

창간호

기계 기술 정책

| 제1권 제1호(2022) |

TECHNOLOGY POLICY
MECHANICAL ENGINEERING

| 기고문 |

- 01 탄소중립, 무엇을 어떻게 할 것인가
- 02 디지털 전환이 묻고 기계산업이 답하다

| 논문 |

- 01 수소경제 시대에 내연기관의 경쟁력 고찰
수소 내연기관 개발 지원 및 친환경 동력원 분류의 필요성
- 02 특허활동이 생산과 수익에 미치는 영향
일반기계 제조업을 중심으로
- 03 과학기술 출연연구기관 연구개발(R&D) 전략 수립
지원을 위한 정보 분석 프레임워크에 대한 연구
수소분야의 기계관련 R&D를 중심으로
- 04 수치제어(NC) 공작기계 개발의 역사적 의미
미국 1950년대·1960년대의 변천 과정을 중심으로

창간사

작은 열매가 열리더라도,
미래의 기계산업 정책 연구자들과 함께
풍성한 나무가 되도록 아낌없이 지원하겠습니다.



기계산업은 국가 경제의 버팀목 역할을 하는 제조업의 기둥이자 강국의 척도라 할 수 있습니다. 십수 년간 기계산업의 강국인 독일, 미국, 일본 등은 기계산업의 정책적 비전을 제시하며, 글로벌 경제 패권 우위를 다져왔습니다.

우리나라도 제조업 중심 국가로서 기계산업 정책의 중요성은 나날이 커지고 있습니다. 그동안 우리나라는 선도국 정책을 벤치마킹하면서 기계산업 경쟁력을 강화해왔지만, 기계산업 인력은 정체 추세이며, 기계산업 정책에 대한 관심도 낮은 수준에 머무르고 있습니다.

최근, 디지털 전환, 탄소배출 저감, 글로벌 공급망 다변화 등 다양한 패러다임 변화와 국가적 이슈들이 대두되고 있고, 국가적 아젠다 해결을 위해 글로벌 기술 리더십을 공고히 할 것을 요구받고 있습니다. 단기·정량적 성과에 좌우되는 R&D 시스템을 벗어나, 창의적이고 혁신적인 의제를 발굴함으로써 기술과 정책의 패러다임을 전환하는 것이 중요해지는 시대입니다.

한국기계연구원은 1976년 설립 이래 기계 분야 연구개발, 성과확산, 신뢰성 평가 등을 기반으로 기계산업 발전에 기여해왔으며, 2007년 이후, 기계기술정책 전문 지식지를 지속적으로 발간하며 기계기술·정책 분야 허브 기관으로 성장해 왔습니다. 급변하는 환경 변화에 따라 동 연구원은 더 나아가 기계산업 정책과 관련된 역량을 결집하고, 기계산업 정책에 대한 관심을 고조하고자 합니다. 기계기술, 기계산업 정책에 대한 토론과 제안을 한 곳에 모아 기계산업 정책에 선제적으로 대응할 방향을 모색하고자 합니다.

TECHNOLOGY POLICY MECHANICAL ENGINEERING

‘기계기술정책’ 학술지를 창간합니다. 처음에는 다소 작은 열매가 열리더라도, 미래의 기계산업 정책 연구자들과 함께 커나가서 나중에는 풍성한 나무가 되도록 아낌없이 지원하겠습니다. 우리나라 유일한 기계산업 정책 특화 학술지로서 역할을 한결음씩 수행해 나가겠습니다. 우리나라 기계산업이 나아갈 새로운 방향을 토론하고, 국가적 의제를 발굴하여 대응함으로써 기술과 정책의 패러다임 전환에 대한 논의의 중심에 서서 혁신적 정책을 이끌어 나가는 발판이 되기를 소망합니다.

더 나아가 기계 정책분야에 특화된 학술지로서 기계기술·산업에 대한 관심과 인지도를 제고하고, 미래의 정책인력 양성에도 기여할 수 있도록 각계 연구자들의 적극적인 참여를 부탁드립니다.

「기계기술정책」 학술지 창간을 위해 힘을 모아주신 여러분과 기계기술정책 편집위원회의 지원에 깊이 감사드리며, 앞으로 기계산업 정책의 대표 학술지로 성장할 수 있도록 학계와 전문가, 독자 여러분의 지속적인 관심과 성원을 당부 드립니다. 감사합니다.

2022년 6월

한국기계연구원 원장 **박상진**

축 사



안녕하세요. 국가과학기술연구회 이사장 김복철입니다.

대한민국 기계기술의 미래를 만들어가고 있는 한국기계연구원의 「기계기술정책」 학술지 창간을 진심으로 축하드립니다.

4차 산업혁명의 진행과 함께 스마트 공장 등 기계산업 분야에서 디지털 전환의 주도권 다툼도 치열해지고 있습니다. 또한 소부장 등 글로벌 공급망 재편 위기를 겪으며, 기계산업의 중요성은 나날이 커져가고 있습니다. 다양한 산업 분야에서 패러다임이 급변하고 있는 시대적 상황에서 우리는 기계산업의 중요성을 다시 한 번 체감하고 있으며, 이러한 시기에 「기계기술정책」이 종합 학술지로 첫 걸음을 내딛게 된 것을 매우 뜻깊게 생각합니다.

지난 40여 년 간 한국기계연구원은 기계분야의 연구개발, 성과확산, 신뢰성 평가 등을 통해 국가경제와 산업계 발전에 크게 기여해왔습니다. 또한, 국가의 정책이나 관련 이슈에 대한 토론의 장을 만들어 전문적인 기술 정보를 전달하고 미래 기계산업 방향을 제시하는 역할도 충실히 수행해 왔습니다.

그런 의미에서 「기계기술정책」 학술지의 창간은 한국기계연구원의 정책 허브 역할을 강화하는 계기가 될 것으로 기대합니다. 「기계기술정책」이 집단지성을 결집하고 미래 기계산업 정책 발굴의 초석을 다지기를 기원하며, 기계산업과 정책 분야에서 선도적인 역할과 기능을 훌륭히 수행해주시길 바랍니다.

창간호의 발간에 애쓰신 관계자분들의 노고에 감사드리며, 다시 한 번 「기계기술정책」 학술지 창간을 진심으로 축하드립니다.

2022년 6월

국가과학기술연구회 이사장 **김복철**

축 사

먼저 한국기계연구원 '기계기술정책' 학술지 발간에 축하의 박수를 보냅니다. 최근, 디지털 전환, 그린 전환 등 글로벌 패러다임이 급격히 변화하는 양상 속에 과학기술과 과학기술 정책의 역할은 막중해지고 있습니다.

한국기계연구원은 1976년 설립 이래 공작기계 국산화 등 기계기술의 혁신을 거듭하며 국가 산업 성장과 궤를 같이해왔습니다. 소부장 등 공급망 이슈, 수소액화플랜트 등 무탄소 에너지 인프라 등 다양한 국가 아젠다를 해결해왔고, 미래 기계산업의 먹거리 발굴을 위해 부단히 노력한 것을 한국과학기술단체총연합회도 함께 경험해왔습니다.

기계산업은 제조업의 기둥으로 묵묵히 한 계단씩 올곧게 올라서야 하며, 이는 어떠한 글로벌 위기 상황 속에서도 탄탄한 산업 체질을 지탱하는 힘으로 작용할 것입니다. 이를 위해서는 미래 과학기술인의 육성과 현재 과학기술인의 역량 결집이 중요합니다.

이에 '기계기술정책' 학술지를 발간하는 것은 현재의 과학기술 정책 역량의 결집은 물론, 미래에 과학기술자들을 꿈꾸는 인재들이 기계산업에 관심을 가지는 촉진자 역할을 수행할 것입니다. 이제 막 씨앗을 심는 농부의 마음으로 미래에 많은 과실을 맺을 수 있는 큰 나무로 성장하리라 믿습니다. 나아가 기계산업에 있어 학술지가 중요한 혁신의제와 정책을 제안하면서 국가 기계산업 정책의 구심체 역할을 수행하기를 기원합니다.

학술지에 참여하시거나, 읽고 계시는 다양한 과학기술인 여러분들의 성원을 부탁드립니다. 과총의 600여 회원단체도 늘 함께 응원하겠습니다.

감사합니다.



2022년 6월

한국과학기술단체총연합회 회장 **이우일**

축 사



제조업 중심국가인 우리나라는 오랫동안 제조업의 발전을 통하여 자동차, 항공, 조선, 반도체 등 다양한 분야에서 지속적인 성장을 하고 있으며, 이러한 성장을 바탕으로 글로벌 일류 국가로 발전하고 있습니다. 이공계 기피현상 및 인구감소 등으로 인하여 기계산업의 지속적인 성장을 담보할 수 없는 상황에서 세계를 선도할 수 있는 밑바탕이 되는 제조업의 강국을 유지하기 위해서는 지속적인 인력 양성 및 투자가 요구되고 있습니다. 특히 기계 산업은 점차 스마트화 된 시스템을 중심으로 융복합된 산업으로 발전할 것으로 예상됩니다. 따라서 기존의 기계 산업 분야를 넘어 다양한 산업으로 성장할 수 있도록 지속적인 인력양성 및 기술개발 정책이 동반되어야 합니다.

전문가들은 최근 이슈가 되고 있는 디지털트랜스포메이션, 저탄소산업 및 무인 자동차 산업이 지속적으로 발전할 것으로 예측하고 있고, 기계 산업도 이러한 산업과 함께 지속적으로 성장하면서 산업의 핵심적인 기반이 되기 위해서는 다양한 패러다임 변화에 대응할 수 있는 정책발굴 및 기술개발 전략이 필요합니다. 이러한 관점에서 금번 국내 기계분야의 선도연구기관이고 오랫동안 기계산업 발전에 기여해 온 한국기계연구원에서 기계기술정책 분야의 학술지를 발간하게 된 것은 그 의미가 매우 크다고 생각합니다. 1945년에 설립된 대한기계학회에는 기계분야를 대표하는 13개 부문이 있고, 각 지역을 대표하는 8개 지회가 있으며, 현재 2만7천여 명의 산학연 회원이 활동하고 있습니다. 금번 기계기술정책 학술지의 발간에 맞춰 대한기계학회의 많은 회원들도 기계기술 정책발굴 및 전략도출에 참여할 수 있기를 바라며, 기계분야의 연구개발 및 성과확산이 확대되기를 희망합니다. 다시 한 번 기계기술정책 학술지 발간을 대한기계학회 회원들과 함께 축하드립니다.

2022년 6월

대한기계학회장 **이재종**

창간호

기계 기술 정책

CONTENTS | **목차**

제1권 제1호(2022) · 창간호

| 기고문 |

- 탄소중립, 무엇을 어떻게 할 것인가 01
손정락
- 디지털 전환이 묻고 기계산업이 답하다 09
심창섭

| 논문 |

- 수소경제 시대에 내연기관의 경쟁력 고찰 15
수소 내연기관 개발 지원 및 친환경 동력원 분류의 필요성
이정우
- 특허활동이 생산과 수익에 미치는 영향 45
일반기계 제조업을 중심으로
김혁준
- 과학기술 출연연구기관 연구개발(R&D) 전략 수립 지원을 위한
정보 분석 프레임워크에 대한 연구 69
수소분야의 기계관련 R&D를 중심으로
이도연, 박기주, 김근환
- 수치제어(NC) 공작기계 개발의 역사적 의미 95
미국 1950년대·1960년대의 변천 과정을 중심으로
이창규

기계기술정책

제1권 제1호(2022)·창간호

| 기고문 |

탄소중립, 무엇을 어떻게 할 것인가

손 정 략

산업통상자원 R&D전략기획단 에너지산업MD

TECHNOLOGY POLICY
MECHANICAL ENGINEERING

탄소중립, 무엇을 어떻게 할 것인가

손정락¹⁾

가. 개요

탄소중립(Net Zero)이란 온실가스 배출을 최소화시키고 불가피하게 배출되는 온실가스는 흡수원을 활용하여 흡수시킴으로써 온실가스 배출 총량을 제로로 만드는 것이다. 2015년 파리 협정에서는 전 세계는 2100년까지 지구 온도 상승을 2.0°C 이내로 억제하고, 더 나아가 1.5°C 까지도 달성하자는 합의를 도출하였다. 그 후 2018년 기후 변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC)가 1.5°C 목표 달성을 위해서는 2050년까지 탄소중립이 필요하다는 특별보고서를 채택한 것이 현재 전 세계적인 관심사인 탄소중립 논의의 시발점이었다.

탄소중립을 위해서는 태초부터 인류가 의존해 온 화석연료의 소비를 획기적으로 줄여야 한다. 전기와 열을 생산하는데 동원된 석탄, 석유, 천연가스 등의 화석연료를 태양광, 풍력 등의 재생에너지와 원자력 중심의 비화석연료로 전환시켜야 한다. 화석연료를 원료나 연료로 사용하고 있는 모든 산업은 비화석연료로 전환시켜야 한다. 내연기관 자동차 비중은 줄이고 전기자동차 비중은 늘려야 한다. 도시가스 등 건물의 난방 자원들도 가급적 태양열 등 재생에너지와 전기에너지로 전환시켜야 한다. 이러한 대대적인 전환의 과정의 부담을 줄이기 위해서는 무엇보다 에너지 소비(수요)를 획기적으로 감축시켜야 한다. 이를 위해서는 전환, 산업, 수송, 건물 등 모든 영역 전반적인 대응이 필요한 상황이다. 우리나라 전체 온실가스 배출량 중에서 에너지의 비중은 86.9%²⁾로 전 세계 73.2%³⁾보다 약 14%가량 높은데, 이는 다른 나라들 보다 철강(13.1%), 석유화학(8.5%) 등 전통적인 제조업의 화석연료 의존도가 높기 때문이다. 우리나라와 같이 에너지

1) 산업통상자원 R&D전략기획단 에너지산업MD

2) 2020 국가온실가스인벤토리(1990-2018) 보고서, 환경부 온실가스종합정보센터, 2020

3) Climate Watch, The World Resources Institute, 2020

소비 중에서 제조업 비중이 높은 국가일수록 단기적으로는 태양광, 풍력 등 탈탄소 수단이 있는 전환 영역에서의 탄소중립을 먼저 추진하고, 경제 사회적 파급효과가 큰 산업 영역의 탈탄소화는 장기적으로 계획할 수밖에 없다. 미국과 영국도 전환 부문의 탈탄소화는 2035년을 목표로 하고 있지만, 산업을 포함한 이용 부문의 탈탄소화는 장기적으로 계획하고 있다.

나. 이슈 및 현황

에너지전환부문 탄소중립의 핵심은 전기 및 열을 공급하는 연료인 화석연료를 재생에너지와 원자력 중심의 비화석연료로 전환시키는 것이다. 국내에서는 이미 2017년 발표된 재생에너지 3020 이행계획에 따라 2030년까지 재생에너지 비중 20%(발전량 기준) 달성 목표가 제시된 바가 있으며, 2018년 제3차 국가에너지기본계획과 2020년 제9차 전력수급기본계획에 재생에너지 보급 확대와 관련된 구체적인 계획들이 수립되었다. 그러나 2050년 탄소중립을 위해서는 이러한 계획들 보다 한층 강화된 에너지 전환 계획이 필요한 상황이다. 2021년 8월 탄소중립위원회가 발표한 2050 탄소중립 시나리오 초안에서는 전환부문 재생에너지 비중을 56.6~70.8%로 제시하고 있다⁴⁾.

재생에너지의 비중 확대는 기존의 석탄 및 LNG 발전의 획기적인 감축을 의미한다. 특히, 지난 60년 이상 우리나라 산업화 과정에 풍부하고 저렴한 전력 생산 역할을 담당하였고, 기저부하 수단으로 안정적 전력 공급에 기여하고 있던 석탄화력 발전은 획기적인 감축이 불가피한 상황이다. 급격한 석탄화력 발전 감축은 아직도 전력 생산이 가능한 기존 설비들의 좌초자산화가 단순히 발전 수단의 전환을 넘어서 고용 불안 등 사회적인 문제로 확대될 전망이다. 그럼에도 불구하고, 석탄화력 비중의 획기적인 축소는 탄소중립 상황에서는 피할 수 없는 상황이어서 사회적 충격을 최소화 시킬 수 있는 정책적 고려가 필요하다. LNG 발전은 9차 전력수급기본계획상으로는 폐기되는 석탄발전을 대신할 다수의 신규 설치가 반영되었다. 2020년 11월 정부는 LNG 발전 주기기인 가스터빈 국산화 보급 확대 정책을 발표하면서 국내 LNG 발전 확대 시 핵심 기자재의 원활한 조달을 대비해 오고 있었다. 그러나 이후 전개된 탄소중립 상황에서는 석탄화력 뿐만 아니라 LNG 발전도 좌초자산화 가능성이 있어 면밀한 대비가 필요하다.

에너지 전환 부문 탄소중립 대응의 핵심은 무엇보다도 인프라 혁신이다. 그 중에서도 전력

4) 2050 탄소중립 시나리오 초안, 2050 탄소중립위원회, 2021

인프라 혁신이 무엇보다 중요하다. 태양광, 풍력 등의 재생에너지 간헐성을 고려할 때 동일한 발전량 기준으로 석탄, 원자력 발전 설비 대비 상대적으로 큰 설비 용량이 필요하며, 이에 비례한 송전설비 증설이 필요하다. 재생에너지 설치 설비 용량을 수용하기 위한 송전 설비를 갖추는 것은 경제적, 사회적 부담이 크므로 이를 해결하기 위해서는 분산(Distribution), 직류(DC) 및 디지털(Digital) 기술들을 접목한 새로운 개념의 전력망 인프라가 설계되어야 한다. 재생에너지 기반 전력망 인프라 혁신을 위해서는 에너지저장장치(ESS)가 필수적이다. ESS는 재생에너지 피크 시 잉여전력을 저장하여 비피크 시기에 공급함으로써 송전설비 증설의 부담을 줄이는 역할을 한다. 현재로서는 ESS는 단주기용인 배터리 기반의 화학적 ESS가 대세이지만, 재생에너지가 주력 전원이 되는 탄소중립 상황에서는 장주기 ESS 수단이 확보되어야 한다.

탄소중립 전력 생산을 위해서는 태양광과 풍력의 역할이 무엇보다 중요하다. 태양광은 중국 중심의 Supply Chain 환경의 변화로 인한 설치비용의 하락으로 경제적 경쟁력이 높아지고 있으나, 저가 생산에 대한 부담으로 국내 태양광 업체들은 큰 고통을 겪고 있다. 이를 해결하기 위해서 국내 연구진들은 다결정(Polysilicon) 기술로부터 탈피한 페로브스카이트(Perovskite) 기반의 고효율 텐덤 태양전지 기술 확보에 박차를 가하고 있다. 또한, 태양광 설치 지역 확대를 위해 기존의 산지 중심의 태양광 발전으로부터 영농형, 수상형 등으로 적용범위 확대를 위한 기술적, 정책적 노력을 펼치고 있다. 뿐만 아니라, 궁극적으로는 도심지역 태양광 발전이 일상화 될 것이므로 건물형 태양광(BIPV)의 역할에도 큰 기대를 하고 있다. 풍력의 경우에는 국가 단위의 고정식/부유식을 포함한 대규모 해상풍력 발전 단지 조성을 계획하고 있다. 풍력발전의 핵심 기기인 풍력 터빈의 경우 국내 제품의 경우 기존의 3~5MW급으로부터 8MW급으로 진화하고 있으며, 해외 제품의 경우 12MW급의 대형 제품이 출시를 앞두고 있다. 태양광도 마찬가지로 풍력발전의 가장 큰 애로사항인 주민수용성을 제고하기 위해 각종 정책적 수단들이 동원되고 있으나, 아직도 사회적으로 적극적인 공감대 형성 수준에는 미치지 못하고 있는 실정이다.

탄소중립 상황에서의 원자력 발전의 역할에 대한 많은 사회적 논란에도 불구하고 원자력 발전이 비화석연료 발전이라는 측면에서 탄소중립을 위한 수단으로 활용할 수 있음은 부인할 수 없다. 그러나 우리나라는 외국에 비해 원자력 발전의 집적도가 높고, 사용 후 핵연료 처리에 대한 사회적 합의가 이루어지지 않고 있는 상황에 대한 고려가 필요하다. 기술의 진화와 규제 강화로 안전문제가 해결된다면 사용 후 핵연료가 인류에 미치는 시간이 수백 년 이상이고, 이에 비해 상대적으로 짧은 수십 년 내에 닥칠 지구온난화 문제해결을 위해 원자력이 동원되는 것은 자연스러운 현상이라고 할 수 있겠다. 재생에너지 보급 확대에 따른 간헐성 문제로 기저 부하

용으로 사용되던 원자력 발전도 부하 조절 기능을 요구받고 있고, 대형 원전 중심의 중앙집중식 발전 단지에 대한 부담으로 최근 우리나라를 포함한 전 세계적으로 SMR(Small Modular Reactor)에 대한 관심도 커지고 있는 상황이다.

수소는 탄소가 포함되지 않은 물질이라는 측면에서 탄소중립을 위해 유용하게 사용될 수 있다. 그러나 수소는 자연 상태에서 구할 수 있는 물질이 아니라 물, 화석연료와 같은 물질로부터 분리해 내어야 하므로 생산하는데 에너지 소모가 필요하다. 따라서 수소는 무탄소 물질이며, 가벼우면서도 발열량이 가장 높은 등의 장점이 있음에도 불구하고 수소를 얻기 위해서는 에너지가 필요하므로 일반적인 ‘연료’와는 구분이 필요하다. 탄소중립 상황에서 수소의 역할은 앞서 재생에너지 등으로부터 생산된 에너지 저장과 수소환원제철 등 산업용으로도 사용되어야 한다. 특히, 향후 장주기 ESS 수단으로 수소가 큰 역할을 할 것으로 기대된다. 즉, 피크 시 재생에너지 잉여전력을 이용하거나, 부하 제어에 어려움이 있는 원자력 발전의 부하 조정 상황에서의 잉여전력을 이용한 수분해로 생산되는 수소를 장주기 ESS 수단으로 활용할 수 있다. 수소를 발전용으로 사용할 경우에는 수십MW이하에서는 연료전지, 그 이상에서는 수소터빈이 주로 사용될 전망이다. 발전용의 경우 수소의 이송 편이성에 따라 수소 대신 질소와 수소의 화합물인 암모니아를 사용할 수도 있을 것이다.

2020년 10월 탄소중립 선언 이전에 이미 추진되고 있었던 수소경제 활성화 계획에서는 연료전지, 수소차 등 수소를 이용한 수요처 산업 육성이 초점이 맞추어져 있었다. 이에 비해 에너지 저장 수단, 산업용 및 발전용 등과 같이 다양한 용도로 수소를 사용해야 하는 탄소중립의 상황에서는 수요처 보다는 충분한 수소를 공급할 수 있는 공급과 수송에 초점이 맞추어져야 한다. 특히, 산업부문의 대표적인 온실가스 배출산업인 제철산업의 탄소중립을 위한 유일한 수단인 수소환원제철을 위해서는 지금까지와는 비교가 될 수 없는 방대한 량의 수소 조달이 필요하다. 이를 위해서 이미 다양한 국가 지원 연구사업으로 그린수소 생산을 위한 알칼라인, PEM 수전해 기술 개발이 진행되고 있으며, 해외 수소 도입관련 다양한 사업들이 준비되고 있다. 해외 수소 도입을 위해 국내 산업체들을 중심으로 장거리 대용량 저장 및 이송을 위한 액화수소, 암모니아 저장 기술들이 개발 중이며 이를 실어 나를 수소 혹은 암모니아 선박 개발을 준비 중이다.

에너지 전환 부문에서는 태양광, 풍력 등과 같은 재생에너지 자원이라도 있지만 그간 화석연료를 원료로 사용하고 있던 산업 부문의 탄소중립은 여전히 큰 숙제로 남아있다. 석유를 원료로 사용하는 정유 및 화학산업, 그리고 석탄을 연료로 사용하는 시멘트 산업의 탄소중립을 위해서는 기존의 개념을 넘어 획기적인 전환이 요구된다. 수송 부문의 탄소중립의 가장 강력한 수단은

전동화(Electrification)이다. 최근 들어 EU가 2035년 수송부문의 100% 전동화 목표를 선언⁵⁾ 하는 등 세계적인 탄소중립 선도국가들의 움직임이 빨라지고 있다. 우리나라는 수송부문 전동화 수단으로 전기차와 수소전기차 모두를 고려하고 있으나, 향후 세계 시장의 움직임에 따라 적정 시장 영역이 설정될 것으로 전망된다. 건물 부문은 탄소중립이 가장 어려운 분야 중의 하나이다. 특히, 그간 거의 100% 화석연료에 의존했던 열에너지 공급 영역의 탈탄소화는 여전히 어려운 숙제이다. 이를 위해서는 충분한 전기에너지가 공급된다는 전제하에 히트펌프 보급 확대가 현재로서는 유일한 대안이다. 그러나 우리나라의 경우 최근까지도 지속적으로 보급이 확대되어 온 도시가스 공급 망이 탄소중립 상황에서 어떠한 모습으로 변화되어야 할 것인가에 대한 많은 고민이 필요하다.

다. 결론

지구온난화와 그에 따른 각종 자연 재난이 심화되는 상황에서 탄소중립은 인류에게 닥친 피할 수 없는 숙제이며 우리나라의 경우에도 마찬가지이다. 뿐만 아니라, 국제사회로부터 지구온난화와 관련된 국가적 책임이 요구되는 상황에서 UN이 요구하는 2030 자발적 온실가스 감축목표(NDC) 상향 조정과 2050 탄소중립을 위한 온실가스 감축 시나리오는 불가피하게 국가 정책의 최우선순위로 다루어질 수밖에 없다. 그럼에도 불구하고, 다른 나라들에 비해 화석연료 의존도가 상대적으로 높은 우리나라의 경우 산업에 미치는 파급효과를 최대한 줄이기 위한 면밀한 정책적 수단이 수립되어야 한다. 이를 위해서는 태양광, 풍력, 원자력 등 그나마 탈탄소 수단이 있는 에너지 전환(공급) 영역에서 탄소중립을 먼저 추진하고, 국가적 파급효과가 큰 산업 부문의 탄소중립은 점진적으로 추진하는 등의 국가적 전략 수립이 필요한 상황이다.

5) The EU Fit for 55 Plan Unpacked, European Commission, 2021

기계기술정책

제1권 제1호(2022)·창간호

| 기고문 |

디지털 전환이 묻고 기계산업이 답하다

심 창 섭

한국산업기술평가관리원 전략기획단 첨단장비PD

TECHNOLOGY POLICY
MECHANICAL ENGINEERING

디지털 전환이 묻고 기계산업이 답하다

심창섭¹⁾

가. 개요

디지털 전환(Digital Transformation, DX)이라는 말은 이제 더 이상 새삼스럽지 않고 익숙한 용어가 되었다. 미래 시대를 준비하는데 있어 디지털 전환이 필수적이라는 것을 부인하는 사람은 아마 많지 않을 것이다. 특히, 코로나19 확산은 교육, 유통 등 비대면 산업을 비롯하여 산업 전반에 디지털 전환의 필요성이 부각되는 계기가 되었다.

일반적으로 산업에서 수준 높은 디지털 전환을 실현하기 위해서는 아날로그 형태를 디지털 형태로 변환하는 ‘전산화(digitization)’ 단계를 지나, 산업에 IT기술을 활용하는 ‘디지털화(digitalization)’ 단계를 거쳐야 한다고들 말한다. 그러나 현 시대가 요구하는 디지털 전환 개념은 AI, 빅데이터, 클라우드 등 IT 신기술을 활용하여 기업 운영과 기존 비즈니스를 변화시키고 산업을 혁신하는 프로세스 전환까지도 포함한다.

나. 주요 정책 및 연구 동향

디지털 전환의 중요성과 시급성에도 불구하고 실질적인 대책과 방안을 마련하는 것은 쉽지는 않다. 이 이슈가 본격화된 이후 정부와 민간의 많은 연구를 통해 디지털 전환 관련 정책들과 전략들이 발표되었다.

우리 정부도 디지털 전환 정책을 산업통상자원부, 과학기술정보통신부, 중소벤처기업부 등이

1) 한국산업기술평가관리원 전략기획단 첨단장비PD

주도적으로 수립한 바 있으며, “산업 디지털 전환 확산 전략”, “디지털 뉴딜”, “스마트 제조 혁신전략” 등으로 발표하고 세부적으로 추진하고 있다. 특히, 작년 말 ‘산업 디지털 전환 촉진법’ 제정이 공포되어 올 7월부터 법률 발효를 앞두고 있으며, 주관부처인 산업부가 ‘산업 디지털 전환 종합계획’을 3년 단위로 수립하고 실행하게 된다.

산업연구원이 2021년 발행한 보고서²⁾를 보면, 국내 디지털 전환 현황과 그동안의 정책들을 체계적으로 정리하고 있고, ICT산업을 중심으로 발전 전략을 마련한 바 있다. 그런데, 이 연구에서 분석한 바에 따르면, 디지털 전환 단계를 5점 척도로 구분³⁾했을 경우, 이미 대기업 중심으로 자동화와 협력업체 연계가 정착된 자동차 산업(4.2점)을 제외하고는 대부분의 제조업이 초기 진입도 못한 수준이었다.(철강 2.8점, 조선 2.7점, 기계 2.6점)

올 5월 새롭게 출범한 윤석열 정부도 주력산업 고도화를 통한 일자리 창출 기반을 마련을 국정과제(23번)로 포함하였고, 그 핵심이 디지털 기술의 접목으로 주력산업의 생산성·부가가치를 혁신하는 것이다.

다. 고찰 및 제언

이와 같이 여러 산업에서의 디지털 전환이 추진 중이고, 산업별로 디지털 전환 수준이 상이하지만, 본 논고의 주된 대상인 기계산업이 디지털 전환에 기여할 수 있는 역할을 중심으로 고찰하고 제언드리고자 한다.

하나, 누구(who)를 위한 디지털 전환인가?

디지털 전환의 대상을 명확히 할 필요가 있다. 우리나라는 이미 세계 최고 수준의 전자정부를 구현했고, 실제 국민들의 삶 가운데도 스마트폰을 중심으로 한 디지털 생활이 일반화되어 있다. 대기업은 어느 정도 디지털 전환을 추진해 가고 있고, 그러한 역량도 스스로 갖추어 가고 있으니, 우리의 디지털 전환 정책은 중소·중견기업의 현장에 집중되는 것이 적절하다. 중소·중견기업의 디지털 전환은 우리 산업의 큰 변화를 불러올 것이다.

2) 디지털 전환 가속화에 따른 ICT산업의 신성장전략, 산업연구원, 2021

3) (1단계) 계획/준비 → (2단계) 기반조성 충실화 → (3단계) 초기 구축 → (4단계) 확산 구축 → (5단계) 구축 완결 및 재구축

둘, 언제(when) 디지털 전환을 할 것인가?

디지털 전환 이행을 위해 시기별로 준비된 정책 마련이 필요하다. 단기적으로 필요한 정책과 중장기적으로 필요한 정책을 수립하고 산·학·연·관이 머리를 맞대고 지혜를 모아 로드맵을 마련해 가야 한다. 우선, 이미 각 부처에서 발표한 디지털 전환 정책을 통합하여 총체적인 디지털 전환이 우리 산업에 일어날 수 있도록 해야 한다. 디지털 전환은 어느 한 시기에 갑작스럽게 일어나는 사건은 아니므로, 조급해하지 말고 긴 안목을 갖고 하나하나 이루어 나가야 한다.

셋, 어디서(when) 디지털 전환을 할 것인가?

우리의 디지털 전환은 산업현장에서 일어나야 한다. 그런데, 이 디지털 전환의 현장이 국외가 아닌 국내에서 먼저 실현될 수 있기를 기대한다. 최근 주요 대기업들의 제조현장이 해외에서 신규 투자되고 있다. 이는 기업들의 전략적 측면에서는 충분히 이해되는 일이나, 점차 제조 현장이 해외로 나간다는 것은 아픈 현실이다. 이 땅의 중소·중견기업의 제조현장이 디지털 전환의 테스트 베드가 되어야 하고, 그 모델이 글로벌 표준이 된다면 금상첨화일 것이다. 기존의 전통적인 산업단지가 정부 주도과 민간의 참여로 '디지털 첨단산업단지'로 리모델링된다면, 매우 큰 파급효과가 있을 것이다.

넷, 왜(why) 디지털 전환을 할 것인가?

현재 점점 심화되고 있는 인력부족, 생산비용 상승, 소비 변화 등 다양한 이슈에 대한 실현 가능한 해결책이 디지털 전환이기 때문이다. 산업의 디지털 전환은 우리 산업 생태계를 지속가능하게 한다. 더 이상 외국 노동자로 인력 대체가 용이하지 않고, 생산 비용을 낮추는 것도 한계에 도달했다. 디지털 전환을 통해 산업의 부가가치를 향상시키지 못한다면, 이 산업들은 언젠가는 우리 곁에서 사라질 것이다.

다섯, 무엇(what)을 디지털 전환할 것인가?

농업, 건설업, 제조업 등의 산업 현장에서 디지털 전환이 실현되려면 기계·장비가 그 핵심 역할을 해야 한다. 자동화되고 자율화된 건설기계와 농기계, 디지털화되고 패키지화된 생산시스템이 우리 산업의 디지털 전환을 이끌 것이다. 첨단화된 기계장비와 숙련된 국내 기술자가 연계되는 질 좋은 일자리가 많아질 것이다. 그동안의 산업 혁명을 기계가 주도했듯이, 4차 산업혁명 또한 기계가 그 어려운 것을 해내야 한다.

여섯, 어떻게(how) 디지털 전환을 할 것인가?

디지털 전환을 위한 산업 정책은 특별한 것이 아닐 수 있다. 지속적인 R&D, 국제협력, 전문인력 양성 등 그동안의 산업 정책의 큰 틀은 크게 달라지지 않을 것이다. 그럼에도 불구하고, 기존 정책과 차별화되고, 구체적이면서, 전 세계를 선도할 수 있는 독창적인 정책들의 발굴이 필요하다.

이러한 연유로, 이번 ‘기계정책학술지’의 창간이 매우 뜻깊다.

라. 결론

디지털 전환이 질문에, 기계산업이 답을 해야 한다. 그동안의 산업혁명에서 보여줬듯이 기계는 모든 산업의 기반이기 때문이다. 우리 산업 현장의 디지털 전환은 전 세계 그 어느 나라도 대신 해 주지 않는다. 우리 기계산업은 우리의 앞 세대들이 그래 왔듯이 우리 현실에 대한 답을 찾아야 하고, 우리 세대에 이루어 내야 한다. 우리의 모델이 이 땅에서 또는 세계 현지에서 새롭고도 명확한 대안을 제시한다면, 우리가 글로벌 디지털 전환을 선도할 수 있다. 그 창대한 미래를 바라보며 아직은 미약하지만, 새로운 시작을 준비하고 함께 고민하는 ‘기계정책학술지’가 되기를 기대한다. 기계정책학술지의 창간을 축하드린다.

기계기술정책

제1권 제1호(2022)·창간호

| 논문 |

수소경제 시대에 내연기관의 경쟁력 고찰

수소 내연기관 개발 지원 및
친환경 동력원 분류의 필요성

이 정 우

전북대학교 조교수

TECHNOLOGY POLICY
MECHANICAL ENGINEERING

수소경제 시대에 내연기관의 경쟁력 고찰

- 수소 내연기관 개발 지원 및 친환경 동력원 분류의 필요성 -

이정우*

- 초 록 -

수소에너지는 탄소중립 시대에 전기에너지와 더불어 그 중요성이 더욱 주목받는 에너지원으로 손꼽힌다. 이에 따라 배터리를 이용하여 전기의 충·방전에 기반한 순수 전기차와 더불어 수소를 공급하여 연료전지를 통해 전기 에너지로 변환 후 활용하는 수소전기차에 대한 정부의 관심과 보급 확대를 위한 보조금 지원 등의 정책도 더욱 강화되고 있다. 수소에너지는 전기화학반응뿐만 아니라 연소를 기반으로 한 열화학반응을 통해서도 활용이 가능한 에너지원으로서 충분히 내연기관에 적용할 수 있는 여건이 마련되어 있다. 하지만 2015년 '디젤게이트' 이후 내연기관에 대한 부정적인 인식이 확산되었으며, 수소 내연기관의 개발 및 해당 동력원을 장착한 차량에 대한 지원 대책 역시 전무한 실정이다.

따라서 본 연구는 수소 내연기관의 경쟁력 분석을 통한 향후 수소 내연기관 개발 지원 및 친환경 동력원으로 분류하는 등의 정책적 필요에 대한 타당성을 논의한다.

주 제 어 수소, 내연기관, 연료전지, 효율, 환경

논문접수일 2022년 3월 18일 수정논문 제출일 2022년 6월 1일 게재확정일 2022년 6월 15일

* 전북대학교 공과대학 기계시스템공학부 조교수, engine@jbnu.ac.kr

I. 서론

1. 친환경 자동차의 분류에 대한 현황 및 문제 제기

최근 Volvo 社의 광고는 승용차량 동력원의 패러다임 변화를 짚은 영상에 강조하여, 시청하는 사람들에게 강렬한 인식을 심어주었다¹⁾. 영상 속 할아버지는 손녀와 장난감 자동차를 가지고 함께 놀아주는 모습을 보이는데, 할아버지는 장난감 자동차를 굴리며 입으로 “부릉부릉”하는 일반적인 내연기관 자동차의 배기음을 흉내 냈고, 이에 손녀는 연신 고개를 내젓는 모습을 보인다. 그리고 광고의 마지막에는 손녀가 본인 부모의 전기자동차를 타고 떠나며 이를 바라보는 할아버지의 표정에서 시대의 변화가 도래했음을 질게 보여주며 마무리된다.

2015년 폭스바겐 社로부터 기인한 “디젤게이트”를 시작으로, 탈(脫)탄소를 통한 탄소중립(Carbon Neutrality) 시대가 도래함에 따라 내연기관의 입지가 점차 줄어들 것을 예고한 지 벌써 7년여가 지났다²⁾. 그간 승용동력분야의 입지전적인 위상을 지닌 내연기관을 대체할 동력원들이 속속 ‘친환경(Eco-friendly)’이라는 명분으로 등장하였고, 실제 도로 위에는 파란 번호판을 단 배터리기반의 전기자동차들이 눈에 띄게 늘어난 모습을 보인다.

산업통상자원부에서 발표한 <환경친화적 자동차의 개발 및 보급 촉진에 관한 법률: 친환경자동차법>에 따르면 ‘환경친화적 자동차’의 분류가 명확한데, ‘전기자동차, 태양광자동차, 하이브리드자동차, 수소전기자동차와 <대기환경보전법> 제46조 제1항에 따른 배출가스 허용기준이 적용되는 자동차 중 산업통상자원부령으로 정하는 환경기준에 부합하는 자동차’로 한정하고 있다.³⁾ 보다 일반적으로 현재 판매되는 자동차의 종류를 기반으로 구분하자면 외부 전원을 이용하여 차량 내 배터리 장치에 충전 후 이의 방전 과정을 통해 모터를 구동하여 동력을 발생하는 ‘전기자동차(EV, Electric Vehicle)’와 외부로부터 수소를 충전하여 차량 내 연료전지(Fuel-cell)를 이용함으로써 수소와 공기 중 산소의 화학반응을 통해 생성된 전기를 동력으로 활용하는 ‘수소전기자동차(FCEV, Fuel-cell Electric Vehicle)’로 나뉘 볼 수 있다. 물론 아직 내연기관에 모터와 배터리 등을 함께 차용하여 기계적/전기적 에너지를 혼합하여 활용하는 ‘하이브리드 자동차(Hybrid Vehicle)’ 역시 환경친화적 자동차로 분류되고 있다.

