

서울대학교가 답하는 탄소중립과 과학기술의 역할

연구책임자

윤제용 교수(서울대학교 공과대학)

공동연구원

구윤모 교수(서울대학교 공과대학)

주현경 연구원(서울대학교 공과대학)



목차

서론	6
1. 탄소중립 시대의 철강 제조 기술	8
1.1. 철강 산업의 온실가스 감축 기술	8
1.2. 국내외 철강 산업의 기술 및 시장 동향	18
1.3. 철강 산업 대전환을 위한 정부와 대학의 역할	20
2. 이차전지 산업 고찰: 기술, 제도, 교육	22
2.1. 배터리 기술의 원리	22
2.2. 국내외 배터리 기술 및 시장 동향	25
2.3. 배터리 기술의 발전을 위한 정부와 대학의 역할	27
3. 탄소중립을 위한 수소기술	29
3.1 수소 기술의 원리	29
3.2. 국내외 수소 기술 및 시장 동향	37
3.3. 수소 기술 개발을 위한 정부와 대학의 역할	39
4. 열에너지 탈탄소화를 위한 핵심기술, 히트펌프	42
4.1. 히트펌프 기술의 원리	42
4.2. 국내외 히트펌프 기술 및 시장 동향	44
4.3. 히트펌프 기술 선도를 위한 정부와 대학의 역할	48
5. 탄소중립 건물 통합설계	51
5.1. 건물 부문의 온실가스 감축 기술	51
5.2. 국내외 건물부문의 기술 및 시장 동향	55
5.3. 건물부문의 탄소중립을 위한 정부와 대학의 역할	56
6. 탄소중립 사회로 가는 브릿지: 탄소 포집·저장 기술	58
6.1. CCS 기술의 원리	59
6.2. 국내외 CCS 기술 및 시장 동향	65

6.3. CCS 기술 선도를 위한 정부와 대학의 역할	69
7. 위기는 기회, 기후테크 산업으로 국가 경쟁력 제고	71
7.1. 기후테크 기술	71
7.2. 국내외 기후테크 기술 및 시장 동향	73
7.3. 기후테크 활성화를 위한 정부와 대학의 역할	75
8. 탄소중립 기술패권을 위한 제도적 기반	81
에필로그 및 향후 추진계획	86

표 목차

표 1. 연료전지의 종류와 특징	33
표 2. 수전해 장치의 종류와 특징	35
표 3. 유럽 의회 및 위원회의 훈령에 따른 히트펌프 재생에너지 인정 기준	49
표 4. 대표적인 CCS 사업	65

그림 목차

그림 1. 철강 생산 공정	8
그림 2. POSCO 수소환원제철 기술	12
그림 3. 전해제철 기술	13
그림 4. 리튬이온전지와 전고체전지 비교	23
그림 5. 글로벌 전기차용 배터리 점유율	25
그림 6. 탄소중립을 위한 수소관련 기술들	30
그림 7. 수전해와 연료전지의 수소기술	31
그림 8. 연료전지의 구조	32
그림 9. 수소를 연료로 사용하여 온실가스 배출이 없는 연료전지차	34
그림 10. 히트펌프의 작동 원리	43
그림 11. 산업용 고온 히트펌프 현황	45
그림 12. 글로벌 히트펌프 시장 성장(2021년(원) 및 2022년(막대))	46
그림 13. 건축설계에서 패시브 조절과 액티브 조절 기법	52
그림 14. 건축설계에서 패시브 조절과 액티브 조절의 통합설계	53
그림 15. CCS 기술의 비유적 이해	59
그림 16. CO2 암석층 저장	60

그림 17. 배출원에 따른 포집 비용 단가	63
그림 18. 노던 라이트 CCS 프로젝트의 탄소 수송경로 및 저장소 위치	66
그림 19. 동해가스전 CO2 저장 모식도	67
그림 20. 기후테크 분야	72
그림 21. 기후테크 시장 전망	74

서론

인류가 기후변화의 위기에 직면한 것은 화석연료를 사용한 기술 발전 때문이다. 하지만 역설적으로, 이러한 문제를 해결하는 것도 결국은 새로운 기술 혁신일 것이다. 저탄소 기술이 무역의 새로운 장벽이 되고, 기업의 지속가능성을 결정하는 중요한 요소가 된 현재 상황에서 과학기술의 역할은 무엇일까? 국가와 산업, 그리고 대학은 감축 기술 개발과 확산을 위해 무엇을 해야 하고, 이를 통해 위기를 새로운 기회로 만들어 내기 위해서는 어떤 전략이 필요할 것인가?

우리는 이에 대한 해답을 주요 산업의 감축기술 최고 기술 전문가와의 인터뷰를 통해 얻고자 한다. 주요 감축 기술에 대한 구체적인 원리와 시장 전망, 기술 패권을 주도하기 위한 정부와 대학의 역할에 대해 알아보고, 민간 기업 생태계와 정부의 제도적 지원 방안에 대해서도 전문가 인터뷰를 통해 심도 있게 분석하였다.

1장에서는 재료공학부 이경우 교수와의 인터뷰를 통해 철강 생산 과정에서 발생하는 온실가스의 원인과 이를 감축하기 위한 최신 기술 동향을 탐구한다. 철강산업은 대표적인 온실가스 배출 업종으로, 국내 전체 온실가스 배출량의 상당 부분을 차지하고 있다. 이에 따라 철강산업의 이산화탄소 배출 감축 기술은 매우 중요한 과제가 되었다. 철강산업의 온실가스 배출 감축 기술은 에너지 효율 개선 뿐만 아니라, 수소환원, 전해제철 등 새로운 혁신 기술을 도입함으로써 실현 가능할 것이다.

2장에서는 화학생물공학부 최장욱 교수와의 인터뷰를 통해 이차전지의 원리와 현재의 기술적 한계, 그리고 향후 발전 가능성을 살펴본다. 이차전지 산업은 전기차의 보급과 함께 급격히 성장하고 있으며, 미래에도 계속해서 큰 수요가 있을 것으로 본다. 탄소중립의 가장 큰 비중을 차지하는 전기화에 반드시 필요한 이차전지의 유형별 특징과 기술 혁신 방향을 살펴보고, 글로벌 기술 주도권을 이어 나가기 위한 전략을 논의한다.

3장에서는 화학생물공학부 성영은 교수와의 인터뷰를 통해 수소기술의 현황과 전망을 살펴보고, 연료전지와 수전해장치 등의 기술적 발전 가능성을 분석한다. 수소기술은 탄소중립 사회로의 전환을 위한 대표적인 청정 에너지로 주목받고 있다. 수소의 생산과 이를 이용한 연료전지의 기술 흐름을 살펴보고, 정부와 대학의 역할에 대해 고찰한다.

4장과 5장에서는 기계공학부 김민수 교수, 건축학과 여명석 교수와의 인터뷰를 건물 부문의 온실가스 감축 기술에 대해 살펴본다. 건물의 경우 우리 일상 및 생활습관과 밀접하게 연관되어 있고 건축물의 내구연한도 길기 때문에 온실가스 감축이 상대적으로 어려운 분야이다. 이 중

특히 많은 에너지를 사용하는 냉난방 부문에서 배출을 줄일 수 있는 히트펌프의 원리와 산업 전망, 혁신 방향에 대해 살펴보고, 건물의 총 배출량을 줄이기 위한 패시브와 액티브 기술 통합 설계에 대해 살펴본다.

6장에서는 에너지자원공학과 정훈영 교수와의 인터뷰를 통해 탄소 포집 및 저장(CCS) 기술에 대해 살펴본다. CCS 기술은 산업 공정에서 발생하는 이산화탄소를 포집하여 지하에 저장함으로써 대기 중으로의 배출을 막는 기술이다. 이 기술은 특히, 전력, 철강, 시멘트, 화학 등 탄소집약도가 높은 산업에서 효과적으로 활용될 수 있다. CCS 기술의 발전은 기존 산업 구조를 유지하면서도 탄소 배출을 줄일 수 있는 중요한 해결책이 될 것이다.

7장에서는 환경계획학과 정수종 교수와의 인터뷰를 통해 기후테크 기업의 생태계에 대해 살펴본다. 기후테크는 기후 변화에 대응하기 위한 다양한 기술을 통칭하는 용어로, 재생에너지, 에너지 효율, 탄소 중립을 위한 혁신 기술 등을 포함한다. 기후테크는 다양한 산업 분야에서 탄소 중립을 실현하는 데 중요한 역할을 하고, 국가 경제 성장에도 큰 영향을 미칠 것이다. 기후테크 육성 전략을 통해 환경과 산업 경쟁력, 두 마리 토끼를 모두 잡을 수 있는 전략을 모색한다.

마지막으로, **8장**에서는 재료공학부 남기태 교수와의 인터뷰를 통해 탄소중립 기술 개발을 위한 국가의 제도적 지원에 대해 살펴본다. 정부의 정책적 지원은 기술 개발을 촉진하고, 산업계와 학계의 협력을 통해 혁신적인 해결책을 도출하는 데 중요한 역할을 한다. 국가 차원의 장기적이고 일관된 지원은 탄소중립 목표를 달성하는 데 있어 핵심적인 요소이다.

본 보고서의 목적은 각 산업 분야에서의 탄소중립을 위한 과학기술의 혁신과 정책적 노력을 종합적으로 분석하고, 이를 통해 산업 전반에 걸쳐 실현 가능한 탄소중립 전략을 제시하는 것이다. 다양한 분야의 전문가 인터뷰를 통해 얻은 통찰을 바탕으로, 각 산업의 특성과 기술적 요구를 반영한 구체적인 실행 방안을 도출하고자 한다. 또한, 글로벌 시장에서의 경쟁력 강화를 위해 필요한 정책적 지원과 협력 방안을 제시하여, 한국이 탄소중립 목표를 성공적으로 달성하는 데 기여하고자 한다.

탄소중립 시대의 철강 제조 기술

철강산업은 2019년 기준 이산화탄소 배출량이 1.17억 톤으로 국내 총 온실가스 배출량의 16%, 산업 부문의 36%를 차지하고 있는 다 배출 업종이다. 이 때문에 이산화탄소 감축에 대한 압력도 가장 많이 받고 있고, EU 수출 비중도 적지 않아 곧 시행될 EU의 탄소국경조정제도 영향도 가장 크게 받을 것으로 예상된다. 이러한 국내외 상황 속에서 철강산업의 온실가스 배출을 줄이기 위한 다양한 기술이 논의되고 있다. 이미 세계 최고의 에너지효율을 자랑하고 있는 국내 철강 산업의 경우 효율 개선만으로는 감축 가능한 양이 많지 않기 때문에 완전히 새로운 기술에 의존하게 될 가능성이 높다. 철강 생산에 대한 기본적인 원리와 탄소 발생의 원인, 그리고 논의되고 있는 감축 기술의 전망을 알아보기 위해 서울대 재료공학부 이경우 교수¹⁾와 인터뷰를 진행하였다.

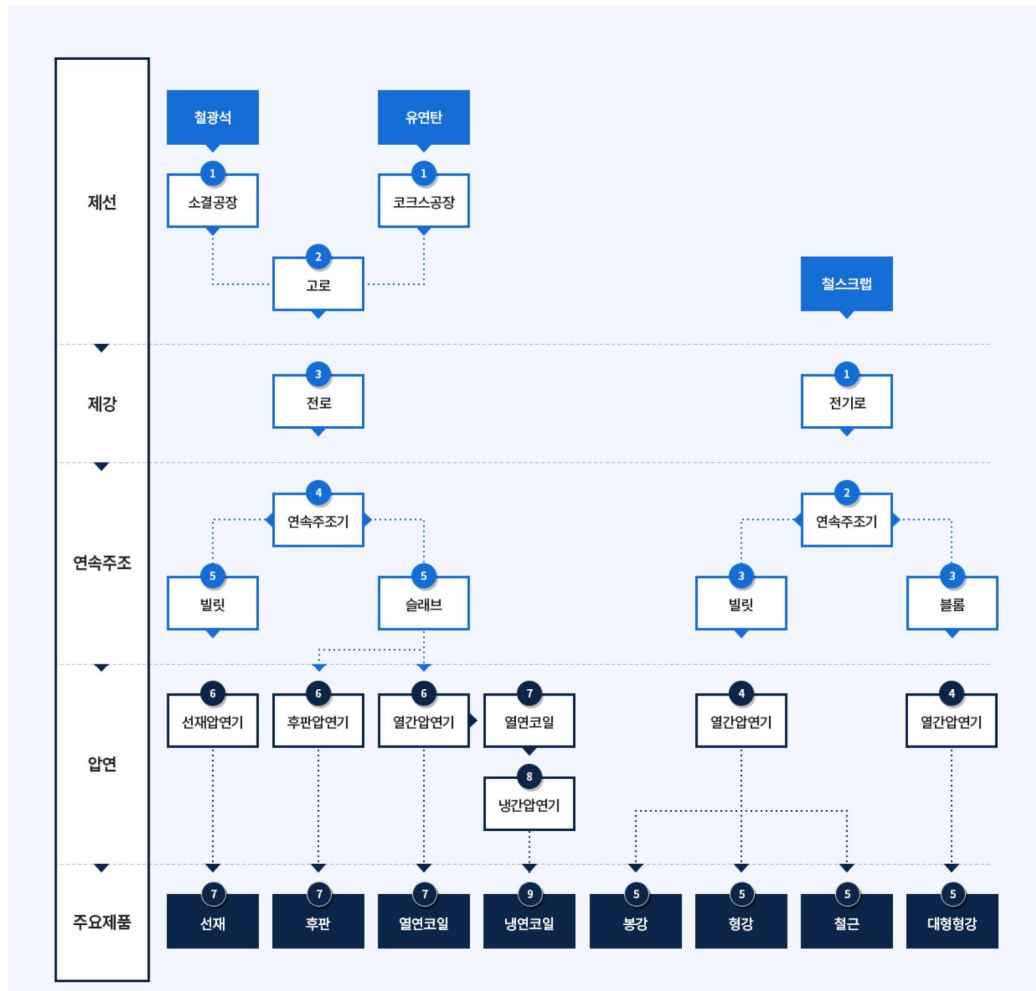
1. 철강 산업의 온실가스 감축 기술

Q) 현재 철을 생산하는 과정에서 왜 이렇게 많은 온실가스가 배출되는 것인가?

철강 생산 공정은 그림1과 같이 제선, 제강, 주조, 압연으로 나눌 수 있다. 이 중대부분 온실가스는 제강 공정에서 발생하고, 제강 공정은 다시 철광석에서부터 철을 만드는 전로 공정과 기존 철스크랩(고철)을 다시 녹여 활용하는 전기로 공정으로 나눌 수 있다.

1) 이경우 교수는 1996년 서울대학교 재료공학부 교수로 임용된 이후, 재임 기간 동안 금속의 제조 및 가공에 관련된 연구를 진행하고 있다. 서울대학교 철강연구센터 센터장 및 신소재공동연구소 소장, 대한금속·재료학회 부회장 등을 역임했으며, 현재 POSCO 석좌교수를 겸임하며 명실상부 대한민국의 대표적인 철강 전문가로 정평이 나 있다.

그림 1. 철강 생산 공정



출처: https://tips.energy.or.kr/overconsector/overconsector_view_01.do?code_num=M1&ch_code_num=M101

고철을 녹여서 만드는 방법은 사용된 철을 재활용하는 것으로 철광석에서 만드는 것 보다 에너지가 훨씬 덜 들고, 이산화탄소 발생량도 적는데 이 방법이 차지하는 비중은 1/3 정도이다. 나머지 철은 철광석을 사용해서 만든다. 철광석은 철 산화물이기 때문에 철을 얻기 위해서는 철 산화물에서 산소를 떼어내는 환원 작업이 필요하며, 이를 위해서 환원제가 필요하다. 그리고 환원 작업은 높은 온도에서 일어나기 때문에 가열하는 것도 필요하다. 철광석에서 철을 생산하는 대표적인 공정인 용광로법에서는 환원제와 열원으로 석탄을 사용하고 있다. 이 때문에 아래 반응 식에서 알 수 있는 바와 같이 이산화탄소가 발생하는 것이다.





(1)번 식은 철광석에서 산소를 제거하고 철을 얻는 환원 반응이며, (2)번 식은 온도를 올려주는 탄소의 연소 반응이다. 실제 용광로에서 일어나는 반응은 온도의 영향으로 이 반응보다 조금 더 복잡하지만 모든 반응을 합치면 결과적으로 위와 같은 반응이 일어난다.

환원제와 열원으로 천연가스를 사용하는 방법도 있다. 이 방법 역시 환원 반응과 연소 반응이 일어나며, 천연 가스의 주 성분인 메탄을 기준으로 아래 식과 같은 반응이 일어난다.



이 반응식에서 알 수 있는 바와 같이 수증기가 같이 만들어지는 대신에 이산화탄소 발생량은 반 정도로 줄어든다. 하지만, 환원제로 사용되는 석탄과 천연가스의 비율은 9:1 정도로 석탄을 사용하는 용광로법의 비중이 압도적이다.

Q) 제강 공정에서 배출을 줄이기 위해서는 (무탄소 전원으로 만들어진 전기를 이용한다는 가정 하에) 전기로의 비중을 높이거나, 탄소가 들어가지 않는 환원제를 이용해야 할 것으로 보이는데, 어떤 방법들이 논의되고 있는지?

질문에 답이 있다. 이산화탄소 감축을 위해서 크게 고철 재활용 증대, 석탄환원을 천연가스 환원으로 전환, 수소 환원 그리고 전기 환원 등 네 가지 방법이 가능하다. 그런데 환원제를 석탄에서 천연가스로 전환하는 것은 기존에 확립되어 있는 기술이기도 하고, 천연가스에도 상당량의 탄소가 포함되어 있기 때문에 이산화탄소 발생이 획기적으로 줄어드는 것도 아니어서 천연가스 자원이 풍부한 일부 국가에서만 관심을 가지고 진행되고 있는 상황이다. 그래서 이 방법을 제외한 나머지 세 가지 기술에 우리나라를 포함한 많은 나라의 산업에서 관심을 가지고 있기 때문에 이 글에서는 이러한 세가지 기술의 핵심 원리를 설명하겠다.

첫 번째로 고철의 재활용에 대해서 살펴보자. 이 방법은 유의미한 탄소 감축을 이룰 수 있는 유망한 기술로 고철을 전기로에서 녹여서 새로운 철로 만들어 사용하고 있다. 이 기술은 현재 상당히 높은 효율을 가지고 있고 철광석에서 철을 만드는 방법과 달리 환원 과정에서 발생하는 이산화탄소가 없기 때문에 이산화탄소 감축 효과가 크다. 현 상황에서 이 방법에서 발생하는 이산화탄소의 대부분은 전기로에 사용되는 전기를 발전하는 시점에서 발생하며 현재 조건에서 이산화탄소 절감 효과는 50~60% 정도로 알려져 있다. 그리고 향후 재생에너지나 원자력과 같은 무탄소 전기를 사용하게 되면 이산화탄소 발생이 거의 없는 획기적인 탄소 감축 효과가 얻

어질 수 있다. 따라서 고철의 재활용을 통한 이산화탄소 감축 효과는 전기를 어떻게 만들 것인가에 크게 의존한다고 할 수 있다.

만일 철의 재활용 비율을 최대한 올려서 사용된 철을 거의 다 회수해서 다시 사용할 수 있다면 궁극적으로는 철광석에서 새롭게 만드는 철이 거의 필요하지 않는 상황에 도달할 수 있다. 이런 상황과 무탄소 전기의 사용이 결합된다면 철강 제조 과정에서 거의 이산화탄소를 발생시키지 않게 될 것이다. 다만 이러한 상황을 구현하기 위해서는 고철의 재활용 비율을 현재보다 획기적으로 높이는 것이 필요하며, 이를 위해서는 고철 회수 시스템 개선, 잔류 금속 제련 기술, 재활용 친화적인 재료 및 제품 설계 그리고 시간이 필요하다. 현재 철의 재활용 비율은 60~70% 정도로 추산되고 있고 위에서 언급한 고철 회수 시스템과 관련 기술들이 더 발전한다면 이 비율을 훨씬 더 높일 수 있을 것이다.²⁾

두번째로 환원제를 탄소에서 수소로 바꾸는 수소 환원 제철 기술을 살펴보자. 수소 환원 제철은 1000도 정도에서 철광석과 수소를 반응시켜서 철을 얻는 것으로 탄소나 천연 가스 대신에 수소를 환원제 및 열원으로 사용하기 때문에 반응식을 보면 다음과 같다.



반응식에서 알 수 있듯이 이 반응에서 발생하는 가스가 수증기이기 때문에 이산화탄소 발생이 없는 제철법이 될 수 있다.

그래서 많은 철강 회사들이 관심을 가지고 기술 개발을 진행하고 있으며, 기술 개발은 크게 두 방향으로 진행되고 있다. 가장 많은 기술 개발이 진행되는 방향은 현재 용광로를 쓰지 않고 철광석 펠렛과 천연 가스를 사용해서 환원하는 MIDREX 라는 제철법을 개선해서 천연 가스 대신에 수소를 환원제로 사용해서 철을 생산하는 방법이다.³⁾ 물론 단순히 기존 장치에 천연가스 대신에 수소를 불어넣어서 철을 만들 수 있는 것은 아니다. 천연가스와 수소는 철을 환원할 때 반응 온도나 반응열 등 화학적 성질이 다르고, 두 기체의 밀도도 차이가 나기 때문에 천연가스 대신에 수소를 사용하려면 상당한 정도로 장치를 개선해야 한다.

또 다른 방향으로 철광석 펠렛 대신에 철광석 분말과 수소를 반응시켜서 철을 만드는 방법을 개발하고 있다. 이 방법 역시 전혀 새로운 공정을 개발하는 것은 아니고, 포스코에서 개발하여 철광석 분말과 탄소를 사용해서 철을 생산하고 있는 FINEX라는 공정을 개선해서 환원제를 수

2) 현재 재료 회수 시스템이 가장 잘 작동되고 있는 금속이 납이며, 사용된 납은 95%가 회수되어 재생산되고 있다. 이 비율이 일반적으로 금속을 사용 후 회수하여 재활용할 수 있는 최대값으로 예상된다.

3) <https://www.midrex.com/technology/midrex-process/midrex-h2/>

소로 변경하는 방향으로 연구가 진행되고 있다.

그림 2. POSCO 수소환원제철 기술



출처: https://www.fntimes.com/html/view.php?ud=202403180059219860dd55077bc2_18

이렇게 현재 진행되고 있는 수소 환원 제철법은 모두 기존에 성공적으로 대량의 철을 생산하고 있는 공정을 기반으로 환원 가스를 수소로 바꾸는 방향으로 연구와 개발을 진행하고 있기 때문에 기술 개발이 상대적으로 빠를 것으로 기대되며, 대략 5년에서 10년 정도면 상용화할 수 있는 기술 수준에 도달할 것으로 예상된다.

세 번째 방향은 전기를 사용해서 철광석을 환원하는 전해제철기술이다. 이 방법의 기본 원리는 철광석을 전해질에 녹인 후 전기를 흘려서 철을 얻는 방법이다. 철광석을 전해질에 녹이면 산화철이 전해질 내에서 철 양이온(Fe^{3+})과 산소 음이온(O^{2-})으로 분해되어 존재하며, 이 전해질에 전기를 흘리면 음극(cathode)에서는 철이 석출되고 양극(anode)에서는 산소가 발생한다.

(Cathodic reaction) $\text{Fe}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}$

(Anodic reaction) $2\text{O}^{2-} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{e}^-$

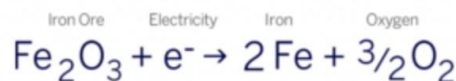
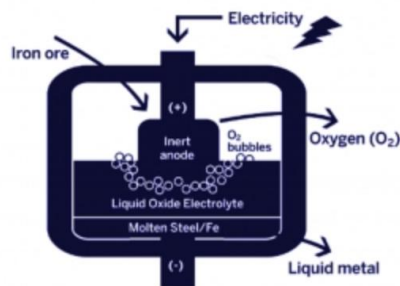
따라서 이 방법으로 철을 생산하면 배기 가스로 산소만 배출되어 이산화탄소가 전혀 발생하지 않게 된다.

전해제철 기술 개발은 전해질의 종류에 따라서 크게 두 가지 방향으로 진행되고 있다. 하나는 물을 전해질로 사용하는 수전해 방식이다. 세계 최대의 철강회사인 아셀로 미탈이나 미국에서 가장 앞선 철강회사인 뉴코아 등이 수전해 제철을 연구 개발하는 벤처 기업에 투자하면서 기술 개발을 이끌고 있다. 또 다른 방식은 용융산화물을 전해질로 사용해서 철을 생산하는 MOE(molten oxide electrolysis)라는 기술이다. 미국의 보스턴 메탈에서는 1500도가 넘는 고온에서 철을 생산하는 고온 MOE 연구를 진행하고 있고, 서울대와 포스코에서는 1000도 정도의 온도에서 철을 생산하는 저온 MOE 연구를 진행하고 있다.

그림 3. 전해제철 기술

Molten Oxide Electrolysis (MOE)

Better quality, easier process, no hazardous waste, pure metal output.



Reducing Agent	Electrons
Feedstock	Concentrates or pure oxides
Electrolyte	Molten oxides (CaO, MgO, etc.)
Containment	Refractory or frozen ledge
Temperature	Up to 2,000°C
Product	Pure metals or alloys

보스턴 메탈의 온실가스 무배출 제련공정 개요. (출처=보스턴 메탈)

출처: <http://www.snmnews.com/news/articleView.html?idxno=518337>

알루미늄, 구리, 납, 아연 등 여러 비철금속들이 이러한 방식으로 생산되고 있긴 하지만, 아직 철을 전기 분해로 생산하는 상업적인 기술은 개발되지 않았기 때문에 전해 제철 연구는 아직은 실험실 단계 또는 규모가 조금 더 큰 파일럿 플랜트 단계의 연구 개발이 진행되고 있다.

Q) 자원순환 관점에서 고철을 재활용하여 계속 활용할 수 있다면 온실가스 배출을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 여러 긍정적 효과도 함께 얻을 수 있을 것으로 보이는데, 고철을 재사용하는데도 특별한 기술이 필요한 것인가?

고철을 재활용하는 기술은 현재도 상당한 수준으로 발전되어 있다. 그렇지만 사용된 고철을 최대한 회수하기 위한 시스템을 개선하고 또 회수된 고철을 여러 번 반복해서 재활용하는 기술은 더 개발이 필요하다.

또한, 고철의 반복 사용을 극대화하려면 고철 회수 시스템의 개선만으로 충분하지 않다. 현재 기술로는 고철을 재활용하는 과정에서 떠돌이 원소들(tramp elements)이라 불리는 일부 원소들

(구리, 주석)을 제거되지 않고 잔류한다. 이 때문에 재활용을 반복할수록 이들이 농축되면서 문제를 발생시킬 것이기 때에 철의 재활용 회수가 2~3회를 넘지 못할 것으로 예상되고 있다.

철 속에 들어 있는 불순물 원소를 제거하는 방법은 철을 녹인 후에 산소와 같이 금속 원소와 반응하는 물질을 넣어서 비금속을 만들어 떠오르게 해서 없애는 것이다. 그런데 떠돌이 원소들은 철보다 반응성이 낮아서 산소와 반응하지 않기 때문에 제거할 수 없다. 이를 해결하기 위해서는 철 속에 들어 있는 떠돌이 원소를 제거하는 새로운 기술의 개발이 필요하다. 다만, 이를 위해서 벌써 몇 십년간 연구가 진행되고 있지만 아직 큰 진전은 없는 상황이다. 앞으로 이 기술의 개발이 계속 진행되어야 할 것이며, 혹시라도 이 기술의 개발이 늦어진다면, 처음부터 이러한 불순물이 고철에 들어가지 않도록 재료 및 제품을 설계하는 방향으로의 기술 개발도 필요하다.

이렇게 재활용 기술이 개발된 이후에도 모든 철이 재활용되어 사용되면서 철광석에서 새로 만드는 철을 거의 줄일 수 있게 되기 위해서는 상당한 시간이 필요하다. 그 이유는 철이 사용되는 시간 즉, 철의 생애주기(lifetime)가 길기 때문이다. 철의 사용 기간은 자동차용 철이 약 15~20년, 수명이 긴 선박이나 건축물 등에 사용되는 철은 40~50년 정도된다. 여러 용도를 평균하면 대략 25년 정도로 추산되고 있다. 즉 현재 재활용되고 있는 철은 평균적으로 25년 전에 만들어진 것으로, 그 당시 철강 생산량이 약 6억톤 정도이다. 그리고 현재 고철로 회수되어 재활용되고 있는 철은 6억톤의 70% 정도 되는 4억톤 정도여서 현재 생산되고 있는 철강 생산량인 19억톤과 비교하면 1/5 조금 넘는 정도에 불과하다. 이 비율은 시간이 지나면 계속 올라가긴 하겠지만 모든 철이 재생산되는 시대가 오기 위해서는 철강 생산량이 포화에 도달한 이후에도 몇 십년이 지나야 하기 때문에 앞으로도 오랜 시간이 걸릴 것이다. 따라서 모든 철이 재생산되는 시대가 오기 전까지의 기간에 사용할 다른 기술의 개발이 필요하다.

Q) 철을 생산하는 새로운 방식, 수소환원 기술과 전해제철 기술은 현재 개발 수준이 어떠한 지? 두 기술의 장단점은 어떤 것이 있고, 앞으로의 전망은 어떻게 보는지?

앞에서도 설명했지만 수소 환원 기술은 10년 이내에 상용화할 수 있는 기술을 개발할 수 있을 것으로 예상된다. 다만, 문제는 수소를 사용하는 것이 실제로 이산화탄소 감축에 기여할 수 있을 것인가 하는 질문에 대한 답이 마련되어야 한다. 자연계에 수소는 수소 기체로 존재하지 않기 때문에 환원에 필요한 수소를 얻기 위해서는 수소 화합물에 에너지를 투입해서 수소를 분리해야 한다. 수소를 얻을 수 있는 화합물로 천연가스와 물이 있다. 구체적으로는 천연가스와 수증기를 반응시켜서 수소를 얻는 증기 개질, 고온에서 천연가스를 분해시켜서 수소를 얻는 열분해 그리고 물을 전기 분해해서 수소를 얻는 수전해 등이 세 가지 기술이 사용될 수 있다.

