 전략과 시사점: 5G 네트워크 구축과 데이터 경제 육성을 중심으로*, KIEP 연구보고서 21-12
- 한국공학한립원 (2021), *새로운 100년 산업혁명, '추월의 시대'로 가자*, 2022년 차기정부를 위한 정책총서 VI
- 길형배·최진철·김철후·오승훈·김희태·이운규·이용규(2023), 「기계산업 2022년 성과와 2023년 전망」, 『기계기술정책』, 111, 한국기계연구원.
- 한국기계연구원 (2022), *기계산업 발전방안*, 정책지원 보고서

[외국문헌]

- Aggarwal, V. and Reddie, A. (2020), “New Economic Statecraft: Industrial Policy in an Era of Strategic Competition”, *Issues & Studies* 56:2
- Allison, G., Klyman, K., Barbesino, K. and Yen, H. (2021), “The Great Tech Rivalry: China vs the U.S.”, *Avoiding Great Power War Project*, Harvard Kennedy School
- Baldwin, R. (2021), “Risks and global supply chains: What we know and what we need to know”, *NBER working paper*
- Baldwin, R.(2016), *The Great Convergence: Information Technology and the New*

- Globalization, Harvard University Press
- European Commission, “A Green Deal Industrial Plan for the Net-Zero Age”, COM(2023) 62 final, 1.2.2023
- Farrell, H. and Newman, A. (2019), “Weaponized Interdependence: How Global Economic Networks Shape State Coercion”, *International Security* 44:1
- Ferencz, J., Lopez-Gonzalez, J. and Garcia, I. (2022), “Artificial Intelligence and International Trade: Some Preliminary Implications”, *OECD Trade Policy Paper N.260*
- Industrial Internet Consortium (2020), *Digital Transformation in Industry White Paper*
- McKinsey (2016), “Digital Globalization: The New Era of Global Flow”, *McKinsey Global Institute*
- Rodrik, D. (2022), “A Better Globalization Might Rise from Hyper-Globalization's Ashes”, *Project Syndicate*
- Schwab, Klaus (2016), “The Fourth Industrial Revolution: what it means, how to respond”, *World Economic Forum*
- The White House, “Building resilient supply chains, revitalizing American manufacturing, and fostering broad-based growth”, *100-Day Review under Executive Order 14017*, June 2021
- WEF (2019), “Global Lighthouse Network: Insights from the Forefront of the Fourth Industrial Revolution”, *WEF White Paper*
- WTO (2018), *The future of world trade: How digital technologies are transforming global commerce*, *World Trade Report*
- WTO (2019), *Technological innovation, supply chain trade, and workers in a globalized world*, *WTO global value chain development report*

The Challenges and AI Transformation (AIX) of Machinery Industry in the Age of Technological Competition

Ho cheol Kim, Mun-Gu Park, Changsup Shim

- Abstract -

The machinery industry, which serves as the foundation of our industrial sector, is currently facing global technological competition, demands for digital transformation and carbon neutrality, as well as challenges and changes in supply chain restructuring. In order to survive in this era of technological competition, it is necessary to secure digital and green technologies, implement AI-based autonomous factories, and utilize and enhance supply chain restructuring. Advanced machinery and manufacturing robots will become key elements in establishing autonomous factories through the integration of intelligent technologies, which will dramatically enhance the competitiveness of our main industries such as semiconductors and automobiles. As a national strategy to achieve this, this document proposes the pursuit of “Advanced Manufacturing AI Transformation (AIX)” as a goal, which includes bridging the gap in advanced manufacturing technologies, internalizing intelligent innovation, establishing a supply chain data platform, and promoting global expansion of advanced manufacturing. The Korean advanced manufacturing system led by digital and green technological innovation will become a source of competitiveness in the era of technological competition and generate growth momentum for the national economy.

Key words

Digital Transformation, Carbon Neutrality, Advanced Manufacturing, Intelligent Robots, AI transformation (AIX)

우리나라 기계산업의 광역시·도별 효율성과 생산성 추이

서 호 준

신용보증기금 기업개선부 팀장, 행정학 박사

TECHNOLOGY POLICY
MECHANICAL ENGINEERING

우리나라 기계산업의 광역시·도별 효율성과 생산성 추이

서호준*

- 초 록 -

본 연구는 우리나라 기계산업의 17개 광역시·도별 효율성과 생산성 추이를 분석함으로써, 지역별로 특화된 산업육성전략을 도출하고자 하였다. 2016-2020년의 5개년을 대상기간으로 설정하고, 효율성 분석을 위해서는 DEA모형을, 생산성 추이 파악을 위해서는 맘퀴스트 생산성지수를 적용하였다. 투입변수로는 지역별 종사자 수와 유형자산 연말잔액을, 산출변수로는 지역별 부가가치액을 선정하였다. 효율성 분석결과, 모형과 연도에 관계없이 효율적인 DMU로 나타난 지역은 서울과 광주 지역이었으며, 충남과 경기, 제주 지역은 순수 기술적 효율성이 100%로 나타났다. 경기 지역은 투입증가전략에 신중을 기할 필요가 있는 반면, 제주 지역은 투입증가전략을 적극적으로 고려할 필요가 있음을 확인하였다. 5개년 기간 동안 전체 생산성은 0.26% 감소한 것으로 나타났으나, 충북과 충남 지역의 생산성은 크게 향상되었다. 분석결과를 바탕으로 기계산업에 대한 다차원적 효율성 분석이 필요한 점, 효율성 수준과 생산성 방향을 종합적으로 감안한 구조조정 전략 마련이 필요한 점, 중앙-지방정부 차원의 연구개발지원노력이 필요한 점, 기계산업 내 고부가가치 업종 육성이 필요한 점 등을 정책적 시사점으로 제시하였다.

주 제 어 우리나라 기계산업, 효율성, 생산성, 자료포락분석, 맘퀴스트 지수

논문접수일 2023년 2월 10일 수정논문 제출일 2023년 6월 4일 게재확정일 2023년 6월 15일

* 신용보증기금 기업개선부 팀장, 행정학 박사 email:horays@naver.com

I. 서론

우리 경제에서 제조업이 차지하는 비중은 약 25% 정도로(THE WORLD BANK DATA, 2023. 1. 9. 검색), 전세계적으로 볼 때 주요 생산국 중 중국에 이어 세계 2위이다. 제조업 비중이 높은 것에 비해 제조업의 경쟁력이 낮다고 보기도 어렵다. 우리나라의 제조업은 2018년 세계 제조업 경쟁력 지수(CIP) 측정결과, 전세계 152개국 중에서 독일, 중국에 이어 3위로 나타났기 때문이다. 제조업의 이와 같은 위상은 우리나라가 2020년 코로나19 경제위기를 전세계에서 가장 빨리 극복하는 데 결정적인 역할을 수행하였다. 즉 대면접촉이 잦은 서비스업 위주의 산업 구조를 가진 선진각국은 코로나19에 따른 경기침체의 여파에 완전히 노출되었던 반면, 제조업 중심의 우리나라 경제는 피해가 상대적으로 작았던 것이다.

코로나19가 가져온 경제위기는 전통적인 제조산업이 갖는 중요성을 다시 한번 일깨워주는 사례라 할 수 있다. 즉 높은 서비스산업 비중을 마치 ‘산업의 선진화’를 나타내는 바로미터인 것처럼 인식하는 것이 얼마나 위험한 접근인지를 각성할 수 계기가 될 수 있다는 것이다. 이처럼 제조산업의 중요성을 인식했다면 그 다음 단계가 바로 우리 제조산업의 경쟁력을 극대화시키는 방안을 찾는 것이 관건이라 할 수 있는데, 이는 제조산업 전반의 효율성을 제고할 필요가 있다는 것과 같은 맥락이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 제조산업 가운데에서도 기계산업(Machinery Industry)의 효율성(Efficiency)과 생산성 추이(Productivity Trend)를 분석대상으로 삼고자 한다. 기계산업은 우리나라 제조업 사업체 및 종사자 수의 절반 가까이 점유하고 있으며, 매출(출하)액에 있어서도 전체 제조업의 1/3 이상을 차지하고 있어 우리나라 제조업의 핵심이자 근간을 이루고 있다고 할 수 있다(한국기계산업진흥회, 2021). 또한, 기계산업은 B2B산업으로 전방연관효과가 크고 다양한 소재와 부품을 가공·조립하는 특성으로 인해 후방연관효과도 높게 나타날 뿐만 아니라 중소기업의 비중이 특히 높다(박광순 외, 2012). 이와 같은 기계산업의 중요성에도 불구하고, 우리나라 기계산업 전반의 효율성을 다룬 선행연구는 매우 드문 편이며, 기계산업의 지역별 효율성을 다룬 연구는 거의 전무한 상황이라 할 수 있다. 따라서 본 연구와 같이 전국 17개 광역 시도별 기계산업의 효율성을 파악하고자 하는 시도 자체로 상당한 차별점을 갖는다고 할 수 있다. 또한, 광역 시도별 효율성을 분석하는 것은 지역별로 특화된 기계산업 육성전략을 마련할 수 있는 계기를 마련할 수 있음은 물론, 우리나라 기계산업 전반의 구조를 혁신하여 국가 경쟁력을 제고하는 데 기여할 수 있다는 차원에서 분석의 필요성은 충분한 것으로 판단되었다.

효율성의 분석기법은 여러 갈래로 발전해왔지만, 현재까지 가장 대표적인 방법론으로 활용되어 오고 있는 것이 바로 자료포락분석(Data Envelopment Analysis, 이하 DEA)모형이다. 본 연구는 DEA모형을 통해 2016-2020년의 5개년 기간을 대상으로 횡단면적 효율성을 분석하고자 한다. 또한, DEA모형이 갖는 정태적(Static) 한계를 극복하기 위해 맘퀴스트 생산성지수(Malmquist Productivity Index: 이하 MPI)모형을 통해 5개 기간 4개 시점에 대한 생산성 변화의 추이를 탐색하고자 한다. 이처럼 기계산업의 지역별 효율성에 대해 시계열적으로 접근하는 것 역시 본 연구의 차별적인 요소라 할 수 있다.

본 연구는 이후, 다음과 같은 순서에 의해 전개된다. 제2장은 본 연구의 이론적 기초로 기계산업의 개요와 최근 동향에 관해 살펴본 다음, 본 연구의 분석방법인 DEA모형과 MPI모형을 소개하고, DEA모형과 MPI모형을 통해 산업의 효율성을 다룬 선행연구를 검토하기로 한다. 제3장에서는 제2장에서 다룬 이론적 배경을 바탕으로 측정변수를 선정하고, 구체적인 분석범위와 자료수집방법 등을 확정하여 연구모형을 정립하고자 한다. 제4장에서는 효율성 실증결과 및 생산성 추이 분석결과를 정리한 다음, 제5장에서 연구결과를 요약하고, 이에 관한 종합 토의를 진행하여 정책적 시사점을 도출하기로 한다.

II. 이론적 배경

1. 기계산업의 개요와 최근 동향

기계산업을 정의하기에 앞서 먼저 기계(Machine)가 무엇인지를 살펴볼 필요가 있다. 기계는 사전적으로 ‘동력을 써서 움직이거나 일을 하는 장치’로 정의되는데(국립국어원 우리말샘 (<http://www.opendict.korean.go.kr>)), 광범위하고 다양한 영역에 걸쳐 발전해 오고 있는 오늘날 기계산업의 범위를 모두 포괄하기에는 다소 어려움이 있는 정의라 할 수 있다. 브리태니커 백과사전은 오늘날 기계산업이 갖고 있는 다양성을 포용하는 정의로서, 타당성을 지니고 있는 것으로 판단되는데, 이에 따르면 기계는 ‘물리적인 작업을 위해 인간 또는 동물의 작동력을 늘리거나 대신하는 고유의 용도를 갖는 장치’로 정의되며, 넓게는 오늘날의 자동차처럼 복잡한 기계장치뿐만 아니라 지렛대·쇠기·축바퀴·도르래·나사처럼 간단한 기계들도 여기에 속한다. 기계의 작동은 화학·열·전기·핵 에너지를 기계 에너지로 바꾸거나 그 반대로 바꾸는 과정이 포함되지만, 단순히 힘과 운동을 수정하거나 전달하는 기능일 수도 있다. 모든 기계에는 입력·출

력·변형·변환·전달 장치가 있다(브리태니커 온라인(<http://www.britannica.co.kr>)).

우리나라에서 기계산업을 제도적으로 정의하고자 했던 노력은 구 「기계공업진흥법」에서 찾아볼 수 있다. 1967년 제정된 동법 제2조에서는 기계공업을 ‘기계기구(部分品을 포함한다) 또는 구조물을 제작(加工을 포함한다), 조립하는 공업’으로 정의하였다. 또한, 동법 시행령에서는 기계공업에 속하는 57개 종류의 기계기구를 열거하기도 하였다. 이러한 열거방식은 산업발전에 따라 새롭게 개척되는 사업영역을 제대로 반영하기 어렵다는 단점을 갖고 있었지만, 우리나라의 기계산업 범위를 처음으로 획정했다는 점에 의미를 부여할 수 있으며, 본 연구에서도 이와 같은 정의에 입각하여 논의를 전개하기로 한다.

「기계공업진흥법」에 의해 설립된 한국기계산업진흥회(KOAMI, Korea Association of Machinery Industry)는 한국표준산업분류(Korea Standard of Industry Classification, KSIC)를 기초로 기계산업을 5대 업종으로 분류하여 관련 통계를 작성하고 있다. 여기서 말하는 5대 업종은 금속제품, 일반기계, 전기기계, 정밀기계, 수송기계를 의미한다. KSIC 10차 개정을 반영한 산업 중분류에 의할 때 금속제품에는 9개 업종, 일반기계에는 18개 업종, 전기기계에는 9개 업종, 정밀기계에는 5개 업종, 수송기계에는 15개 업종이 각각 포함된다. 본 연구의 분석대상으로의 “기계산업” 범위도 위와 같은 산업분류에 따르고자 한다.

아래 <그림 1>은 KSIC에 의한 우리나라 기계산업의 5대 업종과 이에 속하는 세부업종의 범위를 나타낸 것이다.

[그림 1] 우리나라 기계산업의 범위

기계산업 (KSIC 9차 개정 기준)				
금속제품 C25	일반기계 C29	전기기계 C28	정밀기계 C27	수송기계 C30-31
금속구조물	내연기관	발전기	의료용 기기	자동차용 엔진
보일러	유압기기	전동기	측정분석 시험기구	자동차
금속제탱크 및 금속제 용기	풍수력기계	전기공급 및 제어장치	안경	자동차차체 및 프레임
금속압형 용품	벨트	전선 및 케이블	사진 및 광학기기	자동차 부품
공구	동력전달장치	전지	시계	자동차용 전기장치
기계요소	산업용로	전구 및 램프		항공기 및 부품
무기 / 총포탄	운반하여기계	조명장치		이륜자동차
	냉동공조기계	전기용접기		자전거
	액체가스여과정리기	가형용 기구		선박
	포장 및 송진기			전투용 차량
	가공공작기계			
	농업용 기계			
	건설광산기계			
	섬유기계			
	반도체 제조용 기계			
	금형			

* 자료: Invest Korea 홈페이지(<https://www.investkorea.org/ik-kr/cntnts/i-121/web.do>)

〈표 1〉은 2020년 기준 전국 17개 광역시·도별 기계산업의 현황을 나타낸 것이다.

〈표 1〉 광역시·도별 기계산업 현황

(단위: 개, 명, 백만원)

구분	사업체 수	종사자 수	출하액	주요생산비	부가가치
서울	984	25,083	5,950,035	3,226,354	2,774,619
부산	2,044	63,901	20,806,401	13,203,112	7,775,751
대구	1,769	56,825	16,951,509	10,542,904	6,310,983
인천	2,412	81,758	26,445,295	16,730,390	9,828,718
광주	733	38,522	26,100,523	18,627,844	7,395,849
대전	415	18,465	6,525,914	4,023,646	2,501,779
울산	1,161	110,597	67,561,408	49,432,240	17,997,613
세종	97	4,810	2,173,716	1,418,634	780,040
경기	11,031	376,415	135,909,783	85,700,605	50,421,109
강원	269	11,842	3,774,590	2,303,157	1,478,665
충북	1,101	65,799	37,631,201	26,691,305	10,899,350
충남	2,071	110,615	56,992,208	37,362,343	19,886,771
전북	680	31,695	12,191,650	8,447,750	3,726,362
전남	725	32,445	9,888,604	6,941,010	3,014,494
경북	2,355	93,714	37,523,449	24,444,145	12,963,348
경남	4,324	210,569	87,727,998	58,162,694	29,415,270
제주	25	373	93,751	54,964	37,835
계	32,196	1,333,503	554,254,089	367,313,818	187,213,951

* 자료: 국가통계포털(<https://kosis.kr/index/index.do>)

〈표 1〉에 나타난 광역시·도별 현황을 통해 우리나라 기계산업의 최근 동향을 살펴볼 수 있다. 〈표 1〉의 수치 데이터는 통계청에서 실시한 2021년도 「광업·제조업조사」에 기반하고 있으며, 10인 이상이 종사하고 있는 사업체 전수(全數)를 대상으로 하고 있다. 사업체 수는 해당 사업체의 광역시·도별 소재지를 기준으로 산출되었으며, 조직형태로는 개인사업체와 회사법인, 회사이외법인이 포함되었다. 종사자 수는 상용근로자, 임시 및 일용근로자, 자영업자, 무급가족종사자, 기타종사자, 다른 사업체로부터 받은 종사자 등을 포함하였다. 출하액은 사업체에서 직접 생산한 제품 및 위탁생산(원재료 제공)한 제품의 출하액을 의미하는데, 산업용 기계업의 출하액은 제품 출하액으로 조사되었다. 부가가치는 직접 조사된 자료가 아니라 출하액, 재고액, 주요 생산비용을 토대로 생산액에서 주요 중간투입비를 차감하여 산출되었다.

지역별로 볼 때 경기도는 사업체 수, 종사자 수, 출하액, 주요생산비, 부가가치 등 모든 지표에서 압도적인 1위로 나타났다. 또한, 경남은 사업체 수, 종사자 수, 출하액, 주요생산비, 부가가치 등에 있어서 부동의 2위로 집계되었다. 사업체 수에서는 인천과 경북이 3, 4위로 나타났으나, 충남, 부산과의 격차가 크지는 않았다. 종사자 수에서는 충남과 울산이 3, 4위로 나타났는데, 사업체 수가 적었던 충남과 울산의 종사자 수가 많다는 것은 이들 지역의 사업체 규모가 상대적으로 크다는 것을 시사하는 것으로 이해된다. 경북과 인천이 종사자 수에 있어서 충남과 울산의 뒤를 잇는 것으로 나타났다. 출하액에서는 울산이 3위로 나타났으며, 충남, 충북, 경북 등이 그 뒤를 이었다. 주요생산비에서도 울산이 3위였으며, 그 뒤를 충남, 충북, 경북 등이 이었다. 부가가치액에서는 충남이 3위에 올라섰으며, 울산이 4위로 나타났다. 경북과 충북이 그 뒤를 이었다.

〈표 1〉에 나타난 기계산업의 현황을 파악해 본 결과, 우리나라의 기계산업은 경기도와 경남이 주도하고 있다는 사실을 확인할 수 있다. 또한, 경기도에 인접한 인천과 충남, 충북 등 충청권, 경남, 울산, 경북 등 영남권 등이 지역특화산업으로서 기계산업을 비교적 활발히 영위하고 있다는 사실도 함께 확인할 수 있다.

2. 분석방법론: 자료포락분석(DEA)과 맘퀴스트 생산성지수(MPI)

앞서 언급한 바와 같이 본 연구는 2016-2020년의 5개년을 대상으로 우리나라 기계산업의 광역시·도별 효율성을 분석하고자 하는 것을 연구목적으로 하고 있으며, 효율성 분석기법으로는 DEA모형을 적용하고자 한다. 따라서, DEA모형의 특징과 유용성, 한계 등에 관해 소개할 필요가 있다.

DEA모형은 효율적 변경선(Frontier)을 통해 기술적 효율성과 배분적 효율성의 개념을 제안한 Farrell(1957)에서 그 원류를 찾아볼 수 있는데, 효율성 측정분야에 있어서 DEA모형은 가장 대표적인 분석기법으로 활용되고 있다.¹⁾ DEA모형은 함수적 접근법에서 필요한 함수적 가정의 절차가 필요치 않으며, 표본 값이 작아 통계적 가정을 관철하기 어려운 환경에서도 무리 없이 적용할 수 있을 뿐만 아니라 모형 자체가 각 변수간 가중치(Weight)를 자동으로 설정해주기 때문에, 가중치 선정과정에서 연구자의 주관을 배제할 수 있으며, 비효율적인 의사결정단위

1) EBSCO 서비스를 통해 국내외 DEA 관련 학술논문 게재 수를 검색한 결과, 2017~2018년 사이 2,500편 내외이던 DEA 관련 논문 숫자가 2021~2022년 사이에는 4,000편을 상회하는 것으로 나타났는데, 이는 효율성 측정분야에서 DEA모형이 갖고 있는 주도적 위상이 지속되고 있음을 나타내는 것으로 이해된다.

(Decision Making Unit: 이하 DMU)들로 하여금 그들이 효율적인 DMU가 될 수 있게끔 벤치 마킹(Bench Marking) 값을 제시해주는 특징으로 인해 효율성 개선방안 도출에 구체적이고 실무적인 가이드라인을 제공해주는 장점이 있다.

위와 같은 유용성으로 인해 DEA모형은 효율성 측정분야에서 가장 지배적인 방법론으로 주목 받고 있지만, 비모수적 특질에 대해 적지 않은 비판에 직면하고 있는 것도 사실이다. 즉 DEA모형을 통해 산출되는 효율성 값이 통계적으로 어떠한 의미를 갖는가에 관해서는 뚜렷한 답변을 내놓기가 어렵다는 것이다. 또한, 선정되는 변수에 따라 측정결과에 편차가 심하게 나타나는 점은 DEA모형의 신뢰성을 비판하는 근거가 되기도 한다. DEA모형에 대한 비교대상으로 거론 되는 확률적 프런티어(Stochastic Frontier Analysis)모형에서는 비효율성과 추정오차를 걸러낼 수 있는 반면, DEA모형에서는 추정오차까지 비효율로 간주하기 때문에, 비효율이 과다 추정되는 문제점 역시 DEA모형이 갖는 한계로 볼 수 있다.

DEA모형이 갖는 여러 한계에도 불구하고, DEA모형은 현재 고정된 모형이 아니라 다양한 변형모형의 개발과 부트스트랩(Bootstrap) 등 통계 검정모형과의 결합을 통해 지속적으로 진화·개선되고 있음을 고려해본다면 앞으로도 상당 기간에 걸쳐 효율성 분석 분야를 주도할 것으로 예상된다.

DEA모형은 크게 2단계 분석절차를 통해 효율성 점수를 산출하는데, 그 첫 번째 절차는 DMU 들이 갖는 투입요소와 산출요소를 통해 효율적으로 운영되고 있는 DMU를 식별하는 것이다. 두 번째 절차는 효율적인 것으로 평가된 DMU들로 구성되는 변경선을 구축한 다음, 비효율적인 DMU들이 이러한 변경선으로부터 떨어져 있는 거리를 구하여 효율성 정도를 산출하는 것이다.

DEA모형은 1978년 Charnes, Cooper, & Rhodes가 CCR모형을 처음 제안한 이래 다양한 변형모형이 개발·적용되고 있지만, 전통적 모형으로 가장 높은 활용도를 보이고 있는 모형이 바로 CCR모형이다. CCR모형은 규모보수에 관해 불변규모수익(Constant Returns to Scale: 이하 CRS)을 가정하고 있는데, 이는 곧 투입 1단위의 증가가 산출 1단위의 증가를 가져온다는 것을 의미한다. 아래 식 (1)은 DEA-CCR 포락모형의 수리식을 나타낸 것이다.

$$\text{최소화 } z_k = \theta - \varepsilon \sum_{r=1}^s s_r^+ - \varepsilon \sum_{i=1}^m s_i^- \dots\dots\dots \text{식(1)}$$

$$\begin{aligned}
 \text{제약조건 } y_{rk} &= \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} - s_r^+ \quad (r = 1, 2, \dots, s) \\
 \theta x_{ik} - \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} - s_i^- &= 0 \quad (i = 1, 2, \dots, m) \\
 \lambda_j &\geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, n) \\
 s_r^+ &\geq 0 \quad (r = 1, 2, \dots, s) \\
 s_i^- &\geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, m) \\
 \theta &: \text{ 제약없음}
 \end{aligned}$$

DEA모형의 수리모형은 표현 형태에 따라 비율형, 승수형, 포락형 등으로 구분되지만, 실증분석에서 주로 활용되는 것이 바로 식(1)에 나타나 있는 포락모형(Envelopment Model)이다. 위 식(1)의 내용을 구체적으로 살펴보면 θ 는 효율성을 개선하기 위해 피평가 의사결단위 k 의 모든 투입요소에 적용된 비례적 감축을 나타내는 스칼라변수이고, s_r^+ 와 s_i^- 는 산출요소와 투입요소에 각각 대응되는 잉여변수를, λ 는 비효율적 의사결정단위의 투입산출요소에 대한 효율적 의사결정단위의 가중치를 각각 나타낸다. 또한, z_k 는 의사결정단위 k 의 효율성을, y_{rk} 는 의사결정단위 k 가 생산한 산출요소 r 의 양을, x_{ik} 는 의사결정단위 k 가 사용한 투입요소 i 의 양을, s 는 산출요소의 수를, 그리고 m 은 투입요소의 수를 의미한다.

앞서 언급한 바와 같이 CCR모형은 CRS상태를 가정하여 투입증가에 대한 산출의 증가가 일정한 것으로 가정하지만, 실제 사례에서는 투입증가와 산출증가가 불균형을 이루는 경우가 훨씬 많을 수밖에 없다. Banker, Charnes, & Cooper(1984)는 규모 보수에 관해 CRS의 가정이 통용되지 않는 상황을 고려하여 BCC모형을 제안하였다. BCC모형은 DMU의 운영규모가 효율성에 미치는 영향을 고려하여 설사 규모적인 측면에 비효율이 존재하더라도 기술적인 측면이 효율적이라면 효율적인 것으로 판정하는 것이 합리적일 수 있다는 관점을 반영한다. 즉 규모 보수에 관해 투입 1단위의 증가 산출 1단위보다 작거나 크게 증가하는 경우를 상정하는 것으로 BCC모형은 가변규모수익(Variable Returns to Scale: 이하 VRS)으로도 불린다.

CCR모형과 BCC모형은 불변규모수익의 선형계획식에 볼록성(Convexity)의 제약조건을 부과한 것에 차이를 보이는데, 이는 가중치의 합이 1이라는 의미이다. 이러한 제약조건을 부과한 BCC모형은 순수 기술적 효율성(Pure Technical Efficiency: PTE)만을 의미하는 반면, CCR모형은 기술적 효율성(Technical Efficiency: TE)과 규모 효율성(Scale Efficiency: SE)을 합한 총체적 효율성을 의미한다. CCR모형과 BCC모형의 이러한 관계를 수식화하면 아래 식(2)와 같다.

$$\frac{CCR \text{ 효율성}}{BCC \text{ 효율성}} = \frac{\text{기술적 효율성} \times \text{가격 효율성 (규모 효율성)}}{\text{기술적 효율성}} \dots\dots\dots \text{식(2)}$$

식(2)에서 보는 바와 같이 CCR효율성점수를 BCC효율성점수로 나누게 되면 규모의 효율성을 구할 수 있게 되는데, 이는 분자와 분모에 있던 기술적 효율성이 소거되기 때문이다. 이러한 규모의 효율성은 100%에 근접할수록 규모가 최적화되는 것으로 이해할 수 있다.

위에서 살펴본 전통적 DEA모형은 2000년대 후반 이후, 이론적·실증적 발전을 거쳐 다양한 형태의 발전을 이루게 된다. 이 중 퍼지(Fuzzy) DEA모형은 전통적인 DEA모형의 단점을 상당 부분 보완한 것으로 평가된다. 실제 현실에서 얻어지는 데이터는 확실성, 신뢰성, 정확성 등에서 문제를 안고 있는 경우가 많은데, 임성목(2008) 등 일부 연구자들은 이처럼 부정확한 데이터를 상대적 비교가 가능한 수준으로 끌어올리기 위해 퍼지 선형계획법(Fuzzy Linear Programming)을 일반 선형계획법으로 변환하는 과정을 제시하였다.

박노경(2015)에 의하면 퍼지 DEA모형은 불확실하거나 애매모호한 상황과 관련된 자료를 퍼지 수로 표현할 수 있는 장점을 갖지만, 삼각 퍼지 값 계산에는 반드시 2개년 이상의 자료가 필요한 점이나, 자료가 불확실한 경우 삼각 퍼지 값을 산출하는 과정에 편차가 심해지는 점 등을 단점으로 보았다.

규모보수에 관해 가변규모수익을 가정하는 BCC모형은 분석 대상 DMU의 상대수를 효율적인 것으로 판정함으로써, 효율적인 DMU 간의 우선순위 식별이라는 새로운 학술 논의에 단초를 제시하게 된다. 이는 효율적인 판정된 DMU 간에도 효율성의 우열이 존재할 것이므로 최우선적으로 벤치마킹할 대상을 도출해야 할 필요성이 그 배경이라 할 수 있다.