1) [기획자의 광고이야기#7] 볼보 광고 리뷰, 안테암블로, 2022.01.03.

2) Volkswagen: The scandal explained, BBC news, 2015.12.10.

3) 산업통상자원부, 환경친화적 자동차의 개발 및 보급 촉진에 관한 법률: 친환경자동차법, 2022.01.28.

[그림 1] 2022년 환경친화적 자동차 세금감면 사항

정책 및 제도	주요내용	관련 법규
개별소비세 30% 인하 연장	개별소비세 30% 인하 6개월 연장 적용기간: '22.1.1~'22.6.30 감면한도: 100만원	개별소비세법 시행령 제2조의 2 (탄력세율)
전기·수소차 취득세 감면 연장	감면 적용기간 3년 연장 연장기한: '22.12.31 → '24.12.31 감면한도: 140만원	지방세특례제한법 제66조 제4항
하이브리드차 개별소비세 감면 연장	감면 적용기간 1년 연장 적용기간: '22.1.1~'22.12.31 감면한도: 100만원	조세특례제한법 제109조 제1~3항
하이브리드차 취득세 감면 연장	감면 적용기간 1년 연장 적용기간: '22.1.1~'22.12.31 감면한도: 40만원	지방세특례제한법 제66조 제3항

자료: 조선비즈, <보조금 축소·개소세 인하 연장...2022 달라지는 자동차 제도>, 2021.12.30.

그러나 [그림 1]에서 보듯이 한국자동차산업협회(KAMA)의 보도자료를 보면 하이브리드 자동차에 대한 보조금 지원은 2022년 말까지 개별소비세 약 100만원과 취득세 40만원 감면을 이행하며, 이후에는 추가적인 보조금의 형태는 사라질 것으로 예상된다. 반면 전기자동차의 보급 확대에 따른 개별 보조금 액수는 줄어들었으나, 그럼에도 불구하고 전기자동차와 수소전기 자동차에 대해 2024년까지 개별소비세와 취득세 감면은 물론 최대 700만원까지 보조금 혜택을 부여하고 있다 [대기환경보존법 제 58조 3항 참조]. 즉, 조금이라도 화석연료를 사용하는 동력원에 대한 완전 배제와 주행 중 탄소 배출이 전혀 없는 전기 및 수소 차량의 보급 확대에 집중하겠다는 의지를 보인 것으로 해석된다.

즉, 현재 자동차 동력원에 관련된 정부의 지원 체계는 수소와 전기에너지를 기반으로 한 동력원을 탑재한 차량에 집중되고 있으며, 이의 보급 확대를 위한 의지도 포함된다. 분명 사용하는 에너지원 자체에 탄소가 없다면 대기 중 탄소 배출을 없앨 수 있는 확실한 방법임에 틀림이 없지만, 이에 맹점이 존재한다. 전기에너지의 경우 배터리를 통한 충/방전 시스템으로 활용하는 방법이 명확하지만, 수소에너지의 경우 결국은 이의 화학에너지를 활용하는 것이기 때문에, 현재 주로 활용되는 전기화학적(Electro-chemistry) 방법뿐만 아니라 연소에 기반한 열화학

적(Thermo-chemistry) 방법에 적용하여 활용할 수도 있기 때문이다.

여기서 한 가지 짚고 넘어가야 할 부분은 에너지원(Energy source)과 동력원(Power system)에 대한 개념을 구분해야 한다는 점이다. 에너지원은 종래에 인류에 편리한 형태의 에너지로 변환되어 사용될 수 있는 잠재력을 가진 매체로서 우리가 흔히 알고 있는 화석연료, 전기에너지, 수소, 풍력, 태양광·열에너지 등으로 대표될 수 있다. 그리고 동력원이란 위의 에너지원을 유용한 에너지로 변환해주는 ‘에너지 변환장치(Energy Conversion System)’이라 할 수 있다. 동력원의 예시로는 에너지를 받아들여 변환해줄 수 있는 모터, 연료전지, 내연기관, 가스터빈 등이 모두 포함될 수 있다.

[그림 2] 18톤 트럭에 장착되는 기존 디젤 내연기관 대비 KEYOU 社の 수소 내연기관의 배기 배출물 비교 결과

18 t truck		Diesel Engine Euro VI	H ₂ -Engine by KEYOU
CO ₂	[g/kWh]	1,000	0,08
NO _x	[g/kWh]	0,46	0,04
PM*	[g/kWh]	0,01	0,002
HC**	[g/kWh]	0,16	0,01
CO	[g/kWh]	4	0,01

* Particulate Matter, description / unit / standard for fine dust

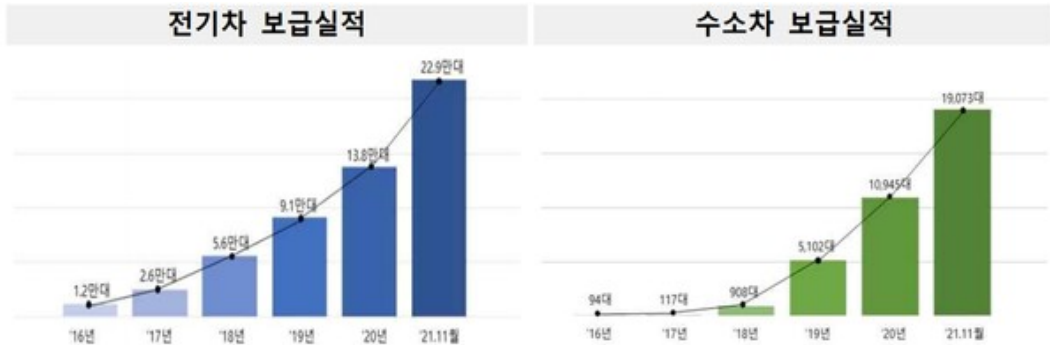
** Volatile organic substances such as hydrocarbons

자료: KEYOU, KEYOU-inside for Hydrogen engines and vehicles, 2018.

따라서 현재 탄소중립 시대에 전기에너지뿐만 아니라 이와 대등하게 중요한 지위를 가지고 있는 수소에너지의 활용에 있어서, 친환경 에너지원의 활용이 중요한 것이지 이를 적극적으로 활용할 수만 있다면 동력원의 종류에 제한을 두어서는 안 된다는 점이 중요하다. [그림 2]에서 보듯이 연소(Combustion)를 기반으로 열화학적 에너지를 이용하는 내연기관(ICE, Internal Combustion Engine) 방식은 연료만 무탄소(Carbon-free) 친환경 에너지원으로 변경해주면 배기 배출물에 탄소를 포함한 물질은 거의 없다. 단, 수소 연료 자체에는 탄소가 없으나 왕복동식 내연기관(Reciprocating ICE)의 구동을 위한 윤활유에 포함된 탄소 일부가 산화되어 배출될 수 있으므로, 배기 중 이산화탄소의 농도는 대기 중 이산화탄소의 농도보다 수십 ppm 수준 상회할 수 있다⁴⁾.

4) Park C. et al., "Effect of fuel injection timing on performance and emissions with dedicated direct injector in a hydrogen engine", SSRN-id4007970, 2022.

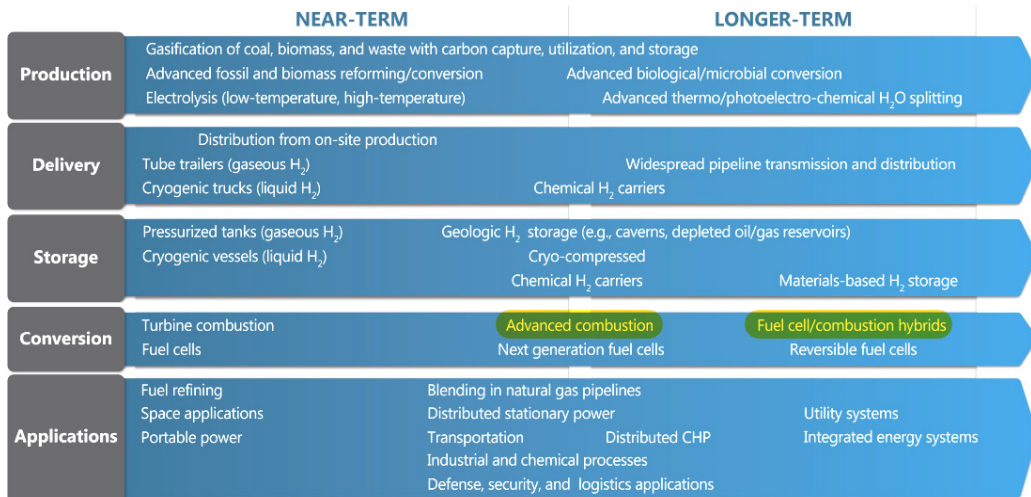
[그림 3] 국내 연도별 전기차/수소차 누적 보급 실적



자료: 가스신문, <올해 국내 수소차 판매 9천대 돌파...누적 1만9천대>, 2021.12.21. [원출처: 환경부]

국내 친환경자동차 연도별 판매량 현황은 [그림 3]에서 보듯이 수소차는 전기차의 10% 이내 수준임을 확인할 수 있다. 첫 번째로 수소 충전소의 확산이 더딘 문제가 존재하며, 연료전지 동력원 기반의 수소 전기차 생산량이 확대되기에 촉매에 사용되는 귀금속을 포함한 원자재 확보 및 생산 인프라 구축의 어려운 점도 존재한다. 이러한 상황에서 이미 대량생산 체제를 갖춘 내연기관이 수소 연료를 받아들일 수 있게 된다면 보다 빠른 수소 에너지 인프라의 보급 확산에 기여할 수 있을 것이다.

[그림 4] 미국 에너지성에서 제시한 수소관련 기술 로드맵



자료: U.S. Department of Energy, Hydrogen Program Plan, 2020.11.

다만 아직 수소 내연기관을 장착한 차량이 시판되지 않고 있으므로, 국내는 물론 미국과 유럽 등지에서도 수소 연료전지 차량에 대한 보조금 정책만 존재하고 수소 내연기관 차량에 대한 정책은 전무한 실정이다. 그러나 [그림 4]에서 보듯이 미국 에너지성 (U.S. Department of Energy)에서 발표한 [Hydrogen Program Plan]에 따르면 수소 활용에 관한 중장기 계획에 분명히 신연소 (Advanced combustion)와 연료전지-연소 하이브리드 시스템(Fuel cell/combustion hybrid)이 명기되어 있다. 특히 신연소 부분에는 기존의 가솔린, 디젤 등에 국한된 화석연료가 아닌 수소와 같은 무탄소 연료의 연소에 적용도 포함될 수 있다. 또한 연소에 있어서 왕복동식 내연기관의 활용도 하나의 옵션으로 제시되어 있다⁵⁾.

[그림 5] 토요타社와 야마하社의 합작으로 개발 중인 V형 8기통 수소 엔진



자료: 한국일보, <야마하, 토요타와의 협력으로 450마력의 V8 수소 엔진 개발한다>, 2022.03.01.

그뿐만 아니라 세계적으로 내연기관과 관련된 기업들이 수소 내연기관 개발에 집중하고 있으며 일부 시제품이 도출되고 있다. [그림 5]에서 보듯이 일본 토요타社에서는 450 마력 수준의 수소 전소(全燒) 내연기관의 시제품을 공개하였으며⁶⁾, 독일 BMW社에서 분사한 KEYOU社에서도 7.8 리터급 포트분사식 수소 내연기관의 연구 결과를 도출한 바 있다⁷⁾. 또한 2022년도

5) U.S. Department of Energy, Hydrogen Program Plan, 2020.11.

6) Toyota global homepage, <Toyota Developing Hydrogen Engine Technologies Through Motorsports>, 2021.04.22.

7) KEYOU, Effective range of H2 lean combustion/NOx emission control, Vienna Symposium, 2020.

3월에는 미국 FORD 社에서 수소 내연기관의 터보차저 장착 및 희박연소 제어에 관한 신규 특허를 출원하는 등 관련하여 꾸준한 연구가 지속되고 있음을 알 수 있다⁸⁾.

즉, 현재에 상용화되어 있지는 않지만 머지않은 미래에 분명히 활용할 수 있는 수소 내연기관 장착 차량에 대해서도 친환경 동력원 지정 및 장려 정책을 미리 준비해놓아야 함을 시사한다. 특히 서두에서 언급한 화석 연료를 기반으로 하는 내연기관의 부정적인 인식과 더불어 사람들 및 유관 산업의 인식개선과 대기 환경 보존 및 개선에 대한 영향도, 보급 확산 가능성 등도 함께 고려하여 논의해 볼 필요성이 있다.

2. 논의 내용 및 분석 방법

따라서 본 논문에서는 대표적인 친환경 에너지원으로 분류되는 수소 에너지를 내연기관에 활용하는 것에 대한 장점을 아래의 세 가지 측면에 따라 논의하고자 한다.

- 1) 에너지 효율
- 2) 배기 배출물
- 3) 전 과정 평가(LCA, Life Cycle Analysis)에 근거한 탄소배출 및 경제성

특히 본 논문에서 수소 내연기관의 주된 비교 대상은 같은 수소 연료를 활용하는 수소 연료전지 혹은 일부 내용은 친환경 자동차 동력원의 하나인 배터리 기반 동력원으로 한정한다.

분석 방법에 있어서 상기 세 가지 주제에 대한 선행 논문 및 신빙성을 기반으로 한 유관 보도 자료와 분석보고서를 기반으로 수집하며, 일부 실제 실험 결과를 인용하여 수소 내연기관의 장점 부각 및 보급 확대의 필요성, 최종적으로 수소 내연기관의 친환경 동력원 분류의 근거로 활용한다.

8) Motor Authority, (Ford patents hydrogen combustion engine), 2022.03.18.

II. 수소 내연기관의 경쟁력 고찰

1. 에너지 효율 측면

탄소중립을 위한 동력원의 개선 방향은 크게 두 가지가 있다. 첫 번째는 본 논문에서 주로 다루는 무탄소 연료인 수소를 에너지원으로 활용하는 것이며, 다른 하나는 동력원의 에너지변환 효율(이하 에너지 효율)을 높이는 것이다. 에너지 효율의 향상은 직관적으로 탄소중립에 와 닿지는 않으나, 실제 동일한 양의 에너지를 사용하며 더 많은 유용한 에너지로 변환시킨다면 실질적으로 연료를 절약하는 효과를 가질 수 있다. 특히 수소의 생산에 있어서 그 과정 중 완전히 탄소 배출이 없는 그린수소도 존재하지만, 일부 탄소가 배출될 수밖에 없는 블루/그레이수소도 존재하기 때문에 고효율을 통한 에너지 절약의 중요성이 대두된다⁹⁾.

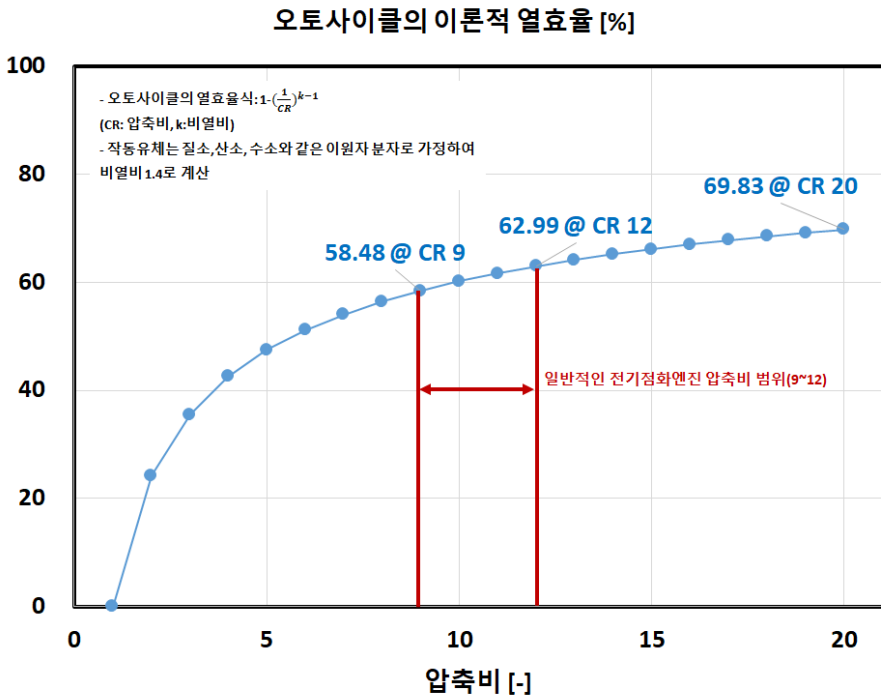
1) 수소 내연기관의 효율 현황 및 잠재력

실제 실험결과에 따른 수소 내연기관의 열효율 분석에 앞서, 내연기관의 이론적 최고 효율에 대해 알아볼 필요가 있다.

[그림 6]은 전기점화방식(SI, Spark Ignition)의 내연기관의 기본원리인 오토사이클의 이론적 효율을 압축비에 따라 나타낸 그래프이다. 일반적으로 이론적인 내연기관의 열효율은 압축비와 비열비에 비례한다. (단, 식에서 보는 것과 같이 정비례하는 것은 아니다.) 전기점화방식의 내연기관은 최고 부하 조건에서 노킹(Knocking) 현상을 피하고자 압축비 상향에 제한이 있으며, 대개 9~12 수준의 압축비를 갖는다. 또한 주된 작동유체는 일부 연료를 포함한 공기의 구성 성분인 질소와 산소이므로, 비열비는 1.4 수준으로 보는 것이 타당하다. 따라서 해당 조건에서 기대할 수 있는 최고 이론 열효율은 63 % 정도라 가늠할 수 있다.

9) Hermesmann M. et al., Green, Turquoise, Blue, or Grey? Environmentally friendly Hydrogen Production in Transforming Energy Systems, Progress in Energy and Combustion Science, 90, No.100996, 2022.

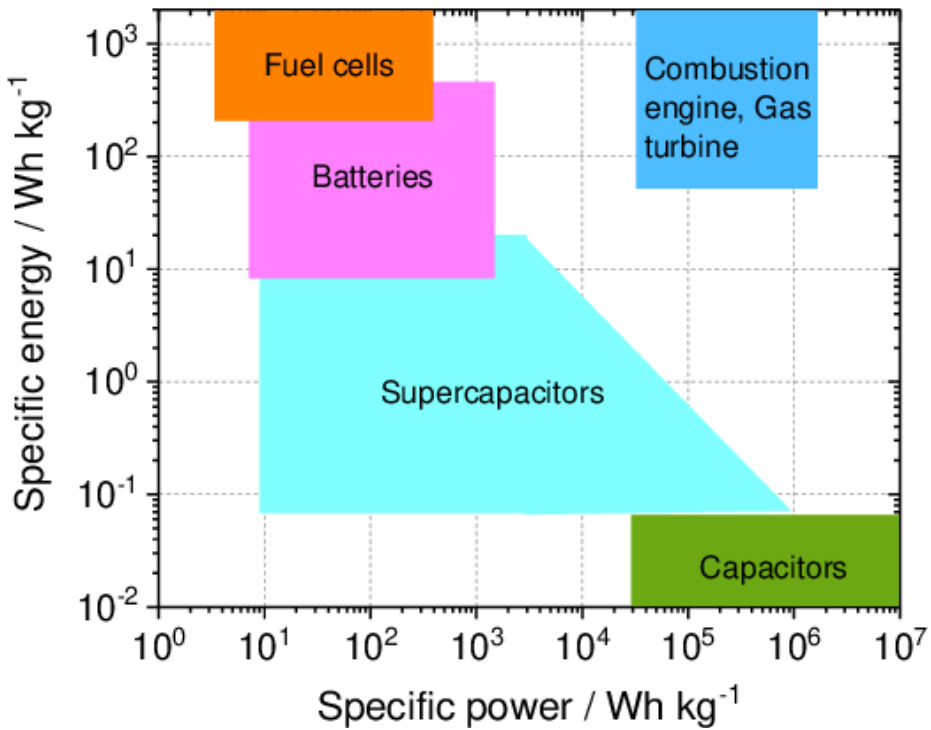
[그림 6] 압축비에 따른 오토사이클의 이론적 효율



반면 동일하게 수소를 주 에너지원으로 사용하는 연료전지의 경우 이론적인 에너지 변환효율이 약 83%에 이르는 것을 알 수 있다¹⁰⁾. 이는 내연기관에서 반복적인 동력 발생을 위해 초기상태로 돌아가는 과정 (즉, 배기과정) 중에 고온의 배기 엔탈피(Enthalpy)가 빠져나가는 상황이 필수적으로 수반되기 때문에 태생적으로 에너지 변환효율에서 약점을 가지고 있기 때문이다. 또한 연료전지의 종류에 따라 다르나 일반적으로 승용차량에 사용되는 PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)의 경우 작동온도가 약 60-100 °C 인데 반해, 내연기관의 연소과정 중 최고온도는 2,000 °C 를 웃돌기 때문에 필연적으로 발생하는 외부로의 열전달 손실(Heat transfer loss)이 크기 때문인 이유도 존재한다. 따라서 동일한 수소를 사용하더라도 내연기관의 에너지 변환 효율이 연료전지에 비해 낮을 수밖에 없는 한계가 존재한다.

10) Fuel Cell Handbook, 7th edition, U.S. Department of Energy, 2004.11.

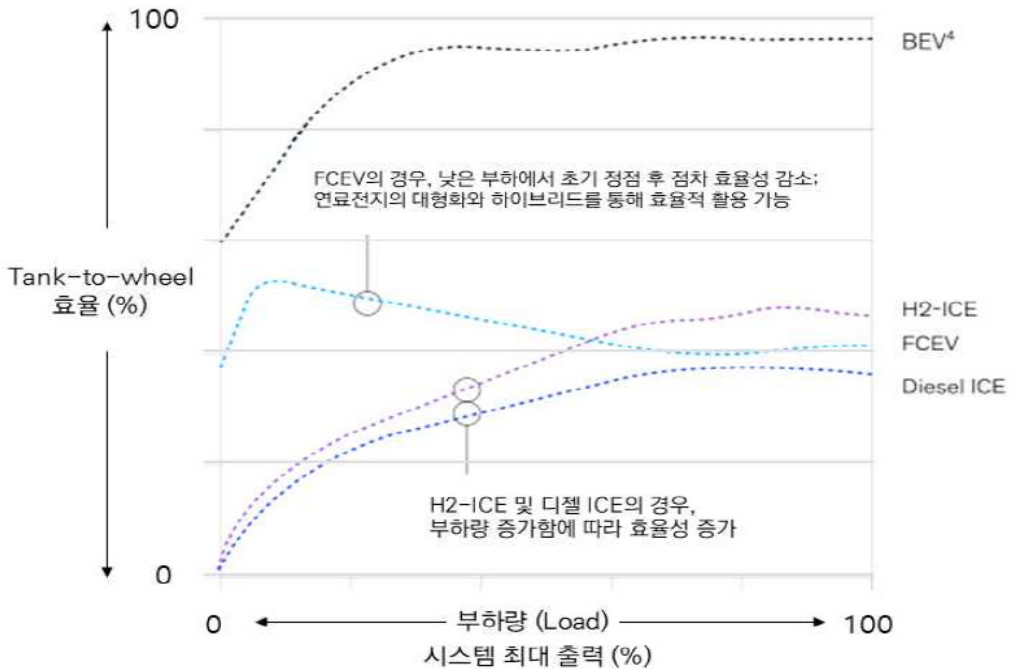
[그림 7] 에너지장치 및 동력원 별 비출력과 비에너지량을 도시한 Ragone plot



자료: Zhu A. et al., Zinc regeneration in rechargeable zinc-air fuel cells—A review, Journal of Energy Storage, 8, pp.35-50, 2016.

이론적인 에너지 효율 측면에서의 내연기관은 연료전지에 비해 분명 낮을 수밖에 없으나, [그림 7]에서 보는 것과 같이 동력원의 질량당 에너지 및 출력 밀도를 살펴보면 내연기관이 갖는 장점을 알 수 있다. 질량당 에너지 밀도는 연료전지와 내연기관이 동등한 수준을 보이며, 배터리 보다는 내연기관이 크게는 10배가량 차이나는 것을 확인할 수 있다. 그러나 질량당 출력밀도를 비교하면 내연기관은 연료전지와 배터리에 비해 큰 차이를 보이고 있으므로, 비출력 측면에서 내연기관은 장점이 있다. 이를 통상적인 에너지변환효율로 표현하기는 어려우나 일반적으로 수송기계들의 한정된 공간을 생각해본다면, 에너지 및 출력 측면에서 큰 강점이 있는 점은 분명하다.

[그림 8] 부하량당 제로배출 기술 효율성 비교 (FCEV, BEV, ICEV)



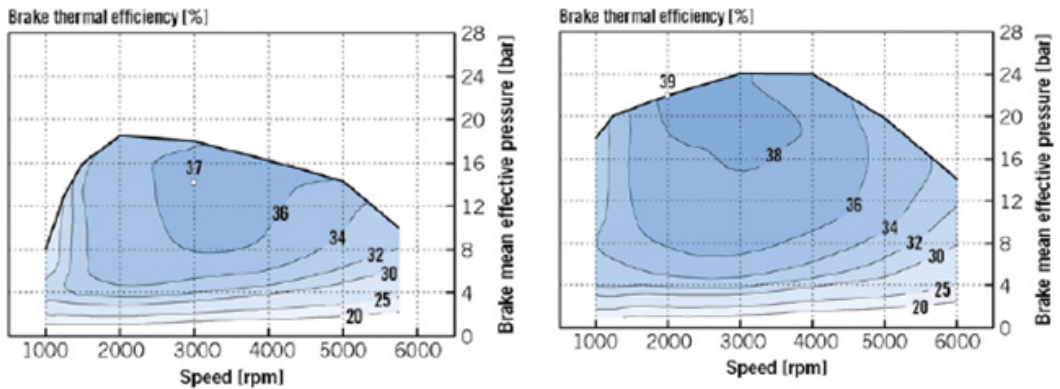
* Load: 시스템이 지속적으로 공급할 수 있는 최대 출력(부스터 포함), FC 시스템 출력의 80%

자료: Global Tech Korea, 탄소제로배출기술, 수소 연소 엔진(H₂-ICE), 2021.09.

특히 [그림 8]에서 볼 수 있듯이 실제 각 동력원의 작동조건에 따르면 연료전지의 전류량이 증가하면, 농도 손실(Concentration loss)에 기인한 전압 강하가 뚜렷하고, 반면 내연기관의 경우 부하 증대 시 연소 효율 향상과 열전달 손실 저감으로 인해 에너지 변환 효율이 향상되어 일부 상호 간 동등 수준 혹은 그 이상의 효율을 기대할 수 있다. 특히 옥탄가가 높고, 층류화염전파 속도(Laminar flame propagation speed)가 빨라 내노킹성(Anti-knocking)이 좋은 수소의 경우, 앞서 말한 일반적인 전기점화기관의 압축비보다 상향하여 구동할 수 있다. 따라서 이와 같은 조건에서는 수소 연료전지는 물론, 기존의 디젤 엔진에 비해서도 높은 열효율을 기대할 가능성이 존재한다¹¹⁾.

11) McKinsey & Company, How hydrogen combustion engines can contribute to zero emissions, 2021.06.

[그림 9] Bosch & IVT에서 발표한 수소 내연기관의 효율 맵(Map) (좌: 포트분사식, 우: 직접분사식)



자료: Bosch & IVT, Hydrogen Engines for Future Passenger Cars and Light Commercial Vehicles, Springer, 2021.02.

이에 수소 내연기관의 효율 추정치뿐만 아니라 실제 구동 시 효율에 대해 확인할 필요가 존재한다. [그림 9]는 독일의 Bosch 社가 2021년 IVT 社와 공동으로 연구한 수소 내연기관의 엔진 속도와 부하 조건에 따른 제동 열효율(BTE, Brake Thermal Efficiency) 맵을 보여주고 있다. 좌측은 수소 연료를 포트에 분사하는 방식(PFI, Port Fuel Injection)을 차용할 경우 결과이며, 우측은 연소실 내에 직접 분사하는 방식(DI, Direct Injection)의 경우 열효율 맵을 보여주고 있다.

이에 따르면 기술적 난이도가 상대적으로 낮은 포트분사식 수소 내연기관도 최고 열효율 37% 수준을 보여줄 수 있으며, 시내 주행 조건에 해당하는 상대적으로 저부하 조건에서도 약 30% 내외의 열효율 결과를 볼 수 있다. 반면 기체의 누설 문제 등으로 인해 기술적 난이도가 상대적으로 높은 직접 분사식을 적용할 경우에는 최고 열효율 39% 수준에 주요 운전점에서도 30~32% 수준의 열효율을 보여주고 있다.

특히 눈여겨 볼 부분은 직접 분사식을 적용할 경우 최고 열효율뿐만 아니라, y축의 최고 부하 조건도 함께 향상된다는 점이다. 이는 수소 기체가 가지고 있는 큰 체적으로 인해, 포트 분사 시 공기의 유입량을 감소시키는 ‘체적 효율 손실’을 초래할 수 있으므로, 기상(Gas phase)의 연료를 이용할 때는 특히 직접분사방식을 차용해야 해당 손실을 줄일 수 있다는 이유에 기인한다¹²⁾. 수소 직접 분사식 내연기관의 최고 부하인 제동유효평균압력 (BMEP, Brake Mean

12) Heywood J., Internal combustion engine fundamentals 1st ed., McGrawHill, 1988.

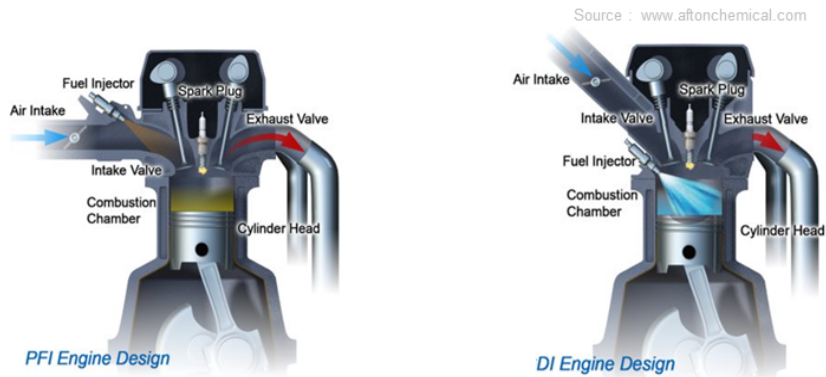
Effective Pressure) 24 bar 조건은 기존의 가솔린 내연기관과 동등한 수준이며, 열효율은 오히려 향상된 수치이다. 즉, 연료전지와와의 비교를 차치하더라도 기존의 가솔린 연료 기반 내연기관보다 더 향상된 열효율에 무탄소 연료를 사용하는 환경이므로, '수소 직분 내연기관'은 효율 측면에서도 탄소중립에 기여할 수 있는 개선된 기술임을 확인할 수 있다. 뿐만 아니라 국내에서도 한국기계연구원의 수소 엔진 연구 결과를 통해 포트 분사 방식을 차용하고 있으나, 상기 결과와 유사하게 35 % 내외의 열효율을 보이는 수소 내연기관의 가능성을 실험적으로 입증한 바 있다¹³⁾¹⁴⁾.

2) 수소 내연기관 효율 향상의 기술적 한계와 대응 방안

수소 내연기관의 효율 향상을 위한 당면 과제는 직접분사식 분사기(Injector)의 개발과 적용에 달려있다. 위의 절에서 보듯이 수소 연료를 효과적으로 내연기관에서 활용하기 위해서는 직접분사 시스템의 적용이 필수적이다.

[그림 10] 포트분사 방식(좌)과 직접분사 방식(우)의 구조 비교

▪ Comparison of Injection system for hydrogen



자료: www.aftonchemical.com

[그림 10]에서 보듯이 좌측의 연료 포트분사 방식은 흡기포트에 신기(Fresh air)와 함께 연료를 분사하는 방식으로 한정된 흡기포트 공간 내에 연료의 체적이 공기의 분압을 빼앗는 악영향을

13) Lee J. et al., Effect of different excess air ratio values and spark advance timing on combustion and emission characteristics of hydrogen-fueled spark ignition engine, International Journal of Hydrogen Energy, 44, pp. 25021-25030, 2019.

14) Park C. et al., Effect of the operation strategy and spark plug conditions on the torque output of a hydrogen port fuel injection engine, International Journal of Hydrogen Energy, 46, pp. 37063-37070, 2021.

미치게 된다. 그러나 우측의 직접분사 방식은 연소실 내에 고압으로 직접 연료를 공급하므로, 공기만 온전히 흡기포트를 통해 공급되므로 한정된 연소실 공간에서 더 많은 양의 연료의 연소가 가능하다. 뿐만 아니라 포트분사 방식은 흡기와 배기 밸브가 동시에 열린 오버랩(Overlap) 구간에서 고온의 배기가 흡기포트 내 공기와 산소에 점화 에너지를 제공하여, 포트 내에서 연소가 발생하는 역화(Back-fire) 현상이 발생할 수 있다¹⁵⁾.

즉, 요약하자면 포트분사 방식을 수소 내연기관에 차용할 경우 다음의 두 가지 문제가 발생할 수 있다.

- 1) 흡입 공기관련 체적 효율 감소로 인한 출력 저하의 문제
- 2) 흡기포트 내 역화로 인한 내구 및 출력 불안정성관련 문제

따라서 직접분사가 가능한 인젝터의 개발과 적용이 선결 과제를 알 수 있다. 그러나 일반적으로 약 8 bar 내외 수준으로 분사하는 포트분사 방식과 달리 직접분사 방식은 연소실 내 압축으로 인한 압력보다 높은 분사 압력을 요구하므로, 적어도 30 bar 이상의 분사압력이 필요하다. 분자의 크기가 매우 작은 수소 기체에 대해 누설 없이 고압으로 짧은 시간 내에 분사하는 기술이 쉽지 않아 현재 국내에서는 생산 기술이 부족한 것이 사실이다. 다만 독일의 Bosch 社와 미국의 Borgwarner 社, 일본의 Denso 社에서는 자체적으로 수소 직분 인젝터 개발의 완성을 눈앞에 두고 시제품을 내놓고 있다. 따라서 초기에는 현존하는 수소 직분 인젝터 기술을 도입하되, 종래에는 국내 고압 기체 직분사 기술 개발 역량을 키워나갈 수 있도록 정부와 기업에서 지원을 아끼지 않아야 할 것이다. 즉, 해당 기술도 소재/부품/장비 기술의 일종으로 원천기술 확보의 필요성이 존재한다.

2. 배기 배출물 및 환경적 측면

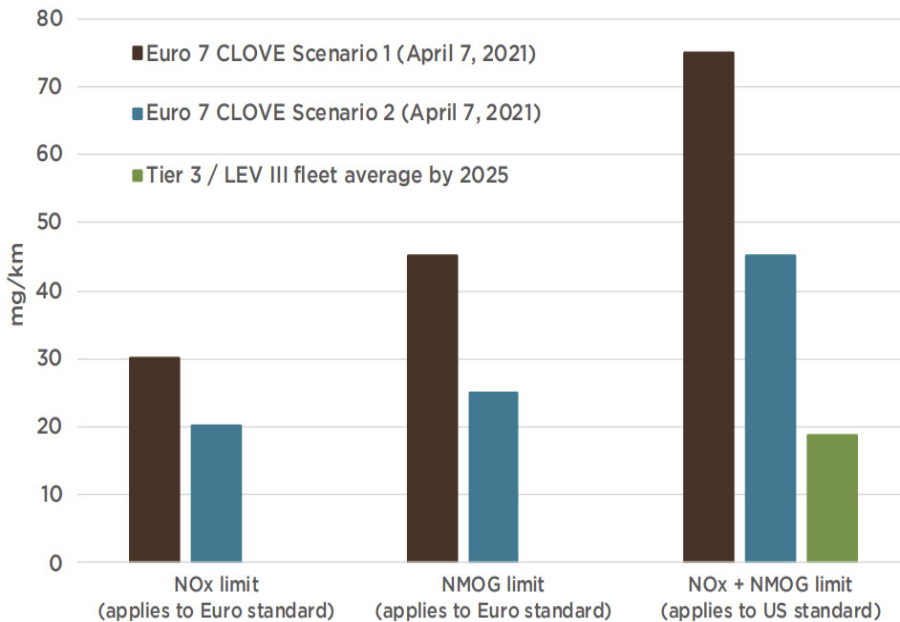
탄소중립 측면에 있어서 무탄소 연료인 수소를 적용하기에 수소 내연기관의 배기 배출물 중에서는 탄소를 포함한 배기가 매우 극소량일 것임이 자명하다. 그러나 앞서 말했듯이 약 2,000 ℃ 내외의 고온에서 수소와 공기 중 산소의 열화학반응을 기반으로 하는 시스템인 만큼 질소산화물(NO_x, Nitrogen Oxides)의 발생 및 배출을 염려하지 않을 수 없다.

15) Sherif S. et al., Handbook of Hydrogen Energy, CRC press, 2014.

1) 수소 내연기관의 배기 배출물 현황 및 잠재력

질소산화물은 공기 중 약 80 % 가량을 차지하는 질소가 고온/고압의 환경에서 열해리된 후 산소와 만나 NO, NO₂ 등의 물질로 재합성 되는 과정에서 발생한다. 질소산화물은 그 자체의 유해성보다는 산성비를 유발하거나 광화학스모그 등의 원인 물질로서 생물체의 호흡기 관련 질병을 유발할 수 있다는 점에서 유해 배기로 분류된다.

[그림 11] 시나리오 별 승용차량의 EURO-7 배기규제 적용 시 질소산화물 배출 규제 수치 예상도

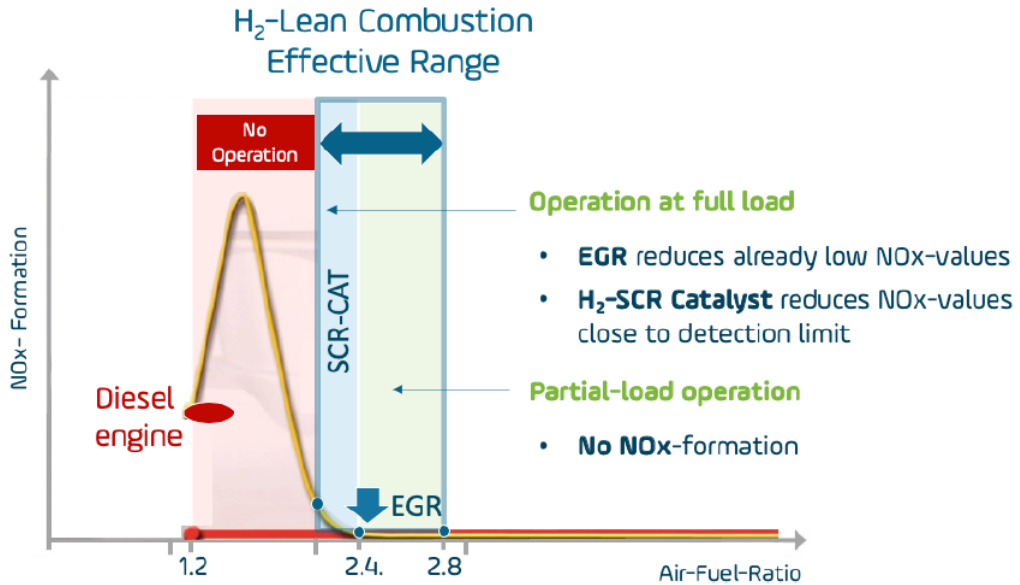


자료: The International Council on Clean Transportation (ICCT), ICCT's COMMENTS AND TECHNICAL RECOMMENDATIONS ON FUTURE EURO 7/VII EMISSION STANDARDS, 2021.05.07.