증기 개질($\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$)은 에너지가 많이 필요하지 않은 공정이지만 수소 생산 과

정에서 천연 가스에 포함된 탄소가 이산화탄소로 방출되기 때문에 이렇게 만들어진 수소를 사용하는 것은 결과적인 이산화탄소 감축에 기여할 수 없기 때문에 이산화탄소 감축을 위한 기술에서 고려할 수 있는 수소 생산 방법은 아니다. 열분해 수소 생산($\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$)은 천연가스를 고온으로 가열하면 탄소와 수소 기체로 분해되는 반응을 활용하는 기술이다. 이렇게 만들어진 수소를 활용하는 것이 이산화탄소 감축에 기여하기 위해서는 반응에서 발생하는 탄소를 연소용이 아닌 다른 용도로 활용할 수 있어야 한다. 만일 이렇게 만들어진 탄소를 카본 블랙이나 배터리 전극 재료로 사용한다면 이산화탄소 감축에 기여할 수 있다. 수전해를 통한 수소 생산($\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + 0.5\text{O}_2$)을 물을 전기 분해하는 방법을 사용하는 것으로, 물에 전기를 흘리면 수소와 산소가 발생하고 이 중에서 수소를 이용하고 산소는 회수해서 다른 용도로 쓰거나 배출하면 되기 때문에 수전해에서 만들어진 수소를 활용한다면 이산화탄소 발생이 없는 제철이 가능하다.⁴⁾

그런데 수소 생산 과정에서 또 하나 고려해야 할 사항은 에너지 손실이다. 열분해를 위해서는 천연가스를 고온으로 가열해야 하며, 열 분해 반응이 흡열 반응이기 때문에 에너지를 투입해야 한다. 그리고 결과적으로 수소만을 사용하기 때문에 천연가스가 가진 본래 에너지와 비교하면 에너지 손실이 크다. 그리고 수전해 수소를 사용한다고 하는 것은 에너지를 투입해서 물을 수소와 산소로 분해한 후에, 여기서 얻어진 수소가 다시 산소와 반응해서 물로 되는 반응을 통해서 철을 만들기 때문에 에너지 측면에서 보면 이득이 없을 뿐 아니라 공정 효율, 수소 저장이나 운송 과정의 에너지 투입 등을 고려하면 오히려 손해보는 공정이다.

따라서 열분해나 수전해 공정에 사용되는 전기 에너지의 원천이 어떤 것인가가 중요하다. 이러한 공정이 실질적인 이산화탄소 절감에 기여하기 위해서는 발전 과정에서 이산화탄소 발생이 거의 없는 재생에너지나 원자력을 이용한 전기를 사용해서 수소를 만들어야만 할 것이다. 그런데 만일 수소가 제철 공정에 사용되어서 모든 철을 만들고자 하면 엄청나게 많은 수소가 재생에너지나 원자력으로 만들어져야 하기 때문에 수소 제철법의 가장 큰 관건은 수소 제철 기술이 아닌 그린 수소 생산 기술과 생산 능력 확대의 문제라고 할 것이다.

전해 제철 기술 개발 과정에서 예상되는 가장 큰 어려움은 스케일 업 문제이다. 전기 분해 기술 자체는 계속 개발되어 오고 있지만, 철 생산 기술은 막대한 양을 생산해야 하기 때문에 생산 속도가 아주 빠르거나 생산 설비가 커야 한다. 현재 개발하고 있는 수전해 제철, 고온 MOE, 저온 MOE 중에서 이러한 요건을 만족시킬 수 있는 기술이 살아남게 될 것이다. 다만, 규모의 확대가 말은 쉽지만 앞으로 어느 정도 시간이 걸릴 지에 대해서는 예측이 쉽지 않다. 현재 다수 의견은 10년 이상 걸릴 것으로 예상되고 있다. 전해 제철의 또 다른 관건은 수소 전기 분해와 마찬가지로, 원자력이나 재생에너지와 같은 저탄소 에너지원에서 만들어진 전기를 사용할 수 있는가 하는 것이 이산화탄소 감축하기 위해서 가장 중요한 요소이다.

4) 이렇게 이산화탄소 발생 없는 전기를 채택한 수전해 방법으로 만들어진 수소를 다른 경로로 만들어진 수소와 구별하기 위해서 그린 수소(green Hydrogen)라고 부르고 있다. 이 글에서도 앞으로 그린 수소라고 하면 재생에너지를 사용한 전기 분해 법으로 만들어진 수소를 의미한다.

이런 측면에서 보면 그린 수소를 활용하는 제철법과 전해 제철법은 모두 무탄소 전원에서 만들어지는 전기를 사용한 전기 분해에서 시작한다. 다만 그린 수소는 수소를 만들고, 이렇게 만들어진 수소를 가지고 철광석을 환원하는 방법이고, 전해 제철법은 전기를 사용해서 바로 철광석을 환원하는 방법이다. 이렇게만 비교해 본다면, 미래에 두 기술이 모두 최대로 발전했다고 가정했을 때, 수소의 저장과 운송 과정이 더 필요한 그린수소 제철보다 전해 제철이 더 우위에 서게 될 가능성이 높다. 다만, 앞에서 언급했듯이 현재 상황에서는 수소 제철의 개발 속도가 더 빠를 것으로 예상되기 때문에 앞으로 어떤 기술이 우위에 점할 지는 앞으로의 기술 개발 속도에 따라 달라질 것으로 예상된다.

그런데 수소 환원 제철이나 전해 제철로 철을 만들게 되면 해결해야 할 새로운 문제가 있다. 현재 용광로에서는 먼저 1400도 정도인 액체 철을 만들게 되는데 이 때 약 4% 이상의 탄소가 포함되어 있다. 이 액체 철에 산소를 주입하면 탄소가 연소되면서 많은 열이 발생하기 때문에 용광로 다음 공정인 전로에서는 에너지를 하나도 사용하지 않고 철을 정련할 수 있다. 실제 공정에서 열이 더 많이 발생하기 때문에 상당한 양의 고철을 같이 녹일 수도 있다.

이에 비해서 수소환원에서는 1000도 정도의 고체철이 만들어지는데 이 철을 녹여서 정련이나 다른 공정을 진행하기 위해서는 추가로 열을 가해야 한다. 특히 이렇게 만들어진 철은 탄소를 포함한 다른 원소를 거의 가지고 있지 않아서 녹는 온도가 높기 때문에 전기로 온도를 1600도 이상으로 올려야 한다. 따라서 정련을 위해서 전기에너지가 상당히 많이 필요하고, 이렇게 고온으로 철을 용해할 수 있도록 전기로도 개선해야 한다. 전해 제련법에서도 유사한 문제가 존재한다. 전해 제련은 상온(수전해) 또는 1000도의 고체철(저온 MOE)이나 1600도(고온MOE)에 달하는 고온 액체철이 만들어진다. 고체철은 수소 환원과 마찬가지로 문제가 있고, 1600도의 고온 액체 철을 만들면 이를 처리하기 위해서는 고온의 액체 철을 다룰 수 있는 반응기가 필요하다.

이러한 문제들을 종합해보면 이산화탄소를 발생시키지 않는 철을 생산하기 위해서는 석탄 대신에 막대한 양의 전기 에너지가 필요하다. 또한 사용되는 에너지의 총량은 용광로법에 비교해서 상당히 많이 필요할 것으로 생각되기 때문에 에너지를 최대한 줄일 수 있는 방향으로의 기술 개발을 진행해야 한다.

Q) 철강산업의 온실가스 감축을 획기적으로 줄이는 것은 상당히 도전적인 과제로 보인다. 전 세계적으로 온실가스 감축에 대한 압력이 강해지는 상황 속에서 철강 생산 과정의 온실가스 배출량을 줄이기 어렵다면 장기적으로는 다른 물질이 철을 대체할 가능성은 없는지?

철강 산업에서 이산화탄소 배출량이 많다고 해서 다른 금속으로 철을 대체하기는 어려울 것이라 본다. 그 이유는 철강 산업 전체와는 달리 철은 생산에 필요한 에너지가 가장 작은 재료 중

의 하나이기 때문이다. 철을 1 kg 생산하기 위해서 필요한 에너지는 25~30 MJ(mega Joule) 정도이다.⁵⁾ 이 값은 금속 중에서 가장 적으며, 철 다음으로 많이 사용되는 알루미늄도 1kg 생산에 200 MJ 정도가 필요한 것에 비교하면 훨씬 적은 에너지가 들어가는 것을 알 수 있다. 금속 외에도 모든 고분자 재료들 보다 훨씬 적은 에너지가 들어간다.⁶⁾ 재료 생산 시 발생하는 이산화탄소의 양은 에너지원에 따라서 일부 편차가 있지만 전체적으로 투입되는 에너지와 비례 관계가 있기 때문에 같은 양의 재료를 만들어 낼 때 철강 생산 과정에서 나오는 이산화탄소 발생량도 다른 재료에 비해서 적은 편이다.

그럼에도 철 생산에 따른 이산화탄소 배출량이 많은 것은, 철이 산업과 사회의 기본 재료의 역할을 하면서, 철의 소비량 즉 생산량이 다른 금속에 비해서 압도적으로 많기 때문이다. 현재 철은 연간 19억 톤 정도가 소비되고 있고, 앞으로도 그 수요는 계속 늘어날 것으로 예측되고 있다. 만일 현재 철강의 역할을 다른 금속으로 대체하고자 하면 그 금속을 적어도 철강과 같은 정도의 양을 생산해야 한다. 이렇게 되면 아마도 인류가 사용하는 모든 에너지를 투입해야만 그만한 양을 만들어낼 수 있을 것이다. 따라서 철강은 현재 상황에서는 대체 불가능한 자원이기 때문에, 철강 산업에서 발생하는 탄소 배출을 줄이기 위한 답은 다른 재료로의 대체가 아닌, 철강 산업 내에서 찾아야 한다.

5) Ashby, 2015, Materials and Sustainable Development, p. 247.

6) 철보다 에너지가 덜 들어가는 재료는 콘크리트, 벽돌, 일반 유리, 그리고 나무가 있다. 그런데 이 재료들이 철을 대체할 수 있는 부분은 많지 않으며, 철을 대체할 수 있는 대부분의 재료들을 만들기 위해서는 철 보다 더 많은 에너지가 필요하고, 이산화탄소 발생량도 많다. 따라서 만일 철강 재료를 이들로 대체하게 되면 대체하는 재료를 생산하기 위해서는 에너지를 훨씬 더 많이 투입해야 하며, 결과적으로 더 많은 이산화탄소를 발생하게 될 것이다.

2. 국내외 철강 산업의 기술 및 시장 동향

Q) 국가 또는 기업에 따라 주로 온실가스 감축 기술 개발 방향이나 속도에 차이가 있는지?

현재 무탄소 철강 생산으로의 전환 연구가 시작된 지 오래되지 않아서 우리나라와 미국, EU, 일본, 중국, 스웨덴 등 모든 나라에서 비슷한 시기에 연구와 개발을 시작했다. 저탄소 철강 생산 기술은 앞에서 언급한 세 기술(고철 재활용, 그린 수소를 사용한 수소 제철, 무탄소 전기를 사용한 전해제철)을 공통적으로 개발하고 있으며, 미국은 고철 재활용 기술에 예전부터 집중해 왔기 때문에 현 시점에서 약간 우위에 있고, 그린 수소 제철은 EU에서 투자를 많이 하고 있기 때문에 프로젝트 시작이 앞서고 있다. 그렇지만 전체적으로 시작한 지 오랜 시간이 지나지 않았기 때문에 국가적인 편차는 크지 않다.

다만 중국은 전세계 철강 생산량의 60% 정도인 12억톤 정도를 매년 생산하고 있고, 철강 전문가를 수십개의 대학에서 배출하고 있고, 학생 숫자는 적은 곳이 한 대학에서 50명 정도 배출하고 있는 상황이기 때문에 막대한 철강 생산량과 인력 자원을 바탕으로 향후 기술 발전이 가속화될 가능성이 높다. 또한 중국의 철강 생산 비중이 앞으로 더 높아질 가능성이 크기 때문에 철강 재료에 대한 독점 리스크도 우려되고 있는 상황이다.

Q) 우리나라 입장에서 중국과의 경쟁이 쉽지 않아 보인다. 한국의 철강 기술 수준은 다른 주요 철강 생산국과 비교했을 때 어떤 위치에 있다고 봐야 하는가?

국내 철강 회사들은 전체적으로 기술 수준에 있어서 우리나라는 세가지 기술을 모두 개발하면서 세계적인 경쟁에서 뒤쳐지지 않고 있다. 특히 수소 제철 기술의 하나인 철광석 분말을 사용하는 제철은 포스코에서 개발한 FINEX 기술을 기반으로 우리나라 고유의 기술인 HyRex⁷⁾ 법으로 개발되고 있어서 이 기술이 성공한다면 기술 경쟁에 상당히 유용한 수단을 보유하게 될 것이다. 전해 제철 기술에서도 서울대와 포스코가 지원을 받아서 저온 MOE⁸⁾라는 기술을 개발하고 있어서 기술 측면에서 경쟁력을 키워가고 있다.

그리고 이러한 상황은 우리나라에는 일종의 위기이면서 기회이기도 하다. 위기인 이유는 기존 철강 기술에 있어서는 현재 우리나라가 일본과 함께 세계 최고 수준이고, 최근 10년 이상 이러한 우위의 이점을 활용해왔는데, 무탄소 철강 생산에서는 다시 같은 출발선에서 경쟁해야 하기 때문이다. 하지만 지금부터 50년 전에 한참 뒤 선에서 출발해서 30~40년 정도 걸려서 먼저 출발한 국가들의 기술력을 추월한 경험을 가지고 있기 때문에 이번에 같은 출발선에서 출발하는

7) <https://www.posco.co.kr/homepage/docs/kor7/jsp/hyrex/>

8) https://webzine-eng.snu.ac.kr/web/snu_en/vol.06/snu_02.html

것은 새로운 기회가 될 수도 있고, 이를 기회로 만들기 위해서 산업, 대학 그리고 정부가 협력해서 빠른 시일 내에 새로운 환경에서도 세계를 선도할 수 있는 위치로 갈 수 있어야 할 것이다.

Q) 국내 철강 기업 입장에서 감축 기술 개발 및 도입과 관련하여 가장 큰 애로사항은 무엇이라고 보는가?

국내 산업의 기술 경쟁력에도 불구하고 산업체에서 우려하고 있는 점은 정부에서 그린 수소 및 무탄소 전기 공급에 대한 구체적인 로드맵이 제시되고 있지 않은 것이다. 철강 기술은 스케일이 크고 기술 개발에 상당히 긴 시간이 필요하기 때문에 많은 투자가 필요하다. 따라서 한번 장치가 설치되면 상당 기간 운영되어야 하기 때문에 장기적인 비전이 제시되지 않으면 산업체에서 방향을 정해서 기술 개발과 투자에 집중할 수 없다. 결국 이러한 불확실성이 가시지 않는다면 현재 계획하고 있는 기술 개발은 주로 실험 장치의 확장판인 파일럿 공장 수준에 머물러 있을 수밖에 없다.

이와 별도로 우리나라 전력이나 수소 생산이 전면적인 무탄소 철을 생산하기 전에도 개별 철강 회사 차원에서는 부분적으로 무탄소 철을 생산해야 할 필요성이 높아지고 있다. 예를 들어서 많은 자동차 회사들이 철강 회사에 몇 년 내에 무탄소 강판을 공급할 것을 요구하고 있다. 이러한 수요를 충족시켜 가면서 글로벌 시장에서의 경쟁력을 위해서라도 기업은 탄소 중립을 만족시키는 철강을 생산해야 한다.

그런데 우리나라의 여건 상 국가 전체의 탄소 중립 전기 공급이나 전면적인 그린 수소 생산이 언제 이루어질 수 있을지? 또는 가능할 수 있는 것인지? 등에 대해서 의문이 있고 전면적으로 전환되기에는 시간이 많이 걸릴 것으로 예상된다. 그래서 전면적인 전환 이전에 선택적 전환이라도 진행해야 한다. 이를 위해서는 '분리'라는 전략을 가지고 가야 할 것으로 판단된다. 기업은 생산 과정을 무탄소 부문과 기존 부문으로 분리해서 수요에 대응하는 방안이 유력한 선택지가 될 것이라 보인다. 그리고 이러한 분리 대응 전략이 제대로 작동하면서 국제적으로 인정받기 위해서는 정부는 무탄소 부문을 위한 기술 투자를 지원해주면서 재생에너지 공급량을 점차 비율을 늘려 수출용 생산량에 맞춰 공급해주는 등 상황에 맞게 대처해가야 하는 방향이 맞지 않을까 생각한다. 이러한 작업은 사회적 합의도 거쳐야 하는 문제이며, 매우 정밀한 대응이 필요하다.

3. 철강 산업 대전환을 위한 정부와 대학의 역할

Q) 철강 산업은 국가 기간 산업이자 압도적으로 많은 온실가스를 배출하는 산업이다. 글로벌 경쟁력을 잃지 않으면서 동시에 온실가스 감축을 해야 하는 어려움이 있어 보인다. 기업 혼자서 기술 패러다임을 바꾸는 대전환을 이루기에는 어려움이 많을 것으로 보이는데, 정책적으로 어떤 지원이 필요하다고 보는가?

정부의 정책은 국가 전체 방향 설정, 예산 배분과 제도 마련 등으로 나타나야 한다. 이 중에서 먼저 예산 부분을 보면 정부에서 저탄소 철강 생산을 위한 기술 개발에 대한 지원을 하고 있지만, 그 액수는 일본을 제외한 다른 철강 선진국과 비교할 수도 없을 정도로 적다. 일본과 한국은 앞에서도 설명했지만 철강 생산 기술에 있어서 가장 앞서 있었고, 그 이점을 누리고 있었다. 그리고 무탄소 철강으로의 전환도 정부 차원보다 앞선 기술력을 갖는 산업체들이 더 많은 책임을 지고 진행하는 방향의 자세를 보였다.

그런데 23년 10월에 일본이 철강 분야의 무탄소 전환을 위해서 기존보다 10배 이상의 예산을 투입하겠다고 선언하면서 미래에도 철강에서의 선도적 위치를 유지하겠다고 천명했다. 이러한 변화는 향후 일본이 정부 지원을 배경으로 현재보다 더 적극적인 기술 개발이나 투자를 진행하게 만들 것이고, 이는 고부가 철강 제품에서 일본과 경쟁관계가 있는 우리에게 큰 위협 요인이 될 것으로 보인다. 따라서 우리나라에서도 정부 지원의 확대를 진지하게 검토해야 할 것이라고 판단된다.

이와 함께 우리나라 상황에서 정부가 시급하게 해야 할 것은 탄소 중립을 위해서 무탄소 전기 발전과 원자력 발전을 어떻게 할 것인가에 대해서 비전을 제시하고, 이를 실천하기 위한 행동을 보여주는 것이다. 특히 수소를 어떻게 확보할 것인가는 철강 기술 결정에 아주 중요한 변수이다.

이 방향이 결정되고 정부에서 그 것을 구현하기 위해서 노력하는 모습을 보인다면, 산업체에서도 대규모의 투자를 시작할 수 있을 것이다. 예를 들어서 국내 수소 생산이 충분하지 않아서 수소 제철을 하기 위한 수소를 수입해야 한다면, 해외에서 수소를 확보하기 위한 전략과 수송 방안, 그리고 대략 3개월 사용량 정도의 수소를 저장해야 하는 막대한 공간 확보의 문제 등을 포함하여 전략을 수립해야 하기 때문에 이러한 내용을 포함할 것인가의 여부는 투자 비용과 방향 설정에 큰 차이가 나게 된다. 이렇게 복합적인 문제가 따라다니기 때문에 산업체에서는 새로운 수소 제철 기술을 개발했다고 해서 바로 투자할 수 있는 것이 아니다.

또 다른 문제는 철강 회사들이 수소로 전환한다고 할 때 그 시점까지 수명이 남아 있는 용광로에 대한 매몰을 어떻게 할 것인가 하는 점도 문제가 된다. 현재 전국에는 12개의 용광로가 있는데 이들 중 한 개만 고장이 발생해도 철강 수급 문제가 생긴다. 이러한 상황에서 수소 전환을 위한 투자의 진행과 그에 따른 순차적인 용광로의 매몰, 그리고 남은 수명에 대한 보상의 문제 등 실제 무탄소 철강 생산으로의 전환 과정이 일어나는 과정도 매우 복잡하며, 이 과정에서 정부의 전략과 지원이 어떻게 이루어질지 불확실한 측면도 전환에 어려움을 더하는 요인이다.

Q) 새로운 기술 개발이 중요하기 때문에 대학의 역할 역시 중요할 것으로 보인다. 서울대학교가 할 수 있는 일, 해야 하는 일이 있다면 어떤 것인가?

대학의 기본 역할인 인력 양성과 새로운 기술의 개발의 역할은 철강의 무탄소 전환과정에서도 서울대가 해야 할 기본 역할이다. 특히 서울대학은 종합대학으로 여러 분야의 우수한 학생을 교육 및 양성하고 있고, 각 분야의 뛰어난 연구자들이 많기 때문에 중요한 역할을 할 수 있다. 앞서서도 설명했지만 철강의 무탄소 전환은 전통적인 철강 기술 만으로 될 수 있는 것이 아니다. 좁게 철강 기술 측면에서 봤을 때에도 전통적인 기술에 더해서 전기로 개선을 위한 전기 및 설비 기술, 재활용을 확대할 수 있는 사회 시스템과 떠돌이 물질 분리 기술, 수소 수전해 기술, 철에 대한 전해 제련 기술 등 다 학제적 문제들이 많기 때문에 서울대학의 우수한 인력들이 서로 협력해서 연구를 진행해야 한다. 철강 산업의 전환에 큰 영향을 주는 것이 무탄소 전기 및 수소 생산이고 이를 위해서는 더 넓은 다학제적 연구가 필요하다. 이러한 협력 연구에 대해서 개별 연구자 차원을 넘어서 연구소나 대학의 체계적인 지원이 있다면 이러한 협력 연구의 진행이 크게 진전될 수 있을 것이다.

이에 더해서 아직 방향을 설정하지 못하고 있는 국가 전체의 무탄소화 전략에 대해서도 서울대학교의 기술과 정책 등 종합적인 역량을 모아서 미래 발전 전략을 도출해서 우리나라 및 세계 차원에서의 전환의 방향 제시를 하는 역할과 같은 종합적인 기여를 하기 위한 노력도 필요할 것으로 판단된다.

이차전지 산업 고찰: 기술, 제도, 교육

배터리는 전기차 시장이 커짐에 따라 반도체만큼 성장할 분야로 평가받고 있다.⁹⁾ 이러한 배터리 분야에서 현재 리튬이온전지는 전통적인 기술로 확립되어 있으며, 향후 보급을 확대하기 위해서 가격경쟁의 우위를 차지하는 것이 중요하다. 예를 들어, 전기차의 경우 초기 수요자들은 이미 구입을 했기 때문에 전기차 수요 증가 및 고급화를 위해서는 가격이 낮아져야 한다. 이처럼 배터리의 가격은 규모의 경제 형성, 시장 플레이어 사이에서의 경쟁으로 점차 낮아질 것으로 예상되고 있는 상황에서 이에 대한 돌파구에 대한 답을 구하기 위해 서울대 화학생물공학부 최장욱 교수¹⁰⁾와 인터뷰를 진행하였다.

1. 배터리 기술의 원리

Q) 배터리의 용도 및 기능에 따라 다양한 연료전지 형태가 존재할 것으로 보인다. 배터리의 종류와 간단한 장단점은 무엇인가?

배터리 분야에서 배터리 셀의 종류는 크게 두가지로 나뉜다. 먼저, 전통적인 기술에 해당하고 현재 시장을 보유하고 있는 리튬이온전지가 있다. 해당 분야에서는 보급 확대와 고급화를 위한 발전에 가장 큰 기술적인 문제인 발화 안정성을 확보하는데 연구개발이 지속될 것으로 보인다. 특히 화재 예방을 하기 위해서 불량 셀을 생산 단계에서 골라 내고, 운전 중의 이상 거동을 소프트웨어 기술로 감지하여 발화 안정성을 확보하는 것이 가장 중요하다. 다음으로, 전고체전지 등 차세대 전지가 있다. 차세대 전지 개발의 가장 큰 동기는 주행거리 확장 및 안전성 확보이다. 기존 내연기관차에 비해 전기차는 상대적으로 주행거리가 짧고, 내구성이 부족하다. 이를 개선하기 위한 방안으로 최근 인화성 소재를 불연성 소재로 대체하여 화재 발생 가능성을 줄이

9) <https://www.ekoreanews.co.kr/news/articleView.html?idxno=71246>

10) 최장욱 교수는 이차전지 분야에서 '휘어지는 배터리' 상용화 목적의 신소재를 개발하고 사용 시간 연장을 위한 고용량 전극소재 및 포스트-리튬이차전지 기술을 개발하는 등 배터리 분야를 개척하며 세계적인 석학으로 꼽히고 있다. 피인용 횟수가 상위 1% 안에 드는 고피인용 논문(HCP)을 다수 연구했으며, 2017년부터 2023년까지 미국 글로벌 학술정보회사 클래리베이트(Clarivate Analytics)의 '세계에서 가장 영향력 있는 연구자(HCR)'로 연이어 선정되었다. 2021년 현대차-서울대 배터리 공동연구센터의 초대 센터장으로 활동하고 2022년 미 배터리 개발 기업 SES AI의 사외이사로 선임되어 국내외 학계와 산업계를 잇는 가교 역할을 하고 있다.

고, 에너지밀도의 향상으로 주행거리가 늘어난 전고체전지 기술이 대두되고 있다.¹¹⁾ 현재 기술 구현은 약80~90% 정도까지 진행되었지만, 이를 양산하기 위한 공정은50% 정도밖에 도달하지 못한 상황이다. 양산 공정에 가장 중요한 경제성을 확보하여 가격을 낮추기 위해서는 산업이 더 커지고 사업 참여자들이 늘어나야 한다. 그러나 한국, 일본 등 소재 개발 및 공정을 잘 하는 국가들이 급격한 성장을 이룰 수 있기 때문에 양산 공정 구현에 대해 상대적으로 더 긍정적인 전망을 가지고 있다.

그림 4. 리튬이온전지와 전고체전지 비교



출처: <https://www.poscofuturem.com/pr/view.do?num=736>

Q) 그렇다면 향후 어떤 배터리가 우위를 점할 것이라고 예측하는가?

추후 다양한 형태의 배터리가 사용처에 따라 공존할 것으로 보인다. 리튬이온전지가 여전히 주류를 이룰 것이지만, 배터리의 용도에 따라 다양한 형태의 배터리가 맞춤형으로 사용될 것으로 예상된다. 예를 들어, 도심항공교통(UAM)과 같은 특정 수송분야에는 리튬이온전지보다 전고체전지 등과 같은 차세대 배터리가 활용될 것이고, 전력 분야에는 리튬이온전지를 기반으로 하면서 더 큰 용량의 새로운 배터리를 사용할 수도 있다.

Q) 배터리 기술 발전에 있어서 가장 큰 방해요인과 이를 해결하기 위한 방안은 어떠한 것이 있을지?

현재 배터리의 가격 경쟁력을 확보하는 것이 가장 중요하다. 가격 하락의 가장 큰 요인이 바로

11) Lee, N. et al, Anode-less all-solid-state batteries: recent advances and future outlook, Mater. Futures 2023, 2, 013502, <https://doi.org/10.1088/2752-5724/acb3e8>

수율 증대이다. 기존 1990년~2000년대에 비해서 최근 공정에서의 수율이 거의 100%에 가까워졌다. 보통 배터리 공장에서 수율이 90% 이상이면 마진(margin)이 형성된다고 알려져 있고, 현재 상용화된 다수의 제품이 높은 수율을 통해서 생산되고 있다.¹²⁾ 이는 집단 지성 및 자본 투입 등으로 인한 결과물이다. 미국의 테슬라가 공급망이 있는 업체들과 함께 배터리 및 전기차 공정기술을 발전시키는데 선봉장 역할을 하였고,¹³⁾ 현재 중국 비야디(BYD)와 여러 중국 업체가 중저가 전기를 선보이면서 전기차 보급에 기여하고 있다.¹⁴⁾ 현재 배터리 시장은 단순 제조 확대를 넘어 충전 인프라 확장의 기로에 서 있기도 하다. 또한, 배터리 기술개발을 위해서는 자원 확보가 매우 중요하다.¹⁵⁾ 이는 시장에서 안정적인 가격을 유지하는데 필수적이기 때문이다. 실제로 배터리 및 자동차 회사들은 광산에 직접 투자하거나 원재료 관련 업체들과 다양한 형태의 MOU를 체결하여 자원 투자 및 협력 활동을 지속하고 있다. 이러한 역할을 수행하면서 밸류체인에서 자원을 직간접적으로 확보하고자 노력하고 있다. 현재 자원을 보유한 국가들은 자원을 쉽게 수출하려고 하지 않으며 1차 가공은 자국 안에서 해결하려고 한다. 우리나라가 배터리 자원을 확보하기 위해서는 상대적으로 가공 공정 기술이 부족한 자원 보유 국가에 친환경 공정 기술을 지원해주며, 자원 확보 측면에서 보다 접근성을 높이고 국가 간 협상력 키울 필요가 있다. 국내의 자동차 업체들도 이러한 측면에서 공격적으로 투자하고 있는 상황이지만, 단순히 자동차 업계 뿐 아니라 다양한 분야에서 자원 확보 사업에 대한 관심을 높이는 것이 필요하다. 자원 확보가 안정적으로 되어야 배터리, 이와 연동된 차량 가격이 안정화될 수 있기 때문에 자원 확보를 위한 다양한 노력이 확장되어야 한다.