효율적인 DMU 간의 우선순위 설정과 관련하여 적지 않은 연구들이 이루어져왔으며, Anderson & Petersen(1993)은 초효율성(Super-Efficiency) 모형을 우선순위 설정에 관한 대안모델로 제시하였다. CCR모형이나 BCC모형을 통해 효율적인 것으로 나타난 DMU의 효율성 점수는 반드시 1 이상으로 측정되기 때문에, 이 경우 1 이상이 되는 초효율성 점수를 구할 수 있다는 것이다. 초효율성 모형은 CCR모형을 기반으로 초효율성을 측정할 때에는 투입기준이나 산출기준에 관계없이 해를 구할 수 있지만, BCC모형을 기반으로 할 때에는 관측치의 위치에 따라 초효율성 점수의 해를 구하지 못하는 경우가 발생한다(이정동·오동현, 2010). 이에 따라 연구자들은 CCR모형에 따른 초효율성 점수만을 산출하고 있다.

지금까지 설명한 DEA모형은 정태적 속성을 지니기 때문에, 주로 특정시점(연도)의 효율성 분석에 활용된다. 물론 DEA모형을 통해서도 각 요소량의 차이가 크지 않고, 동일한 DMU들을 대상으로 할 경우에는 효율성의 대략적인 추이를 파악하는 것은 가능하지만, 그 정확성은 다소 떨어진다고 볼 수 있는데, 본 연구에서는 이러한 생산성의 변화 추이를 파악하기 위해 맘퀴스트 생산성 지수(MPI)모형을 이용하고자 한다.

Malmquist(1953)에 의해 처음으로 제안된 MPI모형은 Cave, Christensen, & Diewert (1992)에 의해 발전되어 현재와 같은 형태로 완성되었다. MPI모형의 거리함수는 DEA모형에서 말하는 기술적 효율성의 역수에 해당되므로 결과적으로 MPI모형은 DEA모형을 근거로 한 시계열적 분석 방법론이라 할 수 있다. 아래에서는 MPI모형의 수리식이 도출되는 과정을 간단히 살펴보기로 한다.

아래 식 (3)은 생산시스템에 비효율이 존재하는 경우로 실측치와 최대잠재산출간의 차이를 나타내는 것이다.

$$y^t < A(t)f(x^t) \dots\dots\dots \text{식(3)}$$

여기서 $A(t)$ 는 시간의 변화에 따른 생산함수의 이동인 기술변화를 나타내는 것이다. 식(3)과 같은 차이를 설명하기 위해 사용되는 것이 Shepherd(1970)의 거리함수인데, 이를 통해 실측치를 생산경계까지 이동시키게 되며, t 기의 산출거리함수(Output distance function) $D_o^t(x^t, y^t)$ 는 아래 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$D_o^t(x^t, y^t) = \text{Min } \{ \theta : (x^t, y^t/\theta) \in S^t \} \dots\dots\dots \text{식(4)}$$

$$= \frac{y_t}{A(t)f(x^t)}$$

식(4)의 S^t 는 t 기의 모든 투입-산출의 쌍으로서 생산가능집합(Production Possibility Set)이라고 한다.

한편, Cave, Christensen, & Diewert(1992)가 정의한 t 기의 산출지향 맘퀴스트 생산성 지수 (M_o^t)와 $t+1$ 기의 산출지향 맘퀴스트 생산성 지수 (M_o^{t+1})는 아래 식(5)와 같이 나타낼 수 있으며, 각 시점의 생산기술하에서 효율성 변화에 따른 생산성 변화를 나타낸다.

$$M_o^t = \frac{D_o^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_o^t(x^t, y^t)} \dots\dots\dots \text{식(5)}$$

$$M_o^{t+1} = \frac{D_o^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_o^{t+1}(x^t, y^t)}$$

Färe, Grosskopf, Norris, & Zhang(1994)은 Cave, Christensen, & Diewert(1992)가 정의한 맘퀴스트 생산성 지수를 기하평균하여 아래 식(6)과 같이 산출지향 맘퀴스트 생산성지수 ($M_o^{t,t+1}$)을 도출하였다.

$$M_o^{t,t+1} = [M_o^t \cdot M_o^{t+1}]^{1/2} \dots\dots\dots \text{식(6)}$$

$$= \left[\frac{D_o^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_o^t(x^t, y^t)} \frac{D_o^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_o^{t+1}(x^t, y^t)} \right]^{1/2}$$

또한, Färe, Grosskopf, Norris, & Zhang(1994)은 아래 식(7)과 같이 맘퀴스트 생산성지수를 효율성 변화와 기술변화로 분리하였다.

$$M_o^{t,t+1} = \frac{D_o^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_o^t(x^t, y^t)} \left[\frac{D_o^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_o^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})} \frac{D_o^t(x^t, y^t)}{D_o^{t+1}(x^t, y^t)} \right]^{1/2} \dots\dots\dots \text{식(7)}$$

효율성 변화는 추격잠재력(Catch-up Potential)을 반영하고, 기술변화는 혁신잠재력(Innovation Potential)을 반영하게 된다. 총생산성과 효율성, 기술변화는 모두 1을 중심으로 제각기 다른 방향을 나타낼 수 있다. 이는 설령 효율성과 기술이 모두 퇴보된 경우라도, 총생산성 자체는 증가할 수 있으며, 기술과 총생산성이 퇴보되어도, 효율성 자체는 향상될 수 있다는 의미이다.

MPI모형은 DEA 모형의 정태적 속성을 뛰어넘어 동태적 생산성 변화를 파악할 수 있게 하는 장점으로 인해 수많은 연구자들에 의해 매우 광범위한 영역에서 걸쳐 적용되어 왔다. 그러나, MPI모형은 Pasto & Lovell(2005) 등이 지적한 바와 같이 순환성 검증(Circular test)를 만족시키지 못한다.²⁾ 즉 3기간 이상을 비교하는 경우 지수로서 문제점이 발생한다는 것이다. Pasto

2) 이를 예를 들어 설명하면 2005년부터 2009년까지 누적된 지수 값과 2005년부터 2009년까지 전체 지수 값 사이에 차이가 발생한다는 것으로 맘퀴스트 생산성 지수는 서로 다른 시점의 생산기술 프런티어 중 하나를 선택해야 하는 문제를 기하평균을 통해 해결하기 때문에, 이러한 순환성 검증을 충족하기 어렵다고 보는 것이다.

and Lovell(2005)이 제안한 글로벌 맘퀴스트 생산성 지수(Global Malmquist Productivity Index)는 총생산성 지수를 효율성변화와 기술변화(생산변경과 글로벌 생산변경 사이의 거리비율)의 곱으로 나타냄으로써, 기하평균을 구하지 않아도 지수의 안정성을 유지할 수 있게 된다.

3. 선행연구 검토

본 연구는 DEA모형을 통해 우리나라 기계산업의 광역시·도별 효율성을 측정하고, 생산성의 변화 추이를 파악하고자 하는 것을 목적으로 하고 있다. 따라서, 본 연구의 선행연구 검토는 기계산업의 효율성을 분석하거나 생산성 변화 추이를 다룬 논저(論著)를 대상으로 진행되어야 할 것이다. 그런데 우리나라에서 기계산업만을 대상으로 효율성이나 생산성을 분석한 사례는 양적으로 상당히 희소한 편이라 할 수 있다. 본 연구에서는 이와 같은 연구상황을 고려하여 검토 범위를 기계산업에만 한정하지 않고, 기계산업이 다른 제조업과 더불어 분석대상에 포함된 경우 까지 검토범위를 확장하여 진행하고자 한다.

송동섭·김재준(2001)은 기계 및 장비 제조업 등 10개 제조산업을 대상으로 투입요소로는 고정자산, 원재료비, 종업원 수를, 산출물로는 매출액을 선정하고서 DEA모형을 통해 1996-1999년 기간 동안의 산업별 효율성을 분석하였다. 분석결과, IMF 이후 제조산업의 경영효율성이 향상되고 있다는 사실을 확인하였다.

주수현·이선영(2004)은 부산지역 94개 기계부품소재산업 클러스터의 2002년도 효율성 분석에 DEA모형과 Tobit기법을 적용하면서 투입변수로는 순자본스톡, 종사자 수, 당기제품 제조 원가를, 산출변수로는 매출액과 부가가치액을 선정하였다. 분석결과, 기계부품소재산업 내 집적은 강하게 나타났으나, 네트워크 및 혁신 시너지는 약한 것으로 나타났다.

허광숙(2005)은 우리나라 일반목적용 기계산업을 대상으로 1994-2003년 기간의 총요소생산성과 2004년의 기술적 효율성을 Cobb-Douglas 생산함수를 통해 측정하였는데, 실질부가가치액을 관심변수로, 실질자본액과 종업원 수(노동투입)를 설명변수로 선정하였다. 분석결과, 대상기간 중 일반기계산업의 총요소생산성이 크게 향상되었음을 확인하였다.

배미경(2008)은 일반목적용 기계, 가공 공작기계, 건설기계, 특수목적용 기계 등 4개 산업의 1991-2005년까지 미시 데이터를 대상으로 확률적 경계생산함수를 적용하여 부문별 총요소생산성 증가율의 기여요인을 파악하고자 하였는데, 자본요소로는 실질유형고정자산을, 노동요소로는 종사자 수를, 생산량은 실질부가가치액을 사용하였다. 측정결과, 일반목적용 기계제조업

을 제외한 나머지 산업의 기술적 효율성은 외환위기 이후 개선되었다는 사실을 확인하였다.

이광배·김창범(2013)은 일반기계 부품을 포함한 부품소재산업의 12개 품목에 대하여 종사자 수와 업체 수를 투입요소로, 생산액을 산출물로 선정하여 DEA/Window모형을 통해 1993-2009년까지의 정태적·동태적 효율성을 측정하였다. 분석결과, 제1차 급속이 가장 효율적인 것으로 나타났으며, 일반기계부품의 효율성 변화가 가장 작았던 것으로 나타났다.

노상환(2014)은 창원 소재 65개 기계산업 영위기업의 2009-2013년 효율성 및 생산성을 DEA모형과 맘퀴스트 기법을 통해 분석하였는데, 투입변수로는 고정자산, 인건비, R&D지출을, 산출변수로는 매출액과 당기순이익을 고려하였다. 분석결과, 창원 소재 기업의 효율성이 대체로 창원 외지역 기업의 효율성보다 낮다는 사실을 확인하였으며, 이 기간 동안 총요소생산성이 증가한 기업의 수 역시 창원 소재 기업이 적다는 결론을 얻었다.

이동주(2017)는 우리나라가 포함된 18개국 제조업을 일반기계산업 등 11개 제조부문으로 구분하여 2000-2015년 기간동안의 효율성을 확률적 프런티어 생산모형을 통해 실증하였는데, 투입변수로는 종업원 수, 순고정자산과 총고정자본형성의 합계액, 중간재 투입금액, 연구개발투자금액을 선정하고, 산출변수로 매출액과 부가가치액을 각각 고려한 2개 모형을 구축하였다. 분석결과, 대부분 제조업 부문에서 일본의 효율성이 가장 높은 것으로 나타났으며, 우리나라는 중국보다 높으나, 일본의 절반 내지 1/3 수준으로 나타났다.

조남권·김규환·이석진(2018)은 기계 및 전기전자산업 46개 중소·중견기업을 대상으로 DEA모형을 적용하여 연구개발투자의 효율성을 측정하고, 효율성에 미치는 영향요인을 파악하기 위해 Tobit분석을 수행하였다. 투입변수로는 연구개발비, 연구인력 수, 특허출원, 전담인력, 특허활용건수를, 산출변수로는 매출액을 선정하였는데, 대부분 기업의 비효율 원인이 기술적 측면에 있는 것으로 나타나 기술적 진보가 필요하다는 결론을 얻었다.

장영재·노상환(2018)은 2010년, 2015년의 광역지자체별 정태적 효율성을 측정하고, 같은 기간의 생산성 변화를 분석하였는데, 일반기계산업 등 매출액이 높은 10개 산업에 대해 종업원 수, 감가대손상각비, R&D 투자액을 투입변수로, 매출액과 영업이익을 산출변수로 선정하였다. 분석결과, 이 기간 동안 평균 생산성이 하락하였음을 확인하였다.

이동원·전정환(2019)은 73개 농기계산업 영위 중소기업을 대상으로 투입, 산출, 성과의 3단계 효율성 분석 프로세스를 구축·적용하고자 하였는데, 투입요소로는 종업원 수, 자산총계, 자본총계를, 산출요소로는 영업이익과 당기순이익, 성과요소로는 매출액을 선정하였다. 2018

년에 대한 분석결과, 효율성과 수익성이 낮은 Underdog 상태의 기업이 측정기업의 50%를 웃돌고 있다는 결론을 얻었다.

다음으로 산업의 효율성을 다루면서 의사결정단위(DMU)를 지역으로 설정한 선행연구를 살펴볼 필요가 있다. 마진희·안영효(2018)는 우리나라 관광산업의 광역시도별 효율성을 분석하면서 DEA모형과 맘퀴스트 생산성 지수모형을 적용하였으며, 서호준(2014)은 DEA모형을 적용하여 대구경북 금융산업의 효율성을 전국 16개 광역시도의 금융산업과 비교하였다. 서호준(2017)은 DEA모형 및 맘퀴스트 생산성 지수모형을 적용하여 인천지역 문화콘텐츠산업의 효율성을 전국 16개 광역시도와 비교하였다. 산업의 효율성을 지역 차원에서 다룬 선행연구들은 DEA모형과 맘퀴스트 생산성 지수모형을 활용한 경우가 다수였으며, 제조업과 같은 전통 산업보다는 금융서비스, 문화·관광산업 등 비제조 서비스업을 대상으로 하는 경우가 많았다. 따라서, 본 연구와 같이 기계산업만을 대상으로 광역자치단체별 효율성 격차를 분석한 사례는 거의 존재하지 않는 것으로 보임에 따라 본 연구의 접근방법은 시도 자체에 상당한 차별성이 있다고 볼 수 있다.

우리나라 기계산업의 효율성과 생산성 분석을 다룬 선행연구들은 비교적 다양한 분석대상과 기간을 대상으로 DEA모형 등 검증된 효율성 분석기법을 적용해왔던 것으로 판단된다. 그러나 대다수 연구가 제조산업 범주에 기계산업을 포함시키거나 다른 제조산업과의 비교에 치중함으로써, 우리나라 기계산업만을 대상으로 삼은 연구는 찾아보기 어려웠다. 또한, 특정 지역과 산업에 한정된 분석이 다수를 이루어 전체 광역자치단체 간 효율성 비교를 목적으로 한 연구는 드물었다. 본 연구는 이와 같은 연구상황에 착안하여 우리나라 기계산업 전체를 대상으로 광역시·도별 효율성 비교와 생산성 추이 변화를 분석함으로써, 광역지자체 관점의 기계산업 육성전략 도출을 위한 실증적 근거를 마련해보기로 한다.

III. 연구모형 설계

1. 투입·산출변수 설정

DEA모형을 통한 실증에서 가장 중요한 절차가 바로 투입·산출 변수, 즉 측정변수를 어떻게 선정할 것인가 하는 문제이다. 측정변수의 선정이 중요성을 갖는 이유는 어떠한 변수를 선정하느냐에 따라 산출되는 효율성 값에 큰 편차가 발생하기 때문인데, 이는 제2장에서 살펴본 바와 같다.

그러나 선정되는 변수값에 따라 분석결과에 차이가 발생하는 것은 DEA모형에 국한되어 발생하는 현상이 아니라 대부분 통계모형도 공통적으로 직면하게 되는 문제인 만큼 이를 근거로 DEA모형 자체의 유용성을 전면적으로 부정할 필요는 없을 것으로 보인다.

DEA실증절차에서 측정변수를 과학적·계량적으로 선정하기 위한 연구노력이 일부 이루어져 왔지만, 만족할 만한 성과에 이른 것으로는 보기 어렵다. 해외에서는 프로파일링기법, 목표계획법, 퍼지집합이론, 기회계약법 등 다양한 방법론을 통해 측정변수 선정에 시도하였으며, 국내에서도 Tofallis(1996)를 바탕으로 강지혜·백동현(2014), 김병철(2015), 박승·나중경(2015) 등이 DEA모형의 변수선정에 프로파일링기법을 적용한 바 있다. 다만, 이러한 접근에도 불구하고, , 마지막 단계에서는 연구자의 주관적 판단이 개입할 수밖에 없다는 점에서 계량적 변수선정 노력이 제대로 뿌리내린 것으로 보기 어렵다.

위에서 살펴본 바와 같이 측정변수의 선정을 계량화하기 위한 노력에도 불구하고, 아직까지 DEA실증절차에서 대다수 연구는 기존 사례에서 사용된 변수를 활용하거나, 연구자의 판단에 의해 결정하는 방법이 주류를 이루고 있다. 본 연구에서도 이와 같은 선행연구 상황 등을 감안하고, Bessent & Bessent(1980)가 제시한 변수선정에 관한 일반원칙³⁾을 고려하여 본 연구의 투입·산출 변수를 선정하고자 한다.

제2장 제3절에서 검토한 선행연구들의 측정변수 풀에서도 변수 선정을 위한 준거(準據)를 찾을 수 있는데, 이를 정리하면 아래 <표 2>와 같다.

<표 2> 변수별 선정 횟수

투입물	빈도수	선정 연구	산출물	빈도수	선정 연구
종사자 수	9	송동섭·김재준(2001) 주수현·이선영(2004) 허광숙(2005) 배미경(2008) 이광배·김창범(2013) 이동주(2017) 조남권 외(2018) 장영재·노상환(2018) 이동원·전정환(2019)	매출액	7	송동섭·김재준(2001) 주수현·이선영(2004) 노상환(2014) 이동주(2017) 조남권 외(2018) 장영재·노상환(2018) 이동원·전정환(2019)

3) 이는 첫째, 투입에서 산출까지 개념적 기초를 가지고 있어야 하며, 둘째, 측정된 투입에서 산출까지의 관계가 귀납적으로 추론될 수 있어야 하고, 셋째, 투입의 증가가 산출의 증가를 가져온다는 연관 관계가 존재하여야 하며, 넷째, 측정치에 0의 수치가 있어서는 안 된다는 것이다.

투입물	빈도수	선정 연구	산출물	빈도수	선정 연구
고정자산	5	송동섭·김재준(2001) 배미경(2008) 노상환(2014) 이동주(2017) 이동원·전정환(2019)	부가 가치	4	주수현·이선영(2004) 허광숙(2005) 배미경(2008) 이동주(2017)
원가 (재료비)	5	주수현·이선영(2004) 노상환(2014) 이동주(2017) 조남권 외(2018) 장영재·노상환(2018)	영업 이익	2	장영재·노상환(2018) 이동원·전정환(2019)
자본액	4	주수현·이선영(2004) 허광숙(2004) 이동주(2017) 이동원·전정환(2019)	당기 순이익	2	노상환(2014) 이동원·전정환(2019)

DEA실증에서 투입변수 선정은 일반적으로 생산의 3요소, 즉 노동, 토지, 자본 요소를 고려한다. <표 2>에서 나타난 바와 같이 투입변수로 가장 많이 선정된 종사자 수는 직원 수, 종업원 수 등을 포괄하는 “인력” 개념에 해당된다고 볼 수 있는데, 이는 생산의 3요소 중 “노동” 요소를 반영하기 위한 것이라 할 수 있다. 본 연구에서도 기계산업의 광역시·도별 종사자 수를 투입변수로 선정하였다.

투입변수 중에서 두 번째로 많이 선정된 고정자산은 유형자산을 포함하는 개념으로 생산의 3요소 중 “토지” 요소를 반영하기 위한 것이다. 여기서 말하는 토지는 단순히 물리적 차원의 토지를 뛰어넘어 생산에 필요한 물적 설비 일체를 의미하는 것으로 이해된다. 본 연구는 생산의 3요소 중 토지요소를 반영하기 위해 기계산업의 광역시·도별 유형자산 연말잔액을 투입변수로 삼았다. 본 연구에서 고정자산보다 더 좁은 개념인 유형자산을 투입변수로 선정한 이유는 유형자산이 기업의 영업활동과정에 보다 직접적으로 연관되어 있는 것으로 판단되었기 때문인데, 고정자산의 경우 투자자산, 무형자산, 이연자산까지 포괄함에 따라 유형자산에 비해 기업의 영업관련성이 다소 떨어지는 것으로 보이는 점을 고려했다.

생산의 3요소 중 하나인 자본요소를 고려할 필요가 있다는 의견이 있을 수 있으나, 본 연구에서 활용한 국가통계포털에서는 광역시·도별 자본 관련 데이터를 확보할 수 없었던 사유 이외에도,

자본요소의 성격이 토지요소와 상당 부분 중복된다는 차원을 고려하고자 하였다. 선행연구에서는 확률적 경제함수를 적용한 경우 자본요소로 고려한 변수가 바로 유형고정자산이었는데, 이는 본 연구에서 선정한 토지요소와 같은 변수이다. 또한, 변수의 숫자가 DMU 숫자에 비해 지나치게 많으면 DEA 실증점수를 전반적으로 하락시키는 경향 등을 고려하여 본 연구에서는 자본요소를 투입변수에 포함시키지 않았다.

위에서 살펴본 바와 같이 투입변수의 선정은 생산의 3요소를 고려한다면 어느 정도의 타당성을 갖출 수 있을 것으로 보인다. 이에 반해 산출물은 해당 사업이나 프로젝트, 산업 등이 영위하고 있는 핵심적·대표적 변수를 선정하여야 하므로 한층 더 어려운 작업이 될 수밖에 없다.

<표 2>에서 나타난 바와 같이 선행연구에서 가장 많이 선정된 산출변수는 매출액이었다. 매출액은 해당 기업적 측면에서 볼 때 기업활동의 최종결과물이라는 차원에서 가장 많은 선정 빈도를 보이는데, 최근의 연구경향은 “부가가치”가 매출액이나 생산액을 대체해가고 있다(이동주, 2017). 또한, 제조산업 역시 과거와는 달리 단순히 매출액보다는 부가가치를 강조하는 관점이 강화되고 있으며, 산업별 부가가치는 매출액과 매우 강한 상관관계⁴⁾를 갖고 있으므로 양자를 선택적으로 운용할 필요가 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 이와 같은 사유를 고려하여 기계산업의 광역시·도별 부가가치액을 산출변수로 선정하였다.

이밖에 산출변수로 고려할 수 있는 변수가 영업이익과 당기순이익이다. 이들 변수는 수익 창출을 제일의 목적으로 삼는 개별기업의 효율성 측정에서는 매우 중요한 의미를 가진다고 볼 수 있지만, 본 연구와 같이 산업적 관점에서 기계산업의 육성과 경쟁력 향상에 초점을 맞추면 산출변수로서의 대표성과 적합성이 다소 떨어진다고 할 수 있다. 또한, 선행연구에서 나타난 바와 같이 투입변수가 많은 경우에도 산출변수를 2개 이상 선정하지는 않는다. 이는 전통적인 회귀모형에서 종속변수를 1개로 설정하는 것과 무관치 않은 것으로 보이며, 본 연구에서도 투입·산출변수 간 균형을 위해 부가가치액만을 산출변수로 삼았다.

전체 DMU 숫자와 투입·산출변수 숫자 간의 관계에 관해 일반적으로 DMU의 수가 투입·산출변수의 합보다 최소 3배는 많아야 한다고 본다(Barros & Alves, 2003). 본 연구는 이러한 조건을 충족하고 있다($17 > 3(2 \times 1)$). 사실 위와 같은 등식은 최소한의 가이드라인이라 할 수 있으며, 이는 변수 숫자에 비해 DMU 숫자가 너무 적을 경우 발생하는 변별력 문제를 제어하기 위한

4) 매출액과 부가가치액에 대한 상관 분석결과, 양자 간 상관계수는 0.992에 이르러 매우 강한 상관관계를 보였다. 양 변수는 개념적으로 중첩 가능성이 있다. 전체 매출액의 일부를 이루는 것이 바로 부가가치이기 때문이다. 본 연구는 이와 같은 관점에서 산출변수로 두 변수 중 하나만을 선정하는 것이 보다 타당한 것으로 판단하였다.

것이다. 즉 효율적으로 판정되는 비율이 너무 높으면 안 된다는 것이다. 이렇게 볼 때 본 연구에서 투입변수나 산출변수를 1개 이상 더 선정해도 DMU 수가 충분하여 가이드라인을 충족시킬 수 있다고 볼 수도 있을 것이다. 그러나, 본 연구의 시뮬레이션 결과, 변수를 1개라도 추가할 경우 효율적으로 판정되는 비율이 크게 증가하는 경향성이 확인된 점을 감안하여 변수를 추가하지는 않았다.

상기와 같은 논의과정을 통해 선정된 본 연구의 투입·산출변수를 정리하면 아래 <표 3>과 같다.

<표 3> 본 연구의 측정변수

투입변수	산출변수
① 기계산업의 광역시·도별 종사자 수 ② 기계산업의 광역시·도별 유형자산의 연말잔액	① 기계산업의 광역시·도별 부가가치액

2. 분석범위 및 자료수집

본 연구는 2016-2020년의 5개년 기간을 대상으로 DEA모형을 통해 우리나라 기계산업의 광역시·도별 상대적 효율성을 분석하고, MPI모형을 통해 5개년 4개 시점에 대한 생산성 변화 추이를 분석하고자 하는 것을 목적으로 하고 있지만, 앞서 이론적 배경 부분에서 소개한 최신 분석기법인 퍼지 DEA모형과 초효율성 모형, 글로벌 맘퀴스트 생산성 지수 모형의 적용 여부에 관해 추가적으로 논의할 필요가 있을 것으로 판단된다.

퍼지 DEA모형은 데이터가 부정확하거나 경영자 요인 등 애매모호한 자료가 반영된 경우 적용 필요성이 크다고 할 수 있는데, 본 연구의 활용 자료들은 모두 국가가 공신력을 담보하는 국가통계로부터 입수한 것으로 퍼지 DEA모형의 배경이 된 애매모호한 상황과 관련된 자료로 보기는 어렵다. 물론 각 지역별 산업 상황이나 정책 요인 등에 있어서 정성적 요인이 전혀 존재하지 않는 것으로 볼 수는 없겠지만, 데이터 정확성이나 지역별 균질성 등은 충분히 인정되므로 본 연구에서는 퍼지 DEA모형을 적용하지 않는 것으로 결론내렸다.

초효율성 분석의 경우 효율적으로 판정된 DMU 상호 간의 우선순위 식별에 상당한 유용성을 제공한다고 볼 수 있다. 그러나 본 연구의 BCC모형에 의한 효율성 점수 시뮬레이션 결과에 따르면 효율적으로 판정된 DMU의 비율이 높지 않으며, 본 연구의 주된 관심은 가장 효율적인

DMU를 찾는 것보다 각 DMU들을 유형화하여 그룹별 개선대책을 마련하는 것에 맞춰져 있으므로 초효율성 모형을 통한 우선순위 식별의 실익이 크지 않을 것으로 판단되었다. 이에 따라 초효율성 모형을 적용하지 않는 것으로 하였다.

글로벌 맘퀴스트 생산성 지수 모형의 경우 기존 맘퀴스트 생산성 지수 모형의 단점을 극복했다는 측면에서 적용가능성을 충분히 고려할 필요가 있을 것으로 판단되었다. 다만, 장영재·양동현(2011)의 분석결과를 살펴보면 순환성은 충족되지 않는다 해도, 두 모형 간 실증결과에서의 차이는 상당히 미세한 것으로 나타나고 있다. 또한, 본 연구와 같이 특정 산업 분야의 효율성과 생산성을 다룬 선행연구들은 대다수가 기존 맘퀴스트 생산성 지수 모형을 활용한 것으로 보인다. 이러한 경향성은 생산성의 추이를 파악하는 맘퀴스트 생산성 지수의 유용성이 지수의 공리(axiom)를 충족하지 못하는 한계보다 훨씬 크기 때문인 것으로 보인다. 특히 장영재·노상환(2018)은 맘퀴스트 생산성 지수를 통해 제조업의 생산성 추이를 분석하였는데, 이들 중 장영재는 글로벌 맘퀴스트 생산성 지수를 사실상 국내에 처음으로 도입한 연구자라는 측면에서 기존 맘퀴스트 생산성 지수 모형의 효용 가치가 감소한 것으로는 판단되지 않는다. 위에서 살펴본 바와 같이 본 연구는 산업의 생산성 분석 분야에서 맘퀴스트 생산성 지수 모형의 활용도가 아직까지도 상당히 높다는 점을 고려하여 글로벌 맘퀴스트 생산성 지수 모형의 적용을 후속연구에 넘기고자 한다.

본 연구의 분석범위를 구체적으로 살펴보면 CCR모형과 BCC모형을 통해 효율성 점수를 구한 다음, 이들을 나누어 규모의 효율성을 산출한다. 또한, 각 광역지자체의 규모수익상태를 판별하여 투입증가전략이 얼마나 효과적인지 여부를 살펴볼 예정이다. CCR모형에서는 비효율적인 DMU로 나타났지만, BCC모형에서 효율적인 DMU로 나타났을 경우 비효율의 원인은 “규모”적인 측면에 있는 것이므로 본 연구의 DMU인 17개 광역시·도의 규모수익상태가 어떠한지에 관해 논의할 것이다.

또한, 효율적인 나타난 DMU가 지나치게 많을 경우, 예를 들어 효율적인 것으로 판정된 DMU 숫자가 전체의 절반을 넘는다면 이들 간의 우선순위를 도출하여야 할 필요가 있으며, 이 경우 초효율성 분석 등 또 다른 차원의 방법론 적용을 고려하는 경우가 있다. 그러나 DEA모형에서는 다른 DMU가 효율적인 모범집단으로 참조한 횟수를 통해서도 가장 효율적인 DMU에 대한 윤곽을 잡을 수 있으므로 이와 관련된 논의도 진행하고자 한다.