대표적인 승용차량의 배기 규제 중 하나인 EURO 규제는 현재까지 주로 질소산화물 및 매연 (Smoke 혹은 Particulate Matter)에 집중되어 왔으나, 최근 및 향후에는 이산화탄소 배출 규제도 엄격하게 다루고 있다. 따라서 2025년 이후 EURO-7 배기규제를 적용할 시 59 g/km 수준의 이산화탄소 배출 규제를 도입 예정에 있으며, 질소산화물의 경우 [그림 11]에서와 같이 배출 시나리오에 따라 약 20~30 mg/km 수준을 제시하고 있다¹⁶⁾.

16) The International Council on Clean Transportation (ICCT), ICCT's COMMENTS AND TECHNICAL RECOMMENDATIONS ON FUTURE EURO 7/VII EMISSION STANDARDS, 2021.05.07.

[그림 12] 공기 과잉률 별 질소산화물 배출 수준 및 수소 내연기관의 질소산화물 저감 방식 제안 개념도



자료: KEYOU, Effective range of H₂ lean combustion/NO_x emission control, Vienna Symposium, 2020.

다만 질소산화물은 이론공연비(Stoichiometric Air-fuel ratio) 부근에서 다소 희박한 (Lean) 조건 시 다량 발생하는 특성을 가지고 있다. 고온의 연소로 인한 에너지와 공기 중 산소가 풍부하기 때문이다. 따라서 현재까지 주로 전기점화식 내연기관에 사용되던 가솔린 엔진의 경우 배기 후처리 장치인 삼원촉매(Three-way catalyst)의 활용을 위해 이론공연비 운전 방식을 차용해왔으며, 이에 따라 연소에 의한 후처리 장치 전 질소산화물의 배출은 수천 ppm에 달했다. 또한 가솔린 연료의 특성상 공기 과잉률(Excessive air ratio) 2.0 이상의 운전이 어려웠으므로, 연소 자체에서 발생하는 질소산화물의 저감은 기대하기 어려웠다. 그러나 수소 연료는 특성상 공기 과잉률 4.0 수준까지도 연소 및 내연기관 적용 시 운전이 가능하므로, 연소 자체에서 발생하는 질소산화물의 저감을 기대해 볼 수 있다¹⁷⁾¹⁸⁾.

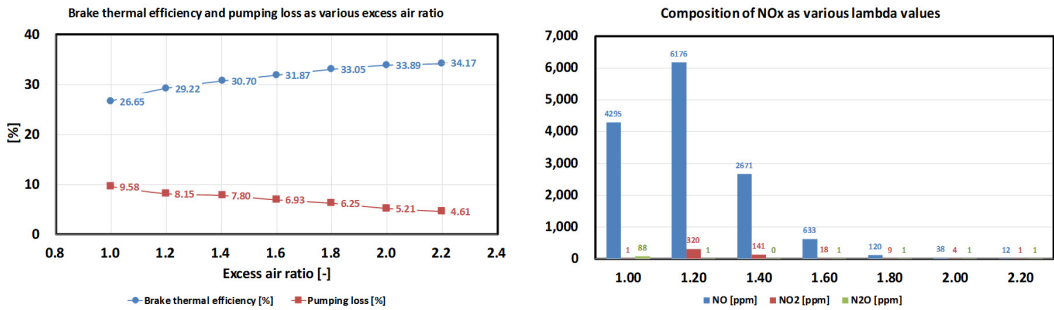
[그림 12]에서 볼 수 있듯이, 독일 KEYOU 社의 운전전략에 따르면 상대적으로 부하가 낮은 운전조건에서는 높은 공기 과잉률을 적용해 연소 자체에서 발생하는 질소산화물을 저감하고, 상대적으로 높은 부하 조건에서는 현재 디젤 내연기관에도 적용 중인 기술인 배기재순환(EGR,

17) Sherif S. et al., Handbook of Hydrogen Energy, CRC press, 2014.

18) Oh S. et al., Ion on the operable range and idle condition of hydrogen fueled spark ignition engine for unmanned aerial vehicle (UAV), ENERGY, 237, 121645, 2021.

Exhaust Gas Recirculation)과 선택적 환원 촉매(SCR, Selective Catalytic Reduction) 방식을 적용하여 최종적으로 수소 내연기관에서 발생하는 질소산화물의 배출을 저감하겠다는 현실적인 제안을 내놓았다.

[그림 13] 포트분사 방식 수소 내연기관의 공기 과잉률별 제동 열효율(좌) 및 질소산화물 배출(우) 경향 실험 결과



자료: Lee J. et al., Effect of different excess air ratio values and spark advance timing on combustion and emission characteristics of hydrogen-fueled spark ignition engine, International Journal of Hydrogen Energy, 44, pp. 25021-25030, 2019.

실제로 수소를 내연기관에 적용한다는 개념은 수소가 매우 희박한 조건에서도 안정적으로 연소가 가능하다는 조건에서 전제한다. [그림 13]에서 보듯이 좌측의 제동 열효율 결과나 우측의 질소산화물 배출 결과를 보면 모두 희박 연소(Lean combustion)를 시행할수록 유리하다는 결과를 도출할 수 있게 된다. 앞서 언급하였듯이 포트분사 방식임에도 불구하고 공기 과잉률 2.2 조건에서 제동 열효율을 34% 수준을 상회하며, 연소에 의해 배출되는 질소산화물은 10 ppm 대 수준에 불과하다. 따라서 수소 내연기관에서 우려되는 거의 유일한 유해 배기물질인 질소산화물 역시 연소 자체에서 효과적인 제어가 가능하며, 일부 현존하는 배기저감 기술을 통해 해결 가능성을 시사한다.

2) 수소 내연기관 배기 저감의 기술적 한계와 대응 방안

다만 수소 내연기관을 구동한다고 해서 탄소를 포함한 배기의 배출이 완벽하게 Zero에 맞출 수 있는 것은 아니다. 내연기관의 구동을 위해 필수불가결한 작동유(엔진오일)가 일부 연소실 내에서 산화하여 배출될 수도 있기 때문이다. 그러나 통상적으로 그 배출수준은 수백 ppm 대에 그칠 것으로 예상되며, 이 정도의 수준은 천연가스를 개질하여 사용하는 고체 산화형 연료전지

(SOFC, Solid Oxide Fuel Cell)와 동등한 정도라 볼 수 있다¹⁹⁾.

[그림 14] 디젤 엔진의 배기량 별 EURO-5 대응을 위한 SCR 장치 장착 비용

Engine displacement	9.0 L	12.0 L	15.0 L
Catalyst volume (SVR = 2.5)	22.5 L	30 L	37.5 L
Substrate and washcoat (vanadium: \$12 × CV)	\$270	\$360	\$450
Canning (\$30 × CV)	\$675	\$900	\$1,125
Total PGMs + substrate + washcoat	\$945	\$1,260	\$1,575
Urea tank cost	\$337	\$409	\$474
Urea level sensor cost	\$48	\$48	\$48
Urea tank accessories cost (brackets, bolts, spacers)	\$33	\$36	\$40
Urea pump cost	\$85	\$94	\$101
Urea injector cost	\$57	\$62	\$67
Stainless steel tubing cost	\$140	\$140	\$140
Urea injection pipe section cost (6 cm in diameter × 38 cm long)	\$112	\$112	\$112
Urea injection mounting cost (brackets, bolts, gaskets, spacers, etc.)	\$33	\$36	\$40
Urea heating system cost (200 W, 12 V DC)	\$66	\$72	\$78
Temperature sensor cost (4 sensors per system)	\$84	\$84	\$84
Mixer cost	\$100	\$115	\$149
Dosing control unit cost	\$170	\$170	\$170
NO _x sensor cost (\$170 × 1 per system)	\$170	\$170	\$170
Total urea system	\$1,435	\$1,548	\$1,673
Total manufacturing	\$2,380	\$2,808	\$3,248

Vd = engine displacement; CV = catalyst volume.

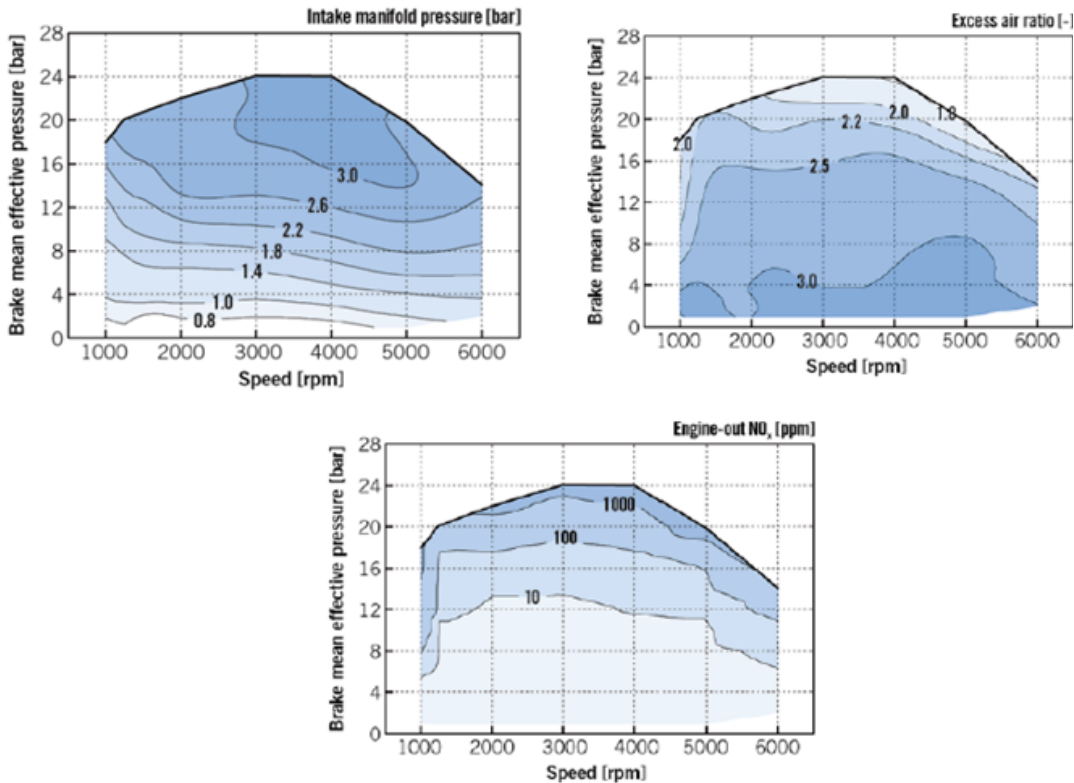
자료: Francisco P. et al., Costs of emission reduction technologies for heavy-duty diesel vehicles, ICCT, 2016.02.

그리고 앞서 언급하였듯이 부하가 낮은, 즉 연료량이 적은, 조건에서는 희박 연소에 의해 효과적인 질소산화물의 저감이 가능하다 할 수 있으나 고부하 조건에서 질소산화물 저감은 더 고민해야 할 문제로 지적된다. 최근 요소수 수급 문제로 SCR을 장착한 차량들의 질소산화물 저감 방식 문제가 사회적 이슈로 대두되었던 만큼, 역시 SCR을 사용하여 질소산화물의 저감을 기대할 수밖에 없는 수소 내연기관 역시 이 문제에서 자유로울 수는 없다. 특히 [그림 14]에서 볼 수 있듯이 SCR을 장착하기 위해서는 요소수 분사계열 및 바나듐을 비롯한 귀금속 촉매와 제어기 등이 필요하기에 배기량이 커짐에 따라 SCR을 제작하는 비용도 한화로 약 300만원 안팎의 고가가 필요하다. 물론 상기 계산치는 배기량 9 리터 이상의 대형 디젤엔진을 기준으로 상정된

19) KEYOU, KEYOU-inside for Hydrogen engines and vehicles, 2018.

것이기 때문에, 약 2 리터급 내외의 승용엔진을 기준으로 할 경우 그 비용은 다소 낮아질 가능성이 존재한다.

[그림 15] 수소 직분 내연기관의 엔진속도와 부하 별 과급압력, 공기 과잉률 및 질소산화물 배출(좌측 상단에서 시계방향) 실험 결과



자료: Bosch & IVT, Hydrogen Engines for Future Passenger Cars and Light Commercial Vehicles, Springer, 2021.02.

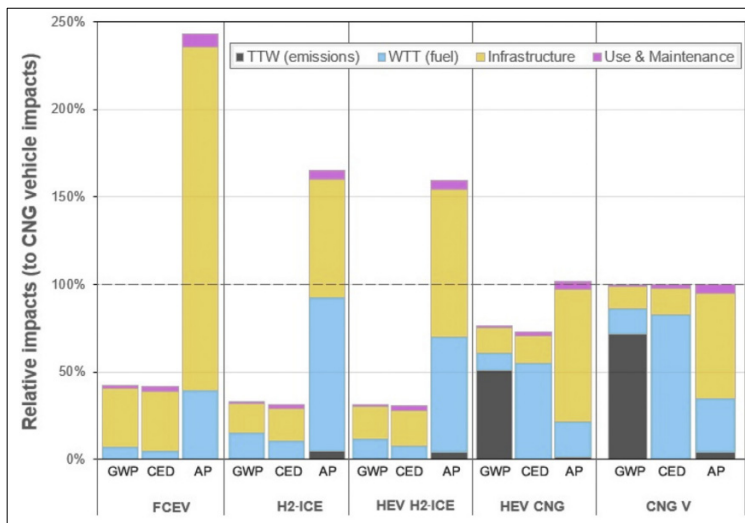
그러나 [그림 15]에서와 같이 터보차저(Turbocharger) 등의 과급(Boosting) 기술을 적용하여 전 영역에 걸쳐 희박 연소를 시행할 경우 연소로부터 발생하는 질소산화물의 수준을 1,000 ppm 대 이하로 제어 할 수 있으며, 특히 10 ppm 대의 저(低)NO_x 영역을 넓히는 데 기여할 수 있다. 따라서 촉매를 기반한 후처리 장치 기술 개발뿐만 아니라, 과급기술에 대한 지원도 필요함을 알 수 있다.

3. 전 과정 평가에 근거한 탄소배출 및 경제성 측면

앞선 두 장에서 수소 내연기관 자체의 효율과 배기 배출 특성에 대해 살펴보았다면, 마지막으로 수소 내연기관 차량의 전 과정 평가 분석(이하 LCA 분석)에 따른 CO₂ 배출량에 기반한 탄소배출 측면과 전반적인 유지비용에 관련된 경제성 측면을 논의하고자 한다.

이론적으로 수소 내연기관은 동일한 수소 에너지를 사용하는 연료전지에 비해 효율이나 배기 배출 특성에서 열세에 있는 것은 사실이다. 그러나 공학과 생산 경제는 단순히 이론적인 배경만으로는 설명할 수 없기 마련이다. 특히 차량의 생산에서부터 운영, 유지에 이르기까지 전 과정에 걸쳐 살펴본다면 생산과정에서 이산화탄소 배출량과 제작비용 등을 고려하지 않을 수 없다.

[그림 16] 수소 연료전지차량과 수소 내연기관 및 수소 내연기관-모터 하이브리드 차량의 이산화탄소 배출관점에서 LCA 분석 결과



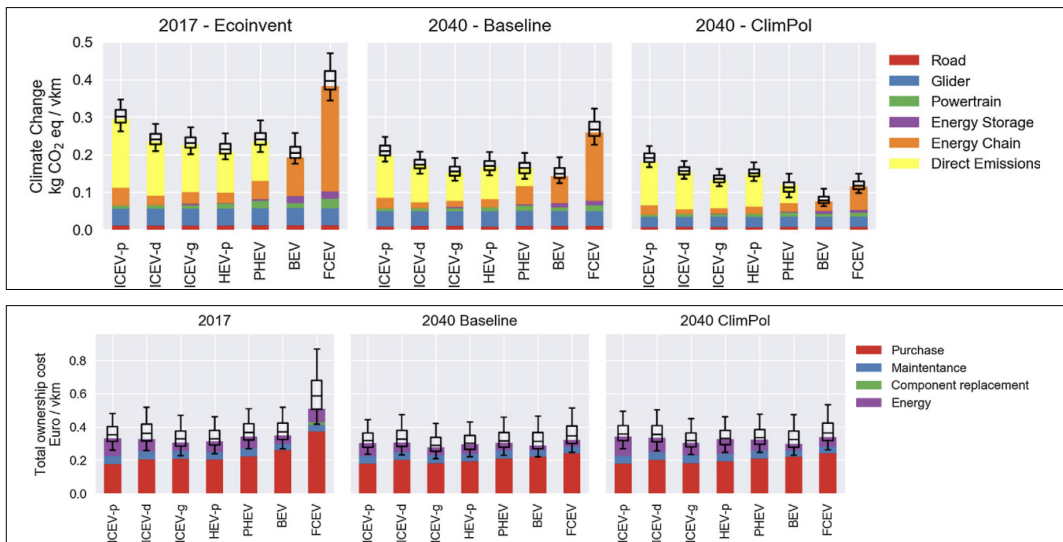
자료: Candelaresi D. et al., Comparative life cycle assessment of hydrogen fuelled passenger cars, International Journal of Hydrogen Energy, 46, pp.35961-35973, 2021.

[그림 16]에서는 압축천연가스(CNG, Compressed Natural Gas) 차량 대비 LCA 분석을 통한 이산화탄소 배출에 의한 환경영향도를 연료전지 기반 수소 전기차와 수소 내연기관 차량에 대해 비교한 결과이다. [그림 중 약어 설명/GWP: Global Warming impact Potential, CED: Cumulative non-renewable Energy Demand, AP: Acidification impact Potential, TTW: Tank-to-Wheels, WTT: Well-to-Tank] 해당 결과를 보면 수소 내연기관이 연료의 생산에서부터 충전까지를 뜻하는 WTT에서 이산화탄소 등의 지구온난화 기체의 발생이 수소

연료전지에 비해 많지만, 인프라 측면이나 운용 중 발생하는 양은 더 적어 최종적으로 더 적은 지구온난화 영향 가능성을 보여주고 있다. 특히 인프라 측면에서 수소 연료전지와 내연기관 간의 큰 차이가 발생하는 이유는 수소 연료전지 제작 시 포함되는 전기모터와 PCU (Power Control Unit), 그리고 BOP (Balance of Plant) 항목에 기인하는 것으로 분석된다.

또한 실제 주행에서 발생 가능한 TTW에서 이산화탄소 등의 발생은 두 동력원 모두 0에 수렴함을 보여준다. 뿐만 아니라 전 과정에서 필요한 비(非)재생에너지 요구량인 CED나 산성화 영향도인 AP 역시 수소 내연기관이 LCA 분석상 현 상황에서 수소 연료전지에 비해 유리할 수 있음을 시사하고 있다. 이는 다시 말해 수소 연료전지의 인프라 구조가 확산되고 확립되기 이전에는 수소 내연기관이 가교 역할을 충분히 수행할 수 있음을 의미한다.

[그림 17] 차량의 동력원 및 연료에 따른 지구 온도 변화 예상 값(상)과 전체 소요 비용(하)에 대한 연도별 시나리오 LCA 분석 결과



자료: Cox B. et al., Life cycle environmental and cost comparison of current and future passenger cars under different energy scenarios, Applied energy, 269, 115021, 2020.

[그림 17]에서 볼 수 있듯이 타 연구결과에 의해서도 현재에는 연료전지 기반 수소 전기차량이 에너지 체인 관련 이산화탄소 배출량의 문제로 인해 오히려 지구온난화 영향에 있어서 LCA 분석상 내연기관 차량과 비교하면 악영향을 초래한다는 결과를 확인할 수 있다. 단, 에너지 체인에 대한 문제가 해결되는 향후 2040년경에는 내연기관 차량과 비교하면 지구온난화 방지를 위한 효과적인 대응책이 될 수 있을 것을 시사한다.

뿐만 아니라 [그림 17] 아래의 결과를 보면 구매에서 유지, 에너지, 부품 교체 등을 모두 고려한 총 비용을 고려해보아도 현행에서는 연료전지 기반의 수소 전기차량에 비해 내연기관 차량의 경쟁력이 두드러짐을 확인할 수 있다. 특히 아래 첨자 ‘g’로 표시된 가스연료 기반의 내연기관의 경우 유지비용의 경쟁력이 우수하며, 특히 구입 및 부품 교체 비용에서 경쟁력이 있음을 알 수 있다. 다만 이 역시도 2040년경에 수소 연료전지의 인프라가 확충되면 동등 수준으로 갈 수 있음을 예상한다.

따라서 수소 에너지의 활용에 있어서 연료전지 기반의 수소 전기차량의 경쟁력이 앞으로 강화 될 것임은 분명하지만, 현 상황에서 볼 때 LCA 분석 관점에서 이산화탄소의 배출이나 비용 측면에서 수소 내연기관의 확대 역시 충분한 경쟁력이 있음을 짐작할 수 있다.

[그림 18] 수소 연료 사용 시 연료전지와 내연기관의 효율 및 운용 비교표

	Hydrogen—Fuel Cell	Hydrogen—Combustion Engine
Tank to wheel efficiency	60%—Fuel cell [49] 93%—Electric motors [53,54] 97%—Rectifier [59] 54%—Total	45%—Combustion engine [29,35] 90%—Transmission [72] 41%—Total
Operating hours	3000 h [50]	10,000 h (comp. Section 3.1)
Relative costs	7 €/kW—Electric Motor [73] 43 €/kW—Fuel cell [52] 14 €/kWh—Hydrogen storage [15]	30 €/kW—Engine + Transmission [42] 14 €/kWh—Hydrogen storage [15]
Power/energy densities	2.0 kW/kg—Fuel cell [49] 5.0 kW/kg—Electric motors [60] 1.59 kWh/kg—Compressed hydrogen [14]	1.5 kW/kg—combustion engine [44,45] 1.59 kWh/kg—compressed hydrogen [14]
Weight of a 130 kW drive train (comp. Equation (6))	65 kg—Fuel cell 10 kg—Air Compressor (estimation) 26 kg—Electric motor 47 kg—Hydrogen storage 4 kg—Supercapacitor 152 kg—Total	87 kg—Combustion engine 40 kg—Transmission (estimation) 15 kg—Electric motor 47 kg—Hydrogen storage 4 kg—Supercapacitor 193 kg—Total
Costs per hour of operation	5590 €—Fuel cell 910 €—Electric motor 1050 €—Hydrogen storage 300 €—Supercapacitor (estimation) 7850 €—Total 2.62 €/h	3900 €— Combustion engine/Transmission 525 €—Electric motor 1050 €—Hydrogen storage 300 €—Supercapacitor (estimation) 5775 €—Total 0.58 €/h
Advantages	<ul style="list-style-type: none"> No emissions 	<ul style="list-style-type: none"> Use of existing manufacturing equipment, No CO₂ emissions Simple to recycle
Disadvantages	<ul style="list-style-type: none"> Limited lifetime of the fuel cell Fuel cell aging leads to increase in fuel consumption Requires battery for warm-up during cold periods 	<ul style="list-style-type: none"> Lowest efficiency Electric motors are only used for recuperation Some Nitrogen oxide emissions Highest maintenance requirements Lubrication Oil consumption

자료: Handwerker M. et al., Comparison of Hydrogen Powertrains with the Battery Powered Electric Vehicle and Investigation of Small-Scale Local Hydrogen Production Using Renewable Energy. Hydrogen, 2, pp.76-100, 2021.

마지막으로 [그림 18]을 통해 동일한 수소 연료 이용 시 연료전지와 내연기관의 운용관련 시간 및 비용, 그리고 효율 등의 비교를 확인할 수 있다. LCA 분석을 통한 TTW 효율은 연료전지가 내연기관에 우위를 보이거나, 총 운용 가능 시간이나 주행 시간 당 운용비용을 보면 내연기관이 경쟁력을 가지고 있음을 알 수 있다. 특히 각 동력원의 상대적인 출력당 제작비용을 보면 내연기관과 변속기의 조합이 연료전지와 모터의 조합보다 40% 가량 저렴한 장점도 존재한다. 즉, 동력원 자체로서 내연기관의 제작/운용 등의 비용에 관한 장점이 뚜렷함을 확인할 수 있다.

Ⅲ. 결론 및 제언

현재 인류는 지구의 기온 상승을 2100년까지 1.5℃ 이내로 줄임으로써, 우리의 생존권 및 지구 생태 보존을 위한 힘든 사투를 벌이고 있다²⁰⁾. 이를 위해 인류는 기존의 편리함을 뒤로 하고 탄소중립이라는 기치 하에 환경보호를 위해 전례 없는 변화를 맞이하고 있다. 이를 위한 노력 중 전기에너지의 활용은 지난 100여 년간 인류가 흔히 사용하던 에너지원 중 하나의 형태였지만, 수소에너지는 그간 그다지 적극적으로 활용하던 분야는 아니었다. 따라서 수소에너지의 보급 확대를 시작하는 현 시점에서 비단 전기화학반응에 기반한 활용뿐만 아니라, 연소를 통한 열화학반응에 기반한 수소에너지의 활용에도 관심을 가져야 할 때이다.

수송 및 승용분야에 있어서 수소에너지의 활용을 위한 시작은 연료전지를 필두로 개진되어 왔으나, 수소 내연기관은 그 보급 확대 및 시장을 보다 확장하고 공고히 이루기 위해 뒷받침되어야 할 필수불가결한 기술이라 할 수 있다. 따라서 기본적으로 수소 내연기관의 기술개발과 적용을 위한 정부 및 유관 기업들의 인식 전환과 지원이 절실하다.

가장 기본적으로는 수소차의 정의를 연료전지를 사용하는 차로 한정하는 것에서 벗어나 수소를 활용하는 모든 동력원을 활용한 자동차임을 명시하는 범위 확대부터 시작할 필요성이 있다²¹⁾. 즉, 수소내연기관이 친환경동력원의 하나임을 인지하는 것이 시작이다. 기본적으로 연료의 충전 및 연료 탱크 등은 수소 내연기관이나 연료전지나 동일하다. 따라서 수소 내연기관이 친환경동력원으로 분류된다면 기본적인 보조금 정책은 수소 연료전지 자동차에 준하여 책정할 필요가 있다. 다만 동력원 내에 적어도 30 bar 이상으로 분사해야하는 수소 내연기관의 특성상

20) 제48차 IPCC 총회 [지구온난화 1.5℃ 특별보고서], 2018.10.

21) 환경부, [친환경 자동차: 하이브리드차/플러그인하이브리드차/전기차/수소차], 2015.12.

안전관련 대책은 조금 더 강화할 필요가 있다. 또한 고출력에서 상대적으로 효율이 좋은 수소 내연기관의 특성상 수소 내연기관을 버스 등 대형 차량에 적용을 장려하는 정책에 대한 준비도 필요하다. 장기적인 관점에서 수소 내연기관 버스는 현재 천연가스 내연기관 버스를 대체할 가능성이 충분하다.

또한 수소 내연기관을 친환경 동력원으로 분류함과 함께 관련된 기술 개발을 위한 기업의 지원과 투자도 필요하다. 고압가스 인젝터의 경우 내연기관 외에도 고(高)에너지 밀도를 요구하는 수소 가스터빈과 같은 연소 및 추력 기관에 활용할 수 있는 원천기술이므로, 그 중요도가 높다. 따라서 향후에는 탄소중립 시대의 도래를 위해 다양한 에너지원과 동력원이 공존하여 활용함으로써 국가 에너지 안보 향상은 물론 환경 친화를 앞당길 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌 및 자료

- [기획자의 광고이야기#7] 볼보 광고 리뷰, 안테암블로, 2022.01.03.
- Volkswagen: The scandal explained, BBC news, 2015.12.10.
- 산업통상자원부, 환경친화적 자동차의 개발 및 보급 촉진에 관한 법률: 친환경자동차법, 2022.01.28.
- 조선비즈, <보조금 축소·개소세 인하 연장...2022 달라지는 자동차 제도>, 2021.12.30.
- KEYOU, KEYOU-inside for Hydrogen engines and vehicles, 2018.
- Park C. et al., "Effect of fuel injection timing on performance and emissions with dedicated direct injector in a hydrogen engine", SSRN-id4007970, 2022.
- 가스신문, <올해 국내 수소차 판매 9천대 돌파...누적 1만9천대>, 2021.12.21. [원출처: 환경부]
- U.S. Department of Energy, Hydrogen Program Plan, 2020.11.
- 한국일보, <야마하, 토요타와의 협력으로 450마력의 V8 수소 엔진 개발한다>, 2022.03.01.
- Toyota global homepage, <Toyota Developing Hydrogen Engine Technologies Through Motorsports>, 2021.04.22.
- KEYOU, Effective range of H2 lean combustion/NOx emission control, Vienna Symposium, 2020.
- Motor Authority, <Ford patents hydrogen combustion engine>, 2022.03.18.
- Hermesmann M. et al., Green, Turquoise, Blue, or Grey? Environmentally friendly Hydrogen Production in Transforming Energy Systems, Progress in Energy and Combustion Science, 90, No.100996, 2022.
- Fuel Cell Handbook, 7th edition, U.S. Department of Energy, 2004.11.
- Zhu A. et al., Zinc regeneration in rechargeable zinc-air fuel cells—A review, Journal of Energy Storage, 8, pp.35-50, 2016.
- Global Tech Korea, 탄소제로배출기술, 수소 연소 엔진(H2-ICE), 2021.09.
- McKinsey & Company, How hydrogen combustion engines can contribute to zero emissions, 2021.06.
- Bosch & IVT, Hydrogen Engines for Future Passenger Cars and Light Commercial Vehicles, Springer, 2021.02.
- Heywood J., Internal combustion engine fundamentals 1st ed., McGrawHill, 1988.
- Lee J. et al., Effect of different excess air ratio values and spark advance timing on combustion and emission characteristics of hydrogen-fueled spark ignition engine, International Journal of Hydrogen Energy, 44, pp. 25021-25030, 2019.
- Park C. et al., Effect of the operation strategy and spark plug conditions on the torque output of a hydrogen port fuel injection engine, International Journal of Hydrogen Energy, 46, pp. 37063-37070, 2021.

- Sherif S. et al., Handbook of Hydrogen Energy, CRC press, 2014.
- The International Council on Clean Transportation (ICCT), ICCT's COMMENTS AND TECHNICAL RECOMMENDATIONS ON FUTURE EURO 7/VII EMISSION STANDARDS, 2021.05.07.
- Oh S. et al., ion on the operable range and idle condition of hydrogen fueled spark ignition engine for unmanned aerial vehicle (UAV), ENERGY, 237, 121645, 2021.
- Francisco P. et al., Costs of emission reduction technologies for heavy-duty diesel vehicles, ICCT, 2016.02.
- Candelaresi D. et al., Comparative life cycle assessment of hydrogen fuelled passenger cars, International Journal of Hydrogen Energy, 46, pp.35961-35973, 2021.
- Cox B. et al., Life cycle environmental and cost comparison of current and future passenger cars under different energy scenarios, Applied energy, 269, 115021, 2020.
- Handwerker M. et al., Comparison of Hydrogen Powertrains with the Battery Powered Electric Vehicle and Investigation of Small-Scale Local Hydrogen Production Using Renewable Energy. Hydrogen, 2, pp.76-100, 2021.
- 제48차 IPCC 총회 [지구온난화 1.5℃ 특별보고서], 2018.10.
- 환경부, [친환경 자동차: 하이브리차/플러그인하이브리드차/전기차/수소차], 2015.12.

Analysis on the potential of hydrogen-fueled internal combustion engine in the 'hydrogen era'

- Needs to support development of hydrogen-fueled internal combustion engine and classify it as 'eco power-train' for H₂-ICE vehicles -

Jeongwoo Lee

- Abstract -

Hydrogen energy takes the important role in the 'carbon neutral' era to reduce carbon-contented emissions. As a result, fuel-cell electric vehicle (FCEV) has been widely used and many subsidy has supported to FCEV according to national policy. However, hydrogen is not only used by 'electro-chemical mechanism', but also can be used through 'thermo-chemical process' based on the combustion. Thus, hydrogen-fueled internal combustion engine (H₂ ICE) could be considered as one of 'environmental friendly' power system for vehicles.

For this reason, in this article, the need to support development of H₂ ICE and calssify it as an 'eco power-train' are discussed based on the analysis of the potential of H₂ ICE.

Key words Hydrogen, Internal Combustion Engine (ICE), Fuel-cell (FC), Efficiency, Environment

기계기술정책

제1권 제1호(2022)·창간호

| 논문 |

특허활동이 생산과 수익에 미치는 영향

일반기계 제조업을 중심으로

김혁준

한국지식재산연구원 연구위원

TECHNOLOGY POLICY
MECHANICAL ENGINEERING

특허활동이 생산과 수익에 미치는 영향*

- 일반기계 제조업을 중심으로 -

김혁준**

- 초 록 -

본 논문은 국내 일반기계 제조업의 특허활동이 생산과 수익에 미치는 영향을 분석한다. 이를 위해 2001~2018년 9,312개의 일반기계 제조업에 속하는 기업 재무정보와 특허정보를 결합하여 패널데이터를 구축한 후 특허출원과 유효특허가 기업의 매출액과 영업이익에 미치는 영향을 분석한다. 그 결과 일반기계 제조업의 특허출원(기술기회)과 유효특허(권리화) 모두 매출액과 영업이익 증대효과를 가지는 것으로 나타났다. 이는 특허가 일반기계 제조업의 성장과 고부가가치화를 위해 유용한 도구임을 보여주는 것으로, 자동차, 조선, 철강, 반도체 등 대부분의 제조업에 생산설비를 공급하며 모든 산업의 핵심 기반산업이 되는 일반기계 제조업의 특성과 기술수명이 짧고 특허기술의 대부분이 기존 기술에 구성의 추가나 구조의 변경이 대부분인 일반기계 제조기술의 특성을 고려할 때 넓은 범위의 특허포트폴리오를 구축한다면 특허의 경제적 성과가 극대화되는 Ernst(1995)의 “이상적” 산업이 될 수 있을 것으로 전망된다. 본 논문은 기존 어떤 연구에서도 주목하지 않았던 일반기계 제조업의 특허활동의 필요성과 방향성을 제시한다는 점에서 정책적, 학술적 의의가 있다고 하겠다.

주 제 어 특허출원, 유효특허, 생산, 수익, 일반기계, 제조업

논문접수일 2022년 4월 25일 수정논문 제출일 2022년 6월 7일 게재확정일 2022년 6월 15일

* 사사표기: 본 연구는 특허청의 2020년 지재권 연구인프라 구축사업의 일환으로 수행된 기초연구과제 ‘특허권 보유의 산업별 경제효과 분석’에서 수행된 연구방법론을 토대로 일반기계 제조업에 초점을 맞추어 수행됨.

** 한국지식재산연구원 경제산업연구실 연구위원, h.kim@kiip.re.kr

I. 서론

지식재산은 국가 산업 경쟁력의 총체로서 최근 지속가능한 경제성장을 실현하기 위한 핵심 요소로 부각되고 있다. 일례로 2018년 노벨 경제학상은 기술혁신이 경제성장을 촉진한다는 ‘내생적 성장이론’을 정립한 폴 로머 교수에게 돌아간 바 있다. 그는 경제 성장을 위해 정부가 금리 등 통화 정책으로 단기적인 성장을 높이는 정책을 취할 수는 있지만 장기적으로는 기술 수준을 높이고 새로운 아이디어를 발굴·육성해야 한다고 강조하며, 기술 발전은 연구개발(R&D)을 통해 가능하고 연구개발을 통해 획득한 지식재산권에 대한 보호는 경제성장을 촉진할 수 기본 조건이라 주장한다(Romer, 1986; 1990). 다시 말해, 경제 성장을 위해 전통적인 생산요소인 노동, 자본의 투입 외에 내부적 요인인 기술과 지식이 축적되고 활용될수록 한계생산성이 개선되어 지속가능한 경제성장이 가능하다는 의미이다.

아쉬운 것은 이러한 지식재산의 가능성이 우리나라 산업혁신 전략에 충분히 녹아들어갔는지 의문이 든다는 점이다. 2014년 수립한 우리 정부의 ‘제조업 혁신 3.0전략’(산업통상자원부, 2014)에는 스마트공장을 핵심으로 우리 제조업을 융합형 신산업으로 개편하겠다는 의지가 담겨 있고, 이를 계승 발전시켜 인공지능, 빅데이터, 사물인터넷 등 첨단 디지털 기술의 산업 현장 적용을 핵심으로 하는 ‘산업 디지털 전환 촉진법’이 금년 7월 시행을 앞두고 있다. 하지만 지속가능한 성장의 핵심이라 할 수 있는 지식재산권의 창출, 보호 및 활용에 관한 내용은 해당 전략과 법률에 반영되지는 않았다. 본 연구는 산업혁신전략 수립에 지식재산권 파트의 필요성을 확인하기 위해 기계제조업, 특히 일반기계 제조업을 대상으로 특허활동과 산업성장과의 관계를 탐구한다.

기계제조업은 크게 금속제품, 일반기계, 전기기계, 정밀기계, 수송기계로 나뉜다(한국기계산업진흥회, 2022)¹⁾. 그 중 일반기계 제조업은 건설기계, 농업기계 등 전통산업의 설비와 장비를 제공하면서 반도체, 디스플레이 등 첨단산업의 설비를 공급하는 핵심 기반 산업이고, 2019년 기준 우리나라 전체 제조업 생산의 7.7%(119.1조원)를 담당하면서 반도체에 이은 수출 2위 품목 업종이기도 하다(통계청, 2022). 이처럼 우리 산업의 핵심이면서 타 산업의 기반이 되는 일반기계 제조업이지만 일반기계 제조업에서의 특허활동에 대한 분석이 수행된 바는 그리 많지 않다. 기반 산업의 특성상 시대의 변화와 기술의 발전에 능동적으로 대응하는 것이 필요해 그 어떤 산업보다 특허의 중요성이 클 것으로 보여 일반기계 제조업에서 특허의 산업적 영향에

1) 1968년 설립된 한국기계산업진흥회는 한국표준산업분류와 국제표준산업분류, 국제표준무역분류를 기준으로 하여 기계산업을 금속제품, 일반기계, 전기기계, 정밀기계, 수송기계의 5대 산업으로 분류하는 KOAMI CODE 체계를 마련하였다.

대한 분석이 시급해 보인다.

이에 본 연구는 일반기계 제조업의 특허활동이 산업의 생산과 수익에 어떻게 영향을 미치는지 파악함으로써 일반기계 제조업의 지속가능한 성장을 위한 시사점을 제시하고자 한다. 이를 위해 본 연구는 다음의 절차를 거쳐 수행한다. 먼저 선행연구 검토를 통해 특허활동과 기업경영 및 산업혁신과의 관계를 탐색한다. 이를 바탕으로 특허활동이 생산과 수익에 미치는 영향을 측정하기 위한 모형을 설정한다. 그리고 나서 일반기계 제조업 데이터를 수집한 후 해당 모형에 적용함으로써, 일반기계 제조업 특허의 생산 및 수익 증대효과를 산출하고 정책적 시사점을 제시한다.