Q) 자원순환 관점에서 에너지원 활용 및 탄소 배출을 줄이기 위한 방안으로 폐배터리가 대두되고 있는데, 폐배터리 사용을 위해서 어떤 기술이 필요할 것인가?

배터리 수요가 증가함에 따라 늘어날 폐배터리와 재활용 문제가 논의되어야 한다.¹⁶⁾ 먼저, 배터리의 잔존가치를 평가 및 진단할 수 있는 기술이 필요하다. 해당 기술의 개발이 선행되어야 시장에서 신뢰성 있는 유통 및 거래가 이루어질 수 있기 때문이다. 하지만 단순히 사용이 완료된 상태에서 잔존가치를 평가하는 것에는 한계가 있기에 소비자가 사용하는 기간동안 사용 이력을 평가하고 진단하여 데이터를 확보할 수 있는 시스템이 구축되어야 할 것이다. 다음으로, 친환경 추출 기술 및 친환경 제련기술이 필요하다. 폐배터리로부터 핵심 원료를 추출하는 과정에서 에너지가 많이 사용될 것이다. 이에 따라 자원순환 관점에서 추가되는 공정에서의 친환경 혹은 저탄소 기술개발도 필요하다.

12) <https://www.sisajournal-e.com/news/articleView.html?idxno=306556>

13) 한국산업단지공단, 산업입지 issue&trend, No.47, 테슬라 기가팩토리의 확산과 제조 혁신에의 시사점

14) <https://www.hankyung.com/article/2024031098911>

15) GT 인사이드, 이차전지 기술동향 및 공급망과 미국의 관련 정책

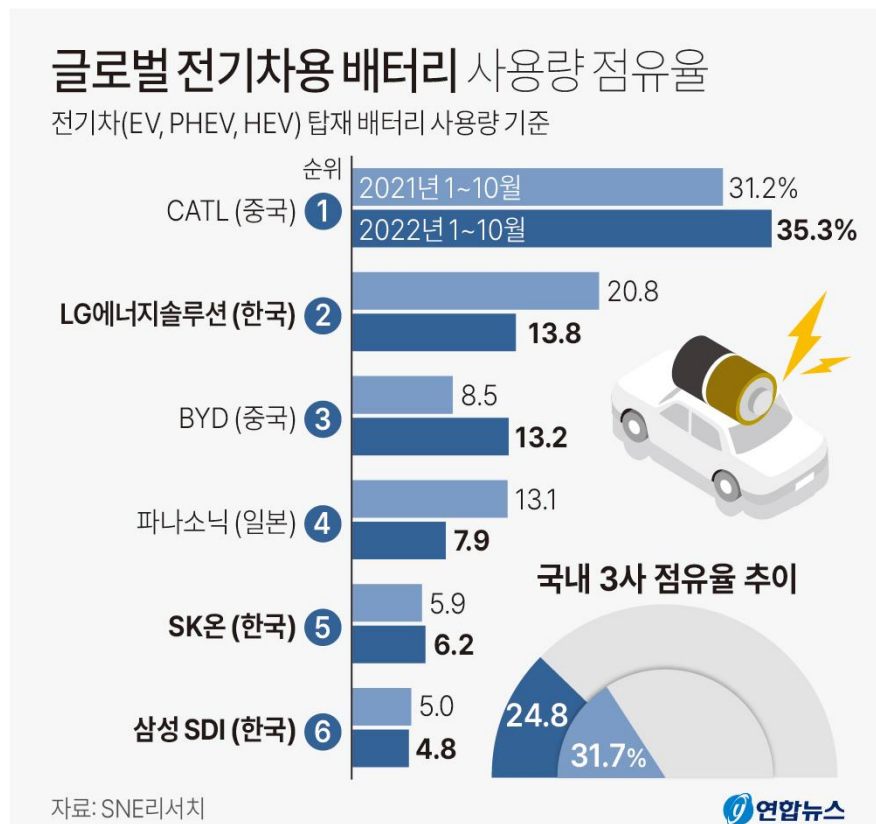
16) Zhao, Y. et al, A Review on Battery Market Trends, Second-Life Reuse, and Recycling. Sustain. Chem. 2021, 2, 167–205, <https://doi.org/10.3390/suschem2010011>

2. 국내외 배터리 기술 및 시장 동향

Q) 배터리 시장이 커짐에 따라 타국과의 경쟁이 심화되고 있다. 현재 배터리 시장에서 한국은 다른 선진국 대비 어느 정도의 위치에 있는 것인가?

아직 배터리 시장에서는 어느 한 국가가 압도적으로 기술을 선점한 상황은 아니다. 하지만 현재 공정 기술 측면에서 한국, 중국, 일본이 선도적인 위치에 있다고 평가받고 있다.¹⁷⁾ 일본은 소극적인 투자로 인해 기술개발 속도가 빠르지 않으며, 중국은 공격적인 투자를 통해 시장에서의 우위를 선점하기 위해 노력하고 있다. 우리나라는 패스트 팔로워(Fast follower) 전략으로 서구에서 오랜 기간 동안 쌓아온 고체화학, 전기화학 등과 같은 기초 학문을 빠르게 수용하며 기초 연구 인력을 확보하였고, 이는 현재 이차전지 산업의 밑거름이 되고 있다. 신진 연구자가 늘어나고 있는 만큼 건전한 경쟁 문화를 조성하고 국가R&D 프로그램을 통해 집단지성으로 협력을 이끌어내어 시너지를 발휘한다면, 아직 두드러진 기술 우위 국가가 없는 상황에서 우리나라가 배터리 시장 점유율을 확대하는데 크게 기여할 것이다.

그림 5. 글로벌 전기차용 배터리 점유율



17) <https://www.asiae.co.kr/article/2023101116561190304>

Q) 현재 기술 개발 수준이 전세계적으로 비슷하고 발전 속도가 미미해 보이는데, 기술 개발 및 확산을 저해하는 요인이 무엇인지?

현재 기술확산의 가장 큰 문제점은 자국 중심주의 정책이다. 미국의 인플레이션 감축법(IRA)과 같은 지원 정책은 모든 국가가 서로 자국에 생산 시설을 설립하도록 압박하는 상황을 만들고 있다.¹⁸⁾ 우리나라도 여러 배터리 기업들이 미국에 공장을 세우고 있지만, 장기적인 측면에서는 국내 생산 기반이 약화되고 국내 연구기반도 취약해질 수 있다는 문제가 존재한다. 해외에 생산 시설을 설립할 경우, 설립 비용 및 인건비가 크게 증가할 수 있지만, 미국과 같은 큰 시장에 진입하여 시장 점유율 확대, 기술 실평가 등의 장점을 누릴 수도 있다. 이처럼 해외 생산 시설을 설립할 경우 다양한 장단점이 존재하기 때문에 국내 배터리 기업들은 고민이 깊어지고 있는 상황이다.

Q) 이러한 상황 속에서 한국이 배터리 시장에서 우위를 선점하기 위해서 어떠한 노력이 필요한 것인가?

우리나라의 경우 공정 인력의 확보가 중요해질 것이다. 고도의 첨단기술을 개발할 수 있는 박사 수준의 인력도 중요하지만, 실제 현장에 즉시 투입될 수 있는 학·석사 수준의 인력도 필요하다. 특히 단기적인 전문가 코스를 통해 배출되는 인력이 아닌 해당 분야에서 실무 경험과 전문 지식을 두루두루 쌓은 인력이 더욱 필요하다. 같은 논리로, 해외에 공장을 증설하는 상황에서 해외 사업장에서도 국내의 인력 뿐만 아니라 현지 인력이 직접 투입되어 운영할 수 있는 능력을 갖추어야 한다.

또한, 배터리 기술에 대한 정보 교류가 중요하다. 자본과 인력이 충분히 있더라도 모든 문제를 내부적으로 다 해결할 수 있는 것은 아니기 때문이다. 미국의 빅테크 기업들도 거대 자본과 뛰어난 인력이 있지만 내부적인 문제 해결이 어려워 스타트업 인수를 통해 기술력을 확보하는 것처럼, 틈새에 존재하는 신기술을 유연하게 확보하는 것이 중요하다. 기술 보안으로 인해 정보 공유가 쉽지 않은 상황이지만 산학간의 정보 교류를 통해 문제를 복합적으로 보면서 다양한 시각을 통해 해결방안을 도출하는 방법도 필요하다.

18) 산업통상자원부, 2023 5월호VOL.132, 미국의IRA 세부지침 내용과 한국 배터리산업의 미래 (https://tongsangnews.kr/webzine/1602305/sub1_2.html)

3. 배터리 기술의 발전을 위한 정부와 대학의 역할

Q) 향후 배터리는 점차 수요가 높아지며 수송, 산업 등 다양한 부문에서 큰 비중을 차지할 것으로 예상된다. 현재 다양한 기업에서 배터리 기술 개발 및 시장 선점을 위해 노력하고 있지만, 정부의 적극적인 지원이 절실히 보인다. 배터리 기술의 발전을 위해 어떤 정책적인 문제점이 존재하며 앞으로 어떠한 정책 개선의 노력이 필요한지?

우리나라의 정부 주도 R&D 프로그램은 산업의 수요를 충분히 충족하지 못한다는 평가가 존재한다. 이는 정부 주도 R&D가 차세대 기술에 집중되어 있기 때문이다.¹⁹⁾ 예를 들어, 반도체의 경우 국내의 삼성전자, SK 하이닉스와 같은 글로벌 기업들이 기술개발을 빠르게 진행하고 있어서 학계에서 경쟁하기 어려운 상황이 있다. 이처럼 배터리 분야에서도 리튬이온전지는 이미 성숙도가 높은 기술이기 때문에 보다 기술을 발전시키기 위해서는 기술개발을 선도하고 있는 선두 기업과의 협력이 필요하다. 정부는 학계 뿐만 아니라 산업계와 함께 국가 로드맵을 수립하여 기술개발을 지원해야 한다. 하지만 기업에서는 경쟁에 따른 기술 보안 문제로 인해 기술 현황을 공개하기가 어려운 한계가 있다. 여러 기술적인 문제가 있겠지만, 대기업이 정부 R&D 프로그램의 일부를 주도하는 것이 기술 개발 측면에서는 가장 효율적인 방향이 될 수 있다. 대기업 주도로 컨소시엄을 구성하는 것이 한 예가 될 수 있다.

또한, 정책의 일관성도 중요하다. 특히 탄소중립은 단기적으로 해결되는 문제가 아닌 30~50년까지도 걸릴 수 있는 문제이기 때문에 장기적인 관점에서 기술개발을 진행하는 것이 필요하다. 따라서 친환경 기술과 같이 즉각적인 수익이 발생하지 않는 분야이더라도 향후 반드시 필요한 기술에 대해서는 선도적인 안목을 가진 기업의 경영진의 꾸준한 리더십과 이를 지원하는 정부 정책의 일관성이 중요하다.

Q) 새로운 기술 개발이 중요하기 때문에 대학의 역할 역시 중요할 것으로 보인다. 서울대학교가 할 수 있는 일, 해야 하는 일이 있다면 어떤 것인가?

우리나라의 교육은 현재까지 일방적인 지식 주입을 기반으로 하는 패스트 팔로워 전략을 주로 취해왔다. 해당 교육 방식은 초기 단계에서 빠르게 성장하는데는 적합하지만, 배터리 분야와 같은 특정 분야는 팔로워(follow)할 대상이 존재하지 않아 기존의 방식을 고수하기 어려운 상황이다. 교육의 관점에서, 장기적으로는 보다 문제 해결 방식을 중점적으로 다루는 전환이 필요하지만, 이는 단기간에 달성하기 쉽지 않은 과제이다. 특히, 재정이 취약한 우리나라 대학은 해당

¹⁹⁾ <https://www.korea.kr/news/policyNewsView.do?newsId=148924965>

전환이 더 어려울 수 있다. 예를 들어, 재정이 풍부한 미국의 대학의 경우 추가적인 인력 고용으로 산업에 친화적인 인재 양성을 위한 프로그램을 개발하고 있다. 이러한 변화로 인해 커리큘럼이 빠르게 진화하고, 뛰어난 인재를 양성하기 위한 노력이 강화되는 시스템이 구축되어 있다. 반면, 현재 우리나라의 교육계는 문제해결을 위한 태스크포스(task force)가 부재하며 기존의 교육에서 벗어나 새로운 교육을 진행하기 위한 교육자도 부족한 실정이다.

이를 해결하기 위해서는 성공 사례를 만들어야 한다고 생각한다. 모든 분야에서 급진적인 교육의 전환이나 융합을 이루는 것은 현실적으로 어려울 수 있다. 따라서 먼저 이차전지 등과 같은 탄소중립 트렌드에 적합한 미래의 성장 동력 산업을 선정하고 이를 위한 교육과정을 개발하여 융합 인재를 양성할 수 있다. 일부 사례가 성공한다면, 다른 분야에도 점차적으로 확대 적용할 수 있다고 생각한다. 이러한 성공 사례를 만들기 위해서는 문제를 올바르게 정의하고 해결할 수 있는 능력을 갖춘 인재를 육성하는 것이 중요하다. 현재까지는 지식을 빠르게 주입해서 제한된 시간 안에 문제를 풀어내는 것이 중요하게 여겨졌다면, 앞으로는 중요한 문제를 정의할 수 있는 역량이 중요해질 것이다. 답은 검색을 통해 쉽게 도출할 수 있지만, 문제 자체를 정의하는 것은 여전히 연구자의 몫이기 때문이다. 산학협력을 통해 학생들에게 인턴 경험을 제공하여 현업의 문제를 확인하도록 할 수도 있지만, 학교 차원에서는 커리큘럼에 맞게 현장 친화형 인재를 육성할 수 있다. 이는 단기 프로젝트 수업 등을 통해 가능한데, 학생들은 제한된 시간 안에 직접 문제 제기부터 해결방안 고안까지 일련의 문제 해결 과정에 대한 연습을 할 수 있다. 교수가 기술 원리 등과 같은 기초적인 지식은 가르치지만, 과제를 통해 학생이 스스로 생각하는 과정을 경험해보는 방식이 필요하다고 생각한다. 이러한 인재상을 세우고 육성하는 것이 향후 서울대학교의 큰 역할 중에 하나일 것이며, 해당 인재는 향후 산업에서 원하는 핵심 인력일 것이다.

탄소중립을 위한 수소기술

수소는 탄소중립 사회로의 전환을 위한 대표적인 청정 에너지로 꼽힌다. 최근 유럽연합(EU)이 발표한 수소전략을 발표한 이후, 미국, 영국, 인도 등에서 수소 산업 육성책을 차례로 내며 전 세계가 수소 기술 개발 및 투자에 관심을 집중하고 있다. 이러한 상황 속에서 현재 한국은 수소 기술 중 수송 및 발전 부문에서 활용되는 수소 연료전지 기술의 선진국으로 평가받고 있다. 하지만 중국, 일본 등 여러 국가에서 이미 빠르게 추격하고 경쟁하고 있는 상황이기 때문에 수소 기술 개발의 고도화 및 안정적인 시장에서의 상용화가 중요해지고 있다. 수소에 대한 전반적인 개요와 수소 연료전지 기술의 현황 및 전망을 알아보기 위해 서울대 화학생물공학부 성영은 교수와²⁰⁾ 인터뷰를 진행하였다.

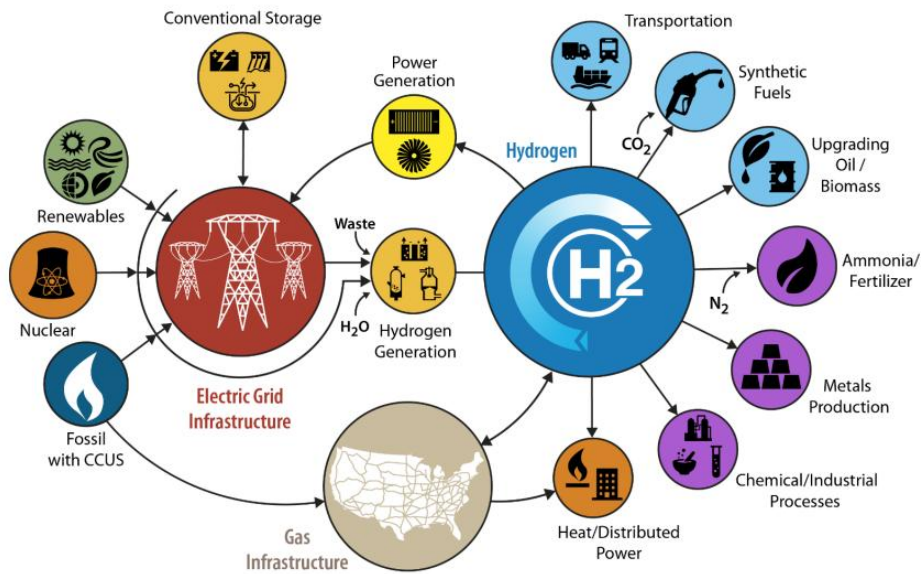
1. 수소 기술의 원리

Q) 수소가 탄소중립 사회의 차세대 에너지로 여겨지고 있다. 수소 기술에 대해 자세히 설명해달라.

수소는 석유 대비 무게당 에너지 용량이 3배 정도 더 크고 탄소가 들어있지 않는 물질이다. 우주에 가장 풍부한 원소이고 지구 상에는 물 속에 풍부하게 들어있다. 수소는 태양광, 풍력과 같은 신재생에너지와 달리 에너지 저장과 사용에 용이하기 때문에 차세대 청정에너지로 주목받고 있다. 무엇보다 수소를 이용한 수소기술은 탄소중립을 위한 핵심 기술로 평가할 수 있다. 그림 6은 수소의 생산과 이용에 관한 각종 수소가 관련된 기술을 나타내고 있다.

20) 성영은 교수는 2004년 서울대 화학생물공학부 교수로 임용된 이후, 재임기간 동안 연료전지, 배터리, 태양전지에 대한 다양한 연구를 진행하였다. 최근까지 한국전기화학회 회장, 한국공업화학회 회장을 역임하며 국내에서 대표적인 수소 기술 전문가로 인정받았고, 한국동서발전 유튜브 인터뷰 등 다양한 매체에 참여하며 수소 기술 개발 증진과 수소 사회로의 중요성을 높이기 위해 노력하고 있다.

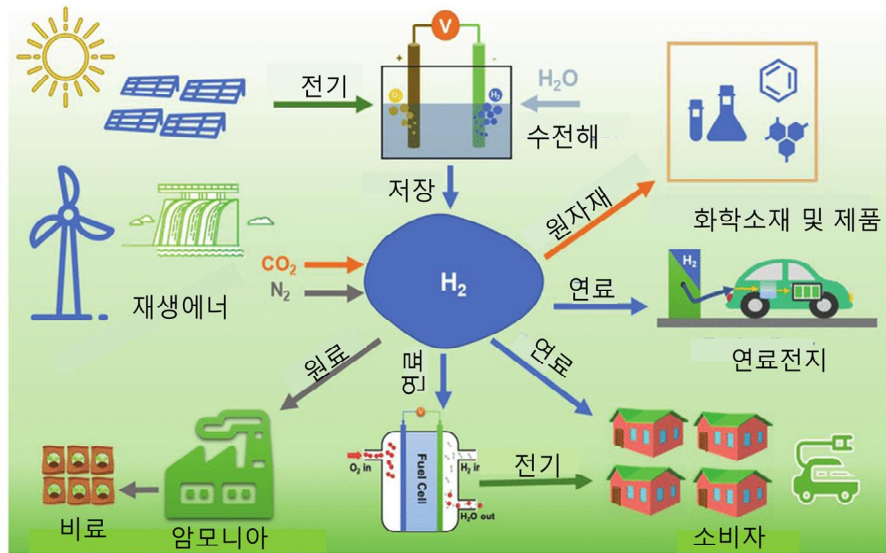
그림 6. 탄소중립을 위한 수소관련 기술들



출처: 미국 DOE Hydrogen Program Plan (2020)

여기에는 신재생에너지나 원전을 이용한 수소생산, 이 수소를 사용하여 전기를 만드는 연료전지나 수소터빈, 수소와 온실가스(CO₂)를 포집하여 수소와 반응시켜 합성연료(e-fuel) 생산, 수소와 질소를 반응시켜 암모니아 생산, 지금의 석탄대신 수소를 이용하여 철강을 생산하는 환원제철, 수소를 이용한 각종 화학 프로세스 등이 포함된다. 수전해와 연료전지로 국한한 수소기술을 표시하면 그림 7과 같다.

그림 7. 수전해와 연료전지의 수소기술



출처: Advanced Functional Materials (2020년30호)

Q) 그렇다면 수소 에너지 및 수소기술을 통해 얼마만큼의 탄소를 저감할 수 있는 것인가?

2050년 전체 에너지의 20%를 수소로 대체한다면 탄소중립이 가능하다는 시나리오가 나와 있다. 현재는 탄소(화석연료)가 에너지원의 85%와 전력 생산의 70%를 차지하고 있다. 그리고 우리가 사용하는 플라스틱, 합성섬유, 합성고무 등 화학제품과 원자재의 상당부분이 이 화석연료에서 나오고 있다. 그런데 2050년 총에너지의 51%를 전력으로 제공하는데 여기에 수소연료전지를 일부 사용하고, 산업재료나 환원제철 등을 위해 총 에너지의 20% 정도의 수소를 사용하면 탄소중립이 가능하다는 것이다.

Q) 수소 기술 중에 가장 대표적인 기술이 연료전지 그리고 수전해장치로 보인다. 향후 발전 가능성이 높은 수소 기술은 무엇인가?

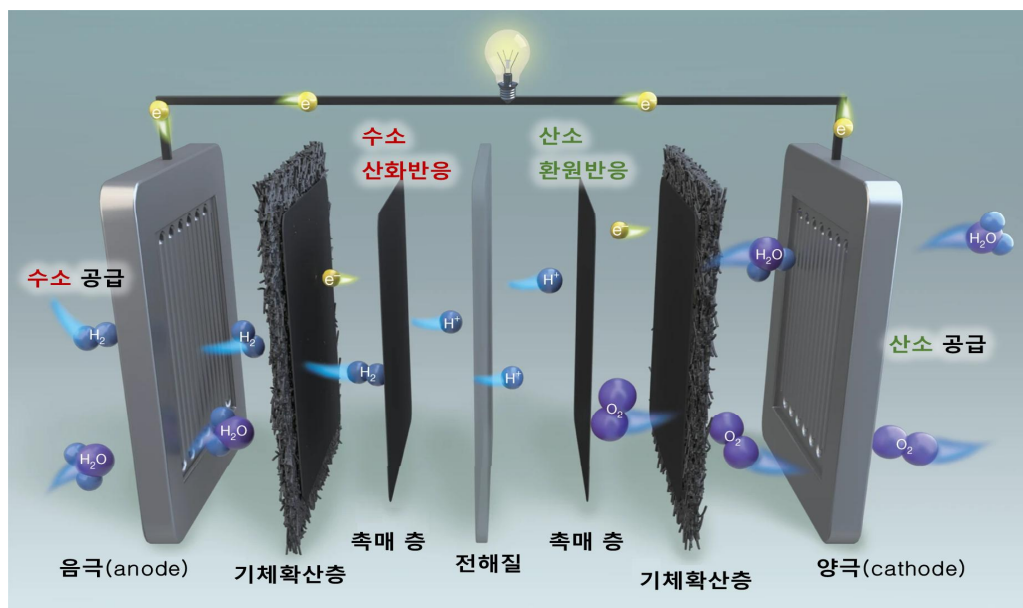
맞다. 먼저 수소기술 중 가장 중요한 것이 수소를 이용하여 전기를 만드는 연료전지이다 (그림 8). 연료전지는 양극, 음극, 수소이온이 이동하는 통로인 전해질로 구성되어 있다. 먼저 수소가 공급되면 음극에서 수소이온과 전자로 분리된다. 다음 분리된 전자는 음극에서 양극으로 이동하며 전기를 생산하게 되고, 수소이온은 전해질로 이동되어 산소와 만나 물이 되어 배출된다.

이러한 연료전지는 1960년대 아폴로 우주선이 우주로 나갈 때 전기를 만들기 위해서 개발됐다. 이후 연료전지는 현재 자동차, 선박, 비행기 등 수송 및 발전 분야에서 다양하게 이용되고 있는 상황이다.

현재 연료전지는 주로 고가의 백금 촉매를 사용하고 있다. 따라서 백금 사용량을 줄이거나 백금을 대신할 저가의 촉매 개발이 필요한 실정이다. 그리고 수전해장치의 촉매는 상업적으로 이리듐(iridium)을 가장 많이 사용하고 있다. 이리듐은 백금보다 3배 정도 더 비싸고 매장량도 적어서 가격 경쟁력이 낮다는 단점이 있다. 따라서 이리듐의 양을 적게 사용해도 동일한 성능이 나올 수 있도록 기술력을 향상시키거나 산소를 잘 발생할 수 있도록 하는 금속 산화물 등 새로운 소재에 대한 기술 개발이 활발히 진행되고 있는 상황이다.

그리고 수소기술에서 또다른 중요한 기술이 물을 전기분해하여 수소를 분리해내는 수전해 장치(water electrolyzer 혹은 electrolysis cell)이다. 수전해 장치는 위의 연료전지와 거의 유사한 구조로 수소와 산소로 전기를 만드는 연료전지와 정확히 반대의 원리이다. 즉 전기를 가해 물을 전기분해하여 수소와 산소를 만드는 것이다. 최근 이 수전해에서도 기술적 돌파구(breakthrough)가 일어나고 있다. 앞선 연료전지와 마찬가지로 수전해 장치도 수소가 발생하는 음극, 산소가 발생하는 양극이 있고, 양쪽 전극 사이에 분리막인 전해질을 통해 이온을 전달하게 된다. 이런 구성으로 양쪽 전극에 전기를 가하면 전기화학반응으로 수소와 산소가 각각 발생되는 것이다. 수전해장치는 전체 하나의 회로라서 한쪽 전극에서 기체가 제대로 발생하지 못하면 작동이 어렵기 때문에 수소와 산소가 발생되는 양쪽 극의 균형이 매우 중요하다. 하지만 수소보다 산소가 발생하는 전극에서 기체 발생이 느려 문제가 다소 존재한다. 물인 상태로 있는 것이 훨씬 안정적이라서 산소가 발생하지 않으려고 하는 속성이 있기 때문이다. 따라서 촉매라는 물질을 이용하여 촉매에 물을 흡착시켜 산소와 수소를 더 쉽게 분리해내려는 노력을 기울이고 있다.

그림 8. 연료전지의 구조



Q) 연료전지와 수전해장치는 운송수단별, 산업별로 다르게 적용되기 때문에 여러가지 형태로 기술이 개발되고 있을 것으로 예상된다. 연료전지 및 수전해장치의 종류와 각각의 장단점을 설명해달라.

현재 대표적인 연료전지는 인산형 연료전지(PAFC), 고분자전해질 연료전지(PEMFC), 용융탄산염 연료전지(MCFC), 고체산화물 연료전지(SOFC) 등이 있다. 각각의 특징은 표 1에 나와 있다. 인산형 연료전지(PAFC)는 인산이라는 액체 전해질을 사용하는 연료전지로 가장 오랜 역사를 가지고 있다. 이온 전도도가 좋은 액체 전해질에 200도 가까이 비교적 높은 온도에서 작동하기 때문에 성능과 효율이 좋은 편이다. 다만 액체 전해질을 사용하기 때문에 장치 부피가 상대적으로 큰 편이라 주로 발전용으로 사용하고 있다. 국내 기업에 의해 여러 지자체에 인산형 연료전지 발전소들이 설치되어 있다.

표 1. 연료전지의 종류와 특징

연료전지 종류	고분자전해질 연료전지	인산형 연료전지	용융탄산염 연료전지	고체산화물 연료전지
영문명	Polymer Electrolyte Membrane FC (PEMFC)	Phosphoric acid FC (PAFC)	Molten Carbonate FC (MCFC)	Solid Oxide FC (SOFC)
전해질	고분자 막	액체 인산 (H_3PO_4)	용융 탄산염	금속 산화물
전하 수송체	수소 이온(H^+)	수소 이온(H^+)	탄산염(CO_3^{2-})	환원된 산소 이온(O^{2-})
작동 온도	80 °C	200 °C	650 °C	600-1000 °C
촉매	백금	백금	니켈	세라믹 (금속 산화물)
셀 구성요소	탄소	탄소	스테인리스	세라믹

고분자전해질 연료전지(PEM)는 고체 고분자를 전해질로 사용하기에 두께가 얇아 각 연료전지를 쌓아 스택으로 만들면 높은 성능을 내면서 장치는 콤팩트 하면서 소형화가 가능하다. 그래서 이 연료전지는 수소연료전지차에 주로 사용된다 (그림 9). 이미 승용차는 상용화되었고, 향후 트럭, 버스 등 중대형 운송수단에 사용될 것으로 예상된다. 다만 고가의 백금 촉매를 사용하

기에 가격 저감을 해야 하는 이슈가 남아 있다.

고가의 백금을 사용하지 않는 방법으로 고온에서 구동하는 연료전지를 사용하는 것이다. 그렇게 하여 개발된 연료전지가 용융탄산염 연료전지(MCFC)와 고체산화물 연료전지(SOFC)이다. 용융탄산염 연료전지는 용융염을 전해질로 사용하기에 성능은 우수하나 부식 문제 등으로 실증 단계에서 상업화되지 못한 채 남아 있다. 반면 세라믹을 재료로 사용하는 고체산화물 연료전지는 현재 상업화되어 이미 발전용 등에 사용되고 있다. 고온에서 작동하기 때문에 효율이 높다.