본 연구의 생산성 추이분석은 단순히 총생산성지수(MPI)의 산출에 그치지 않고, 규모효율성

변화, 순수 효율성 변화, 기술적 효율성 변화, 기술 변화 등 4개 요인으로 분해하여 총생산성지수에 미치는 영향을 규명할 예정이다. MPI분석에서 가장 중요한 시사점은 생산성의 추세가 상승하고 있는지 또는 하락하고 있는지에 따라 효율성 개선전략을 차별화하여 운영할 수 있다는 것인데, 본 연구에서도 광역자치단체별 생산성의 변화추이를 통해 각 지역 실정에 맞는 효율성 개선 전략에 관한 함의를 제시할 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구에서 사용된 투입·산출변수 데이터는 국가통계포털에서 제공하는 2020년 기준 「광업·제조업 조사」를 통해 획득하였으며, 이는 종사자 수 10인 이상 기업에 대한 설문에 기반하였다. 또한, 투입·산출변수 데이터의 가공처리에는 Microsoft사의 MS-Office 2016의 Excel이 활용되었으며, 효율성 분석 및 생산성 추이 분석에는 DEA/Malmquist 전용 분석프로그램인 EnPAS Version 1.0이 활용되었다.

3. 연구모형

상기에서 논의된 내용을 바탕으로 설계된 연구모형은 아래 <표 4>와 같다.

<표 4> 연구모형

절차	구분	변 수	출 처
효율성 측 정	투입	기계산업의 광역시·도별 종사자 수(명)	국가통계포털
		기계산업의 광역시·도별 연말 유형자산 잔액(백만원)	국가통계포털
	산출	기계산업의 광역시·도별 부가가치액(백만원)	국가통계포털
효율성 및 생산성 분석		① 기계산업의 광역시·도별 2016~2020년 투입방향 CCR·BCC 효율성점수 산출 ② 기계산업의 광역시·도별 2016~2020년 MPI 생산성 변화 추이 분석 ③ 광역자치단체별 효율성/생산성 개선전략 구축	

IV. 실증분석 결과

1. 효율성 분석 결과

〈표 5〉에 나타난 바와 같이 본 연구의 변수 간 상관관계는 모두 1% 유의 수준에서 통계적으로 유의미하였다. 종사자 수와 유형자산 잔액 간의 상관계수는 0.971이었으며, 종사자 수와 부가가치액 간의 상관계수도 0.992였고, 유형자산 잔액과 부가가치액 간의 상관계수도 0.976으로 각 변수 간 상관관계는 모두 매우 강한 양(+)의 상관관계에 있는 것으로 나타났다. 본 연구의 변수 간 상관관계는 매우 높지만, 본 연구는 다중회귀분석과는 차원을 달리하는 DEA 모형을 적용하기 때문에, 다중공선성의 영향은 크지 않을 것으로 판단된다.

위와 같은 분석 결과는 투입변수가 증가하면 산출변수도 증가하는 양(+)의 상관관계가 성립하여야 한다는 DEA 변수선정 원칙에 부합하는 것으로 볼 수 있다(Mostafa, 2009).

〈표 5〉 투입·산출 변수 간 상관분석 결과

구분	종사자 수	유형자산 잔액	부가가치액
종사자 수	1	-	-
유형자산 잔액	.971**	1	-
부가가치액	.992**	.976**	1

주) **는 1% 수준(양측검정)에서 유의

아래 〈표 6〉에 나타난 평균 효율성 점수를 먼저 살펴보면 CCR모형에 의할 때 2016년 79.3%, 2017년 79.9%, 2018년 78.2%, 2019년 80.6%, 2020년 75.8%로 나타났는데, 2016-2019년 까지 평균 효율성은 연도별로 유사한 수준을 유지하다가, 2020년 들어 다소 하락한 것으로 보인다. BCC모형에 의한 효율성 점수는 2016년 86.8%, 2017년 85.2%, 2018년 83.0%, 2019년 85.2%, 2020년 82.9%로 측정되었는데, 2018년에 다소 하락했던 효율성이 2019년 들어 다시 반등했다가, 2020년 들어 다시 하락한 것으로 나타났다.

〈표 6〉 효율성 분석 결과

구분	2016			2017			2018			2019			2020		
	CCR	BCC	SE	CCR	BCC	SE	CCR	BCC	SE	CCR	BCC	SE	CCR	BCC	SE
서울	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
부산	0.68	0.701	0.969	0.678	0.682	0.994	0.697	0.698	0.998	0.702	0.704	0.998	0.634	0.637	0.995
대구	0.644	0.68	0.947	0.675	0.683	0.989	0.693	0.694	0.999	0.683	0.684	0.998	0.579	0.579	0.999
인천	0.679	0.734	0.925	0.679	0.704	0.964	0.625	0.632	0.989	0.706	0.707	1	0.626	0.643	0.974
광주	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
대전	0.921	0.937	0.982	0.889	0.892	0.996	0.802	0.807	0.994	0.877	0.886	0.99	0.81	0.817	0.992
울산	0.873	0.986	0.886	0.884	0.916	0.964	0.76	0.761	1	0.847	0.848	0.999	0.848	0.902	0.94
세종	1	1	1	0.921	0.941	0.98	0.869	0.891	0.975	0.823	0.856	0.962	0.845	0.878	0.963
경기	0.771	1	0.771	0.815	1	0.815	0.843	1	0.843	0.801	1	0.801	0.745	1	0.745
강원	0.771	0.782	0.986	0.768	0.775	0.991	0.893	0.901	0.991	0.823	0.843	0.977	0.869	0.883	0.984
충북	0.783	0.784	0.999	0.845	0.851	0.992	0.837	0.838	0.999	0.898	0.9	0.999	0.863	0.893	0.966
충남	0.907	1	0.907	0.964	1	0.964	1	1	1	1	1	1	0.936	1	0.936
전북	0.82	0.833	0.984	0.814	0.815	1	0.788	0.789	0.999	0.798	0.801	0.996	0.647	0.65	0.996
전남	0.485	0.497	0.977	0.518	0.52	0.997	0.415	0.417	0.994	0.475	0.479	0.991	0.515	0.518	0.993
경북	0.723	0.815	0.888	0.715	0.747	0.958	0.737	0.738	1	0.767	0.775	0.99	0.721	0.775	0.93
경남	0.823	1	0.823	0.77	0.956	0.806	0.825	0.951	0.868	0.893	1	0.893	0.728	0.919	0.792
제주	0.598	1	0.598	0.65	1	0.65	0.514	1	0.514	0.603	1	0.603	0.528	1	0.528
평균	0.793	0.868	0.92	0.799	0.852	0.945	0.782	0.83	0.951	0.806	0.852	0.953	0.758	0.829	0.925
최대값	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
최소값	0.485	0.497	0.598	0.518	0.52	0.65	0.415	0.417	0.514	0.475	0.479	0.603	0.515	0.518	0.528

DEA모형은 횡단면적 분석을 가정하는 것이므로 이를 통해서 연도별 효율성 변화를 단정하기 어려운 것은 사실이다. 효율성의 정확한 추세 변화를 살펴보기 위해서는 MPI모형을 활용할 필요가 있는데, MPI모형에 따른 생산성 변화와 DEA모형에 따른 효율성 변화 간의 비교를 통해 효율성의 변화 원인을 다각적인 측면에서 파악할 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 기계산업의 전반적인 효율성 수준이 CCR모형의 경우 70%대 후반, BCC모형의 경우 80%대 중반이라는 것은 기계산업이 우리나라 제조업의 주력산업이라는 관점에서 이미 효율성 수준 자체가 일정 수준 이상에 도달해 있을 가능성을 시사하는 것으로 보인다. 또한, 최근 연도인 2020년의 효율성 수준이 그 이전 시점보다 낮게 측정된 것은 코로나19에 따른 사회적 거리두기의 영향이 일부 작용한 결과로 추정된다.

한편, 효율적인 것으로 판정된 DMU 수는 CCR모형에 의할 때 2016년 3개, 2017년 2개, 2018-2019년 3개, 2020년 2개로 나타났다. BCC모형에 의할 때 2016년 7개, 2017-2018년 5개, 2019 6개, 2020년 5개로 나타났다. 효율적으로 판정하는 비율이 전체 DMU의 50%를 넘게 되면 실증모형의 식별력이 문제될 수 있지만, 본 연구에서 효율적으로 판정된 비율이 50%를 넘은 사례는 존재하지 않아 본 연구모형의 식별력에 별다른 문제는 없는 것으로 판단된다.

연도·모형에 관계없이 효율적인 것으로 나타난 광역지자체는 서울과 광주였다. 서울과 광주는 다른 지역에 비해 상대적으로 기계산업의 저변이 넓지 못한 편인데, 한정된 지역 내 자원과 역량을 상당히 효율적으로 관리하여 궁극적으로 높은 효율성을 견인했던 것으로 보인다. 충남 지역의 경우 일부 연도에 약한 수준의 기술적 비효율이 존재했던 것으로 나타났지만, 5년 내내 규모의 비효율을 제외한 순수 기술적 효율성은 100%로 나타났다.

경기 지역의 경우 기술적 효율성은 높지 않은 것으로 나타났지만, 순수 기술적 효율성은 5개년 내내 효율적이었던 것으로 분석되었다. 이는 경기 지역이 우리나라 기계산업에서 차지하는 절대적 비중을 감안해 볼 때 규모의 비효율을 관리해나가야 할 필요가 있음을 시사하는 것으로 이해된다. 제주 지역 역시 기술적 효율성은 높지 않았지만, 순수 기술적 효율성은 5년 내내 100%로 나타났는데, 제주 역시 규모에 비효율이 존재하고 있는 것으로 볼 수 있다. 다만, 제주의 경우 경기와는 정반대의 논리로 설명할 필요가 있다. 즉 경기 지역이 압도적으로 큰 규모가 문제였다면 제주 지역은 작은 규모가 문제였던 것이다.

세종 지역의 경우 다른 지역에 비해 기계산업의 규모가 매우 열악한 것으로 나타났지만, 상대적 운영은 비교적 효율적이었던 것으로 볼 수 있다. 2016년에는 기술적 효율성 및 순수 기술적 효율성이 모두 효율적인 것으로 측정되었던 것이다. 그러나 2017년부터는 전반적으로 효율성이 저하되는 경향을 보였다. 경남지역은 5년 내내 기술적 효율성이 비효율적인 것으로 측정되었지만, 2016년과 2019년에는 순수 기술적 효율성이 100%로 나타났다.

5개년 효율성 점수가 가장 낮은 지역은 전남이었는데, 5년 내내 50% 전후의 효율성 점수를 나타내었다. 전남의 효율성이 낮은 것은 투입요소에 비해 산출요소가 가장 낮았기 때문이며, 이는 동일 경제권이라고 할 수 있는 광주 지역의 높은 효율성과 대비되는 부분이다. 결국 동일 경제권인 광주 지역으로 고부가가치 업종이 집중됨에 따라 전남 지역의 효율성이 상대적으로 낮게 측정된 것으로 이해할 수 있다. 이밖에도 부산, 대구, 인천 등 광역시 지역의 효율성 역시 50~60%대에 머물러 있어 상대적으로 낮은 수준을 보였다. 전북 지역은 2019년까지 효율성

순위에서 중위 그룹에 속했으나, 코로나19 경제위기가 심화된 2020년에는 효율성이 크게 하락한 것으로 나타났다.

우리나라 기계산업의 광역시·도별 효율성을 분석한 결과, 서울, 광주와 같이 기계산업의 저변이 넓지 못한 지역에서의 효율성이 오히려 높게 측정되었는데, 이는 기계산업에 특화된 지역들의 효율성이 오히려 낮다는 것을 의미하는 것으로 양적 확장보다는 투입과 산출의 구조를 보다 합리적으로 운영해나갈 필요가 있을 것으로 생각된다. 특히, 우리나라 기계산업의 메카인 경기 지역과 경남 지역의 경우 규모의 효율성이 낮은 것으로 나타난 만큼 이에 대한 정확한 분석과 함께 차별화된 운영전략이 필요할 것으로 보인다.

〈표 7〉 광역시·도별 규모수익상태와 비효율 원인

구분	2016			2017			2018			2019			2020		
	규모 수익	비 효율 원인	참조 횟수	규모 수익	비 효율 원인	참조 횟수	규모 수익	비 효율 원인	참조 횟수	규모 수익	비 효율 원인	참조 횟수	규모 수익	비 효율 원인	참조 횟수
서울	CRS	-	5	CRS	-	8	CRS	-	5	CRS	-	4	CRS	-	4
부산	DRS	기술	0	DRS	기술	0	IRS	기술	0	IRS	기술	0	DRS	기술	0
대구	DRS	기술	0	DRS	기술	0	IRS	기술	0	IRS	기술	0	IRS	기술	0
인천	DRS	기술	0	DRS	기술	0	DRS	기술	0	IRS	기술	0	DRS	기술	0
광주	CRS	-	9	CRS	-	11	CRS	-	8	CRS	-	8	CRS	-	11
대전	DRS	기술	0	IRS	기술	0	IRS	기술	0	IRS	기술	0	IRS	기술	0
울산	DRS	기술	0	DRS	기술	0	IRS	기술	0	DRS	기술	0	DRS	기술	0
세종	CRS	-	4	IRS	기술	0	IRS	기술	0	IRS	기술	0	IRS	기술	0
경기	DRS	규모	0	DRS	규모	1	DRS	규모	1	DRS	규모	0	DRS	규모	1
강원	DRS	기술	0	IRS	기술	0	IRS	기술	0	IRS	기술	0	IRS	기술	0
충북	DRS	기술	0	DRS	기술	0	IRS	기술	0	IRS	기술	0	DRS	기술	0
충남	DRS	규모	5	DRS	규모	7	CRS	-	7	CRS	-	7	DRS	규모	6
전북	DRS	기술	0	IRS	기술	0	IRS	기술	0	IRS	기술	0	IRS	기술	0
전남	DRS	기술	0	IRS	기술	0	IRS	기술	0	IRS	기술	0	IRS	기술	0
경북	DRS	기술	0	DRS	기술	0	IRS	기술	0	DRS	기술	0	DRS	기술	0
경남	DRS	규모	1	DRS	기술	0	DRS	기술	0	DRS	규모	1	DRS	기술	0
제주	IRS	규모	0	IRS	규모	5	IRS	규모	10	IRS	규모	9	IRS	규모	6

〈표 7〉은 17개 광역시·도의 연도별 규모수익상태와 비효율의 원인, 참조횟수를 분석한 것이다. 규모수익상태는 앞서 언급한 바와 같이 불변규모수익(CRS)과 가변규모수익(VRS)으로 구

분되며, 가변규모수익은 투입 1단위 증가에 대해 산출이 1단위 증가에 미치지 못하는 체감규모 수익(Decreasing Returns to Scale: 이하 DRS)과 투입 1단위 증가에 대해 산출이 1단위 증가를 상회하는 체증규모수익(Increasing Returns to Scale: 이하 IRS)으로 나누어진다.

〈표 7〉의 연도별 규모수익상태를 살펴보면 2016년의 경우 CRS 3개, DRS 13개, IRS 1개로 나타났으며, 2017년은 CRS 2개, DRS 9개, IRS 6개로 나타났다. 2018년에는 CRS 3개, DRS 3개, IRS 11개였으며, 2019년은 CRS 3개, DRS 4개, IRS 10개였다. 2020년에는 CRS 2개, DRS 8개, IRS 7개로 나타났다. 연도별 규모수익상태의 경향은 2016-2017년까지는 DRS가 다소 많았다가, 2018-2019년 들어 IRS가 훨씬 많아졌으며, 2020년에는 DRS와 IRS가 비슷한 비중을 나타냈다. 이와 같은 규모수익상태는 광역지자체별로 차별화된 투입전략을 구사해야함을 의미한다. 규모가 작은 것에 비효율의 원인이 존재하여 5년 내내 IRS로 나타난 제주 지역의 경우 적절한 투입·산출 증가전략을 시도할 필요가 있으며, 규모수익상태가 DRS로 규모가 큰 것에 비효율이 있는 경기 지역의 경우 투입·산출 증가전략에 신중을 기할 필요가 있을 것으로 생각된다.

앞서 살펴본 바와 같이 CCR모형에 의할 때에는 비효율적이었지만, BCC모형에 의할 때 효율적인 것으로 나타났다면 이는 규모적 측면에 비효율의 원인이 있음을 의미한다. 17개 광역시·도의 연도별 비효율 원인을 기술적 측면과 규모적 측면으로 대별해보면 2016년의 경우 기술적 비효율이 10개, 규모적 비효율이 4개였으며, 2017년과 2018년의 경우 기술적 비효율과 규모적 비효율이 각각 12개와 3개였다. 2019년의 경우 기술적 비효율이 11개였으며, 규모적 비효율이 3개였다. 2020년에는 기술적 비효율이 12개, 규모적 비효율이 3개로 나타났다.

비효율의 질적인 측면을 고려해보면 기술적 측면에 비효율이 있는 경우에는 투입이나 산출을 고정시킨 상태에서 산출이나 투입을 늘리거나 줄여야 되기 때문에, 비효율의 개선이 상대적으로 어려운 반면, 규모의 비효율은 투입과 산출을 모두 포괄하는 전체 규모를 줄이거나 늘리면 되기 때문에 효율성 개선에 따르는 고통이나 장애는 상대적으로 덜하다고 볼 수 있다. 따라서 규모에 비효율이 존재하는 광역지자체의 경우 효율성 개선이 훨씬 용이한 것으로 해석할 수 있을 것이다.

참조횟수는 비효율적으로 운영되고 있는 다른 DMU가 해당 DMU를 모범(준거)집단으로 삼는(참조하는) 빈도를 의미하는 것으로 참조횟수가 많은 DMU는 실제로도 효율적으로 운영되고 있을 가능성이 높고 효율적인 DMU 중에서도 효율성이 가장 높다는 것을 의미한다.

17개 광역시·도 중 가장 참조횟수가 많았던 지역은 광주 지역으로 총 47회였다. 충남 지역은

총 32회 참조되어 두 번째였으며, 제주 지역과 서울 지역이 각각 30회, 26회 참조되었다. 5년 내내 순수 기술적 효율성이 100%로 측정된 바 있는 경기 지역은 규모가 너무 커서 다른 지역의 참조대상으로는 다소 부적합하다고 할 수 있는데, 총 3회 참조되는 데 그쳤다.

2. 생산성 추이 분석 결과

아래 <표 8>은 2016-2020년의 5개년 4개 시점에 대한 시계열 평균 생산성 지수를 나타낸 것이다.

<표 8> 시계열 평균 생산성 지수

구분	TECI	TCI	PECI	SECI	MPI
T2(16년-17년)	1.0115	0.9926	0.9835	1.0285	1.004
T3(17년-18년)	0.9699	0.9943	0.9684	1.0015	0.9644
T4(18년-19년)	1.0373	0.9775	1.0313	1.0058	1.0139
T5(19년-20년)	0.9377	1.0752	0.9693	0.9673	1.0082
기하평균	0.9884	1.0092	0.9878	1.0005	0.9974

<표 8>의 첫 번째 행, 두 번째 열에 표시된 TECI는 기술적 효율성 변화지수(Technical Efficiency Change Index)를 의미하며, TCI는 기술변화지수(Technical Change Index)를 나타낸다. PECI는 순수 효율성 변화지수(Pure Efficiency Change Index)를 의미하고, SECI는 규모효율성 변화지수(Scale Efficiency Change Index)를 나타낸다. 앞서 언급한 바와 같이 MPI모형은 DEA모형과 같은 논리 구조를 갖기 때문에, PECI와 SECI를 곱하여 TECI를 구할 수 있으며, TECI와 TCI⁵⁾의 곱을 통해 MPI를 구할 수 있다.

<표 7>에서 보는 바와 같이 4개 시점 기간 동안 17개 광역시·도별 기계산업의 총생산성은 0.26% 감소한 것으로 나타났는데, 2017-2018년 기간의 생산성 하락(3.56%)이 전체 기간의 생산성 하락에 주원인이었던 것으로 분석되었다. 2017-2018년 기간을 제외한 2016-2017년 기간(0.4%)과 2018-2019년 기간(1.39%), 2019-2020년 기간(0.82%)에는 생산성이 상승한 것으로 나타났기 때문이다.

5) TCI는 DEA모형과 비교해 볼 때 가장 대비되는 부분의 MPI모형의 핵심요소를 이룬다. TCI는 기술변화지수를 말하는데, 결국 이는 생산기술의 변화를 의미한다. 이러한 생산기술의 변화는 효율적인 변경선(Frontier)이 변경된다는 것이므로 TCI가 크게 변화할 경우 그 사유에 대한 면밀한 분석이 필요하다.

이 기간 중 생산변경의 이동을 의미하는 TCI가 0.92% 상승하는 데 그쳤지만, 최근 기간인 2019-2020년 기간에 7.52% 상승하여 생산기술의 비약적인 진보가 이루어졌던 것으로 판단된다. 물론 나머지 3개 시점에서 생산기술이 퇴보한 것에 대한 기저효과가 반영된 측면도 존재하겠으나, 생산기술이 향상되는 방향으로 전환된 것은 고무적인 현상이라 할 수 있다. 이와 같은 생산기술의 진보가 구체적으로 어떠한 측면에서 기인하는지를 파악하는 것은 결코 쉬운 과제가 될 수 없겠으나, 코로나19가 가져온 경제·산업적 패러다임 변화에 대응하기 위한 우리나라 기계산업의 전산업적 노력과 정책적 뒷받침이 상당 부분 작용했을 것으로 추정해볼 수 있다.

5개년 기간 중 TECI와 PECI는 각각 1.16%와 1.22% 하락하였으며, SECI는 0.05% 상승하였는데, 규모효율성의 변화보다는 순수 효율성의 하락이 전체 기술적 효율성의 하락에 큰 영향을 미쳤다고 할 수 있다. 결국 이 기간 중에는 규모의 문제보다는 투입과 산출의 구조에 따른 순수 기술적 요인이 총생산성을 하락시킨 주된 원인이라 할 수 있는데, 향후 생산성 추이를 상승으로 전환시키기 위해서는 투입에 대비하여 산출을 늘리거나, 또는 산출에 대비하여 투입을 줄이는 방식의 산업합리화 전략이 필요할 수 있을 것으로 보인다.

5개년 기간 동안 17개 광역시·도별 기계산업의 생산성이 근소하게나마 하락한 것은 고비용 구조를 지속되고 있는 우리나라 제조업 전반의 산업환경과 밀접하게 연관되어 있는 것으로 볼 수 있는데, 광역시·도별로 생산성의 변화추이를 파악한다면 생산성의 상승과 하락을 주도하고 있는 지역을 판별하여 보다 차별화된 육성전략을 수립하는 데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

아래 <표 9>는 17개 광역시·도별 평균 생산성 지수를 분석한 결과이다.

<표 9> 광역시·도별 평균 생산성 지수

광역시·도별	TECI	TCI	PECI	SECI	MPI
서울	1.0000	0.9485	1.0000	1.0000	0.9485
부산	0.9827	1.0265	0.9763	1.0065	1.0087
대구	0.9736	1.0208	0.9605	1.0137	0.9939
인천	0.9801	1.0230	0.9675	1.0130	1.0026
광주	1.0000	1.0138	1.0000	1.0000	1.0138
대전	0.9686	0.9925	0.9663	1.0023	0.9614
울산	0.9926	1.0265	0.9780	1.0149	1.0189
세종	0.9587	1.0051	0.9679	0.9905	0.9635

광역시·도별	TECI	TCI	PECI	SECI	MPI
경기	0.9915	1.0038	1.0000	0.9915	0.9952
강원	1.0304	0.9839	1.0311	0.9994	1.0139
충북	1.0246	1.0265	1.0330	0.9918	1.0517
충남	1.0080	1.0253	1.0000	1.0080	1.0336
전북	0.9426	1.0020	0.9398	1.0029	0.9444
전남	1.0148	0.9993	1.0106	1.0041	1.0141
경북	0.9990	1.0197	0.9874	1.0117	1.0187
경남	0.9697	1.0265	0.9792	0.9904	0.9954
제주	0.9696	1.0160	1.0000	0.9696	0.9851
기하평균	0.9884	1.0092	0.9878	1.0005	0.9974

〈표 9〉에 따르면 17개 광역시·도 중 생산성이 상승한 곳은 9개, 하락한 곳은 8개로 나타나 상승·하락의 비중이 거의 대등했다. 상승 폭이 가장 컸던 광역지자체는 충북 지역으로 5.17% 증가하였으며, 충남 지역이 3.36% 증가하여 그 뒤를 이었다. 충북 지역의 생산성 향상은 순수 효율성, 기술진보, 기술적 효율성이 모두 상승한 것에 기인한 것으로 보이는데, DEA모형에 의할 때 충북 지역의 효율성이 2016년 70% 후반에서 2020년 80% 후반으로 상승한 측정결과치와 같은 맥락으로 판단된다. 이 밖에 울산 지역과 경북 지역이 각각 1.89%, 1.87% 상승한 것은 나타났다. 하락 폭이 가장 컸던 광역지자체는 전북 지역으로 5.56% 감소하였으며, 서울 지역이 5.15% 감소하여 두 번째로 큰 낙폭을 보였다. 전북 지역의 생산성이 하락한 것은 DEA모형을 통한 효율성 점수 측정결과와도 일맥상통하는 결과라 할 수 있는데, 순수 효율성이 6.02% 감소한 것이 주된 하락 사유였던 것으로 판단된다. 이밖에 대전 지역과 세종 지역도 각각 3.86%와 3.65% 감소하여 그 뒤를 이었다.

위와 같이 생산성 변화의 추이를 분석해봄으로써, 다양한 효율성 개선전략을 마련하여 시행해 볼 수 있을 것이다. 특히 중앙-지방 정부의 산업정책방향을 정책자금 배정이나 신용보증 공급과 같은 정책금융수단과 연계시킨다면 정책효율성은 물론 정책 간 시너지 창출 측면에서 상당한 의미를 가질 수 있을 것으로 판단된다. 이와 같은 전략 방향성을 바탕으로 광역시·도별 효율성 개선전략의 개요를 설계해본다면 아래 〈표 10〉과 같을 것이다.

〈표 10〉 효율성 수준과 생산성 방향에 따른 정책대안

효율성 수준	생산성 방향	해당산업	정책대안
높음	증가	광주, 충남	<ul style="list-style-type: none"> • 적극적인 중기금융 정책이 필요한 분야 • 정책금융 지원 확대, 투자연계 등 다각적인 지원 필요
높음	감소	서울, 경기, 경남, 제주	<ul style="list-style-type: none"> • 현상유지 전략(Wait and See) • 4년 생산성 비교가 충분치 않기에 향후 3-4년 추이를 지속 관찰할 필요가 있음
낮음	증가	부산, 인천, 울산, 강원, 충북, 전남, 경북	<ul style="list-style-type: none"> • 규모 효율성이 낮은 분야에 적극적인 정책 필요 • 규모가 비대한 분야는 자산 구조조정을 통해 효율성 개선 • 규모가 작은 분야는 적극적인 투자로 규모의 경제 실현을 위한 지원 강화
낮음	감소	대구, 대전, 세종, 전북	<ul style="list-style-type: none"> • 체계적·단계적 구조조정 검토 필요 • 정책금융 졸업제 등 단계적 구조조정을 통한 경기 정착률 시도 등

〈표 10〉에 기술된 내용은 본 연구의 정책제안에서 핵심을 이루기 때문에, 좀 더 상세히 살펴볼 필요가 있다고 판단된다. 먼저 효율성을 높거나 낮게 구분한 사유부터 설명해보면 앞서 제시한 〈표 6〉의 효율성 분석 결과, CCR 모형이나 BCC 모형에 의한 효율성 점수가 5개년 기간 동안 적어도 1회 이상 100%로 측정되었을 경우 효율성이 높은 지역으로 분류하였다. 효율성의 절대 점수가 비교적 높더라도, 100%로 측정된 적이 없다면 효율성이 낮은 지역으로 분류하였다. 생산성의 증가/감소 여부는 MPI 점수 1을 기준으로 구분하였다.

이처럼 효율성 수준과 생산성의 방향을 바탕으로 우리나라 기계산업 육성을 위한 전략 조합이 가능할 것으로 판단되었다. 효율성 수준이 높고, 생산성도 증가하는 추세라면 이미 확보한 경쟁 우위 국면을 굳히기 위해 적극적인 산업 및 금융 지원정책이 필요할 것으로 본다. 쉽게 말해 승리를 완전한 것으로 하기 위한 노력이 이루어져야 한다는 것이다. 현재 효율성 수준은 높지만, 생산성이 감소하는 추세라면 현상유지 전략(Wait and See)이 필요할 수 있다. 이미 효율성 수준이 높기 때문에, 생산성 추세는 단기적으로 하락할 수 있다는 점을 고려하여 보다 장기적 추세를 관찰하여야 한다는 것이다. 본 연구의 실증결과는 비교적 단기라 할 수 있는 5개년 4개 시점이므로 향후 장기 시계열을 기반으로 한 추가 분석을 통해 산업전략을 설정할 필요가 있을 것으로 보인다.

효율성 수준이 낮지만, 생산성이 증가하는 추세라면 투-트랙(two-track) 전략을 고려할 수 있다. 본 연구에서 효율성이 낮은 것으로 평가된 지역은 규모가 비대하든, 과소하든 그 규모(Scale)에 비효율이 있다고 할 수 있다. 규모가 비대하다면 자산 구조조정을 통해 효율성을 개선할 수 있고, 규모가 과소하다면 보다 적극적인 투자를 통해 규모의 효율성을 제고하는 투-트랙 전략이 필요할 수 있다는 것이다. 효율성 수준이 낮고, 생산성도 감소하는 추세라면 체계적인 산업 구조조정을 추진하되, 정책금융 졸업제 등을 통해 단계적인 구조조정이 필요할 것으로 판단된다. 효율성/생산성이 모두 부진한 지역의 경우 고강도의 구조조정이 불가피하지만, 경기연착륙 등을 고려하여 단계적인 구조조정을 고려하여야 한다는 것이다.

