2019 Vol.02
차세대리포트

과학기술이 만들어가는 미래

수소 사회

KAST 한국과학기술한림원
The Korean Academy of Science and Technology

차세대리포트 2019 Vol.02

수소 사회

과학기술이 만들어가는 미래

펴낸곳
한국과학기술한림원
031)726-7900

펴낸이
한 민 구

발행일
2019년 12월

홈페이지
www.kast.or.kr

기획·편집
배승철 한림원 정책연구팀 팀장
이동원 한림원 정책연구팀 주임
조은영 한림원 정책연구팀 주임
박주이 한림원 정책연구팀 주임

디자인·인쇄
경성문화사
02)786-2999

이 보고서는 복권기금 및 과학기술진흥기금의 지원을 통해 제작되었으며,
모든 저작권은 한국과학기술한림원에 있습니다.

발간사

지난해 한국과학기술한림원은 젊은 과학자들의 생각과 아이디어를 담은 정책제안서인 '차세대리포트'를 신설했다. '젊은 과학자를 위한 R&D정책', '과학자가 되고 싶은 나라를 만드는 방법' 등의 주제에 대해 우수한 젊은 과학기술인 그룹인 '한국차세대과학기술한림원(Young Academy of Science and Technology, Y-KAST)' 회원들의 목소리를 담았다. 이를 통해 정책관계자들에게 새로운 정책의 실마리를 제공하고 과학기술계에서 소통과 공감을 이끌어내는데 조금이나마 일조하고자 했다.

특히 '영아카데미, 한국과학의 더 나은 미래를 위한 엔진'을 주제로 발간된 차세대리포트 2018-04호에서는 Y-KAST로 모인 젊은 과학기술인들은 어떤 목적을 향해 무슨 일들을 해나가야 하는지에 대한 설문조사와 소규모 인터뷰를 진행한 바 있다. 흥미롭게도 이들은 성별, 지역, 전공분야에 상관없이 일치된 바람을 드러냈다. **Y-KAST는 정부와 젊은 연구자들 사이의 통로로 기능해야하며 차세대회원들은 후속세대 양성에 대한 깊은 책임감으로 미래를 위한 나침반이 되어야 한다**고 입을 모았다.

올해 차세대리포트는 이들이 제기한 두 개의 목표를 향해 나아갈 수 있는 발판이 되었으면 한다. 미래 핵심기술(머신러닝, 양자기술, 수소경제)의 연구개발 이슈와 함께 해당 분야에서 우리나라가 확실한 우위를 선점하기 위해서는 어떤 정책적 지원이 필요한지 살펴보고, 이공계 인재들이 진로를 선택하는 데 있어 도움이 될 만한 생생한 정보를 전달하고자 한다.

차세대리포트 제2호에서는 최근 4차 산업혁명에 버금가는 사회경제적 화두로 부상 중인 수소사회에 대해 다루고자 한다. 전 지구적인 환경 문제의 대안으로서 뿐만 아니라 에너지 소유를 둘러싼 세계의 권력지도까지 개편할 것이라 거론되고 있는 수소경제, 이를 이끌어갈 차세대 기술과 해당 분야를 선도하기 위해 필요한 과학기술정책까지 현장에서 직접 연구하고 있는 젊은 과학자들의 생각과 아이디어를 담았다. 이들이 전하는 목소리가 개개인뿐만 아니라 국가의 미래를 치열하게 고민하는 청소년들과 정책입안자들에게 작은 빛이 될 수 있기를 기대한다.

2019년 12월

한국과학기술한림원 원장

한 민 구

함께해주신 분들

서울대학교
재료공학부 교수

장 호 원

친환경적이지만 전력 투입 비용이 과도한 물 분해 수소 생산의 경제성을 해결하기 위해 태양광을 이용한 수소 생산 광전극 기술을 연구하고 있다. 자연계에 대한 오랜 관찰로 태양광을 가장 잘 받는 3차원 나무 구조, 즉 피보나치 수열 구조를 응용한 인공나노나무의 아이디어로 주목을 받고 있다. 수소경제 시대를 향한 각국의 경쟁구도를 이해하기 쉽게 설명하였으며 친환경 수소 대량생산 기술이 불러올 미래상에 대한 구체적인 전망을 소개했다.

카이스트
생명화학공학과 교수

이 진 우

차세대 수소 생산 혁신기술인 고분자수전해장치(PEMWE)의 가격 경쟁력 확보를 위해 고가의 귀금속을 대체할 수 있는 고효율·고내구성 물 분해 촉매 물질과 다공성 담지체 개발에 주력하고 있다. 비교적 이른 시기인 2008년부터 10년 넘게 수소연료전지를 연구해 왔으며 현재 세계 최고 수준에 이르고 있는 국내 수송형 수소연료전지의 촉매 안정성과 활성 극대화 연구 등에 많은 기여를 한 경험을 바탕으로 향후 수소경제 생태계 구축을 위한 R&D 정책의 방향성들을 제시했다.