II. 선행연구

특허활동이 기업, 산업, 국가의 생산과 수익에 미치는 영향에 관한 연구는 미국이 친특허정책(pro-patent)을 본격적으로 실시하던 1980년대부터 다수 수행되었다. 먼저 Griliches(1981)는 유효특허건수와 기업의 성과가 반영된 기업 시장가치와 높은 상관관계가 있음을 확인한 바 있다. 이후 특허 획득에 따른 기업의 시장가치의 변화에 관한 연구가 많이 수행되었는데, Ben-Zion(1984)는 1969~1976년에 걸쳐 93개 기업을 대상으로 연구를 수행한 결과, 산업별로 집계된 특허 수가 개별 기업의 시장가치에 정(+)의 영향을 미치지만, 기업 자신의 특허가 가지는 영향력은 미미하게 나타남을 보였다. Connolly & Hirshey(1988)는 Fortune 500대 기업의 경우, 예상치 못했던 특허 한 단위의 증가가 5백만 달러 정도의 기업가치 상승효과를 가져옴을 보였다. Megna & Klock(1993)은 무형 자산의 전략적 중요성이 특히 높은 것으로 인식되고 있는 반도체산업을 중심으로 무형자산의 영향력을 평가하여, 연구개발투자와 특허가 기업의 시장가치에 대해서 유의한 설명변수로서 작용함을 보였다. Arora et al.(2008)은 혁신 주체가 R&D 성과를 특허로 보호하는 것과 그렇지 않은 경우의 기대수익 차이를 ‘특허프리미엄(patent premium)’으로 정의한 후, 737개 미국 제조기업을 대상으로 산업별 특허프리미엄을 분석한 결과 제약·바이오, 기계 및 컴퓨터와 같이 특허 프리미엄이 높은 분야는 특허와 혁신가치 사이에 강한 긍정적인 관계를 가지고 특허가 R&D투자를 유발하는데 반해 전자, 반도체와 같이 특허프리미엄이 낮은 분야는 특허 이외 수단을 활용해 혁신을 보호하는 경향이 강하지만, 여전히 특허는 R&D투자를 유발하는 특성을 가짐을 보였다. Jensen et al.(2011)은 특허를 등록한 경우가 등록하지 않은 경우보다 발명에 대한 수익(returns on invention)이 평균 40~50%

높은 것을 확인하였는데, 기술분야에 따른 발명에 대한 수익의 차이는 통계적으로 확인하지 못했다. Frietsch et al.(2014)은 1988~2007년 19개국의 35개 기술분야별 패널데이터를 활용하여 회귀분석을 실시한 결과 특허출원 1%를 증가시키면 수출액 12.2%가 증가함을 확인하였다. Farre-Mensa et al.(2020)은 2009~2013년 34,215개의 첫 특허출원(스타트업)이 기업 성과에 미치는 영향에 대한 패널회귀분석을 실시하였다. 그 결과 특허가 등록된 스타트업은 특허가 거절된 스타트업에 비해 1년, 3년, 5년 후 생존율이 각각 4.6%, 6.9%, 8% 포인트 높았고 특허등록기업과 거절기업은 누적 매출액 증가율에 있어서 9.6%(1년 후), 27.6%(2년 후), 51.2%(3년 후), 79.6%(4년 후), 79.5%(5년 후) 포인트 차이가 발생함을 보였다. 최근에는 EPO & EUIPO(2021)가 유럽기업의 재무 정보와 지식재산권 정보를 결합한 데이터를 활용하여 기초 통계분석, 계량경제분석을 실시하여 지식재산권 보유기업이 보유하지 않은 기업에 비해 종업원당 매출액이 55% 더 큰 것을 확인하였다. 특히, 중소기업은 종업원당 매출액이 68%나 크다는 것을 보였다.

특허의 경제적 효과를 측정하기 위한 연구의 흐름은 국내에서도 활발하다. 연태훈(2004)은 우리나라 상장기업들의 특허취득 공시가 기업의 시장가치에 유의하고 긍정적 영향을 미치는 것을 확인하였다. 이기환·윤병섭(2006)은 특허활동이 경영성과에 미치는 영향을 일반기업과 벤처기업으로 구분하여 분석한 결과 일반기업의 특허활동이 경영성과에 더 유의한 정(+)의 영향을 미치는 것을 밝혔다. 안연식(2010)은 우수 특허역량을 보유한 기업은 특허 사업화에 성공할 가능성이 크고 이를 통해 해당 기업의 경영성과가 증가하는 경향이 있음을 확인하였다. 고영희·이미연(2013)은 기업의 보유특허는 기업 기술역량의 결집체로서 특허전략을 통해 향후 특허의 경제적 활용 가능성을 높일 수 있음을 강조하였다. 정두희 외(2019)는 특허기반창업이 창업성과에 미치는 영향을 분석하여, 특허기반 창업은 자금조달, 혁신성, 단기 제품판매증가율, 단기고용 등의 성과 측면에서 긍정적 영향을 주는 것으로 나타난 반면, 단기 매출성과에는 효과가 없는 것을 확인함으로써, 특허기반 창업이 창업기업의 자금조달 역량, 미래 경쟁력, 성장성을 높이는 데 유효한 방법이라는 시사점을 도출하였다.

국내의 이러한 연구흐름은 특허활동과 기업경영성과간의 관계 규명에서 더 나아가 기업 전략 방향 제시를 위한 다양한 시사점을 도출하고 있다. 정석화·신호균(2017)은 유효특허율(=등록건수/출원건수)은 기업경영성과에 부(-)의 영향을 미치지만 유효특허 등록건수는 기업경영성과에 정(+)의 영향을 미치는 것으로 확인함으로써, 특허출원건수 중심의 양적 성장이 증대되고 있는 국내 기업들의 추세를 볼 때 보다 가치 있는 유효특허의 개발과 등록으로 이어지는 전략이

필요함을 강조하였다. 이어서 정석화·신호균(2018)은 기업들의 유효특허 권리화 활동이 신기술 및 신제품 성과에 긍정적 영향을 미침을 확인하고 기업들의 특허개발 프로세스 관리는 신기술의 경쟁력 확보, 신제품의 적기출시, 가격인하, 품질향상 등 판매경쟁 우위 확보에 필수적임을 제시하였다. 한편 김도성 외(2018)는 103개 의료기기 제조·판매 기업의 연구개발활동과 특허가 기업경영성과에 미치는 영향을 분석하였는데, 그 결과 연구개발비는 매출액, 영업이익률, 순이익률, 기업평가등급, 현금흐름등급, 순이익증가율, 자기자본순이익률, 투하자본이익률, 총자본회전률 등 대부분의 경영성과 지표에 대해 음(-)의 영향을 미치고, 무형자산에만 양(+)의 영향을 미치는 것으로 확인하였고, 국내등록특허는 매출액, 현금흐름등급, 투하자본이익률에 음(-)의 영향을 미치고, 순이익증가율에는 양(+)의 영향을 미치는 것을 확인하였다. 이는 영세한 중소기업이 대부분을 차지하는 의료기기 산업의 특성 상, 연구개발활동과 특허취득이 단기적으로는 기업 경영성과에 부정적 영향을 미치지만, 장기적으로 연구개발 후 임상시험과 인허가의 절차를 거쳐 특허권을 취득한 후에는 긍정적 영향을 미치는 것으로 해석하였다. 김진우(2019)는 2017년 전 세계 R&D투자 상위 2,500개 기업의 성과 정보를 활용하여 4개국(한국, 중국, 미국, 일본)의 소재 관련 산업에서 다른 발명에 대한 기여가 높은 고인용 특허의 보유와 기업 성과와의 관계를 분석하였다. 그 결과 기업의 매출 성장에 기여하는 것은 단순한 발명 수가 아니라 고인용 발명 수라는 것을 확인하였다. 이는 기술혁신의 양적인 성장이 기업 매출 성장으로 이어진다고 보기는 어렵지만 기술적 영향력이 높은 고인용 발명규모는 기업 매출 성장과 상관관계가 크다는 것을 확인한 것으로서, 우리나라의 고인용 발명 수가 적은 상황을 개선함으로써 기업의 성과를 제고할 수 있을 것이라 제안하였다.

특허의 경제효과에 관한 연구는 아니지만, 기계산업을 대상으로 한 기술혁신 패턴에 관한 연구를 살펴봄으로써 본 연구의 초점인 일반기계 제조업 특허의 생산 및 수익 증대효과를 추론할 수 있었다. 먼저 이공래(1994)는 기계산업의 혁신은 전후방산업과 연관된 융복합기술 혁신으로 발생하며, 기계설비 공급기업은 물론 수요기업이 혁신과정에 적극적으로 참여하는 특성을 갖는다고 지적하며, 정보기술과의 융합이 기계기술혁신의 핵심 트렌드가 될 것으로 전망한다. 그러면서 국내 기계산업 제품혁신은 특허 등의 지식재산권 보호가 선호되지만, 공정혁신은 생산성 절감이 중요 목표로 여겨져 비밀로 유지하려는 경향이 강하다는 것도 언급한다. 송준엽·곽기호(2012)는 1995~2010년까지 기계산업의 ICT 융합도 변화를 측정하여 기계산업 ICT 융합도가 높아짐에 따라 ICT 융합의 부가가치 유발효과도 증가하는 경향을 확인하였다. 봉강호 외(2018)는 기계산업 기업의 업력, 매출액 규모, 연구소 보유, 연구개발비 지출, 정부지원, 세제혜택이

제품혁신 성과에 정(+)의 효과를 가짐을 실증적으로 보여주며, 인적자원의 기술역량이 강조되는 기계산업에서 조직 구성원들에 대한 동기부여가 제품혁신 성과에 대해 중요한 역할을 한다는 점을 강조한다. 한편, 이성상(2007)은 기계산업에서 선행기술조사 활동과 특허출원성향이 R&D 성과를 대변하는 특허출원건수에 정의 영향을 미침을 실증적으로 보여준 바 있다.

Ⅲ. 분석 방법론

1. 분석모형

특허활동은 연구개발 성과를 특허화하기 위해 특허청에 신청하는 ‘출원(application)’, 특허청으로부터 독점적 권리를 부여받는 ‘등록(registration)’, 등록된 권리를 유지하는 ‘갱신(renewal)’으로 나누고, 각각의 단계에 있는 특허를 ‘출원특허’, ‘등록특허’, ‘유효특허’라고 부른다. 일반적으로 출원특허와 등록특허는 기업 기술역량의 유량(flow) 변수로 활용되고, 유효특허는 기업 기술역량의 저장(stock) 변수로 활용된다. 본 연구는 특허활동의 유량변수로 ‘특허출원건수’로, 저장변수로 ‘유효특허건수’를 선택하여 일반기계 제조기업의 특허활동(유량, 저장)이 생산 및 수익에 미치는 영향을 분석한다.

이를 위해, 본 연구는 콥-더글라스(Cobb-Douglass) 생산함수를 기초로 회귀방정식을 도출한다. 콥-더글라스 생산함수는 양변에 로그를 취해 비선형관계를 선형으로 변환해 생산탄력성을 측정하기 쉽다는 장점이 있어 지식자본의 생산증대 효과분석 연구에 많이 사용된다. 콥-더글라스 생산함수는 원래 둘 이상의 투입(물리적 자본, 노동)과 생산의 관계를 나타내기 위해 경제학에서 널리 이용되는 식으로서 표준 수식은 다음과 같다.

$$Y = AK^\alpha L^{1-\alpha} \tag{1}$$

이 때 Y는 총생산, K는 자본 투입, L은 노동 투입, A는 총요소생산성(TFP, total factor productivity), α 는 생산의 자본탄력성, $1-\alpha$ 는 생산의 노동탄력성이 된다. 이런 콥-더글라스 생산함수를 확장하면(Griliches & Lichtenberg, 1984) 노동, 물리적 자본(physical capital), 기술적 자본(technical capital) 등 생산요소의 투입 산출 관계를 나타내는 함수로서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Y = AK^{\beta_1}L^{\beta_2}R^{\beta_3} \quad (2)$$

위 식에서 Y는 생산, K는 유형자산, L은 노동, R은 기업이 축적한 무형자산을 나타내며 A는 기업에 영향을 미치는 외부 지식변수를 나타낸다. $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 각각은 기업의 각 투입요소에 대한 생산탄력성을 의미하는데, $\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 > 1$ 이면 수확체증(increasing returns), $\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 = 1$ 이면 수확불변(constant returns), $\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 < 1$ 이면 수확체감(decreasing returns)이 된다.

위 (2)식에서 양변에 자연로그를 취하면,

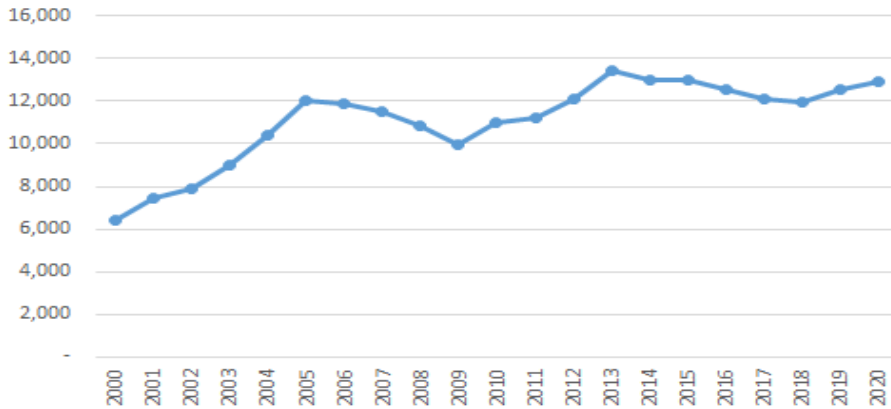
$$\ln Y = \ln A + \beta_1 \ln K + \beta_2 \ln L + \beta_3 \ln R \quad (3)$$

위 (3)식에서 본 연구는 특허활동이 일반기계 제조업의 생산과 수익에 미치는 영향을 상세히 살펴보고자 생산 Y에 해당하는 종속변수로 기업의 매출액과 영업이익을 설정하였고, 무형자산을 나타내는 변수 R에 해당하는 설명변수로 연구개발비 지출액과 특허활동변수(유량, 저장)를 설정하였다. 추가적으로 물가상승률에 따라 연도별로 달라지는 명목데이터의 문제를 통제하기 위한 시간 더미를 추가하였고, 기업 규모에 따른 변화, 일반기계 제조업 내 ‘일반목적용 기계 제조업’과 ‘특수목적용 기계 제조업’의 차이에 따른 변화를 포착하기 위해 관련 변수를 설정하여 분석하였다. 일반목적용 기계는 범용의 목적으로 활용될 수 있는 기계를 의미하며, 내연기관, 유압기기, 밸브, 동력전달 장치 등이 이에 해당하고, 특수목적용 기계는 기계의 사용 목적이 한정된 기계를 의미하며, 농업용 기계, 건설·광산 기계, 섬유 기계 등이 이에 해당한다(중소벤처기업부, 2021, p.6). 일반목적용 기계의 판매처가 다양할 것이고 그로 인해 일반목적용 기계 관련 특허가 생산성과 수익성 측면에서 특수목적용 기계 특허보다 나올 것이라는 가정에서 분석 대상을 구분하여 별도 분석을 실시하였다.

2. 데이터

<그림 1>은 특허청이 2015년 개발해 배포한 ‘KSIC-IPC 연계표’ 상의 산업분류를 활용하여 산출한, 2000~2020년 우리나라 일반기계 제조업의 특허출원 변동 그래프이다. 일반기계 제조업의 특허출원은 4~5년을 주기로 등락을 반복하는 것이 특징적이다. 2009년 금융위기 당시 저점을 찍은 특허출원은 2013년까지 상승하다가 2018년까지 다시 계속 하락세를 보였는데 2019년부터 다시 특허출원 상승세를 보이고 있다.

[그림 1] 일반기계 제조업의 특허출원 변동 (2000~2020)



주 1. 특허청 연계표상 일반기계 제조업은 사무용 기계 및 장비 제조업, 사무용 이외의 일반기계 제조업, 특수 기계제조업으로 나뉨

본 연구는 일반기계 제조업에 속한 기업의 2001~2018년 연도별 특허자료와 재무자료를 이용한다. 특허자료는 특허청 데이터베이스를 활용하였고 재무자료는 NICE평가정보(주)가 제공하는 KISLINE 서비스를 활용하였다. 여기서 본 연구에서 설정하고 있는 일반기계 제조업은 한국표준산업분류(KSIC)의 중분류 단위인 기타 기계 및 장비 제조업(C29)만을 대상으로 하였다. 이는 다시 소분류 단위의 일반목적용 기계 제조업(C291)과 특수목적용 기계제조업(C292)으로 구분되고 그 아래 세분류로 각각 9개씩의 업종 구분이 가능하지만 본 연구는 분석 대상 기업 표본 수를 충분히 확보하기 위해 중분류 단위의 C29, 소분류 단위의 C291, C292만을 분석 단위로 설정하여 진행하였다.

〈표 1〉은 분석데이터 출처와 목록을 보여준다. 일반기계 제조업의 특허건수를 수집하기 위해 KISLINE 상 기업의 업종코드가 C29에 해당되는 기업을 선별하고 해당 기업의 법인번호를 특허청 데이터베이스 상에서 매치함으로써 일반기계 제조업에 해당하는 기업의 연도별 매출액, 자본, 인건비, 연구개발비, 특허출원건수, 유효특허건수를 확보할 수 있었다. 그 결과 본 연구에서 확보한 일반기계 제조기업 수는 최저 3,270개(2001년)에서 최대 6,341개(2016년)였다. 이를 통해 확보한 연평균 매출액, 영업이익, 자본총액, 총인건비, 연구개발비, 특허출원건수, 유효특허건수는 다음 〈표 2〉와 같았다. 2019년 기준 일반기계 제조업의 생산액이 119.1조원이 고(통계청, 2022), 본 연구의 분석대상의 매출액이 10조원 수준임이므로 표본 규모가 전체 일반기계 제조업 규모의 8~9% 수준으로 파악되었다.

〈표 1〉 분석 데이터 목록

출처	변수	세부 내용
NICE평가정보(주)의 KISLINE	매출액	KISLINE에서 제공하는 매출을 그대로 사용
	영업이익	KISLINE에서 제공하는 영업이익을 그대로 사용
	자본	KISLINE의 재무제표에서 제공하는 자본총계 = 자본금 + 자본잉여금 + 이익잉여금 + 자본조정 + 기타 포괄 손익 누계액
	노동	총 인건비 = 손익계산서의 인건비 + 제조원가명세서의 노무비
	R&D	총 연구개발비 = 재무상태표의 '연구개발비' + 손익계산서의 '연구비 + 경상연구개발비 + 경상개발비' + 제조원가명세서의 '연구비 + 경상개발비'
특허청의 특허DB	특허출원	특허등록을 위해 출원한 특허의 수
	유효특허	설정등록하거나 연차등록되어 권리가 유지되고 있는 특허의 수

한편 본 연구는 특허출원건수나 유효특허건수가 0인 경우처럼 로그변환으로 인해 분석에서 제외되는 관측치를 최소화하기 위해 각 변수에 1을 더한 값을 활용하였다. 하지만 기업의 영업이익이 음의 값을 가짐으로 인해 분석에서 제외되는 관측치도 상당수 발생한다. 본 연구의 초점은 특허활동이 생산 및 수익 증대에 미치는 영향이지만 기업의 영업이익이 음의 값을 갖는 경우 글로벌 금융위기와 같이 본 연구에서 고려하고 있지 못하는 기업 외부의 불확실한 요인이 작용할 가능성이 크기 때문에 영업이익이 음의 값을 갖는 관측치를 무리하게 보정하여 분석에 포함시키기 보다는 분석에서 제외하여 특허활동이 생산성 및 수익성 증대에 미치는 영향을 분석하는 것이 더 합리적이라 판단하였다. 최종적으로 분석에 포함된 변수의 기술통계량은 〈표 3〉과 같다.

〈표 2〉 연도별 평균 데이터

연도	기업수 (개)	매출액 (억원)	영업이익 (억원)	자본총액 (억원)	총인건비 (억원)	연구개발비 (억원)	특허출원 (건)	유효특허 (건)
2001	3,270	22,660	1,260	10,740	2,834	670	1,720	2,219
2002	3,591	26,120	1,265	12,220	3,239	755	1,962	2,888
2003	3,816	29,760	1,654	13,740	3,710	810	2,673	3,387
2004	3,850	37,380	2,355	17,280	4,135	967	2,697	4,254
2005	3,996	41,770	2,453	18,240	4,526	1,158	3,608	5,119
2006	4,214	46,760	2,863	21,020	5,281	1,432	4,513	7,997
2007	4,301	52,580	3,388	23,440	5,257	1,667	5,423	11,223
2008	4,443	62,750	4,188	31,680	5,648	2,043	5,746	13,719
2009	4,258	58,800	3,719	30,700	5,159	1,952	5,087	14,680

연도	기업수 (개)	매출액 (억원)	영업이익 (억원)	자본총액 (억원)	총인건비 (억원)	연구개발비 (억원)	특허출원 (건)	유효특허 (건)
2010	4,551	74,110	5,343	35,380	5,972	2,352	5,103	16,727
2012	4,947	84,550	5,287	40,220	6,768	2,633	5,675	19,898
2013	5,385	83,430	4,188	40,960	7,264	2,949	6,116	23,755
2014	5,845	82,320	4,024	41,540	7,944	3,183	6,464	28,178
2015	6,049	81,980	3,581	42,240	8,055	3,330	6,702	32,866
2016	6,302	82,020	3,544	43,180	8,953	3,427	6,516	35,278
2017	6,341	84,450	4,434	46,360	8,982	3,659	6,555	37,523
2018	6,143	99,860	6,771	52,110	9,708	4,112	6,509	39,276

〈표 3〉 변수의 기술통계량

변수		평균	표준편차	최소값	최대값	관측수
SALE =ln(1+매출액)	전체	14.77	2.23	0.00	22.76	86,693
	개체 간		2.32	0.00	22.19	9,312
	개체 내		1.41	-1.95	26.85	9.31
PROF =ln(1+영업이익)	전체	12.19	1.73	0.00	20.11	73,551
	개체 간		1.54	0.00	19.32	8,823
	개체 내		1.08	-1.00	18.40	8.34
CAP =ln(1+자본총액)	전체	14.17	1.61	0.00	22.17	84,579
	개체 간		1.48	5.43	21.55	9,232
	개체 내		0.86	-0.98	18.57	9.16
LAB =ln(1+인건비)	전체	2.07	1.71	0.00	9.04	86,696
	개체 간		1.32	0.00	8.75	9,312
	개체 내		1.06	-4.41	7.37	9.31
RND =ln(1+연구개발비)	전체	7.30	6.01	0.00	20.51	86,683
	개체 간		4.73	0.00	19.24	9,312
	개체 내		3.99	-7.12	21.11	9.31
PAT_A =ln(1+특허출원건수)	전체	0.31	0.59	0.00	6.76	86,696
	개체 간		0.37	0.00	5.91	9,312
	개체 내		0.44	-3.60	3.05	9.31
PAT_N =ln(1+유효특허건수)	전체	0.77	0.95	0.00	7.88	86,696
	개체 간		0.65	0.00	6.46	9,312
	개체 내		0.62	-3.86	3.39	9.31

IV. 분석 결과

1. 특허활동이 생산에 미치는 영향

〈표 4〉는 일반기계 제조업의 특허활동이 생산에 미치는 영향을 분석한 결과이다. 본 연구의 분석 대상 데이터는 일반기계 제조기업의 불균형 패널데이터이다. 이에 대해 F 검정, Breusch-Pagan 검정, Hausman 검정을 통해 합동 OLS(ordinary least square), 확률효과모형(random effect model), 고정효과모형(fixed effect model) 중 가장 타당한 분석방법이 고정효과모형을 확인하였고, 모든 분석 결과는 고정효과모형의 결과를 제시하고 있다. 결과적으로 모형 6-2의 일부를 제외하고는 모든 추정계수가 99% 신뢰구간에서 통계적 유의성이 확인되었다. 모형 3에서 특허출원 1%가 증가하면 기계 제조기업의 매출액이 통계적으로 유의하게 0.06% 증가함을 확인할 수 있었고, 모형 4에서 유효특허 1%가 증가하면 매출액이 0.02% 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 특허출원과 유효특허가 모두 설명변수에 포함된 모형 6에서는 특허출원 1% 증가 시 매출액 0.05%, 유효특허 1% 증가 시 매출액 0.02%가 증가함을 확인할 수 있었다. 이를 특허건수와 실제 매출액을 기준으로 환산하면 2018년을 기준으로 할 때 특허출원 1건이 증가하면 매출액은 9천만원, 유효특허 1건이 증가하면 2천만원 정도 증가한다는 결과이다. 이는 직접적 매출증대 효과가 이렇다는 것이지 특허권에 의한 분쟁 예방 효과까지 고려하면 그 이상일 수 있기는 하지만 연간 2018년 기준 노동 1%증가 시의 매출증대효과가 0.05%, 연구개발비 1% 증가 시의 매출증대효과가 0.02%에 그치고 있는 것을 고려하면 전반적으로 일반기계 제조업의 생산 증가분에 자본 투입에 따른 효과가 크게 작용하고 있는 반면(0.74), 노동과 기술 투입에 따른 생산 증가분은 그리 크지 않다는 것을 보여주는 결과이다. 실제로 전체 생산성에서 노동과 자본 투입에 따른 생산성 증가분을 뺀 생산성으로 정의되는 총요소생산성 지표를 한국생산성본부가 산출해 공개한 데이터에 따르면, 일반기계 제조업의 2018년, 2019년 총요소생산성 증가율은 각각 0.09%, 0.08%로 전체 산업 평균인 2.3%, 1.2% 보다 낮은 것으로 파악되었다. 이러한 결과는 일반기계 제조업이 설비와 장비를 공급하는 산업의 특성이 강하게 작용해 나타난 것으로 해석할 수 있다.

모형 6을 기업규모로 세분화한 결과를 모형 6-1(중소기업), 6-2(대기업+중견기업)로 제시하였다. 모형 6-1의 결과는 모형 6의 결과와 거의 유사하였다. 조금 차이가 나는 것은 모형 6의 특허출원(PAT_A) 추정계수가 0.06이었지만 모형 6-1에서는 0.03으로 다소 작아졌다는 점이다. 분석대상에 대기업과 중견기업까지 포함되어있던 모형 6에서 보다 중소기업만 포함되어

있는 모형 6-1에서 특허출원의 매출액 증대에 미치는 영향이 더 작다는 것은 일반기계 제조업 내의 중소기업이 대기업 및 중견기업보다 특허출원의 결과를 매출액 증대로 연결시키는 역량이 다소 미흡하다는 것을 의미한다. 여기서, 유효특허(PAT_N)의 추정계수가 모형 6과 모형 6-1이 동일한 0.08이었다는 점을 고려하면 일반기계 제조 중소기업의 특허출원이 등록이 되어 효력이 발현되기만 하면 매출액 증대에 업계 평균 수준의 효과를 갖지만 중소기업 특허출원의 매출액 증대효과는 업계 평균 수준을 밑돌 수 있다는 결과이다. 따라서 일반기계 제조기업이 특허출원을 사업화하는데 도움이 될 수 있는 별도의 정책방안 마련이 필요할 것으로 보인다.

한편 대기업과 중견기업만을 대상으로 하여 분석한 모형 6-2에서는 특허출원과 유효특허의 추정계수가 통계적 유의성을 갖지 않는 것으로 나타났다. 이는 일반기계 제조업 내의 대기업과 중견기업의 수가 176개라 관측 수가 작아서 추정계수의 표준오차가 커져 발생한 것으로 해석할 수 있어서 그 결과에 큰 의미를 두기 곤란하다. 또한, 일반기계 제조업을 일반목적용 기계 제조업(C291)과 특수목적용 기계 제조업(C292)으로 나누어 분석한 모형 6-3과 모형 6-4는 전체 일반기계 제조업 대상 분석인 모형 6의 결과와 크게 다르지 않아 일반목적용 기계 제조업과 특수목적용 기계 제조업의 특허활동이 매출액에 미치는 영향은 무차별하다는 것을 확인할 수 있었다.

2. 특허활동이 수익에 미치는 영향

〈표 5〉는 일반기계 제조업의 특허활동이 수익에 미치는 영향을 분석한 결과이다. 앞선 생산에 미치는 영향 분석에서와 같이 대부분의 추정계수가 99% 신뢰구간에서 통계적 유의성을 보였지만 모형 6-2와 모형 6-4에서 일부 변수들에게서 통계적 유의성이 없는 것으로 나타났다. 그리고 대부분의 추정계수의 크기가 앞선 생산에 미치는 영향 분석에서의 결과보다 작아졌는데 이는 영업이익의 크기가 매출액보다 작기 때문에 나타난 것이라 해석할 수 있다. 우리가 주목해야 하는 것은 모형 6에서 매출액뿐만 아니라 영업이익의 경우에도 일반기계 제조업의 특허활동이 통계적으로 유의한 정(+)의 효과(0.02, 0.03)를 갖는다는 점이다. 즉, 일반기계 제조업의 특허활동은 생산과 수익 모두 증대효과가 있다는 것으로, 특허활동을 확대해야 일반기계 제조업의 성장이 가능하다는 것을 보여주는 것이다.

또 하나 주목해야 하는 것은 연구개발비 증가에 따른 생산증대효과(0.03) 및 수익증대효과(0.02) 보다도 특허활동 증가에 따른 생산증대효과(0.06, 0.08) 및 수익증대효과(0.02, 0.03)가 크다는 점이다. 물론 연구개발비의 효과는 생산증대 및 수익증대 효과뿐만 아니라 고용증대를

견인할 수 있고 특허활동의 효과를 강화할 수도 있기 때문에 본 분석모형에 포착될 수 없는 것이 많겠지만 적어도 본 모형의 결과만을 놓고 봤을 때 특허활동의 중요도는 연구개발비의 중요도에 필적한다고 할 수 있다.

〈표 5〉의 모형 6-4의 결과는 특수목적용 기계 제조업에서 유효특허의 수익증대효과의 통계적 유의성이 확인되지 않는다는 점이다. 이는 〈표 4〉의 모형 6-4에서 유효특허의 생산증대효과가 통계적으로 유의한 정(+)의 효과가 확인된 것과 다른 것이다. 특수목적용 기계 제조업은 일반목적용 기계 제조업과는 달리 농업, 식품, 금속, 건설, 반도체, 로봇 등 산업의 스펙트럼이 다양해 어떤 하나의 산업적 특성으로 유효특허의 수익증대효과가 확인되지 않는다는 분석결과를 설명하기는 곤란하다. 분명한 것은 유효특허와 기업의 성과와의 관계는 개념적으로도 실증적으로도 상당히 유의한 상관관계가 있다고 알려져 있는데 특수목적용 기계 제조업에서 그것이 부정된다는 것은 추가적인 심층 분석이 필요해 보인다.

3. 타 산업과의 비교

일반기계 제조업의 특허출원 및 유효특허의 생산 및 수익 증대효과는 그리 크지 않은 것으로 확인되었는데 그 정도가 어느 정도인지 타 산업과의 비교가 필요하다. 김혁준·이성욱(2020)은 국내 제조업을 KSIC상 중분류, 소분류 단위까지 구분하여 기업의 유효특허가 매출액과 부가치에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과, 일반기계 제조기업의 유효특허 1% 증가는 매출액 증가에 0.03% 증가하는 것으로 나타나 본 연구의 분석 결과와 거의 유사하였다. 해당 분석에서 유효특허가 정(+)의 매출증대효과를 갖는 경우는 24개 분석대상 제조업 중 11개 뿐 이었는데 그 중 기계산업이 5개를 차지한 것은 상당히 의미심장하다. 즉, 기계산업의 성장에 특허가 다른 산업보다 더 강력한 동력원으로 작용한다고 해석할 수 있는데 그렇다면 왜 유독 기계산업에서 특허의 매출증대효과가 뚜렷이 관찰될까? 그 이유는 기계산업의 구조적 특징과 변화를 탐구한 박광순 외(2012)의 연구결과를 통해 유추할 수 있을 듯하다. 그들은 본 연구의 분석대상 시기인 2000년 이후부터 우리 기계산업은 국제경쟁력을 확보하여 주요 수출산업으로 변모하였고 2004년 이후 무역수지가 흑자로 전환되었으며 2010년 이후부터 기존 가격경쟁력 위주에서 기술기반의 제품경쟁력 확대 구조로 전환되고 있음을 강조하였다. 다시 말해 기술기반의 제품경쟁력이 특허를 통해 발현된다고 본다면 기계산업의 특허가 생산과 수익에 긍정적 영향을 미친다는 본 연구의 분석결과를 방증하는 것이라 생각된다.

〈표 4〉 분석 결과 (종속변수: SALE)

변수	모형 1	모형 2	모형 3	모형 4	모형 5	모형 6	모형 6-1 (중소)	모형 6-2 (대+중견)	모형 6-3 (C291)	모형 6-4 (C292)
CAP	0.88 (0.00)	0.83 (0.01)	0.83 (0.01)	0.83 (0.01)	0.82 (0.01)	0.85 (0.01)	0.89 (0.01)	0.99 (0.03)	0.83 (0.01)	0.86 (0.01)
LAB	0.10 (0.00)	0.09 (0.00)	0.09 (0.00)	0.09 (0.00)	0.09 (0.00)	0.08 (0.00)	0.09 (0.00)	0.19 (0.02)	0.10 (0.01)	0.07 (0.01)
RND		0.03 (0.00)	0.03 (0.00)	0.03 (0.00)	0.03 (0.00)	0.03 (0.00)	0.03 (0.00)	0.04 (0.01)	0.03 (0.00)	0.03 (0.00)
PAT_A			0.06 (0.01)		0.05 (0.01)	0.06 (0.01)	0.03 (0.01)	0.03 (0.03)	0.05 (0.01)	0.06 (0.01)
PAT_N				0.02 (0.01)	0.02 (0.01)	0.08 (0.01)	0.08 (0.01)	-0.02 (0.03)	0.09 (0.01)	0.07 (0.01)
Year dummy (2002~2018)						YES	YES	YES	YES	YES
_const	2.09 (0.07)	2.63 (0.07)	2.68 (0.07)	2.73 (0.08)	2.76 (0.08)	2.38 (0.08)	1.70 (0.07)	-0.59 (0.53)	2.53 (0.11)	2.26 (0.11)
Observation	84,576	84,563	84,563	84,563	84,563	84,563	81,985	2,578	41,301	43,262
Number of firms	9,232	9,232	9,232	9,232	9,232	9,232	9,056	176	4,262	4,970
R-squared	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.53	0.66	0.57	0.55
Hausman statistic	252.57	345.37	489.79	357.86	515.56	476.98	496.11	38.30	187.67	328.22

주 1. 굵은 글씨의 추정계수만 통계적 유의성이 없고, 그 외 모든 추정계수는 99% 신뢰구간(p -value < 0.01)에서 통계적 유의성이 확인

2. 괄호 안은 표준오차

〈표 5〉 분석 결과 (종속변수: PROF)

변수	모형 1	모형 2	모형 3	모형 4	모형 5	모형 6	모형 6 (중소)	모형 6 (대+중견)	모형 6 (C291)	모형 6 (C292)
CAP	0.76 (0.00)	0.72 (0.00)	0.72 (0.00)	0.70 (0.01)	0.70 (0.01)	0.74 (0.00)	0.68 (0.01)	0.80 (0.04)	0.74 (0.01)	0.69 (0.01)
LAB	0.05 (0.00)	0.05 (0.00)	0.05 (0.00)	0.05 (0.00)	0.05 (0.00)	0.05 (0.00)	0.04 (0.00)	0.04 (0.02)	0.06 (0.00)	0.04 (0.00)
RND		0.02 (0.00)	0.02 (0.00)	0.02 (0.00)	0.02 (0.00)	0.02 (0.00)	0.02 (0.00)	0.02 (0.01)	0.02 (0.00)	0.02 (0.00)
PAT_A			0.03 (0.01)		0.03 (0.01)	0.02 (0.01)	0.03 (0.01)	-0.02 (0.03)	0.02 (0.01)	0.02 (0.01)
PAT_N				0.05 (0.01)	0.04 (0.01)	0.03 (0.01)	0.04 (0.01)	-0.00 (0.03)	0.05 (0.01)	0.01 (0.01)
Year dummy (2002~2018)						YES	YES	YES	YES	YES
_const	1.24 (0.06)	1.64 (0.07)	1.67 (0.07)	1.86 (0.07)	1.88 (0.07)	1.18 (0.06)	2.11 (0.08)	0.93 (0.56)	1.22 (0.09)	1.94 (0.11)
Observation	72,355	72,345	72,345	72,345	72,345	72,345	70,168	2,177	35,728	36,617
Number of firms	8,731	8,731	8,731	8,731	8,731	8,731	8,559	172	4,027	4,704
R-squared	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.56	0.63	0.60	0.60
Hausman statistic	196.42	241.05	243.73	271.34	270.51	498.24	459.79	14.91	259.74	256.93

주 1. 굵은 글씨의 추정계수만 통계적 유의성이 없고, 그 외 모든 추정계수는 99% 신뢰구간(p-value < 0.01)에서 통계적 유의성이 확인

2. 괄호 안은 표준오차

4. 정책적 시사점

〈그림 2〉에서 보듯이 일반기계 제조업에서 특허출원 및 유효특허 모두 기업의 생산 및 수익에 정(+)의 효과를 갖는다는 사실을 통해 다음의 시사점을 도출할 수 있다.

첫째, 일반기계 제조업의 지속적 성장을 위해서는 생산 증대효과를 갖는 특허출원에 집중해야 한다는 점이다. 특허출원에 소홀할 경우 기술기회를 놓쳐 결국 시장에서 도태됨으로써 성장에 지장이 있을 수 있으므로 특허출원을 통해 기업의 성장 가능성을 지속적으로 확보해야 할 것이다. 특히 코로나 19 전후로 주춤해진 해외특허 확보 노력에 더욱 신경 써야 할 것으로 보인다. 실제로 일반기계 제조업의 2018년 PCT(Patent Cooperation Treaty, 특허협력조약) 국제출원건수는 6,400건이었는데 2019년 6,149건, 2020년 5,431건으로 계속 감소하였다(특허청, 2018, 2019, 2020). 세계 일반기계 수출시장에서 독일, 중국, 미국, 일본 등 주요 4개국과 경쟁하며 2018년 기준 세계 8위에 있는 우리나라의 상황과 맞지 않아 보인다.

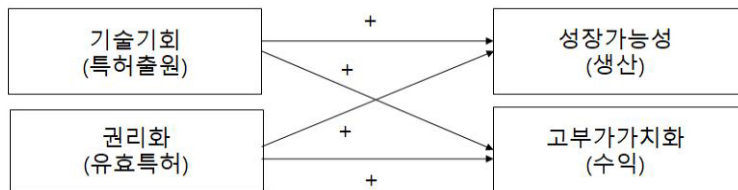
둘째, 특허등록이 아닌 특허출원 자체가 생산과 수익 증대효과를 갖는다는 것은 특허출원이 권리화를 위한 행정절차 이상의 의미를 지닌다고 해석할 수 있다. 즉, 특허출원은 지난한 R&D 과정에서 축적한 지식과 성과의 결정체로서 의미가 있으면서 동시에 미래의 성장 동력원일 수 있다. 따라서 정부의 기계산업 정책 수립이나 기업의 R&D 전략 수립 시 특허출원에 대한 모니터링을 더 강화하는 것이 바람직해 보인다. 기계산업의 디지털 융합을 촉진하기 위한 특허분석도 더 확대하는 것을 고려해야 할 것이다.

셋째, 기업과 산업의 고부가가치화를 위해 특허출원을 통한 권리화에 노력해야 한다는 점이다. 고부가가치화를 위해 특허권만 확보하면 끝이라는 의미는 아니지만 고부가가치화를 위한 충분조건이라는 점이 본 연구를 통해 확인됐기에 고부가가치화를 위해 특허권 확보에 소홀히 하면 곤란하다. 특히 일반기계 제조업은 자동차, 조선, 철강, 반도체 등 대부분의 제조업에 생산 설비를 공급하는 자본재산업으로 모든 산업의 핵심 기반이 되는 산업이다(산업통상자원부, 2021, p.82). 또한, 기계기술은 기술수명이 짧고, 개량발명이라 하더라도 구성의 추가, 구조의 변경 등이 대부분이다(강경남 외, 2015). 즉, 하나의 솔루션을 얻기 위해 다양한 기술이 적용될 수 있으며 회피 설계를 통해 쉽게 특허출원 할 수 있다는 의미이다. 따라서 기계산업에서는 최초 특허출원에 대한 수정 또는 보완보다는 신규출원을 많이 하고 방대한 포트폴리오를 구축하는 것이 비용은 많이 들지만 전략적으로 유용할 수 있다. 결국 일반기계 제조업에서는 산업과 기술의 속성상 넓은 범위의 기술 스펙트럼을 확보하는 것이 유리하기에 광범위한 특허포트폴리오 구축이 산업 고부가가치화의 열쇠가 될 수 있을 것이다.