수전해 장치도 그 구조 자체는 연료전지와 유사하다. 수전해 장치는 알칼라인 수전해(AEC), 고분자전해질 수전해(PEM), 음이온 분리막 수전해(AEM), 고체산화물 수전해(SOEC) 등이 있다 (표 2).

그림 9. 수소를 연료로 사용하여 온실가스 배출이 없는 연료전지차

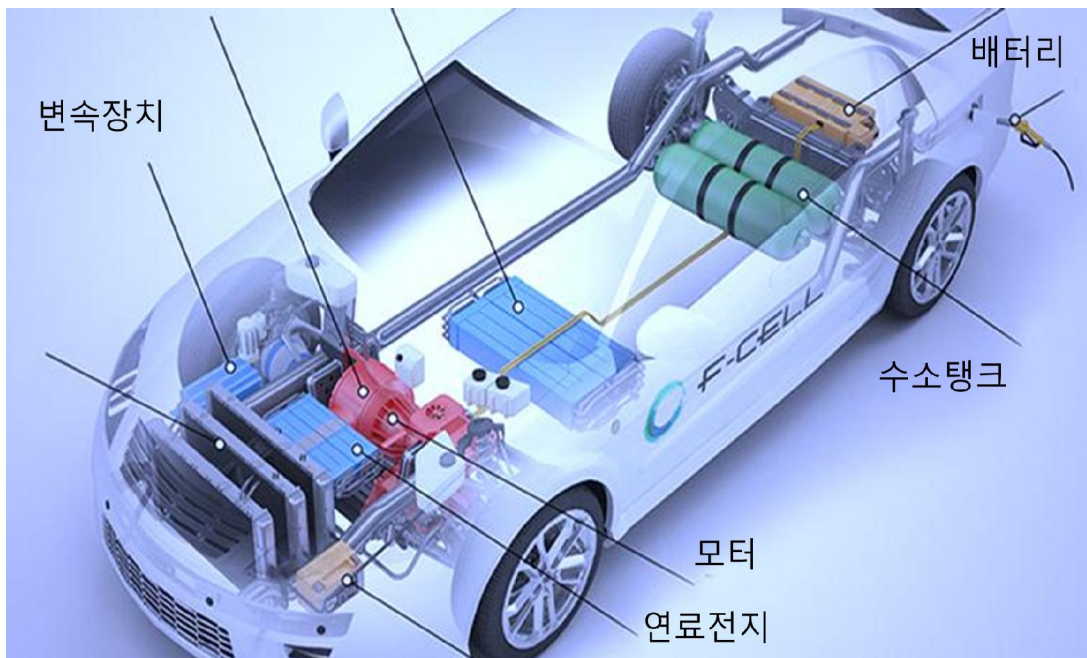


표 2. 수전해 장치의 종류와 특징

수전해 종류	고분자전해질 수전해	알칼라인 수전해	음이온교환막 수전해	고체산화물 수전해
영문명	Polymer Electrolyte Membrane (PEMWE)	Alkaline Water Electrolyzer (Alkaline)	Anion Exchange Membrane (AEM)	Solid Oxide (SOE, SOEC)
전해질	고분자 막	액체 KOH	용융 탄산염	고분자 막
음극 (수소생산)	백금, 백금합금	니켈, 니켈합금	니켈, 니켈합금	니켈/세라믹
양극 (산소생산)	이리듐, 루테튬	니켈, 니켈합금	니켈, 철, 코발트	세라믹
작동 온도	50-80 °C	60-80 °C	50-60 °C	500-850 °C
완성도	상업화	상업화	실증단계	연구단계

먼저 알칼라인 수전해는 알칼라인 수용액(KOH, 수산화칼륨)에 전기를 흘려 물을 수소와 산소로 분리하는 방식이다. 1900년대부터 개발된 기술로 가장 오랫동안 연구되어 왔다. 촉매로 니켈 등 비금속을 사용하기 때문에 가격이 저렴하고 생산 구조가 단순하여 대량 생산에 적합하다고 평가된다. 하지만 알칼리 성분으로 인한 부식이 생길 가능성이 있고, 전류밀도 효율이 낮다는 것이 단점으로 꼽힌다. 장치의 전류의 양이 수소의 생산량과 비례하는데, 음극에 수소를 많이 생산하기 위해 전기를 많이 가하면 양극에서 발생하는 산소와 만나 폭발 위험이 존재한다. 액체 전해질을 통한 수소와 산소 기체가 혼합되는 것이다. 이를 막기 위해 전해질이 들어있는 분리막을 두껍게 만들어야 한다. 즉, 장치 및 전해질의 가격 경쟁력은 있지만 전기 효율이 낮은 것이다.

다음으로, 고분자전해질 수전해(PEM)는 고분자 전해질막을 전해질로 사용하는 방식이다. 고체전해질을 사용하기 때문에 두께가 얇아 전류밀도와 에너지 효율이 높고 콤팩트하면서 소형화가 가능하다. 다른 화합물 없이 물만 원료로 사용할 수 있어 수소의 순도도 높다. 하지만 촉매로 백금, 이리듐과 같은 귀금속을 사용하기 때문에 생산 단가가 높아 알칼라인 수전해에 비해 상대적으로 가격 경쟁력이 낮다는 것이 단점이다. 현재 수전해 장치 가격의 60%가 촉매 등에 따른 장치 가격이기 때문에 촉매의 양을 줄이고 전극 두께를 얇게 하는 등 소재 비용을 낮추면 가격 경쟁력을 확보할 수 있다.

고체산화물 수전해(SOE 혹은 SOEC)는 고체산화물 전해질로 800°C의 높은 온도에서 수증기를 전기분해하는 방식이다. 세라믹 등과 같은 고체산화물을 전해질과 또 전극의 소재로 사용하기 때문에 소재 가격이 상대적으로 저렴하다 할 수 있다. 또 부식에 강해 효율이 높고, 전해액을

보충할 필요도 없어 설비 유지 및 보수가 용이하다. 하지만 고온에서 작동하기 때문에 세라믹 등과 같은 재료의 내구성 문제에 관한 연구가 아직 부족하다. 세라믹 성형 기술도 대형화를 위해 필요한 형편이다. 이 수전해 장치는 고온에서 작동하기 때문에 원자력 발전의 전기뿐 아니라 고온의 열도 이용할 수 있는 등의 장점이 있다.

마지막으로 음이온 교환막 수전해(AEM)는 알칼라인 수전해와 고분자전해질 수전해 두 장치의 특징을 합친 것으로 음이온 교환막을 전해질로 사용하는 방식이다. 알칼라인 수전해처럼 액체 형태의 전해질이 아닌 고분자막을 사용하기 때문에 두께를 얇게 만들 수 있고, 고분자전해질 수전해처럼 고순도의 수소를 생성할 수 있다. 그리고 고분자전해질 수전해처럼 고가의 백금이나 이리듐 촉매를 사용하지 않고 알칼라인 수전해처럼 저가의 니켈 등의 소재를 사용하는 점도 큰 장점이다. 하지만 현재 아직까지는 pH가 높은 알칼라인 조건에서 작동하는 고분자 전해질이 개발되지 않았다. 국내 연구소 등에서 지속적으로 개발 중에 있으나 상업적 스케일로 적용하기에는 아직 어려운 상황이다.

Q) 수소 기술 개발에 있어서 가장 방해요인은 무엇이며, 이를 해결하기 위한 방안은 무엇인가?

먼저 좋은 성능, 높은 안정성, 저렴한 가격이라는 삼박자를 만족하는 촉매가 개발되어야 한다. 현재 연료전지나 수전해 장치에 촉매로 사용되는 백금과 이리듐은 kg 당 수만 달러가 넘는 가격이 매우 비싸고 또 희소하다는 문제가 있다. 이들보다 1/1,000배 이상 저렴한 니켈이나 철과 같은 전이금속을 활용하기 위해 많은 연구가 이루어지고 있지만, 실제 작동 환경의 혹독한 조건에서 높은 성능과 함께 안정성까지 지닌 좋은 촉매를 개발한다는 것은 매우 어려운 일이다. 또한, 정밀하게 설계된 구조의 촉매를 생산하기 위해서는 여러 합성 공정과 분석이 필요하기 때문에 많은 비용이 소모된다. 따라서 해당 기술분야의 상용화를 위해서는 위 조건을 만족하는 촉매를 대량 생산이 가능할 만큼의 촉매 기술의 발전을 이룩하여규모의 경제를 달성해야 한다. 그리고 전해질 성능의 개선, 전해질 소재에 대한 개발이 필요하다. 이렇게 만들어진 촉매가 담지된 전극과 전해질의 접합 기술(membrane-electrode assembly, MEA) 또한 아주 중요하다. 알칼라인 수전해에서 콤팩트하면서 효율을 향상시키는 제로갭 전극구조(zero-gap electrode) 등도 이 기술개발에 해당된다. 현재 이와 관련하여 많은 연구개발이 이루어지고 있다.

다음으로 높은 전기요금에 의한 수소생산과 낮은 기술 성숙도에 의해 야기되는 높은 생산 단가이다. 즉, 어떻게 경제성을 확보할 것인가이다. 미국, EU 등 수소경제 선도국은 대규모 수소 프로젝트를 통해 장기적인 목표를 갖고 기술 개발 및 상업화를 위한 투자를 진행하고 있다. 국내 수전해 기술 및 수소생산 경제성의 현황을 파악하고, 수전해 장치의 높은 설치 비용을 낮추기 위한 방안을 기술적·정책적 측면에서 심도 있게 살펴볼 필요가 있다. 신재생 에너지나 원전 등과의 연계나 해외 신재생 전기의 활용 등이 그 예일 것이다.

2. 국내외 수소 기술 및 시장 동향

Q) 국내외 수소 기술의 개발 및 상용화는 어느 정도까지 진행됐는지?

현재 연료전지는 국내외 많은 기업에서 상업적으로 생산 중이다. 미국의 블룸에너지(Bloom Energy), 국내의 두산, SK 등이 발전용 연료전지 시장에 뛰어든 상황이다. 현대차 등은 승용차, 트럭, 버스 등 수송용 연료전지 시장을 열기 위해 고군분투하고 있다. 현재 우리나라는 수소를 이용하는 연료전지 분야에서 세계에서 가장 큰 시장 중 하나이다. 연료전지 선박 등을 위한 새로운 시장 개척을 위한 기술 개발도 활발히 진행 중이다.

수전해 장치는 알칼라인 수전해, 고분자전해질 수전해, 음이온 교환막 수전해, 고체산화물 수전해의 4가지 타입 모두 많이 연구되고 있다. 독일의 지멘스(Siemens), 노르웨이의 넬(Nel), 그리고 미국, 중국, 일본 등 세계 유수의 많은 기업에서는 이미 수전해 장치의 상업 생산 시설을 갖추어 생산 중이다. 생산 시설 규모로는 이미 2022년 전 세계 53 GW 정도가 된다. 알칼라인 수전해와 고분자전해질 수전해가 거의 대부분을 차지하고 있다. 이 두 수전해 기술은 실증 단계를 넘어 대는 단계에 와 있다 할 수 있다. 미국의 블룸에너지 등은 효율이 가장 높은 고체산화물 수전해에 관심을 가지고 상업화에 노력을 하고 있다. 국내의 여러 기업에서도 이 기술에 많은 관심을 가지고 있다. 아직 연구 개발 단계인 음이온 교환막 수전해(AEM)는 국내의 한화솔루션 등에서 활발히 기술 개발이 이루어지고 있다. 유럽(독일의 Fumatech 및Solvay, 이탈리아의 Acta SpA)과 일본(Tokuyama Corporation)을 중심으로 이 AEM 수전해 기술의 상용화가 진행 중이지만, 아직 글로벌 수준에서 성공한 기업은 부재하기 때문에 국내 기업들이 기술 개발과 사업화를 주도한다면 세계 수전해 시장을 선도할 것으로 예상된다.

Q) 특히 현재 중국의 기술 개발 속도가 굉장히 빠를 것으로 예상된다. 국내 수소 기술 개발에 있어서 위협요인 및 문제점과 이를 극복하기 위한 방안은 무엇인가?

특히 수전해 기술에서 주목해야 할 국가가 바로 중국이다. 현재 이 분야에서 가장 공격적으로 투자하고 있는 나라가 바로 중국이다. 친환경과 탄소중립과 거리가 있을 것으로 예상하는 중국이 관련 기술을 선도하려고 하는 점은 주목할 필요가 있다. 국내의 수전해 기술 개발은 전반적으로 부족한 실정이다. 그래도 대학과 연구소를 중심으로 4가지 타입의 수전해 전체에 대한 원천과 일부 실증 규모의 연구 개발이 이루어지고 있다.

우리나라는 아직 수전해 관련 자체적인 기술 확보를 하지 못한 상황이다. 현재 해외에서는 수전해 장치에 대한 수요보다 공급이 부족하여 발주에 수 년 정도까지 지연되고 있는 실정이다.

국내에서는 기술을 수입해서 선진 기술력을 확보하거나 메가와트(MW) 단위의 큰 스케일로 운전 경험을 축적해보고 싶지만 주문 자체가 어려워서 기술개발에 어려움을 겪고 있다. 또한, 정부에서 발표한 2030년 목표 수소 공급량인 300만 톤을 달성하기 위해서는 최소 3GW 상당의 대규모 수전해 설비가 설치되어야 한다. 이미 58MW를 생산하는 독일과 13MW를 생산하는 프랑스와 달리 우리나라는 아직 2030년 10MW급 수전해 시스템 개발을 진행하고 있어 수소생산 목표에 한참 못 미치는 수준이다. 특히 1GW당 설비비용이 약 1조원 정도로 예측되어 너무 비싸기 때문에 현실적으로 해당 수소 공급량을 맞추기는 쉽지 않을 것으로 보인다. 이런 모든 상황이 기술 개발의 필요성을 더 절실히 보여준다 할 수 있다.

국내에서 자체적인 기술 개발 및 확산이 어려운 이유는 여전히 패스트 팔로워(Fast follower) 전략을 취하고 있기 때문이다. 패스트 팔로워 전략은 퍼스트 무버(First mover)로 일컬어지는 시장 선구자의 기술력을 모방하고 쫓아가는 후발주자들의 경영 전략을 말한다. 과거 경제발전을 이룩했던 다른 전통 산업의 경우, 해외에서 선진 기술을 수입해와서 설비 분해 및 설비 시험운행을 하며 해당 기술에 대한 노하우를 얻으며 기술력을 국산화시키는 과정을 거쳤었다. 하지만 현재 미국의 인플레이션 감축법(IRA), 유럽의 핵심원자재법(CRMA) 등과 같이 자국의 자원이나 기술을 보호하는 제도 및 정책으로 인해 과거와 같은 전략을 이용하여 기술을 획득하는 방법은 어려워진 상황이다. 예를 들어 연료전지의 경우, 우리나라가 전세계에서 발전용 연료전지를 가장 많이 설치한 최대 수요를 가진 국가이다. 하지만 기술협약에 따라 설비 운전 데이터나 고장 및 수리 데이터를 해외에서 공유하지 않다 보니 간접적으로 데이터를 추측하여 기술개발을 달성하는 수밖에 없다. 수소기술과 같은 분야에서 패스트 팔로워 전략이 전혀 소용이 없다는 말이다. 특히 중국 등과 같이 가격이 싼 석탄으로 수소를 만들어내며 수소의 가격 경쟁력을 갖춘 국가들이 등장하는 상황에서 우리나라가 보다 적극적으로 자체 기술 개발을 위해 노력해야 한다고 생각한다. 즉, 우리나라의 위상이 퍼스트 무버가 아니면 점점 설 자리가 없어지고 있다 할 수 있다.

새로운 사업이 성장한다는 것은 우리나라가 새로운 시장에 기회가 있다는 의미이다. 타이밍을 놓치지 않고 핵심기술을 개발하며 이를 전세계 확산시켜 시장 우위를 점하기 위한 노력을 기울여야 한다. 현재 우리나라는 기술자에 대한 보상이 적고 사회적인 배려가 아직 부족하다고 생각한다. 기술 패권 시대에 기술을 확보하는 것이 점차 중요해지고 있는 상황에서 향후 우수한 인재를 양성하고 유지하기 위해서는 특허 등 기술 개발에 기여를 했을 때 상당한 경제적·사회적 보상이 필요할 것이다. 과거의 패스트 팔로워 전략에서 벗어나 퍼스트 무버 전략을 취해야 한다. 배터리, 수소 등의 분야처럼 퍼스트 무버 역할을 해야 하는 기술 분야에 성공 사례가 신속하게 나타나서 다른 분야로도 확산이 될 수 있도록 사회 경제적 지원과 정책이 뒷받침되어야 한다.

3. 수소 기술 개발을 위한 정부와 대학의 역할

Q) 국내에서 수소의 중요성을 인지하며 '2050년 탄소중립 추진전략'에서 수소를 핵심 에너지원으로 택했다. 이에 따라 다양한 기술 개발 지원 정책이 이루어지고 있을 텐데, 수소 기술 개발 및 상용화에 대한 정부의 R&D 지원 현황과 문제점 및 해결방안은 무엇인가?

우리나라는 세계적인 수소에너지 기술 핵심 국가 중 하나로, 국가전략기술로 지정된 주요 12개 분야에 수전해 수소생산 및 저장·운송, 수소연료전지가 포함되어 꾸준한 기술발전과 비전을 이어나가고 있다. 이에 따라 개방적인 연구를 통해 기술 격차를 빠르게 줄여가고 있으며 수소에너지의 역할에 대한 인식이 확대되는 추세이다. 하지만 장기적인 전략을 수립하는 단계에 접어들고 있는 주요 기술 선진국과 비교하면, 전 주기적 관점에서의 연계 기술 경쟁력은 상대적으로 저조한 측면이 있다. 성공적인 해외 사례들이 주로 장기간의 연구 수행과 다각적인 교류 및 협력을 기반으로 하고 있지만, 국내의 연구 환경은 아직 미비하다. 하지만 최근 산학연 간 협력이 활발하게 이뤄지며 공동 과제가 많이 진행되고 있어 실질적인 성과를 얻는 과정에 있다. 기술 선도국으로 도약하기 위해서는 향후 다양한 연구 생태계를 구축하여 초학제적인 연구를 활성화하는 구체적인 방안이 제시되어야 한다.

특히 현재 우리나라는 새로운 기술개발을 위한 R&D 지원에 대한 예산은 충분하게 배분되고 있지만, 기술을 실질적으로 상업화시키기 전에 파일럿 테스트(pilot test)와 같은 실증 연구를 하여 트랙 레코드(Track Record)를 축적할 수 있는 부분에 대한 지원이 더 필요하다. 특히 스케일업(Scale-up)한 실증적인 연구가 중요하다. 해외 기업은 10MW와 같이 대규모 설비를 설치하여 진행하고 있기 때문에 국책연구소, 공기업, 대기업 간의 협업을 통해 규모를 최대한 늘려 연구를 진행해야 한다. 아직 국내에서는 실증 분야에 대한 지원은 부족한 상황이다. 이처럼 다자간의 연구 협력을 촉진하며 인센티브 분배 구조를 체계적으로 구축할 필요가 있다.

그리고 정부와 국내 기업들은 수소 산업의 경쟁력 확보를 위해 긴밀한 협력을 추진해야 할 것이다. 오픈 이노베이션 등 전략적 제휴는 대기업과 중소기업, 스타트업 간의 협력을 통해 수소 생태계를 활성화하고 경쟁력을 강화하는 데 중요한 역할을 할 것으로 예상된다. 규제 완화 정책과 함께 대기업과의 전략적 기술제휴를 통해 수소 산업 경쟁력을 높여 세계를 선도하는 정책이 필요할 것이다. 또한 초기 투자 비용 문제에 대한 리스크 분담을 위해 정부와 기업 간의 긴밀한 논의를 통해 협력할 수 있어야 한다.

또한 수소기술의 구현을 위해 이미 제정된 수소법 등의 시행을 원활히 하기 위한 세칙 등 제도 정비에도 지속적 관심을 기울여야 할 것이다. 아울러 수소 생산, 저장, 운반, 저장 등의 국제적

표준화 작업에도 적극 참여하여야 할 것이다. 새로운 산업을 위한 국내외적 법과 제도에서 정부가 그 어느 때보다 큰 역할을 해야 할 것이다.

Q) R&D 프로젝트, 법제도 수립과 같은 정책적 지원 외 정부의 역할은 어떤 것이 필요할 지?

수소기술과 관련한 국내 기술개발의 문제점 중 하나는 연료전지의 실패 사례를 능동적으로 활용하지 못하는 점을 들 수 있다. 과거 포스코, 두산, 한국과학기술연구원(KIST) 등이 협력하여 용융탄산염 연료전지(MCFC) 개발에 투자한 적이 있었다. 가장 전망이 높아 보이는 기술을 택하여 우리나라 정부와 기업들이 힘을 모아 큰 규모의 R&D와 투자를 진행했다. 하지만 실증을 넘어 상용화를 앞둔 시점에 좌초됐다. 우리나라가 기술력을 올린하여 주도한 유일한 경험이었는데, 이 실패 사례를 경험한 후 위험부담이 큰 연구개발은 주저하게 되었다. 위험 부담을 지지 않으려는 것이다. 그리하여 하나의 핵심 기술을 선정하여 투자하기보다는 여러 기술을 선정하여 지원하기 때문에 스케일업을 통해 상업화까지 가기에는 지원이 충분하지 못하다는 문제점이 존재한다. 한정된 예산으로 관련된 모든 기술을 개발하는 식으로 연구개발이 이루어지고 있는 것이다.

이를 극복하기 위해서는 책임감 있는 리더십이 필요하다고 생각한다. 현재의 정부 재원의 투자 및 정책에서의 선택과 집중을 위한 리더십이다. 특히 핵심 기술의 스케일업(Scale-up)을 위해 분산된 기술 투자보다는 집중된 기술 투자가 필요한 상황이다. 이는 기업에서도 마찬가지이다. 기업 전문 경영인의 경우 매년 실적을 내는 것이 더 중요하기 때문에 장기적인 비전을 가지고 투자 위험을 부담하려고 하지 않는 경향이 있다. 또한, 탄소중립이라는 전 세계적 흐름에 대해 안일한 생각을 가지고 있었다고 생각한다. 탄소중립이 단순히 환경 뿐만 아니라 정치, 경제, 사회 등 전반적인 분야에 큰 영향을 끼칠 수 있다고 생각하지 못하고 준비가 미흡했던 것이다. 따라서 정부 혹은 기업의 의사결정권자들이 추진력 있는 리더십을 바탕으로 해당 결정에 대한 책임감을 가지는 것이 중요하다고 생각한다.

Q) 새로운 기술 개발이 중요하기 때문에 대학의 역할 역시 중요할 것으로 보인다. 서울대학교가 할 수 있는 일, 해야 하는 일이 있다면 어떤 것인가?

대학에서의 수소기술 분야에 대한 젊은 인재 양성은 중요하다. 여기에 더해 화학 산업 등에서의 인력 재배치에 대한 교육 수요가 증가하고 있는 상황을 주시할 필요가 있다. 탄소중립 문제가 현실화되는 상황 속에서 화학 산업에서 온실가스 줄이려면 전기화 공정(Electrification)이나 수소 환원 공정 등이 도입되어야 하는 구조이기 때문에 화학 계통의 인력의 상당 수가 업무 전환을 추진해야 할 것이다. 따라서 학교는 이미 기초 지식을 보유하고 있는 경력 인재들을 탄소중립을 위한 신기술 개발과 발전을 위한 인력으로 변화시키는 재교육의 현장이 되어야 한다고 생각한다.

또한, 학교에서 연구가 기존의 연구 문화를 넘어서 스케일업을 고려한 연구로 전환되어야 한다. 단순히 논문을 위한 연구라고 지적되는 부분을 개선하여 실제 산업에 적용될 수 있을만 한 규모의 연구를 해야 한다. 아무리 훌륭한 연구를 하더라도 산업체에 실질적으로 이전이 돼서 적용하지 못한다면 의미가 없기 때문이다. 이러한 점을 개선하여 학교 차원에서 연구를 할 때 실제 산업 규모로 운영되었을 때 의미 있는 연구 결과인지 확인하고 증명하는 작업이 필요하다. 이처럼 바로 산업에 투입되어서 산업 발전을 위해 기여할 수 있는 연구, 그런 연구를 통한 인재를 육성하기 위해 노력해야 한다고 생각한다. 이것이 패스트 팔로우를 넘어 퍼스트 무버로의 연구 전환이라 할 수 있다.

서울대는 교육 기관으로서 수소기술 실천 혹은 실증에도 앞장서야 할 것이다. 서울대가 수소기술을 포함한 탄소중립을 실천하는 사례를 보여주어야 한다는 것이다. 서울대에서 이루어진 연구가 서울대에서 구현되고 이것이 인력양성과 교육에 적극 활용될 필요가 있다. 가능하다면 교육과 실증 시설로서 수소기술 관련 수전해 장치나 연료전지가 캠퍼스에 설치될 수 있으면 좋겠다. 이를 바탕으로 서울대 내에서 스타트업들이 나올 수 있으면 좋을 것이다. 아울러 정책적 판단이 중요한 탄소중립 기술에서의 리더십을 발휘하는 서울대가 되어야 할 것이다.

현재 전 세계적으로 약 1억 톤의 수소가 생산 사용되고 있다. 대부분 석탄과 천연가스에서 생산되는 블랙수소 혹은 그레이 수소이다. 일부 온실가스를 제거한 블루수소가 생산되기 시작했다. 여전히 수전해를 통한 그린수소는 미미한 수준이다. 그런데 탄소중립을 실현할 2050년 수소의 수요량은 6억 톤에 미칠 예정이다. 6억 톤 중 온실가스를 제거한 블루수소가 38%, 나머지 62%는 수전해 장치를 통한 그린수소로 충당하겠다 한다. 그야말로 새로운 산업적 구조를 필요로 하는 것이다. 그래서 수소경제 혹은 수소시대라 부른다. 서울대와 우리나라가 이에 대해 잘 대비하면 좋겠다.

<참고문헌>

IRENA(국제재생에너지기구) 보고서, Green Hydrogen: A Guide to Policy Making (2020).
서울대학교 국가미래전략원, 그랜드 퀘스트2024, 포르체(2023).
맥킨지 보고서, Hydrogen Insights (2023).
세계은행, Hydrogen Reports (2022).
IEA 보고서, Gloval EV Outlook (2023).

열에너지 탈탄소화를 위한 핵심기술, 히트펌프

전 세계 최종 소비 에너지 중 열에너지는 약 50%로 상당히 큰 비중을 차지한다. 국내에서도 약 48%로 마찬가지로 높은 비중을 차지하고 있지만, 열에너지의 탄소 중립에 대한 관심은 아직 현저히 부족한 상황이다. 이러한 열에너지의 탈탄소를 위한 효과적인 방안으로 '히트펌프' 기술이 대두되고 있다. 특히 IEA(International Energy Agency)는 2050 탄소중립 로드맵에서 전기, 산업, 수송, 건물 등 분야에서 탄소중립을 위해 제시한 과제 중 열에너지 부분에서 히트펌프의 확대가 필수적이라고 밝힌 바 있다. 재생 에너지를 활용하여 운용할 수 있는 친환경 기술 중 하나인 히트펌프에 대해 자세히 알아보기 위해 서울대 기계공학부 김민수 교수²²⁾와 인터뷰를 진행하였다.

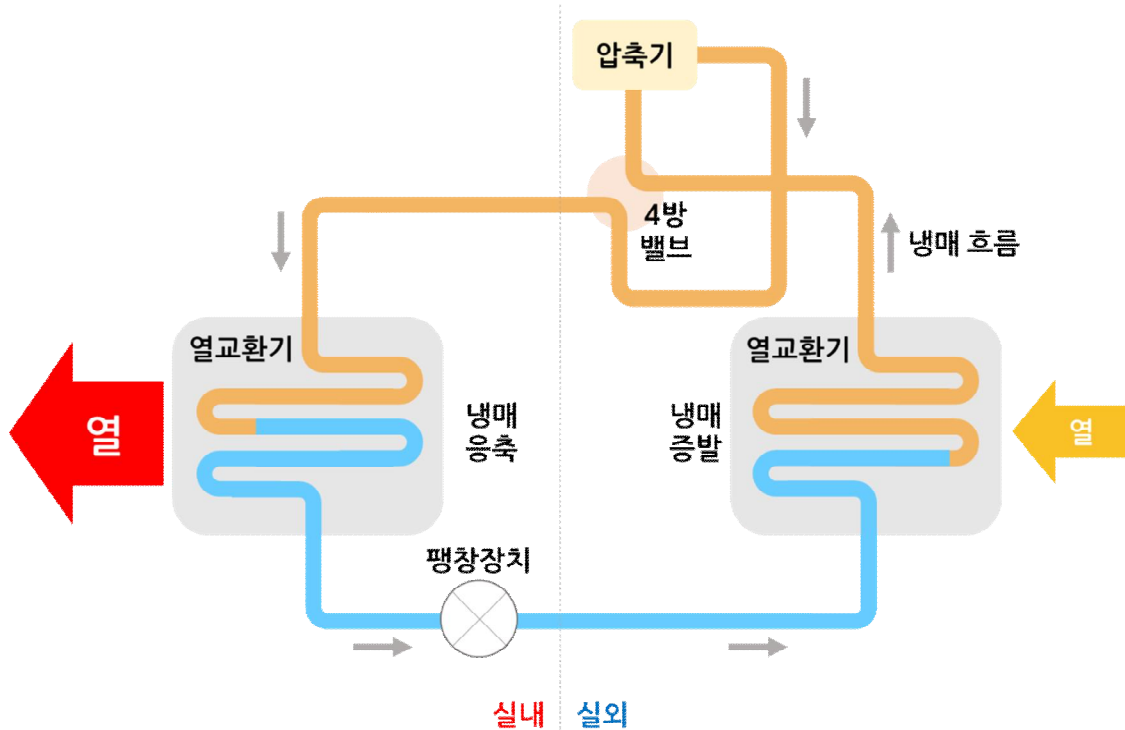
1. 히트펌프 기술의 원리

Q) '히트펌프'라는 기술이 다소 생소한데, 어떤 원리로 작동되는 기술인가?