여기서 주의할 점은 기계산업의 저변이 취약한 서울과 광주의 효율성이 매우 높게 측정된 부분인데, 이는 어느 정도 인프라를 갖춘 지역과는 차원을 달리하여 정책적 함의를 도출하여야 할 것으로 보인다. 효율성은 높으나, 생산성이 낮아지는 추세에 있는 서울의 경우 현상유지 전략으로 충분할 것이므로 자원과 역량이 소진될 가능성이 크지 않지만, 광주의 경우 절대 우위 지속을 위해 상당한 노력이 기울여질 필요가 있다는 정책대안이 제시되었기 때문이다. 광주 지역 기계산업의 구조에 대한 정확한 이해가 선결되어야 하겠지만, 관련 인프라 구축이나 신성장산업으로서의 기계산업 유치 등 산업정책적 의사결정을 위해서는 보다 심도 있는 논의가 뒤따를 필요가 있을 것으로 판단된다.

위와 같은 정책대안들은 본 연구의 DEA/MPI 실증 결과를 바탕으로 예시적인 차원에서 제시된 것인 만큼 이들을 즉각적으로 실시하는 것보다는 여타 산업정책정보 등과 결부시켜 정책 함의로서 접근한다면 보다 나은 정책성과 창출이 가능할 수 있을 것으로 예상된다.

V. 결론: 요약과 시사점

본 연구는 제조업 비중이 높은 산업 특성으로 인해 우리나라가 코로나19 경제위기로부터 가장 먼저 벗어날 수 있었음에 주목하고, 제조업 중에서도 전·후방연관효과가 크고 중소기업 비중이 높은 기계산업에 대해 광역자치단체별로 특화된 산업육성전략 도출을 위해 전국 17개 광역시·도별 효율성과 생산성 변화 추이를 분석하였다.

구체적으로 분석범위를 살펴보면 2016-2020년의 5개년을 대상기간으로 설정하는 한편, 국내외적으로 효율성 분석 분야에서 가장 높은 활용도를 보이는 DEA모형과 MPI모형을 실증기법으로 선정하고, 투입변수로는 광역자치단체별 기계산업의 종사자 수와 유형자산 연말 잔액을, 산출변수로는 광역자치단체별 기계산업의 부가가치액을 고려하였다.

DEA모형을 통해 광역시·도별 효율성을 분석한 결과, 모형·연도에 관계없이 서울과 광주 지역의 효율성이 가장 높은 것으로 나타났다. 경기와 제주 지역은 규모에는 비효율성이 존재했으나, 순수 기술적 효율성은 100%로 측정되었다. 이 밖에 세종과 경남 지역의 효율성도 비교적 높았던 것으로 나타났다. 효율성이 가장 낮게 평가된 지역은 전남으로 나타났다.

최근 연도인 2020년의 광역자치단체별 규모수익상태는 체감규모수익상태와 체증규모수익상태에 있는 DMU 수가 엇비슷한 것으로 측정되었으며, 규모가 큰 경기 지역과 규모가 작은 제주 지역은 규모수익상태를 근거로 차별화된 자원 배분 및 운영전략을 구사하여야 할 것으로 보인다.

효율적으로 평가된 DMU 중에서도 가장 효율적인 DMU를 판별하기 위해 참조횟수를 고려할 수 있으며, 광주, 충남, 제주, 서울 지역 순으로 참조횟수가 많았던 것으로 나타났다.

2016-2020년 기간 동안 우리나라 기계산업의 총생산성은 0.26% 감소하였으며, 총생산성의 하락은 주로 Peci 감소에 주로 기인하고 있지만, 이 시기 TCI는 0.92% 상승하였을 뿐만 아니라 최근 기간의 TCI가 크게 증가하여 향후 생산기술의 진보가 기대되었다. 광역시·도별 평균 생산성이 증가한 곳과 감소한 곳의 비중은 엇비슷한 것으로 나타났으며, 충북, 충남, 울산, 경북 등의 총생산성은 상승한 것으로, 전북, 서울, 대전, 세종 등의 총생산성은 하락한 것으로 나타났다.

효율성 수준과 생산성의 방향을 고려하여 다음과 같은 정책대안을 제시할 수 있을 것이다. 효율성과 생산성이 모두 높은 지역은 적극적인 금융정책을 통해 집중적인 산업육성이 필요할

것으로 보이며, 효율성은 높으나, 생산성이 낮은 지역은 지속적으로 추이를 관찰하는 현상유지 전략이 타당할 것으로 판단된다. 효율성은 낮으나, 생산성이 높은 지역의 경우 규모가 비대한 분야는 자산 구조조정 등을 통한 효율성 개선이 필요하고, 규모가 작은 분야는 적극적 투자로 규모의 경제를 실현할 필요가 있을 것으로 보인다. 효율성과 생산성이 모두 낮은 지역은 체계적이고 단계적인 구조조정 전략이 필요할 것으로 판단된다.

상기와 같은 분석결과를 토대로 다음과 같은 정책적 시사점을 제시할 수 있다.

첫째, 기계산업의 여러 차원(Dimension)을 고려하여 다각적인 효율성 분석이 이루어질 필요가 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 광역시·도를 DMU로 설정하여 기계산업 발전을 위한 지역 차원의 특화전략 도출을 목적으로 하였으나, 기계산업에 대한 글로벌 비교나 제조업종 내 비교 등 매우 다양한 조합을 통한 접근이 이루어진다면 적실성 있는 정책대안 도출을 위한 밑거름이 될 수 있을 것으로 기대된다.

둘째, 효율성 수준과 생산성 변화 방향을 종합적으로 감안한 구조조정 전략을 수립하여야 할 것으로 판단된다. 본 연구의 분석결과에서 나타난 바와 같이 효율성 수준과 생산성의 방향이 상이하게 나타난 지역이 적지 않은데, 이를 고려하여 맞춤형 효율성 개선 전략을 추진할 필요가 있다는 것이다. 각 지역이 처한 상황이 제각기 다른 만큼 기계산업 진흥이라는 정책목표를 달성하기 위한 심도 있는 정책대안을 개발·발굴할 필요가 있을 것으로 보인다. 예를 들어 정책금융과 산업정책 간의 연계를 통해 효율성이 낮고 생산성도 하락하고 있는 지역의 기계산업에 대해서는 중앙정부-지방정부-정책금융기관 간 정책협업을 통해 구조조정 전략을 추진해나가는 것도 고려해 볼 수 있을 것으로 생각된다.

셋째, 중앙정부-지방정부 차원의 연구개발 지원노력이 필요하다. MPI모형을 통한 실증결과에서도 나타난 바와 같이 기술변화지수의 증가는 총생산성 증가에 매우 큰 영향을 미치기 때문에, 지역별 꾸준한 연구개발 노력이야말로 기계산업의 생산성 향상을 위한 첩경이 될 수 있을 것으로 보인다. 이와 같은 연구개발 지원노력은 해당 지역의 현재 효율성 수준과 성장가능성, 국가경제에 대한 기여도 등을 종합적으로 고려하여 효율적으로 이루어져야 할 것이다. 최근 우리나라의 연구개발지원이 효율적으로 이루어지지 못하고 있다는 연구결과 등을 감안할 때 산업 자체적인 효율성뿐만 아니라 정부의 지원 역시 효율성 있게 이루어져야 한다는 것이다.

넷째, 기계산업 내 고부가가치 업종을 전략적으로 육성하여야 할 것이다. 제2장에서 살펴본 바와 같이 우리나라의 기계산업은 매우 폭넓게 정의되고 있으며, 기계산업 내 각 세부업종들의

산업환경에 상당한 차이가 있을 수 있다. 각 지방정부들은 지역내 고부가가치 업종을 선별하여 선택과 집중 전략을 추진할 필요가 있을 것으로 판단된다. 한정된 자원을 고려할 때 이와 같은 전략적 접근은 지역 내 기계산업의 효율성을 제고하고 생산성의 방향을 전환시킬 전기를 제공해 줄 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 기존 연구에서는 찾아보기 어려운 17개 광역시·도별 기계산업의 효율성과 생산성 변화 추이를 분석하고자 시도했다는 점에서 차별점과 공헌을 갖지만, 다양한 측정변수를 고려하지 못한 점이나 보다 구체적이고 종합적인 정책대안을 제시하지 못한 점, Fuzzy-DEA나 글로벌 맘퀴스트 생산성 지수 등 최신의 효율성 분석기법 등을 적용하지 못한 점, 효율성 결정요인 분석 등 효율성 실체에 대해 더 정교한 접근을 수행하지 못한 점 등은 연구의 한계이자 후속연구를 위한 가늠자가 될 것으로 믿는다.

참고문헌

- 강지혜·백동현(2014), 「국가 R&D 사업 효율성 분석의 개선 방법」, 『산업경영시스템학회지』, 37, pp.82~88.
- 국가통계포털(<https://kosis.kr/index/index.do>).
- 국립국어연구원 우리말샘(https://opendict.korean.go.kr/dictionary/view?sense_no=404591&viewType=confirm).
- 기계공업진흥법
- 김병철(2015), 「혼합 효율성을 이용한 새마을금고의 효율성 분해 연구」, 『제도와 경제』, 9(2), pp.101~120.
- 노상환(2014), 「창원 소재 기계산업의 효율성 및 생산성 분석: DEA 와 Malmquist 기법을 중심으로」, 『경제연구』, 32(4), pp.237~260.
- 마진희·안영효(2018), 「우리나라 관광산업의 광역시도별 효율성 분석」, 『문화산업연구』, 18(4), pp.21-33.
- 박 승·나중경(2015), 「DEA를 활용한 국방기술 연구개발 효율성 분석」, 『경영연구』, 30, pp.57~84.
- 박광순·이진면·진혜진(2012), 「기계산업의 국제경쟁력 분석과 전략적 발전발안」, 산업연구원.
- 박노경(2015), 「퍼지(평균지수변환) DEA 모형과 교차효율성모형을 이용한 클러스터링측정에 대한 실증적 비교연구」, 『한국항만경제학회지』, 31(1), pp.85-110.
- 배미경(2008), 「일반기계 산업의 부문 별 총 요소생산성 증가율의 기여요인 추정」, 『산업경제연구』, 21(4), pp.1381-1404.
- 브리태니커 온라인(http://premium.britannica.co.kr/search/s97_utf8.exe?QueryText=%B1%E2%B0%E8&DBase=Article_ed).
- 서호준(2014), 「대구경북 금융산업의 효율성 측정: DEA 모형의 적용」, 『대구경북연구』, 13(2), 177-204.
- 서호준(2017), 「문화콘텐츠산업의 광역시·도별 효율성 분석: 인천지역 문화콘텐츠산업을 중심으로」, 『도시연구』, 12, pp.173-220.
- 송동섭·김재준(2001), 「IMF 전후시점의 제조업의 효율성 분석과 기술변화 측정」, 『중소기업연구』, 23(4), pp.265~290.
- 이광배·김창범(2013), 「우리나라 부품소재산업의 효율성 분석」, 『Asia-Pacific Journal of Business & Commerce』, 5(1), pp.41-54.
- 이동원·전정환(2019), 「3단계 DEA를 이용한 농업기계산업의 효율성 분석」, 『산업혁신연구』, 35(4), pp.31-55.
- 이동주(2017), 「한국 제조업의 기술적 효율성 국제 비교 분석」, 『무역학회지』, 42(5), pp.137~159.
- 이정동·오동현(2010), 『효율성 분석이론: DEA 자료포락분석법』, IB Book.
- 임성묵(2008), 「퍼지 선형계획법 해법 및 퍼지 DEA에의 적용에 관한 연구」, 『산업경영시스템학회지』,

- 31(2), pp.51-60.
- 장영재·노상환(2018), 「한국의 광역지자체 제조업 효율성 및 생산성 변화 비교 분석」, 『지역산업연구』, 41(2), pp.51-70.
- 장영재·양동현(2011), 「공공병원의 글로벌 맘퀴스트(Global Malmquist) 생산성지수 변화 분석」, 『보건경제와 정책연구』, 17(4), pp.89-107.
- 조남권·김규환·이석진(2018), 「DEA를 통한 중소·중견기업의 R&D 효율성 분석」, 『지식재산연구』, 13(2), pp.207-236.
- 주수현·이선영(2004), 「부산지역 기계부품소재산업 클러스터의 효율성 분석」, 『경제연구』, 22(4), pp.201~226.
- 한국기계산업진흥회(2021), 「기계산업 편람(2021)」.
- 허광숙(2005). 「일반기계 산업의 생산성 및 효율성 분석」, 『POSRI 철강수급전망』, 2005(4), pp. 160~166.
- Invest Korea(<https://www.investkorea.org/ik-kr/cntnts/i-121/web.do>)
- Andersen, P., and N. C. Petersen(1993), “A Procedure for Ranking Efficient Units in Data Envelopment Analysis”, *Management Science*, 39(10), pp.1261-1264.
- Banker, R. D., A. Charnes and W. W. Cooper(1984), “Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis”, *Management Science*, 30(9), pp. 1078-1092.
- Bessent, A. M., and E. W. Bessent(1980), “Determining the Comparative Efficiency of Schools through Data Envelopment Analysis”, *Educational Administration Quarterly*, 16(2), pp.57-75.
- Caves, D. W., L. R. Christensen and W. E. Diewert(1982), “The Economic Theory of Index Numbers and the Measurement of Input, Output, and Productivity”, *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 50(6), pp.1393-1414.
- Charnes, A., W. W. Cooper and E. Rhodes(1978), “Measuring the Efficiency of Decision Making Units”, *European Journal of Operational research*, 2(6), pp.429-444.
- Färe, R., Grosskopf, S., M. Norris and Z. Zhang(1994), “Productivity Growth, Technical Progress, and Efficiency Change in Industrialized Countries”, *The American Economic Review*, 84, pp.66-83.
- Farrell, M. J.(1957), “The Measurement of Productive Efficiency”, *Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)*, 120(3), pp.253-290.
- Malmquist, S.(1953), “Index Numbers and Indifference Surfaces”, *Trabajos de Estadística*, 4(2), pp.209-242.
- Mostafa, M. M. (2009), “Benchmarking the US Specialty Retailers and Food Consumer

- Stores using Data Envelopment Analysis”, *International Journal of Retail & Distribution Management*, 37(8), pp.661-679.
- Pastor, J. T., & C. K. Lovell(2005), “A Global Malmquist Productivity Index”, *Economics Letters*, 88(2), pp.266-271.
- Pestana Barros, C., & C. A. Alves(2003), “Hypermarket Retail Store Efficiency in Portugal”, *International Journal of Retail & Distribution Management*, 31(11), pp.549-560.
- Tofallis, C.(1996), “Improving Discernment in DEA Using Profiling”, *Omega*, 24(3), pp.361-364.
- WORLD BANK DATA(https://data.worldbank.org/indicator/NV.IND.MANF.ZS?most_recent_value_desc=true).

Efficiency and Productivity Trend of the Machinery Industry at Provincial/Metropolitan Level in Korea

Seo Hojoon

- Abstract -

This study aimed to derive a specialized industrial development strategy for each region by analyzing the efficiency and productivity trends of 17 metropolitan cities and provinces in Korea's machinery industry. The five-year period from 2016 to 2020 was set as the target period, and the DEA model was applied to analyze efficiency and the Malmquist productivity index was applied to identify productivity trends. As a result of the efficiency analysis, regardless of the model and year, the areas that showed efficient DMU were Seoul and Gwangju, and Chungnam, Gyeonggi, and Jeju areas showed 100% pure technical efficiency. Overall productivity decreased by 0.26% over the five-year period, but productivity in Chungbuk and Chungnam regions improved significantly. This study examines the need for a multi-dimensional efficiency analysis of the machinery industry, the need to prepare a restructuring strategy that comprehensively considers efficiency levels and productivity directions, the need for R&D support efforts at the central and local government levels, and The necessity of fostering value-added industries was presented as policy implications.

Key words Korean Machinery Industry, Efficiency, Productivity, Data Envelopment Analysis, Malmquist Index

| 논문 |

기술창업 활성화를 위한 브리콜라주 전략

KAIST의 실리콘 포토닉스
기술을 중심으로

권상집

한성대학교 사회과학부 기업경영트랙 교수

TECHNOLOGY POLICY
MECHANICAL ENGINEERING

기술창업 활성화를 위한 브리콜라주 전략

- KAIST의 실리콘 포토닉스 기술을 중심으로 -

권상집*

- 초 록 -

본 연구는 브리콜라주 전략을 토대로 기계기술 기반 창업과정을 살펴보기 위해 진행되었다. 기술 기반 비즈니스 환경에서 기업가들은 창업과정 및 사업계획의 원활한 실행을 위해 자원을 재활용하고 재구성하는데 많은 관심을 두고 있다. 그러나 기술정책 및 스타트업 연구에서는 아직까지 자원의 재활용과 재구성에 기반을 둔 브리콜라주 전략에 대해 많은 관심과 노력이 부족한 편이다. 본 연구는 자원제약 상황에서 정형화된 기술창업 과정은 생산적이지 못하며 브리콜라주 관점(자원 재활용 및 재구성)이 기술창업의 효과적인 진행과 활성화를 슬기롭게 설명할 수 있다고 제안하였다.

해당 논리를 뒷받침하기 위해 본 연구는 KAIST 연구진이 개발한 실리콘 포토닉스 기술 중심의 기술창업 과정을 세밀히 살펴봤다. 기존 연구는 자원제약 상황에 놓인 기술창업 프로세스에 관해 다양한 관점의 분석이 이루어졌으나 상반된 결과만이 존재하였다. 본 연구는 KAIST의 실리콘 포토닉스 기술을 토대로 자원의 재활용 관점과 자원의 재구성 관점을 제시하고 통합하여 관련 학술연구 및 스타트업 현장에 더 깊은 시사점을 제안하였다. 아울러, 본 연구는 기업가적 프로세스의 하나인 기술창업에 대한 심도 있는 이해와 함께 브리콜라주 관점을 기술창업에 적용함으로써 관련 연구 영역에 중요한 기여도와 시사점을 제공하였다.

주 제 어 브리콜라주, 기술창업, 기술사업화, 비즈니스 모델, 실리콘 포토닉스

논문접수일 2023년 3월 31일 수정논문 제출일 2023년 6월 7일 게재확정일 2023년 6월 15일

* 한성대학교 사회과학부 기업경영트랙 교수, risktaker@hansung.ac.kr

I. 서론

2022년 국내 기계산업은 러시아와 우크라이나 전쟁 장기화 등 경기 침체 요인에도 불구하고 생산량이 3.9% 증가한 112조원을 기록하는 등 의미 있는 성과를 거두었다(길형배 외, 2023). 기계산업의 지속적인 성장세를 위해 산업 차원의 거시정책과 다양한 대안이 거론되고 있지만 실제로 국내 기계산업 더 광범위하게 관련 분야의 기술을 활용한 대학의 기술창업에 대한 고민은 많은 연구가 진행되지 못한 상황이다. 기계산업은 그 범위 자체가 워낙 광범위하고 폭넓지만 크게 공작기계, 플랜트, 건설기계, 반도체장비, 디스플레이 장비 등으로 구성되어 있어(길형배 외, 2023) 대학이 해당 분야에서 창업을 시도한다는 건 실로 어려운 일이라고 여겨지고 있다.

그러나 기계산업이 아닌 기계기술이라는 관점에서 살펴보면 다양한 이공계 대학의 우수한 기술을 활용해 기술창업을 독려, 촉진할 수 있다. 이미 전국의 4년제 대학들도 창업보육센터를 설치하는 등 연구와 강의, 교육을 넘어 산학 더 나아가 기업가정신 전진센터로 자리매김하기 위해 노력하고 있다. 그 중 대표적인 교육기관이 바로 한국과학기술원(이하, KAIST)이다. KAIST는 2022년 ‘The 세계 대학 순위’에서 산학협력 부문에서 2년 연속 100점으로 세계 1위를 차지하는 등 국내 대학 중에서는 가장 적극적으로 기술창업을 독려하고 있다.

기술창업 활성화를 위해 KAIST는 대전광역시와 함께 대전에 위치한 연구원 그리고 KAIST 교수 등의 연구진이 보유한 기술을 토대로 기술창업 활성화 프로그램을 실행하고 있다. 기술에 관한 많은 노하우를 보유하고 있는 연구진은 사업역량이 부족한 편이며 사업역량이 탁월한 전문가들은 기술에 대한 노하우와 전문성이 부족한 편이다. 서로의 강점을 적극적으로 공유하고 보완하면 또 다른 의미의 상생협력을 통해 기술창업을 활성화시킬 수 있다.

본 연구는 그 중에서도 실리콘 포토닉스 기반 광전 부품 생산 및 판매 기술을 보유한 KAIST 연구진의 기술을 어떻게 기술창업으로 연결시킬 수 있는지 그 과정을 세밀하게 기술하고자 한다. 실리콘 포토닉스 기반 광전 부품 생산과 기술이라는 용어에서 알 수 있듯이 해당 기술은 기계기술 기반 영역이기에 기술과 경영에 대해 연구진과 전문가가 상호논의와 협의를 통해 끊임없이 해당 기술의 잠재력을 평가하고 이를 개발, 보완해야 한다. 이를 위해 기술창업 및 기술사업화 과정에서 제한된 자원과 상황을 극복하기 위해 브리콜라주(Bricolage) 전략을 실행하였다.

브리콜라주는 새로운 기회 발굴을 위해 주어진 자원을 창의적으로 재조합하고 재구축하는 과정을 뜻한다(Baker and Nelson, 2005). 즉, 브리콜라주는 보유한 자원을 새로운 관점에서

해석하고 살펴보는 과정을 통해 자원제약을 극복하는 기업가적 자원관리의 과정이다(Yu, Li, Su, Tao, Nguyen, and Xia, 2020). 기계기술정책 연구에서는 중견기업의 기술진화(곽기호, 2022), 중국 드론기업의 혁신전략(김혜주, 2022), 반도체 노광광정 혁신(최희수, 2022) 등의 다양한 기업 사례연구가 진행되어 왔지만 대학의 관련 기술이 어떻게 창업 과정을 통해 기술을 한 단계 업그레이드시킬 수 있는지에 대해서는 연구가 부족한 편이다.

이에 본 연구는 KAIST 교수 및 연구진이 개발한 실리콘 포토닉스 광전 부품 생산 및 기술을 대상으로 해당 기술의 잠재력 및 활용 방안을 어떻게 수립했는지 그 과정을 브리콜라주의 관점에서 살펴본 후 대학의 기술창업과 기계기술정책에 관한 중요한 시사점을 제공하고자 한다. 해당 기술은 당초 실리콘 포토닉스 집적 칩설계/제작(광원, 광변조기, 광커플러, 광분배기) 등 하드웨어 기술 및 서비스 개발에 중점을 두고 있었다. 본 연구는 관련 기술을 사업 다각화시키는 과정에서 해당 기술의 범위를 어떻게 확장시키는지 살펴보고 대학의 기술을 활용한 기술창업을 유도하기 위해서는 외부와의 협력을 통한 브리콜라주 관점이 중요하다는 점을 제안하고자 한다.

II. 이론적 고찰

1. 기술창업을 위한 브리콜라주 전략

기술창업 과정은 매우 어려운 탐험과 시행착오의 과정이다. 특히, 대학에서 발굴한 기술을 활용한 기술창업은 더욱 어렵고 하드웨어 부문 중심의 기계분야 기술창업은 대학에서도 거의 실행되지 못하고 있다(김성화·이규봉, 2016). 기술창업 과정에서는 아이디어를 사업화하는 단계에서 가장 어려움을 겪는다고 알려져 있다. 기술창업은 기술을 토대로 혁신적 사고와 창업가의 기업가적 역량으로 기업을 창업하는 과정을 의미하는데(최종열, 2013) 그 동안 기술창업 연구는 주로 기술창업 기업의 성과 또는 기술창업 지원의 타당성에 초점을 맞춰 진행되었기에(김대호·김홍, 2009; 최대수·성창수, 2018) 실제로 아이디어를 사업화하는 단계에서 경영진이 무엇을 준비해야 하는지에 대한 과정은 체계적인 설명이 부족한 편이다.

대학에서 진행되는 기술창업은 아이디어를 사업화하는 단계에서 많은 어려움이 따르는데 이는 기술을 개발한 창업 멤버(교수, 교원, 연구진 등), 아이팀(기술), 추진동력(산학협력단) 중에서 경영에 대한 전문성 그리고 사업기획 및 조직 관리에 대한 경험을 지닌 이가 부족하다는데 있다(안경민·권상집, 2021). 대학에서 주로 진행되어 온 지원 제도가 벤처캐피탈 또는 공간

제공(창업보육센터)에 맞춰져 있기에 실질적으로 기술을 개발한 창업 멤버들이 어떻게 아이템의 사업화를 고민하고 어떤 방향으로 사업화를 추진해야 하는지에 대한 지원은 대학에서 효과적으로 제공하지 못하는 편이다. 이를 위해 학계에서도 꾸준히 브리콜라주 실행의 필요성이 거론되어 왔다.

브리콜라주는 중소벤처기업을 중심으로 국내에서 연구가 진행되었는데 그 이유는 전략적 실행을 위해 자원제약을 극복하고 문제를 다각도로 살펴보고 기회를 창출할 수 있다는 장점 때문이다(Zahra, 2021). 브리콜라주는 크게 자원을 재구성하고 재활용해서 새로운 기회를 발굴한다는 개념이므로 두 개의 구성 요소, 자원 재활용과 자원 재구성을 포함하고 있다(박태경·이종완·이주연, 2020; 이주연·박태경, 2022). 불확실성이 높고 성공 가능성이 희박한 기업들 그리고 자원 제약 상황에 놓인 기업들에게는 브리콜라주 전략이 더욱 요구된다. 참고로, 브리콜라주의 핵심 개념은 자원 재활용과 자원 재구성에 있다. 자원 재활용은 자원의 활용 가능성을 기존 영역에서 극대화시킬 수 있는 내부적 활동을 뜻하는데 이는 비용 효율성의 목적을 갖고 있다(Zahra, 2021). 반면, 자원 재구성은 기존 자원의 활용 범위에서 벗어나 새로운 기회를 창출하는 탐험적 활동으로 효율성이 아닌 가능성을 추구하기 위해 자원을 창의적으로 재조합하는 과정을 의미한다(Yu et al., 2020). 자원 재구성은 자원의 굴절적 사용(Exaptation)으로도 해석되는데 기업이 보유한 한정된 자원을 외부의 다양한 시각에서 관찰, 기회를 도출하는 개념을 의미한다(Dew, Read, Sarasvathy, and Wiltbank, 2008).

기술이 발전하고 시장 수요의 변화 폭이 확대될수록 환경은 불확실성을 지니는데 이 경우 기계산업 등 중후장대한 산업과 기계기술을 기반으로 한 창업은 변화의 위기에 더욱 크게 직면할 수 있다. 이를 내부 관점에서만 해석, 대응하지 말고 다양한 이들의 관점을 혼합해서 새로운 각도로 기회를 탐색하고 새로운 기회를 발굴하는 것이 바로 브리콜라주 전략이다.

결국, 브리콜라주 전략의 핵심은 기술을 토대로 한 기존 경계(Boundary-breaking)를 허무는 데 있다(An, Zhao, Cao, Zhang, and Liu, 2018). 이를 위해서는 새로운 지식을 장려하고 각기 다른 관점을 지닌 이들의 논의를 토대로 조직 내 지식을 공유하고 새로운 방향성을 창출해야 한다. 논의 과정을 통해 지금까지 주목하지 않았던 영역에서 새로운 기회를 찾고 조직이 보유한 내부 및 외부의 자원 중 무엇을 활용하고 어떤 방안을 재구성할 것인지 좀 더 깊이 있게 주목한다(Yang, 2018). 쉽게 말해 브리콜라주 전략이란 조직 내 다양성이 조성되지 못했다면 자신들과 분야가 다른 구성원들이 함께 기술 또는 기업의 방향성을 조명하는 과정이라고 말할 수 있다.

브리콜라주는 이미 기업의 자원 재탐색, 혁신성과 등에 긍정적인 영향을 미친다고 알려져 있다(이주연·박태경, 2022). 그런데 아직까지 브리콜라주 전략을 토대로 기업이 어떤 노력을 해왔는지에 대해서는 KEB하나은행의 전산통합 사례연구 한 편뿐이다(박성재·강현구·이정훈, 2019). 그러나 브리콜라주는 금융기업 또는 대기업보다 기술기반 기업 그리고 중소벤처기업과 스타트업에 더 적합한 전략과 기업가적 관리과정으로 알려져 있기에 본 연구에서 살펴본 KAIST의 기술을 토대로 한 기술창업과정에 더 부합한 논의 주제라고 할 수 있다. 특히, 기술창업 및 기술사업화에 브리콜라주가 부합하다고 판단한 근거는 브리콜라주 자체가 기업가의 마인드셋과 관련되어 있기 때문이다. 전략적 기업가정신 이론에 의하면 브리콜라주는 기업가정신과 밀접한 관계에 놓여 있다(Hitt, Ireland, Sirmon, and Trahms, 2011).

그럼에도 아직까지 브리콜라주 전략을 토대로 기업가가 어떤 사업기회를 포착하고 어떻게 논의 과정을 거쳐야 하는지에 대해서는 연구가 부족했다. 학술적 그리고 실무적 관점에서 브리콜라주는 혁신, 경영성과, 조직의 양면성 등에 대해 폭넓은 논의가 진행되어 왔지만(Hitt et al., 2011) 대부분이 실증분석 연구이고 깊이 있는 사례연구 또한 부족한 상황이다. 브리콜라주 연구가 주로 실증분석 그리고 중소벤처기업을 대상으로 진행되었다면 이제 대학의 기술창업 과정 그리고 사례연구에도 적용될 필요가 있다. 그러므로 브리콜라주 전략을 활용한 대학의 기술창업 과정을 사례연구로 살펴보고 효과적인 기술창업 방향성을 제언한다면 기계기술산업 그리고 기술정책 전반에 걸쳐 중요한 교훈을 제공할 수 있을 것이다.