넷째, 기계산업에서는 ‘제조 노하우’를 암묵지 형태로 운영하고 보호하는 경향이 강하기 때문에 특허로 지식을 자산화하는 경향이 약한 편이다(강경남 외, 2015). 따라서 비록 본 연구의 분석에 고려되지는 않았지만 특허에 체화되지 않은 노하우를 보유한 인력을 얼마나 확보해서 어떻게 활용할 것인가에 대한 고민이 필요하다. 특히, 일반기계 제조업에서는 숙련인력의 고령화가 빠르게 진행되고 있기 때문에 이들의 노하우를 어떻게 산업계 내부로 자산화할 것인지, 퇴직 이후에도 어떻게 효과적으로 이들을 활용할 것인지에 대한 대책이 필요해 보인다.

다섯째, 과거의 성장이 미래의 성장을 담보하지 않는다는 점을 고려하여 일반기계 제조업의 미래를 위한 산업 구조의 혁신을 준비하는 것이 필요하다. 일반기계 제조업의 혁신방향은 일본의 수출규제에 따른 우리 정부의 ‘소재, 부품, 장비’ 대응 과정에서 도출된 기술자립화, 공급망 다변화와 같은 대외 구조 혁신이 하나가 있고 수요업체, 완제품업체, 하청 및 부품업체가 분업관계를 형성하며 상호작용을 하는 방식에 의해 발생하는 문제를 해소하기 위한 대내 구조 혁신이 하나가 있을 수 있다. 전자는 정부의 대책으로 어느 정도 개선이 된 듯 보이지만 후자에 대한 대책은 아직 요원해 보인다. 김희태·권상집(2019)은 이에 대해 기초 및 기반 R&D 강화를 제안한다. 기존 정부 R&D 지원은 최종재화의 제작에 초점을 둔 응용·개발 R&D 중심이기에 중소기업이 주로 포진한 하청 및 부품업체의 경쟁력 강화로 연결되지 않는 문제가 존재한다는 것이다. 따라서 기초 및 기반 R&D를 강화하여 그 성과를 중소기업이 이용할 수 있게 하는 것은, 일반기계 제조업 전반의 혁신과 성장을 가져올 수 있기에 매우 적합한 제안으로 보인다.

[그림 2] 일반기계 제조업 특허활동 효과분석 결과



Ernst(1995)는 독일의 50개 기계산업 기업을 대상으로 군집분석을 실시하여 4개 군집을 도출한 후 각 군집별 특허활동 특성과 해당 특성 변수들과 경제적 성과와의 관계를 규명하였다. 그는 4개의 군집 중 “높은 특허 등록, 높은 유효 특허, 적극적 출원, 넓은 출원범위”를 특징으로 하는 기업 집단을 가장 “이상적인(ideal)” 군집으로 보고 해당 군집의 경우 경제적 성과와 모든 특허활동 지표가 통계적으로 유의한 상관관계를 가짐을 보였다. 본 연구의 분석대상으로 하고 있는 일반기계 제조업이 “이상적인” 산업이 되기 위해서는 기술간 융합을 목표로 한 활발한 특허활동이 강화되어야 할 것으로 보인다.

V. 결론

본 연구는 일반기계 제조업의 특허활동이 생산과 수익에 미치는 영향을 분석하기 위해 기업 재무정보와 특허정보를 결합한 패널데이터 분석하였다. 그 결과 특허출원변수와 유효특허변수 모두 기업의 매출액과 영업이익 증대에 정(+)의 영향을 미치는 것을 확인하였다. 이는 일반기계 제조업의 성장 가능성과 고부가가치화를 위해 특허가 효율적 도구임을 확인하는 것이다. 다만, 그 효율성의 정도가 타 기계업종 대비 일반기계 제조업은 낮은 편이기에 정부는 특허출원, 특허 등록, 특허갱신 등 일련의 특허활동을 적극적으로 지원하고, 기업은 일반기계 제조업의 특성상 특허활동의 범위를 특정 기술에 집중하기 보다는 기술간 융복합에 대비해 되도록 넓은 범위의 특허활동에 나서는 것이 바람직해 보인다.

본 연구의 한계는 다음과 같다. 첫째, 특허 품질의 효과를 고려하지 못했다. 특허마다 부가가치 창출 가능성이 다르고, 특허의 양이 특허가 가진 경제효과를 대변하는 것이 아닌데 본 연구는 특허품질을 산출하는데 필요한 해외특허정보, 특허인용정보 등에 대한 접근과 핸들링의 어려움으로 특허품질 변수를 활용하지 못했다. 둘째, 산업적 특성을 반영한 변수를 모형에 포함시키지 못했다. 예를 들어, 산업의 시장집중도, 기술융합도, 시장참여기업 수 등 산업 고유의 특성을 반영하는 변수들을 모형에 포함시킨다면 더 정교한 분석이 될 수 있었을 텐데, 역시 데이터 접근성 문제로 해당 변수들이 모형에 반영되지 못했다. 셋째, 분석모형에 설명변수들의 생산 및 수익에 대한 시차적 영향이 고려되지 못했다. 즉, 보통 연구개발과 특허의 경제효과 발생은 시차를 두고 발생하는 게 일반적 인식이지만 본 연구에서는 모형의 단순화(parsimoniousness)를 위해 시차를 고려하지 않았다.

이상의 한계에도 불구하고 본 연구는 다음과 같이 기여한다. 첫째, 본 연구는 산업적 중요성은 크지만, 그동안 어떤 연구에서도 주목하지 않았던 일반기계 제조업의 특허활동 필요성을 제시한다. 산업의 명칭에서 보여주듯이 어떤 하나의 특성으로 설명하기 힘든 일반기계 제조업의 특허활동의 경제효과를 규명함으로써 정부의 일반기계 제조업 특허활동 지원의 근거를 제시한다. 둘째, 일반기계 제조업의 성장과 고부가가치화의 도구로서 특허활동이 유의미함을 보여준다. 일반기계 제조업은 설비와 장치 공급 중심의 산업 특성상 공정혁신 비율이 타 산업대비 높은 편이고 그로 인해 영업비밀에 의한 기술보호가 타 산업대비 선호될 수 있다는 것이 일반적 인식인데 본 연구를 통해 특허도 유용한 전유(appropriability) 수단임이 확인되었다.

참고문헌

- 강경남, 임소진, 최서희, 김규환, 이민정 (2015) “지식재산과 경영전략-기업의 IP전략에 따른 생존 및 성과 분석”, 한국지식재산연구원 기초연구.
- 곽기호, 박주형 (2009) “산업연관분석을 활용한 기계산업의 경제적 파급효과 분석”, *산업경제연구* 22(1), 179-199.
- 고영희, 이미현 (2013) “기업의 보유 특허 특성과 경제적 활용 가능성에 대한 연구: 의료화학산업 특허를 중심으로”, *지식경영연구* 14(1), 39-55.
- 김도성, 이정수, 조성한, 김민석, 김남현 (2018) “국내 의료가기 제조기업의 연구개발활동과 특허가 기업 경영 성과에 미치는 영향에 관한 연구”, *한국산학기술학회논문지* 19(11), 157-165.
- 김진우 (2019) “기술의 혁신경쟁력과 산업 성과: 고인용 특허 경쟁력과 한, 중, 미, 일의 소재 산업 성과 비교”, Clarivate Analytics Korea, August.
- 김혁준, 이성욱(2020) “특허권 보유의 산업별 경제효과 분석”, 한국지식재산연구원 기초연구.
- 김희태, 권상집 (2019) “국내 기계 산업의 지속 성장을 위한 구조 진단과 혁신 정책”, *과학기술정책* 2(1), 107-131.
- 봉강호, 박준영, 박재민 (2018) “기계산업의 제품혁신 성과 및 결정요인에 관한 연구”, *한국산학기술학회논문지* 19(9), 427-434
- 박광순, 이진면, 진혜진 (2012), “기계산업의 국제경쟁력 분석과 전략적 발전방안”, 산업연구원 연구보고서 2012-645.
- 박명준, 박선효, 정만태, 정준호, 조현민 (2020) “기계산업 인적경쟁력 강화방안 연구(I): 총론 편”, 한국노동연구원 정책연구 2020-22.
- 산업통상자원부 (2014) “창조경제 구현을 위한 제조업 혁신 3.0 전략”. 2022년 5월 30일 접속, http://www.motie.go.kr/motie/py/brf/motiebriefing/motiebriefing11.do?brf_code_v=11#header.
- 산업통상자원부 (2021) “2019-2020 산업통상자원백서: 산업편”.
- 송준엽, 곽기호 (2012) “기계산업 ICT 융합과 부가가치 유발효과”, *경제저널* 52(11), 37-42.
- 안연식 (2010) “기업의 특허 역량이 성과에 미치는 영향에 관한 실증 분석: 우수 벤처기업을 중심으로”, *지식경영연구* 11(1), 83-96.
- 연태훈 (2004) “특허의 가치에 대한 시장의 평가”, *KDI 정책연구* 26(2), 65-104.
- 이공래 (1994) “기계산업의 기술혁신패턴”, *과학기술정책* 4(6), 4-19.
- 이기환, 윤병섭 (2006) “특허활동이 경영성과에 미치는 영향: 벤처기업 대 일반기업”, *기술혁신연구* 14(1), 67-99.
- 이성상 (2007) “기계산업의 지식재산 활동과 R&D 생산성”, *지식재산연구*, 2(1), 95-105.
- 정두희, 이경표, 신재호 (2019) “지식재산기반 창업의 효과 및 시사점: 주요 창업성과에 대한 특허기반 창업의 영향”, *벤처창업연구* 14(3), 1-11.

- 정석화, 신호균 (2017) “중소기업의 유효특허가 경영성과에 미치는 영향에 관한 연구”, *한국창업학회지* 12(1), 258-282.
- 정석화, 신호균 (2018) “제조기술기반 중소기업의 유효특허권리화 활동이 신기술 및 신제품 성과에 미치는 영향에 관한 연구”, *한국창업학회지* 13(2), 243-265.
- 중소벤처기업부, 중소기업기술정보진흥원 (2021) “중소기업 전략기술로드맵 2021-2023: 일반기계”.
- 통계청 (2022) “일반기계산업 동향”, e나라지표, 2022년 1월 17일 수정, 2022년 5월 30일 접속, https://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1154.
- 특허청 (2019) “2018 지식재산 통계 연보”.
- 특허청 (2020) “2019 지식재산 통계 연보”.
- 특허청 (2021) “2020 지식재산 통계 연보”.
- 한국기계산업진흥회 (2022) “기계산업의 특성 및 분류”, 한국기계산업진흥회 홈페이지, n.d., 2022년 5월 30일 접속, <https://www.koami.or.kr/cyber/viewSpecification.do>.
- Arora, A., Ceccagnoli, M., Cohen, W. M. (2008) “R&D and the Patent Premium”, *International Journal of Industrial Organization* 26, 1153-1179.
- Ben-Zion, U. (1984) “The R&D and investment decision and its relationship to the firm's market value: Some preliminary results,” in Zvi Griliches(ed.), R&D, patents, and productivity, Chicago: University of Chicago Press, 299-312.
- Connolly, R., Hirschey, M. (1988) “Market value and patents: A Bayesian approach”, *Economic Letters* 27(1), 83-87.
- European Patent Office, European Union Intellectual Property Office (2021), Intellectual property rights and firm performance in the European Union, Firm-level Analysis Report.
- Ernst, H. (1995) “Patenting strategies in the German mechanical engineering industry and their relationship to company performance”, *Technovation* 15(4), 225-240.
- Farre-Mensa, J., Hegde, D., Ljungqvist, A. (2020) “What is a patent worth? Evidence from the U.S. patent ‘lottery’”, *Journal of Finance* 75(2), 639-682.
- Frietsch, R. Neuhäusler, P. Jung, T., Van Looy, B. (2014) “Patent indicators for macroeconomic growth—the value of patents estimated by export volume”, *Technovation* 34, 546-558.
- Griliches, Z. (1981) “Market value, R&D, and patents”, *Economics Letters* 7(2), 183-187.
- Jensen, P. H., Thomson, R., Yong, J. (2011) “Estimating the patent premium: Evidence from the Australian inventor survey”, *Strategic Management Journal* 32(10), 1128-1138.
- Megna, P., Klock, M. (1993) “The impact of intangible capital on Tobin's q in the semiconductor industry”, *American Economic Review* 83(2), 265-269.
- Romer, P. (1986) “Increasing returns and long-run growth”, *Journal of Political Economy* 94(5), 1002-1037.
- Romer, P. (1990) “Endogenous technological change”, *Journal of Political Economy* 98(5) Part 2, S71-S102.

The Effects of Patent Activities on Production and Profit

– Focused on General Machinery Manufacturing –

Hyukjoon Kim

– Abstract –

This paper analyzes the effect of patent activities in the general machinery manufacturing industry in Korea on production and profit. For the purpose, panel data are constructed by combining financial information and patent information of 9,312 general machinery manufacturing firms from 2001 to 2018, and the impact of patent applications and effective patents on sales and operating profit of companies is analyzed. As a result, it was found that both patent applications and effective patents in the general machinery manufacturing industry have the effect of increasing sales and operating profit. This shows that patents are a useful tool for the growth and high value-added of the general machinery manufacturing industry. Given the characteristics of the general machinery manufacturing industry, which supplies production facilities to most manufacturing industries such as automobiles, shipbuilding, steel, and semiconductors, and most of the technologies are added to existing technologies, it is expected to become Ernst (1995)'s "ideal" industry if a wide range of patent portfolio is established. This paper has policy and academic significance in that it presents the necessity and direction of patent activities in the general machinery manufacturing industry, which have not been noted in any previous studies.

Key words Patent application, Effective patent, Production, Profit, General machinery manufacturing

| 논문 |

과학기술 출연연구기관 연구개발(R&D) 전략 수립 지원을 위한 정보 분석 프레임워크에 대한 연구

수소분야의 기계관련 R&D를 중심으로

이도연

한국과학기술정보연구원 선임연구원

박기주

한양대학교 겸임교수, 법학박사

김근환

한국과학기술정보연구원 책임연구원, UST-KISTI 겸임부교수

TECHNOLOGY POLICY
MECHANICAL ENGINEERING

과학기술 출연연구기관 연구개발(R&D) 전략 수립 지원을 위한 정보 분석 프레임워크에 대한 연구*

- 수소분야의 기계관련 R&D를 중심으로 -

이도연**, 박기주***, 김근환****

- 초 록 -

본 연구에서는 탄소중립 사회구현을 위한 수소 분야의 기계 관련 국가 R&D 전략 수립에 필요한 중점 연구영역(분류체계)과 분야별 연구·개발 지원현황 정보를 국가출연연구기관의 연구기획과 협동연구를 추진하는 연구개발전략위원회 등을 포함하는 이해관계자들 에게 제공하기 위해 데이터 기반의 정보분석 프레임워크를 제안하였다. 기존 빅데이터와 인공지능 기법을 활용한 정책연구는 개념적 연구에 국한된 한계점이 있었는데, 본 연구를 통해 실증적으로 데이터를 기반으로 수소 영역의 기계 분야 연구·개발 전략에 필요한 정보를 제공하는 것을 구현하였다. 수소 관련 국가 R&D 과제 955건(2015~2020년)을 대상으로 기계학습기법을 적용한 ASJC 분류모델을 적용하여, 총 9개의 클러스터를 분류하였다. 수소경제 가치사슬 기반으로 국가 연구·개발 투자현황 및 기계 분야의 수행 주제별로 현황을 분석하였다. 실무적으로 국가연구개발의 연구기획 방법에서 기존의 정성분석을 통해 도출되는 연구영역과 비교해 볼 때, 대규모의 데이터를 기반으로 한 과학적인 방법론을 통해 보다 더 객관적이고 재현성이 높은 데이터 제공이 가능하다는 장점이 있다. 따라서 이해관계자들간 객관적이고 합리적인 의사결정을 지원할 수 있는 정보의 생산이라는 필수조건을 갖추게 되었다.

주 제 어 수소경제, 기계, 국가 R&D 과제, 정부출연연구기관, 정보분석 프레임워크

논문접수일 2022년 4월 30일 수정논문 제출일 1차: 2022년 6월 8일 2차: 2022년 6월 17일 게재확정일 2022년 6월 23일

* 본 논문은 Research and Development Investment and Collaboration Framework for the Hydrogen Economy in South Korea. Sustainability. 2021의 내용을 수정 보완한 것임.

** 한국과학기술정보연구원 데이터분석본부 RnD투자전략연구센터 선임연구원, dylee@kisti.re.kr

**** 한양대학교 공공정책대학원 겸임교수, 법학박사, pkj6756@hanmail.net

***** 한국과학기술정보연구원 데이터분석본부 RnD투자전략연구센터 책임연구원; UST-KISTI HPC 과학, 겸임부교수, khkim75@kisti.re.kr(교신저자)

I. 서론

폭염, 폭설 등 이상기후 현상에 대한 위기가 현실화되면서 국제사회는 기후변화 문제의 심각성에 대응하기 위해 “2050 탄소중립”이라는 지향점을 제시하고 유럽, 중국, 일본, 미국 등 많은 국가들이 참여하고 있다(기획재정부, 2020). 이에 정부는 『2050 탄소중립(20.12.7)』 추진전략을 발표하고 R&D 확충 등의 방향성을 제시하였고, 『탄소중립 기술혁신 추진전략(21.3.31)』에서는 탄소중립 10대 핵심기술에 대한 2050년까지의 목표와 확보전략 제시하였다(범부처, 2021). 특히 탄소중립의 핵심 기술로 전주기에 걸친 수소 기술 확보를 목표로 하고 있다. 이러한 목표를 달성하기 위해 기초/원천 기술분야의 연구개발(Research and Development, 이하 R&D) 역량을 강화하고 민간과의 협력을 촉진할 수 있는 국가 R&D 사업을 위한 정책적 기반을 마련하였다. 과학기술분야 정부출연연구기관(이하 출연(연))의 역할이 경제성장에 필요한 과학기술 경쟁력 확보에서 국가적 난제 관련 기초기술 연구(예, 탄소중립), 미래수요기반 원천기술 개발(예, 우주항공 등 고위험 영역 등), 기업 협력 및 R&D 지원(예, 기술이전 등)으로 출연(연)의 역할과 임무(Role & Responsibility)가 확대되고 있다. 국가 출연(연) 연구기획 및 협동연구 추진을 위한 자문기구인 연구개발전략위원회(이하, 전략위)가 과기정출연법 개정안 국회 본회의 통과(20.12.2.)하면서 국가과학기술연구회(National Research Council of Science & Technology, 이하 NST)는 조직 고유의 역할과 임무를 갖게 되었다(과기출연기관법, 2020). 따라서 국가적 난제에 대응하기 위한 과학기술 정책 이해관계자들은 탄소중립이라는 대전환 시대에 능동적으로 대응하기 위한 체계적인 국가 R&D 전략 수립을 위한 의사결정을 지원할 수 있는 정보 분석 프레임워크가 요구되고 있다.

세계적으로 빅데이터와 인공지능 기술을 적용한 정책 수립에 대한 접근이 시도되고 있는 상황이다. 기존의 전문가 중심의 전략기획방법의 한계점을 보완할 수 있는 증거를 기반으로 정책의 정당성(Legitimacy)을 제고하려는 노력을 경주하고 있다(이도연·김근환, 2021). 최근 국내에서도 증거를 기반으로 정책을 수립하려는 시도가 정부 및 공공기관을 중심으로 발생하고 있다. 특히, 국가 R&D 전략분야에서 관련성이 높은 국가R&D과제 정보를 바탕으로 고령화, 바이러스, 미래차 등 국가 현안에 대한 국가 R&D 정책의 방향성에 대한 논의를 제시하는 연구가 시도되고 있는 상황이다. 본 연구에서는 탄소중립의 핵심수단인 수소 영역을 대상으로 기계분야의 연구수행 주체를 중심으로 연구 현황에 대한 분석 프레임워크를 제시하여, 관련 이해관계자들이 증거기반 R&D 전략을 수립하는데 필요한 정보 분석 체계를 마련하고자 하였다. 전체적인 연구

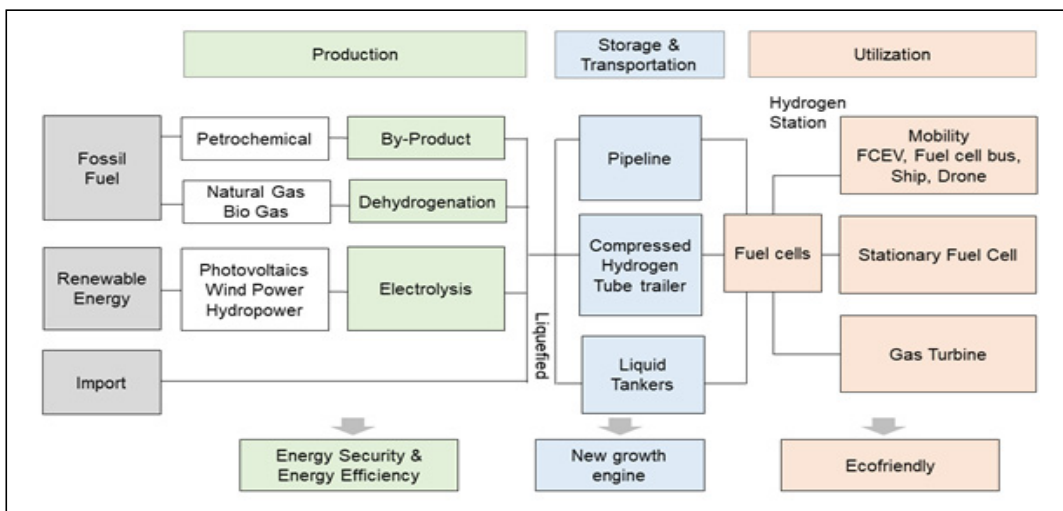
의 구성은 제2장에서는 연구의 배경과 선행연구를 통해 연구 질문(Research questions)을 도출하고, 제3장에서는 연구데이터(수소 관련 국가 R&D과제) 및 분석방법에 대해 설명하였다. 제4장에서는 수소 관련 R&D영역별 연구수행 현황에 대해 다각적인 측면에서 분석한 결과를 제시하였다. 마지막으로 제5장 결론에서는 본 연구가 학술적, 실무적으로 기여하는 부분에 대해 기술하였다.

II. 연구의 배경 및 선행연구

1. 수소경제의 가치사슬

정부는 재생에너지 보급 확대와 함께 수소 경제의 전환을 통해 탄소중립 사회 탄소중립의 사회로 가는 목표를 수립하였다(과학기술정보통신부, 2021). 즉, 수소를 주 에너지원으로 하는 경제산업 구조인 수소경제의 구현이 국가의 주요 투자 분야인 것이다. 수소 경제는 공급측면에서 수소의 깨끗하고 효율적인 생산 및 저장, 수요 측면에서 수소 가치 사슬(value chain) 전반에 걸쳐 생성된 에너지의 상업적 활용에 의존하고 있다(Cheon and Kim, 2020). [그림 1]은 수소 경제의 가치 사슬인 생산(production) - 저장 및 운송(storage & transportation) - 이용(utilization)을 보여주고 있다(DOE, 2020).

[그림 1] 수소경제의 가치사슬



자료: Lee and Kim, 2021

상기 수소 경제 개념은 많은 학자들에 의해 채택되어 왔다(Cheon and Kim, 2020; Kasi et al., 2020; DOE, 2020). 우선 수소 생산을 위한 다양한 형태의 수소 생산 기술들이 개발되고 있다. 여기에는 탄소 포집, 활용 및 저장(CCUS)을 통해 화석 자원을 활용하는 기술, 바이오매스 및 폐수 자원에서 수소를 추출하는 기술, 물을 분해하는 기술이 존재한다. 수소의 낮은 에너지 밀도로 인해 일반적으로 물리적 프로세스를 통해 기체 또는 극저온 액체로 저장된다. 또한 화학 물질과 결합되는 물질 기반 프로세스를 통해 저장할 수 있다. 수소가 가치가 있으려면 수소의 에너지 함량이 전기나 열과 같은 다른 형태로 변환되어야 하는데, 이 변환은 연료전지(Fuel Cell: FC)를 사용하는 전기화학적 공정을 통해 달성될 수 있다. FC는 천연 또는 합성 가스 및 수소와 같은 연료의 화학 에너지를 사용하여 전기 및 열 에너지를 생산한다. FC는 다양한 유형의 연료와 공급원료(feedstocks)를 사용할 수 있기 때문에, 운송, 발전, 산업 및 제조 부문과 같은 다양한 부문에서 전력원의 역할을 담당할 수 있다(DOE, 2020). 따라서 수소관련 국가 R&D 전략을 수립하기 위해서는 수소경제의 가치사슬 영역으로 분류하여 분석해야 하는 접근법에 대한 당위성을 확인 할 수 있었다.

2. 국가과학기술연구회 연구개발전략위원회

국가 R&D 전략을 수행하는 주요 주체로 출연(연)의 역할과 임무가 상당한 비중을 차지하고 있다. 25개 출연(연)의 중심역할을 수행하는 연구회에는 연구기획 및 협동연구 추진을 위한 자문기구로서 연구개발전략위원회(이하, 전략위)가 존재하고 있다. 과기출연기관법 개정안이 국회 본회('20.12.2.)를 통과하고, 「과기출연기관법」개정('20.12.22)에 따라 출연(연)의 범기관 및 민간과의 협력 연구 환경을 주도하는 역할과 기능을 수행하기 위해 연구회는 전략위 설립을 위한 제도적 기반 및 운영 방안을 마련하고 있다(과기출연기관법, 2020).

실무적으로 전략위의 운영 방향은 전문가 중심의 위원회를 중심으로 이들의 의견을 듣고 수용하는 수동적인 형태를 제시하고 있다. 하지만 전문가들의 전문성을 인정하더라도 이들이 급변하는 모든 과학기술 R&D 과제에 정통한 것은 아니므로 연구기획에 있어 의사결정 과정에서 편향성(bias)이 나타나는 한계를 많은 연구에서 지적하고 있다(Grossmann, 2012; 이도연·김근환, 2021). 따라서 전문가의 전문성과 함께 유용한 정보를 기반으로 정책참여자들 간 상호 이해관계의 차이를 합리적으로 해결할 수 있는 방안을 마련하는 것이 전략위의 역할과 기능을 효율적으로 수행하기 위한 선제조건일 것이다.

3. 증거기반 연구개발 전략기획에 대한 문헌연구

국가 R&D 전략기획은 경제적 사회적 차원에서 특정 분야가 제공할 수 있는 혜택을 극대화하기 위한 목표를 설정하고, 목표를 달성하기 위해 이해관계자간 협의를 통해 구체적인 방법과 절차를 수립하는 연속적인 과정이다(이도연, 김근환, 2021). 목표를 극대화하기 위해 이해관계자들은 유용한 정보를 확보하여 의사결정의 불확실성을 낮추려고 한다(Bordia et al., 2004). 이를 위해 연관 데이터를 기반으로 통계 등 다양한 정보의 생성을 필요조건으로 하고 있다.

국가 R&D의 연구기획방법으로 기술로드맵(Technology Roadmap, TRM)이 정부부문에 서 핵심적인 연구기획기법으로 사용되고 있다(중소벤처기업부, 2017; 한국보건산업진흥원, 2017). 이미 수소경제 선도국가로 도약하기 위한 「수소경제 활성화 로드맵(2019.1.16.)」에서도 제시된 바 있으며, 일반적인 도출 과정은 아래와 같다.

(1단계) R&D 영역 도출 → (2단계) R&D 영역별 현황분석 → (3단계) R&D 영역별 주요 R&D 영역도출 → (4단계) 주요 R&D 영역별 중점 연구분야 도출 → (5단계) 전략적 R&D 영역별 실행방법 수립 및 로드맵 도출

본 연구는 전체과정의 가장 기본단계인 (1단계)와 (2단계)에 초점을 맞추고 있다. 이렇게 수립된 전략을 바탕으로 국가의 관련 부처에서는 목표를 달성하기 위한 예산을 배정하게 된다. 출연(연)을 포함한 R&D수행주체인 대학 및 기업들은 수소와 같은 국가 전략 기술개발에 배정된 국가 R&D 예산을 통해 연구비를 지원받거나 경쟁수주를 통해 확보하게 된다. 이때 국가 R&D과제를 수행하면서 R&D과제 관련 데이터를 생성하게 되는데, 여기에는 해당 기술분야에 투자한 정부 R&D 규모, 수행주체, 연구내용 및 목표, 과제 책임자, 담당부처 등 국가 R&D 투자전략에 필요한 정보를 담게 된다(Lee and Kim, 2021a). 이것은 기존의 특허 및 논문정보가 아닌 R&D 과제 정보를 기반으로 분석을 수행하게 되면, 시기적으로 R&D완료 후 진행되는 논문 및 특허보다 시기적으로 가장 최신성을 갖게 될 뿐만 아니라, 무엇보다도 투자 규모를 추정할 수 있는 정보를 확보할 수 있는 장점을 갖게 된다(Lee and Kim, 2021a).

최근 많은 증거기반 R&D 전략기획에 관련된 연구들은 빅데이터와 인공지능 기법을 통한 정책의사결정의 효율성을 제고하는 필요성을 강조하는 규범적 주장이 주를 이루고 있다. 오철오(2015)은 증거기반의 정책 의사결정에 대한 학술적 관심은 높아지고 있지만, 실질적으로 정책에 활용할 수 있는 정보를 추출하는 실증적 연구가 부족하다는 것을 지적하고 있다. 따라서 정보를

활용한 정책의사결정에 관한 실증연구를 통해 정보 활용을 제고할 수 있는 원인을 파악하는 연구가 필요하다고 주장하였다. 서형준(2019)은 전자정부의 도입과 공공부문의 데이터 활용 기조로 인해 공공부문의 인공지능 정책의사결정에 대한 기반이 마련된 것을 중요한 시사점으로 제시하였다. 그러면서도 보다 심도 있는 정책적 함의를 제시할 수 있는 인공지능에 대한 실증 연구의 필요성을 강조하였다. Höchtl, Parycek, Schöllhammer(2016)는 기존의 정책 과정(policy cycle)과 다르게 데이터의 수집과 분석을 통해 정책 단계마다 정책에 필요한 정보를 정책입안자들이 활용할 수 있기 때문에 보다 효율적인 정책을 수립-수행-평가 할 수 있는 개념적 프레임워크를 제시하였다. Giest (2017)의 연구도 이전 연구와 유사하게 데이터기반 정책결정 프레임워크를 제시하였고, 실질적으로 이러한 접근법을 활용하기 위해서는 정부 스스로 데이터를 활용하여 정책을 수립하는 문화를 만들어야 하고, 정책의 목표를 달성할 수 있도록 다양한 정보를 사용해야 하고, 어떤 형태의 서비스를 제공할 수 있도록 의지가 있어야 한다고 하였다. Pencheva, Esteve, Mikhaylov(2020)는 빅데이터와 인공지능 기법이 정책 과정에서 정확성(accuracy), 속도(speed), 협력(collaboration), 정당성(legitimacy), 신뢰(trust)와 같은 효과가 정책 수립과정에서, 비용절감(cost saving), 생산성 향상(productivity gains), 더 나은 서비스와 의사결정(better service and decision-making)와 같은 효과가 정책 실행과정에서, 마지막으로 향상된 분석(improved policy analysis), 연속적이고 실시간 평가(continuous, real-time evaluation)와 같은 효과가 정책평가과정에서 발생할 수 있다고 문헌 연구를 통해 개념화하였다. Suominen and Hajikhani (2021)은 계량분석을 통해 정책결정을 위한 빅데이터 분석에 관한 연구영역을 분류하였고, 가장 많은 연구가 진행된 영역은 앞서 살펴본 바와 같이 빅데이터가 정책과정에 미치는 영향력에 대한 개념적 연구 분야이고, 그렇기 때문에 실증연구에 대한 필요성을 공통적으로 요청하고 있다는 것을 확인하였다.

이러한 학계의 요청에 최근 주요 국가현안인 COVID-19, 감염병, 바이러스, 고령화, 맞춤형 의료, 미래차 등을 대상으로 빅데이터와 인공지능 기법을 활용한 국가 R&D 전략수립을 위한 정보 분석 프레임워크에 대한 실증연구가 진행되고 있었다(Lee, Heo, Kim, 2020, Lee, Kang, Kim, 2020, Lee, Kim, Kim, 2020, Lee and Kim, 2021a, 2021b). 게다가 이러한 정보 분석 프레임워크가 국가R&D전략기획을 수립단계에서 이해관계자들간 관점의 차이를 줄일 수 있도록 협의를 유도하는 긍정적인 효과가 있는 것을 확인되기도 하였다(이도연·김근환, 2021). 지금까지의 문헌 연구를 통해, 국가 R&D과제 데이터와 인공지능 기법을 활용하여 수소 경제의 기계분야에 초점을 맞춘 실증연구가 부족한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 기존 선행연구

구의 한계점을 극복하기 위해 다음과 같은 연구 질문(Research Question, RQ)을 설정하였다.

RQ 1: 국가R&D과제 데이터와 인공지능기법을 활용한 수소경제관련 R&D 연구영역은 어떠한가?

RQ 2: 국가R&D과제 데이터와 인공지능기법을 활용하여 도출한 수소경제관련 R&D 연구 영역별 R&D 현황은 어떠한가?

RQ 3: 국가R&D과제 데이터와 인공지능기법을 활용하여 도출한 수소경제관련 R&D 연구 영역별 기계분야의 R&D 현황은 어떠한가?

Ⅲ. 연구 방법

1. 연구데이터 수집

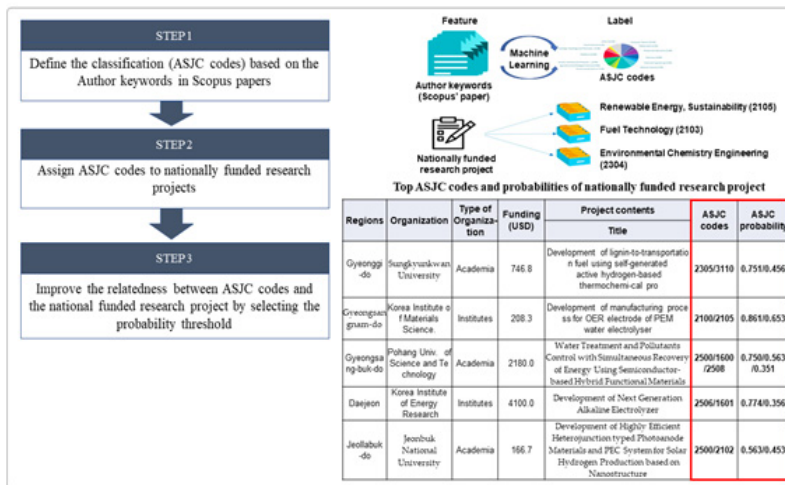
본 연구는 Lee and Kim (2021)의 연구에서 활용한 수소경제관련 국가R&D과제 데이터와 방법론을 활용하였으나, 분석의 초점을 기계분야에 맞추었다. 수소경제관련 국가 R&D데이터는 NTIS의 데이터베이스를 기반으로 ASJC 분류모델을 적용하기 위해 국가 R&D과제의 요약문 (abstract)을 한글에서 영문으로 변환한 데이터 필드가 추가된 데이터베이스를 구축하였고, 아래 검색식 형태로 데이터를 추출할 수 있는 검색엔진을 내부적으로 개발하였다. 아래 검색식을 작성하여 수집된 데이터셋에서 2015년부터 2020년 기간에 해당하는 데이터를 추출하였다. 추출된 모든 데이터를 대상으로 기계분야 전문가들과 수소경제와 관련 없는 연구개발과제를 제거하는 전처리과정을 수행하였다. 본 연구에서 초점을 맞추고 있는 기계분야에 대한 분석을 수행하기 위해 과제별 고유번호를 킷값으로 과학기술표준분류의 대분류 필드를 추가하였다. 즉, 연구개발 과제 데이터에서 중복 및 노이즈를 제거한 최종 유효건수는 955건이며, <표 1>에 정리하였다.

〈표 1〉 국가 R&D과제 데이터셋 개요

수집 DB	국가과학기술지식정보서비스(NTIS)
검색식	((("grey" OR "blue" OR "green" OR "solid fuel" OR "pyrolysis" OR "syngas" OR "methane" OR "natural gas") OR (steam OR plasma OR gasification) OR ("CCS" OR "carbon dioxide")) OR ((artificial photosynthesis" OR "artificial photosynthesis" OR "anaerobic digestion") OR (photocatalyst OR photofermentative OR nuclear)) OR ((water electrolysis" OR "PEM" OR "MEA") OR (alkaline OR membrane OR electrode OR biogas)) AND ("hydrogen" OR "h2")) OR (((port logistic" OR "liquid tank" OR "carbon monoxide") OR (cryogenic OR deoxidate) OR (turbine AND ("natural gas" OR CNG))) OR (((refuel OR refueling) AND charging AND station) OR (cryogenic OR deoxidate) OR (liquefaction AND (cycle OR plant))) AND ("hydrogen" OR "h2"))
수집기간	2015년 ~ 2020년
수집 건수	1939건
최종 유효 건수	955건

수소경제관련 R&D과제를 군집화하기 위해 334개의 분류체계로 구성된 SCOPUS의 All Science Journal Classification (ASJC) 코드를 활용한 모델을 활용하였다. 각 ASJC별로 최근 1만개의 저자 키워드(Author keywords)를 피쳐(feature)로, ASJC 코드의 필드명(예, 1311: Genetic 등)을 라벨(labels)로 기계학습(Machine learning) 기법을 적용하여 ASJC 분류 모델을 구축하였다. 국가 R&D과제들을 군집화 하는데 노이즈를 줄이기 위해 수소경제관련 국가 R&D과제 데이터 955건에 대해 국가 R&D과제별로 3개의 ASJC코드(Label)를 할당하게 하였다(Lee and Kim, 2021 참고). 전체적인 데이터 구축과정은 [그림 2]에 나타내었다.

[그림 2] 국가 R&D 과제에 ASJC 코드 부여 과정



자료: Lee and Kim, 2021

2. 수소경제 관련 데이터 분석

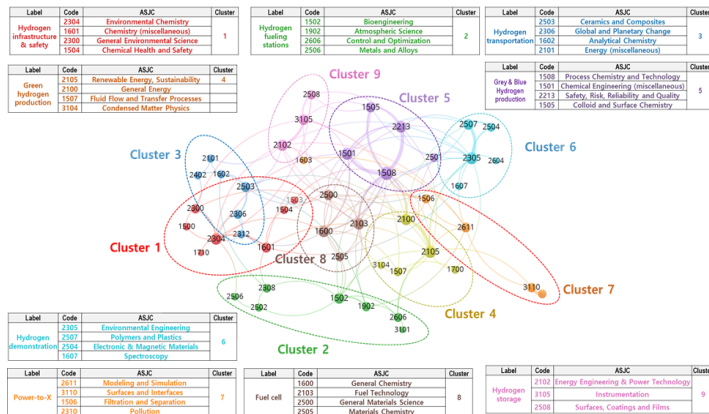
수소경제관련 국가 R&D 과제의 연구 영역을 파악하기 위해 과제별로 부여된 ASJC 코드 간의 동시발생 매트릭스(Co-occurrence matrix)를 Vantage Point®(Search Tech, Inc., U.S.)소프트웨어를 활용하여 구현하였고, 도출된 결과를 기반으로 VOSViewer (Leiden University, the Netherlands)를 활용하여 클러스터링 및 시각화를 수행하였다. 클러스터링의 수는 해상도 매개변수($\gamma > 0$)에 의해 결정되는데, 매개변수 값이 높을수록 생성되는 클러스터의 수가 많아진다. 본 연구에서는 클러스터 수의 범위는 1($\gamma = 0.1$)에서 9($\gamma = 0.9$)였다. 수소관련 전문가들과 개별 클러스터의 항목(즉, ASJC 코드)의 수와 조합, II.1 수소경제의 가치사슬의 문헌연구를 고려하여 최종적으로 9개의 클러스터를 결정하였다.