히트펌프는 전기 에너지를 이용하여 저온부로부터 열을 흡수하고, 이를 고온부로 방출하는 기기이다. 히트펌프 내부를 순환하는 냉매를 압축기로 압축하면 고온고압 상태가 되고, 응축기(열교환기)를 통해 실내로 열을 방출한다. 이후 팽창장치를 통과하여 압력이 감소한 냉매는 온도도 감소하여 저온저압 상태가 되고, 증발기(열교환기)를 통해 저온부로부터 열을 흡수한다. 히트펌프는 이와 같은 과정을 반복하며 응축기가 설치된 실내를 따뜻하게 만든다. 또한, 냉매의 흐름 방향을 바꾸어주는 4방 밸브(4-way valve)를 사용하여 여름에는 실내기가 증발 열교환기, 실외기가 응축 열교환기의 역할을 하게 할 수 있으며, 실내를 냉방시키는 에어컨의 기능을 하게 된다. 히트펌프는 현재 많은 산업체에서 제조하여 보급하고 있으며 기술적으로도 상당히 발전된 단계에 있다고 볼 수 있다.

22) 김민수 교수는 1994년 서울대학교에서 기계공학과 교수로 임용된 이후, 재직 기간 동안 HVAC 관련 기업들과 히트펌프 시스템, 전기차 열관리, 연료전지 연구 등 120여 건의 프로젝트를 진행했다. 특히 이 프로젝트들의 기술 정교화를 통해 248개의 국제 저널 논문과 480개의 컨퍼런스 논문을 발표했으며 지금까지 48개의 한국 특허와 8개의 국제 특허를 보유하고 있다. 최근 2023년 IEA에서 주관하는 제14차 히트펌프학술대회(HPC)에서 Peter Ritter von Ritinger International Heat Pump Award를 수상하며 히트펌프 기술 발전에 크게 기여하고 있다.

그림 10. 히트펌프의 작동 원리



Q) 냉방과 난방이 가능한 전기보일러, 가스보일러와 유사한 기능을 보이는데, 히트펌프가 가진 다른 기기와의 차별성이 무엇인가?

히트펌프는 전기보일러나 가스보일러와 달리 공기열, 지열, 수열, 태양열 등 재생에너지원을 열원으로 활용할 수 있어 투입 에너지 대비 방출 열량, 즉 성능계수(Coefficient of Performance, COP)가 높다. 보일러의 경우, 1차 에너지인 천연가스를 100만큼 사용하였을 때 최대한 100의 열을 만들지만, 히트펌프는 재생에너지원으로부터 열을 흡수하여 100 이상의 열을 공급할 수 있다. 따라서 히트펌프는 에너지 이용 효율이 높고 탄소 배출 감축에도 기여하여 열에너지 부문의 탄소중립 달성에 도움이 될 수 있다. 국제에너지기구(International Energy Agency, IEA)에 따르면, 2050년 탄소중립 (Net-Zero) 시나리오를 달성하기 위해서는 2045년까지 열공급 수요의 50%를 히트펌프로 충족시켜야 한다. 또한, 2025년부터 건물용 화석 연료 보일러의 신규 도입 금지를 권고하고 있다. 특히, 2030년에 6억 대, 2050년에는 18억 대의 히트펌프가 사용될 것으로 예상하는 등 히트펌프 시장이 화석 연료를 사용한 가정용, 건물용, 산업용 보일러를 대체할 수 있는 시장으로 성장하리라 예측하고 있다.

Q) 현재 국내 히트펌프 기술은 아직 상용화 단계는 아닌 것 같다. 향후 히트펌프가 어떻게 발전할 것으로 예측되는가?

향후 히트펌프의 핵심기술은 두 가지 방향성을 가지고 개발될 것으로 예상된다. 먼저, 고온의 스팀 히트펌프 개발이다. 통상적으로 히트펌프의 공급 온도를 높여 수증기를 공급하는 것을 스팀 히트펌프라고 말한다. 이러한 스팀 히트펌프로 산업 현장의 스팀 수요에 대응하여 스팀 발생 보일러를 대체할 것이다. 가정용 및 상업용 히트펌프의 경우 국내 기업들이 이미 기술개발을 충분히 진행한 상태이지만, 산업용 고온 히트펌프 개발은 전 세계적으로 초기 단계이다. 우리나라는 현재 국가연구개발사업으로 공급 온도 120℃에 달하는 스팀 히트펌프 개발을 진행하고 있고, 공급 온도가 180℃에 달하는 고온의 스팀 히트펌프도 추가적으로 개발할 예정이다. 다음으로는 한랭지에서의 성능 확보 기술 개발을 들 수 있다. 히트펌프는 실외로부터 열을 흡수하여 실내로 고온의 열을 방출하는데, 실외기의 온도가 매우 낮은 한랭지의 경우 열을 충분히 흡수하지 못하여 히트펌프의 성능이 크게 감소한다. 꾸준한 기술 개발을 통해 현재 영하의 조건에서도 히트펌프를 통한 난방 열공급이 가능하게 되었으나, 추가적인 사이클 기술 개발 등을 통해 한랭지에서의 난방 성능 향상이 필요하다.

Q) 기술개발이 활발히 진행되기 위해서는 에너지원 확보, 규제 개선 등 다양한 지원이 선행되어야 할 것으로 보인다. 이러한 히트펌프 기술 개발에 있어 가장 어려운 지점과 이를 개선하기 위한 방안은 무엇인가?

히트펌프의 기술개발에 있어 어려운 점 중의 하나는 바로 냉매 규제이다. 모든 히트펌프는 냉매를 사용하는데, 현재 주로 사용되는 냉매들은 지구온난화지수(Global Warming Potential, GWP)가 높다. 최근 강화된 냉매 규제에 따라 높은 GWP를 가진 냉매의 사용이 점진적으로 금지되고 있기 때문에 히트펌프에 기존의 냉매가 아닌 친환경 냉매를 적용해야 한다. 오존층파괴지수, 지구온난화지수, 유럽의PFAS 규제 등을 고려할 때, 이산화탄소, 프로판과 같은 자연냉매가 주요 후보로 거론되고 있다. 이산화탄소를 사용하는 경우 기존 냉매와 특성이 많이 달라 고압에서 작동하는 시스템으로 구축해야 하므로 비용 문제가 발생할 수 있고, 난방 성능이 좋은 반면 냉방 성능이 떨어지는 문제를 해결하여야 한다. 프로판의 경우 냉매 누설 시 가연성으로 인한 화재 발생을 방지할 수 있는 안전 대책이 함께 강구되어야 한다. 이러한 어려움에도 불구하고 학계 및 산업계는 위와 같은 친환경 냉매를 적용한 히트펌프 개발에 매진하고 있으며, 가연성 냉매인 프로판의 충전량을 최소한으로 하는 히트펌프 제품을 선보이기도 하였다.

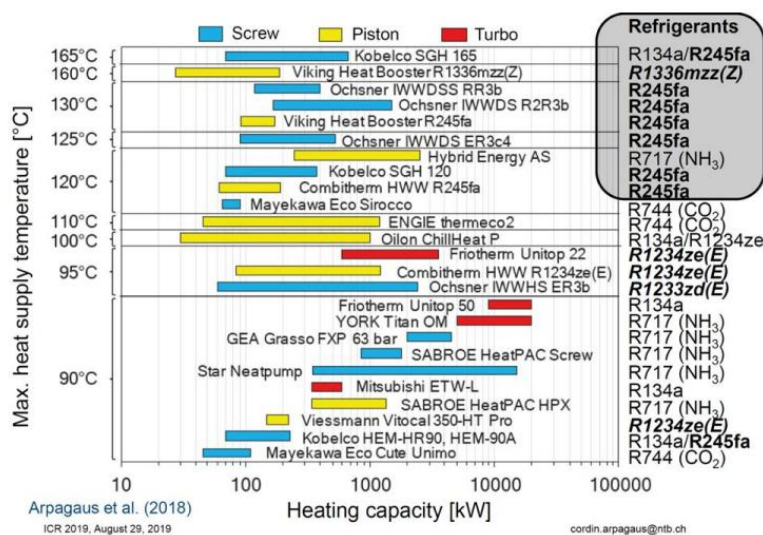
2. 국내외 히트펌프 기술 및 시장 동향

Q) 히트펌프가 가정용, 건물용, 산업용 보일러를 대체하기 위해서는 각각의 용도에 맞는 기술개발이 선행되어야 할 것으로 보인다. 현재 선진국 대비 한국의 히트펌프 기술 개발 정도는 어떠한가?

중저온 히트펌프라고 할 수 있는 가정용, 상업용 히트펌프에 있어서 우리나라의 히트펌프 설계 및 제조기술은 세계적인 수준이다. 특히 국내 대기업들의 뛰어난 기술력을 바탕으로 세계 시장 공략에 나서고 있다. 증기 인젝션 기술 등을 적용하여 저온 환경에서도 사용 가능한 히트펌프를 만들고 있으며, 2023년 유럽ErP(Energy-related Products) 에너지 등급 중 가장 높은 A+++를 충족하는 히트펌프 제품을 선보이기도 했다. 해외 시장에서의 판매량이 점차 증가하는 추세인 만큼 빠른 시간 내에 세계 시장에서 두각을 나타낼 수 있을 것으로 보인다.

하지만 고온 히트펌프라고 할 수 있는 산업용 히트펌프에 있어서는 기술 개발을 위한 많은 노력이 필요한 상황이다. 해외 선진 제조사들은 이미 용량 수십kW에서 수MW 규모까지 이르는 다양한 고온 히트펌프를 출시한 바 있다. 특히, 일본의 Kobelco는 증기 재압축기를 활용하여 165°C의 스팀을 생산하는 고온 히트펌프 제품을 상용화하였다. 하지만 아직 국내 고온 산업용 히트펌프는 상용화된 제품이 없으며 현재 기술 개발 중이다. 국가연구개발사업을 통해 1,000RT 급의 120°C 스팀 생산 히트펌프를 실증하고, 핵심기술인 무급유 터보 압축기를 개발하는 등의 연구가 이루어지고 있는 만큼 향후 우리나라도 세계적인 기술 수준을 확보할 수 있을 것으로 보인다.

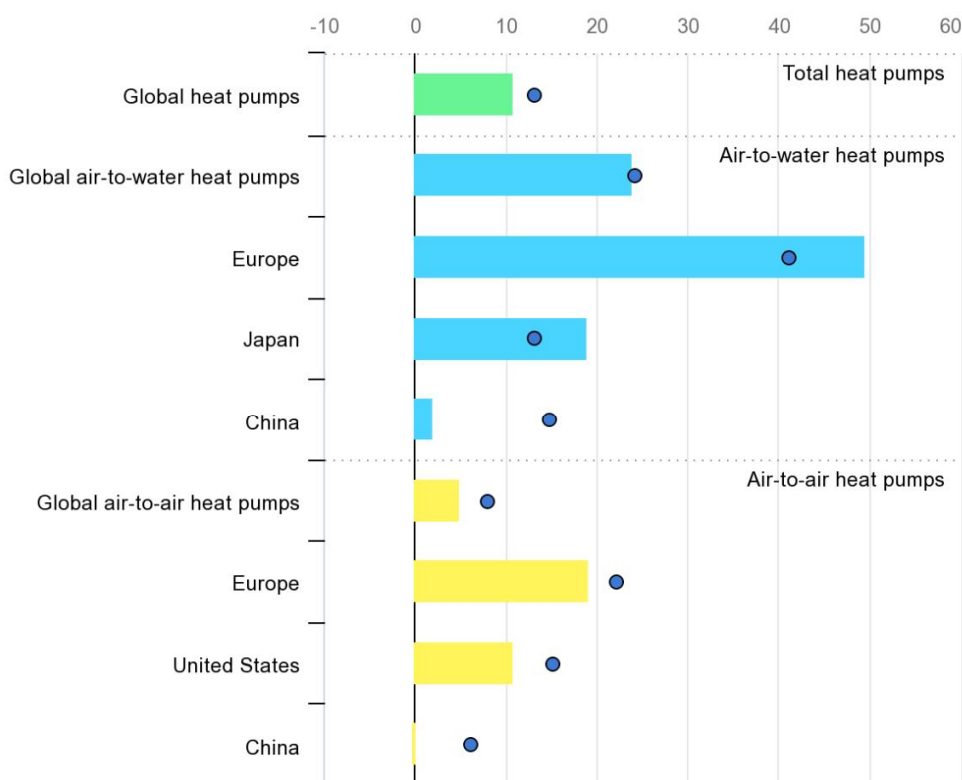
그림 11. 산업용 고온 히트펌프 현황



Q) 현재 국내외 히트펌프 기술 시장은 어떠한 상황이며, 향후 어떻게 진행될 것으로 보는가?

2022년 기준 우리나라는 약11.8조 원에 해당하는 금액의 냉동공조기기를 생산했으며, 수출금액도 약 60억 달러에 이른다. 즉, 히트펌프를 비롯한 냉동공조기기 관련 기술은 국가 산업 경쟁력 강화에 크게 이바지하고 있다고 볼 수 있다. 하지만 향후 유럽 연합이 'REPowerEU' 계획을 통해 현재 약 2,000만 대 수준인 히트펌프 수를 2030년까지 8,000만 대 수준으로 늘리는 것을 목표로 하고 있고, 미국은 히트펌프 설치와 제조에 재정적 지원을 예고하는 등 전 세계 공조시장은 확대될 것으로 보이며, 이에 따라 공조기기 수출 기업의 실적도 꾸준한 상승곡선을 나타낼 것이다. 따라서 히트펌프 관련 기술의 개발은 국가 산업 경쟁력 강화 및 수출 실적 증대에 더욱 중요한 역할을 하게 될 것이며 나아가, 우리나라가 탈탄소화를 선도한다는 국가 브랜드 이미지도 제고할 수 있을 것으로 예상된다.

그림 12. 글로벌 히트펌프 시장 성장(2021년(원) 및 2022년(막대))



출처: IEA Data and statistics (Annual growth in sales of heat pumps in buildings worldwide and in selected markets, 2021 and 2022)

Q) 전 세계 히트펌프 시장이 커질 것으로 예측되는 만큼 기술의 상용화에 대한 기대가 크다. 히트펌프가 실질적으로 가정 및 산업부문에 보급을 위한 방안과 이에 대한 장단점은 무엇인가?

일부 산업 공정에서는 300℃ 이상의 고온을 필요로 하지만 아직까지 고온 히트펌프 기술은 180℃ 급도 연구개발 단계에 있어 산업용 보일러를 완전히 대체하기는 어려운 실정이다. 히트펌프의 공급 온도를 더욱 높여 산업용 보일러를 대체할 수 있는 고온 히트펌프를 개발하는 것은 지속적으로 추구해야 할 과제이다. 또한, 화석 연료 보일러에 비해 히트펌프를 구축하기 위한 초기 비용이 높은 것도 보급, 확산을 어렵게 하는 문제점 중 하나이다. 하지만 탄소중립 등의 친환경성 및 높은 에너지 이용 효율로 인한 장기적 이점을 고려했을 때, 히트펌프로 보일러를 대체하는 것은 피할 수 없는 일이다. 따라서 탄소중립의 핵심기기인 히트펌프로의 교체 또는 신규 설치 시 보조금 등을 지원하거나, 세액 공제 등을 통해 히트펌프의 보급을 장려하는 것이 국가적으로 필요하다.

이전에는 난방용 보일러와 냉방용 에어컨을 개별적으로 설치하여 공간을 많이 차지하였지만, 히트펌프는 한 대의 기기로 냉방과 난방, 그리고 경우에 따라서는 급탕을 제공할 수 있기 때문에 오히려 공간 활용 상 이점이 존재한다. 또한, 히트펌프는 추운 날씨에 작 작동하지 않는다는 인식도 개선되어야 한다. 히트펌프의 성능이 혹한기에 다소 감소하는 것은 사실이지만, 이를 해결하기 위해 인버터 적용 기술, 기상냉매 인젝션 기술 등 많은 개발이 이루어졌으며 최근에 출시되는 제품은 혹한기에도 안정적인 성능을 보인다.

히트펌프 기술의 개발과 보급은 탄소중립의 측면에서 필수불가결한 조치이며, 장기적으로 큰 이득을 가져와줄 것으로 기대되지만, 이를 달성하기 위해서는 공급 온도가 높은 산업용 히트펌프가 개발되어야 하며, 초기 설치 비용에 대한 국가 차원의 지원이 동반되어야 한다. 또한, 히트펌프에 대한 소비자들의 인식 개선을 위한 노력도 지속적으로 해야 한다.

3. 히트펌프 기술 선도를 위한 정부와 대학의 역할

Q) 최종 소비 에너지원 중 가장 큰 부분을 열에너지가 차지하고 있다. 해당 부문의 탈탄소화를 위해서는 히트펌프 기술 개발이 중요할 것으로 보인다. 아직 기술개발을 하기 위해서는 여러 장애 요인이 존재할 것 같은데, 현재 해외 정책 지원은 무엇이 있으며 국내에서는 어떠한 지원 정책이 필요할 것으로 보이는가?

먼저, 히트펌프의 보급이 더 확대되어 시장의 규모가 커지게 하기 위해서는 공기열을 재생에너지원으로 인정하는 것이 필요하다. 우리나라의 '신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법(신재생에너지법)'은 지열, 해수열, 하천수열만을 재생에너지로 인정하여 제도적 지원을 하는 반면, 독일, 영국, 프랑스, 스웨덴 등의 유럽국가들은 2009년부터 지열, 수열과 더불어 공기열을 재생에너지로 지정해왔으며, 미국, 일본, 중국에서도 지열, 공기열, 수열 등 다양한 자연온도 차 에너지원을 재생에너지로 분류하고 있다.

2050 탄소중립 시나리오에 따르면, 우리나라는 2018년 기준 건물 부문에서 총 1억 8천만 톤 CO₂eq의 온실가스를 배출했으며, 그 중 건물의 난방과 취사 등을 위해 사용하는 화석연료로 인한 직접 배출량은 약 5,210만 톤 CO₂eq를 차지한다. 현재 우리나라는 이러한 직접 배출량을 2050년까지 620만 톤 이하로 감축하고자 계획하고 있는데, 이는 히트펌프 보급의 확대 없이는 달성하기 어려운 상황이다. 따라서 공기열 뿐만 아니라 수열, 지열, 태양열 및 이들 열원을 복합적으로 사용하는 히트펌프 모두 재생에너지 이용 기기로 지정하여 보급 사업을 포함한 정책적 지원을 강화해야 한다. 유럽 연합의 경우 각 국가가 위치한 기후에 따라 조금씩 다르지만 공기열원에 대해서는 계절성능지수(Seasonal Performance Factor, SPF)가 2.7 이상인 히트펌프를, 지열원, 수열원에 대해서는 SPF가 3.5 이상인 히트펌프에 대해서 재생에너지로 인정하고 있다. 우리나라도 다른 선진국들과 마찬가지로 성능계수가 일정 수준 이상인 히트펌프를 대상으로 인정하는 등, 국내 상황에 맞추어 히트펌프 확대에 적극 나서야 할 것이다.

표 3. 유럽 의회 및 위원회의 훈령에 따른 히트펌프 재생에너지 인정 기준

		Climate conditions		
		Warmer climate	Average climate	Colder climate
Heat Pump Energy source:	Energy source and distribution medium	SPF	SPF	SPF
Aerothermal energy	Air-Air	2.7	2.6	2.5
	Air-Water	2.7	2.6	2.5
	Air-Air (reversible)	2.7	2.6	2.5
	Air-Water (reversible)	2.7	2.6	2.5
	Exhaust Air-Air	2.7	2.6	2.5
	Exhaust Air-Water	2.7	2.6	2.5
Geothermal energy	Ground-Air	3.2	3.2	3.2
	Ground-Water	3.5	3.5	3.5
Hydrothermal heat	Water-Air	3.2	3.2	3.2
	Water-Water	3.5	3.5	3.5

출처: Official Journal of the European Union, DECISION (2013/114/EU)

이외에도 신규 주택에 대해 가스 그리드 설치를 의무화하는 정책 방향성도 히트펌프 보급과 방향성이 다르기에 개선이 필요하다. 유럽 연합이 신축 가스보일러 설치 금지 또는 히트펌프 설치 의무화 정책을 펼치는 것과 상반되는 모습이다. 아직 국내 신재생 에너지 발전량이 크지 않아 화석연료 난방 방식을 금지하기는 어려우나, 히트펌프를 포함한 재생에너지를 이용한 난방 비중을 점진적으로 높여갈 수 있도록 해야 한다. 신축되는 건물부터 히트펌프의 설치를 장려하는 것이 필요한데, 화석연료 난방 방식을 채택하는 경우 앞으로 수십년 간 화석연료를 쓸 수밖에 없기 때문에 더더욱 서둘러야 하는 정책이다. 국토교통부에서 시행 중인 제로에너지 건축물 인증제도에 열에너지 자립률을 포함하여 히트펌프 난방 비중을 높이는 것도 방법이 될 수 있다.

Q) 새로운 기술 개발이 중요하기 때문에 대학의 역할 역시 중요할 것으로 보인다. 서울대학교가 할 수 있는 일, 해야 하는 일이 있다면 어떤 것인가?

서울대에서는 현재 히트펌프 기술 개발 관련 연구를 지속적으로 수행하고 있다. 서울대에서는 스팀 히트펌프 실험 장치를 구축하여 성능 향상 연구를 수행한 바 있으며, 현재 진행되고 있는 1,000 RT 급의 스팀 생산 히트펌프 실증 연구에도 참여하여 산업용 히트펌프 해석 기술 개발을 담당하고 있다. 또한, 기존의 HFC 계열 냉매를 대체하는 자연냉매인 CO₂, 프로판, 그리고 사이클의 성능을 향상시킬 수 있는 혼합 냉매를 적용한 냉난방 사이클에 대해서도 연구를 수행하여

좋은 성과를 얻은 바 있다. 또한, 히트펌프와 관련된 고급인력을 양성하고 있으며, 사회적으로는 히트펌프에 대한 인식을 개선하는 다양한 노력도 진행하고 있다.

탄소중립 건물 통합설계

건물부문은 2018년 기준 온실가스 배출량이 약 1.8억 톤으로 전체 중 25%에 달하는 상당히 큰 부분을 차지하고 있다. 건물에서의 주 에너지원인 전력의 사용량이 증가함에 따라 직접 배출량은 감소하는 추세이지만, 전력은 석유류 및 도시가스 등에 비하여 단위 에너지당 온실가스 배출계수가 높기 때문에 전체 배출량은 지속적으로 증가하는 추세이다. 특히 건물부문은 주거 및 근무 환경에 밀접한 연관이 있어 2050 탄소중립을 달성하기 위해서는 건물부문을 간과해서는 안되는 상황이다. 건물부문의 전반적인 이해와 해당 분야의 탄소중립 기술에 대한 현황 및 전망을 자세히 알아보기 위해 서울대 건축학과 여명석 교수²³⁾와 인터뷰를 진행하였다.

1. 건물 부문의 온실가스 감축 기술

Q) 건물부문에서 온실가스가 배출되는 요인은 난방부터 취사, 급탕까지 굉장히 다양해 보인다. 현재 이러한 온실가스 감축을 위해서 건물부문은 대체 어떻게 설계되고 운영되는 것인가?

건물부문의 온실가스 배출을 이해하기 위해서는 먼저 건물 설계 시 역할이 나뉘어 있다는 것을 이해해야 한다. 일반적으로 건물을 설계할 경우 건축가(architect)와 엔지니어(engineer)의 역할이 구분되어 있다. 먼저 건축가는 건물 매스(mass) 및 내부 공간과, 외피 등을 설계하고, 구조, 기계/전기 설비, 소방설비 등 엔지니어와의 설계를 총괄한다. 이때 건물의 환경 및 에너지를 조절하는 기법은 표1과 같이 크게 단열, 기밀, 일사차폐 등의 건축 디자인인 패시브(passive)조절과 보일러, 냉동기, 히트펌프 등의 설비 시스템인 액티브(active)조절로 나누어 볼 수 있으며, 패시브적인 기법은 주로 건축가가 담당하고, 액티브적인 기법은 주로 엔지니어가 담당한다. 실제 건물을 설계할 경우에는 이러한 패시브적인 조절과 액티브적인 조절을 효율적으로 적절하게 설계하는 기술이 매우 중요하다.

23) 여명석 교수는 2006년 서울대학교 건축학과 교수로 임용된 이후, 실내 환경 질과 성능(열환경, 빛환경, 공기환경), 에너지 분석과 절약(저비용-고효율 난방 시스템, 건물 에너지 분석), 건물 시스템(HVAC 시스템 디자인 분석, 배관 시스템 디자인 및 분석, 자동 제어) 등 주로 건물의 환경적 성능에 대한 연구를 진행하였다. 최근 서울대 LnL 시범 사업 운영단 총괄단장을 위임하여 학습과 생활을 통합한 전인교육을 실시하며 뛰어난 인재를 양성하는데 앞장서고 있다.

그림 13. 건축설계에서 패시브 조절과 액티브 조절 기법

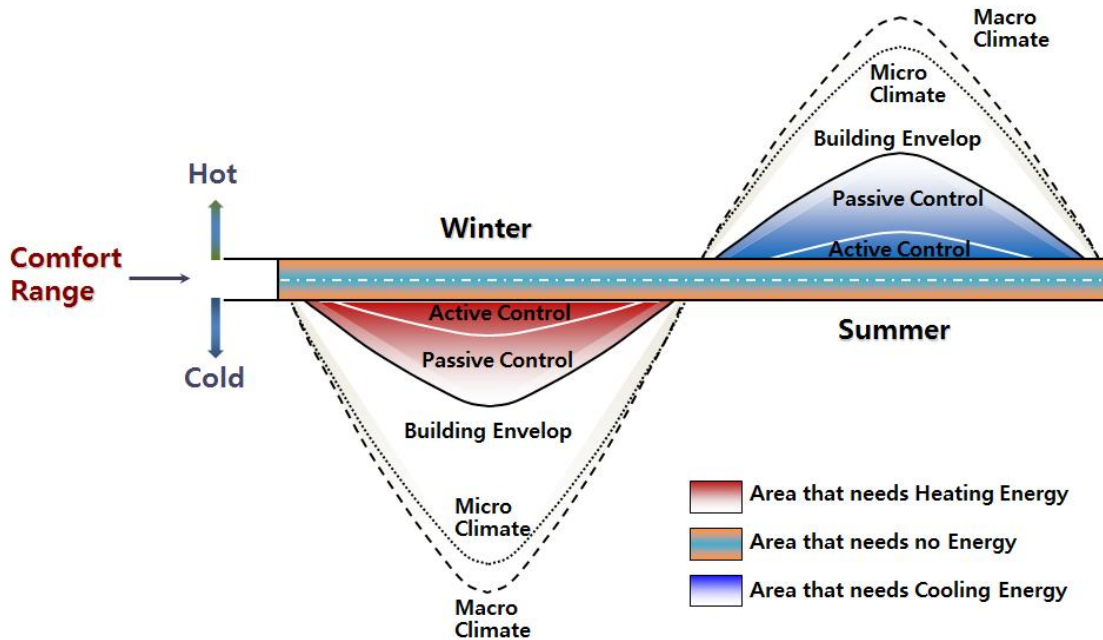
Environment	Passive control	Active control
Thermal	Insulation, shading, natural cooling, alternative energy use	Boiler, chiller, mechanical cooling, fossil fuel use
Visual	Day lighting	Artificial lighting
Sonic	Source control, sound barrier, acoustic design	Active silencer, sound masking, electrical speaker
Air	Source material control, natural ventilation	Cleaning control, mechanical ventilation
other	Rain water use, composting toilet, sewage treatment plant	City water use, flush type toilet, resource recovery waste water treatment

Q) 그렇다면 국내외 건물부문에서 온실가스를 줄이기 위한 기술은 무엇인가?

환경적으로 쾌적하고 에너지 효율적인 건물설계를 위해서는 그림 1과 같이 먼저 기후 및 외피 설계, 건축적인 패시브적인 기법을 최대한 활용하고, 화석연료 등의 에너지를 사용하는 설비적인 액티브적인 기법은 최소화하거나 신재생에너지로 대체할 수 있도록 설계가 되어야 한다. 이를 위해서는 건축가에 의한 패시브적인 설계와 엔지니어에 의한 액티브적인 설계가 최적화된 통합설계(integrated design)를 하여야 한다. 현재 국내의 경우 이러한 다양한 패시브 기법과 액티브 기법의 적용이 활발하지 않고 특히 패시브와 액티브 기법의 하이브리드 적용과 같은 통합 설계 역시 활발하지 않다고 볼 수 있다.

반면 국외의 경우 외피의 단열 및 기밀뿐 아니라 일사차폐 등 패시브에 다양한 신기술을 접목시켜 기능적·미적으로도 뛰어난 건물을 설계하고, 액티브에도 공기열원 EHP/GHP 등의 냉난방이 아닌 복사냉방, 데시칸트 제습 등을 활용하여 친환경적으로 운영하고 있다. 이처럼 해외에서는 에너지 환경 기술 중심적인 건물이 많이 설계되고 있는 반면 국내에서는 기본적인 패시브와 액티브 적용을 통해 건물외관 디자인에 편중되어 있는 경향이 있다.

그림 14. 건축설계에서 패시브 조절과 액티브 조절의 통합설계



Q) 국내 건물부문에서는 어떠한 탄소중립 기술이 적합하고 생각하는가?