Ⅲ. 사례연구방법

본 연구는 KAIST의 실리콘 포토닉스 기반 기술을 토대로 기술사업화를 통해 기술창업이 진행되는 과정을 사례연구방법을 통해 상세히 살펴보고자 한다. 일반적으로 사회과학 연구에서는 실증연구가 많이 진행되고 있으나 사례연구방법의 필요성 역시 부각되고 있다. 사례연구는 기존의 정형화된 변수로 검증할 수 없는 다양한 현상 또는 동태적인 사례를 분석할 때 효과적이다(곽기호, 2022; Caza, Moss, and Vough, 2018).

그 동안 기술창업 및 기술사업화 연구는 많았으나 주로 특정 변수에 의한 통계분석이 진행되어 현장에 의미 있는 교훈을 제공하는데 일정 부분 제한적인 면이 많았다. 본 연구의 사례 대상인 KAIST 연구진의 기술 기반 기술창업 준비 과정은 시간적으로도 종단적인 측면이 강하고 정형화

된 변수를 바탕으로 실증분석을 진행하기엔 분명히 한계가 존재한다. 또한, 그간 사례연구를 통해 접근하지 않았던 브리콜라주라는 개념으로 기술창업을 새롭게 분석, 설명한다는 점에서 본 연구의 의의를 찾을 수 있다(Yin, 2014).

〈표 1〉 사례연구 프로세스

연구 단계	주요 내용	참고 문헌
연구 계획	• 연구대상: KAIST의 기술창업 과정	Gioia, Corley, and Hamilton (2013)
연구 시작	• 분석내용: 브리콜라주 관점에서 본 기계기술 창업 과정	
데이터 수집	• 문헌: 기술창업 문헌 및 보고서 • 인터뷰: 5명 (기간: 2021년 4월 ~ 10월)	
인터뷰 대상자	• 기술창업 당사자 (KAIST 교수 및 박사급 연구원) • 기술창업 프로그램 운영자 (KAIST센터 연구원) • 기술창업 전문가 (기술사업화컨설팅 연구원)	
연구 종료	• 연구의 정책적 시사점 제언	

사례연구방법은 연구자가 ‘어떻게 이런 현상이 발생했는지’ 그리고 ‘이런 결과가 도출되기까지 어떤 프로세스가 진행되었는지’ 등에 대해 좀 더 효과적인 대답을 학계뿐 아니라 조직 현장에도 줄 수 있기에 2000년대 이후 더 많이 활용되고 있다(Xiao, Tylecote, and Liu, 2013). 이를 고려, 본 연구는 해당 기술에 대해 특허를 갖고 있는 KAIST 공과대학 교수 및 박사급 연구원과의 온라인 및 오프라인 인터뷰를 3회 이상 진행했으며 기술창업 프로그램에 본 연구의 저자와 함께 기술창업 전문가 지원을 해준 기술사업화컨설팅 연구원과의 인터뷰를 토대로 연구결과를 상세히 기술하였다.

IV. 사례연구

1. 연구대상 (기술: 실리콘 포토닉스)

KAIST 및 대전창조경제센터는 매년 대전시에 위치한 연구원 그리고 KAIST의 기술을 토대로 공공기술 기반 창업지원사업을 진행하고 있다. 해당 창업지원사업은 실제로 학교 및 연구원에서 사업화가치를 지닌 기술을 발굴하고 기술창업에 관심을 갖고 있는 우수 연구진을 정책적으로 뒷받침하기 위해 진행되는 사업 프로그램이다.

해당 프로그램에 참여한 KAIST 전기 및 전자공학부에 재직 중인 박효훈 교수의 실리콘 포토닉스 기술은 기술성숙도(TRL) 단계에서 4단계에 위치, 이미 사업화의 잠재력을 높이 지닌 우수기술 중 하나다. 참고로, 우리에게 익숙하지 않은 용어인 포토닉스(Photonics)는 빛(광자)을 의미하는 Photon과 학문을 의미하는 ics의 결합 용어로서 두 용어가 결합되어 일반적으로 빛과 관계된 과학기술, 학문을 의미한다. KAIST 연구진은 실리콘 포토닉스 칩 전반에 대한 설계 기술을 확보했고 관련 기술을 토대로 사업화를 준비했다.

이를 토대로 연구진이 생각한 사업화 방향은 크게 두 가지였다. 첫째, 실리콘 포토닉스 집적 칩 설계/제작 서비스에 주력하는 것. 실리콘 반도체칩 기술을 의미하는 실리콘 포토닉스 집적 칩은 기존 실리콘 반도체 성능을 완전히 넘어서는 차세대 칩으로 인정받고 있다. 고집적, 저전력, 대용량, 초고속이 요구되는 서비스는 필연적으로 실리콘 포토닉스 집적 칩이 필요하기에 관련 분야의 성장을 기대할 수 있다고 KAIST 연구진은 설명했다. 둘째, 빔포밍(Beam forming)형 고속 광무선 전송 모듈 제품의 개발. 빠르게 진화하는 이동통신 기술 등으로 데이터 전송량은 급증하고 있다. 그런데 현재로서는 Wifi를 대체할 솔루션이 없기에 실리콘 OPA를 사용한 빔포밍형 광무선 전송 시스템은 저소비전력화, 고속화를 모두 달성할 수 있기에 해당 분야의 급속한 성장을 기대할 수 있다. 해당 분야에 KAIST 연구진이 주목한 이유는 실리콘 OPA 기반 광무선 부품은 실리콘 포토닉스 기술로 제작되기에 연구진이 경쟁력을 확보할 수 있기 때문이다.

실제로 연구진은 OPA 기반 빔포밍형 고속 데이터 송신 칩 제작기술을 확보했으며 25Gbps (4GB 영화를 1분 내 전송할 수 있는 속도)/ch-Si OPA 기반의 고집적 반도체 제조공정 원천기술을 보유하고 있다(출원/등록 특허 총 34개). 연구진의 고민 사항은 기계기술 시장/산업에서 경쟁력이 충분히 통할 수 있는 실리콘 포토닉스 설계 기술을 가졌지만 창업 과정에서 무엇을 준비, 보완해야 하는지에 있었다. 비즈니스 모델의 정교화 그리고 좀 더 구체적인 수익 창출 방안과 제품, 시장, 조직에 따른 사업 추진 방향 설정 등에서 어떤 사항을 보완해야 할지 고심하고 있었다. <표 2> 및 [그림 1]과 같은 지식재산권 보유 및 기술 활용 방향은 갖고 있었지만 이를 구체적으로 발전/보완시킬 수 있는 내용이 부족한 상황이었다.

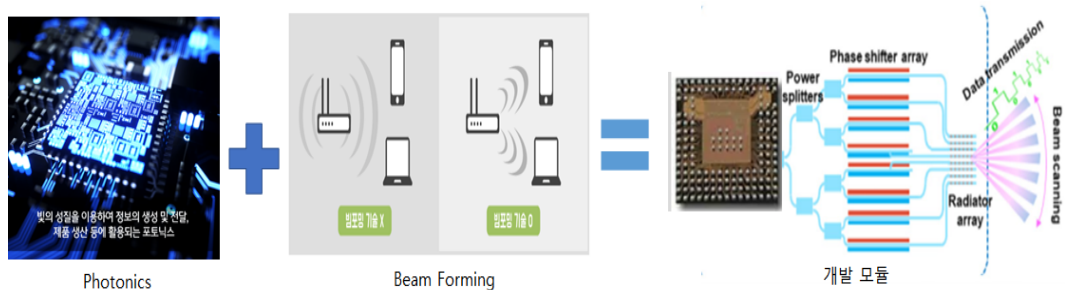
<표 2> 핵심기술 관련 지식재산권

핵심기술	확보된 지식재산권	추가 확보 특허
OPA 전체구조와 2D beam-scanning 방법	<ul style="list-style-type: none"> • KR101720434, US9740078 • PCT/KR2020/001496 • KR2019-0129502 	

핵심기술	확보된 지식재산권	추가 확보 특허
OPA radiator 구조	<ul style="list-style-type: none"> • KR101672586, US14/69126 • KR2015-0168696, US15/777074 • KR1018820, US15/523664, CN2015/80084655.4 • KR101837266, US15/481928 • KR101836613, CN2017/10218891.1 	
OPA 빔모니터링 구조와 방법	<ul style="list-style-type: none"> • KR2019-0029731 	
수신 OPA 구조와 수신 방법	<ul style="list-style-type: none"> • KR2020-0027790 • KR2020-0158650 	
광패키징기술	<ul style="list-style-type: none"> • KR2016-0070224, US15/239622, CN2016/010656644.5 	
데이터전송구조와 방법	<ul style="list-style-type: none"> • KR2019-0108295, US17/010277 	
Heterodyne, ToF 거리측정을 위한 구조와 방법	<ul style="list-style-type: none"> • KR2020-0034129, US16/830869 • KR2020-0038027, US16/839277 	
OPA, MEMS 집적구조와 기능	<ul style="list-style-type: none"> • KR2020-0040761, PCT/KR2020/004627 	
3D 영상 Sensing 시스템 OPA 구동, 거리측정 IC 구조 OPA + IC 집적모듈구조		연구/확보 진행 중

* 자료: KAIST 박효훈 교수 연구실

[그림 1] 실리콘 포토닉스 기술 활용 방향



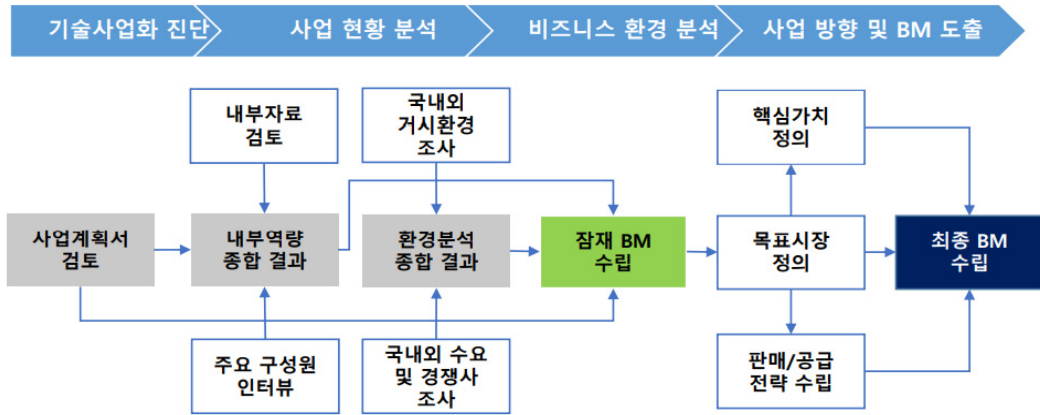
2. 브리콜라주 전략 1단계: 자원제약 극복을 위한 브레인스토밍

대학의 기술창업이 가장 직면한 자원제약은 바로 기술사업화에 필요한 전문성이 부족하다는 데 있다. 국내 대다수의 대학은 현재 창업을 독려하고 있지만 창업보육센터가 제공하는 공간과 일정 부분의 자금 지원으로는 실제 현장에서 직면하는 자원제약(ex: 경영역량 전문성 확보 등)을 극복하는데 한계가 있다. 실제로, 기존 연구에서는 대학 교원이 기술창업을 하는 데 있어 경영에 대한 경험과 사업계획서 작성, 시장 트렌드에 대한 이해도에 관해 한계가 존재한다고 언급하고 있다(박건철·이치형, 2019) 이러한 자원제약을 극복하기 위해 대학 및 연구진이 보유한 기술창업을 독려하는 KAIST 이노베이션 센터에서는 자원의 한계를 극복하기 위해 기업 현장에서 전략기획, 조직 관리, 기술사업화컨설팅 경험을 보유한 전문가와 기술창업을 준비하고 있는 대학교수, 연구원 등을 하나의 팀으로 묶어 자원제약 극복을 위한 기술창업 비즈니스 모델 프로세스를 확립했다. 전체적으로 해당 프로세스는 기술창업을 준비하는 예비 창업자의 견해 및 관점 경청 → 기술사업화 진단 → 사업 현황 및 비즈니스 환경 분석 → 사업계획 방향 및 비즈니스 모델 도출 등의 단계로 나아갔다.

자원제약 극복을 위해 단계별로 기술창업을 준비하고 있는 창업팀(본 연구의 경우 KAIST 교수 및 박사 연구팀)과 컨설팅 전문가(인사조직, 기술사업화컨설팅 경험을 지닌 외부 전문가)가 서로의 생각을 공유하며 아이디어를 끊임없이 확장시키고 새롭게 가다듬는 과정을 거듭했다. 이 과정에 대해 본 연구에 참여한 KAIST 교수팀은 브레인스토밍 단계의 긍정적 효과를 다음과 같이 평가했다.

“대학에서 기술창업이 정착되지 못한 이유는 기업 현장에서 기획, 조직 관리, 기술사업 등의 경험을 지닌 전문가를 만나기가 어렵기 때문입니다. 1회성 특강이 아닌 기술창업 단계별로 경영과 사업계획에 대한 전문가의 검토와 논의가 함께 이루어지면 대학이 가진 자원제약을 극복할 수 있는데 그 과정이 쉽지 않은 게 사실입니다. 특히, 애플리케이션 등 S/W 기술이 아닌 기계기술, 하드웨어 분야의 기술을 사업화로 이끌기에는 시장 트렌드 파악, 사업화 가능성, 자원 확보 방안 등 대학이 헤쳐 나가야 할 자원제약 요소가 많습니다. 그러므로 대학이 직면하는 자원제약을 뛰어넘기 위해서라도 기업 현장의 전문가 또는 기업에서 다양한 경험을 거친 경영학 교수, 연구진과의 협업이 더 많이 이루어질 필요가 있습니다.”

[그림 2] 기술창업 비즈니스 모델 수립 프로세스 (Sample)



* 자료: 안경민·권상집(2021)

이를 토대로 연구진은 기술사업을 준비하고 있는 외부 전문가와 끊임없이 논의하며 사업 아이템 선정과 타당성 분석, 사업계획서 작성에 있어서 구체적인 평가 기준을 아래와 같이 확보, 단계별로 기술과 경영 전문가의 관점에서 균형 있는 비즈니스 모델 개발에 조금씩 나아갈 수 있었다. 당시, 기술창업 아이템 선정에서 고려되었던 기준은 <표 3>과 같다. 그리고 이를 토대로 대학이 직면한 경영 현장의 노하우 부족에서 비롯된 자원제약을 조금씩 극복할 수 있었다.

<표 3> 사업 아이템 평가 및 선정 기준

구분	선정 기준
시장성 및 입지성 전망	<ul style="list-style-type: none"> • 시장 분석 상, 입지가 해당 업종에 적합한가? • 사업발전 단계상 도입기, 성장기 업종인가? • 해당 업종의 시장 규모는 커지고 있는가? • 시장 경쟁현황과 전망은 양호한가?
수익성 양호 여부	<ul style="list-style-type: none"> • 투자비용 대비 수익 전망은 양호한가? • 손익분기점은 언제인가? • 2~3년 이내 흑자 실현이 가능한가?
상품성 우수 여부	<ul style="list-style-type: none"> • 고객 입장에서 가격 대비 유용한 상품인가? • 고객에게 인기와 경쟁력은 있는가? • 상품조달 및 공급의 용이성은 있는가?
위험요소 여부	<ul style="list-style-type: none"> • 해당업종 인/허가 등에서 미비한 점은 없는가? • 경쟁업체 및 거래업체와의 분쟁 가능성이 있는가?

* 자료: 2021 KAIST 공공기술기반 참여기술 비즈니스 모델 개발 제안서 (실리콘 포토닉스 기술)

3. 브리콜라주 전략 2단계: 자원의 재활용/재구성을 통한 비즈니스 모델 개발

브리콜라주의 기본 전제는 자원제약을 극복한 후 본격적으로 자원을 재활용/재구성하는 데 있다. 본 사례연구의 주제인 KAIST 실리콘 포토닉스 기술창업 과정에서도 연구진이 보유한 설계 기술을 기반으로 기존 강점(자원)을 재활용하는 방안(ex: 모듈 설계 및 제조) 그리고 기존 자원의 재구성을 통해 새로운 방향을 도출하는 방안(ex: 컨소시엄 R&D, 기술컨설팅/교육)으로 기술사업화 방향성을 좀 더 다양하게 가져가는데 창업팀과 컨설팅 전문가는 견해를 같이 했다. 이를 위해 먼저, 시장, 제품, 조직이라는 3대 요소에서 비즈니스 상황을 바탕으로 사업 추진방향에 대한 고민을 다음과 같이 수립해 나갔다.

〈표 4〉 기술창업 및 사업화 추진방향

구분	비즈니스 상황	사업 추진방향
시장	<ul style="list-style-type: none"> 단거리 무선통신 시장 지속 상승 가전기기 및 모바일 적용 위해 속도, 장애, 초소형화, 표준화 문제 해결 필요 	<ul style="list-style-type: none"> 고용량 데이터 전송 확대로 단거리 통신기술이 강조되며 메타버스와 개인화기기 시장 확대로 표준화 가능한 기술개발 추진
제품	<ul style="list-style-type: none"> 단거리 무선통신과 관련된 주요 제품은 고유기술과 응용제품 및 서비스로 구분 고유기술의 잠재 수요처 중요 	<ul style="list-style-type: none"> 수익창출 단계에서 빔포밍 설계기술을 보유한 기술컨설팅 및 교육사업 추진 → 기술사업화 컨설팅 이후 다양한 네트워크 통해 브랜딩 강화
조직	<ul style="list-style-type: none"> 단거리 무선통신 장치와 관련된 우수한 기술을 보유하고 있지만 인력, 자본, 네트워크 등의 자원 확보를 고민해야 함 	<ul style="list-style-type: none"> 국내외 주요 연구개발조직, 자금지원 조직과의 네트워크 통해 사업역량 극대화 추구하고 자원제약 극복

* 자료: 2021 KAIST 공공기술기반 참여기술 비즈니스 모델 개발 제안서 (실리콘 포토닉스 기술)

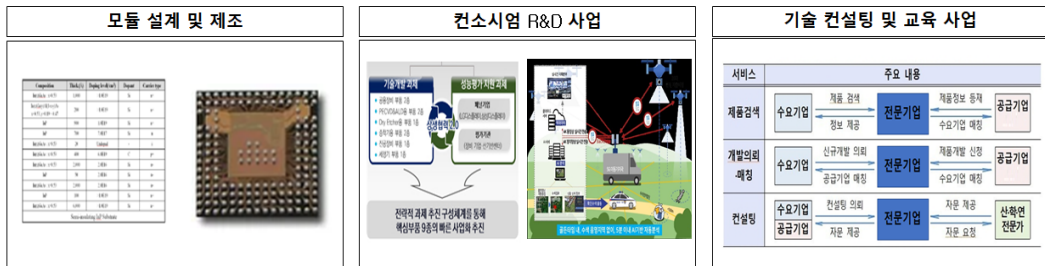
자원제약 상황을 돌파하기 위해서는 기존 자원을 재활용하는 방안도 고민해야 하지만 동시에 기존 자원을 재구성해서 새로운 방향성을 모색하는 것도 필요하다. 대체적으로 기업의 실패 요인은 주로 기존 자원의 집착과 활용에 있다(신재호, 2021). 이에 대해 이번 KAIST 기술창업 및 사업화에 참여한 외부 전문가(기술사업화컨설팅 연구원)는 기존 자원의 재구성 및 재활용에 관해 다음과 같이 얘기했다.

“실제로 대학에서 발굴, 개발한 기술은 기업 현장에서 중요한 평가를 받지 못하는 것이 사실입니다. 기술 자체의 한계라기보다 기술 활용 방향성을 지나치게 좁게 바라보기 때문입니다. 기술을 개발한 대다수의 예비창업자는 보유한 설계 기술을 통한 제품 및 모듈 개발에 관심을 기울이지만 이를 위해서는 제품경쟁력이라는 또 하나의 한계에

직면하게 됩니다. 기존 역량과 보유 자원을 강점이 있는 영역에서 재활용하는 것도 좋지 만 오히려, 기존 기술의 강점을 살리되 기술에 관한 관점 또는 역량을 재구성해서 지금까지 살펴보지 못했던 영역에서 새로운 방향을 모색해야 훨씬 더 나은 사업기회를 포착할 수 있습니다.”

본 연구의 사례대상인 실리콘 포토닉스 기술의 경우, KAIST 기술창업팀이 평소에 고민했던 사업화 아이디어를 재활용(모듈 설계 및 제조)이라는 관점과 재구성(컨소시엄 R&D, 기술 컨설팅 및 교육)이라는 관점에서 확장, 사업 영역을 다변화시키는데 주력했다. 컨소시엄 R&D와 기술 컨설팅 영역은 설계 및 제조가 아닌 추가 연구개발 확장사업이라는 차원에서 자원 재구성을 통한 사업 영역 확대를 의미한다. 브리콜라주는 자원제약을 극복하기 위해 기존 자원의 재활용과 재구성을 추진해야 혁신의 효율성을 극대화할 수 있다는 점을 강조하는 키워드다(Davidsson, Baker, and Senyard, 2017). 창업팀과 컨설팅 전문가팀도 브리콜라주 관점에서 기존 영역 강화 그리고 자원의 재구성을 기반으로 한 새로운 영역으로의 확장을 고민, [그림 3]과 같은 사업화 방향을 확정했다.

[그림 3] 비즈니스 모델 사업화 방향



* 자료: 2021 KAIST 공공기술기반 참여기술 비즈니스 모델 개발 제안서 (실리콘 포토닉스 기술)

KAIST 연구진이 보유한 실리콘 포토닉스 기술의 우수성은 입증되었지만 비즈니스 모델을 세 분야로 구성한 건 기존 기술의 재활용만으로는 수익 창출의 지속성을 담보할 수 없었기 때문이다. 모듈 설계 및 제조 사업은 기본적으로 연구진이 보유한 설계 기술의 활용을 토대로 하드웨어 기술 분야에서 수익을 창출할 수 있는 사업이다. KAIST가 보유한 실리콘 OPA 기반 빔포밍형 고속 광무선 전송 기술력을 활용하면 관련 분야의 대기업 및 글로벌 기업이 요청하는 다양한 기대 및 요구사항에 맞게 최적화된 모듈 설계 및 제품 제공이 용이하다. 실제로 KAIST 기술창업팀에서도 이와 관련하여 실리콘 포토닉스 칩 설계 및 제작 서비스, 빔포밍 광무선 전송 모듈제품

개발을 목표로 기술창업을 준비하는 상황이었다. 이는 브리콜라주 관점에서도 자원의 재활용을 토대로 한 사업 영역 설정이라고 말할 수 있다(박태경 외, 2020).

추가적으로 컨설팅 전문가가 컨소시엄 R&D와 기술 컨설팅 사업을 제안한 이유는 보유한 기술을 단순 활용하는데 그치지 않고 이를 교육과 네트워크 확장이라는 사업전략 관점에서 재구성하자는데 있다. 컨소시엄 R&D사업은 사업자 간의 네트워크 형성을 토대로 B2B 더 나아가 B2G R&D 사업 추진을 의미한다. 완제품 출시 및 도화를 위해 각각의 기업이 컨소시엄을 형성, 제품을 개발하는 사업인 컨소시엄 R&D를 위해서는 연구진이 보유한 설계 기술뿐 아니라 기술창업팀의 기술 노하우 역량을 컨소시엄 R&D사업에 맞게 재구성, 재구축해야 한다. 연구진의 인력과 역량을 재구성한다면 기술컨설팅 사업으로도 확장할 수 있는데 창업팀이 보유한 관련 분야의 전문성과 연구역량을 재구성, 기술컨설팅과 기술지원 교육에 이용한다면 중소기업과 중견기업에게 부족한 기술력을 지원함으로써 수익 창출과 함께 사회적 가치 창출, 기계기술 창업기업으로의 브랜딩 확보도 용이할 수 있다.

이를 위해서 창업팀과 컨설팅 전문가팀은 자원 재구성에 필요한 자금 소요 및 조달 계획, 시장 진입 및 성과진출 전략, 팀 구성 방안을 다시 세밀하게 고찰하는 과정을 진행했다. 일반적으로 창업할 경우 자금과 인력, 성과진출 전략을 먼저 수립하는 것과 달리 브리콜라주 전략은 기존 자원의 활용 관점을 넘어 자원을 재구성해서 새롭게 사업 영역을 확장해야하기에 자금과 인력, 시장 진입 전략을 그 이후 설정하는 것이 유리하다(Davidsson et al., 2017). 기술사업화 방향성이 확장되며 기술창업 가능성이 좀 더 커지자 해당 기술을 토대로 창업을 준비했던 창업팀의 박사급 연구원은 이를 다음과 같이 평가했다.

“기술을 개발한 입장에서는 개발한 기술 활용에만 포커스를 두고 하드웨어 제품 또는 모듈 설계 방안에만 몰입하게 되는데 보유한 기술역량을 R&D 사업 및 컨설팅에 맞게 재구성한다면 다양한 사업영역으로도 진출, 확장할 수 있다는 점을 느꼈습니다. 그리고 사업영역 확장 후 필요한 자금과 인력은 무엇인지 그리고 이를 어떻게 확보해야 하는지 구체성을 갖고 작업할 수 있어 기술창업의 성공 가능성을 보다 높일 수 있었습니다. 자원 제약의 어려움을 호소하기보다 외부 전문가와의 브레인스토밍을 토대로 자원의 재활용과 재구성은 어떻게 해야 할지 조금 더 고민하는 것이 가장 효과적인 기술창업 방법이라고 생각합니다.”

4. 기술창업 사업계획 도출 및 확정

서로 다른 분야의 관점과 역량을 지닌 전문가가 상호 토론을 토대로 기업가적 관점을 넓힌다면 자원제약을 넘어설 수 있다는 것이 브리콜라주 이론의 핵심이다. KAIST의 실리콘 포토닉스 기술 개발팀과 경영컨설팅 전문가팀이 함께 논의하는 과정은 기술에 대한 노하우와 경영에 대한 노하우가 상호작용하면서 자원제약을 허무는 기업가적 기회로 작용되었다. 그 이후 서로의 관점과 생각을 학습한 기술 개발팀과 컨설팅 전문가팀은 기존 자원을 재활용하는 방향과 기존 자원을 재구성/재구축해서 새롭게 진출할 수 있는 방향을 확정된 후 구체적인 기술사업화 비즈니스 모델을 수립했다. 예컨대, 모듈 설계 및 제조라는 관점에서도 KAIST 연구진이 보유한 실리콘 OPA 기반 빔포밍형 고속 광무선 전송기술을 활용하면 기존에 고려했던 단순 기계기술 제품 이외 고화질 영상이 필요한 VR/AR, 의료, 드론, 로봇 등의 영역에서도 최적화된 제품을 설계할 수 있다. 예를 들어, 모듈 설계 및 제조 영역에서는 <표 5>와 같은 조금 더 구체적인 진출 영역 수립이 가능하다.

<표 5> 모듈 설계 및 제조 진출 영역

분야	융합기술	진출 영역 (예시)
콘텐츠	VR/AR	<ul style="list-style-type: none"> 초저지연성 기반 메타버스 게임, 영상실감형 콘텐츠 서비스 메타버스를 이용한 디지털 사이니지 등 360도 광고 무선 4K, 8K 슈퍼HD 영상 중계 무선 메타버스 게임
보안/안전 의료	로봇 드론	<ul style="list-style-type: none"> 고용량 통신망을 통한 고화질 감시 서비스 재난상황 대비 드론 중계국, 단말기 직접 통신 등 다양한 통신망 제공 원격진료 확대 개인 신체 정보 실시간 검토 및 건강 예측
물류/유통	AI 로봇 드론	<ul style="list-style-type: none"> 화물차 자율군집 주행 및 적재공간 관리 교통관제 시스템 최적화 무선센서 기반 물류로봇 활용으로 물류관리 최적화 무선통신 활용 메타버스 쇼핑 서비스

* 자료: 2021 KAIST 공공기술기반 참여기술 비즈니스 모델 개발 제안서 (실리콘 포토닉스 기술)

각각의 비즈니스 모델이 확정된 이후 세부적인 수익 창출 방안이 수립되면 구체적인 기술창업 사업계획은 90% 이상 도출되었다고 봐야 한다. 이후 자금조달 계획, 시장진입 전략을 수립하고

시장진출을 위한 핵심 파트너 등을 선정하는 세부적인 절차가 진행된다면 기술창업 과정에 대한 전반적인 검토 및 준비가 마무리된다. 본 프로그램을 운영한 KAIST센터 연구원은 기술을 개발한 내부 창업팀과 경영컨설팅 전문가와의 상호작용에 관한 중요성을 다음과 같이 평가했다.

“실제로 대학에서 기술창업을 진행하는 대다수의 예비창업자는 경영지식과 현장 노하우에 대한 전문성을 필요로 합니다. 지난 2년간 이번 프로그램을 운영하다 보니 기술창업의 효과성과 수월성이 높아졌을 뿐 아니라 다양한 시각과 생각이 공유되면서 기존 사업 방향과 새로운 사업 방향이 함께 도출되는 순기능을 많이 지켜볼 수 있었습니다. 기술만 개발한 전문가들은 사업계획서 수립과 비즈니스 모델 제안에 어려움을 많이 느끼는 편입니다. 그러므로 기술정책 관점에서 국내 기술창업을 독려하기 위해서는 기술과 경영 전문가의 상호교류와 지원을 더 많이 늘릴 필요가 있습니다.”