IV. 연구 결과

1. 수소경제 관련 R&D 영역의 군집화

Scopus 학술저널의 과학분류체계(All Science Journal Classification, ASJC) 코드 동시 발생 매트릭스에 의한 클러스터링을 시각화한 분석결과는 [그림 3]에 나타내었다. 동일 클러스터에 속한 ASJC 코드(노드, node)는 동일한 색을 갖게 되며, 노드의 크기는 ASJC 코드의 빈도수를 의미한다. 수소경제관련 R&D 영역은 총 9개의 클러스터(Cluster)로 구성되는 것으로 나타났다. 각 클러스터에 속한 R&D과제의 제목(Title), 내용(abstract) 및 워드클라우드(Word Cloud) 분석결과를 종합적으로 검토하여 최종적으로 클러스터를 정의하고 명명하였다.

[그림 3] 수소경제 관련 9개 연구영역



2. 수소경제 관련 9개 R&D 연구영역

앞서 분석결과 수소경제와 관련된 연구 분야를 9개의 클러스터로 구분하고 앞서 살펴본 수소 경제를 구성하는 가치 사슬(생산-저장/운송-활용)분야를 적절하게 대표할 수 있게 배정하였다. 클러스터명은 프로젝트의 제목과 개요, 대표 연구 분야 및 관련 키워드를 고려하여 각 연구영역을 다음과 같이 명명하였다.

- 클러스터 1. 수소 기반 시설 및 안전(수소 생산): 수소 안전 및 신뢰성을 위한 재료, 부품 및 측정 표준, 즉 수소 안전 표준 및 재료 계측에 대한 연구.
- 클러스터 2. 수소 충전소(수소 이용): FCEV용 수소 충전소 시스템, 즉 냉각기 및 디스펜서에 대한 연구.
- 클러스터 3. 수소 운송(수소 저장/운송): 수소 파이프라인 운송 인프라 또는 액화 수소 운반선, 즉 450 bar 튜브 트레이일러 및 액체 수소 저장 탱크에 대한 연구.
- 클러스터 4. 그린 수소 생산(수소생산): 태양광, 풍력 등 재생에너지원(알칼리수전해, 광전)을 통해서 수소를 생산하는 연구.
- 클러스터 5. 블루 수소 생산(수소 생산): 회색수소 생산과정에서 발생하는 온실가스를 탄소 포집 및 저장(CCS)을 통해 저탄소 임계치를 만족하는 수소 생산에 관한 연구..
- 클러스터 6. 수소 실증(수소 활용): 수소 그리드 및 수소 가스터빈 실증에 대한 연구.
- 클러스터 7. power-to-x: 태양광 및 풍력에서 생성된 전력을 다른 부문에서 소비하거나 전력으로 재변환하기 위해 다른 에너지 운반체(수소 등)로 변환하는 연구.
- 클러스터 8. 연료전지(수소 활용): FC 및 FC 전력 시스템용 첨단 소재 연구.
- 클러스터 9. 수소 저장(수소 저장/운송): 압축 수소 가스 탱크, 액체 수소 탱크, 극저온 압축 수소, 금속 수소화물, 고표면적 흡착제 및 화학 수소 저장 재료를 포함한 수소 저장 기술.

3. 수소경제 가치사슬 및 세부 R&D 영역별 수행 규모 현황

수소경제를 크게 생산 - 저장/운송 - 활용 분야로 구분하였고, 수소생산에는 ‘Gray/Blue 수소생산’, ‘Green 수소생산’, ‘수소기반/안전’으로, 수소 저장/운송에는 ‘수소 저장’과 ‘수소

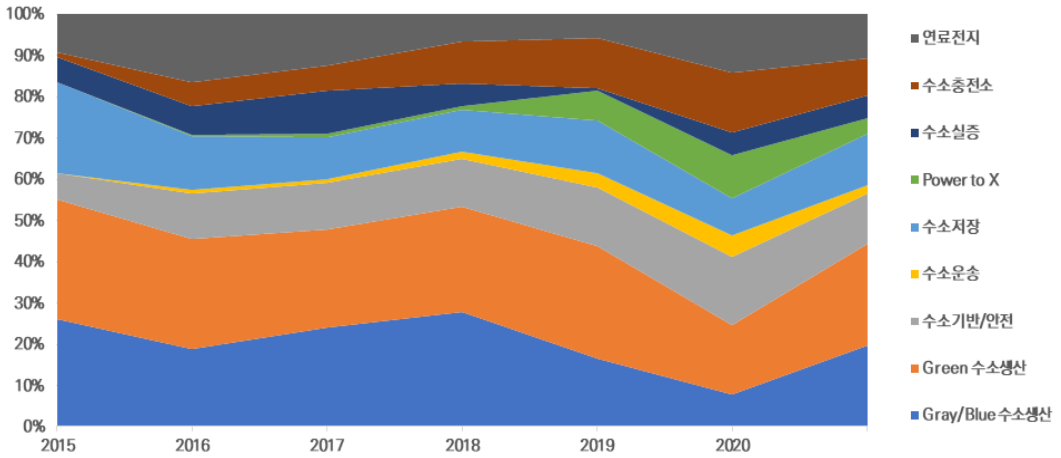
운송'으로, 수소활용에는 'Power to X', '수소실증', '수소충전소', '연료전지'으로 구성하였다. 한국 수소경제에서 지난 5년간(2015-2020) R&D현황은 <표 2> 및 <그림 4>와 같다. 수소생산영역은 전체 국가 수소경제관련 R&D의 57%(384,376백만원)를 차지하고 있으며, 다음으로 수소활용이 29%(195,437백만원), 수소 저장/운송이 14%(99,006백만원)를 차지하고 있다. 이것은 수요 생산단가 목표를 맞추기 위한 R&D에 집중한 것으로 보인다. 한편 연도별로 살펴보면 수소생산 기술에 대한 국가 R&D 투자규모는 감소하고 있는 추세를 나타내고 있는 반면, 개발된 기술을 활용해서 산업경제에 적용하려는 국가 R&D 과제의 비중은 지속적으로 증가하고 있는 상황이다.

수소경제 가치사슬의 세부 R&D영역별로 살펴보면, 수소생산영역은 가장 탄소발생이 적은 Green 수소생산 기술에 가장 많은 국가 R&D 과제가 수행된 것을 볼 수 있으며, 다음으로 Grey/Blue 수소생산 기술에도 상당한 투자를 진행하는 것으로 나타났다. 수소운송 및 저장영역에서는 최근 수송운송 기술(노란색) 영역에서 국가 R&D 투자 비중이 높아지는 추세를 볼 수 있다. 수소활용영역은 Power to X와 수소충전소 분야의 국가 R&D 투자가 지속적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 Power to X 확대를 위해서는 경제성을 확보하기 위한 기술 발전과 더불어 제도적 보완, 상호배타적인 규제들의 완화정책이 동반되어야 할 것이다.

<표 2> 수소경제 가치사슬별 R&D 수행 규모 트렌드

수소경제가치사슬	2015년 ~ 2020년 연구비 현황 (단위: 백만원)						
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	총계
수소생산(a)	53,681	66,021	71,679	69,778	74,139	49,079	384,376
Grey/Blue 수소생산	22,665	22,147	29,023	29,725	21,121	9,360	134,041
Green 수소생산	25,303	30,956	29,108	27,564	34,915	19,867	167,714
수소기반/안전	5,713	12,918	13,548	12,489	18,103	19,852	82,621
수소운송 및 저장(b)	18,977	16,155	13,501	12,711	20,787	16,874	99,006
수소운송	-	1,037	979	1,761	4,364	5,905	14,046
수소저장	18,977	15,118	12,522	10,950	16,423	10,969	84,959
수소활용(c)	14,438	34,547	35,992	24,723	32,946	52,791	195,437
Power to X	-	488	1,073	967	9,170	12,121	23,819
수소실증	5,379	7,945	12,391	5,767	881	6,547	38,909
수소충전소	1,136	6,985	7,658	10,946	15,708	17,218	59,652
연료전지	7,923	19,129	14,871	7,043	7,187	16,906	73,058
총계(=a+b+c)	87,097	116,723	121,172	107,212	127,872	118,744	678,819

[그림 4] 수소경제 가치사슬별 R&D 수행 규모 트렌드 시각화



4. 수소경제 관련 학제별 R&D 수행 규모 현황

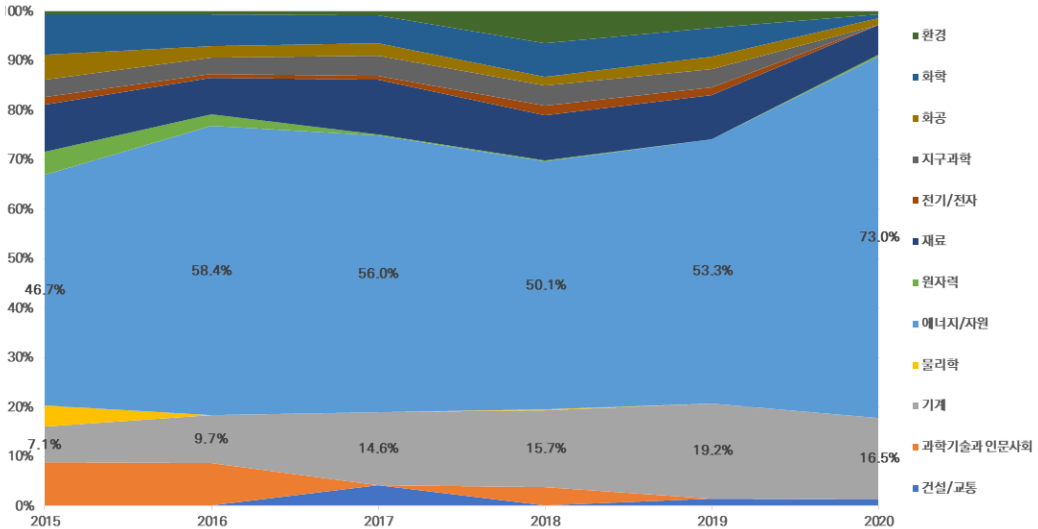
한국 수소경제를 구성하는 학제별 R&D 현황(과학기술표준분류1 대분류 기준)은 <표 3>과 같다. 수소경제를 구성하는 학제 중 에너지/자원(57%, 385,251백만원)과 기계(14%, 96,152백만원)이 전체의 약 71%를 차지하는 것으로 나타났다. 특히, 에너지/자원의 투자비중은 꾸준히 50%대를 유지하는 추세를 보이다가 2020년에 큰 폭의 증가세를 나타냈었다. 한편 기계의 투자 비중은 2015년 이후 지속적으로 증가하다가 2020년에 소폭 감소하는 경향을 보였다. 2020년 코로나 사태를 고려하면, 재료와 화학 분야의 R&D도 지속적으로 수행되어져 온 것으로 분석되었다. 수소경제를 실현하기 위해 에너지/자원, 기계, 재료, 화학분야의 R&D 역량을 높이는 것이 중요한 R&D 투자 전략일 것이다.

<표 3> 수소경제를 구성하는 학제의 R&D 수행 규모 트렌드

학제	2015년 ~ 2020년 연구비 현황 (단위: 백만원)						총계
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	
건설/교통	-	200	5,154	143	1,960	1,600	9,057
과학기술과 인문사회	7,761	9,856	-	3,850	-	-	21,468
기계	6,148	11,304	17,711	16,816	24,613	19,561	96,152
물리학	3,729	50	67	178	17	-	4,041
에너지/자원	40,657	68,209	67,894	53,667	68,108	86,715	385,251
원자력	4,070	2,915	160	160	160	429	7,894

학제	2015년 ~ 2020년 연구비 현황 (단위: 백만원)						
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	총계
재료	8,213	8,578	13,535	9,905	11,434	7,103	58,767
전기/전자	1,431	875	746	2,099	1,951	96	7,198
지구과학	3,125	3,887	4,963	4,230	4,724	-	20,929
화공	4,246	2,606	3,095	1,958	3,072	1,568	16,546
화학	7,236	7,468	6,982	7,338	7,578	939	37,540
환경	480	776	865	6,869	4,254	732	13,976
총계	87,097	116,723	121,172	107,212	127,872	118,744	678,819

[그림 5] 수소경제를 구성하는 학제의 R&D 수행 규모 트렌드 시각화



5. 수소경제 가치사슬별 학제의 R&D 수행 규모 현황

앞서 에너지/자원과 기계 분야의 국가 R&D 과제가 수소경제의 70%를 차지하는 것을 파악할 수 있었다. 구체적으로 한국 수소경제 가치사슬별 학제의 R&D 수행 현황을 살펴보고자 하였다 <표 4>. 에너지/자원 분야에 속한 국가 R&D 과제들이 Green 수소생산 (85,481백만원) 분야에서 가장 많이 수행이 되었고, 다음으로 연료전지(68,641백만원)와 Grey/Blue 수소생산 (66,955백만원) 분야를 차지하고 있었다. 기계 분야에 속한 국가 R&D 과제들은 수소 기반/안전 (37,002 백만원) 분야가 가장 많았으며, 다음으로 수소 운송(14,067백만원) 및 저장(14,697백

만원) 분야를 주를 이루고 있었다. 재료 분야에 속하는 국가 R&D 과제들은 Grey/Blue 수소생산 (18,206백만원), Green 수소생산 (17,512백만원), 수소저장(14,960백만원) 영역을 중심으로 연구활동을 수행하고 있다. 화학분야의 국가 R&D 과제는 Grey/Blue 수소생산 (31,756백만원)에 대부분이 집중되어 있다. 수소경제 기계분야는 가장 국가 연구개발의 비중이 낮은 수소 운송 영역에서 주요한 역할을 수행하는 것으로 파악되었다. 현재 상대적으로 낮은 수소운송 영역의 기술역량을 강화하기 위해 해당분야의 연구개발의 집중도를 높이는 필요성이 나타났다.

〈표 4〉 수소경제 가치사슬별 학제의 R&D 수행 현황

가치사슬	수소 생산			수소운송 및 저장		수소 활용			
	Gray/Blue 수소생산	Green 수소 생산	수소 기반/안전	수소 운송	수소 저장	Power to X	수소 실증	수소 충전소	연료 전지
건설/교통	-	3,760	143	-	-	-	-	-	-
과학기술과 인문사회	-	11,747	-	-	14,874	-	-	-	-
기계	1,954	2,853	37,002	14,046	14,697	-	227	23,359	2,014
물리학	3,779	50	-	-	150	-	-	-	61
에너지/자원	66,955	85,481	39,048	-	33,503	19,698	38,349	33,577	68,641
원자력	-	5,949	1,945	-	-	-	-	-	-
재료	18,206	17,512	833	-	14,960	3,069	333	2,593	1,262
전기/전자	646	2,154	700	-	3,001	-	-	34	664
지구과학	-	20,142	787	-	-	-	-	-	-
항공	2,016	11,473	1,016	-	877	704	-	44	416
화학	31,756	3,203	1,147	-	1,389	-	-	46	-
환경	8,730	3,389	-	-	1,509	348	-	-	-
총계	134,041	167,714	82,621	14,046	84,959	23,819	38,909	59,652	73,058

6. 수소경제 가치사슬별 학제의 R&D 수행 주체의 투자 현황

한국 수소경제 가치사슬 - 학제별 R&D 수행 주체의 투자 현황을 〈표 5〉에 나타내었다. 전체적으로 대학은 수소운송(5,501백만원)에서, 연구소는 수소생산(Green 수소생산: 37,3764백만원, Grey/Blue 수소생산: 88,608백만원, 수소기반/안전: 45,744백만원) 분야에서, 기업은 수소저장(39,033백만원), 수소충전소(37,352백만원), 연료전지(42,230백만원)에서, 기타 기관은 Power to X(18,748백만원)와 수소실증(27051백만원)에서 상대적으로 많은 국가

R&D를 수행한 것으로 나타났다. 학제별로 살펴보면, 에너지/자원 분야에서는 연구소가 Green 수소생산(56,354백만원)과 Grey/Blue 수송생산(38,988백만원)에서 상대적으로 더 많은 국가 R&D 과제를 수행한 반면, 기업은 수소기반/안전(16,624백만원), 수소충전소(16,031백만원), 연료전지(39,426백만원) 분야에서 주도적인 모습을 보이고 있다. 기계 분야에서는 연구소가 수소기반/안전(27,893백만원)에서 주도적으로 R&D 활동을 수행하고 있으며, 대학은 수소운송(5,501백만원)에서 상대적인 우위를 보이고 있다. 기업은 상대적으로 수소충전소(21,288백만원)와 수소저장(13,962백만원)에서 주도적으로 국가 R&D를 수행하는 것으로 나타났다. 앞서 수소관련 기계 분야의 출연(연)들은 낮은 기술경쟁력을 보유한 수소운송 분야에서 활발한 연구개발 활동을 추진할 수 있도록 제도적 방안이 마련될 필요성이 나타나고 있다. 기계분야 산학연정 이해관계자 또는 nst의 전략위의 전문가들은 수소경제 가치사슬상 어느 영역에서 기술경쟁력을 확보하고 있는지 현황을 파악할 수 있으며, 지속적인 연구개발을 통해 대학과 출연(연)은 기술사업화에 초점을 두는 연구개발 프로그램을 과제개발기관은 고려할 필요성이 있다. 즉, 체계적인 과정을 통해 수소 경제 가치사슬별 학제별 국가 연구개발 현황을 파악할 수 있는 정보를 이해관계자들에게 제공하였다.

〈표 5〉 수소경제 가치사슬-학제별 R&D 수행주체의 투자 현황

가치 사슬		수소 생산			수소운송 및 저장		수소 활용			
학제	수행주체	Gray/Blue 수소생산	Green 수소 생산	수소 기반/안전	수소 운송	수소 저장	Power to X	수소 실증	수소 충전소	연료 전지
건설/교통	대학	-	-	143	-	-	-	-	-	-
	연구소	-	3,760	-	-	-	950	-	-	-
	기타기관	-	0.5	-	-	-	18,748	-	-	-
과학기술과 인문사회	연구소	-	11,747	-	-	14,874	-	-	-	-
기계	대학	1,112	1,281	4,966	5,501	735	-	167	-	588
	연구소	709	1	27,893	3,363	-	-	-	1,307	-
	기업	133	1,571	1,360	1,834	13,962	-	60	21,288	1,426
	기타기관	-	-	2,783	3,348	-	-	-	764	-
물리학	대학	50	50	-	-	150	-	-	-	-
	연구소	3,729	-	-	-	-	-	-	-	61
에너지/자원	대학	2,328	13,557	2,179	-	3,400	-	7,868	1,889	7,982
	연구소	38,988	56,354	15,933	-	16,135	-	3,430	15,588	11,627
	기업	25,638	15,570	16,624	-	13,968	-	-	16,031	39,426
	기타기관	-	-	4,311	-	-	-	27,051	68	9,605

가치 사슬		수소 생산			수소운송 및 저장		수소 활용			
학제	수행주체	Gray/ Blue 수소생산	Green 수소 생산	수소 기반/ 안전	수소 운송	수소 저장	Power to X	수소 실증	수소 충전소	연료 전지
원자력	대학	-	50	-	-	-	-	-	-	-
	연구소	-	4,549	1,465	-	-	-	-	-	-
	기업	-	1,350	480	-	-	-	-	-	-
재료	대학		5,710	563	-	2,316	-	93	-	397
	연구소	2,640	2,667	138	-	3,747	3,069	240	-	1
	기업	15,566	9,136	133	-	8,897	-	-	-	864
	기타기관		-	-	-	-	-	-	2,593	-
전기/전자	대학	-	219	34	-	1,601	-	-	-	101
	연구소	646	180	-	-	-	-	-	-	50
	기업	-	1,755	-	-	1,400	-	-	34	513
	기타기관	-	-	666	-	-	-	-	-	-
지구과학	대학	-	42	-	-	-	-	-	-	-
	연구소	-	7,210	-	-	-	-	-	-	-
	기업	-	12,890	787	-	-	-	-	-	-
항공	대학	300	6,448	601	-	838	-	-	-	416
	연구소	1,716	350	315	-	40	704	-	44	-
	기업	-	4,675	100	-	-	-	-	-	-
화학	대학	204	2,613	351	-	899	-	-	-	-
	연구소	31,450	558	-	-	-	-	-	-	-
	기업	102	30	796	-	490	-	-	-	-
	기타기관	-	2	-	-	-	-	-	46	-
환경	대학	-	3,389	-	-	978	-	-	-	-
	연구소	8,730	-	-	-	214	348	-	-	-
	기업	-	-	-	-	317	-	-	-	-
총계	대학	3,994	33,359	8,836	5,501	10,916	-	8,129	1,889	9,484
	연구소	88,608	87,376	45,744	3,363	35,010	5,071	3,670	16,940	11,739
	기업	41,440	46,976	20,280	1,834	39,033	-	60	37,352	42,230
	기타기관	-	2	7,761	3,348	-	18,748	27,051	3,470	9,605

7. 수소경제 가치사슬별 기계분야의 주요 국가 R&D 과제 현황

수소경제 가치사슬상 기계분야가 가장 많이 투자된 영역의 연구수행주체는 수소기반/안전(수소생산)에서 연구소, 수송운송(수소 운송 및 저장)의 대학, 수소저장(수소 운송 및 저장)의 기업, 그리고 수소충전소(수소 활용)의 기업, Green 수소생산(수소생산)의 기업, Grey/Blue 수소생산(수소생산)의 대학으로 나타났는데, 구체적으로 수행된 국가 R&D과제들을 살펴보면 <표 6>과 같다.

우선 수소기반/안전에서는 한국자동차연구원이 수소택시 실증기반 수소저장 및 운전 장치 요소부품 내구성 검증기술 개발(구영모, 산업통상자원부, 4556백만원) 등의 과제를 수행하는 것으로 나타났다. 수송운송에서는 대표적으로 부산대학교이 수소연료전지 추진선박용 연료저장 및 공급시스템 핵심 소재의 성능평가 설비 구축 및 평가기술 개발(서정관, 산업통상자원부, 5500백만원)의 과제를 수행한 바 있으며, 수송 저장에서는 일진복합소재(주) (70L이상 급 고밀도 고압수소저장탱크 원가절감을 위한 경량화 기술개발, 윤영길, 산업통상자원부, 1793백만원), (주)케이지에프(고속 필라멘트 와인딩 공법을 이용한 FCEV용 700bar 수소저장용기 제조 기술 개발, 박종욱, 산업통상자원부, 2787백만원) 등이 주요 연구를 수행한 것으로 파악되었다. 수소충전소(수소 활용)에서는 대표적으로 일진복합소재(주) (도심주행용 수소전기버스 핵심기술 개발, 윤영길, 산업통상자원부, 7170백만원), (주)케이제이엔지니어링(수소 압력 제어장치 성능 검증용 장비 및 실증기술 개발, 김명중, 산업통상자원부, 1190백만원) 등의 기업들이 주요 연구수행 주체로 파악되었다. Green 수소생산(수소생산)에서는 대표적으로 (주)케이제이 엔지니어링 (수소 압력 제어장치 성능 검증용 장비 및 실증기술 개발, 김명중, 산업통상자원부, 1,190백만원)이, Grey/Blue 수소생산(수소생산)에서는 한양대학교(엔진의 폐열을 이용한 희박 개질수소-LPG 혼소 시스템 개발, 이기형, 산업통상자원부, 461백만원), 연세대학교(디젤엔진의 폐열회수 기술을 이용한 개질 수소 EGR시스템 개발, 설용건, 산업통상자원부, 500백만원) 등의 대학이 대표적인 연구수행 주체로 나타났다.

지금까지 본 연구에서 수소경제 가치사슬별 연구개발 현황 → 기계분야를 포함한 학제별 수소경제 가치사슬 연구개발 현황 → 기계분야를 포함한 학제별 수소경제 가치사슬별 산학연 연구개발 현황 → 기계분야를 포함한 학제별 수소경제 가치사슬별 산학연 연구개발 세부 현황 순서로 국가 R&D 기반 수소경제에 대한 전체적인 생태계를 파악할 수 있는 기반 정보를 제공하였다. 이러한 정보를 바탕으로 정부 또는 관련 대표기관에서 이들의 활동하는 기술영역별로 협의체를 구성할 수 근거로 활용할 수 있을 뿐만 아니라, nst의 위원회를 포함한 이해관계자 그룹에서

동일한 기술 영역내에서 산학연간 공동 R&D과제를 추진할 수 있는 기초자료로도 활용이 가능할 것이다. 한편 기업측면에서 기존의 논문이나 특허정보를 활용한 잠재적 협력 연구조직과 연구자를 파악하는 것이 아니라, 가장 최근에 수행된 R&D 과제내용을 기반으로 기술확보가 필요한 영역이나 확장이 필요한 영역으로 진출하기 위한 잠재적 협력 연구조직과 연구자에 대한 정보를 확보할 수 있을 것이다.

〈표 6〉 수소경제 가치사슬별 기계분야 주요 R&D 과제 수행 현황

클러스터 연구수행기관명	2016년 ~ 2020년 연구비 현황		연구 책임자	부처명	과제규모 (백만원)
	과제명				
[수소생산 - Gray/Blue 수소생산]					
한양대학교	엔진의 폐열을 이용한 희박 개질수소-LPG 혼소 시스템 개발		이기형	산업통상 자원부	461
연세대학교	디젤엔진의 폐열회수 기술을 이용한 개질 수소 EGR시스템 개발		설용건	산업통상 자원부	500
한국생산기술연구원	수소에너지 산업 대응을 위한 수소제조용 다공성 3D 나노구조체 촉매 및 고감도 수소감지 스마트 세라믹 센서 원천기술 개발(1/3)		임동하	과학기술 정통부	708
[수소생산 - Green 수소생산]					
광주과학기술원	알칼라인 수전해 시스템 성능예측 및 최적 제어용 디지털 트윈 기술 개발		강상규	과학기술 정통부	494
서울시립대학교	고분자 전해질막 수전해 분리판 유로 및 확산체 설계		나영승	과학기술 정통부	130
인하대학교	알카라인 수전해 해석모델 및 설계 원천기술 개발		주현철	과학기술 정통부	157
(주)케이제이 엔지니어링	수소 압력 제어장치 성능 검증용 장비 및 실증기술 개발		김명중	산업통상 자원부	1,190
[수소생산 - 수소기반/안전]					
교통안전공단	수소버스 안전성 평가기술 및 장비 개발		김시우	국토 교통부	1640
	수소버스 안전성 평가기술 및 장비개발 기획		김시우	국토 교통부	143
	수소버스 운행차 안전성 검사기술 및 장비개발		여운석	국토 교통부	1000
부산대학교	MW급 선박용 수소연료전지 ESS 시스템 성능평가 설비 구축 및 시험기법 개발		정광호	산업통상 자원부	4297
	친환경 수소연료선박 RnD 플랫폼 구축		이제명	산업통상 자원부	618

클러스터 연구수행기관명	2016년 ~ 2020년 연구비 현황		연구 책임자	부처명	과제규모 (백만원)
	과제명				
한국자동차연구원	수소운송용 수소용기 bundle 및 적재, 하역 기술 개발		최성진	산업통상 자원부	1307
	수소택시 실증기반 수소저장 및 운전 장치 요소부품 내구성 검증기술 개발		구영모	산업통상 자원부	4556
한국표준과학연구원	수소용복합스테이션 신뢰성 측정표준 기술개발		백운봉	과학기술 정통부	9650
(주)지엔씨오토	수소버스 구동시스템 성능 평가기술 및 장비개발		정광식	국토 교통부	1360
[수소 운송 및 저장 - 수소 운송]					
부산대학교	수소연료전지 추진선박용 연료저장 및 공급시스템 핵심 소재의 성능평가 설비 구축 및 평가기술 개발		서정관	산업통상 자원부	5500
한국조선해양 기자재연구원	수소연료전지 추진선박 개발을 위한 1MW급 전기추진 시스템 성능평가 기술 개발		황태규	산업통상 자원부	3363
(주)아모센스	수소저장 구조/부품장착 설계 및 제작기술 개발		박종원	산업통상 자원부	1834
(사)한국선급	액화수소운송선용 CCS 설계 및 검증기술 개발		노길태	산업통상 자원부	1332
[수소 운송 및 저장 - 수소 저장]					
전북대학교	차세대 6.0 wt% 저장효율 고압 수소저장용기용 원천소재 및 최적 설계기술 개발		이중희	과학기술 정통부	221
일진복합소재(주)	70L이상 급 고밀도 고압수소저장탱크 원가절감을 위한 경량화 기술개발		윤영길	산업통상 자원부	1793
(주)케이지에프	고속 필라멘트 와인딩 공법을 이용한 FCEV용 700bar 수소저장용기 제조 기술 개발		박종욱	산업통상 자원부	2787
하이리움산업(주)	무인이동체용 액화수소 연료전지- 이차전지 하이브리드 시스템 개발		김서영	과학기술 정통부	200
[수소활용 - 실증]					
울산과학기술원	저탄소/고효율 엔진의 저온연소 특성에 관한 멀티스케일 해석모델 개발		김승욱	교육부	15
(주)와이엠티	저탄소/고효율 엔진의 저온연소 특성에 관한 멀티스케일 해석모델 개발		김승욱	교육부	15
[수소활용 - 수소충전소]					
한국자동차연구원	수소운송용 수소용기 bundle 및 적재, 하역 기술 개발		최성진	산업통상 자원부	1307
일진복합소재(주)	도심주행용 수소전기버스 핵심기술 개발		윤영길	산업통상 자원부	7170
(주)케이제이엔지니어링	수소 압력 제어장치 성능 검증용 장비 및 실증기술 개발		김명중	산업통상 자원부	1190

클러스터 연구수행기관명	2016년 ~ 2020년 연구비 현황	연구 책임자	부처명	과제규모 (백만원)
	과제명			
한국다쓰노(주)	수소충전기 검교정 성능향상을 위한 질량계측 기반의 계량측정장치 기술개발	최명규	산업통상 자원부	223
한국산업기술시험원	수소연료전지자동차 충전기 계량관리를 위한 중량식검사기반 구축	유동훈	산업통상 자원부	764
[수소활용 - 연료전지]				
고려대학교	암모니아 직접 주입형 고출력 고안정성 프로톤 세라믹 연료전지 개발	심준형	과학기술 정통부	400
홍익대학교	장시간의 Furnace 열처리 공정을 대체할 수 있는 고출력 대면적의 VCSEL 열처리 공정개발: 반도체, 디스플레이, 고체산화물 연료전지 박막 재료를 대상	박승호	과학기술 정통부	87
(주)화승소재	일체형 연료전지 스택 가스켓용 열가소성 탄성소재 및 적용 기술 개발	이무정	산업통상 자원부	1426

V. 결론

본 연구는 국가 R&D전략분야의 정책수립에 있어서 빅데이터와 인공지능 기법을 적용하여 전문가 중심의 전략기획방법의 문제점을 보완할 수 있는 정보분석 프레임워크를 제시하고, 국가 현안인 탄소중립 사회 구현을 위한 핵심 기술영역인 수소분야의 기계관련 국가 R&D과제를 기반으로 실증연구를 수행하였다. 본 연구는 크게 세 가지 측면에서 기여를 하고 있다. 첫째, 실무적으로 빅데이터와 인공지능기법을 활용하여 보다 체계적인 과정을 통해 수소경제 가치사슬별로 학제별/연구수행 주체별 국가 R&D 현황을 파악할 수 있었다. 연구기획단계에서 특정 기술에 대한 연구영역을 분류하는 것이 가장 중요한 부분인데, 일반적으로 전문가 협의체를 통한 연구영역이 도출된다. 그러나 이러한 연구영역에 대한 신뢰성은 협의체의 구성원에 따라 변경될 수 있는 가능성이 높아진다. 본 연구에서 제시한 프레임워크는 대규모의 데이터를 기반으로 객관적인 방법론을 적용하여 연구영역을 도출하기 때문에 이질적인 전문가 구성원들로부터 협의를 유도할 수 있는 접근법을 제시하고 있다. 게다가 R&D 연구영역별 국가 R&D 과제의 투자 현황 및 관련 정보를 제공하고 있기 때문에, 기존에 논문이나 특허로는 분석할 수 없었던 국가 R&D 투자의 현황에 대해 구체적으로 파악할 수 있게 된다. 기존의 다양한 정보기관에서 제공하는 투자현황에 대한 정보는 거시적이거나 분류체계 중심으로 제공되어 있어, 특정 분야별로 구체적인 현황을 분석하는데 한계가 있었다. 본 연구는 이러한 한계점을 극복하고 특정영역에

대해 구체적인 국가R&D투자 정보를 제공하고 있어, 세부 R&D영역별 전문가 협의체의 구성원들이 미래 연구개발 예산 방향성에 대해 논의할 수 있는 유용한 정보를 제공하고 있다.

둘째, 학술적인 측면에서 본 연구는 데이터와 인공지능 기법을 통한 R&D정책연구, 특히, 수소경제의 기계분야에 대한 국가 R&D 전략수립을 위한 정보 분석 프레임워크와 실증사례를 제공하고 있어, 개념적으로 정책의사결정의 효율성을 강조하는 기존연구에 정책적 함의를 제시하는 기여를 하였다. 기존 개념적 연구(오철오, 2015; 서형준, 2019, Höchtl, Parycek, Schöllhammer 2016)에서는 증거기반 정책 의사결정이 실질적으로 어떻게 활용되는지 파악할 수 있어야 정보의 활용을 제고할 수 있는 원인을 파악할 수 있다고 주장하였다. 본 연구에서는 이전의 연구에서 제기했던 한계점을 실질적인 사례를 통해 어떻게 데이터를 수집하고 분석하며, 효율적인 R&D정책을 수립하는데 어떤 방식으로 활용할 수 있는지 보여주고 있다. 또한 Pencheva, Esteve, Mikhaylov (2020)가 문헌 연구를 통해 개념화했던 증거기반 정책과정의 효과인 정확성, 협력, 정당성, 신뢰성, 향상된 분석 등에 대한 실증을 통해 기존 개념연구의 구성 개념을 더욱 공고화해주고 있다.

마지막으로, 실무적으로 본 연구결과는 국가 현안을 해결해야하는 출연(연)의 범기관 및 민간과의 협력 연구 환경을 주도하는 역할과 기능을 수행해야하는 연구개발전략위원회의 이해관계자들간 편향성을 낮추고 합리성을 제고할 수 있는 유용한 정보 분석에 대한 방향성을 제시하고 있다. 국가과학기술연구회 산하 25개 출연(연)이 특정 국가 현안에 대한 국가 R&D 과제 현황을 총체적으로 파악할 수 있는 정보분석 모니터링 플랫폼의 기본적인 체계를 보여주고 있다. 예를 들어, 기계분야의 대표 출연(연)인 한국기계연구원이 수행한 국가 R&D과제들을 대상으로 본 연구에서 제시한 방법론을 적용하여 다양한 국가 현안에 어떻게 대응하고 있는지 파악하거나, 국가 필수전략기술에 어떻게 기여를 하고 있는지 전체적인 현황을 파악할 수 있을 것이다. 또한 최신성이 높은 국가 R&D과제를 기반으로 동일 연구영역에서 활동하고 있는 민간기업과의 협력 체계를 구축할 수 있는 기초정보를 제시할 수 있을 것이다.

본 연구의 한계점은 수소경제의 9개 연구영역을 보다 세부적으로 파악하지 못했다는 점이다. 이러한 한계점을 해결하기 위해서 9개 영역별 국가 R&D 과제데이터를 대상으로 본 연구에서 제시한 방법론을 적용하여 9개 영역별 세부 R&D 연구영역을 도출해야 할 것이다. 이러한 과정을 통해 연구영역별로 보다 정교한 정보를 제공하여, 세부 R&D연구영역별 연구의 방향성 및 투자의사결정에 필요한 유용한 정보를 제공할 수 있을 것이다.

참고문헌

- Bordia P., Elizabeth H., Elizabeth J., Cindy G., and Victor J. C. (2004), "Uncertainty during organizational change: Types, consequences, and management strategies", 18(4), pp.507-532.
- Bordia P., Elizabeth H., Elizabeth J., Cindy G., and Victor J. C. (2004), "Uncertainty during organizational change: Types, consequences, and management strategies", 18(4), pp.507- 532.
- Cheon, K. and Kim, J. (2020). "Hydrogen Economy in Major Countries: Policies of Promotion and Lessons Learnt from Them", *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers* 57 (6), pp. 629-639.
- DOE. (2020). Hydrogen Program Plan.
<https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/hydrogen-program-plan-2020.pdf>[2022.02.12.]
- Giest, S. (2017). "Big data for policymaking: fad or fasttrack?", *Policy Sciences*, 50(3), pp. 367-382.
- Grossmann, M. (2012). "Interest Group Influence on US Policy Change: An Assessment based on Policy History", *Interest Groups and Advocacy*, 1(2), pp. 171-192.
- Höchtel, J., Parycek, P. and Schöllhammer, R.(2016). "Big data in the policy cycle: Policy decision making in the digital era", *Journal of Organizational Computing and Electronic Commerce*, 26(1-2), pp.147-169.
- Kasai, H., Padama, A. A. B., Chantaramolee, B. and Arevalo, R. L. (2020) "Hydrogen and Hydrogen-Containing Molecules on Metal Surfaces", *Springer Series in Surface Sciences; Springer Singapore: Singapore*, Vol. 71.
- Lee, D. and Kim, K. (2021). "A Collaborative Trans-Regional R&D Strategy for the South Korea Green New Deal to Achieve Future Mobility", *Sustainability*, 13, pp. 8637.
- Lee, D. and Kim, K. (2021). "Research and development investment and collaboration framework for the hydrogen economy in South Korea", *Sustainability*, 13(19), pp. 10686.
- Lee, D., Heo, Y. and Kim, K.(2020). "A strategy for international cooperation in the COVID-19 pandemic era: Focusing on national scientific funding data", *Healthcare*, 8(3), pp. 204.
- Lee, D., Kang, J. and Kim, K. (2020). "Global collaboration research strategies for sustainability in the post COVID-19 era: Analyzing virology-related national-funded projects", *Sustainability*, 12(16), pp. 6561.
- Lee, D., Kim, S. and Kim, K.(2020). "International R&D Collaboration for a global aging society: focusing on aging-related National-Funded Projects", *International journal of environmental research and public health*, 17(22), pp. 8545.
- Pencheva, I., Esteve, M. and Mikhaylov, S.J. (2020). "Big Data and AI-A transformational shift for government: So, what next for research?", *Public Policy and Administration*, 35(1), pp.

24-44.

Suominen, A. and Hajikhani, A. (2021). "Research themes in big data analytics for policymaking: Insights from a mixed-methods systematic literature review", Policy & Internet, 13(4), pp.464-484.

과기출연기관법(2020. 12. 22.) 제25조(기획평가위원회 등) 제3항

<https://www.law.go.kr/%EB%B2%95%EB%A0%B9/%EA%B3%BC%ED%95%99%EA%B8%B0%EC%88%A0%EB%B6%84%EC%95%BC%EC%A0%95%EB%B6%80%EC%B6%9C%EC%97%B0%EC%97%B0%EA%B5%AC%EA%B8%B0%EA%B4%80%EB%93%B1%EC%9D%98%EC%84%A4%EB%A6%BD%E3%86%8D%EC%9A%B4%EC%98%81%EB%B0%8F%EC%9C%A1%EC%84%B1%EC%97%90%EA%B4%80%ED%95%9C%EB%B2%95%EB%A5%A0>

범부처 (2021), 「탄소중립 기술혁신 추진전략」.