한국의 건물부문에는 국내 여건에 맞는 다양한 패시브 및 액티브 설비 시스템을 개발하여 적용하는 것이 중요하다. 국내의 경우, 벽체 및 창호 단열, 기밀화 등의 패시브 기술은 상당히 개발되고 활성화되었는데 냉난방설비 등의 액티브 기술은 상대적으로 다양화하고 활성화되지 못한 실정이다. 국내 액티브 설비시스템을 살펴보면, 주거용 건물은 난방의 경우 지역난방 및 고효율 가스보일러를 주로 사용하고, 냉방의 경우 공기 열원 패키지 에어컨을 주로 사용하고 있다. 그리고 상업용 건물은 공기열원 히트펌프를 냉난방용도로 주로 이용하기 때문에 액티브 설비부문에서는 획일화된 설비시스템에서 벗어나서 다양화된 설비시스템의 개발과 지원 제도가 필요한 상황이다.

Q) 건물부문에서는 재생에너지를 이용하는 냉난방 기술인 히트펌프도 대두되고 있다고 알려져 있다. 건물부문의 탄소중립 기술로서 히트펌프 기술은 어떠한 가?

현재 해외 액티브 분야에서는 신재생에너지를 활용하는 히트펌프의 사용이 증가하는 추세인데,

히트펌프의 경우 저열원에서 고열원으로 열을 전달하는 시스템이기 때문에 건물 및 주변에서 열원(heat source/sink)을 다양하게 확보해야 한다. 예를 들어 하수폐열, 지열, 수열, 태양열 등을 통한 다양한 신재생에너지로부터 열원을 얻을 수도 있다.

기본적으로 히트펌프는 저온부의 열을 흡수하여 고온부로 열을 방출하는 원리로 저온부와 고온부 온도차이가 크면 클수록 히트펌프의 효율이 저하되어 에너지 소비는 증가할 수 있다. 그러므로 신재생에너지를 이용한 히트펌프 적용 활성화되어야 할 것이다. 열원(heat source/sink)으로서 공기열원이 아닌 지열 및 태양열, 수열 및 하수, 기타 폐열 및 미활용 열 등을 이용한다면 겨울 난방 시 외기온보다 훨씬 양호한 조건의 온도에 작동되므로 효율적일 수 있기 때문에 신재생에너지를 이용한 히트펌프가 주목받고 있다. 결과적으로 이미 존재하는 히트펌프 기술에 어떤 열원(heat source/sink)을 활용하느냐가 중요한 것이다.

Q) 탄소중립 사회로의 도약을 위해서 히트펌프 기술은 상당히 매력적인 대안이 될 수 있을 것 같다, 기술개발 혹은 활용에 관한 문제점이 있는가?

액티브 설비시스템으로서 신재생 활용 히트펌프는 대부분 건물의 중앙식 설비로 설치가 쉽지 않다는 문제가 존재한다. 중앙식 설비시스템이기 때문에 현실적인 지하기계실 및 배관설치 공간 등의 확보가 필요하며 다음으로 비용 문제도 있다.

국외의 경우 전력, 가스 등 유틸리티 에너지 비용이 크기 때문에 에너지 효율이 높은 설비를 설치하여 비용을 아낄 수 있지만, 국내의 경우 상대적으로 에너지 비용이 저렴하여 에너지 효율이 높은 설비를 비싸게 설치하는 것이 투자회수 관점으로 불리할 수 있다. 국내에서는 이러한 낮은 에너지 비용도 문제지만 건축 공사 및 설계비가 상대적으로 저렴하다는 문제점도 있다. 저가의 공사와 설계에 익숙해지다 보니 국외의 다양한 건물만큼 창의적인 패시브 설계와 액티브 시스템 제안이 나오기가 어려운 상황이다.

2. 국내외 건물부문의 기술 및 시장 동향

Q) 우리나라에서 건물부문의 온실감축 저감 기술이 적용되었다는 사례는 접하기 어려웠다. 다른 선진국 대비 한국의 건물부문의 탄소중립 기술 개발 및 적용의 현황은 어떤 지, 향후 발전 방향은 어떠한 것이 있는가?

유럽은 앞서 언급한 바와 같이 패시브와 액티브 분야의 설계 기술 개발이 다양하고 활발하게 전개되고 있는 상황이다. 특히 패시브와 액티브 기술의 통합설계(hybrid design)을 통해 최적의 환경과 에너지 소비를 건물에서 유도하고 있다.

국내의 다양한 패시브 기술의 개발과 활성화를 위해서는 정부의 지원과 정책이 요구되며 건물주 및 거주자의 인식변화 등 다양한 부분에서 변화가 필요하다. 아울러 패시브 기술과 액티브 기술의 하이브리드 통합설계(integrated design)를 위해서는 새로운 기술의 통합적용을 위한 건축설계자와 엔지니어의 노력과 협업이 무엇보다 요구된다고 할 수 있다.

액티브 설비시스템으로서 히트펌프 활용 액티브 시스템의 효율화를 위해서는 히트펌프의 열원(heat source/sink)을 확보하는 것이 중요하다. 열원으로써 지열, 수열, 태양열 등 신재생에너지원을 이용하거나 폐열 및 미활용 열 등을 활용할 수 있도록 하며 특히 해당 건물자체에서 이를 모두 확보하는 것도 중요하지만 도심에서 블록단위, 지구단위로 이러한 열원을 상호 확보하도록 하는 광역화 계획도 필요하다.

3. 건물부문의 탄소중립을 위한 정부와 대학의 역할

Q) 건물부문은 전체 온실가스 배출량의 1/4을 차지하고 있기 때문에 탄소중립을 달성을 위해서는 간과해서는 안되는 중요한 부문인 것 같은데, 건물부문의 탄소중립에 대한 지원 및 정책은 타 부문 대비 다소 약해 보인다. 현재 우리나라의 관련 정책은 무엇이 있는가? 그리고 이를 효과적으로 지원하고 실행하기 위해서는 어떤 노력이 필요할 것이라고 생각하는가?

현재 서울시에서는 작년('23년)에 '30년까지 지열에너지를 원전 1기 설비용량에 해당하는 1GW 수준으로 확대하는 '지열보급 활성화 종합계획'을 통해 지열을 이용한 히트펌프를 활성화시키겠다고 발표했다. 이처럼 탄소중립 달성을 위한 히트펌프의 도입이 본격화될 전망이다. 이를 위해서는 먼저 에너지 가격이 안정화되어야 한다. 해외 대비 국내의 전기요금체계를 조정하고 에너지 가격을 안정화시켜 에너지효율 및 탄소절감에 도움되는 설비 설치의 필요성을 강조할 필요가 있다고 생각한다. 다음으로 설계 및 공사 비용에 대한 인식 제고가 필요하다. 건설 및 설계에서는 대부분 기존 관행대로 보수적으로 설계하는 경향이 많은데 정부는 설계자를 위한 지원, 건강한 설계 환경 조성 등으로 부담을 줄여주고 창의적인 설계가 창조될 수 있도록 다양한 설계 아이디어가 도출될 수 있는 환경 및 지원 제도가 마련되어야 한다.

또한, 부동산의 가치와 인식에 대한 변화가 필요하다. 건물주의 경우 에너지 측면에서 건물을 짓기 위해서는 추가적인 비용이 필요하다. 하지만 보통 직접 거주하기 않고 임대자에게 빌려주는 형태로 운영되기 때문에 에너지 효율 및 탄소중립 달성 등을 위한 설계에 대한 동기부여가 크지 않다. 따라서 부동산 가치가 단순히 비용 뿐만 아니라 다양한 방면으로 평가받을 수 있도록 제도나 시장 시스템의 변화가 필요하다. 예를 들어, 세입자에게는 에너지 효율이 높은 주거지가 유틸리티(utility) 비용을 줄여주기 때문에 월세를 더 받게 할 수 있도록 하는 제도나 에너지 효율이 좋지 않은 건물을 지을 시 세금을 더 부과하는 등 제도를 개선해야 한다. 아울러 현재 국내에서 건물의 가치는 에너지 및 탄소중립보다는 부동산적 가치가 더 우위를 차지하고 있는데 이러한 국내 건축문화 인식도 제고되어야 한다.

마지막으로, 도시 단위로 실증해볼 수 있는 실험적 과제를 제공해야 한다. 건물부문은 자체 건물 안에서만 탄소중립을 달성하기 어려울 수 있다. 따라서 블록단위, 지구단위 등 도시 전체의 협력 관계가 필요하다. 특히 컴팩트 도시(compact city) 등의 개념도 도출되었는데 패시브 기술과 액티브 기술의 건물 자체 활용 뿐 아니라 광역적인 차원에서 이를 활용할 수 있는 것을 실증해볼 수 있는 기회가 필요할 것이다.

Q) 새로운 기술 개발 및 적용이 중요하기 때문에 대학의 역할 역시 중요할 것으로 보인다. 서울대학

교가 할 수 있는 일, 해야 하는 일이 있다면 어떤 것인가?

건축부문에서는 다양한 패시브 및 액티브 기술에 대한 개발과 적용, 활성화가 더욱 필요한 시점이다. 건물의 패시브 및 액티브 기술 관련 기존 개발된 기술의 적용한계와 난제를 풀어내고, 새로운 기술을 개발하고 적용할 수 있도록 해야 할 것이다. 특히 서울대는 다양한 전공의 교수와 연구진이 있으므로 이러한 기술개발과 융합화가 더욱 용이할 것이다.

아울러 패시브 및 액티브, 건축가와 엔지니어가 융합된 통합설계(integrated design) 영역의 발전과 활성화가 필요하다. 각 분야의 전문성도 필요하지만 향후 이를 통합하는 연결고리 역할을 하는 기술개발과 인재 양성이 중요해질 것이다. 해외의 건축 설계사무소에는 건축의 서로 다른 분야를 연결하고 신기술을 소개하고 적용하게 해주는 기술 코디네이터라고 하는 직업이 실제로 존재한다. 서울대에서도 과목 신설, 융합 전공 개발 등 다양한 교육 시스템을 통해 전반적인 건축부문을 통합할 수 있는 역량을 가진 리더를 키우는 역할을 할 필요가 있다고 생각한다.

또한, 전 세계 대학 캠퍼스 탄소중립 전환의 흐름에 발맞춰 현재 서울대학교가 건물부문의 탄소중립 전환을 선제적으로 시도하는 것도 좋을 것이라고 생각한다. 해외에서는 현재 탄소중립 캠퍼스 전환을 위한 노력이 활발히 진행되고 있지만, 국내에서는 일부 대학을 제외한 대부분의 대학에서는 기후 위기 극복을 위한 대학 캠퍼스 탄소중립 전환의 노력이 크게 진전되지 못한 상황이다. 특히 서울대학교 캠퍼스는 2012년 에너지 사용량 집계 시작 이후 10년 연속으로 서울시 에너지 사용량 1위, 온실가스 배출량도 1위를 유지하고 있다. 최근 서울대학교의 2030년 온실가스 배출량을 예측한 결과, 2030 NDC가 목표인 온실가스 배출량의 32.8% 감축을 하기 위해서는 서울대학교의 전력량은 현재로부터 18% 정도 증가해야 서울대학교 건물분야 온실가스 감축 목표를 달성할 수 있다. 즉, 도시가스가 전기화가 이루어지면 서울대학교에서 사용하는 전기 에너지가 모두 재생에너지로 전환되고 서울대학교 탄소중립 캠퍼스 전환은 이루어질 수 있다는 것이다. 꾸준한 연구를 토대로 서울대학교의 탄소중립 캠퍼스 전환을 달성한다면, 다른 학교로의 긍정적인 스피로버 효과를 기대해볼 수 있을 것으로 예상된다.

<참고문헌>

- Alison G. Kwok, Stein, Benjamin, John S. Reynolds and Walter T. Grondzik, Mechanical and Electrical Equipment for Buildings, Wiley, 2010.
Lechner, Norbert, Heating, cooling, Lighting Design Methods for Architects, John Wiley Sons, 1991.
Jan F. Kreider, Heating and cooling of buildings(2nd edition), McGraw-Hill, 2002.
R. McMullan, Environmental science in building, The Macmillan press Ltd., 1983.
Tao Janis, Mechanical and electrical systems in buildings, Prentice Hall, 2002.
Seonyoung Yun, Dongyoung Kim, Myoungsok Yeo, Hyejin Jung, Jeyong Yoon, Journal of Appropriate Technology, 2024.

탄소중립 사회로 가는 브릿지: 탄소 포집·저장 기술

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)는 2023년 발간된 보고서를 통해 글로벌 온실가스 감축 경로 모델에 탄소 포집·저장(CCS, Carbon Capture and Storage) 기술을 중요한 감축 옵션으로 포함하였다. 다양한 감축 수단을 적용하더라도 일부 산업에서는 감축 비용이 지나치게 비싸거나 감축이 불가능한 경우가 있을 수 있고, 이 경우 불가피하게 탄소 포집을 활용해야 하기 때문이다. 저탄소 사회로의 신속한 전환이 예상보다 어려운 현실 속에서 브릿지(Bridge) 기술로 평가받는 CCS 기술에 대해 알아보기 위해 서울대 에너지자원공학과 정훈영 교수²⁵⁾와 인터뷰를 진행하였다.

25) 정훈영 교수는 2018년부터 서울대학교 에너지자원공학과 교수로 임용된 이후, 재임 기간 동안 지질모델링, 저류층 시뮬레이션, 유동 건설성, 최적화, 데이터 사이언스, 유가스 개발, 이산화탄소 지중 저장 등 다양한 CCUS 분야의 연구를 진행하고 있다. 최근 서울대학교 에너지신산업 혁신공유대학사업단의 '에너지전환정책 세미나'에서 CCS 현황 및 전망에 대해 강의하며 차세대 CCS 인재 양성을 위해 노력하고 있다.

1. CCS 기술의 원리

Q) CCS는 어떤 원리로 이산화탄소를 대기 중에서 제거할 수 있는 것인가? 포집과 저장 기술에 대해 설명해달라

그림 15. CCS 기술의 비유적 이해



출처: <https://www.ft.com/content/88c187b4-5619-11e5-a28b-50226830d644>

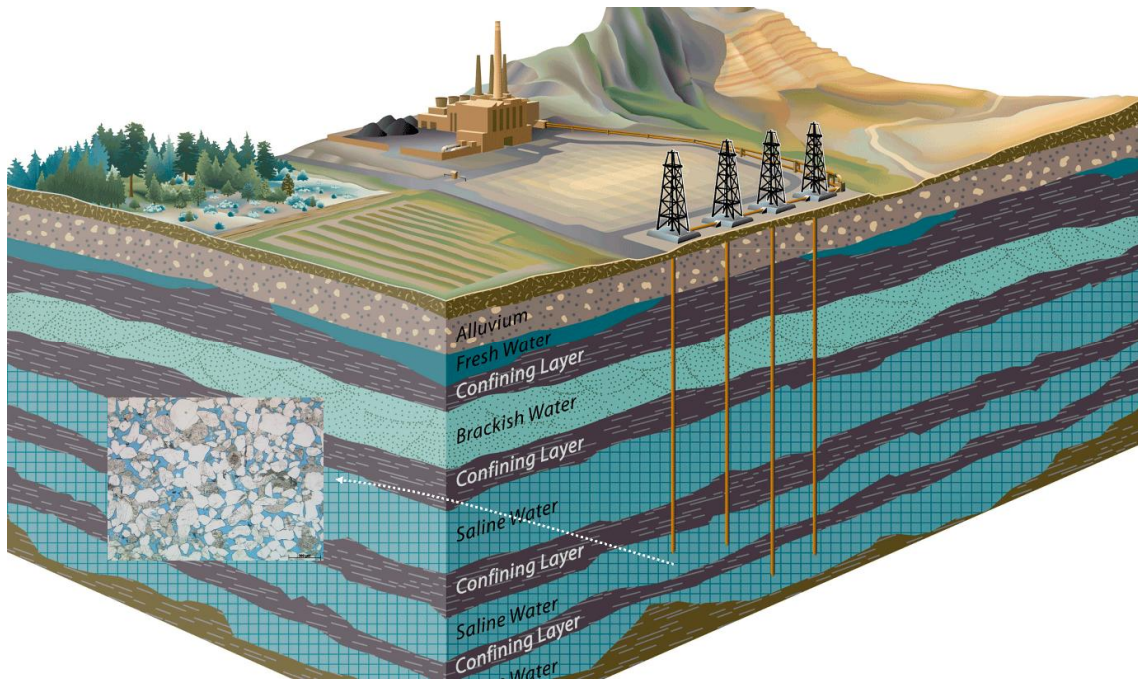
그림 15는 CCS 기술의 쉬운 이해를 돕기 위해 CO₂ 포집, 수송, 저장을 진공청소기에 빗대어 표현한 그림이다. 여기서 보여지는 것처럼 CCS는 배가스의 CO₂를 포집하여 저장소로 수송하고, 수송된 CO₂에 압력을 가하여 땅 속에 주입하고 주입된 CO₂를 대기과 장기간 격리시키는 기술이다.

CO₂ 포집 기술은 크게 흡수, 흡착, 분리막 방식이 있다. 흡수 방식은 배가스의 CO₂를 액상에 흡수시키고 액상에 흡수된 CO₂를 분리해내는 방법이다. 흡착 방식은 배가스의 CO₂를 고체에 물리적 또는 화학적으로 흡착시키는 방법으로 압력 또는 온도 차를 이용해 흡착된 CO₂를 분리한다. 분리막 방식은 분리막에서 배가스의 CO₂를 선택적으로 통과시켜 분리하는 방법이다.

포집된 CO₂는 파이프라인, 트럭, 선박 등의 운송수단으로 저장소까지 수송된다. 파이프라인으로 CO₂ 수송 시 비용이 파이프라인의 길이에 비례하여 증가하므로 장거리 수송 시 선박이 경제적으로 유리할 수 있다.

수송된 CO₂의 저장을 지상 탱크에 고압의 CO₂를 저장하는 것으로 오해할 수 있다. 그러나 지속적으로 배출되는 막대한 양의 CO₂를 지상 탱크에 저장하는 것은 부지 부족으로 인해 불가능하다.

그림 16. CO₂ 암석층 저장



출처: <https://coloradogeologicalsurvey.org/energy/e-co2/>, <http://oildoc.ir/tag/porosity/>

그림 16처럼 지상 탱크가 아닌 지하 암석층에 CO₂를 저장하는 것을 탄소 저장이라 한다. 일상 생활에서 접할 수 있는 암석은 언뜻 보기에 내부에 빈 공간이 없는 것처럼 보일 수 있으나 빈 공간이 암석 전체 부피의 많게는 20~25%까지도 차지할 수 있다. 이러한 암석 내부의 빈 공간을 공극이라 부르고 전체 암석 부피 대비 공극 부피의 비율을 공극률이라 한다. 암석 내부를 확대한 그림에서 푸른 색으로 되어 있는 부분이 공극이며 불균질한 암석 알갱이 모양으로 인해 암석 알갱이 사이에 공극이 존재한다. 지하 암석층에 CO₂를 주입하고 주입된 CO₂는 암석층 공극에 존재하게 된다.

Q) 대부분 암석 사이에 공극이 존재하면 CO₂를 저장할 수 있는 공간도 많을 것 같다. 비용의 문제가 없다면 포집된 CO₂의 양이 많아도 저장하는 데 어려움은 없는지?

주입된 CO₂를 암석층 공극에 저장할 때 크게 3가지 고려할 점이 있다. 첫째, “CO₂가 저장되는 지하 암석층 공극은 주입 전에 빈 공간으로 존재하나?”이다. 정답은 “그렇지 않다”이다. 지하 암석층 공극은 공기가 아닌 대부분 물로 채워져 있다. 낮은 확률로 물이 아닌 유가스로 공극이 채워져 있을 수 있다. 우리가 일상 생활에서 사용되는 유가스는 바로 이 유가스로 채워진 공극

으로부터 생산된 것이다. 유가스로 채워져 있는 암석층 공극으로부터 유가스를 생산하고 생산이 종료되면 공극 속에 유체 양이 감소되면 공극 내 압력도 감소하게 된다. 생산이 종료된 유가스전을 고갈가스전, 고갈유전(또는 폐가스전, 폐유전)이라 하며 공극 내 압력이 낮아 낮은 압력으로 CO₂를 공극에 밀어 넣어 저장할 수 있다. 가스전은 가스의 높은 압축률 때문에 유전에 비해 많은 양을 생산할 수 있어 고갈가스전은 고갈유전에 비해 보다 많은 양의 CO₂를 저장할 수 있다. 공극이 물로 채워진 암석층을 대수층이라 하는데 물은 압축률이 낮아 CO₂ 주입시 높은 압력이 필요하고 CO₂ 주입시 압력 상승 정도가 커 대수층은 동일 공극 부피 고갈가스전에 비해 CO₂ 저장용량이 작다. 그러나 앞서 언급한 것처럼 대부분의 암석층은 공극이 물로 채워진 대수층이므로 대수층은 고갈가스전, 고갈유전보다 더 흔하게 존재한다는 장점을 가진다.

둘째, “공극률과 CO₂ 저장용량의 어떤 관계가 있나?”이다. 앞서 설명한 것처럼 공극률은 전체 암석층 부피 대비 공극 부피의 비율이고 CO₂는 공극에 저장되기 때문에 암석층 공극률이 클수록 많은 양의 CO₂를 저장할 수 있다. 따라서 공극률과 CO₂ 저장용량은 매우 밀접한 관련이 있다고 할 수 있다. 공극률은 현장에서 채취된 암석 시료로부터 측정되거나 암석층의 시추공에 장비를 투입하여 측정하는 물리검층을 통해 평가할 수 있다.

셋째, “단위 시간당 CO₂ 주입량은 공극률과 어떤 관계가 있나?”이다. 두 암석층이 동일한 부피 및 공극률을 갖는다면 같은 부피의 CO₂를 저장할 수 있으나 단위 시간당 주입할 수 있는 CO₂ 양은 다를 수 있다. 같은 1천 만 톤을 저장할 수 있다 하더라도 연간 주입량 100만 톤과 10만 톤은 사업 수익성에 있어 크게 차이가 난다. CO₂ 주입 유량은 공극률이 아닌 암석의 유체투과율과 밀접한 관련이 있다. 암석의 유체투과율은 공극의 크기를 나타내는 지표로 공극이 크다면 유체와 암석 알갱이 사이의 마찰 면적이 적어 유체가 더 빠르게 유동할 수 있다. 따라서 암석의 유체투과율이 크다면 단위 시간당 더 많은 양의 CO₂를 주입할 수 있어 CO₂ 저장 사업의 높은 수익성을 달성할 수 있다. 유체투과율도 공극률과 마찬가지로 현장에서 채취된 암석 시료로부터 측정할 수 있으며 암석 시료 실험 외에도 현장에서 유체 유량과 압력의 변화로부터도 유체투과율을 평가할 수 있다.

Q) CCS 기술의 핵심은 앞서 설명한 세 가지 문제를 해결하는 것과 직결되어 있어 보인다. 실제 어떤 기술개발 이슈가 있고, 해결을 위해 어떤 연구가 이뤄지고 있는가?

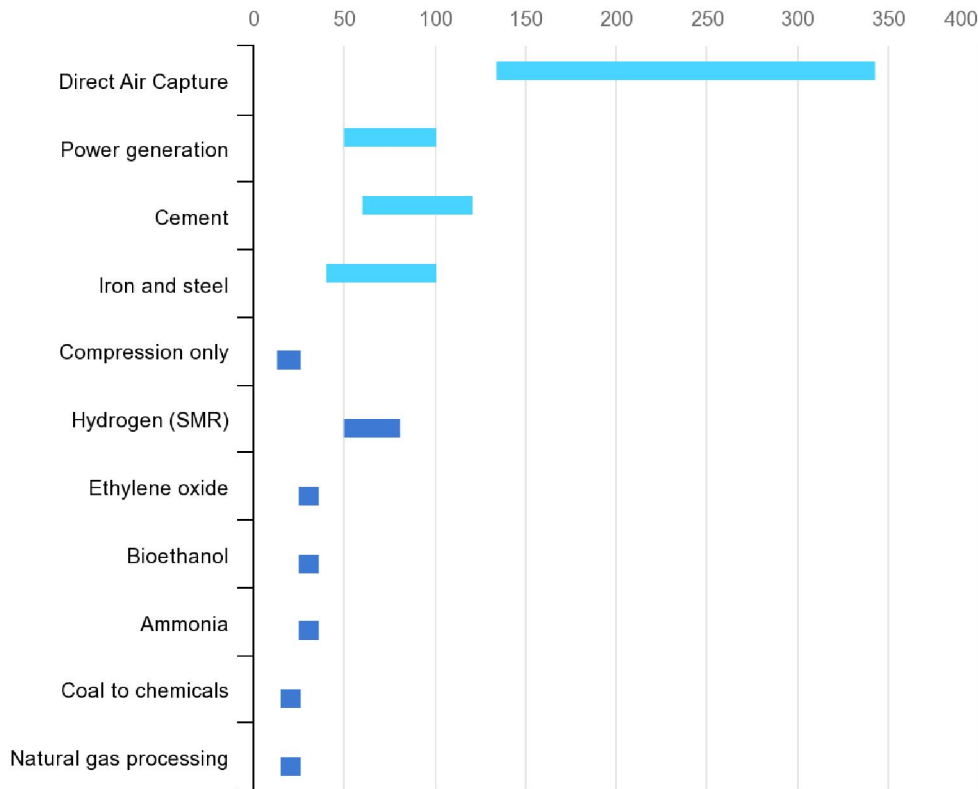
첫번째 기술 개발 이슈는 CO₂ 주입으로 인한 공극압(공극에서의 유체 압력)의 과도한 상승 억제이다. CO₂ 주입으로 인해 공극압이 과도하게 상승하면 누출 및 지진이 발생할 수 있다. CO₂를 암석층 공극에 주입하여 대기와 장기간 격리하는 것이 CO₂ 저장의 목적이다. 그러나 덮개암 파쇄, 유정 주변 균열, 유정 손상 등으로 인해 의도한 암석층으로부터 CO₂가 빠져나와 대기 중으로 누출될 수 있다. 또한 CO₂ 주입으로 인해 단층이 재활성되면 지진이 발생해 큰 피해가 발생할 수 있다. 따라서 같은 양의 CO₂를 주입하더라도 공극압 상승 정도가 낮을수록 보다 안

전하다고 할 수 있다. 공극압의 과도한 상승을 억제하기 위한 주입 효율 및 암석층 공간 활용도 향상을 위한 첨가제 개발, CO₂ 용해 및 광물화 포획 비율 최대화를 위한 주입 조건 최적화, 암염 침전 완화를 위한 주입 유체 조절 등의 연구들이 수행되고 있다.

두 번째 기술 개발 이슈는 CO₂ 저장 안전성 모니터링의 효율화이다. CO₂ 주입 종료 이후에도 주입된 CO₂가 의도한 암석층에 안전하게 저장되어 있는지 장기간 모니터링이 필요하다. 2024년 1월에 국회에서 통과된 “이산화탄소 포집·수송·저장 및 활용에 관한 법률안”에도 저장사업자의 모니터링 의무에 대한 조항이 포함되어 있다. CO₂ 주입으로 인해 암석층의 압력, 밀도, 변위, CO₂ 농도 변화를 모니터링하게 되는데 모니터링에서 관측된 변화가 정상적인지 판단하는데 상당한 분석 및 계산 비용이 발생할 수 있다. 분석 및 계산 비용을 절감하여 CO₂ 저장 안전성 모니터링을 효율화하기 위해 기계학습을 이용하는 연구들이 수행되고 있다.

세 번째 기술 개발 이슈는 CO₂ 포집 단가 절감이다. 그림 17은 배출원에 따른 포집 비용 단가의 범위를 보여준다. 배출원의 물질 구성, CO₂ 농도, 포집 방식 등에 따라 포집 비용 단가의 범위가 크게 달라질 수 있다. 포집, 수송, 저장 비용 중 일반적으로 포집 비용이 가장 높고 CCS 비용은 결국 탄소 배출 제품의 가격에 반영될 수밖에 없기 때문에 기술 개발을 통해 포집 단가 절감이 필요하다. 포집 방식의 에너지 효율 개선, 공정 개선, 소재 개발 등을 통한 포집 단가 절감 연구가 수행되고 있다.

그림 17. 배출원에 따른 포집 비용 단가



출처: IEA, 2021

네 번째 기술 개발 이슈는 CO₂ 부식 문제이다. 일부 CO₂가 물에 용해되어 부식을 일으킬 수 있다. 파이프라인으로 CO₂ 수송 시 물이 일정량 이상 존재하면 파이프라인 부식을 야기해 부식된 부분으로 CO₂가 누출될 수 있다. 이러한 부식은 지상과 지하 암석층 간의 연결관에서도 발생할 수 있다. 부식을 방지하기 위해서는 금속 코팅 및 합금 사용이 대표적이나 경제성 때문에 수백km에 달하는 파이프라인에는 이를 적용하기 어려워 CO₂ 수송 전에 충분히 탈수시켜 부식을 방지한다. 부식율은 압력, 온도, 유체 조성, 유속 등의 영향을 받으나 현재 CO₂ 농도가 높은 경우에 대한 부식율 평가 연구 결과가 부족한 상황이다. CO₂와 불순물이 포함된 각기 다른 조성의 여러 공급원이 있을 경우 파이프라인 수송 시 부식율에 대한 적절한 평가가 어려워 여러 사업자로부터 CO₂를 공급받는 것이 제한적일 수 있다. CO₂ 사업 확장성 향상을 위해 CO₂로 인한 부식율 평가 관련 연구가 필요하다.

다섯 번째 기술 개발 이슈는 석회암층 및 비전통 암석층 CO₂ 저장이다. 현재까지 대부분의 CO₂ 저장은 사암층에 이루어져 왔다. 사암층은 공극률이 크고 공극 간 연결성이 양호하며 CO₂와 반응성이 낮아 CO₂를 안정적으로 저장할 수 있다는 장점이 있다. 공극률이 크고 공극 간 연결성이 양호한 석회암층 또한 CO₂ 저장소로 적합할 수 있으나 CO₂가 용해된 물과 석회암이 반응하여 석회암이 용해되어 누출, 지반 침하, 저장 효율 저하 등의 문제가 발생할 수 있

다. 암석 시료에 대한 석회암층 CO₂ 주입 실험은 많이 이루어졌으나 상업적 규모의 석회암층 CO₂ 저장소 개발은 계획 단계에 있다. 상업적 규모에서 석회암 용해로 발생할 수 있는 문제의 위험성을 낮출 수 있는 기술 개발이 필요할 것으로 판단된다. 석회암층 외에도 미래에는 현무암층, 셰일층, 가스가 함유된 석탄층(Coalbed Methane, CBM)과 같은 유체투과율이 낮은 비전통 암석층에 대한 저장도 필요할 것으로 예상된다. 비전통 암석층은 사암층 및 석회암층에 비해 저장소 개발 난이도가 높으나 충분한 CO₂ 저장용량 확보를 위해 비전통 암석층 CO₂ 저장 기술 개발도 필요할 것으로 판단된다.