대학에서 기술창업과 관련된 사업계획을 수립하면 가치생산, 고객가치의 차별성, 가치전달 등의 프로세스를 체계적으로 이해하거나 수립하기 어려운 것이 사실이다. 또한, 고객관리 방안, 국내 및 해외 유통채널 진출 전략 등을 수립한다는 것도 현실적으로 불가능하다. 이는 대학의 기술창업뿐 아니라 중소기업 현장에도 적용되는 얘기다. 그러므로 자원제약 상황에 늘 직면하는 스타트업 및 중소기업과 대학의 기술창업 과정에 브리콜라주 전략이 보다 많이 활용될 필요가 있다(Ferneley and Bell, 2006). 이를 위해서는 다양한 전문가와의 네트워킹이 구축되어야 하고 기존 자원의 재활용과 함께 새로운 방향성에 대한 모색을 함께 병행해야 한다.

V. 결론

1. 정책적 시사점 및 학문적 기여도

본 연구는 국내 대학이 개발한 기계기술을 활용한 기술창업 과정을 브리콜라주 개념으로 고찰함으로써 정책적 시사점을 다음과 같이 제공하였다.

첫째, 본 연구는 기술과 경영에 관한 전문가들이 상호 모여 논의할 수 있는 장을 현장에서 더 많이 조성, 구축해야 함을 시사하고 있다. 기술경영, 기술정책 연구는 주로 기술사업화가 미친 파급효과에 관한 연구를 제공하고 있지만 실제로 현장에서는 그 앞단에서 기술사업화, 기술창업을 어떻게 진행해야 하는지에 관해 어려움을 겪는 기술 개발진들이 많다. 대학에서도 기술창업을 강조하면서 창업자금과 공간지원을 제공하고 있지만 예비 창업자들은 비즈니스 모델 수립, 기술사업화컨설팅에 대해 더 많은 도움을 원하고 있었다. 특히, 소프트웨어 기술과 달리 하드웨어 기반의 기계산업 내에서 기술창업을 준비하는 이들은 경영에 대해 더 많은 조언을 듣길 원한다. 이를 토대로 앞으로는 기술정책 관점에서 기술창업을 독려하기 위해 기술 전문가와 경영 전문가들이 시너지를 낼 수 있는 관련 프로그램을 더 많이 만들어야 한다.

둘째, 브리콜라주 관점에서 기술집약 기업들이 향후 어떤 노력을 보완해야 하는지에 대해 본 연구는 상세한 내용을 제공하였다. 브리콜라주는 쉽게 말해 자원제약의 극복을 위해 기존 자원을 재활용하거나 재구성하는 과정을 의미한다(Senyard, Baker, Steffens, and Davidsson, 2014; Wu, Liu, and Zhang, 2017). 여기서 말하는 자원은 금전적 자원 이외 조직이 보유한 기술과 인력 측면을 모두 아우르는 개념이다(이주연·박태경, 2022). 기술집약 기업일수록 기술에 대한 전문성은 뛰어나나 이를 새로운 각도로 살펴볼 수 있는 비즈니스 시각은 부족한 편이다(Ferneley and Bell, 2006). 또는 기계산업에 속한 중소기업, 스타트업은 주로 자원제약의 어려움으로 더 높은 성장률을 기록하기 어렵다고 얘기한다. 그러나 실제로 자원 재활용과 재구성의 관점을 토대로 기업이 보유한 역량을 다시 세밀히 관찰하면 새로운 방향성을 수립할 수 있다. 기술정책 연구 및 공공기관에서도 기업 현장에서 브리콜라주가 뿌리내릴 수 있도록 현실적 조언을 더 많이 제공해야 한다.

학문적 관점에서 본 연구는 국내에서 본격적으로 연구가 진행되고 있는 브리콜라주의 개념을 기계기술을 토대로 한 대학의 기술창업 과정에 적용함으로써 브리콜라주 연구영역을 기술정책, 사례연구로 확장했다는데 학문적 의의가 있다. 이론적 고찰에서 언급했듯이 브리콜라주는 주로

실증분석 연구에 활용되어(박태경 외, 2020; An et al., 2018; Yu et al., 2020) 조직 현장에서 많은 관심을 갖지 못한 것이 사실이다. 기존 브리콜라주 연구에서도 점점 더 기업 현장을 살펴본 사례연구의 필요성을 강조하고 있기에(박성재 외, 2019) 본 연구는 브리콜라주 전략을 기술정책 영역으로 확장한 학문적 기여도를 갖고 있다.

아울러, 본 연구의 분석 대상인 실리콘 포토닉스 기술은 VR/AR 이외 드론 개발 그리고 집적 칩 개발을 통해 기존 실리콘 반도체 성능을 넘어서는 차세대 칩으로 발전시킬 수 있어 반도체 장비 관련 응용분야가 폭넓다. 그러므로 실리콘 포토닉스 기술은 설계 기술의 중요도와 해당 기술의 활용 및 재구성 범위가 넓어 기계산업의 성장을 촉진할 수 있는 핵심기술 중 하나로 인정받고 있다. 브리콜라주 전략을 토대로 해당 기술의 응용 범위를 더욱 확장시킬 수 있는 방안을 본 연구는 제공하였다.

2. 후속연구 제언

기계기술정책 연구 영역은 매우 폭넓은 만큼 후속연구에서는 좀 더 다양한 관점의 연구가 진행되어야 한다. 후속연구는 브리콜라주의 개념을 토대로 다음 연구를 진행해야 한다.

첫째, 브리콜라주의 개념을 활용하여 실제로 기계산업에 속한 기업들의 성과에 브리콜라주 전략이 어떤 영향을 미쳤는지 실증분석을 진행해야 한다. 자원제약 상황을 극복하기 위한 브리콜라주는 기업이 성과를 최적화시키는데 가장 효과적인 자원관리, 전략실행 방안으로 알려져 있다(Desa and Basu, 2013; Duymedjian and Rüling, 2010; Ferneley and Bell, 2006). 후속연구에서는 기계산업 내 중소벤처기업 또는 조직 규모별로 브리콜라주 실행이 기업의 혁신성과, 경영성과 등에 어떤 차별화된 영향을 미치는지 연구를 진행해야 한다.

둘째, 기계기술분야에 속한 기업들의 창업 및 성장 과정을 정밀 비교, 기계기술 분야에서 창업과 성장을 안정적으로 성공하기 위해서는 무엇을 좀 더 유념해야 하는지 세밀히 살펴봐야 한다(곽기호, 2017; 이흥배, 2006). 기계산업은 주로 대기업 위주의 플레이어들이 활동하고 있기에 그 아래 위치한 중소벤처기업 그리고 중견기업은 어떤 부분에 역량을 집중해야 성공할 수 있는지 연구 측면에서도 많이 알려져 있지 않다. 후속연구에서는 기계산업에 속한 기업들의 창업과 성장 과정을 정밀 분석, 스타트업-중소기업-중견기업으로 가는 성장 로드맵과 성공 방안을 제시해야 한다.

참고문헌

- 곽기호(2022), “아키텍처 포지셔닝 전략 관점에서 바라본 중견기업의 기술진화”, 『기계기술정책』, 1(2), 한국기계연구원, pp. 25-49.
- 곽기호(2017), “우리나라 일반기계산업의 성장사 연구”, 『경영사연구』, 32(3), 한국경영사학회, pp. 25-52.
- 길형배·최진철·김철후·오승훈·김희태·이운규·이용규(2023), 「기계산업 2022년 성과와 2023년 전망」, 『기계기술정책』, 111, 한국기계연구원.
- 김대호·김홍(2009), “기술창업 장애요인 실태조사”, 『벤처창업연구』, 4(1), 한국벤처창업학회, pp. 67-88.
- 김성화·이규봉(2016), “기술창업기업의 경영전략에 관한 연구”, 『인문사회21』, 7(4), 인문사회21, pp. 407-424.
- 김혜주(2022), “특허 분석을 통한 중국 드론 기업의 혁신 전략 연구: DJ사를 중심으로”, 『기계기술정책』, 1(2), 한국기계연구원, pp. 51-73.
- 박건철·이지형(2019), “교수 기술창업 장애요인 및 활성화 방안에 관한 연구”, 『디지털융복합연구』, 17(8), 한국디지털정책학회, pp. 81-88.
- 박성재·강현구·이정훈(2019), “브리콜라주 전략을 활용한 KEB하나은행의 전산통합 사례연구”, 『한국산업정보학회논문지』, 24(5), 한국산업정보학회, pp. 27-39.
- 박태경·이종완·이주연(2020), “환경격변성, 브리콜라주 및 기업성과: 성장단계의 조절효과”, 『경영연구』, 35(3), 한국산업경영학회, pp. 31-43.
- 신재호(2021), “자원제약과 혁신 성과, 그리고 혁신 효율성에 관한 연구”, 『기업경영연구』, 28(5), 한국기업경영학회, pp. 173-184.
- 안경민·권상집(2021), “기업가적 대학으로의 전환을 위한 대학의 기술창업 활성화 방안 고찰: 공공기술 창업지원 사업을 중심으로”, 『과학기술정책』, 4(2), 과학기술정책연구원, pp. 93-121.
- 이주연·박태경(2022), “자원재탐색과 혁신성과: 브리콜라주에 대한 다차원적 접근”, 『경영연구』, 37(1), 한국산업경영학회, pp. 37-54.
- 이흥배(2006), “한중일 일반 기계산업의 구조적 특징과 FTA 대응방안”, 『동북아경제연구』, 18(1), 한국동북아경제학회, pp. 1-30.
- 최대수·성창수(2018), “고용창출을 위한 기술창업 지원의 타당성 연구”, 『한국창업학회지』, 13(6), 한국창업학회, pp. 25-46.
- 최종열(2013), “기술창업기업의 기술보유유형과 성과와의 관계”, 『벤처창업연구』, 8(1), 한국벤처창업학회, pp. 29-36.
- 최희수(2022), “과학기반형과 기술융합형 특성 관점에서 바라본 ASML사의 반도체 노광공정 혁신 사례 연구”, 『기계기술정책』, 1(2), 한국기계연구원, pp. 75-104.
- An, W., Zhao, X., Cao, Z., Zhang, J., and Liu, H.(2018). How bricolage drives corporate

- entrepreneurship: The roles of opportunity identification and learning orientation. *Journal of Product Innovation Management*, 35(1), pp. 49-65.
- Baker, T., and Nelson, R. E.(2005). Creating something from nothing: Resource construction through entrepreneurial bricolage. *Administration Science Quarterly*, 50(3), pp. 329-366.
- Caza, B. B., Moss, S., and Vough, H.(2018). From synchronizing to harmonizing: The process of authenticating multiple work identities. *Administration Science Quarterly*, 63(4), pp. 703-745.
- Davidsson, P., Baker, T., and Senyard, J. M.(2017). A measure of entrepreneurial bricolage behavior. *International Journal of Entrepreneurship Behavior and Research*, 23(1), pp. 114-135.
- Desa, G., and Basu, S.(2013). Optimization or bricolage?: Overcoming resource constraints in global social entrepreneurship. *Strategic Entrepreneurship Journal*, 7, pp. 26-49.
- Dew, N., Read, S., Sarasvathy, S. D., and Wiltbank, R.(2008). Outlines of a behavioral theory of the entrepreneurial firm. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 66(1), pp. 37-59.
- Duymedjian, R., and Ruling, C. C.(2010). Towards a foundation of bricolage in organization and management theory. *Organization Studies*, 31(2), pp. 133-151.
- Ferneley, E., and Bell, F.(2006). Using bricolage to integrate business and information technology innovaiton in SMEs. *Technovation*, 26(2), pp. 232-241.
- Gioia, D. A., Corley, K. G., and Hamilton, A. L.(2013). Seeking qualitative rigor in induction research: Notes on the Gioia methodology. *Organizational Research Methods*, 16(1), pp. 15-31.
- Hitt, M. A., Ireland, R. D., Sirmon, D. G., and Trahms, C. A.(2011). Strategic entrepreneurship: Creating value for individuals, organizations, and society. *Academy of Management Perspectives*, 25(2), pp. 57-75.
- Senyard, J., Baker, T., Steffens, T. P., and Davidsson, P.(2014). Bricolage as a path to innovativeness for resource-constrained new firms. *Journal of Product Innovation Management*, 31(2), pp. 211-230.
- Wu, L., Liu, H., and Zhang, J.(2017). Bricolage effects on new-product development speed and creativity: The moderating role of technological turbulence. *Journal of Business Research*, 70, pp. 127-135.
- Xiao, Y., Tylecote, A., and Liu, J.(2013). Why not greater catch-up by Chinese firms?: The impact of IPR, corporate governance and technology intensity on late-comer strategies. *Research Policy*, 42(3), pp. 749-764.

- Yang, M.(2018). International entrepreneurial marketing strategies of MNCs: Bricolage as practiced by marketing managers. *International Business Review*, 27(5), pp. 1045-1056.
- Yin, R. K.(2014). *Case study research: Design and methods (5th ed)*. Sage, London.
- Yu, X., Li, Y., Su, Z., Tao, Y., Nguyen, B., and Xia, F.(2020). Entrepreneurial bricolage and its effects on new venture growth and adaptiveness in an emerging economy. *Asia Pacific Journal of Management*, 37, pp. 1141-1163.
- Zahra, S. A.(2021). The resource-based view, resourcefulness, and resource management in startup firms: A proposed research agenda. *Journal of Management*, 47(7), pp. 1841-1860.

The Bricolage Strategy Utilization for Vitalization of Technology-based Startup

- Focusing on KAIST's Silicon Photonics Technology -

Kwon, Sang-Jib

- Abstract -

This study considers the interplay of bricolage strategy in relating to the initiation and vitalization of technology-based startup. In a technology-based business context, entrepreneurs could turn to resource utilization and reconstruction as a guideline for untangling growth and success related to startup actions and their strategic planning. However, technology venture research has not yet fully taken advantage of bricolage strategies. This study suggests that under resource constraints, a standardized technology-based startup process could be counter-productive and bricolage perspective (resource reutilization & reconstruction) might better explain effective startup process in resource-constrained business environments. Results from a silicon photonics technology startup process of KAIST. The role of resource constraints in technology startup processes has been investigated in various perspectives but with conflicting outcomes. This study not only examined and organizes technology commercialization by providing resource reutilization mechanisms but also offers a much-needed integration between technology policy studies in these disciplines by offering a resource reconstruction perspective. Overall, this paper contributes the importance of bricolage for advancing technology policy research domains and a fully understanding of technology-based startup process as a genuinely entrepreneurial action.

Key words

Bricolage, Technology-based Startup, Technology Commercialization, Business Model, Silicon Photonics

산업 디지털전환을 위한 5G

5G 기능과 3GPP 표준 참여
현황 및 시사점

김동욱

KAIST 기술경영전문대학원

TECHNOLOGY POLICY
MECHANICAL ENGINEERING

산업 디지털전환을 위한 5G

- 5G 기능과 3GPP 표준 참여 현황 및 시사점 -

김동욱*

- 초 록 -

디지털전환은 통신 인프라/기술을 정보 기술 솔루션이 적용될 수 있는 기반으로 활용하여, 기존에는 불가능하였던 산업의 최적화와 자동화를 가능케한다. 5G는 고정/이동, 실외/실내의 구분을 넘어서 모든 것을 연결시킬 수 있어 디지털전환에 적합한 기술이나, 이동통신업계를 제외한 업계에서는 5G에 대한 이해가 어려운 것이 현실이다. 이에, 본 고에서는 5G의 기능 중 디지털전환에 적합한 기능들을 소개하고, 현재 5G 표준화에 산업계의 참여 현황이 어떻게 되는지 분석한다. 5G는 기업이 자체적으로 망을 구축, 다양한 IT솔루션을 통합시킬 수 있고 망의 기능을 기업이 조정할 수 있도록 개방하며, 정밀한 시간과 측위를 보장할 수 있다. 그러나, 현재 5G 표준에서는 한국 산업계의 참여가 제한적인 편이다. 5G를 100% 활용하기 위해 해외 산업계의 주요 사업자들을 벤치마킹하여 표준에의 참여가 권장되며, 정부 혹은 산업계 주도의 5G 교육/시범 프로그램이 이에 도움이 될 것으로 사료된다.

주 제 어 디지털전환, 5G 적합성, 5G 기능, 표준화 현황, 표준화 참여

논문접수일 2023년 4월 30일 수정논문 제출일 2023년 6월 2일 게재확정일 2023년 6월 15일

* KAIST 기술경영전문대학원, yooksonbaekon@gmail.com

I. 서론

1. 5G와 디지털전환

우리나라 뿐만이 아닌 전세계 적으로 디지털 전환이 화두가 되고 있다. 디지털전환이란 “디지털 기술을 사회 전반에 적용하여 전통적인 사회 구조를 혁신시키는 것”으로 정의되며, 보다 구체적으로는 사물 인터넷 (IoT: Internet of Things), 클라우드 컴퓨팅, 인공지능(AI), 빅데이터 분석 등의 정보통신기술을 통하여 기존의 운영방식과 서비스를 혁신하는 것을 뜻한다 (한국정보통신기술협회). 이는 디지털전환이 통신기술이라는 기반 인프라가 기본으로 구축되어야 한다는 것을 내포하며, 실제로 사물 인터넷, 클라우드 컴퓨팅, 인공지능, 빅데이터 분석과 같은 기술들 모두 하드웨어의 발달 뿐만이 아니라 인프라의 중앙집중을 가능하게 만든 통신 인프라의 보급 및 발달로 실현될 수 있었다. 또한, 고정된 지점/단말에서만 활용가능한 유선통신을 넘어서고 이동 중에도 광대역 데이터 통신을 활용 가능한 수준으로 제공할 수 있는 4G 이동통신 기술의 보급을 통해서 디지털전환이 가능하게 된 측면이 있다. 이러한 맥락에서, 2023년 현재의 최신 이동통신 기술세대인 5G에 디지털전환을 도울 수 있는 기능이 무엇이 있는지 그리고 추후 기계 산업을 포함한 비통신산업의 디지털전환의 확산을 가속화하기 위해서는 어떤 조치가 필요한지를 분석하는 것이 필요하다.

1) 5G의 사용 사례

우선 5G가 충족할 수 있는 디지털전환 사용 사례(Use Case)들을 파악할 필요가 있다. 이 사용 사례들은 크게 4가지로 분류 가능하다. 첫째로, 넓은 지역에 분포되어 있는 대량의 단말들이 소량의 데이터 통신을 필요로 하는 대규모 사물인터넷(Massive IoT)가 있다. 이 분류에서는 보통 저가 단말이 활용되며 예시로는 스마트미터기(Smart meter)와 같이 고정된 형태와 자산(예: 화물) 관리와 같이 이동하는 형태가 있다. 둘째로, 기존의 소비자들이 활용하는 데이터 통신과 비슷하게 대용량 데이터의 빠른 전송이 필요한 광대역 사물인터넷(Broadband IoT)가 있다. 가상현실/증강현실과 같이 사용자가 직접 활용하거나 아니면 드론에서 전송되는 영상 데이터와 같이 사용자를 보조하는 형태 등 여러가지의 사용 사례가 가능하다. 셋째로, 반응 속도가 빠르고 (초저지연) 전송 데이터가 잘 유실되지 않으며 (초신뢰) 성능이 일정해야 하는 미션 크리티컬 사물 인터넷(Critical IoT)가 있다. 협력 지능형 교통체계와 같이 다수의 자동차와 인프라가 상호 소통함으로써 안전을 확보하는 시스템과 기차와 같은 대중 교통 수단의 안전 및 제어 시스템

을 포함한다. 넷째로, 미션 크리티컬 사물 인터넷과 유사하게 초저지연 및 초신뢰 통신을 요구하면서도, 시간의 정밀성도 필요로 하는 산업자동화 사물 인터넷 (Industrial Automation IoT) 가 있다. 작업자와 같이 협업할 수 있는 협동로봇이나 기계를 정밀하게 제어하고 자동화 할 수 있는 사용 사례들이 포함된다. (Apicella, 2020)

이와 같은 5G 사용 사례들이 미래의 공장에 어떻게 적용되는 지는 Marshall (2022)에서 잘 설명되어 있다. 우선, 각종 기계와 재고 등 각종 상황을 실시간으로 확인할 수 있는 추적 및 모니터링 시스템이 가능해진다. 이는 대규모 사물 인터넷에 근접한 사용 사례이며 5G의 무선 연결과 이동성의 지원을 통해 가능해진다. 다음으로는 증강현실을 활용한 사용자의 작업 처리 보조가 있을 수 있으며, 차세대 미디어(고품질 영상, 가상현실 등)를 통하여 디지털 쌍둥이 (Digital Twin)을 구현, 원격 제어와 운영에 도움을 줄 수도 있다. 이는 광대역 사물 인터넷과 미션 크리티컬 사물 인터넷을 혼합한 사례라고 볼 수 있다. 마지막으로 자율적으로 판단, 작업 할 수 있는 협동 로봇과 생산 과정을 실시간으로 관리하고 처리하는 시스템의 구축이 있다. 이는 산업자동화 사물 인터넷에 해당되며 어떻게 보면 산업의 디지털전환에 있어서 추구하는 이상향에 근접한 형태이다.

5G-ACIA(5G Alliance for Connected Industries and Automation) 협회 (5G-ACIA, 2022)에서는 보다 구체적으로 5G가 산업용으로 어떻게 활용될 수 있는지를 연구하였다. 여기서 산업용 단말을 7가지의 종류로 파악하였으며, 이는 다음과 같다:

- 저지연 센서/액추에이터: 이동하는 로봇에 적용되는 경우가 많으며, 저지연 고신뢰 통신을 요구
- 저전력 센서/액추에이터: 보통, 상태의 추적/모니터링에 활용되며 외부 전력 공급 없이 수년간 사용되어야 하는 경우가 많음
- 2D/3D 센서: 카메라/라이다 등을 통해 2D/3D 데이터를 수집
- 인간-기계 인터페이스 (HMI): 제어자와 사용자에게 시각적인 정보를 제공 (예: 증강현실)
- PLC/제어장치: 관리 시스템이나 타 제어 장치와 통신, 공정을 제어
- 게이트웨이: 산업용 시스템과 5G 단말들을 호환시키고 연결하는 장비
- TSN 포트: 시간의 정밀성을 요구하는 유선 망에 통합될 수 있는 5G 시스템

다양한 사용 사례에서도 볼 수 있었듯이, 단말에 따라서 요구되는 성능은 상이하다. 반응 속도(지연시간)의 측면에서는 실시간성이 요구되는 경우에 1초 미만의 반응속도, 어떤 경우에는 1 ms 미만의 반응속도를 요구한다. 예를 들면 저지연 센서/액추에이터, 저전력 센서/액추에이터, 2D/3D센서, 그리고 특정 상황에서의 HMI가 이에 해당된다. 그 외의 경우에는 100 ms 이상의 지연속도면 충분히 활용 가능한 단말들이 있으며, 이는 다른 상황에서의 HMI, PLC/제어장치, 게이트웨이, TSN 포트가 있다. 데이터 전송 속도의 경우 센서들은 많아봤자 2Mbit/s, 어떤 경우에는 수 kbit/s을 요구하고 있었으나, HMI, PLC/제어장치, 게이트웨이, TSN 포트의 경우 100Mbit/s에서 1 Gbit/s까지도 요구하고 있다. 에너지 효율 측면에서는 인간 작업자의 작업시간과 휴식시간을 고려하여 재충전/배터리교환 없이 10시간 이상 활용이 가능해야 하며, 로봇, HMI와 같이 이동을 수반하는 경우에는 끊임 없는 연결과(서비스연속성) 정밀한 위치파악이 가능해야 하는 제약 조건이 있다.

결국에 산업용을 위한 사물 인터넷은 위에 언급되었던 4가지의 사용 사례로 요약될 수 있으며 이는 저전력 소규모 데이터 단말을 대량으로 연결하는 대규모 사물 인터넷, 광대역 고속 데이터 통신을 필요로 하는 광대역 사물 인터넷, 빠른 반응 속도와 데이터 손실을 최소화할 수 있는 미션 크리티컬 사물 인터넷, 그리고 공정과 제어에 필요한 시간의 정밀성을 확보할 수 있는 산업 자동화 사물 인터넷으로 분류될 수 있다.

2) 디지털전환을 위한 무선기술과 5G의 적합성

디지털전환의 사용 사례를 충족하는 기술은 5G에 국한되어 있지 않으며, 어떤 사용 사례를 보느냐에 따라서 고려할 수 있는 기술¹⁾이 더 많아질 수 있다. 이러한 사항을 고려할 때, 5G와 다른 경쟁기술을 비교, 평가하는 것이 필요하며, 본 항에서는 디지털전환의 4가지 사용 사례 분류를 모두 충족할 수 있는 다른 기술인 Wi-Fi와 5G를 비교한다.

Wi-Fi는 IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers)에서 정의하는 표준을 기반으로 한 무선기술로 일반인에게는 스마트폰이나 컴퓨터를 연결할 수 있는 편리한 기술로 널리 활용되고 있다. 2023년 현재, 최신 표준은 Wi-Fi 6와 Wi-Fi 6E이며 이는 IEEE 802.11ax 표준 기반으로 각각 802.11ax의 2019년도 버전과 2021년도 버전을 활용하고 있다. Wi-Fi의 장점은 5G대비 가볍고 단말/모뎀/서비스 단가가 저렴하다는 것이나, 성능은 5G대비 열위에 있다 (<표 1> 참조).

1) 예컨대, 대규모 사물 인터넷의 경우 5G와 같은 이동통신 말고도 LoRA나 Sigfox와 같은 경쟁기술이 존재한다.

〈표 1〉 5G와 Wi-Fi의 비교

(단위: 각 행 참조)

기준	5G	Wi-Fi 6/6E	우위
최대 전송속도 (다운로드)	2-20 Gbit/s	10 Gbit/s	-
최대 전송속도 (업로드)	1-10 Gbit/s**	5 Gbit/s	-
최저 지연시간	0.5-4ms	2ms	5G
커버리지 ²⁾	10 km(실외) 100-300 m(실내)	300 m(실외) 50 m(실내)	5G
이동으로 인한 지연	10 ms	50 ms	5G
간섭 관리	관리 가능	관리 어려움	5G
단말/모뎀 비용	\$ 300/\$ 10-50	\$100/\$ 1-5	Wi-Fi
데이터 서비스 비용	월 \$ 5-20 구독	기존 유선데이터 활용	Wi-Fi
구축/설치 난이도	高	低	Wi-Fi

* 자료: Oughton et al. (2020) 및 BT-PON (2021) 재구성

단, 위의 비교는 Wi-Fi 6과의 비교이며, Wi-Fi의 새로운 버전인 Wi-Fi 7(IEEE 802.11be 표준 기반)이 2024년부터 상용화될 계획으로 전송속도, 지연, 커버리지가 향상될 경우 5G의 우위가 감소하거나 없어질 수도 있다. 하지만 이미 상용화되어 있어서 제품의 레퍼런스가 존재하고 어느 정도로 증명되어 있는 5G와 상용화가 2024년 이후에 되기 시작하는 Wi-Fi 7을 2024년부터 비교하는 것은 적합하지 않으며, 특히 5G는 지속적으로 성능과 기능이 향상되고 있는 상황(2절 참조)으로 현재의 비교로부터 결론이 크게 달라지지는 않을 것으로 예상된다.

5G와 Wi-Fi의 장단점을 감안할 때, 디지털전환에 있어서는 5G를 활용하는 것이 4가지 사용 사례 분류의 요구사항을 충족하는 데에 보다 적합할 수 있다. 우선, 5G는 사용자나 단말이 이동하는 상황에서 서비스를 끊김 없이 제공할 수 있는 이동성을 지원한다는 것이 강점이다(Doyle, 2021). 애초에 이동통신이 이동하는 상황에서 지연시간에 민감한 음성 전화를 연속적으로 제공하기 위해 만들어진 기술이기 때문에, 이동으로 인한 지연시간의 증가를 최소화시킬 수 있다. Wi-Fi 또한 이러한 이동성을 지원하기 위한 기능들이 있으나, 대부분의 Wi-Fi 단말들은 이를 구현하고 있지 않으며, 이들을 구현하려면 단가가 증가하기 때문에 Wi-Fi의 장점을 희석시킬 수 있다.

2) 5G는 실외의 경우 Macro Cell, 실내의 경우 Small Cell 활용 가정

5G는 또한 망과 단말에서의 신호 측정 결과에 기반하여 사용자/단말의 정확한 위치를 파악할 수 있는 기능이 있다 (Doyle, 2021). 자산 관리와 기계/로봇 제어에 있어서는 각각의 자율적인 판단 능력도 중요하지만, 중앙 시스템에서 개입할 수 있도록 정확한 현황을 파악하는 것도 중요하다. 5G는 실내에서도 위치를 정확하게 파악할 수 있으며, 실외에서도 GPS를 병용하여 위치를 보다 정밀하고 정확하게 파악할 수 있다.

5G의 경우, Wi-Fi 대비 상대적으로 복잡한 무선 프레임 체계를 가지고 있으나, 이는 다수의 신호간에 발생하는 간섭 현상을 관리하는 데에 있어서 효과적이다. 5G는 제어 채널(Control Channel)을 통해서 단말과 기지국간의 통신을 관리할 수 있으며, 이는 단말에서 주파수 현황에 따라서 전송을 할지 자체적으로 판단³⁾하는 Wi-Fi보다 다수의 단말을 수용, 서비스 품질을 유지하는 데에 효과적이다 (Doyle, 2021). 또한, Wi-Fi는 비면허 주파수 대역을 활용하기 때문에, 누구나 사용할 수 있어 사용하는 데에는 쉽지만 다른 조직/사용자의 사용을 막을 수 없어 간섭의 관리가 어려우나 5G는 비면허 주파수 대역뿐만이 아니라 면허가 있어야만 사용 가능한 면허 주파수 대역을 활용할 수도 있어 품질 관리에 있어서 더 많은 선택지가 있다.