[https://www.msit.go.kr/bbs/view.do?sCode=user&mId=113&mPid=112&pageIndex=&bsSeqNo=94&nttSeqNo=3180091&searchOpt=ALL&searchTxt=/\[2022.02.12.\]](https://www.msit.go.kr/bbs/view.do?sCode=user&mId=113&mPid=112&pageIndex=&bsSeqNo=94&nttSeqNo=3180091&searchOpt=ALL&searchTxt=/[2022.02.12.])

기획재정부 (2020), 「2050 탄소중립」 추진전략.

https://www.moef.go.kr/synapView/previewTop.jsp?CastExtn=PDF&orignlFileNm=2050%20%ED%83%84%EC%86%8C%EC%A4%91%EB%A6%BD%20%EC%B6%94%EC%A7%84%EC%A0%84%EB%9E%B5.pdf&atchFileId=ATCH_00000000016289&fileSn=1

서형준 (2019) “4차 산업혁명시대 인공지능 정책의사결정에 대한 탐색적 논의”, 정보화정책, 26(3), 한국지능정보사회진흥원, pp. 3-35.”

오철호 (2015) “정책결정, 증거 그리고 활용-연구경향과 제언”, 한국정책학회보, 24(1), 53-76.

이도연·김근환 (2021) “증거기반 연구개발 정책 지원을 위한 정보 분석 프레임워크에 대한 연구: 정책과정의 합리성 제고에 관한 실무적 고찰”, 「정보화정책」, 28(1), 한국지능정보사회진흥원, pp. 77-93.

중소벤처기업부 (2017), 「중소·중견기업의 글로벌화를 위한 전략기술로드맵」.

[https://www.korea.kr/news/pressReleaseView.do?newsId=156184360/\[2022.02.12.\]](https://www.korea.kr/news/pressReleaseView.do?newsId=156184360/[2022.02.12.])

한국보건산업진흥원 (2017), 「고령친화산업 R&D 중장기 로드맵 수립 연구」.

[https://www.khidi.or.kr/board/view?pageNum=1&rowCnt=10&no1=160&linkId=48717225&menuId=MENU00314&maxIndex=00487442809998&minIndex=00001264029998&schType=0&schText=&schStartDate=&schEndDate=&boardStyle=&categoryId=&continent=&country=/\[2022.02.12.\]](https://www.khidi.or.kr/board/view?pageNum=1&rowCnt=10&no1=160&linkId=48717225&menuId=MENU00314&maxIndex=00487442809998&minIndex=00001264029998&schType=0&schText=&schStartDate=&schEndDate=&boardStyle=&categoryId=&continent=&country=/[2022.02.12.])

Research on information analysis framework to support establishment of research and development (R&D) strategy of science and technology-funded research institutes

– Focused on machine-related R&D in the hydrogen field –

Lee Doyeon, Park Kiju, Kim Keunhwan

– Abstract –

In this study, stakeholders including the NST R&D Strategy Council, which promotes research planning and cooperative research, provide information on the key research fields (classification system) and the status of R&D support for each field required for establishing a hydrogen-related national R&D strategy for the realization of a carbon-neutral society. A framework for data-driven information analysis was proposed to provide This study empirically implements conceptual research by providing data-driven information for R&D strategies in the mechanical field in the hydrogen domain, in order to overcome the limitations of existing big data and artificial intelligence technology policy research, which is limited to conceptual research. The ASJC classification model with machine learning was used to classify 955 hydrogen-related national R&D projects, yielding a total of 9 clusters (2015–2020). Furthermore, the state of national R&D investment and the state of each research organization in the machinery sector was examined using the hydrogen economy value chain. In comparison to the existing qualitative research field, it has the advantage of being able to provide more objective and reproducible data through a scientific methodology based on large-scale data. As a result, this study is significant in that it has laid the groundwork for information products that can support objective and rational decision-making among stakeholders.

Key words

R&D Strategy Council, Government-funded research institutes, Hydrogen economy, Mechanical technology, Analysis framework

기계기술정책

제1권 제1호(2022)·창간호

| 논문 |

수치제어(NC) 공작기계 개발의 역사적 의미

미국 1950년대·1960년대의
변천 과정을 중심으로

이 창규

아주대학교 특임교수, 법학박사, 기술거래사

TECHNOLOGY POLICY
MECHANICAL ENGINEERING

수치제어(NC) 공작기계 개발의 역사적 의미

- 미국 1950년대·1960년대의 변천 과정을 중심으로 -

이창규*

- 초 록 -

미국은 최초로 수치제어(NC) 공작기계의 개발하고 상용화하였다. 일본은 포함한 그 밖의 국가들은 1960년대를 지나가면서 미국의 주도를 계속 허용하고 있었다. 그러나 1970년대 이후의 선진국 경제가 다품종 소량 생산 체제의 정비를 위해 NC 공작기계가 필요했을 때 그 대량의 수요를 맞춘 것은 미국제품이 아니라 일본제품이다. 미국에서의 NC 공작기계의 개발은 제조 현장에서의 문제 해결하기 위해 시작되었지만 얼마 되지 않아 미국 공군과 협업한 MIT 서보메커니즘 연구소의 주도 아래 최고의 기능을 구현하기 위한 목표 달성을 추구하였다. 이후, 상용화 과정도 미국 공군의 대량 수급 계획을 위해 진행되었다.

1950년대 말 이후부터 고성능 기능을 탑재하고 있는 제품에서 비교적 단순한 제품으로 개발 및 생산이 초점이 옮겨졌다. 1960년대 중반 이후부터는 군사 물자의 공급이나 항공우주 기술의 개발을 위한 특수한 사용자들의 수요가 있었다. 이러한 개발 후원자나 대형 시장의 존재가 없었다면, 미국에서의 NC 공작기계의 개발이나 보급의 프로세스가 구축되기 어려웠다고 할 수 있다. 컴퓨터나 반도체산업의 발전과 같이 NC 공작기계도 미국의 군사 산업 발전이라는 핑계로 진행되었다. 이러한 시장에 있어서 기업들은 주어진 특수한 요구를 충족시키는 것에만 집중하고, 어떻게 비용을 삭감하는지와 어떻게 이익을 창출하는지를 생각할 필요가 없었다. 이에 기업들이 미래 발전을 위한 고민한 노력이 적었다고 할 수 있다.

우리나라에 영향을 많이 준 일본의 NC 공작기계 개발은 미국에 수년 늦게 시작되었다. MIT의 기술에 기초해 개발을 진행하였지만, 정부로부터의 지원과 시장에서 수요가 반드시 있을 것이라는 신뢰가 없었다. 따라서 NC 공작기계의 개발은 단순히 일정한 성능의 구현을 목표로 할 뿐만 아니라 어떻게 하면 그것이 상품으로서 성립할 수 있는지를 고민하면서 개발을 진행해야 할 것이다. 기업이 성장하기 위해선 안정된 환경보다는 새롭게 개척하기 위한 환경이 필요하다고 할 수 있다.

주 제 어 수치제어, 파슨스社, 서보메커니즘 연구소, 미국 공군, 군수 조달, 자동 프로그래밍 도구

논문접수일 2022년 4월 30일 수정논문 제출일 1차: 2022년 6월 8일 2차: 2022년 6월 21일 게재확정일 2022년 6월 23일

* 아주대학교 특임교수 / 법학박사 / 기술거래사, email: lck@ajou.ac.kr

I. 서론

주지하다시피 18세기 증기기관의 발명과 더불어 인류는 도구를 기계적으로 작동시키는 방법을 고안했으며, 이를 산업혁명(Industrial Revolution)이라고 한다.¹⁾ 18세기에 들어서 영국 내외에서는 면직물의 수요가 급증하게 되자 제임스 와트(James Watt)는 증기기관을 개량해 대량 생산 체계를 구축하였다. 이후 면직물 산업이 산업혁명을 주도하게 되면서 많은 무수하게 많은 생산용 기계가 발명되었으며, 이때부터 기계는 생산을 지탱하는 중요한 역할을 하게 되었다.²⁾

이같이 역사적 관점에서 글로벌 기계공업의 발전은 섬유생산 기계의 제작과 사용으로 급격하게 발전되었다고 해도 과언이 아니라고 할 수 있다. 섬유산업에서의 섬유생산 기계의 활용은 획기적인 생산방식이었으며, 이후 인류는 기계를 물품생산에 본격적으로 이용하고 개량하여 오늘날에 이르렀다. 이러한 역사적 흐름에서 주목해야 하는 점은 기계공업의 발전이 기계를 생산하기 위한 기계인 ‘공작기계(machine tools)’의 제조가 시작되면서부터 자동화 시스템을 갖추게 되었다는 점이다.³⁾

공작기계는 영국과 미국에서 최초로 발명되었지만, 현재 세계 공작기계 산업을 선도하고 있는 국가는 일본과 독일이다. 특히, 일본의 공작기계 산업 발전 원동력이 된 것은 바로 수치제어(Numerical Control, 이하 “NC”로 명기함) 공작기계 분야에서의 성공이라고 감히 말할 수 있다.⁴⁾ 사실, NC 공작기계를 개발하고 상용화한 것은 미국이었으며, 1960년에는 미국이 NC 공작기계의 개발과 생산을 독점하였다. 그러나 1970년대 이후의 세계 경제에서 소량 생산 체제가 확립되면서 다품종을 생산하기 위해 NC 공작기계가 필요했을 때, 일본에서 제조된 기계제품이 주를 이루었다. 이처럼, 미국의 공작기계 산업은 19세기 이후 높은 기술 수준을 바탕으로 발전해 왔지만, 오늘날 일본이 주도권을 가지게 된 연유는 무엇일까?

1) 김석일, “차세대 공작기계의 개발동향”, 기계와 재료 제2권 제1호, 재료연구소, 1990, 84면.

2) 1797년 영국의 헨리 모슬리(Henry Gwyn Jeffreys Moseley)가 나사절삭 동력선반을 개발했으며, 그 뒤 영국에서 셰이퍼(shopper), 단조용 증기 해머 등 많은 공작기계가 개발되었다. 미국에서는 1818년 일라이 휘트니(Elias (Eli) Whitney)가 밀링 머신을 발명했으며, 1862년 J. R. 브라운(J.R. Brown)이 만능 밀링 머신을 개발했다. 19세기 말에는 미국의 C. H. 노턴(CH Norton)에 의해 연삭기가 개발되어 공작기계의 새로운 장이 열렸다. 20세기에는 전자장치에 의한 자동제어가 이루어졌으나, 일반적으로 보급된 공작기계 대부분은 19세기 중엽에 설계되었으며, 오늘날 가정이나 공장에서 수십 종의 공작기계를 사용하고 있다. 기계공학용어사전 편찬위원회, 2009.

3) 한국민족문화대백과사전, 기계공업(機械工業), <<http://encykorea.aks.ac.kr/Contents/Item/E0008118>>(최종방문일 2022년 4월 30일).

4) 수치제어(Numerical Control)는 수치와 기호로서 구성된 수치 정보를 매개 수단으로 하여 기계의 운전을 자동제어 한다는 의미이다. 공작기계의 테이블 또는 절삭공구 등의 구동 부분을 자동으로 움직여서 가공물을 가공시키는 제어장치로써 종래의 수동운전되었던 기계의 조작이 자동화될 뿐 아니라, 복잡한 형상이라도 짧은 시간에 높은 정밀도로 가공할 수 있다. 성대중 외, “다계통 e-CNC 개발”, 『한국정밀공학회지』 제26권 제4호, 한국정밀공학회, 2009, 7~8면.

일본의 NC 공작기계의 주도권을 가지게 된 것은 우리나라와 일본의 어느 정도 관련성이 있다. 우리나라의 기계공업은 1930년대에 시작되었으며, 초창기 기계공업은 일부 영역을 제외하곤 매우 영세하였다. 당시 우리나라의 기계공업은 소규모의 주물공장을 비롯해 몇 개의 차량 부품공장 및 농기구 제작공장 등이 전부였으며, 기계의 수입은 대부분 일본에 의존하였다.⁵⁾ 이후 일본은 1941년에 발발한 태평양 전쟁(Pacific War)을 발발시키며, 근대적 시설을 갖춘 공장을 우리나라에 건설했으며, 전쟁 말기에 이르러 국내에서 비행기 제작, 일부 기계 부품의 제작, 철도차량·선박용 기계와 일부 산업용 기계의 생산이 증대되었다.⁶⁾

1945년 태평양 전쟁이 종전이 되면서, 일본으로부터 원자재 공급원이 차단되었다. 이에 따라 우리나라의 기계공업은 공구와 주요 부품의 조달이 어렵게 되어 일시적인 정체 상태에 빠졌다.⁷⁾ 뒤이어 1950년에 발발한 6.25 전쟁 이후 경쟁력이 매우 약화하였으며, 설비의 노후화나 기술 수준의 지연 등이 매우 심각해졌다. 그러나, 일본은 태평양 전쟁 뒤 1950년대부터 설비 투자를 활발하게 하기 시작하였는데, 특히 도드라진 정책은 외국제 공작기계의 수입이었다. 이러한 정책 기조에 따라 일본의 공작기계 산업은 1970년대부터 크게 성장하기 시작해 1982년에는 미국을 제치고, 1985년에는 생산액으로 1조엔(現 환율로 약 90조 원) 규모로 산업이 성장하였다.⁸⁾

그런데도 미국은 최초로 NC 공작기계 개발해 기계공업 분야에 새로운 혁명을 불러일으킨 것은 역사적 사실이며, 이러한 일련의 기계공업의 발전 역사를 탐구함으로써 미래 산업의 이정표를 가늠해 보고자 한다. 그리하여 이 글에서는 1950년대와 1960년대의 미국의 공작기계 산업 발전연혁에 대해 알아보려고 한다. 특히, 미국의 과거 현황을 파악하기 위해 NC 공작기계의 초기 개발과정의 진행 현황을 알아보고, 1960년대의 개발 내력에 대해서 알아본다. 이를 바탕으로 1950년대와 1960년대의 미국 공작기계 산업의 발전 추이를 알아보면서, 경쟁력 상실로 이어진 요인을 도출해 시사하는 바를 찾고자 한다.

5) 이와 함께, 일본은 전시체제로 들어감에 따라 근대적 규모의 공장을 우리나라에 건설했으며, 전쟁 말기에 이르러서는 비행기 제작, 일부 기계 부품의 제작, 철도차량·선박용 기계와 일부 산업용 기계의 생산이 증대되었다. 위의 자료.

6) 이 시기 기계공업의 산업상 비중을 보면, 기계공업체 수는 1936년에는 344개 업체로 전체 제조업체 수의 5.8%이던 것이 1943년에는 1,354개 업체로 9.0% 증가하였으며, 생산액의 비중도 1936년 1.7%이던 것이 1943년에는 5.6%로 향상되었다. 기계류의 자금도는 1940년 15.8%에서 1944년에는 41.5%에 달하였다. KOTRA, “일본 공작기계 산업”, <https://dream.kotra.or.kr/kotranews/cms/news/actionKotraBoardDetail.do?SITE_NO=3&MENU_ID=200&CONTENTS_NO=1&bbsSn=403&pNttSn=176488>(최종방문일 2022년 4월 30일).

7) 1948년의 기계공업체 수는 543개에 불과하였으며, 농기구 제작을 비롯하여 선박 및 차량수리 등이 대부분이었다. 그러나 1950년 6·25전쟁으로 기존의 시설마저 크게 파괴되어 최악의 상태에 이르렀다. 당시의 피해 상황을 보면 피해업체 수가 284개 업체로서 전체의 35.8%이며, 기계시설 파괴도 23%에 이르렀다. 한국민족문화대백과사전, 앞의 자료.

8) KOTRA, 앞의 자료.

II. 수치제어(NC) 공작기계 개발의 시작: 1950년대 초반

1. 수치제어(NC) 공작기계의 최초 개발

NC 공작기계의 개발은 제2차 대전 이후 미국에서 시작되었다. 미국에서는 전쟁 이후의 공작 기계를 수치 데이터를 통해 가동하려는 시도가 있었고, 이러한 연구는 공작기계 산업의 발전으로 자연스럽게 이어졌다.⁹⁾ 이런 흐름을 주도적으로 이끈 사람은 바로 존 파슨스(John Parsons, 이하 ‘파슨스’로 명기함)였다. 파슨스는 미시간주(State of Michigan)에서 헬리콥터의 프로펠러를 생산하는 파슨스社(Parsons Corporation)를 운영하고 있었다.¹⁰⁾

사실, 헬리콥터의 회전 날개(rotor blade)는 회전마다 피치(Pitch)가 바뀌고, 구조적으로 높은 강도가 필요하다. 이 때문에 형상과 중량과 융복합된 구조의 최적화된 원인을 찾기 위해선 설계작업에서의 정확성이 필요했다. 그래서 파슨스는 방대한 시간이 필요한 설계작업을 단축을 위해 1947년에 IBM 602A Multiplier를 도입해 설계업무를 진행하였다.¹¹⁾

그런데, 기계의 설계 단계 이후 작업에서의 어려움은 회전 날개(rotor blade)의 제조공정이었다. 특히 문제가 된 점은 날개 모양과 피치(Pitch) 검사를 위해 많은 다른 형판을 만들어야 했다. 당시, 형판의 제작에는 판에 구멍(hole)을 뚫고, 구멍(hole)과 구멍(hole)을 선으로 연결해 윤곽을 잘라 내고, 이후 마감하는 방식이 취해졌다. 하지만, 이러한 절차는 많은 시간이 소요되고, 구멍(hole)과 구멍(hole)을 잇는 곡선의 정밀도를 높이는 것이 난도가 매우 높은 작업이었다. 이에 파슨스는 가공 시간을 절약하는 동시에 가공 정밀도를 높이기 위해 새로운 접근법을 개발하기 위해 고민하였다.¹²⁾ 즉, 더욱 정확한 윤곽을 완성하기 위해, 기존의 방법보다 훨씬 많은 좌표를 IBM 계산기를 활용해 도출하였고, 해당 수치 데이터에 기초해 가공작업을 실시하였다. 이러한 극렬한 노력에 따라 가공 정밀도는 매우 향상되어, 오랜 숙련도가 필요했던 판 위에서의 중간 위치결정의 조작에는 정밀한 기술이 필요하지 않게 되었다. 그러나 계산된 방대한 수의 수치를 기반으로 위치에 대한 최종적인 결정은 사람이 해야 했다, 이 때문에 중복 작업을 진행해야 했고,

9) 강철희, “공작기계 기술의 현재와 미래”, 한국정밀공학회지 제12권 제12호, 한국정밀공학회지, 1995.12, 5~6면.

10) Heinrich Arnold, “The recent history of the machine tool industry and the effects of technological change”, *University of Munich, Institute for Innovation Research and Technology Management*, 2001, pp.14~15.

11) Robin Mitchell, “What Is CNC Machining? A Look Into the History of This Technique”, <<https://control.com/news/What-Is-CNC-Machining-A-Look-Into-the-History-of-This-Technique/>> (Last visited April 30, 2022)

12) Roberto, Mazzoleni, “Innovation in the Machine Tool Industry: A Historical Perspective on the Dynamics of Comparative Advantage”, in Mowery, David C. and Richard R. Nelson (eds.), *Sources of Industrial Leadership: Studies of Seven Industries*, Cambridge U.P., 1999, p.412.

좌표를 잘못 판단할 수 있는 위험도 있었다. 파슨스는 이러한 문제를 해소하기 위해 펀치 카드(punch card) 정보로 기계가 자동으로 위치결정을 할 수 있는 방식을 고민하였지만, 그러한 자동화 시스템을 구축하기 위해선 많은 연구비가 필요하였다.¹³⁾

〈그림 1〉 1952년 MIT에서 시연된 최초 NC 기계



자료: Johnston Industrial Supply, <<https://www.johnstoncompanies.com/jc/birth-of-modern-machining-and-johnston-industrial-supply/>>

한편, 당시 미국의 정세는 제2차 세계대전의 종결 이후에 얼마 되지 않아 냉전(cold war)체제에 돌입했으며, 이와 함께 제2차 세계 대전 중 독일이 시현하였던, 초음속기에 관한 항공 기술의 개발이 필요하였다. 이에 고속성과 기동성이 매우 높은 요구 수준을 충족시키기 위해 기체의 디자인 개발과 함께 기체의 강도를 높이기 위해 소재의 개발에 총력을 기울였다. 이와 함께 대형 항공기 부품을 높은 정밀도로 제작하는 방안에 관해서도 연구를 진행하였다. 그리하여 미국의 공작기계 제조업체인 기딩&루이스(Giddings&Lewis, 이하 국문으로 명기함) 및 키어니&트레커(Kearney&Trecker, 이하 국문으로 명기함)는 미국 공군(U.S. Air Force, USAF)에 대해 기존 공작기계를 이용한 제작 방법을 제안했지만, 이들의 제안은 미국 공군을 만족시킬 수는 없었다.¹⁴⁾

이러한 상황을 알게 된 파슨스는 공군의 담당 부서를 방문해 그의 구상을 설명했는데, 담당자는 파슨스에게 공작기계의 실제 사용자인 록히드 마틴(Lockheed Martin, 이하 “록히드”로 명기함)을 방문해, 시험할 수 있도록 제안하였다. 당시, 록히드에서는 공군용 항공기의 날개 부분의 강도를 높이기 위해 기존까지의 리벳(rivet)의 고정 방식이 아니라 일체형 구조로 제작할 수

13) Cardoso Llach, Daniel, “Software Comes to Matter: Toward a Material History of Computational Design”, *Design Issues* 31, no.3 (July 2015), Massachusetts Institute of Technology, 2015, p.47.

14) Robert Forrant, Good Jobs and the Cutting Edge: The U.S. Machine Tool Industry and Sustainable Prosperity, *Working Paper* No. 199, 1997, p.3

없는지에 고민하고 있었다. 이에 록히드의 담당자는 파슨스의 제안에 큰 관심을 보이면서, 시제품을 요청하였다, 이후 1948년 말에 공군과 항공기 제조사의 대표자를 모아 형판의 안지름 및 절삭가공을 시현하였다.¹⁵⁾

공군과 제조사의 많은 관심을 알게 된 파슨스는 1949년 1월에 IBM의 왓슨(Watson)을 방문하여 펀치 카드(punch card)에 의한 기계제어장치의 개발을 제안한다. 왓슨은 파슨스에게 합작투자(joint venture)의 설립을 제안했지만, 당시 자금 조달 문제로 인해 이 제안은 보류되었다. 이후 IBM은 공군의 연구지원으로 펀치 카드식 제어(Punch card control)의 개발에 참여할 수 있었다.¹⁶⁾

이러한 경위를 거쳐 1949년 6월에는 파슨스는 공군과의 계약을 맺는다. 해당 내용은 카드 또는 테이프에 의해 제어되어 항공기의 날개 부분과 같은 윤곽을 자동으로 끊어 낼 수 있는 기계를 설계하고 제작하는 것으로 프로젝트 기간은 1년 9개월이었으며, 예산은 20만 달러(당시 환율로 약 25억 원)이었다. 파슨스는 이 미국 공군과의 계약성립을 통해 정밀한 가공을 실현하는 펀치 카드식 자동제어 고속 밀링 시스템인 카다마틱(Cardamatic)을 개발하고 있었다. 이 카다마틱(Cardamatic) 구상은 1948년 11월에 비즈니스 위크(Business Week)에 의해 소개되며, 계산기나 카드 펀치 장치가 없는 사용자에게 대해 파슨스사가 그러한 서비스를 제공하는 등 구체적인 비즈니스 계획도 추진되었다. 파슨스는 어디까지나 제조 현장의 요구에 맞는 개발 구상하고 있었다고 할 수 있다.¹⁷⁾

2. 수치제어(NC) 공작기계의 개발 참여자

파슨스사는 공군의 지원을 확보하였지만, 단독으로 개발을 수행이 가능한 전문지식이 없었다. 이에 파슨스는 IBM에 카드 판독기 개발을 스나이더 툴 앤 엔지니어링(Snyder Tool & Engineering, 이하, ‘스나이더’로 명기함)에 기계 제작을 각각 위탁함과 동시에 프로젝트에 필요한 인재를 새롭게 채용하였다. 구성원 중 기계 설계 기사인 로버트 H. 마쉬(Robert H. Marsh, 이하 ‘마쉬’로 명기함)는 제어장치의 설계에 관한 요령을 가진 매사추세츠 공과대학교(Massachusetts Institute of Technology, 이하 ‘MIT’로 명기함)의 서보메커니즘 연구소

15) Noble, *op. cit.*, pp.101-102.

16) IBM, *a history of progress 1890s to 2001*, 2008, p.18.

17) David Noble, *Forces of Production: A Social History of Industrial Automation*, Routledge; 1st edition, March 30, 2011, p.104.

(Servomechanisms Laboratory, 이하 국문으로 명기함)와 접촉한 이후에 파슨스社의 자동기계의 개발에 참여하게 되었다. 이러한 정부와 대학이 연계 연구는 제2차 세계대전에서 군사력을 높이기 위해 산업이나 대학과 심도 있는 연구를 해 온 것은 잘 알려진 사실이다.¹⁸⁾

특히, MIT는 미국 육해공군과 밀접한 연구 협업을 진행했으며, 당시 MIT는 국방부의 산하 연구기관과 같았다는 평가가 있다.¹⁹⁾ MIT는 1944년 해군의 비행 시뮬레이터 연구를 진행하기 위해 휘윈드(Whirlwind)라고 하는 컴퓨터 개발 프로젝트에 착수했다. 서보메커니즘 연구소는 휘윈드(Whirlwind) 개발에 적극적으로 참여하였다. 휘윈드(Whirlwind) 프로젝트는 미국 해군(U.S. Navy: USN)으로부터의 위탁받아 시작되었지만, 개발 기간 도중에 의견대립이 발생하고, 예산이 축소되는 등 여러 문제가 발생하여 개발이 중단되었다. 이 시기는 1949년에 파슨스가 공군과의 계약을 맺은 시기로서, 서보메커니즘 연구소가 새로운 컴퓨터 애플리케이션 개발 지원을 위해 미국 공군과의 접촉을 시도하던 시기와 겹친다고 할 수 있다.²⁰⁾

앞서 언급한 바와 같이 파슨스社와 공군과의 계약은 카다매틱(Cardamatic)을 판매하기 위한 절차였으며, 경제적인 생산을 하기 위한 절차였다. 이에 대해 서보메커니즘 연구소는 파슨스가 목표로 하는 개발내용과 공군과의 계약 내용이 다른 점에 대해 곤혹스러워했다. 또한, 서보메커니즘 연구소의 개발 과제는 비록 시간이 걸리더라도 연구소와 연구진의 명성을 드높일 수 있는 획기적인 성과를 얻을 기회라고 생각하였다.

이러한 의견 불일치는 개발 목표를 설정하는 단계에서 갈등으로 표출되었다. 사실, 공작기계의 수치제어는 위치결정제어(positioning control)와 연속통로제어(contouring control)로 구분된다. 전자는 장치의 마지막 위치만을 제어하는 것이지만, 후자는 장치가 이동하는 통로를 연속적으로 제어하는 방식으로 가공을 하는 것보다 훨씬 복잡한 작업이다. 파슨스社와 MIT는 개발을 진행하면서 서로 다른 태도를 보였다.

즉, 파슨스는 우선 위치결정 제어를 먼저 실현해야 한다고 주장했지만, 연구소는 공작기계의 동작을 현실로 제어할 수 있음을 보여주기 위해 1축 제어의 시제품을 조기에 완성하는 것이 중요하다고 하였다. 또한, 시제품에는 스나이더가 설계한 항공기 날개 부분의 부품 가공에 적합한 공작기계를 사용해야 한다고 주장하였다.²¹⁾ 그러나, 서보메커니즘 연구소는 더욱 복잡한

18) MIT Archives space, "Massachusetts Institute of Technology, Servomechanisms Laboratory records", <<https://archivesspace.mit.edu/repositories/2/resources/125>>(Last visited April 30, 2022)

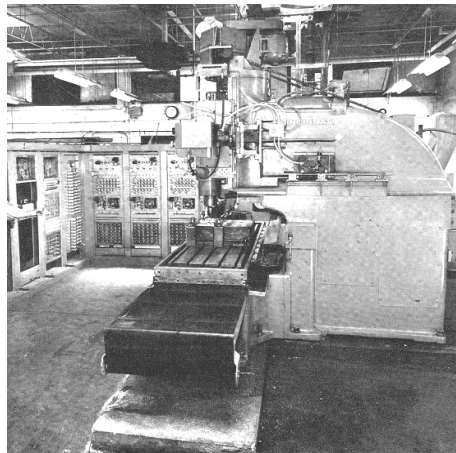
19) Noble, *op. cit.*, p.108.

20) MIT Archives space, "Massachusetts Institute of Technology, Project Whirlwind", <<https://archivesspace.mit.edu/repositories/2/resources/125>>(Last visited April 30, 2022)

연속통로제어(contouring control)의 실현을 목표로 했다. 우선 디지털 데이터 및 펄스 서보기구(pulse servomechanism)가 공작기계의 3축 제어에 적용 가능한지를 확인하고, 이후에 기술을 범용성이 높은 공작기계로 최적의 상태로 사용하기 위한 개발을 추진해야 한다고 주장했다. 또한, 이를 위해 스나이더가 설계하는 전용기가 아니라 이미 시장에 있는 3축 범용기를 사용해야 한다고 주장했다.²²⁾

양자의 의견이 대립하는 가운데, 파슨스가 예정하고 있던 IBM의 카드 판독기 시스템의 개발은 MIT가 주장하는 테이프 리더의 개발로 변경되고, 사용하는 공작기계도 스나이더 전용기에서 신시내티 밀링 머신(Cincinnati Milling Machine, 이하 ‘신시내티’로 명기함)의 하이드로 텔(Hydro-Tel)로 변경되었다. 결국, 프로젝트는 실질적으로 MIT가 주도하게 되어, 개발의 방향성이 파슨스의 구상과 멀어진다. 공군도 고도의 기술개발을 추진하면서 개발 비용도 예정액을 초과하였다. 파슨스는 공군과의 계약기간 연장과 추가 연구비를 지원받게 된다면, 자신의 프로젝트를 완수할 수 있다고 주장했지만, 1950년 말에 협상을 진행한 결과, MIT와 공군은 파슨스社를 제외하고 개발계약을 맺는다.²³⁾

〈그림 2〉 신시내티 밀링 머신 “Hydro-Tel”



자료: cnc-life, <<https://medium.com/cnc-life/history-of-cnc-machining-part-1-2a4b290d994d>>

21) Roger Miranda Colorado and Gamaliel Contreras Castro, “Closed-Loop Identification Applied to a DC Servomechanism: Controller Gains Analysis”, *Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2013, 2013, p.2.

22) History of CNC Machining, <<https://medium.com/cnc-life/history-of-cnc-machining-part-1-2a4b290d994d>> (Last visited April 30, 2022)

23) *Ibid.*

이때 MIT가 공군과 체결한 개발계약은 파슨스와 공군 사이의 계약과는 다르게 원가 가산 계약(cost-plus contract)이 고려되었다. 또한, 얼마나 비용이 소요될지를 염려할 필요가 없었다. 한편, 프로젝트에서 배제된 파슨스는 현실의 생산업무에 적합한 자동제어시스템인 디지털론(Digitron)의 개발을 기획하고, 미국 공군에게 다시 지원을 요청했지만, 미국 공군은 이를 거절했다. 파슨스사와 미국 공군과의 계약성립에서 3년 3개월을 거친 1952년 9월 중반 서보메커니즘 연구소는 NC 공작기계 제1호기인 3차원 연속통로제어(contouring control) 밀링 머신을 공개한다.²⁴⁾

이 1호기의 시제품 제작을 위해 공작기계 제조업체, 항공기 부품 제조업체 등, 세 개의 그룹으로 나누어 총 3일 동안 130단체·합계 242명이 참가하는 대규모가 행사가 개최되었다. MIT는 총 36만 달러(당시 환율로 약 45억 원)를 이 프로젝트에 지출했으며, 28만 달러(당시 환율로 약 35억 원)는 공군에서 직접적으로 지원받고, 나머지 8만 달러(당시 환율로 약 10억 원)는 파슨스사를 통해 각각 MIT에 지급되었다. 이상과 같이 위치결정의 오류를 줄이고 싶다는 파슨스의 발상으로 시작한 NC 개발은 서보메커니즘 연구소의 참여와 미국 공군 요청의 고도화를 배경으로 연속통로제어(contouring control)보다 높은 성과를 도출하였다고 할 수 있다.²⁵⁾ 이러한 개발 성과가 어떠한 경위로 상용화되어 가는지를 장(章)을 바꾸어 탐구하고자 한다.

Ⅲ. 수치제어(NC) 공작기계의 상용화의 시작: 1950년대 중반

1. 수치제어(NC) 공작기계 제조업체의 등장

서보메커니즘 연구소는 1951년부터 NC 1호에 대해 개발을 시작하였다. 이후 외부에서 프로젝트 추진 사항에 대한 문의가 많아졌고, 연구진에 대한 강연 의뢰도 늘어갔다. 서보메커니즘 연구소는 NC 관련 정보는 공개하는 원칙을 취하고 있었기 때문에, 강연은 물론 견학도 허용했다. 이러한 개방정책으로 인해 NC 개발에 관한 내용이 기계 공업산업에 알려지게 되었다. 그러나, 신기술 기반 제품의 상용화에 대해 제조업체의 반응은 미온적이었다.²⁶⁾ 이는 이미 높은 정확도를 보여주었던 기존 공작기계 기술에 대한 신뢰감과 당시의 라디오나 텔레비전에 사용되어 고장

24) Daniel Southwick, *Expertise in the Age of Digital Fabrication*, University of Toronto, 2019, pp.41-42.

25) History of CNC Machining, *op. cit.*

26) MIT Archives space, *op. cit.*

이 원인이 되었던 진공관(Vacuum tube)에 대한 불신감 등에 의한 것이 큰 요인이었다. 또한 개발단계에 많은 연구비를 투입해야 하는 부담감도 있었다. 게다가 고가 제품의 생산 가능성 유무와 높은 유지보수 비용에 대한 우려도 NC 개발에 대한 중요한 문제요인이었다. 게다가 국제정세와 관련된 요인으로 6.25 전쟁의 군수 조달에 더 집중하고 있었던 점도 있다.²⁷⁾

서보메커니즘 연구소의 연구진과 미국 공군도 이러한 문제점을 인식하고, NC 개발에 대한 불신감을 없애고자 고민하였다. 이에 NC 1호의 시제품 출시에 앞서 1952년 7월에 서보메커니즘 연구소와 공군 사이에 NC 1호와 기존 기기와의 비교 연구를 통해 NC 개발의 우수성을 널리 알리기로 계획하였다. 서보메커니즘 연구소는 이 계획에 따라 NC의 우수성을 홍보하기 위해 공작기계·전자·항공기 관련 각 제조업체에 대한 방문 강연도 동시에 추진하였다.²⁸⁾

그러나 현실에는 제조업체들이 NC 공작기계의 상품화에 적극적으로 나서는 모습은 보이지 않았다. 공군은 이러한 이유를 비용적 문제가 있다는 것으로 인식하고, 1954년 초에 NC 공작기계의 상품화에 대한 연구비 지원 프로그램을 개시하였다. 그러나 연구비 지원 신청은 항공기 부품제조기업에서만 신청이 있었고, 공작기계 관련 제조업체인 기딩&루이스와 키어니&트레커의 두 개의 회사에 머물렀다. 당시 업계 최대 규모였던 신시내티는 이때까지 참가하지 않았다. 이후 이듬해인 1955년에 서보메커니즘 연구소가 미국 공작기계공업회(National Machine Tool Builders Association : 이하 NMTBA로 약칭함)에 NC 개발 프로젝트에의 참가를 요구했을 때, NMTBA는 이 제안을 거절한다. NMTBA는 공동개발 연구는 연구 개발 활동(영업비밀)을 전략으로 삼는 제조업체의 경영방침에 맞지 않는다는 이유였다.²⁹⁾

그래서 1955년에는 자금원조 프로그램에 기초한 2개의 개발 계획 수립하고 추진한다. 하나는 키어니&트레커와 벤딕스(Bendix)가 글렌 마틴(Glenn Martin)을 위한 MIT 방식의 NC 밀링 머신의 개발하는 프로젝트였고, 다른 하나는 기딩&루이스와 제너럴 일렉트릭(General Electric: GE)가 록히드의 의뢰로 넘머리코드(Numericcode)라는 NC 시스템을 이용한 스킨밀(Skin mill)을 개발하는 프로젝트였다. 이러한 연구에 기초해 항공기 관련 자재 조달에 해당하는 AMC(Air Material Command)와 미국 공군 내의 NC 개발을 추진에 찬성하는 사람들이 상용화를 추진하기 위한 새로운 장치를 개발하였다. 이것이 공군에 의한 NC 공작기계의 대량 조달(bulk-buy)계획이다.³⁰⁾

27) David Noble, *Ibid.*, p.25.

28) *Ibid.*, p.26.

29) Axel Wieandt, "Innovation and the Creation, Development and Destruction of Markets in the World Machine Tool Industry", *Small Business Economics* Vol. 6, No. 6, 1994, p.422.

그러나 대량조달계획은 전쟁에서 승리하기 위한 군수물자 조달을 위해 대량의 공작기계가 필요하지만, 전쟁 예비태세에서의 군수생산에 어떠한 기종이 얼마나 필요한가를 추정하기는 쉽지 않았다. 제2차 세계 대전의 발발 이후의 군사 물자 조달담당자는 신속한 개발의 진행을 요청받았다. 공작기계 제조업체도 인력 부족으로 인해, 24시간 생산 체제로의 생산을 강요받았고, 전쟁의 종결 이후에 전사에서 사용한 공작기계 약 30만 대가 시장에 증저가로 방출되었다. 이러한 양상은 6.25 전쟁 때에도 반복되었다.

이 경험에 따라 미국 공군은 항공기 제조업체가 군수생산을 위해 사용하는 공작기계 중 특히 리드 타임(lead time)이 긴 기종을 대량 생산해 비축할 방침을 수립한다. 록히드 시제품 이후에 공군은 이미 정해져 있던 1955년의 조달계획을 재검토해 항공기공업회(Aircraft Industries Association, 이하 AIA로 명기함)³¹⁾와 협의한 이후에 스킨밀(Skin mill) 105대를 모두 NC 시스템으로 전환하기로 하였다.³²⁾

이러한 공군의 계획은 공작기계 제조업체를 선도하는 기업들에 대해 NC의 상용화를 진행할 수 있도록 환경을 조성하는 것에 성공했다. 계획에 참여하는 기업들은 공군이 요구하는 사양을 충족하는 부서가 있어야 하며, 군 담당자 앞에서 시제품 부품을 만들고, 이후 허용치의 범위 내의 오차 여부를 보잉(Boeing)에서 확인받아야 한다. 이러한 시험을 거쳐, 신시내티, 키어니&트레커, 제너럴 일렉트릭·콘코드 컨트롤즈(Concord Controls)·기딩&루이스, 모레이 머신(Morey Machine), 모두 4개 그룹의 기업으로 구성돼 기업 규모에 비례해 제조생산을 배분하였다.³³⁾ 이러한 결과, 미국 최대의 공작기계 제조업체인 신시내티가 가장 업무를 할당받게 되었다. 그다음 순위는 기딩&루이스와 키어니&트레커였으며, 모레이 머신(Morey Machine)은 일부 업무를 할당받았다. 제어장치는 제너럴 일렉트릭, 콘코드 컨트롤즈가 절반에 해당하는 55개를 제조하게 되었다.³⁴⁾

2. 자동 프로그래밍 도구(APT)의 개발

앞서 언급한 바와 같이 서보메커니즘 연구소는 공군의 위탁을 받아, NC 1호와 기존 기기를

30) Bo Carlsson, Small-Scale Industry at a Crossroads: U.S. Machine Tools in Global Perspective, *Small Business Economics* Vol. 1, No. 4, 1989, p.248.