2. 국내외 CCS 기술 및 시장 동향

Q) 해외에서도 CCS와 관련하여 여러 프로젝트가 진행 중인 것으로 알고 있다. 현재 기술 수준은 어떤 지 궁금하다.

CO2 포집은 유가스에 포함된 CO2 제거를 위해서 오래 전부터 적용되어 왔다. 포집된 CO2는 다른 암석층에 주입되거나 오일 회수 증진에 활용하기 위해서 유전에 주입될 수 있다. 표 4는 대표적인 CCS 사업의 정보를 요약한 표이다. 여기서 주어진 것처럼 CCS 기술은 90년대부터 유가스에 포함된 CO2를 대규모로 포집하고 지하 암석층에 저장하는데 적용되어 왔다. 이처럼 CCS 기술은 유가스 산업에서 오랜 기간에 걸쳐 현장 적용되어온 기술이다.

표 4. 대표적인 CCS 사업

프로젝트명	국가명	운영기간	CO2 포집원	CO2 저장량
Sleipner	노르웨이	96'-22'	생산 가스의 9%	1 백만톤/년
Snøhvit	노르웨이	08'-	생산 가스의 5-8%	70 만톤/년
In Salah	알제리	04'-11'	생산 가스의 4-9%	54 만톤/년
Quest	캐나다	15'-	비투멘 개질에 필요한 수소 생산시 배출되는 CO2	1 백만톤/년
Decatur	미국	17'-	옥수수 에탄올 추출시 배출되는 CO2	52 만톤/년
Gorgon	호주	16'-	생산 가스의 14%, 1%	2 백만톤/년

기존 유가스 관련한 CCS 사업 외 탄소 저장을 상업적 목적으로 하는 대표적인 CCS 사업은 노르웨이의 노던 라이트(Northern Lights) 프로젝트다. 그림 18처럼 해양 국경을 넘어서 탄소 수송 및 저장하는 서비스를 제공하는 최초의 프로젝트로, 수년 내로 시행될 예정이다. CO2 1톤의 수송 및 저장 서비스에 대해 30~55유로 정도의 가격이 될 것으로 예상되고 있다.

2023년 7월 기준 운영 중인 전 세계 CCS 시설의 포집 용량은 약 5천 만톤/년이며 건설 및 개발 중인 포집 용량은 약 3.12억 톤/년이다. 2020년 이후로 CCS 시설의 포집 용량은 해마다 50% 이상 증가하고 있다.

그림 18. 노던 라이트 CCS 프로젝트의 탄소 수송경로 및 저장소 위치

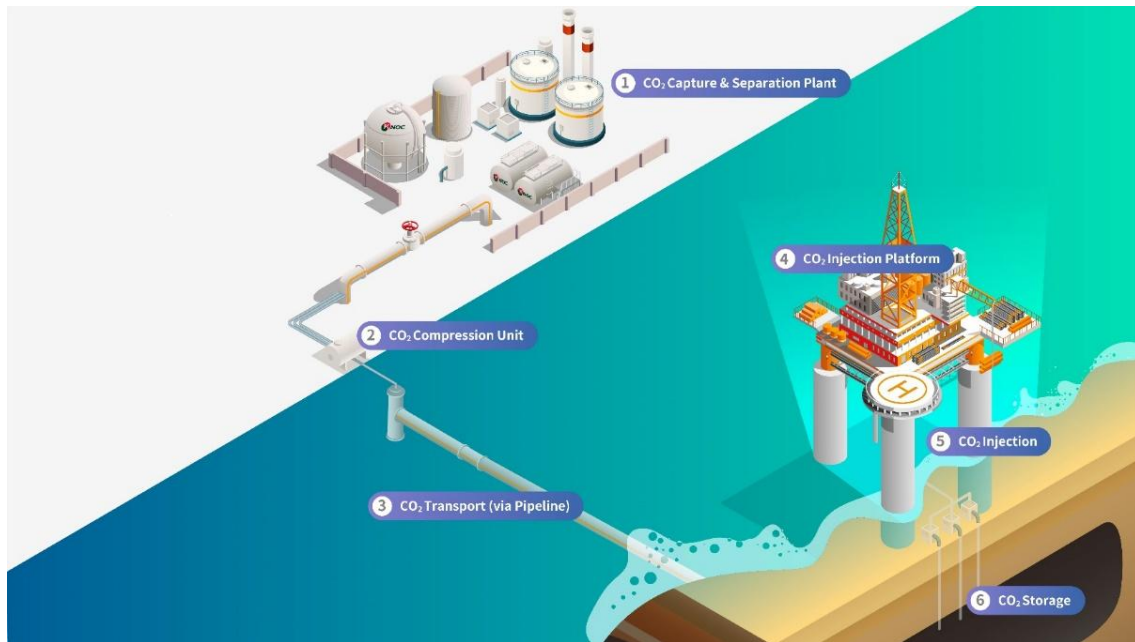


출처: <https://www.brevikccs.com/en/facts>.

Q) 국내에는 유가스전이 거의 없기 때문에 탄소 저장 기술의 획득 및 저장 공간확보에 있어서 불리해 보인다. 현재 국내에서도 CCS 기술 상용화를 위한 연구가 진행 중인가?

국내에서는 2021년 생산이 종료된 동해가스전에 CO₂를 저장하는 프로젝트를 추진 중에 있다 (그림 19). 또한 산업통상자원부에서는 지원하는 “대규모 CO₂ 저장소 확보를 위한 기반조성사업”에서는 산학연(한국석유공사, 코코링크, SK 어스온, 서울대학교, 연세대학교, 인하대학교, 한양대학교, 한국지질자원연구원) 컨소시엄에서 국내 대륙붕 CO₂ 저장소 탐사 및 선정을 위한 공동 연구를 수행하고 있다. 국내 막대한 규모의 탄소 배출량과 에너지 전환 속도를 감안할 때 보다 신속한 저장용량 확보가 필요할 것으로 판단된다.

그림 19. 동해가스전 CO2 저장 모식도



출처: https://www.knoc.co.kr/sub03/sub03_9.jsp

Q) 세계적으로 CCS 기술에 대한 관심이 높아 보인다. CCS 기술을 확보하고 일정 수준 이상의 track record를 가진다면 국내 온실가스 감축을 넘어 세계 시장에서 부가가치를 창출하는 것도 가능할 것으로 보는지?

2030년 국가 온실가스 감축목표를 달성하고 수년 내 현실화될 탄소국경세에 대비하기 위해서는 신속한 탄소 감축안 시행이 필요한 상황이다. CCS 기술은 단기간 탄소 감축 달성에 적합한 기술로서 우리나라는 기후변화 위기를 새로운 성장 기회로 전환할 수 있는 충분한 CCS 산업 잠재력을 갖추고 있다. 이는 세 가지 주요 이유에 기반한다.

첫째, 세계 CCS 산업 시장 성장에 대한 기대와 국내의 높은 CO2 감축량 수요이다. 서두에 언급한 바와 같이 2023년 IPCC에서 발간한 보고서에서는 CCS 기술을 글로벌 온실가스 감축 경로 모델의 중요한 감축 옵션으로 포함시켰다. IEA(International Energy Agency)는 2050 넷제로 달성 로드맵에서 CCS 기술의 연간 감축량을 전체 감축량의 16%인 약 53억 톤/년을 할당하였다. CCS 기술의 CO2 톤당 비용을 100불로 가정하면 CCS 기술로 인해 형성되는 시장은 연간 수천억 달러의 시장이 형성될 수 있다. 국내 CO2 저장소 개발을 통해 탄소 감축량을 신속히 달성하고 국내 CCS 사업 경험을 바탕으로 해외 CCS 산업 시장에 진출한다면 신산업 진출 및 추가적인 탄소 감축량을 달성할 수 있을 것이다.

둘째, CCS 산업은 아직 초기 단계에 있어 시장 진입의 적기라 할 수 있다. 2023년 7월 기준 운영 중인 CCS 포집 용량은 IEA에서 제시한 CCS 기술의 연간 탄소 저감 목표 53억 톤의 10분의 1 수준인 연간 약 5,000만 톤으로 CCS 산업은 초기 단계에 있다.

셋째, CCS 기술의 국내 적용을 위한 제도가 마련되고 있으며 국내 기업은 CCS 기술에 대한 충분한 잠재력을 보유하고 있다. 비록 국내 기업의 CCS 사업 실적은 초기 단계에 있으나 포집 기술은 국내 실증에 성공하였으며 저장 기술 또한 유가스 자원개발 기술과 유사하여 국내 기업도 저장 기술에 대한 경험과 잠재력도 충분하다 할 수 있다. 국회는 지난 1월 “이산화탄소 포집·수송·저장 및 활용에 관한 법률안”을 통과시켜 CCS 기술 적용 및 지원을 위한 제도적 근거를 마련하였다. 정부는 관련한 시행령을 제정 중에 있어 CCS 기술 적용의 구체적인 제도적 지원책 또한 마련될 것으로 예상된다.

3. CCS 기술 선도를 위한 정부와 대학의 역할

Q) 기술 개발 외에 한국이 CCS 기술을 선도하기 위해 정책적으로 어떠한 지원이 필요한가?

국내에 CCS 기술 잠재력이 있다 하더라도 CCS 산업 시장이 형성되어 있지 않아 CCS 기술 확산은 쉽지 않은 상황이다. CCS 기술 확산에 있어 앞서 제시한 기술 개발 이슈가 존재하기는 하나 기술 개발 이슈보다는 시장 형성이 더 시급한 문제이다. 아무리 수준 높은 기술을 개발한다고 하여도 기술 적용 시장이 형성되지 않는다면 지속적인 기술 개발은 어려울 것이다.

CCS 산업 시장은 정부의 일관된 규제 및 지원 없이는 형성되기 어렵다. 일반적인 산업에서는 소비자의 자연발생적 수요가 있는 제품 또는 서비스를 제공하여 매출이 발생한다. 그러나 CCS 산업에서는 CO₂ 배출에 대한 규제가 없으면 수요가 발생하지 않는다. 현재 국내 탄소배출권의 대부분은 무상 할당되고 있어 전반적인 탄소 감축 사업 및 기술 개발이 활성화되지 않은 상태이다. 정부는 산업계의 의견을 청취하며 탄소배출권 유상 할당 속도를 조절해야 할 것이나 국내에는 탄소 배출 집약도가 높은 산업이 많아 탄소배출권 유상 할당에 대한 준비가 신속하게 이루어져야 할 것이다.

그러나 탄소 배출을 규제하기만 해서는 CCS를 포함한 탄소 저감 산업 시장이 형성되기 어렵다. 탄소 저감 사업 및 기술 개발에 대한 적극적이고 과감한 초기 지원이 동시에 이루어져야만 탄소 저감 산업 시장이 형성될 수 있다. 국회에서 통과된 “이산화탄소 포집·수송·저장 및 활용에 관한 법률안”에서 기본적인 지원 정책 토대가 마련되었으나 지원을 위한 시행령이 조속히 마련되어야 한다.

Q) 방금 언급한 바와 같이 CCS 기술 적용을 위한 초기 비용이 높은 반면에 국내 탄소 가격은 아직 낮은 수준이다. 장기적인 투자가 필요한 분야에서 금융 관련 지원도 필요할 것으로 보인다.

CCS 사업은 초기에 대규모 자금 투자가 필요하다. 포집 및 수송 시설 건설, 저장소 탐사 및 시추, 주입 시설 건설에 초기 막대한 자금 투자가 필요하여 개별 기업의 독자적인 사업 추진이 어렵다. 이러한 CCS 사업은 해외자원개발 사업과 유사하여 해외자원개발의 성공불 용자 제도를 국내 저장소 개발에 적용하여 CCS 사업 투자를 활성화할 수 있다. 이 외에도 탄소차액결제 제도처럼 탄소가격에 대한 불확실성을 낮추고, 탄소가격이 낮은 초기에도 감축 비용보다 감축에 따른 이윤이 더 클 수 있도록 인센티브를 주는 것이 초기 시장 형성에 큰 도움이 될 것이다.

Q) 마지막으로 CCS 기술 개발 및 축진을 위해 서울대가 할 수 있는 일, 해야 하는 역할은 무엇이라고 생각하는가?

CCS 사업은 통상적으로 계약, 탐사, 평가, 시추, 건설, 수송, 주입, 모니터링 단계를 거치며 지질학, 자원공학, 조선해양공학, 화학공학, 기계공학, 토목공학 등 다양한 학문 분야의 기술 융합을 필요로 한다. 서울대학교는 앞서 언급한 모든 학문 분야에 대한 인재 양성 및 연구 개발을 수행하고 있는 소수의 교육 기관 중 하나이다. 따라서 CCS 기술 개발을 위한 서울대학교의 주요 역할은 융합형 인재 양성 및 연구 개발을 선도적으로 수행하는 것이 되어야 할 것이다. 또한 이러한 융합형 인재 양성 및 연구 개발을 지속적으로 수행하기 위해서는 다양한 분야의 산학연 교류를 활성화할 수 있는 플랫폼이 필요할 것으로 판단된다.

<참고문헌>

Northern Lights Project. "Northern Lights: a European CO₂ Transport and Storage Network". February 24, 2020.

Global CCS Institute, GLOBAL STATUS OF CCS 2023, 2023.

International Energy Agency(IEA), 2020. Energy Technology Perspectives 2020.

International Energy Agency(IEA), 2021. 02. 17. Is carbon capture too expensive, <https://www.iea.org/commentaries/is-carbon-capture-too-expensive>.

International Energy Agency(IEA), 2021. Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector.

국가녹색기술연구소, 2023. IPCC 제6차 평가보고서 종합보고서 기반, 기후기술 대응 시사점: 탄소중립 10대 핵심기술을 중심으로.

Emissions Database for Global Atmospheric Research, 2023. GHG emissions of all world countries.

이종형, 2023. 코앞으로 다가온 탄소국경세와 철강사들의 대응, <https://bit.ly/3G8H64q>.

위기는 기회, 기후테크 산업으로 국가 경쟁력 제고

유엔기후변화협약(UNFCCC) 산하의 기술집행위원회(Technology Executive Committee)는 기후테크를 '온실가스 감축 또는 기후변화 적응을 위한 장치, 기술, 실용적 지식 또는 방법'으로 규정하고 있다. 우리나라의 기후변화 대응 기술개발 촉진법에서도 기후변화 대응 기술을 '온실가스 감축 기술'과 '기후변화 적응 기술' 두 가지로 설명하고 있다. 향후 이러한 두 기술을 통합한 신산업인 기후테크 산업 및 시장이 전세계적으로 대두될 것으로 예상되고 있다. 탄소중립 시대의 새로운 먹거리가 될 수 있는 기후테크에 대한 정의 및 현황에 대한 전반적인 이해와 미래의 기후테크 시장 전망을 알아보기 위해 서울대 환경대학원 정수종 교수²⁷⁾와 인터뷰를 진행하였다.

1. 기후테크 기술

Q) '기후테크'는 최근 새로 등장한 개념인 것으로 보인다. 기후테크의 정의에 대해서 자세히 설명해 달라.

2023년 2050 탄소중립녹색성장위원회(이하 탄녹위)는 기후테크를 '기후(Climates)와 기술(Technology)의 합성어로, 기후 위기 해결을 위한 온실가스 감축 및 기후변화 적응에 기여하는 혁신 기술을 통해 수익을 창출하는 산업'으로 새롭게 정의하였다. 기존의 기후테크가 주로 기후 기술, 즉 원천 기술과 관련된 과학 및 공학 기술에 초점을 맞추었다면, 탄녹위가 제시한 기후테크는 그러한 기술이 산업에 적용되고 수익을 창출하는 일련의 과정 및 결과를 포함하는 더 넓은 개념으로 볼 수 있다.

27) 정수종 교수는 2018년 서울대학교 환경대학원 환경계획학과 교수로 임용된 이후, 환경 및 기후변화의 메커니즘, 미래 변화를 정확히 예측하기 위한 융합과학 연구를 진행하고 있다. 산림청 미세먼지 대응 협의회 위원, 서울시 서울기술연구원 기술평가위원, 한국기상학회 환경 및 응용기상 분과 위원장, GTC 녹색기술센터 기후기술전문가협의회 위원, 환경부 미래전략 기획위원 등을 역임하며 명실상부 대한민국의 대표적인 기후 환경 전문가이다. 최근 기후테크 센터를 설립하여 기후환경 변화로 인한 새로운 기술로의 신속한 전환을 위해 기후테크 관련 전문가를 육성하며, 관련 분야의 산학연 네트워크를 촉진하고 있다.

기후테크는 클린(Clean), 카본(Carbon), 지오(Geo), 푸드(Food), 에코(Eco) 5대 분야로 구분된다. 클린은 재생·대체에너지 생산 및 분산화 솔루션을 제공하는 기술, 카본은 공기중 탄소포집·저장 및 탄소 감축 기술, 지오는 탄소관측·모니터링 및 기상정보를 활용하는 기술, 푸드는 식품 생산·소비 및 작물 재배 과정 중 탄소 감축 기술, 에코는 자원 순환, 저탄소원료 및 친환경제품을 개발하는 기술을 나타낸다.

그림 20. 기후테크 분야



2. 국내외 기후테크 기술 및 시장 동향

Q) 해외에서는 탄소중립 흐름에 빠르게 편승하고 있는 만큼 기후테크 시장이 새로운 기회이자 블루오션으로 여겨질 것 같다. 해외에서 현재 기후테크 시장 상황은 어떠한 가?

해외에서는 이미 기후테크 시장이 빠르게 성장하고 있으며 향후 시장의 성장 가능성도 높을 것으로 전망하고 있다. '23년 기후테크 시장 가치는 약 27조 원으로, 10년 뒤에는 약 10배 증가하여 연평균 증가율(Compound annual growth rate; CAGR)이 24.5%에 달할 것으로 예상된다. 최근에는 경기침체로 인해 투자 시장이 경색되어 있음에도 불구하고 전체 투자 중 기후테크에 대한 투자 비율은 증가하는 추세이다. 실제로 2023년에 2022년 대비 투자금이 30% 줄었음에도 초기 단계의 투자금은 여전히 증가하고 있어, 기후테크 산업의 수익성보다는 성장 가능성에 대한 기대감이 높다는 것을 알 수 있다. '23년 기준 글로벌 유니콘 기업의 수는 82개로, 기후테크 5대 분야로 나누어 보면 카본(28)과 클린(27) 분야에 가장 많이 분포해 있다. 그러나 카본테크 유니콘 기업 중에는 모빌리티 관련 기업이 64%를 차지하고 푸드테크 유니콘 기업에는 농업기술에 해당하는 애그테크 분야가 53%를 차지하였다는 점이 특징적이다. 일반적으로 DAC(Direct Air Capture)나 탄소포집 및 활용 저장(Carbon Capture and Utilization and Storage; 이하 CCUS)을 카본테크를 대표하는 것으로 여겨지나, 유니콘 기업의 비중은 모빌리티 분야에서 높다는 것인데, 이는 기술성숙도가 높은 분야에서 대형 투자를 유치하기 용이하다는 것을 시사한다.

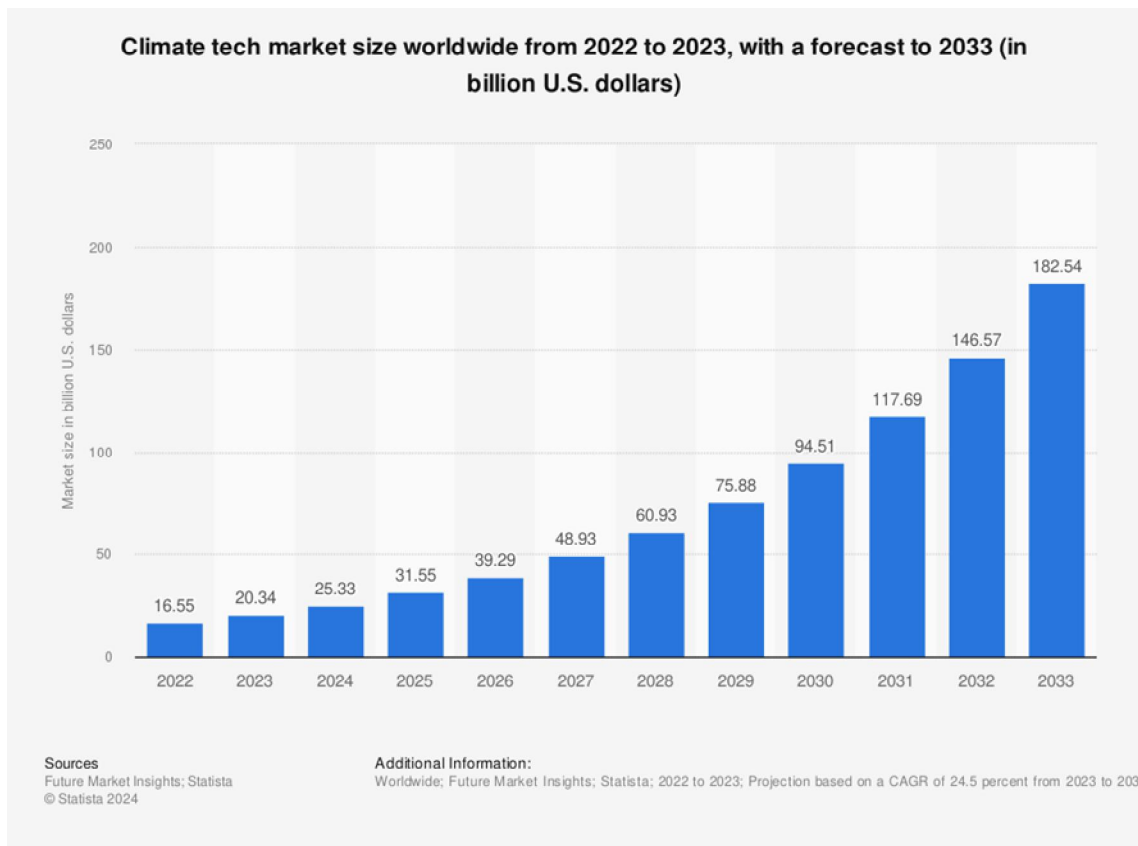
기후테크 유니콘 기업을 가장 많이 배출한 국가는 미국이며, 이에 뒤이어 중국, 유럽 국가들이(독일 5개, 영국 4개, 스웨덴 3개) 많은 유니콘 기업을 보유하고 있다. 미국, 중국, 그리고 유럽에서 상대적으로 많은 유니콘 기업이 배출된 것은 해당 국가들의 선제적 기후테크 육성정책과 활발한 민간 투자에 기인한 것으로 보인다. 실제로 미국의 경우 2022년에서 2031년까지 IRA(인플레이션감축)법을 통해 기후 관련 예산 약 480조를 사용할 예정이고, 중국의 경우 한 해 청정 에너지 투자금이 710조에 달하며, EU(유럽연합)는 2022년에서 2027년 동안 REPower 예산이 약 281조로 책정되어 있다.

Q) 우리나라에서는 기후테크 개념이 생소한 만큼 해당 기술 발전 및 시장 형성이 아직 부족하다고 보인다. 국내에서 기후테크 기술과 관련 시장은 어떠한 가?

국내 기후테크 시장은 해외에 비해서는 미미한 수준이나, 최근 들어 투자 규모나 건수가 급격히 증가하고 있다. 이는 최근 기후변화로 인한 인적·물적 피해가 급증하면서 탄소중립에 대한 국제적 선언 및 규제 강화에 발맞춘 변화로 보인다. 최근 국내에서도 임팩트 투자사의 기후테크 펀드 조성, 대기업 오픈 이노베이션 등이 활성화되고 있으며, 정부 차원에서의 기후테크 육성에 박차를 가하기 위해 2023년 6월에는 탄독위에서 기후테크 육성을 위한 별도의 위원회를

발족하기도 하였다. 2024년 3월에는 금융위원회에서 민관합동으로 기후위기 대응을 위한 금융 지원의 일환으로 기후테크 육성에 2030년까지 총 9조 원을 투자하고, 그 중 3조 원 규모의 기후기술펀드는 신규 조성하겠다고 발표한 바 있다. 하지만 후발주자인 우리나라에는 아직 기후테크 유니콘 기업이 없으며, 대부분 초기단계 투자 유치를 받은 기업이 상당수 분포해 있는 상황이다. 이처럼 국내에서는 스타트업 성적이 저조한 편이지만, 대기업 중심으로 기후테크의 경쟁력을 키우고 있다. 예를 들어, 전기차, 태양광, 배터리 분야의 경우 대기업을 중심으로 글로벌 시장을 선도하고 있다. 하지만 더 빠르고 과감한 기술혁신을 위해서는 정부와 민간의 주도 하에 스타트업을 육성하고자 하는 노력이 필요하다.

그림 21. 기후테크 시장 전망



출처: Statista, 2024.

3. 기후테크 활성화를 위한 정부와 대학의 역할

Q) 향후 탄소중립 사회에서는 기후테크가 수익성 높은 신산업으로 대두될 것은 분명해 보인다. 하지만 국내에서는 아직 시장조차 형성되지 않은 상황인 것 같다. 국내에서 기후테크를 활성화시키기 위해서는 어떤 방안이 있는가?

기후테크 생태계 조성의 후발주자로서 우리나라에서는 여러 기후테크 분야 중 우리가 국제적 경쟁력을 확보할 수 있는 분야를 선택하여 집중 육성할 필요가 있다. 영국의 경우 녹색 산업 혁명이라는 이름 하에 10대 중점계획을 발표하였고, EU 넷제로 산업법에는 기술 성숙 정도와 경쟁력 기여 여부, 공급망 안보 위협 여부를 기준으로 전략기술을 선정한 바 있다. 우리나라의 경우도 전략 분야 선정이 필요하며, 그 기준은 다음과 같이 여러 가지가 될 수 있다: ① 국제적 경쟁력을 확보할 수 있는 분야, ② 기존 산업의 인프라를 최대한 활용하는 분야, ③ 기존 산업의 좌초를 막기 위해 필요한 분야가 그 예이다. 첫 번째로 국제적 경쟁력을 확보할 수 있는 분야의 예시로는 이미 기술성숙도가 높은 에너지 저장 기술, 모빌리티, 태양광 등이 있다.

두 번째로, 기존 산업 인프라를 최대한 활용한 분야의 예시는 플라즈마 기술을 활용한 온실가스 포집 및 에너지 생산 분야가 있을 수 있다. 플라즈마 기술은 반도체 공정에 사용되고 있기 때문에 우리나라가 가진 기존 기술력과 인프라를 활용할 수 있다. 또다른 예로는 우리나라 IT 기술을 활용한 에너지 효율화 및 기후변화 감시 예측 기술이 있다. 마지막으로 기존 산업의 좌초를 막기 위해 필요한 분야로는 철강, 시멘트의 탈탄소화를 돕는 그린수소와 그린 철강이 있다.

이 외에도 아직 경제성이 입증되지 않았으나(늦은 상용화 시점 예상) 우리나라가 주요 원천기술을 확보하고 있는 분야도 집중 육성 대상이 될 수 있다. 그 예로 핵융합 기술이 있는데, 우리나라는 초전도 핵융합연구장치(KSTAR) 개발 및 국제핵융합실험로(ITER) 참여도 하고 있어 핵융합 기술에 있어서 경쟁력을 확보하고 있는 것으로 알려져 있다. 이렇게 기술 성숙도가 낮은 분야는 상용화 촉진을 위한 맞춤형 정책적 지원이 필요할 것이다. 결론적으로 국내의 독자적인 기술테크를 확보하기 위해서는 기존 인프라와 기술력을 활용하여 집중 육성할 수 있는 분야를 발굴할 필요가 있다. 또한, 국내 우수 연구자들에 대한 기후테크 창업을 유도하고, 컨설팅 제도 마련하는 등 산업계의 지원을 강화하기 위한 전략이 필요하다.

Q) 기후테크가 국가중점산업의 좌초를 막을 수 있는 새로운 기술로의 전환의 기회가 될 수 있을 것 같다. 산업 분야별로 기후테크로의 전환에 대한 수요가 있는가?

있다. 우리나라 국가중점산업의 좌초를 막기 위한 기후테크 분야를 파악하기 위해 국내 주요

기업에서의 기후테크 기술 수요는 존재한다. 해당 산업 분야는 크게 세 분야로 분류할 수 있다. 아래 내용은 '24 5월 KDB 산업은행 70주년 행사 내용을 기반으로 재구성되었다.

먼저, 수출입이 잦은 우리나라는 조선 항만 분야에 경쟁력이 있다. 그러나 현재 해상운송 에너지원의 99% 이상이 석유 기반의 연료로, 친환경 선박의 수요가 높아지고 있다. 친환경 선박이란 친환경 대체 연료 사용, 탄소배출 저감 및 에너지 효율 향상 기술(탄소 포집, 운항 최적화, 에너지효율 향상)이 적용된 선박을 의미하며, 그 중 대체연료 추진 기술이 가장 큰 탄소저감 효과가 있을 것으로 예상된다. 단기적으로는 화석연료 운반선에 비해 탄소배출이 25-30% 저감될 것으로 예상되는 LNG와 메탄올과 같은 저탄소 연료로의 전환 및 탄소포집 기술 적용이 필요하고, 장기적으로는 화석연료 운반선에 비해 90%의 탄소배출 저감이 가능한 암모니아와, 수소, 합성연료 등 무탄소 및 탄소중립 연료의 개발이 필요할 것으로 예상된다. 따라서 조선 항만 분야가 좌초산업이 되지 않기 위해서는 상술한 분야의 지원이 필수적이다. 실제로 삼성중공업에서 친환경 선박 산업을 위해 추진 중인 사업을 예로 살펴보면, LNG 핵심기술 고도화, 암모니아 추진 기술 개발 및 이산화탄소 포집 등이 있다. 먼저 LNG 추진선을 상용화하기 위해 LNG 가치사슬 전 영역에 대한 핵심 기술(LNG 액화공정, LNG 화물창 및 재액화, LNG 연료공급 및 연료탱크, LNG 재기화) 확보를 추진 중이다.