보안 측면에서도 5G가 Wi-Fi 대비 우위를 가지고 있는 기능들이 있다. 이동통신은 단말과 사용자의 신원을 확인하는 국제 표준 기반의 체계가 이미 있다. 단말의 경우 각 단말에 있어 고유한 번호인 IMEI(International Mobile Equipment Identifier)를 통해 단말의 파악 및 관리가 가능하다. 사용자의 경우 흔히 SIM카드로 알려져 있는 UICC(Universal Integrated Circuit Card), 혹은 eSIM(embedded SIM)을 통해 사용자를 확인, 관리한다. Wi-Fi의 경우 비슷한 기능을 구현하기 위해서는 별도의 솔루션을 구축하거나 단말의 경우 MAC (Medium Access Control) 주소를 활용한다. MAC 주소는 위장/변경이 IMEI 보다 용이하여 보안성 측면에서는 열위에 있다. (Doyle, 2021)

5G는 전세계적으로 활발한 생태계가 있다는 것이 큰 장점이다 (Apicella, 2020) (Ericsson ITU). 5G는 전세계 통신사들이 이미 활용하고 있는 기술이기 때문에 관련 제조사와 솔루션 개발사가 전세계적으로 존재하고 있으며, 이는 대륙/국가에 의한 제한이 최소화될 수 있다는 것을 의미한다. 또한, 5G는 단순히 상용제품만이 아니라, 관련 연구개발, 표준정의, 표준 기반의 인증 체계가 활발한 기술로 (2절에 후술) 일정 수준 이상의 품질의 제품 및 솔루션을 확보할 수 있다는 것도 매력적이다.

3) 정확히는 사용하려는 주파수 대역이 사용되고 있지 않아야 함

마지막으로, 5G는 기존에 구축되어 있는 공중 이동통신망과의 통합이 가능하여 확장성을 확보할 수 있다 (Digital Catapult, 2022). 5G를 산업용으로 활용할 경우, 곧 후술될 사설망을 직접 구축하거나, 공중 이동통신망을 일정 부분 활용하는 등 유연하게 대처할 수 있으며, 갑작스럽게 규모를 증설하거나 다른 지역으로 진출/이동하는 경우 해당 지역의 공중 이동통신망을 활용하여 필요한 규모를 빠르게 확보할 수 있다. 또한, 공중 이동통신망의 음성/영상 전화 서비스나 메시징 서비스 등, 기초 통신 서비스의 활용도 가능하며, 자체적인 솔루션/시스템을 구축할 필요가 없다는 장점도 있다. (Ericsson ITU)

5G의 장점은 단순히 서류상에서만 존재하는 것이 아니며 실제로 전세계적으로 비통신업계에 서 5G를 도입한 사례가 다수 존재한다. 실제로 GSA (2022)에 따르면 2022년 8월 기준, 이동통신(4G/5G)를 활용하는 사설망이 전세계적으로 889 기관이 있다고 추정하고 있다. 사설망 (Private Network)이란 구축하는 기관 (예: 기업, 정부, 행사 장소 등)에서 인증하는 사용자만 접근/사용이 가능한 망으로 기관에서 망 전체를 소유/구축/운영하거나 공중 이동통신망을 일부 활용할 수 있다. 100,000유로 (약 1.4억 원) 미만의 계약은 집계되지 않는다는 것을 감안하면 5G를 도입하고 있는 비통신업 기관은 더 많고 더 늘어날 것으로 추정할 수 있다. 이 추정은 EY Global (2022)의 설문조사에서도 유추할 수 있다. 이 설문조사에서는 조사 대상인 1,018개의 기업 중 744개의 기업이 5G에 투자하고 있거나 투자할 계획이 있다고 답하였다.

2. 이동통신 표준과 5G

이동통신은 다른 산업 대비 특이점이 두 가지 있다. 첫째로, 이동통신은 점진적인 기술 변화가 아니라 9-10년에 한번씩 새로운 세대의 기술이 표준화, 상용화되어서 성능이 약진한다. 물론 세대 내에서의 점진적인 발전이 축적되면서 성능이 비약적으로 향상되는 경우가 많지만, 새로운 세대에서는 새로운 아키텍처를 도입하여 보다 미래 대비적인 기술로 거듭난다. 예컨대, 5G는 4G대비 사물인터넷 사용 사례를 효과적으로 충족할 수 있으며, 클라우드 기반 아키텍처를 통해 IT 시스템과의 통합도 보다 용이하다. 둘째로, 이동통신은 글로벌 표준에 기반을 두고 있다. 이는 사용자가 많아질 수록 가치가 지수적으로 증가하는 네트워크 효과 때문으로, 표준을 어느 정도로 준수하지 않으면 상호간의 통신이 불가능하여 기술의 가치가 떨어지기 때문이다. 이로 인하여 이동통신의 기술 주기는 1.5년에서 2년으로 표준, 제품 개발, 시험/테스트, 상용 전 시범 사업, 상용화의 단계를 거친다. 즉, 표준 정의 이후 1.5년에서 2년 후에는 상용 제품이 출시된다고 볼 수 있다.

이동통신 표준의 정의에 있어서 중요한 표준 기구는 2개가 있다. 첫째로 ITU-R (International Telecommunication Union Radio Communication Sector)가 있다. ITU-R은 전세계의 무선주파수의 용도를 지정하고 이동통신 기술 세대의 요구사항을 정립하는 유엔 산하의 국제기구로 각국의 정부와 기업들이 참여하고 있다. ITU-R은 이동통신용 주파수를 지정할 뿐만이 아니라 이동통신 기술을 정립된 요구사항에 맞춰 평가, 해당 세대의 이동통신 기술로 인정하는 역할을 한다.

둘째로, 3GPP(3rd Generation Partnership Project)가 있다. 3GPP는 유럽, 한국, 중국, 일본, 미국, 인도의 통신표준기관⁴⁾들이 연합하여 출범한 프로젝트로, 3GPP 자체는 표준기구가 아니지만 3GPP의 표준을 해당 표준기관들이 그대로 국가 표준으로 준용하기 때문에 국제적으로 인정되는 표준이다. 3GPP의 표준은 현재 이동통신 업계에서 사실상의 표준으로 통용되기 때문에 보통 5G 기술을 지칭할때는 암묵적으로 3GPP 표준 기술을 의미한다. 3GPP는 단말과 기지국 사이의 무선 전송 기술, 사용되는 프로토콜, 기지국 간의 통신 기술을 관장하는 TSG(Technical Specification Group) RAN(Radio Access Network), 기술의 요구사항, 아키텍처, 보안, 운용/관리, 미디어 등의 사항을 관장하는 TSG SA(Service & System Aspects), RAN을 제외한 범위에서의 구체적인 프로토콜을 관장하는 TSG CT(Core Network & Terminals)의 3개로 구성되어 있으며 총 25개의 WG(Working Group)이 3개 TSG의 산하에 존재한다. 3GPP는 또한 기술의 표준을 정의하는 데에만 그치지 않고, 테스트를 위한 규격을 만들면서 해당 규격을 시험하기 위한 주요 인증협회 - GCF(Global Certification Forum), 미국의 PTCRB - 와도 교류 중이다.

5G는 3GPP 표준의 Release 15로 시작하여 Release 17까지 완성되었으며, 현재는 통칭 5G Advanced(기존 5G대비 향상된 기능을 제공한다는 것을 의미)의 단계에 진입하여 Release 18을 작업 중이다. 이는 4G LTE의 경우 Release 8-9가 LTE, 10-12가 LTE-Advanced, 13-14가 LTE Advanced Pro로 지칭된 것과 같은 맥락이며, 세대내에서의 발전도 상당부분 진행된다는 것을 의미한다.

4) ETSI (유럽), TTA (한국), TTC, ARIB (일본), CCSA (중국), ATIS (미국), TSDSI (인도)

3. 논의 내용 및 분석 범위

5G가 기계산업을 포함한 비통신산업의 디지털전환에 적합하다는 것으로는 디지털 전환에 도움이 되지 않는다. 더 나아가서, 디지털전환을 이루기 위한 5G의 세부 기능들이 어떤 것인지 확인하는 것이 중요하다. 5G는 표준 기반으로 구축되고 운영되는 기술이므로, 3GPP 표준 기능 중 디지털전환에 도움이 된다고 사료되는 기능들을 2023년 기준으로 파악할 필요가 있다. 이는 단순히 5G가 디지털전환에 필요하다는 당위적인 측면을 넘어서 실제로 기계산업에서 5G를 활용하려면 표준의 어떤 기능을 먼저 분석하고 활용해야 하는지를 파악할 수 있다. 추가적으로, 5G를 활용하여 제조업/기계산업을 혁신한 해외 사례들을 소개하여 5G의 잠재적 활용 사례 중 어느 것이 현실적으로 가능한지 가늠할 수 있도록 한다.

또한, 단순히 있는 기능을 활용하는 것을 넘어서, 기능들의 개발과 개선에 영향을 줄 수 있는 3GPP 표준 참여의 현황이 어떻게 되는지도 고려해야 한다. 디지털전환에 있어서 5G 기술의 사용자는 기계산업을 포함한 비통신업계이며, 사용자의 수요를 정확히 고려하지 않은 기술은 성공하기 어렵다. 또한, 사용자가 기술을 사용하기 위해서는 해당 기술의 맥락을 파악하는 것도 중요한데, 이는 표준의 참여를 통해서 상당부분 파악이 가능하다. 이를 위해, 본 연구에서는 3GPP 표준화 과정에서 비통신업계가, 더 나아가서 한국의 비통신업계가 얼마나 참여하고 있는지 또한 분석한다. 이는 단순히 5G를 활용하는 측면에서 그치지 않고, 5G를 한국의 특성에 맞게 활용하기 위한 노력이 얼마나 되고 있는지를 대략적으로 측정하기 위해서이다.

마지막으로, 위의 두 가지 측면을 바탕으로 한국 기계산업이 디지털전환을 위해 5G를 효과적으로 활용할 수 있는 제언과 시사점을 도출한다.

II. 디지털전환을 위한 5G 기능

1. 개요

본 고에서는 5G의 기능을 두 가지 측면에서 기술한다. 첫째로, 단말과 기지국 간의 무선 인터페이스와 통신 프로토콜을 포함하는 무선 액세스 기술이다. 무선 액세스 기술은 보통 특정 사용 사례에만 국한되어서 개발되지는 않으나, 디지털전환 및 산업용 사용 사례에 있어서 도움이 될만한 기능들을 부각하여 기술한다. 둘째로, 5G 시스템 차원에서 디지털전환 및 산업용 사용

사례에 맞게 개발하는 기능들이다. 이 기능들 또한 엄밀하게는 다른 사용 사례에도 적용될 수 있으나, 무선 액세스 기술만큼 범용도가 높지 않다.

2. 무선 액세스 기술

1) 다중안테나기술

다중안테나기술 (MIMO: Multi-Input Multi-Output)은 Wi-Fi나 4G에서부터 활용되던 기술이지만, 5G에서는 보다 많은 수의 안테나를 활용하는 Massive MIMO 기술을 도입하고 있다. 단말의 경우 공간의 한계 때문에 안테나의 수가 제한되나 기지국의 경우 적게는 16개에서 많게는 128개의 안테나를 활용하여 여러 사용자를 보다 효과적으로 수용하고 커버리지도 확장할 수 있는 활용도가 높은 기술이다.

기존의 5G에서는 지속적으로 Massive MIMO의 Downlink (망에서 단말로 전송되는 통신을 의미)를 향상시켰다면, 현재 Release 18에서는 Uplink (단말에서 망으로 전송되는 통신을 의미)를 향상시키는 데에 집중하고 있다 (5G Americas, 2022). 특히 산업용 단말은 스마트폰에만 국한되지 않기 때문에, 다양한 단말의 종류를 고려하는 Massive MIMO 기술을 표준화 중이며, 초저지연과 고속 이동 사용 사례들에 맞춰서 최적화하는 작업도 진행 중이다 (5G Americas, 2022).

2) 단말 성능 최적화

5G의 초반인 Release 15와 16에서는 주로 5G의 기존 공중 이동통신망에서의 활용에 초점이 맞추어져서 표준화가 진행되었다. 이는 공중 이동통신망에서의 빠른 5G 상용화에 대한 요구사항이 있었기 때문에 표준화의 범위 또한 맞춰서 진행되었던 것이나, Release 17부터는 산업용을 위한 5G 기술의 표준화가 본격적으로 이루어지기 시작하였다.

RedCap (Reduced Capability) 기능은 이러한 추세를 반영한다. RedCap은 다양한 산업용 단말들을 반영한 성능 최적화를 진행하였다. 예를 들면 센서(수백 kbit/s)와 고속 데이터 전송 (Gbit/s) 사이의 전데이터 전송 속도(수백, 수십 Mbit/s)에 최적화된 단말 성능을 정의하고 단말이 보유하고 있는 공간 및 형태의 제약을 감안하여서 성능을 최적화하는 것이다 (5G Americas, 2022). Release 17에서는 웨어러블, 영상 감시 장비 등 좀 더 무거운 성능이 필요한 단말들에 맞춰 최적화를 했으며, Release 18에서는 좀 더 가벼운 성능을 요구하는 단말들에 맞춰 최적화를 진행 중이다 (5G Americas, 2022)

3) 단말 에너지 효율 향상

산업용 단말 중에서는 센서와 같이 긴 주기를 가지고 데이터를 통신해야 하는 경우가 있다. 특히 센서는 외부의 전기 공급 없이 수 년을 작동해야 하는 경우가 많아 에너지 효율이 중요하다. 기존의 휴대폰 또한 외부의 전기 공급 없이 작동 시간을 최대한 늘리기 위해 수신 신호를 전부 수신하지 않고 신호의 초반부⁵⁾만 수신, 해석하여서 필요하지 않을 경우 그 외의 신호는 수신하지 않는 조치를 이미 취하고 있으나 센서는 그 이상의 에너지 효율을 요구하고 있다. 5G에서는 Wake Up Signal (WUS)를 도입하여 이러한 신호 초반부 읽기도 일정시간 건너뛰고 전원으로 아낄 수 있게 만들었으며, 현재는 이 효율을 더 향상시키기 위한 기술의 표준화와 WUS만 수신하는 수신기를 별도로 분리하여 데이터 송수신을 위한 송수신기는 필요시에만 작동하는 방안도 고려 중이다 (5G Americas, 2022).

3. 5G 시스템 기술

1) 사설망/비공중망

서론에서 전술되었듯이 사설망은 도입하는 기관의 목적에 맞춰서 소유/구축/운영이 되는 망이며, 특히 해당기관에서 인정하는 사용자만 망에 접속할 수 있어 망의 유연한 제어와 관리가 가능하다. 3GPP에서는 사설망을 비공중망(Non-Public Network)라는 개념으로 정의하여서 표준을 정의하였다. 이는 누구나 접속할 수 있는 공중 이동통신망과는 달리 특정 사용자만 접속 가능한 통신망에 초점을 맞춘 개념으로, 크게 두 가지로 분류된다.

SNPN(Standalone Non-Public Network)는 공중 이동통신망의 도움 없이 구축되는 망으로 기관의 목적(예: 산업용 사용 사례)에만 최적화되어 구축 및 운영되는 망이다. 어떻게 보면 기존의 유선 기관망과 유사한 개념으로 기관이 자체적으로 (혹은 솔루션 사업자를 선정하여) 통신 인프라를 구축하여 기관내의 용도로 활용, 운영하는 망이다. 그와 대비되는 개념으로 PNI-NPN(Public Network Integrated Non-Public Network)는 사설망의 일정 부분, 혹은 전부에 공중 이동통신망 인프라를 활용하는 망으로, 네트워크 슬라이싱과 같은 기술을 통해 기관의 트래픽과 공중 통신망의 일반 가입자를 구분, 다른 제어/관리 정책을 적용할 수 있다. 특히 CAG(Closed Access Group)이란 개념을 통해서 일반 가입자는 기관의 논리적망에 접속을 할 수 없게 만든다(Kim, 2022). SNPN의 경우, 사용기관의 목적에 최적화되고 기관이 자유롭게

5) 슬롯의 헤더

게 제어/관리할 수 있으나 구축에 있어서 시간과 초기투자비가 많이 필요하다는 단점이 있으며, 반대로 PNI-NPN의 경우 공중 이동통신망을 활용하기 때문에 제어/관리가 제한된다는 단점이 있으나 이미 존재하는 인프라를 활용할 수 있어 빠른 사용/확장이 가능하고 초기투자비가 적게 든다는 장점이 있다.

3GPP에서는 사설망을 단순히 하나의 기관이 구축, 인증, 운영하는 시나리오뿐만이 아니라 다양한 시나리오를 지원하기 위한 기능도 마련하고 있다. 특정 사설망을 소유/사용하는 기관의 사용자들 뿐만이 아니라 Credentials Holder라는 다른 기관에서 인증하는 사용자들도 해당 사설망에 접속할 수 있게 허용하는 기능도 있다 (Kim, 2022). 또한, 사설망에 접속할때 5G뿐만이 아니라 Wi-Fi를 통해서도 접속이 가능하게 아키텍처를 개선 중이며, 사설망에 적용되는 각종 규제(긴급재난문자, 긴급전화 등)도 충족될 수 있는 기능도 정의 중이다 (SA WG2, 2022).

위와 같은 기능들을 통해, 기관은 자체적인 요구사항에 따라서 독립된 사설망 (SNPN)을 구축하거나, 망의 일부분을 공중 이동통신망에 의존하거나, 아니면 공중 이동통신망 인프라만을 활용하는 방안을 선택할 수 있다(그림 1 참조). 이는 다양한 산업용 사용 사례와 기관의 전략을 충족하기 위해서이다.

[그림 1] 사설망과 공중 이동통신망과의 통합

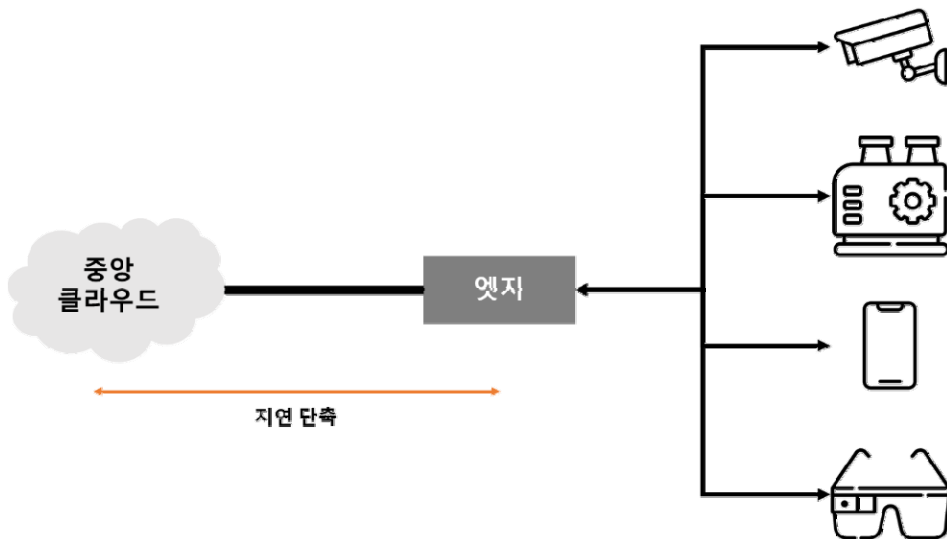


* 자료: Apicella (2020) 재구성

2) 엣지 컴퓨팅의 통합

데이터 센터에 서버가 집중되어 작업을 처리하고 그 결과를 사용자에게 전송하는 클라우드 컴퓨팅과는 달리, 엣지 컴퓨팅은 서버를 사용자에게 가까운 장소(엣지: Edge)에 비치하여 전송시간을 대폭적으로 줄이는 새로운 기술 패러다임이다. 엣지 컴퓨팅은 빠른 반응 시간이 요구되거나 보안을 위하여 데이터가 기관 밖으로 전송되지 못 하는 상황에서 쓰이며, 산업용 사용 사례들 중 미션 크리티컬 사물 인터넷이나 산업자동화 사물 인터넷의 경우 엣지 컴퓨팅이 활용되어야 사용되는 IT 솔루션이 요구사항을 충족시킬 수 있다. 예를 들면, [그림 2]와 같이 중앙 클라우드와 엣지 클라우드를 연결하고 5G를 활용하여 다양한 사물 인터넷 기기들을 지원할 수 있다.

[그림 2] 산업용 사용 사례를 충족하기 위한 엣지 컴퓨팅 시나리오



3GPP에서는 5G망과 엣지 컴퓨팅을 통합시키기 위한 기능들을 제공하고 있다. 첫째로, 엣지 컴퓨팅 환경을 제공하기 위해 망의 장비/기능들을 분산시키는 아키텍처를 정의하고 있으며, 엣지 환경으로의 분기가 어떤 위치에서 어떻게 이루어지느냐에 따른 시나리오들도 지원하고 있다 (3GPP, 2022c). 예컨대, 엣지 환경만을 위한 네트워크 기능들이 따로 구축되는 경우와 중앙 클라우드와 접속하는 네트워크 기능들과 엣지 환경을 위한 네트워크 기능들이 통합되어서 분기만 엣지에서 되는 경우 등을 구분하여 지원한다. 후자는 엣지 컴퓨팅 뿐만이 아니라 기존의 클라우드 컴퓨팅도 활용해야 하는 경우에 유용하다. 둘째로, 5G망을 통해 제공된 엣지 컴퓨팅

환경을 애플리케이션(예: 산업용 솔루션)이 활용할 수 있는 플랫폼을 정의하고 있다. 애플리케이션들은 이 플랫폼을 활용하여 엣지 컴퓨팅 자원과 기능을 확인할 수 있으며, 해당 엣지 환경에 최적화되어 사용자에게 제공될 수 있다(3GPP, 2022d). 예컨대 특정 엣지 환경에서 다른 엣지 환경으로 옮기게 될 경우 애플리케이션의 서비스가 끊기지 않고 사용자에게 제공될 수 있도록 연속성을 보장하는 기능이 있다.

3) 5G망 기능 개방

사설망이나 엣지 환경이 아닌 경우에도 고객은 자신의 서비스를 위해 5G망의 기능들을 활용할 수가 있다. 5G와 이전 세대의 큰 차이점은 5G망은 자신의 기능(Capability)을 개방(Exposure)하여 제3자(Third Party)가 5G망의 여러 가지 기능들을 자신의 서비스에 상황에 맞게 활용할 수 있게 한다는 것이다. 이는 SEAL(Service Enabler Architecture Layer)를 통해서 이루어진다.

SEAL은 Release 16부터 정의된 기능으로, Release 18 현재에도 지속적으로 개선 중이다. SEAL은 5G망 내부의 복잡한 원리를 모르더라도 제3자가 5G망에 접속, 개방된 기능들을 쉽게 활용할 수 있게 만드는 API(Application Programming Interface)를 제공한다. 어떻게 보면 애플의 iOS에서 API를 제공하여 iOS 앱 개발자들이 iOS 내부의 복잡한 원리에 대한 지식의 여부와는 관련 없이 iOS의 기능들을 쉽게 활용할 수 있게 만드는 것과 비견된다.

SEAL에서 개방하여 제3자가 접근 가능한 기능으로는 크게 6가지가 있다(3GPP, 2022b). 첫째로, 위치 정보 관리가 있다. 제3자는 자신의 사용자들의 위치 정보를 수집할 수 있으며, 특정 조건하에서 위치 정보가 자동으로 서비스 서버에 공유될 수 있게 설정할 수 있다. 더 나아가서 특정 위치 주변에 있는 단말들과 그 단말들의 위치 정보도 파악할 수 있는 기능도 제공된다. 둘째로, 그룹 관리가 있다. 제3자는 자신의 사용자들을 그룹으로 지정하거나 이미 정의된 다른 그룹과 병합할 수 있으며, 정의된 그룹들을 자신의 다른 애플리케이션에도 적용할 수 있다. 셋째로 자신의 사용자들의 단말들의 설정을 관리하고 설정하는 설정 관리 기능이 있다. 그 다음으로, 보안에 필요한 정보들(암호키 등)을 보호된 환경에서 배포할 수 있는 키 관리 기능과 신원을 관리하는 Identity 관리 기능이 있다. 마지막으로 5G망의 전송 유형을 지정하는 등 네트워크 자원을 정책에 맞게 관리하는 네트워크 자원 관리 기능이 있다.

4) 시간 정밀성 보장

사용 사례를 분석할 때에도 언급되었듯이, 산업자동화 사물 인터넷 사용 사례는 시간의 정밀성을 요구한다. 초저지연을 위해서는 데이터 전송의 오류를 최소화 해야하는 것을 뜻하며, 이를 위해 각 기계간의 시간이 동기화하고 엄격한 기준의 스케줄링 (Scheduling)이 적용되어야 한다. 이러한 맥락에서 유선 Ethernet 기술에 적용되는 시간 민감형 네트워크(TSN: Time-Sensitive Networking) 기술이 IEEE로 인하여 정의되었고, 기계 자동화에 적용되었다. 5G는 이미 유선 기반으로 기구축된 산업 자동화 기술과도 쉽게 통합이 가능하며, 이를 위해 위에 정의된 IEEE 표준들과 호환되는 기능을 제공한다.

첫째로, IEEE 802.1AS에서 정의된 Generalized Precision Time Protocol (gPTP)를 지원하고 5G내의 장비/소프트웨어가 기존 자동화 시스템과 동기화될 수 있도록 한다. 두 개의 사설망(NPN)이 같은 기지국을 공유하는 경우에도 전부 동기화가 될 수 있는 등, 단순히 하나의 5G 사설망에 국한되지 않는 동기화가 가능하다. 둘째로, IEEE 802.1Q에서 정의한 TSN 기능을 지원하고, 해당 아키텍처 내에서 5G망이 어떻게 통합되어야 하는지를 정의한다. 논리적으로는, 5G망이 기존 자동화 시스템 내에서는 TSN 단말로 인식이 되는 형태를 갖춘다. (5G-ACIA, 2021)

5) 측위

산업용 사용 사례에서는 기계나 사용자의 위치를 확인, 파악하는 것이 중요하다. 기계가 자율적으로 대응하는 능력도 중요하지만, 중앙에서 모든 상황을 파악하고 필요시 개입하기 위한 수준의 정보를 확보하는 것도 필요하며, 이를 위해서는 위치 정보를 배제할 수 없다. 5G에서는 위치 확인/파악을 위하여 네트워크 차원에서 5G Location Services (LCS) 기능을 지원하고 있다. 이 기능은 단말 혹은 제3자의 서비스 서버에 위치하고 있는 LCS 클라이언트가 네트워크에 위치 정보를 요구하면, 네트워크에서 기지국/단말의 정보를 수집, 통합하여 위치를 도출한 후 공유한다.

5G가 측위에 있어서 강점을 가지는 부분은 다음과 같다. 첫째로, 산업용 사용 사례는 보통 공장 등 실내에서 이루어지기 때문에, 소비자용으로 널리 활용되는 GNSS (Global Navigation Satellite System) - 흔히 GPS로 알려져 있다 -를 그대로 활용하기에는 제약이 있다. 실내에서는 위성의 커버리지가 약해지거나 막히기 때문에 GNSS를 통해 정확한 위치를 파악하기 어렵다. 둘째로, 5G는 기지국에서 단말까지의 전송에 걸리는 시간의 차이를 여러 기지국에서 측정

하여 위치를 도출하거나 기지국의 여러 안테나를 이용하여 단말까지의 거리 및 각도를 도출하는 등의 외부 환경에 크게 영향을 받지 않는 자체적인 위치 확인 기능이 있다. 마지막으로, 5G에서 고주파수 대역(예: 24GHz-40GHz 대역)을 활용할 경우 보다 정밀한 위치 측정이 가능하여 위에 언급된 두 가지 강점을 더 강화할 수 있다.

6) 유무선망 통합

이전에도 언급되었듯이 3GPP는 이동통신 기지국만을 활용하여 단말과 통신하는 것을 넘어서서 다양한 액세스망(Wi-Fi, 유선망 등)을 통합하여 단말과 통신하는 것을 지향하고 있으며, 본 항에서는 이를 유무선망 통합으로 지칭한다. 산업용 사용 사례를 충족하기 위해서는 5G뿐만 아니라 다른 종류의 연결 기술도 활용해야 하는 경우가 있기 때문에, 유무선망 통합은 디지털 전환의 실현을 위해 필수적이다. 예컨대, 유선이 필요한 사용 사례는 유선으로, Wi-Fi 혹은 블루투스 등과 같이 가벼운 연결성으로도 해결되는 사용 사례는 해당 기술로, 5G 무선 인터페이스가 필요한 기술들은 5G 무선 인터페이스를 활용하고 전체적인 통합은 5G 시스템에서 이루어질 수 있다는 것이다.

이를 위해 3GPP에서는 크게 두 가지를 진행 중이다. 첫째, 다양한 종류의 유선망을 통해서 5G 시스템이 단말과 접속할 수 있는 아키텍처를 정의, 지속적으로 개선 중이다. 예를 들면, 5G 시스템이 유선망을 통해서 특정 장소에 고정되어 있는 게이트웨이에 접속하고, 5G 연결성을 지원하지 않는 단말들을 해당 게이트웨이를 통해서 연결, 연결성을 제공하는 기능이 있다(3GPP, 2022a). 둘째, 다양한 액세스 기술들을 어떻게 활용할지 정하는 ATSSS (Access Traffic Steering, Switching, Splitting) 기능이 있다. Steering은 다양한 액세스 기술 중에서 어떤 기술로 데이터를 전송할 것인지 정하며, Switching은 전송 중인 데이터를 현재 활용 중인 액세스 기술에서 다른 액세스 기술로 끊임 없이 전환 시킨다. Splitting은 데이터를 하나의 액세스 기술만 활용하지 않고 두 개 이상의 액세스 기술로 분리, 전송한다. 예컨대, 단말의 새로운 보안 설정을 서버에서 전송하고 싶을 때, Wi-Fi를 쓸지 5G를 쓸지 결정하는 기술은 Steering, Wi-Fi로 결정하고 전송하는데 5G로 끊임 없이 바꾸고 싶을 때 전환하는 기술은 Switching, Wi-Fi와 5G를 둘 다 활용하여서 데이터를 분리, 전송하는 기술은 Splitting이라고 볼 수 있다.