31) J. Francis Reintjes, *Numerical Control: Making a New Technology*, Oxford U.P., 1991, p.86

32) Noble, *op. cit.*, p.201.

33) *Ibid.* p.202.

34) *Ibid.*

비교 연구했다. 연구소는 NC 1호를 개발해 이미 실제 가공작업을 하고 있었기 때문에, 가공에 관련된 각종 자료를 수집하는 것은 어렵지 않았다. 비교 연구의 결과로 NC에 의한 부품 제조 비용은 기존 부품비용보다 낮아졌지만 개발 관련 비용, 특히 프로그래밍 개발에 드는 비용이 가공 시간의 단축에 의한 비용 절감분을 이상을 상회하는 것이 판명되었다.³⁵⁾ 이 같은 무렵, AIA 항공기체제조설비위원회(Airframe Manufacturing Equipment Committee)는 NC 분과위원회를 조직해 현행 프로그래밍 방식과 향후 추진해야 하는 방향성에 대한 검토를 시작하였다.³⁶⁾

이러한 동향에 따라 1955년 공군은 서보메커니즘 연구소와의 사이에 자동 프로그래밍 소프트웨어의 개발에 관한 개발계약을 맺는다. 당시의 서보메커니즘 연구소에서는 공군으로부터의 다른 위탁연구로 디지털 비행 테스트 장치 개발 연구가 거의 끝나가고 있었고, 더글라스 로스(Douglas T. Ross)가 이끄는 팀이 진행할 수 있는 신규 과제를 찾고 있었다. 이에 따라 1956년 여름, 로스를 리더로 하는 컴퓨터 응용 연구그룹이 조직되고, NC 공작기계를 위한 프로그래밍 언어인 APT(Automatically Programmed Tool system)의 개발이 시작된다.³⁷⁾

〈그림 3〉 APT의 시현 모습



자료: MIT Science Reporter-“Automatically Programmed Tools” (1959), <<https://www.youtube.com/watch?v=ob9NV8mmm20>>

로스를 비롯한 연구자들은 공작기계 기술이나 수치제어 기술에 익숙한 것은 아니었지만, 1956년 말에는 APT의 기본구조를 결정하고 최초의 중간보고서를 작성하였다. 이후, APT의 개발은 AIA와의 공동으로 진행되게 되었다. 공동연구의 매개 역할을 한 것은 NC 1호의 개발로부터 서보메커니즘 연구소와 협업을 진행해온 미국 공군이었다. 위에서 언급한 AIA의 NC 분과

35) Reintjes, *op. cit.*, p.65.

36) AIA, 1959 annual report, 1960, pp.27~28.

37) Reintjes, *op. cit.*, pp.82.

위원회의 동향을 알고 있던 미국 공군은 로스에게 AIA에 참여할 수 있도록 제안하였다.³⁸⁾

2D-APT-II 시스템이라 불리는 프로젝트에는 9개의 항공기 제조업체와 IBM이 참가해, 연구소에서 개발한 아키텍처를 기반으로 각 기업에 할당된 분야의 프로그램 개발을 진행했다. 그들은 로스의 프로그래밍 언어의 기본에 따라 다른 패키지와와의 일관성을 유지하면서 개발하는 어려운 작업을 진행했지만, 프로젝트 시작 후 약 1년 후에는 1단계의 개발을 완료하고 필드 테스트를 진행하게 되었다.³⁹⁾

1958년 완성된 APT II에서는 곡선을 입체적으로 구현하는 것이 가능하게 된 것 이외에 직선 절삭의 끝 지점을 컴퓨터가 자동으로 판단하는 등의 특징 있는 기능이 담겨 있었다. 서보메커니즘 연구소는 자신들의 개발에 대한 성과를 유의미하게 평가했지만, 사용자 측의 평가는 같지 않았다. 애초 사용자에게는 메인 프레임에 대한 투자와 숙련 프로그래머의 확보라는 큰 부담이 있었다. 게다가 APT는 복잡한 가공에 활용할 수 있었지만, 일반적인 부품 가공에는 적합하지 않았고, 단순한 위치결정 등을 할 때는 매뉴얼 프로그래밍보다 시간이 많이 소요되었다.⁴⁰⁾

NC 기술개발의 시행처였던 미국 공군은 NC 공작기계의 상품화에서도 주도적인 역할을 담당했다. 미국 공군은 대량조달계획을 확립해, 공작기계 제조업체 및 전자공학 제조업체의 참여를 유도하였다. 1949년부터 10년간 미국 공군은 적어도 6,200만 달러(당시 환율로 약 7천 8백억 원)를 NC 관련 프로젝트에 지원하였다.⁴¹⁾ 이렇게 미국의 NC 공작기계의 상용화는 시작되었다고 할 수 있다.

IV. 수치제어(NC) 공작기계 개발 확산: 1960년대 이후

1. 수치제어(NC) 공작기계 개발 및 확산

1950년대의 NC 공작기계의 상용화에 관한 변천 과정 이후, 1960년대의 NC 공작기계의 개발 및 확산에 대해 알아본다. 앞서 언급한 바와 같이 NC 공작기계의 개발은 공군 주도로 진행되

38) *Ibid.*, pp.82-83

39) *Ibid.*, pp.84-86.

40) MIT Commission on Industrial Productivity, *The US Machine Tool Industry and its Foreign Competitors*, The MIT Press, 1989, p.22.

41) Anthony DiFilippo, *Military Spending and Industrial Decline: A Study of the American Machine Tool Industry*, Greenwood Press, 1986, p.57

었다. 이후 항공기 산업에서 필요한 복잡하고, 정교한 가공 요구를 충족하는 연속통로제어(contouring control)의 개발에 주력하였다. 이러한 과정에서 기딩&루이스의 NC 밀링 머신인 디밀(DiMil)과 같은 주요 기종도 등장하였다.⁴²⁾

당시의 NC 공작기계는 기존의 매뉴얼의 밀링 머신이나 선반에 제어장치나 드라이브를 설치하는 성능개선(Retrofit) 방식이 기본이었지만, 1958년에는 NC 장점을 최대한 활용하는 것을 목표로 해, 획기적인 신제품이 키어니&트레커에 의해 만들어졌다. 이는 다양한 가공방식을 활용할 수 있는 머시닝 센터인 밀워키-마틱(Milwaukee-Matic)였다. 이 시스템은 공구의 교환을 자동으로 할 수 있는 자동 공구 교환 장치(Automatic Tool Changer: ATC)를 구축해, 밀링 가공·중간 가공·구멍 가공·연마가공 등의 다양한 가공방식을 활용할 수 있다. 이 시스템은 휴즈항공(Hughes Aircraft)의 생산설비에 도입되었으며, 1960년대에는 매주 2대씩 생산되어 판매될 정도의 인기 상품이었다.⁴³⁾

한편, 이 밀워키-마틱(Milwaukee-Matic) 등장할 무렵, 버그 톨 매뉴팩처링(Burg Tool Manufacturing, 이하 국문으로 명기함)이라는 기업이 NC Burgmaster 2-BH를 개발했다. 버그 톨 매뉴팩처링은 1946년에 설립되어 가공 현장에서 널리 사용되는 드릴링 머신(drilling machine)을 개발하고, 터렛 드릴링 머신(turret drilling machine)이라는 제품을 생산하였다. 드릴링 머신(drilling machine)은 한 번에 1개의 구멍만 뚫을 수 있다. 가령, 5종류의 구멍을 뚫을 때는 5개 종류의 공구가 필요하게 되어, 가공보다 공구 준비 시간이 더 많이 소요된다. 그래서 1대의 드릴링 머신(drilling machine)에 여러 공구를 접목해, 작업 준비 시간을 줄이도록 노력했다. 이에 탄생한 것이 터렛 헤드(turret head)에 복수 공구를 장착한 터렛 드릴링 머신(turret drilling machine) Burgmaster 1-A이다. 이 기기의 판매를 통해, 급성장을 이루는 동시에 항공기 부품 제조업체나 자동차 부품 제조업체를 포함한 다양한 사용자로부터 높은 평가를 얻게 되었다.⁴⁴⁾

NC Burgmaster 2-BH는 회사의 주력 제품인 터렛 드릴링 머신(drilling machine)을 기초로 한 것으로, 기계 자체에 특별한 신규성이 있었던 것은 아니다. 그러나 터렛 드릴링 머신(turret drilling machine)은 간단한 조작으로 다양한 가공을 효율적으로 실행할 수 있는 기계를 최초로 NC화한 것으로 상대적으로 저렴하고, 프로그래밍도 간단하였기에, NC와 무관한 일반 시장을

42) CNC Services Northwest, LLC, <<http://www.cncsnw.com/>>(Last visited April 30, 2022).

43) E. Sciberas and B. D. Payne, *Machine Tool Industry: Technical Change and International Competitiveness*, Longman Group Limited, 1985, p.29

44) Max, Holland, *From Industry to Alchemy: Burgmaster, A Machine Tool Company*, Beard Books, 2002, pp.13.-16.

개척하는 상품(기계)으로서 큰 주목을 받았다. 이러한 성과를 통해 1960년대 초반에 신시내티를 포함한 큰 규모의 회사들이 NC 터렛 드릴링 머신(turret drilling machine) 개발에 참여하였다. 특히, 1961년에는 프랫&휘트니(Prat&Whitney)가 고성능 및 중저가의 NC 드릴링 머신(NC drilling machine)인 테이프오매틱(Tape-O-Matic)을 출시하였다.⁴⁵⁾

〈그림 4〉 프랫&휘트니(Prat&Whitney)의 테이프오매틱(Tape-O-Matic) 외관



자료: proxibid, <<https://bit.ly/3xJghzl>>

이 같은 일련의 내용들은 파슨스가 구상했던 일반 제조공정에서 사용될 수 있는 단순 NC 공작기계의 상용화가 진행되었다고 할 수 있다. 아메리칸 메카니스트(American Machinist)는 1964년 10월에 “NC: 두 번째 10년(Numerical Control: The Second Decade)”라고 하는 NC 공작기계의 특집 기사를 기획해, 그중에서 위와 같은 개발의 추세에 대해 NC는 달리는 것을 배우고 걷는 법을 배웠다고 표현하였다.⁴⁶⁾ 이 특집호의 권말에는 1964년 시점에서 미국 내에서 판매되고 있는 대부분의 NC 공작기계의 사양 등을 망라한 목록이 수록되어 있으며, 이 부분에서도 약 3분의 2를 위치결정 제어장치가 차지하고 있어, 더 단순한 제품의 개발이 활발하게 이루어지고 있었다.⁴⁷⁾

같은 보고서에 의하자면, 미국에서는 1954년 1월 1일부터 1963년 12월 31일에 이르는 10년 간에 3,583대의 NC 공작기계가 출시되었지만, 그 세부 출하명세는 1954~1958년의 출하 대수

45) *Ibid.*, p.40.

46) American Machinist, October 26, 1964, p.NC2

47) *Ibid.*, p.NC6.

는 5% 이상이고, 1959~1961년에는 31%, 1962~1963년이 64%로 많은 차이로 수출이 되었다. 이같이 NC 공작기계의 출하대 수가 1960년대 이후 급증하고 있는 이유는 단순한 기계의 상용화가 활발해진 것과 관련이 있다. 실제로, 3,583대에 대해 제어기능별로 보자면, 위치결정 제어장치가 2,478대를 차지하고 있다.⁴⁸⁾ 그리고 사용자를 살펴보자면, 항공우주산업계에서 가장 많이 사용했으며⁴⁹⁾, 두 번째로는 공작기계 산업에서 많이 사용했다.⁵⁰⁾ 미국 최대의 산업인 자동차 산업 부문에서는 NC 공작기계의 도입 실적은 194대에 그쳤다. 그러나 아메리칸 메카니스트(American Machinist)는 NC 시스템이 산업에 본격적으로 도입되어 제조 분야뿐만 아니라 마케팅 부분에서도 큰 변화가 있을 것이라고 예상하였다.⁵¹⁾

1950년대 미국의 자동차 산업에서는 복수의 트랜스퍼머신(transfer machine)을 연속적인 시스템으로 움직이는 디트로이트 자동화(Detroit Automation)의 도입이 진행되어 표준화된 부품의 대량 생산 능력이 크게 높아졌지만, 한편으로 생산 시스템의 유연성의 부족이 문제가 발생했다.⁵²⁾ 예를 들어, 높은 유연성이 요구되는 금형의 제작 등에 NC 공작기계를 활용하면서, 자동화(Automation)의 대량 생산 능력과 조화하게 된다면, 새로운 모델의 설계로부터 시장 투입까지의 리드 타임(lead time)을 줄일 수 있어서 적시의 디자인을 시장에 출시할 수 있으므로 전략적으로 큰 의미가 있다는 것이 아메리칸 메카니스트(American Machinist)의 의견이었다.⁵³⁾

앞서 언급한 내용에서 이러한 사용자 산업의 동정이나 반도체 기술의 진화 등을 배경으로 차후 10년 동안에는 NC 다른 산업 분야로 확산하는 것은 분명하고, 빠른 속도로 기술개발이 진행될 것으로 예상했다.⁵⁴⁾ 당시 NC 공작기계가 널리 일반 제조업으로 도입되기 위해서는 극복해야 할 과제도 있었다. 즉, 가격에 대한 문제로서 1950년대 말 이후 위치결정 제어 기계의 개발·상품화가 시작되었지만, 가격이 상승하는 요인에 대해 NC 장치에 있다고 생각된다.⁵⁵⁾ 사실, 1964년 즈음에 미국 기업이 생산하는 NC 장치는 모두 34개 회사에서 54개 종류나 되었다. 그리고 제어기능별로는 위치결정이 13개 종류, 위치결정·직선 절삭이 28개 종류, 윤곽 제어

48) *Ibid.*, p.NC2.

49) 1964년 1월 1일 자로 629대를 설치하였다. *Ibid.*, p.NC2.

50) 총 490대이다. *Ibid.*, p.NC2.

51) *Ibid.*, p.NC3, NC8

52) Carlsson, Bo, "The Development and Use of Machine Tools in Historical Perspective", *Journal of Economic Behavior and Organizations*, 5, 1984, p.102.

53) *Ibid.*

54) American Machinist, *Ibid.*, p.NC10 .

55) MIT Commission on Industrial Productivity, *op. cit.*, p.24.

11개 종류, 그 외가 2개 종류였다. 이는 상대적으로 단순한 제어기능을 갖춘 NC 장치만으로도 40개 종류가 넘는 제품이 시장에 출시되었다고 할 수 있다. 특히, 버그마스터(Burgmaster)⁵⁶⁾의 인기 제품인 NC 터렛 드릴링 머신(NC turret drilling machine)은 벤디스(Bendix), 제너럴 일렉트릭(GE), 휴즈(Hughes), 림(Rheem) 등이 사용하였다.⁵⁷⁾

당시 NC 장치의 유형에는 대형제품이 많았기 때문에 대형기계를 주로 제조 생산하는 업체더라도 양상에 따른 비용이 많이 소요되었다. NC 공작기계의 일반 제조업에의 보급을 방해하는 요인은 가격 이외에도 있었다. 그중 하나는 프로그래밍, 트레이닝, 컴퓨터 지원, 유지보수 등에 필요한 비용이다. 사용자가 대기업이라면 이러한 업무에 많은 담당자를 배치할 수 있지만, 소규모 기업의 경우에는 그러한 여유는 없었다. 또 다른 중요 요소는 생산기업과 구매자 사이의 요구 불일치가 있었다. 즉, 당시의 기계 구매자들은 NC 장치의 고유 기능보다 더 높은 수준을 요구했다.⁵⁸⁾

2. 수치제어(NC) 공작기계 산업의 특징

위에서 언급했듯이 1964년 10월의 아메리칸 메카니스트(American Machinist)는 NC 공작기계가 미만의 규모로 미국 산업에 도입이 되리라고 전망하고, 그에 적합한 제품 개발에 대한 기대를 언급하였다. 그러나 1960년대 후반의 미국에서는 이와 다른 전개가 진행되었다. 즉, 증가 경향에 있던 단순한 위치결정 제어 기계의 출하액은 1967년을 경계로 급속히 감소하였고, 1968년 이후에는 연속통로제어(contouring control) 기계의 출하액에 크게 떨어졌다. 이러한 추세가 가장 현저하게 나타나고 있는 것이 드릴링 머신(drilling machine) 부분이었다.⁵⁹⁾

드릴링 머신(drilling machine)의 연간 생산 대수는 1961년의 약 200대에서 현저히 증가하고, 1966년에는 약 1,150대에 이르지만, 이후에는 많이 감소해, 1970년에는 1961년과 거의 같은 수준에까지 침체하였다. 미국 상무부(U.S. Department of Commerce)의 자료에 따르면, 1964~1968년 5년간 항공기 산업이 다른 산업을 크게 이끌 1,718대의 NC 공작기계를 구매하고, 이와 별도로 약 1,404대가 정부 예산으로 구매되고, 그 대부분은 항공기 산업의 제작

56) 1961년에 버그 툴 매뉴팩처링(Burg Tool Manufacturing)은 버그마스터(Burgmaster)로 사명을 변경하였다. Chicagotribune, <<https://www.chicagotribune.com/news/ct-xpm-1989-05-28-8902040802-story.html>>(Last visited April 30, 2022)

57) American Machinist, *ibid.*, pp.NC26-41

58) MIT Commission on Industrial Productivity, *op. cit.*, p.24.

59) Mazzoleni, Roberto, *ibid.*, p.184.

공장에 설치되었다.⁶⁰⁾

1950년대 말 이후 개발되기 시작해 제조업에서 보급될 것으로 예상하였던 NC 공작기계는 1960년대 후반에는 예상보다 빨리 보급되기 시작하였다. 이러한 배경에는 베트남 전쟁의 개입, 우주개발의 시작이라는 요인이 있었다. 이와 관련해 1965년 5월의 아메리칸 메카니스트(American Machinist)에서 “Buy 551 NC profilers by 1969”이라는 글에서 항공 관련 제조업체·공작기계 제조업체 등의 대표자 20명으로 구성되는 공작기계 자문위원회가 미국 공군에 대해 실시한 제언의 내용을 소개하였다.⁶¹⁾ 이 기사에 의하면, 정부의 수탁업자와 그 하청업자는 프로파일러를 2,753대로(NC: 356대, copying control: 2,397대) 보유하고 있지만, 이들은 기존에 다용도로 이용되어온 알루미늄 등의 소재를 가공을 위해 설계되었다. 향후 우주개발을 비롯한 고급 분야에서 사용이 진행되는 난삭재(hard-to-machine materials)에는 대부분 처리가 곤란하고, 이 분야에 요구되는 높은 정밀도를 만족시키는 것도 불충분하다고 하였다.⁶²⁾

따라서, 난삭재 가공에 적합하고, 공차 0.002인치 이내의 정밀도를 가진 NC 프로파일러 551대를 1969년까지 조달하는 총액 2.5억 달러(당시 환율로 약 3조 원)의 수급 계획을 즉시 시작해야 한다는 것이 자문위원회에서 조언하였다. 이러한 새로운 대량 수급 계획이 많은 공작기계 제조업체나 전자공학 제조업체에 큰 영향을 주었다는 것을 예측할 수 있다. 아메리칸 메카니스트(American Machinist)의 글과 같은 정부자금에 의한 공작기계의 조달계획에서는 설비가 설치되고 운용되기 위해 4~5년 전에 기계의 사양이 공표되었다. 공표된 사양은 명확한 기술적 목표를 달성하기 위해 유력 제조업체를 개발에 활용할 수 있는 요인으로 고려되었다. 또한, 이 개발에는 비용을 신경 쓰지 않고 실시할 수 있고, 안정적인 이익을 전망할 수 있는 이점도 있었다.

이러한 대량 수급 수급 계획을 통해 구매할 수 있는 공작기계의 가격은 기본적으로 원가 가산 방식(cost-plus)으로 비용에 일정 비율의 보상을 지급하는 방식으로 결정되었다. 게다가 케네디 정권하에서 국방부 장관이 된 로버트 맥나마라(Robert MacNamara)가 군수 조달의 비용 산정에 취득원가(historical costing)라고 하는 방식을 도입해 비용의 제약이 완화되었다. 이 방식 아래에서는 현실적인 비용 견적과는 무관하게 과거의 비용 증가를 기초로 산정된 비율까지 비용을 늘리는 것이 인정된 것이라고 할 수 있다.⁶³⁾

60) *Ibid.*, p.184.

61) American Machinist, May 24, 1965, pp.77-78.

62) Wei Fan, Wei Ji, Lihui Wang, Lianyu Zheng & Yahui Wang, “A review on cutting tool technology in machining of Ni-based superalloys”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 110, 2020, p.2863.

63) Seymour, Melman, “How the Yankees Lost Their Know-How,” *Technology Review*, October, 1983, p.58.

이상의 내용을 통해, 당시의 제조업체가 판매시장에서 이용되는 NC 공작기계의 개발 및 제조에서 합리성이 있었다고 할 수 있다. 이러한 측면은 두 가지 사항에 대해 시사하는 바가 있다고 할 수 있다.

첫째, 판매시장에서 비즈니스 모델을 생각할 필요가 없었다. 즉, 제품의 구매자도 구매자에게 줄 가격이 미리 정해져 있었다는 점이다. 또한, 어떤 비용 구조를 취하고 어떻게 이익을 창출할 것인지는 기업으로서 가장 중요하고 어려운 문제지만 고민할 필요가 없었다. 미국의 공작기계 산업에 관한 보고서에서는 위와 같은 비용산정방식 아래에서는 첨단 기계설비 도입 등 생산의 효율화를 도모함으로써 비용을 낮추려는 성과보수가 지급하지 않았다고 지적했다.⁶⁴⁾ 그리고 기존의 미국 공작기계 제조업체는 비용 최소화를 추구해 왔지만, 취득원가(historical costing)의 도입 때문에 계약 제조업체는 반대로 비용을 늘리는 것을 생각하게 되어, 한때 공작기계 제조업체가 추구하고 있던 비용 최소화는 보조금의 범위 내에서 비용의 최대화로 대체되었음을 알 수 있다.⁶⁵⁾

둘째, 공작기계 제조업체가 판매시장과 깊은 관계가 있었다. 이 때문에 복합기업(Conglomerate)의 인수 대상이 되었다. 미국에서의 가장 인기가 있었던 복합기업은 1950년대 말부터 높은 성장을 이룩한 전자공학(electronics) 관련 회사는 특히 인기가 있었다. NC 시스템의 도입으로 인해 변모를 추진하는 공작기계 기업은 이에 해당하였다. 또한, 공작기계 제조업체의 대부분은 창업자의 가족과 연관된 기업으로 그렇지 않은 경우에도 주식의 소유는 소수의 주주에 집중되었다. 게다가 경기변동을 받기 쉽다는 산업의 특성상, 이름이 널리 알려진 공작기계 제조업체는 일반적으로 보수적으로 운영되고 있어 차입 비율이 낮았다. 이들은 모두 인수 대상을 찾는 복합기업(Conglomerate)에 알맞은 조건이었다.

그리고 무엇보다 공작기계 시장에서는 군수산업이라는 확실한 고객이 있었다. 미국이 베트남에 대한 군사 개입 정도를 높이는 가운데 공작기계 업체에 대한 기대는 더욱 높아지고, 1960년대 중반 이후 공작기계 제조업체는 모두가 인수를 원하는 기업이었다.⁶⁶⁾ 당시의 미국 상무부(United States Department of Commerce)는 공작기계 산업의 시장 상황에 대한 합병이나 인수 때문에 독립된 산업의 지위와 새로운 생산공정이나 생산방법의 개발, 혁신 담당자의 지위를 상실하고, 하나의 산업으로서의 독자성이 손상되어 산업 내의 지위가 저하될 우려가 있었다.

64) National Research Council, *op. cit.*, p.56.

65) Melman, *ibid.*, p.60.

66) Holland, *op. cit.*, pp.59-60.

실제로 복합기업(Conglomerate)의 산하에 들어간 공작기계 제조업체 중에는 그때까지 구축해 온 경쟁력을 상실해 버리는 예도 있었다.⁶⁷⁾

앞서 언급한 버그 톨 매뉴팩처링은 그중 하나며, 복합기업(Conglomerate)에 의해 회사의 인수 경위나 인수 이후의 사업 변화에 관한 연구가 진행되었다.⁶⁸⁾ 버그마스터(Burgmaster)의 경우에는 1965년에 후다이유(Houdaille)라는 복합기업(Conglomerate)의 산하에 들어가 단기적으로 설비 투자 자금을 얻는 등의 장점을 누렸다. 그러나 눈에 띄지 않는 이익을 요구하는 복합기업(Conglomerate)으로부터의 간섭이 심해졌다. 본사로부터 파견된 경영자는 기존의 경쟁력 있던 제품과는 다르게 사용자에게 있어서 분명히 과잉 성능의 기계를 개발하거나 기존의 인기 제품에 대한 비용을 대폭 인상하는 무리수를 두었다. 최종적으로 회사는 사업으로서의 매력조차도 하지 않고, 설비를 날개로 판매하는 형태로 폐업하기에 이르렀다.

V. 결론

이 글은 비교적 연구가 진행되지 않았던 1950년대와 1960년대의 미국 NC 개발의 역사적 의미에 대해 되짚어 보았다. 기존 미국 공작기계 산업에 관한 연구는 1950년대에 초점을 맞춘 것과 1970년대 이후의 기계산업에 대한 논의가 대부분이었다. 1950년 NC 공작기계에 관한 연구는 최초 개발에 대한 역사적 의미에 대한 고찰이었고, 1970년대에 NC 공작기계에 관한 연구는 국제 경쟁력 상실의 요인을 분석한 연구로 역사적인 의미보다 국제경쟁에서의 우위를 갖게 된 원인을 논증하는 연구였다. 이에 이 연구에서는 미국의 1950년대와 1960년대에서의 NC 공작기계의 모델 개발 경위와 참여 기업의 특징에 대한 논의를 진행하였다.

미국에서의 NC 공작기계의 개발은 제조 현장에서의 문제 해결하기 위해 시작되었지만 얼마 되지 않아 미국 공군과 협업한 MIT 서보메커니즘 연구소의 주도 아래 최고의 기능을 구현하기 위한 목표 달성을 추구하였다. 이후, 상용화 과정도 미국 공군의 대량 수급 계획을 위해 진행되었다. 1950년대 말 이후부터 고성능 기능을 탑재하고 있는 제품에서 비교적 단순한 제품으로 개발 및 생산이 초점이 옮겨졌다. 1960년대 중반 이후부터는 군사 물자의 공급이나 항공우주 기술의 개발을 위한 특수한 사용자들의 수요가 있었다. 이러한 개발 후원자나 대형 시장의 존재가 없었

67) Heinrich Arnold, *Ibid.*, pp.1-2.

68) Holland, *op. cit.*, pp.59-60.

다면, 미국에서의 NC 공작기계의 개발이나 보급의 프로세스가 구축되기 어려웠다고 할 수 있다.

컴퓨터나 반도체산업의 발전과 같이 NC 공작기계도 미국의 군사 산업 발전이라는 핑계로 진행되었다. 이러한 시장에 있어서 기업들은 주어진 특수한 요구를 충족시키는 것에만 집중하고, 어떻게 비용을 절감하는지와 어떻게 이익을 창출할지에 대한 고민이 없었다. 즉, 기업들이 미래 먹거리를 향해 고민한 노력이 적었다고 할 수 있다. MIT의 기술에 기초해 개발을 진행하였지만, 정부로부터의 지원과 시장에서 수요가 반드시 있을 것이라는 신뢰가 없었다.

1970년대 이후 세계시장에서는 일본에서 NC 공작기계에 대한 평가가 고조되었고, 1980년대에 들어서면서 일본이 미국을 추월해 전 세계 최대 공작기계 생산국으로 거듭난 이후 주요 산업 및 수출 품목의 하나로 공작기계 분야를 육성하게 된다. 이렇듯 미국과 일본의 NC 공작기계 산업의 역전(逆轉)이 일어난 것은 다음과 같이 몇 가지 요인을 분석할 수 있다.

첫째, 미국은 정부의 우주항공산업, 무기 산업 등 국가전략 산업의 육성에 따라 첨단기술을 요구하는 대형 전용기 등 특수·정밀기종의 기술은 발달했지만, 성력화(elimination of labor)를 목적으로 수요가 급증하기 시작한 소형 NC 공작기계의 기술 수준은 취약했다.

둘째, 1차 금속 가공업 등 수요 산업의 설비 투자의 둔화로 기존에 설치된 공작기계의 노후 현상이 심화하였으며, NC 선반과 머시닝 센터의 주요 수요자인 중소 기계 업계의 발달이 대기업에 비해 상대적으로 늦어져 동 기종의 양산화가 지연되었다.

셋째, 미국의 공작기계업체들은 내수 시장이 팽대하여 수출 확대의 필요성을 별로 느끼지 않았으며, 특히 유럽 등 세계 각지에 거점을 확보한 다국적 기업들은 해외의 자회사를 통한 판매 확대에 보다 중점을 두고 있었다.

넷째, 1974년 이래 세계 각국은 스테그플레이션(stagflation)에 놓여 경제의 어려움이 가중되었고 오일쇼크의 영향으로 성력화(elimination of labor), 에너지 절감을 위한 기술개발 요청이 쇄도하면서 NC 공작기계의 수요가 폭발적으로 늘어났다. 더욱이 소형차의 수요 급증에 따른 설비 투자의 확대와 항공기의 경량화 추진의 가속화로 미국에서 소형 NC 기종에 대한 수요가 많이 늘어나면서 자연스럽게 NC 공작기계의 생산과 개발이 소원해졌다.

따라서 NC 공작기계의 개발은 단순히 일정한 성능의 구현을 목표로 할 뿐만 아니라 어떻게 하면 제품으로 판매할 수 있을지를 고민하면서 개발을 진행해야 할 것이다. 기업이 성장하기 위해선 안정된 환경보다는 새로운 도전이 필요한 환경이 필요하다고 할 수 있다. 이러한 도전은

오늘날 공작기계 산업을 선도하고 있는 일본의 전략을 참고할 수 있다.

앞서 언급한 바와 같이 1960년대까지는 미국이 선도했지만, 1970년대 중반에 일본 파낙(FANUC Corporation)이 마이크로프로세서를 이용해 NC 장치의 컴퓨터 수치 제어(Computerized Numerical Control: CNC)를 적극적으로 도입 및 발전시켰다. 특히, 파낙은 NC 장치를 중소형 NC 선반이나 머시닝 센터에 활용하고, 또한 이들 제품의 표준화를 실현해 양산 체제에 돌입하면서 그동안 간과되어 온 시장의 개척에 성공했다. 이러한 일본의 CNC 개발은 기계와 전기 및 전자를 일체화 시킨 제품을 출시함으로써 전자공학 산업의 급속한 발전과 맞물려 있다. 결과적으로 CNC의 개발은 NC 공작기계의 보급을 크게 가속하는 요인이 된 것이라고 할 수 있다.

특히, 일본은 공작기계 산업에서 새로운 시장을 개척하기 위해 잠재적인 사용자의 니즈의 변화를 반영한 제품을 개발하고자 노력했다. 주된 전략은 설계·제조를 만족하면서, 염가 제품을 생산하기 위한 전략을 수립하고 이행했다. 1970년대 중반 이후 해외 시장에서 경쟁력을 확보한 일본의 공작기계 산업은 주된 고객층을 중소기업으로 정하고, 그 요구 충족을 위한 연구 개발에 주력해, 제품 설계를 단순화해 생산량을 늘림과 동시에 염가로 판매하기 위한 전략을 취하였다. 이에 공작기계 생산업체들 대부분이 파낙의 개발·양산하는 보급형의 NC 장치의 공급에 의존하게 해 시장에서의 주도권을 갖고자 했다. 향후 일본에서의 공작기계의 발전과 세계시장 점유를 진행하는 과정을 분석하는 연구를 진행하는 것도 의미가 있을 것이다.

마지막으로 미국의 공작기계 산업의 발전과정을 기초로 국내 공작기계 산업이 지향해야 하는 바로 끊임 없는 기술개발의 추진이다. 미국과 같이 공작기계 산업의 기술 자립도를 높이고, 자체 모델의 개발을 위해 노력해 독자적인 브랜드가 해외 시장에서 정착되고, 지명도가 제고될 수 있도록 하는 등 기술개발의 환경 조성이 필요하다. 이를 위해 신기술의 해석과 응용 능력 제고 노력, 연구 개발 투자의 확대, 고급 기술 인력과 기능인력의 양성 등에 역점을 두어야 할 것이다. 미국은 NC 공작기계의 개발단계에서 기본적으로 요구되는 고정도화나 고능률화 외에 사용의 편역성, 안정성을 향상하게 시키기 위해 노력하였으며, 이를 우리나라의 공작기계 기술개발에 참고할 수 있다.

참고문헌

1. 국내 문헌

- 강철희, “공작기계 기술의 현재와 미래”, 한국정밀공학회지 제12권 제12호, 한국정밀공학회지, 1995.12.
김석일, “차세대 공작기계의 개발동향”, 기계와 재료 제2권 제1호, 재료연구소, 1990, 84면.
성대중 외, “다계통 e-CNC 개발”, 「한국정밀공학회지」 제26권 제4호, 한국정밀공학회, 2009.

2. 외국 문헌

- AIA, *1959 annual report*, 1960.
American Machinist, May 24, 1965.
American Machinist, October 26, 1964.
Axel Wieandt, “Innovation and the Creation, Development and Destruction of Markets in the World Machine Tool Industry”, *Small Business Economics* Vol. 6, No. 6, 1994.
Bo Carlsson, Small-Scale Industry at a Crossroads: U.S. Machine Tools in Global Perspective, *Small Business Economics* Vol. 1, No. 4, 1989.
Carlsson, Bo, “The Development and Use of Machine Tools in Historical Perspective”, *Journal of Economic Behavior and Organizations*, 5, 1984.
Southwick, Daniel. *Expertise in the Age of Digital Fabrication*, University of Toronto, 2019.
Noble, David. *Forces of Production: A Social History of Industrial Automation*, Routledge; 1st edition, March 30, 2011.
DiFilippo, Anthony. *Military Spending and Industrial Decline: A Study of the American Machine Tool Industry*, Greenwood Press, 1986.
Arnold, Heinrich. “The recent history of the machine tool industry and the effects of technological change”, University of Munich, Institute for Innovation Research and Technology Management, 2001.
Holland, Max, *From Industry to Alchemy: Burgmaster, A Machine Tool Company*, Beard Books, 2002.
IBM, *a history of progress 1890s to 2001*, 2008.
Llach, Daniel Cardoso, “Software Comes to Matter: Toward a Material History of Computational Design”, *Design Issues* 31, no.3 (July 2015), Massachusetts Institute of Technology, 2015.
Mazzoleni, Roberto, “Innovation in the Machine Tool Industry: A Historical Perspective on the Dynamics of Comparative Advantage”, in Mowery, David C. and Richard R. Nelson (eds.), *Sources of Industrial Leadership: Studies of Seven Industries*, Cambridge U.P., 1999.
Melman, Seymour, “How the Yankees Lost Their Know-How,” *Technology Review*, October, 1983.

- MIT Commission on Industrial Productivity, *The US Machine Tool Industry and its Foreign Competitors*, The MIT Press, 1989.
- Reintjes, J. Francis, *Numerical Control: Making a New Technology*, Oxford U.P., 1991.
- Farrant, Robert. Good Jobs and the Cutting Edge: The U.S. Machine Tool Industry and Sustainable Prosperity, Working Paper No. 199, 1997.
- Colorado, Roger Miranda and Castro, Gamaliel Contreras, "Closed-Loop Identification Applied to a DC Servomechanism: Controller Gains Analysis", *Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2013, 2013.
- Sciberras, E. and Payne, B. D., *Machine Tool Industry: Technical Change and International Competitiveness*, Longman Group Limited, 1985.
- Fan. Wei, Ji, Wei, Wang, Lihui, Lianyu Zheng & Yahui Wang, "A review on cutting tool technology in machining of Ni-based superalloys", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 110, 2020.
- 松野建一, 日本の工作機械産業発展史 -日工大工業技術博物館の紹介と共に-, 日本音響学会誌 74巻 8号, 2018.

3. 웹사이트

- 한국민족문화대백과사전, 기계공업(機械工業), <<http://encykorea.aks.ac.kr/Contents/Item/E0008118>>(최종방문일 2022년 4월 30일).
- KOTRA, "일본 공작기계산업", <https://dream.kotra.or.kr/kotranews/cms/news/actionKotraBoardDetail.do?SITE_NO=3&MENU_ID=200&CONTENTS_NO=1&bbsSn=403&pNttSn=176488>(최종방문일 2022년 4월 30일).
- Chicagotribune, <<https://www.chicagotribune.com/news/ct-xpm-1989-05-28-8902040802-story.html>>(Last visited April 30, 2022)
- CNC Services Northwest, LLC, <<http://www.cncsnw.com/>>(Last visited April 30, 2022).
- History of CNC Machining, <<https://medium.com/cnc-life/history-of-cnc-machining-part-1-2a4b290d994d>>(Last visited April 30, 2022)
- MIT Archives spcae, "Massachusetts Institute of Technology, Servomechanisms Laboratory records", <<https://archivesspace.mit.edu/repositories/2/resources/125>>(Last visited April 30, 2022)
- MIT Archives spcae, "Massachusetts Institute of Technology. Project Whirlwind", <<https://archivesspace.mit.edu/repositories/2/resources/125>>(Last visited April 30, 2022)
- Robin Mitchell, "What Is CNC Machining? A Look Into the History of This Technique", <<https://control.com/news/What-Is-CNC-Machining-A-Look-Into-the-History-of-This-Technique/>>(Last visited April 30, 2022)

Historical research on numerical control (NC) machine tool development

– Focusing on the current situation in the 1950s and 1960s
in the United States –

Chang-Kyu, Lee

– Abstract –

The United States first developed and commercialized numerically controlled (NC) machine tools. Other countries including Japan continued to accept US leadership past the 1960s. However when the economies of developed countries after the 1970s needed NC machine tools to establish a high-mix low-volume production system it was Japanese products not US products that met the large demand.

The development of NC machine tools in the United States began to solve problems at the manufacturing site but soon under the leadership of the MIT Servo Mechanism Laboratory in collaboration with the U.S. Air Force the goal was achieved to achieve the best function. Pursued. Since then the commercialization process has also been pursued for the US Air Force's mass supply and demand program.

Since the late 1950s, development and production have focused on products with high performance features to relatively simple products. Since the mid-1960s, there has been a demand for specialized users for the supply of military materials and the development of aerospace technology. Without such development sponsors and large markets it would have been difficult to establish a process for developing and popularizing NC machine tools in the United States. Like the development of the computer and semiconductor industries NC machine tools were advanced under the dawn of the development of the US military industry. In these markets companies did not have to focus on meeting specific special needs and thinking about how to reduce costs and generate profits. It can be said that the company did not make much effort for future development.

The development of Japanese NC machine tools that influenced South Korea began several years behind the United States. Development was based on MIT technology but there was no confidence in the government's support and market demand. Therefore the development of NC machine tools will have to proceed not only with the aim of implementing a certain level of performance but also with concern about how it can be realized as a product. It can be said that in order for a company to grow it needs an environment for new development rather than a stable environment.

Key words

Numerical Control, Parsons Corporation, Servomechanisms Laboratory, U.S. Air Force, Army procurement, Automatically Programmed Tool system

기계기술정책

창간호

| 제1권 제1호(2022) |

발행일 2022년 6월
발행처 한국기계연구원
발행인 박상진
문의처 한국기계연구원 전략조정본부 기계기술정책센터
대전광역시 유성구 가정북로 156
T. 042-868-7682

ISSN 2950-9939

기계기술정책

제1권 제1호(2022)