두 번째로, 암모니아 추진 기술은 수소연료의 상용화 전 단계에 사용하는 것을 목표로 하여 핵심기술을 개발 중이다. 세 번째로, 선박용 고효율 컴팩트 이산화탄소 포집 시스템(On board Carbon Capture and Storage)을 개발 중에 있으며, 액화수소 운반선 및 원자력 기반 기술 개발은 초저온 액화수소의 저장/추진/운용을 위한 핵심기술 개발, 용융염 원자로(MSR) 기반 원자력 추진선 및 부유식 발전설비를 중심으로 개발 중이다.

다음으로, 석유화학 분야는 석유 및 가스 등의 생산·운송·정제 과정에서 탄소가 발생하여 전 세계 탄소 배출량의 15%를 차지한다. 이에 탄소중립 달성을 위해 생산 시 배출량을 저감하도록 유도하는 환경인증제도와 탄소 누출 방지를 위한 탄소국경세 등의 국제 규제가 도입되고 있다. 우리나라는 석유화학 산업 규모를 대표하는 에틸렌(Ethylene)의 생산 능력이 전 세계 4위로, 효과적인 탄소배출 감축을 위한 기술인 무탄소에너지 전환, 원료 대체(열분해유, Bio), 및 CCUS 기술 적용을 중점적으로 고려할 필요가 있다.

롯데케미칼을 예로 들면, 수소/암모니아 산업 및 CCUS 사업을 중점적으로 진행 중이며, 자원순환을 중심으로 기술협력을 추진 중이다. 먼저 수소/암모니아 사업의 경우 수소산업은 생태계 구축에 기여하기 위한 대규모 투자를 기획 및 진행 중이다. 기술 상용화를 위해 다양한 글로벌 기업과 함께 인프라 펀드 투자와 산학 연계의 R&D(암모니아의 수소 전환기술, 수전해 신기술) 협력을 추진하고, 해외 청정 암모니아 도입 및 혼소발전 등 가치사슬 전반의 기술 협력을 기획하고 있다. CCUS 추진을 위해서는 국내 화학업계 최초 기체 분리막 CCU 설비 실증을 완료하

여 2030년 이산화탄소를 연간 50만 톤 포집하는 것을 목표로 하고 있다. 플라스틱 자원의 선순환을 위해서는 지속 가능한 플라스틱 순환고리 구축에 힘쓰고 있으며, 기계적 재활용(용융을 통한 재활용 및 용매 추출)과 화학적 재활용(해중합, 가스화 및 오일화 등의 연료화)를 포함한 재활용 공정을 도입 및 적용하고 있다. 이외에도 배터리 소재 사업에도 투자 중이다.

마지막으로, 모빌리티 분야의 자동차 경우 과거 연비 규제의 역사가 길었으나 최근에는 이산화탄소 배출량 및 연료 규제 방향으로 바뀌고 있다. 친환경 자동차 연료로 거론되고 있는 것은 재생에너지 기반으로 생산한 그린수소, 암모니아, 전기에너지 등이며 특히 미국의 IRA 법안의 영향력으로 인해 청정 수소에너지와 해상풍력에 많은 국제적 관심이 집중되고 있으므로 해당 기술의 확보가 필요하다. 이러한 에너지를 저장할 수 있는 차량용 배터리에 대한 수요도 증가하고 있는데, 특히 전고체 배터리가 차세대 기술로 주목받고 있다. 전고체 배터리는 배터리의 양극과 음극 사이의 전해질이 고체로 된 2차 전지로, 에너지 밀도가 높아 대용량 구현이 가능하고, 불연성 고체로 이루어져 발화 가능성이 낮기 때문에 리튬이온 배터리를 대체할 차세대 배터리로 평가받고 있다. 전고체 배터리 상용화를 위한 투자가 주요할 것으로 보이며 이를 통해 전기차 전환이 가속화될 수 있을 것이다.

현대자동차의 사례를 보면, 다양한 에너지 저장 기술에 투자하고 차량용 태양전지를 개발하고 있으며, 수소에너지 전환을 위한 기술혁신에 투자하고 있다. 먼저 에너지 기술 투자의 경우 전기차의 남은 전력량을 활용하는 양방향 충전 기술 V2G (Vehicle to Grid)인 그린에너지 솔루션과 전기차 배터리를 재사용한 에너지 저장장치인 SLBESS (Second Life Battery Energy Storage System)를 개발 중이다. 또한 차량용 태양전지로 투명 태양전지에 투자중인데, 솔라루프(태양광 전지로 덮인 차 지붕)를 개선해 실내광(지하주차장 실내 등)에서도 구동되는 제품 개발에 주력을 다하고 있다. 마지막으로 수소 에너지 전환을 위해 미국 에너지부와 수소 및 연료전지 기술 혁신 및 글로벌 확대를 위한 양해각서를 체결한 바 있다.

이와 같이 세 가지 국내 주요 제조업에서의 수요를 파악하였다. 국내외 여러 규제로 인해 기존 산업군에서 탄소중립을 향한 많은 움직임이 있으며, 기존 산업군의 유지를 위해 필요한 기술들에 자연스럽게 민간자본이 유입되면서 국내 기후테크 스타트업 생태계가 구축에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

Q) 국내에서도 기후테크에 대한 수요가 확실해 보이고, 향후 기술에 대한 전망이 좋아 보인다. 시장 자체가 형성되기 위해서는 기업 뿐만 아니라 정부의 정책적인 지원도 필요할 것 같다. 어떠한 정책 지원이 필요할 것으로 예상되는가?

국내 기후테크 시장은 해외 대비 기후테크 시장이 형성되어 있지 않기 때문에 투자 지원이 절대적으로 필요하다. 따라서 장기적 관점에서 먼저 투자 자원의 확보가 중요하다. 확보된 투자

재원은 R&D 지원, 탄소중립형 시설전환 지원, 인력 재교육, 신규 일자리 창출에 사용함으로써 기후테크의 경제적·사회적·인적 자원을 확보하는 데에 기여해야 한다. 특히 경제적 투자를 위해서는 기후테크 분야를 위한 기금의 확보 및 다른 분야의 기금과의 유동적인 연동이 필요하며, 그 형태는 대출자금, 인센티브 제공, 투자금 지원 등이 될 것이다. 효율적인 투자금 및 대출자금 지원을 위해 기 발표된 금융위의 기후테크 투자안을 보다 구체화시킬 필요도 있다. 특히 대기업의 경우 정부의 기후테크 금융지원책에 대한 정보의 습득이 빠르기 때문에 기금 확보가 가능하지만, 중소기업의 경우 기후테크 사업으로 연동하지 못해 기금 확보를 하지 못하는 경우가 많은 상황이므로 이를 보완할 필요가 있다.

다음으로, 일관성 있는 정책이 필요하다. 기후테크 기술 투자 및 육성에 대한 장기적인 로드맵을 체계적으로 구축하기 위해서는 정부의 일관적인 정책의 추진이 중요할 것이다. 일례로 재생에너지 사업과 원전 사업은 정권에 따라 그 기조가 바뀌는 경향이 있어 지속적 투자나 기술 발전에 어려움이 있어 왔다. 기후변화 문제와 기후테크 육성안은 초당적 문제임을 환기시켜 일관성 있는 정책을 추진할 필요가 있다.

이외에도 신속하고 효율적인 규제 개선 및 창구 일원화, 국내 우수 R&D 역량의 사업화 지원, 기술실증 및 공공조달 지원, 탄소거래제 및 배출권 활성화 등이 필요하다. 탄소 저감 기술의 활성화를 위해서는 탄소가격이 높아야 하며, 감축한 탄소를 거래할 수 있는 시장이 활성화되어야 하기 때문이다. 탄소 시장 활성화의 예로, 사회적 가치 연구원에서 추진 중인 EPCM(environment protection credit market)사업을 활성화하는 방안도 고려할 수 있다. EPCM은 탄소중립 기술을 가진 회사에 선투자하여 추후 성장하여 수익성이 나면 수익의 일부분을 가져가는 프레임워크이다.

Q) 새로운 기술 개발이 중요하기 때문에 대학의 역할 역시 중요할 것으로 보인다. 서울대학교가 할 수 있는 일, 해야 하는 일이 있다면 어떤 것인가?

서울대학교는 교육기관으로서 학생들을 대상으로 기후변화 현황과 이로 인해 수립된 여러 국제적 합의에 대해 파악하여 국내외 정황 및 투자 동향에 대해 교육할 의무가 있다. 이러한 교육은 기후테크에 대한 목적 및 필요성에 대한 인식 제고를 통해 관련 기술에 대한 아이디어 활성화에 기여할 수 있다. 일례로, 서울대학교 기후테크센터에서는 기후테크 인식 확산을 위해 탄복위 및 대한상의와 함께 2023 기후테크 포럼을 기획한 바 있으며, 국내 기후기술투자 기업인 소풍벤처스와 함께 대학 내 기후테크 특강을 진행하였다. 실제로 특강 이후 진행한 설문조사 결과에는 기후테크 특강이 기후테크 분야 자체에 대한 이해도 향상에 도움이 되었다는 피드백이 있었다.

기후테크를 구성하고 있는 기술은 주로 딥테크(첨단기술)이다. 서울대학교는 국내 최고의 대학

으로서 딥테크 육성을 위한 학내 교육 및 R&D 지원을 통해 우수한 인적 자원을 활용하고, 상용화되지 않은 기술에 대한 지속적 투자와 교육을 제공할 수 있다. 실제로 미국 보스턴에서는 여러 고등교육기관과 연구소가 밀집됨에 따라 딥테크에 대한 투자가 활발한데, 대표 사례가 MIT에서 출발하여 2018년 설립된 미국 핵융합 기업 'Commonwealth Fusion Systems'이다. 캘리포니아에서도 많은 기후테크 기업이 분포해 있는데, 유명 대학 및 연구소와의 연계로 기후테크 관련 인적 자원이 풍부한 것이 많은 기후테크 기업을 탄생시킨 주요 원인으로 평가받고 있다. 기후테크는 단일 연구 분야가 아닌 물리학, 화학, 생물학, 지구과학, 컴퓨터공학 등 다양한 전공에서 접근이 가능한 분야이므로, 다학제간 연구를 통해 기후테크 선도기술을 확보해야 하며, 이를 위한 기반을 대학에서 제공해줄 수 있다.

또한, 실험실수준의 연구가 상용화될 수 있도록 다양한 프로그램을 개설하는 역할이 필요하다. 예로, 캘리포니아주에서는 실리콘밸리 산학 연계 활성화를 통해 R&D 결과를 시장으로 진출시키는 데에 많은 투자를 하고 있다.

그리고 학내 연구결과를 사업화 할 수 있도록 동기부여하는 교육도 필요하다. 미국 스탠포드 대학에서는 'Stanford Climate Ventures'를 통해 에너지와 기후 기술을 시장에 내놓기 위한 방법을 배우는 프로그램을 운영 중이며, 실제로 해당 프로그램의 스핀오프 기업이 배출된 바 있다. 스탠포드 대학에서는 기후테크 이외에도 다양한 기술에 대한 창업을 유도하기 위해 기업가 정신 함양 교육을 진행하였고, 2011년 조사에 따르면 졸업 이후 3년 이내에 투자받은 창업가의 60%가 스탠포드에서 기업가 정신 과정을 이수한 것으로 밝혀졌다. UC 버클리에서도 'Sutardja Centre for Entrepreneurship'에서 세상을 바꿀 기술과 신흥 산업 활성화를 위한 프로그램을 운영 중이다. 예로, 비건 식품에 관심 있는 학생, 기업가, VC, 업계 리더를 연결하는 허브를 운영하기도 한다. 마지막으로, UC 데이비스에서는 'Innovation Institute for Food and Health'를 통해 학내 교수진과 연구원을 투자자 및 업계 전문가와 연결하는 역할을 하고 있다. 이 외에도 캘리포니아 주 대학에서는 새로운 아이디어와 프로젝트가 성공할 수 있도록 친환경 창업을 지원하는 다양한 프로그램이 있다. 서울대에서도 이러한 미국 대학의 사례를 벤치마킹하여 기업가 정신 고취를 위한 여러 교육 프로그램을 개발할 필요가 있다.

마지막으로, 앞서 기술한 바와 같이 기후테크는 첨단기술이 많이 활용되는 산업으로, 개발에 오랜 시간이 걸리고 큰 투자금을 요구하며 대규모 실증사업이 필요한 경우도 많다. 이 문제를 해결하기 위해서 학생들에게 보조금, 연구실, 멘토십 및 스타트업, 투자자 및 업계의 중요한 네트워크를 제공하면서 문제를 완화하고자 하는 노력이 필요하다. 예를 들어, 스탠포드 내 'TomKat Center'의 혁신 이전 프로그램은 보조금, 멘토링, 기업 네트워크 등을 제공하여 새로운 기술의 투자 유치 가능성을 판단하는 데 도움을 줌으로써 획기적이고 혁신적인 기술의 상용화를 돕고 있다. 또다른 예로 버클리 하스 경영대학원(Berkeley Hass School of Business)에서는 'Cleantech to Market (C2M)'이라는 프로그램을 운영 중인데 'TomKat Center'의 프로그램에 참

여하고 있는 스타트업과 대학원생을 연결하여 클린테크의 상용화를 가속화하는 데 도움을 주고 있다.

특히 서울대는 교육기관임과 동시에 지식집단이므로 기후테크 정책 수립에 필요한 각계 전문가의 의견 제시가 가능하다고 생각한다. 예로, 기후테크 육성을 위해 교육기관에 필요한 지원(R&D 지원 등)을 포함한 고등교육재정 확보 및 이를 뒷받침할 법적, 제도적 정비에 목소리를 낼 수 있다. 정부의 기후테크 육성 정책에 대한 감시 기구로서의 역할도 수행할 필요가 있다.

탄소중립 기술패권을 위한 제도적 기반

탄소중립을 향한 여정에 있어 기술의 중요성은 아무리 강조해도 지나치지 않다. 하지만, 아직 성숙하지 않은 감축 기술을 개발하고 확산해 나가고, 이를 새로운 경제 성장 동력으로 연결시키기 위해서는 적절한 제도가 반드시 뒷받침되어야 한다. 온실가스 감축을 위한 특정 기술을 넘어 기술의 개발과 확산에 유리한 고지를 차지하기 위한 전략을 모색하고자 서울대 재료공학부 남기태 교수²⁸⁾와 인터뷰를 진행하였다.

Q) 아직 성숙하지 않은 감축기술은 당연히 시장성이 부족할 수밖에 없다. 초기 시장을 열어주고 자생적으로 기술 개발이 촉진될 수 있게 하기 위해서는 어떤 정책이 필요한가?

기술개발 초기에 높은 가격으로 인해 시장 형성이 어려운 것은 사실이다. 이러한 초기시장 형성 문제를 해결한 대표적인 사례가 전기차/배터리 시장이다. 2000년 초반에는 전기차가 비싸기 때문에 경제 논리로만 봤을 때 배터리 시장이 성장하기 어려웠지만, 보조금이나 공공구매 등 정책수단을 동원하여 초기시장을 만들어 준 덕분에 현재와 같은 대규모 상업적인 시장이 만들어졌다.

보통 상용화 단계에서 어려움을 겪는 혁신기술은 기존 기술 대비 약2배 정도 높은 가격을 가지는 경우가 많다. 예를 들어, 그린수소의 경우 kg 당 약 5달러로 그레이 수소 가격보다 2배 정도 높다. 배터리 전기자동차도 과거에는 일반 자동차의 2배 높은 가격에서 시작했으며, 태양광 역시 마찬가지였다. 2배보다 훨씬 높은 경우 시장성이 전혀 없고, 기존 기술보다 가격이 낮은 경우 자연스럽게 확산되었을 것이다. 제조업에서는 단가가 10%만 높아도 시장 진입이 어려운 상황이기 때문에 2배의 가격 차이는 결코 쉽게 볼 수 있는 차이가 아니다. 정부의 정책은 2배 가격의 혁신기술에 시장을 열어줘 생산을 확대할 수 있는 기회를 통해 기존 기술 가격보다 낮은 수준으로 만들 수 있는지가 핵심이다.

최근 미국에서 시행하는 IRA 법이 대표적이다. 법의 내용을 살펴보면 친환경 재료 사용으로 인

28) 남기태 교수는 신개념 탄소중립 연료 합성 등 신소재 분야에 세계적인 연구 업적을 이루고 있으며, 한국과학기술한림원에서 선정한 세계적으로 두각을 나타내는 젊은 과학자(20년) 선정, 대통령직인수위원회 과학기술교육 분과 위원(22년)으로 활동하였다.

해 인플레이션이 발생하는 것을 막기 위해 혁신기술에 보조금을 주는 내용을 포함하고 있다. 이처럼 정부는 혁신기술이 탄생할 수 있는 R&D 프로그램 지원과 혁신기술이 확산될 수 있도록 초기 수요처로서의 역할을 하는 것이 중요하다.

추가적으로, 지속적으로 일관된 메시지를 제공하는 것이 필요하다. 불확실성이 높은 초기 시장에서는 작은 정책의 혼선이나 변화만으로도 시장에 큰 충격을 줄 수 있기 때문이다. 탄소중립·녹색성장 기본법이 제정되어 법제화가 미비한 국가보다는 더 나은 상황이지만, 법제화 유무보다는 정부가 바뀌더라도 장기적이고 지속적으로 감축 기술에 대한 개발과 촉진을 할 것이라는 믿음이 있어야 초기 시장도 개척될 수 있다.

Q) 우리나라는 경제 규모가 상대적으로 크지 않아서 초기 시장을 만드는 것에도 한계가 있을 것 같다. 시장 자체가 작은 상황에서 국내 시장만으로 규모의 경제를 이룰 수 있는 초기시장 개척이 가능한지?

혁신 기술의 초기 수요처 역할을 통해 경제성장을 잘한 나라가 우리나라라고 생각한다. 혁신 기술 확산의 마중물 역할을 하기에 우리 시장이 그렇게 작다고 생각하지도 않는다. 다만, 정부가 주도하여 시장을 개척할 경우 특정 분야의 기업을 지원한다는 부정적인 인식이 존재하기 때문에 국민을 설득하는 과정이 필요하다. 위기 상황이라는 공감대 하에서는 국민을 설득하기가 더 쉽지만, 탄소중립 문제에 대해 국민적으로 위기 의식을 가질 정도로 공감대가 형성되지 않아 정부의 적극적인 정책 추진이 어려운 상황이다.

중국의 경우 배터리 시장에서 해외 배터리 사용을 금지하여 자국 산업 수요를 창출하였다. 이와 같은 방법은 WTO 체제 아래에서는 어려운 정책일 수 있으나, 미국을 비롯하여 주요 선진국에서도 점점 자국 우선주의가 심화되는 상황에서 포스트 WTO 체제 하의 과감한 지원 정책으로 초기 시장을 창출하는 것이 필요하다고 생각한다. 극단적인 방법이 아니라고 하더라도, 공공 구매, 세금 감면, 탄소감축 인증제도 등과 같은 제도 도입을 통해 시장을 형성하는 것도 가능하다고 본다.

정부의 도움으로 인해 시장이 형성된 경우, 기업 역시 해당 기술과 관련하여 공공성에 부합하는 역할을 할 필요가 있다. 탄소배출량이 많고 감축 기술 적용이 필요한 대기업에 지원이 이뤄진 경우, 대기업은 감축 기술이 중소기업으로도 확산될 수 있도록 노력해야 한다.

Q) 혁신기술 개발에 있어서 산학연의 협력이 부족하다는 지적이 있다. 산학연 간의 협력을 어떤 방식으로 추진할 수 있다고 보는가?

산학연 모두 혁신기술을 개발하는 주체이다. 산학연 간의 협력이 부족하다는 인식도 존재하지

만, 선진국과 비교해도 협력의 토대가 크게 부족하지 않다고 생각한다. 예를 들어, 미국의 경우에도 기업과 학교의 연결고리가 우리나라만큼 강하지 않다고 생각하고, 제조업에 강한 독일도 마찬가지이다. 반면 우리나라는 산학연의 좋은 에코시스템을 가지고 있기 때문에 정부의 제도적인 지원만 있다면 발전 가능성 높다. 중국의 초기 발전 모델도 우리나라를 벤치마킹한 경우가 많았다.

현재 국내 기업들이 보유한 기술 수준은 세계적으로 봐도 우수하다. 기업이 가진 글로벌 정보력과 산업 생태계에서의 역할은 산학연 기술 개발에 있어 중추적인 역할을 한다. 연구소의 경우 과기부 주도로 방향성을 빠르게 바꿀 수 있는 유연한 환경을 보유하고 있어 정책적으로 초점을 맞춘 기술의 개발을 효율적으로 할 수 있는 구조이다. 대학은 연구 네트워크를 전국적으로 가지고 있어 산업과의 접촉점이 넓다.

이처럼 산학연 기술 개발과 협력에 좋은 토양을 가지고 있으나, 아직 씨앗이 발화해서 꽃을 피우는 단계는 아니다. 일례로 2000년 초반부터 기후변화대응사업의 일환으로 오랜 기간 동안 추진된 탄소포집활용 기술의 경우, 100억~200억 단위의 여러 사업단이 존재했지만 기업의 활용으로 연결되지는 않았다. 좋은 기술이 많지만 최종 성과로 연결이 되지 않는 것이다. 대학이나 연구소 기반으로 기술이 탄생할 수 있지만, 대기업의 기술은 외국기술을 도입하는 경우가 많은 상황이다. 이는 개발된 기술을 기업에서 대규모로 활용하기에는 아직 검증되지 않고 미흡한 부분이 많기 때문이다. 즉, 스케일업의 문제가 있기 때문이고, 이러한 차이를 메꿔주기 위한 정책적 노력이 필요하다. 정부가 산업계와 학계 간의 본딩(bonding)을 만들어주는 접착제 역할을 해야 한다.

산학연 연계를 통해 글로벌 R&D 체계를 구축하는 것도 필요하다. 대학과 연구소는 기술개발 시점부터 해외 확장성 있는 기술을 개발하고, 기업은 글로벌 네트워크를 이용해 국제 기술 표준을 선도할 수 있는 형태로 협력을 이뤄 나가는 것이 필요하다.

Q) 탄소중립 100대 기술이 선정되었다. 우리나라의 시장 규모나 자원 역량을 고려했을 때 100대 기술 모두에 대한 투자는 현실적으로 어렵지 않은가?

먼저 우리나라가 100대 핵심기술 선정한 것은 미국, 중국, 일본 등 다른 국가에서 봤을 때는 큰 성과로 인식한다. 탄소중립 법제화 노력처럼 핵심기술을 선정했다는 것 자체가 기술 개발 방향성을 효과적으로 제시하고 있기 때문이다. 다만, 현재 선정한 핵심 기술은 계층과 기술의 범위가 분야별로 다소 차이가 있다. 100대 핵심기술을 같은 기준에서 바라볼 수는 없고, 어느 정도의 집중은 필요할 것이라 본다.

하지만 정부가 특정 기술에만 집중할 경우 공정성 문제가 발생할 수 있다. 각 분야의 연구자나

산업 전문가의 경우 모두 본인이 속한 분야가 중요하다고 생각하기 때문에 국가적으로 더 집중해야 할 분야를 선정하는 것이 쉽지 않다. 전문가의 의견을 균형 있게 청취하고, 경제적 가치, 기술 수준, 파급효과에 대한 연구를 바탕으로 역량을 집중할 분야를 과감하게 선정하는 것이 필요해 보인다.

Q) 대학은 혁신기술을 만들어내는 핵심 센터로서 환경의 변화가 필요하다. 탄소중립의 관점에서 학교 교육은 어떠한 방식으로 해야 하는가?

탄소중립은 전 분야의 협력이 필요한 주제이다. 전통적으로 한 분야에 속하지 않고 모든 분야에 걸쳐 있는 분야이기 때문이다. 디지털 전환, AI 전환처럼 탄소중립 전환도 중요하게 대두될 것으로 예상된다. 이처럼 학문에서는 전통적인 경계를 뛰어넘는 진정한 의미의 융합이 필요한 상황이다. 학교 내의 융합만을 의미하는 것이 아니라 확산을 더 빠르게 가기 위한 대학 주체들 간의 협력도 필요하다고 생각한다. 교육적인 측면에서는 새로운 학문이 탄생하는 만큼 학문을 정의하고 교육할 수 있는 플랫폼이 필요하다. 연구적인 측면에서 제조업에서는 신재생 에너지, 원자력 에너지가 많은 비수도권과의 연계를 주도적으로 해야 한다고 생각한다. 특히 서울대 네트워크를 통해 다른 대학과의 활발한 협력이 이뤄질 수 있도록 서울대가 주도적인 역할을 해야 한다.

Q) 대학의 글로벌 경쟁력을 높일 수 있는 효과적인 방안은 무엇인가?

대학의 강점과 역할에 대해 정리할 필요가 있다. 서울대는 서울대만의 강점, 지식축적, 브랜드 등을 적극적으로 활용해야 한다. 글로벌 네트워크, 협력 및 경쟁의 경험을 다른 대학에 전파해야 한다. 특히 아시아의 역할이 중요하게 대두되면서 우리나라가 주도적인 역할을 수행해내야 한다. 지리적 위치 상으로 동남아시아, 정치 외교적으로 자유로운 중동 국가의 협력 관계를 이루기에는 최적의 상황이기 때문이다. 선진국과 개발도상국의 중간자 역할을 수행하며 양쪽 상황을 대변하며 우위를 선점해야 한다. 이는 탄소중립 분야에서도 마찬가지이다.

Q) 글로벌 인재 육성 방안은 무엇인가?

우리나라처럼 대학 학과를 빠르게 통합하고 분리하는 국가의 전례가 없다. 이를 장점으로 성장시키기 위해서는 교육의 목표를 확실하게 하는 것이 중요하다. 탄소중립 문제에서는 효율성보다는 환경성과 공공성을 고려해야 한다. 또한, 세부 기술 개발이 전체 시스템에서의 영향을 미칠 수 있기 때문에 상황을 종합적으로 바라보며 유기적인 사고를 가진 인재가 필요하다. 즉, 경제성, 사회성, 환경성을 모두 고려해야 하는 것이다. 각각의 전문성이 있는 인재를 개발하고 각각의 전문가들이 대화할 수 있는 교육 시스템 만들어야 한다. 또한, 창의성만을 강조하기 보다는 다양성을 인식하여 균형을 유지해야 한다. 마지막으로, 지속적인 모니터링을 통해 글로벌 인

재 육성의 방향성을 평가하고 발전시켜야 한다.

에필로그 및 향후 추진계획

본 원고는 국가미래전략원 탄소중립 클러스터 보고서 중 하나로 2024년 3월부터 4월까지 서울대에 재직 중인 8명의 전문가와 인터뷰한 내용을 바탕으로 작성되었다. 탄소중립 달성을 통해 기후변화를 완화하고자 하는 인류의 큰 과제를 달성하기 위해 반드시 필요한 주요 기술의 기본 원리와 시장 동향, 기술혁신을 촉진하기 위한 정부와 대학의 역할에 대해 각 분야의 전문가의 의견을 청취하고 정리한 것이다.

학내 전문가 선정은 편집 필진이 다수의 회의와 주변 전문가의 추천을 통해 선정하였고, 각 전문가에게는 사전 질문지를 송부한 후에 대면 인터뷰를 진행하였다. 인터뷰 후에는 필자가 해당 내용을 정리하여 인터뷰 대상자에게 재확인 받는 형태로 취합하였다. 원고 구성은 독자의 이해를 돕기 위해 인터뷰 질문 순서와 다르게 구성된 부분이 있으나, 큰 틀에서 인터뷰의 본질적인 내용이 다르게 전달되지 않도록 노력하였다.

연구와 교육으로 바쁜 와중에 성실히 인터뷰에 응해준 (존칭 생략) 이경우, 최장욱, 김민수, 남기태, 여명석, 성영은, 정훈영, 정수종 교수에게 감사를 표한다. 인터뷰 진행 및 보고서 집필을 공동으로 수행한 공학전문대학원 구윤모 교수와 기술경영경제정책 대학원 협동과정 주현경 연구원에게도 고마움을 전한다.

하지만 본 보고서는 아직 완성본이 아니다. 일부 전문가 인터뷰 원고는 정리가 충분히 되지 않아 2차년도에 포함할 예정이다. 이른 시일 내에 1차년도에 다루지 못한 발전설비 및 전력망, 석유화학 및 바이오연료, 시멘트, CCU 기술 등 추가적인 감축 기술에 대한 전문가를 섭외하고 인터뷰를 추가적으로 진행할 예정이며, 이를 바탕으로 탄소중립 기술 전반을 아우르는 체계를 갖춘 보고서(서울대가 답하는 탄소중립과 과학기술의 역할, 가치)를 완성할 계획이다. 최종적으로는 일반 대중이 이해하기 쉬운 언어로 풀어 교양서로 출판할 계획이다. 본서의 출판을 통해 일반 대중의 기후위기 극복을 위한 탄소중립은 물론 탄소중립 전환을 가능케하는 탄소중립 기술에 대한 이해와 관심이 높아져, 대한민국이 기술 혁신을 통한 탄소중립과 글로벌 기술 경쟁력 강화를 동시에 이룰 수 있기를 기대한다.

2024. 5월

서울대 공과대학 윤제용