4. 기계사업/제조업 5G기반 혁신 사례

1) Ford

영국 정부에서는 비통신업계에서 5G를 활용할 수 있도록 여러가지 프로젝트와 지원을 진행 중이다. Digital Catapult라는 프로그램을 통해 이러한 지원과 프로젝트를 관리하고 있으며, 이 중 주목할만한 프로젝트는 Ford의 Essex 전기자동차 공장에 5G 사설망을 구축, 생산 시설과 공정을 개선한 것이다.

Ford는 전기자동차 제조에 있어서 관련 부품을 제조하고 통합 관리를 미세 조정해야 하는 요구사항이 있었으며, 이러한 과정들이 지연되지 않고 (저지연) 고장나거나 실패하지 않아야 (고신뢰) 했다. 이런 맥락 하에서, 5G는 적합한 솔루션이었으며, Ford는 5G 사설망과 5G 센서들을 도입하여 실제 공정의 디지털 트윈을 생성, 원격의 전문가들도 대규모의 공정 데이터를 실시간으로 모니터링할 수 있는 환경을 구축하였다. 이러한 과정에 있어서 영국의 Vodafone이라는 통신사업자와 긴밀하게 협업하였다. (GSMAa)

이를 통해 Ford는 물리적으로 기계/케이블을 변경하지 않고 원활하게 설정을 변경하거나 새로운 솔루션을 적용할 수 있었으며, 이는 Ford 뿐만이 아니라 각 기계를 제조하는 협력사들에게도 동일하였다. 즉, 기계를 새로 도입하거나 업그레이드 하는 데에 걸리는 시간을 단축할 수 있다는 것을 뜻하였다. 또한, 5G 이외의 통신기술로는 어려웠던 대규모 제조 공정 데이터의 저지연 고신뢰 전송이 5G 도입으로 가능하게 되었다. (GSMAa)

2) Gree Zhengzhou

5G 사설망 도입은 단순히 새로운 솔루션을 도입하거나 성능을 개선하는 것으로만 이어지지 않는다. 5G에서 정의된 5G망 기능 개방을 통해 기존의 분리된 제조 시스템들을 통합할 수도 있다.

2021년, 중국의 Gree Zhengzhou라는 전기 제품 제조사는 자사의 공장에 5G 사설망을 도입하고 엣지 컴퓨팅 환경을 구축하여 자사의 제조 시스템을 완전 통합할 수 있었다. 기존에는 10개 이상의 개별 제조 시스템들이 있어서 관리와 최적화에 어려움을 겪고 있던 Gree Zhengzhou는 5G라는 대안을 중국의 통신사인 China Unicom과 중국의 통신장비 제조사인 ZTE와 함께 검토, 도입하였다. (GSMA).

Gree Zhengzhou는 5G 사설망과 관련 IT 플랫폼 도입을 통해서 다음과 같은 효과를 거두었다. 첫째로, 10개 이상의 개별 제조 시스템들을 통합할 수 있었으며, 둘째로 관리 및 통합에 소요되던 인력을 절감, 보다 고부가가치 업무로 전환할 수 있었다. 또한, 현장의 구축 비용을 80%까지 절감할 수 있었으며, 이동성을 충족하는 5G 도입으로 연결이 끊어지는 현상을 80% 감소시킬 수 있었다. (GSMAb)

3) Hotel Star

Hotel Star는 5G 사설망 도입을 통해 비용을 절감하고 품질과 효율을 개선한 사례이다. Hotel Star는 판지 상자 제조사로 상자 가격 저하와 비용 증가라는 진퇴양난에 처해있었던 회사이다. 이 난관을 해결하기 위해 Hotel Star는 중국의 통신사인 China Mobile과 제조사인 ZTE와 함께 5G 사설망과 엣지 컴퓨팅을 도입하였다. Hotel Star는 이를 통해 설비 가동률을 20%, 물류창고 관리 효율을 50% 향상시켰으며, 자동화를 통해 인건비를 30% 절감하는 등 총 생산 비용의 20%를 절감할 수 있었다. (GSMA)

III. 3GPP 표준화 참여 현황 분석

1. 개요

이전에도 기술되었듯이, 5G의 기술 규격을 정의하는 것은 3GPP이며, 3GPP 표준의 제정은 회원 기관들의 기고에 기반하여 이루어진다. 즉, 3GPP 외부에서 요구하거나 3GPP에서 활발히 활동하는 기관들에게 요구하는 것으로 3GPP 표준은 쉽게 영향 받지 않으며, 3GPP 내부에서 기고를 접수하거나 기여를 하여야 3GPP 표준에 영향을 줄 수 있다. 이러한 맥락을 고려할 때, 5G 기술의 비통신업계의 요구사항 반영이 잘 되고 있는지를 평가하기 위해 현재 3GPP 표준화에 있어서 비통신업계가 얼마나 참여를 하고 있는지, 특히 한국 비통신업계의 참여도는 어느 정도인지 파악할 필요가 있다.

단, 표준에 있어서 기여도를 정량적으로 측정하는 것은 정확하지 않으며 이는 개별 기고문의 영향력과 참여자들의 기여분을 측정하는 것이 지극히 어렵기 때문이다. 그렇기 때문에 정량적인 분석의 결과가 꼭 기여도를 정확하게 표시하는 것은 아니며, 그 결과는 어떠한 추세를 나타내거나 시사한다는 정도의 해석을 도출하는 것이 옳다. 물론, 분석이 없이 정성적으로만 관련 인사이

트를 도출하는 것은 어렵기 때문에 정량적인 분석은 필요하다.

2. 분석 방법론

본 분석에서 활용된 데이터는 2020년 1분기부터 2023년 1분기까지 3GPP에 기고된 기고문들을 대상으로 참여 회원사와 기고문 수를 도출하였으며, 특히 Change Request (CR)과 Pseudo-CR (pCR)들과 3GPP WG중 SA1, SA2, SA6, CT1, CT3, CT4에 초점을 맞춰서 분석하였다 (3GPP WG별 담당 내용은 [그림 3] 참조).

[그림 3] 3GPP WG 및 담당 범위



CR과 pCR만 분류한 이유는 이들이 3GPP의 기술 규격(Technical Specification)과 기술 문서(Technical Report)를 정의하는 기고문이기 때문이다. 다른 종류의 기고문들은 이러한 표준들에 간접적으로 영향을 줄 수 있으나, CR과 pCR만 직접적으로 변경사항을 반영할 수 있기 때문에 이들만 분석하였다. CR과 pCR들의 경우 꼭 합의된 (Agreed) 기고문만 포함하지 않았으며, 참여에 의의를 두었기 때문에 합의되지 않았더라도 기고가 되었다면 분석에 포함하였다. 위의 조건에 해당되는 기고문 수는 총 44,890개였으며, 어떤 기고문은 2개 이상의 기관이 참여하였다는 것을 감안할 경우 (이 경우 각 참여 기관이 한 건으로 집계) 64,707건 (이하 기고문 참여로 표기)이었다. 참여한 기관은 203개의 기관으로 이 중 10개의 기관이 한국에 본사/본부가 위치한 기관이었다. 또한, 비통신업계로 제한할 경우 54개의 기관이 표준화에 참여하였으며,

이 중 3개의 기관만이 한국에 본사/본부가 위치한 기관이었다.

분석 범위에 있어서 위 6개의 3GPP WG만 포함한 이유는 다음과 같다. SA1은 3GPP 기술의 요구사항을 정의하는 WG이며, 이미 비통신업계의 기관들이 요구사항 반영을 위해 참여를 하고 있는 WG이다. 그렇기 때문에 산업용 5G를 논의할 때 SA1을 제외할 수 없다., SA2는 5G의 전반적인 아키텍처를 정의하는 WG이며, 산업용 5G의 아키텍처 또한 일정 부분 SA2에서 담당하고 있다, SA6의 경우, 산업용 5G 중 미션 크리티컬 사물 인터넷이나 5G 기능 개방을 위한 기능을 정의하고 있기 때문에 포함되었다. CT1, CT3, CT4는 SA2와 SA6에서 정의한 아키텍처를 구현하기 위한 프로토콜과 인터페이스들을 정의하기 때문에 포함하였다. CT1, CT3, CT4의 정확한 담당 범위는 각각 단말-망간의 통신, 외부망(예: 유선망, 고객망 등)과 이동통신망의 통신, 5G망 내부 간의 통신이다.

3. 분석 결과

1) SA1

기술의 요구사항을 담당하고 있는 SA1에서는 <표 2>에서도 볼 수 있듯이 총 3,146건의 기고문 참여가 있었다. 전반적으로 비통신업의 참여가 15.3%로 높은 그룹이었으며, 특히 한국의 경우 비통신업 기관들 중에서도 10.6%의 기고문 참여를 기록할 정도로 참여를 활발하게 하고 있다. 전반적인 한국 기관들 또한 기고문 참여의 9.8%를 차지하고 있었으며, 2022년 상반기에는 한국 기관들의 기고문 참여가 15%이상이 될 정도로 기여를 많이 하고 있다 (<표 3> 참조). 또한, 5G 초기인 2020년에는 기존의 통신 사용 사례에 집중하고 있었기 때문에 요구사항 참여 건수가 낮았지만, 2021년 이후 산업용 5G 논의가 보다 활발해지면서 비통신업 기관들을 포함한 전반적인 기고문 참여가 늘어난 것으로 보인다.

<표 2> SA1의 기고문 참여 건수

(단위: 건)

종류	2020	2021	2022	2023 ⁶⁾	계
한국 기관	45	92	138	34	309
비통신업	86	231	134	29	480
비통신업 한국 기관	3	9	36	3	51
총 건수	538	1,282	885	441	3,146

6) 2023년은 1분기 데이터만 포함. 추후의 표에 대해서도 2023년 데이터는 1분기 데이터만 포함

〈표 3〉 SA1의 기고문 참여 비중

(단위: %)

종류	2020	2021	2022	2023	평균
한국 기관	8.4	7.2	15.6	7.7	9.8
비통신업	16.0	18.0	15.1	6.6	15.3
비통신업 한국 기관	0.6	0.2	4.1	0.7	1.6

2) SA2

이동통신 기술의 아키텍처를 담당하고 있는 SA2에서는 〈표 4〉에서도 볼 수 있듯이 총 24,804건의 기고문 참여가 있었다. 아키텍처를 다루다 보니 비통신업 기관들의 기존 통신업의 이해관계자들의 참여가 활발하였으며 한국 기관들의 참여가 10%대에 육박하여 통신업 내의 한국의 위상을 간접적으로 확인할 수 있었다. 하지만, 비통신업의 비중은 1.5%에 불과했으며, 한국 비통신업 기관들의 기고는 분석 기관 동안 0건이었다(〈표 5〉 참조). SA2의 경우에는 5G에 대한 통신업 기관들의 관심도의 추세를 보여주고 있는 것으로 사료된다. 처비통신업의 참여가 낮을 뿐만 아니라, 5G가 확장되기 시작하는 2021년 이후로 참여 건수가 지속적으로 늘어나고 있는 것을 볼 수 있다.

〈표 4〉 SA2의 기고문 참여 건수

(단위: 건)

종류	2020	2021	2022	2023	계
한국 기관	608	724	699	447	2,478
비통신업	93	86	145	58	382
비통신업 한국 기관	0	0	0	0	0
총 건수	5,807	7,080	7,944	3,973	24,804

〈표 5〉 SA2의 기고문 참여 비중

(단위: %)

종류	2020	2021	2022	2023	평균
한국 기관	10.5	10.2	8.8	11.3	10.0
비통신업	1.6	1.2	1.8	1.5	1.5
비통신업 한국 기관	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

3) SA6

SA6는 분석대상 WG 중 비교적 새로운 WG로, 애초에는 Mission Critical Push to Talk (MCPTT: 이동통신을 활용하여 기존 무전기를 대체하는 기술)의 표준화를 위해 발족된 WG였다. 하지만 MCPTT 이외에도 담당 범위가 확산되면서, 현재는 비통신업을 위한 통신 기술의 표준화를 대부분 담당하고 있다. SA6는 <표 6>에서도 볼 수 있듯이 총 7,787건의 기고문 참여가 있었으며, 비통신업의 비중은 6.0%였다. 한국 기관의 참여는 12.1%에 육박했으나, 비통신업의 기관 중 한국 기관의 참여는 3.6%에 그쳤다 (<표 7> 참조). SA6는 SA1의 경우와 비슷하게 2021년에 참여가 늘어나고 있으나, 세부 사항을 들여다보면 비통신업계의 참여가 SA1에 후행하고 있는 것을 볼 수 있다. 아키텍처는 요구사항 정립 이후의 단계이기 때문에 자연스러운 추세인 것으로 사료된다.

<표 6> SA6의 기고문 참여 건수

(단위: 건)

종류	2020	2021	2022	2023	계
한국 기관	255	255	323	107	940
비통신업	106	131	159	74	470
비통신업 한국 기관	7	2	3	5	17
총 건수	2,456	2,801	2,037	493	7,787

<표 7> SA6의 기고문 참여 비중

(단위: %)

종류	2020	2021	2022	2023	평균
한국 기관	10.4	9.1	15.9	21.7	12.1
비통신업	4.3	4.7	7.8	15.0	6.0
비통신업 한국 기관	0.3	0.1	0.1	1.0	0.2

4) CT1

단말과 망 사이의 프로토콜을 담당하고 있는 CT1에서는 <표 8>에서도 볼 수 있듯이 총 13,200건의 기고문 참여가 있었다. TSG CT의 WG 중에서는 한국 기관과 비통신업 기관들의 비중이 상대적으로 높은 편이다. 특히 한국의 경우 9.7%의 기고문 참여를 기록할 정도로 참여를 활발하게 하고 있다. 단, CT WG중 가장 높은데도 불구하고 비통신업의 비중이 2.1%에 불과하였으며, 비통신업 한국 기관의 기여가 없었다 (<표 9> 참조).

〈표 8〉 CT1의 기고문 참여 건수

(단위: 건)

종류	2020	2021	2022	2023	계
한국 기관	494	397	338	49	1,278
비통신업	49	68	144	20	281
비통신업 한국 기관	0	0	0	0	0
총 건수	4,114	4,208	4,248	630	13,200

〈표 9〉 CT1의 기고문 참여 비중

(단위: %)

종류	2020	2021	2022	2023	평균
한국 기관	12.0	9.4	8.0	7.8	9.7
비통신업	1.2	1.6	3.4	3.2	2.1
비통신업 한국 기관	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

5) CT3

이동통신망과 외부망과의 접속/호환을 담당하는 CT3에서는 〈표 10〉에서도 볼 수 있듯이 총 7,983건의 기고문 참여가 있었다. 망과 망 사이를 주관하는 그룹이다 보니 단말과 반도체에 강한 한국의 참여는 제한되는 수준으로 2.8%의 기고문 참여가 한국 기관으로부터 이루어졌다. 또한, 비통신업의 비중이 0.5%에 불과하였으며, 비통신업 한국 기관의 기여가 없었다(〈표 11〉 참조).

〈표 10〉 CT3의 기고문 참여 건수

(단위: 건)

종류	2020	2021	2022	2023	계
한국 기관	55	66	89	14	224
비통신업	0	29	4	5	38
비통신업 한국 기관	0	0	0	0	0
총 건수	1,822	2,587	2,915	659	7,983

〈표 11〉 CT3의 기고문 참여 비중

(단위: %)

종류	2020	2021	2022	2023	평균
한국 기관	3.0	2.6	3.1	2.1	2.8
비통신업	0.0	1.1	0.1	0.8	0.5
비통신업 한국 기관	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

6) CT4

이동통신망 내부의 장비/기능간 통신을 담당하는 CT3에서는 〈표 12〉에서도 볼 수 있듯이 총 7,787건의 기고문 참여가 있었다. CT3와 비슷하게 망 내부에 집중하는 그룹이다 보니 단말과 반도체에 강한 한국의 참여는 제한되는 수준으로 2.1%의 기고문 참여가 한국 기관으로부터 이루어졌다. 또한, 비통신업의 비중이 0.3%에 불과하였으며, 비통신업 한국 기관의 기여가 없었다 (〈표 13〉 참조).

〈표 12〉 CT4의 기고문 참여 건수

(단위: 건)

종류	2020	2021	2022	2023	계
한국 기관	50	44	55	11	160
비통신업	0	15	8	4	27
비통신업 한국 기관	0	0	0	0	0
총 건수	2,456	2,801	2,037	493	7,787

〈표 13〉 CT4의 기고문 참여 비중

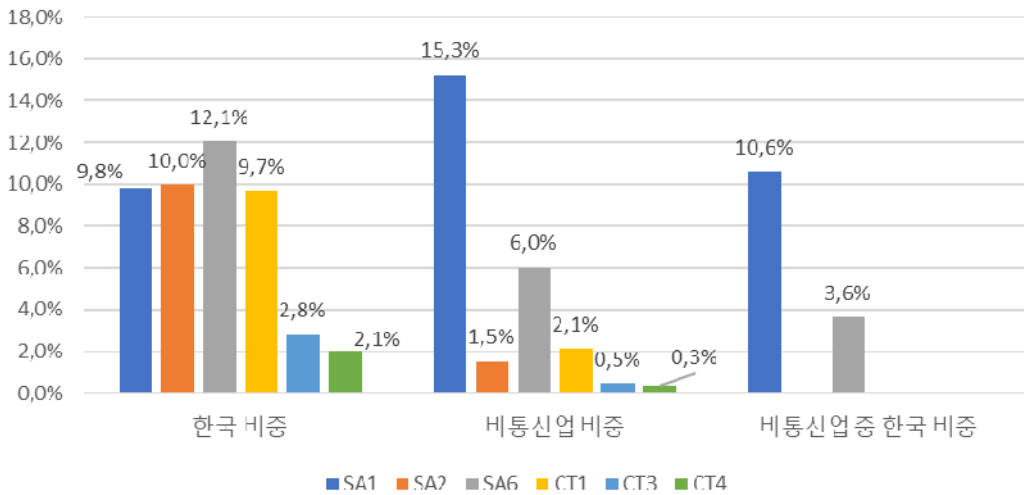
(단위: %)

종류	2020	2021	2022	2023	평균
한국 기관	2.0	1.6	2.7	2.2	2.1
비통신업	0.0	0.5	0.4	0.8	0.3
비통신업 한국 기관	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

7) 주요 결과

전반적으로 비통신업의 3GPP 참여는 많은 편은 아니며, 특정 WG들의 경우, 비통신업계의 한국 기관들의 참여가 활발한 편이다(그림 4 참조). 특히, SA1이나 SA6와 같이 관련 요구사항 및 아키텍처를 정의하는 그룹은 한국 기관들, 그리고 비통신업계의 한국 기관들의 참여가 상당한 편이다. 크게 개선할 부분은 없는 것으로 판단된다.

[그림 4] WG간 기관 종류별 참여 비중 비교



하지만 보다 구체적으로 보면 크게 안심할 수는 없는 상황이다. 비통신업 중 한국 비중의 이면을 보면, 실제로는 3개의 기관이 참여한 결과이며, 이들은 경기대학교, 한국철도기술연구원, 한성대학교으로, 기계산업과 밀접한 연관이 있는 기관이라고는 할 수 없다. 해외의 비통신업 기관의 경우 Bosch, Siemens, Lockheed Martin, Airbus, Philips 등 주요 제조사들이 포진하고 있어 대비가 된다. 이런 측면에서 산업계의 3GPP 표준화 참여, 특히 SA1과 SA6와 같이 요구사항과 관련 아키텍처를 담당하는 WG의 참여는 개선될만한 여지가 있는 것으로 파악된다. 또한, SA2에서도 산업용 5G를 위하여 표준을 정의하는 경우가 있고, CT1, CT3, CT4 또한 구현을 위해 상세한 프로토콜을 정의하기 때문에 기술의 상세한 부분까지 영향을 미치고 싶은 경우 참여를 하는 것이 권장된다.

4. 비통신산업의 참여와 5G 기능 개발

서론에서도 기술하였듯이, 비통신산업의 표준 참여는 두 가지 측면에서 중요하다. 첫째로, 기술 수요자의 요구사항 반영과 최적화이다. 통신업계의 제조사들과 통신사들은 기존 통신 사용 사례(일반인을 위한 데이터 통신)에 대해서는 잘 파악하고 있고 최적화 되어 있으나, 새로운 사용 사례인 비통신산업은 비교적 미지의 영역이다. 비통신산업에서의 5G 적용 효과를 극대화 하기 위해서는 비통신산업의 요구사항이 제대로 반영되고 이러한 요구사항에 맞춰서 최적화되어야 할 필요가 있으며, 이는 비통신산업의 참여가 없이는 실현하기 어렵다. 둘째로, 기술을 활용할 때의 불확실성을 해소하기 위한 기술의 맥락 파악이다. 대부분의 기술은 사회/경제/문화적 배경으로 인한 발전과정이 있기 마련인데, 이 것들이 논의되는 장은 보통 표준기구들이며, 이러한 것들은 문서화하기 어렵거나 찾기 어려운 곳에 문서화가 되기 마련이다. 그렇기 때문에 맥락의 쉬운 파악과 관련 지식을 쉽게 찾기 위해서는 표준 참여가 필수불가결이다.

위에 언급된 SA1/SA2/SA6등에서의 주요 비통신기관들의 활동을 분석할 때, 대부분의 회사들(예: Bosch, Siemens, Philips)이 요구사항을 정립하는 SA1에서의 활동이 활발한 것을 볼 수 있으며, 이들 중에서도 아키텍처를 정의하는 SA2/SA6에서의 활동이 활발한 회사들이 있다(예: Siemens, Philips). 이는 5G가 이러한 플레이어들의 요구사항을 반영하고 있다는 것을 뜻하며, 참여하지 않고 있는 회사들의 요구사항이 아닌 이들이 제시하는 요구사항에 최적화되고 있다는 것을 의미한다. 이러한 관점에서 한국의 비통신업계의 3GPP 표준 참여가 권장된다.

IV. 결론 및 시사점

1. 디지털전환과 5G

본 고를 통해서 디지털전환을 위해서 5G에 어떤 기능이 있는지를 볼 수 있었다. 기업/기관은 5G를 통해서 자체적인 망을 구축할 수 있으며, 엣지 클라우드와 중앙 클라우드 기반의 IT 솔루션들과 통합, 효율 개선에 활용할 수 있다. 특히 5G는 자신의 기능을 제3자가 쉽게 활용할 수 있게 개방할 수 있는 체계를 제공하며, 산업에서 필요로 하는 시간의 정밀성을 확보하고 상세한 수준에서의 측위도 가능케한다. 또한, 실제로 산업 현장에서 적용, 효과를 거둘 수 있는 것도 확인할 수 있었다. 단, 5G 기능의 개발에 있어서 표준화가 중요한 상황에서, 한국 비통신업계의 참여는

제한적이었으며, 추후 5G 기능 개발 및 최적화에 있어서는 참여 중인 해외 비통신업계 기관들에 맞춰서 진행될 것으로 예상된다.

2. 제언

디지털전환을 위하여 5G를 활용하기 위해서는, 기술 표준이 정의되는 과정에서 참여하는 것이 권장되며, 이러한 맥락에서 산업계의 3GPP 참여도 고려해야 할 것이다. 통신기술의 난해함을 고려하면, SA1과 같은 요구사항을 정립하는 WG에 먼저 참여를 시작해서, 아키텍처를 정의하는 SA2와 SA6로 확장, 그리고 상세한 프로토콜을 정의하는 CT1, CT3, CT4에 참여를 하는 순서로 진행하는 것을 권장한다. 물론, 해외의 비통신업 기관의 경우에도 볼 수 있듯이, 대부분의 회사는 기술의 자세한 사항까지 관여를 하지 않아도 될 것이기 때문에 SA1에서의 참여만으로도 충분할 것으로 사료된다.

이를 촉진시키기 위해서는 영국 정부에서 운영하는 Digital Catapult와 같이 5G를 각종 산업계의 사용 사례에 시범적으로 활용하고 산업계에 5G에 대한 기초적인 지식과 교육을 제공하는 프로그램이 유익할 것으로 보인다. 기관에서도 자체적으로 자원을 투입하여 표준화 과정에 참여를 시작할 수도 있지만, 정부와 기관이, 혹은 업계내에서 서로 협력하면 표준화 과정의 참여와 5G 지식을 보다 효과적으로 증진시킬 수 있을 것이다.

3. 연구의 한계점과 향후 연구방향

본 연구는 다음과 같은 측면에서 보완 가능하다. 첫째로, 본 연구에서는 전반적인 5G 기능들을 다 다뤘지만, 기능 하나하나의 적용을 위해서는 보다 깊이 있는 이해가 필요하다. 이를 위해 각 기능들에 대해서 더 자세한 설명을 제공하고 표준화 현황을 특정 기능에 집중해서 파악하는 것이 권장된다. 둘째로, 국내외 통신산업-비통신산업 간 협업 사례를 분석하는 등의 시도도 필요하다. 실제로 기술을 구현하는 데에 있어서 어떻게 협업해야 하는지도 중요하기 때문이다. 마지막으로, 비통신업계와 통신업계가 표준화 참여에 있어서 어떻게 협업하고 있는지를 파악하는 것 또한 필요하다. 현재의 연구는 기고문 참여 건수에 집중하고 있으나, 기고문 참여를 통해서 어떤 기관들이 파악을 하고 있는지를 분석할 수 있다면 비통신업계의 표준화 참여 전략 수립에 있어서 도움이 될 것이다.

참고문헌

- 한국정보통신기술협회. “디지털 전환”, 정보통신용어사전, 2023년 4월 23일 방문
http://terms.tta.or.kr/dictionary/dictionaryView.do?word_seq=137416-5
- 3GPP (2022a), TS 23.316 “Wireless and wireline convergence access support for the 5G System (5GS)” v17.4.0
- 3GPP (2022b), TS 23.434 “Service Enabler Architecture Layer for Verticals (SEAL): Functional architecture and information flows” v17.7.0
- 3GPP (2022c), TS 23.548 “5G System Enhancements for Edge Computing; Stage 2” v17.5.0
- 3GPP (2022d), TS 23.558 “Architecture for enabling Edge Applications” v17.6.0
- 5G-ACIA (2021), “5G for Industrial Internet of Things (IIoT): Capabilities, Features, and Potential”
- 5G-ACIA (2022), “Industrial 5G Devices – Architecture and Capabilities”
- 5G Americas (2022), “Becoming 5G-Advanced: the 3GPP 2025 Roadmap”
- Apicella, S. (2020), “5G for Industries”, Ericsson
- BT-PON (2021), “5G and Wi-Fi 6: Complementary rather than competitive”, 2023년 4월 21일 방문 <https://www.bt-pon.com/5g-vs-wi-fi-6.html>
- Doyle, S. (2021), “5G for Industry 4.0 operational technology networks”, GSMA
- Digital Catapult (2022), “Industrial 5G: A Toolkit for Business in a Digital Future”
- EY Global (2022), “Enterprise 5G: is the Industry 4.0 growth opportunity being overlooked?”
- GSA (2022), “Private-Mobile-Networks August 2022 Member Report”, 2023년 4월 16일 방문 <https://gsacom.com/paper/private-mobile-networks-august-2022-member-report/>
- GSMA, “How Private 5G Networks Can Optimise Vehicle Manufacturing”, 5G Transformation Hub
- GSMA, “5G and MEC smart factory operations at Gree Zhengzhou”, 5G Transformation Hub
- GSMA, “5G Enables Digital Transformation of Manufacturing”, 5G Transformation Hub
- Kim, D. (2022), “Non-Public Networks (NPN)”, 2023년 4월 24일 방문 <https://www.3gpp.org/technologies/npn>
- Marshall, P. (2022), “5G and Industry - an Overview”, Ericsson
- Oughton, E.J., Lehr, W.H., Katsaros, K.V., Selinis, I., Bublely, D., & Kusuma, J. (2020), “Revisiting Wireless Internet Connectivity: 5G vs Wi-Fi 6”. ArXiv
- SA WG2 (2022), “SP-220805; New WID: Enhanced support of Non-Public Networks Phase 2”, 3GPP

5G for Digital Transformation

– 5G features, 3GPP standard participation status and implications –

Dongwook Kim

– Abstract –

Digital transformation uses communications technology as an enabler for information technology solutions and achieves full automation and optimization of industries. 5G can realize internet of everything and is therefore suitable for digital transformation. This paper provides an overview of the 5G features that are suitable for digital transformation and analyzes the current standardization status of 5G. 5G enables private networks, integrates edge clouds, exposes its capabilities, and ensures precision of time and positioning. Currently, Korean industries' participation in 5G standards are limited. To exploit 5G to the fullest, it is recommended that they participate in the standardization and consider introducing government or industry-led 5G pilot/training programs.

Key words

Digital Transformation (DT), 5G as tool for DT , 5G Features, Standardization Status, Participation in standards

기계기술정책

| 제2권 제1호(2023) |

발행일 2023년 6월
발행처 한국기계연구원
발행인 박상진
문의처 한국기계연구원 전략조정본부 기계기술정책센터
대전광역시 유성구 가정북로 156
T. 042-868-7239

ISSN 2950-9939

기계기술정책

제2권 제1호 (2023)