유니스트
에너지 및 화학공학부 교수

주 상 훈

기업 연구소 재직 시 촉매 연구에 참여하며 연료전지에 관심을 갖기 시작했다. 박사후연구원 시절 등장한 비 귀금속 촉매 분야의 의미 있는 논문들을 눈여겨보았고 귀국 후 10여 년 간 백금 촉매를 대체할 다공성 탄소 물질 기반 에너지 변환 촉매 개발에 집중하고 있으며 세계 최고 수준의 비귀금속 연료전지 촉매를 개발하였다. 수소사회 구축에 필요한 기술적 요소들에 대한 설명과 함께 미래 주역들을 위한 조언 역시 아끼지 않았다.

들어가기 : 수소 문명으로의 초대 06

의제 1 **수소 에너지에 관한 시대적 논의들**
1. 왜 수소경제인가? 08
2. 수소경제 선점을 향한 총성 없는 과학기술 전쟁 10

의제 2 **에너지 패러다임 시프트의 기술적 동력들**
1. 인공 나노나무에서 '그린 수소'를 수확하다 13
2. 도심 속 작은 발전소, 움직이는 공기청정기? 16
3. 비 귀금속 촉매로 경제성을 확보하라 19

의제 3 **수소에너지 시대를 향해**
1. 예측 가능한 정책이 도전정신 북돋는다 22
2. 꾸준한 소액연구가 수소경제 마중물 23
3. 수소사회 구현을 위한 인적네트워크 '수소살롱' 24

우문현답 : 우리의 문제는 현장에 답이 있다 26

수소 문명으로의 초대

들어가기

여보게들, 물은 언젠가 연료가 될 거야.
수소와 산소를 따로 쓰든 함께 쓰든
석탄에 비할 수 없을 만큼
강력하고 고갈되지 않는 에너지원이 될 것이지.

- <신비의 섬 L'ile mysterieuse null> 中에서

근대과학의 여명기인 1874년. 전 세계의 과학자들은 의문의 초청장 한 통을 받게 된다. 발신인은 프랑스의 공상과학 소설가 쥘 베른. 초청장에는 이렇게 짤막한 글이 적혀 있었다.

과학자들의 영감을 자극한 그의 초청장은 150여 년이 흐른 현재, 마침내 현실로 모습을 드러내고 있다. 서서히 저물어가고 있는 화석연료의 시대 뒤에서 새로운 인류 문명의 동력원, 수소 에너지 시대가 동트고 있는 것이다.

현대 입자물리학은 태초의 우주가 더 이상 쪼개지지 않을 만큼 작은 소립자들의 세상이었다고 설명한다. 137억 년 전 빅뱅과 함께 쏟아져 나온 이들은 우주가 초스피드로 팽창하는 사이 충돌과 결합을 반복하며 새로운 물질을 만들어 갔다. 그렇게 찰나의 시간이 흘러 주기율표의 첫 번째 원소가 탄생한다. 하나의 양성자와 전자로 이뤄진 원시 수소이다. 이들은 주변의 원시 수소 형제들과 결합하며 더 큰 질량의 동위원소인 중수소와 삼중수소를 만들고 이제 헬륨, 리튬, 베릴륨, 붕소, 탄소, 질소, 산소 등 한층 더 복잡한 원소들로 진화했다. 우주와 지구와 인간, 바로 우리가 알고 있는 세상의 시작이다.

18세기 화학자 라부아지에로부터 수소(Hydrogen, 水素)라는 이름을 얻으며 존재를 드러낸 이 우주 탄생과 진화의 열쇠는 자연계의 발견과 응용, 즉 과학과 산업의 이름으로 인류가 누리게 된 혜택들을 한 차원 더 높은 단계로 이끄는 결정적인 힘이 된다.

물을 분해하여 이 세상에서 가장 가볍고 다른 원소 대부분과도 잘 화합하는 기체를 얻게 된 인류는 기구와 비행선을 띄웠고, 식물성 액체 지방을 응고해 마가린을 만들었으며, 암모니아를 합성해 비료를 만들거나 일산화탄소와 반응시켜 공업용 메틸알코올을 얻기 시작했다. 또한 원유에서 등유와 경유를 정제하고 불순물을 제거하였으며, 구리와 코발트 니켈 같은 다양한 금속을 제련하며 산업 전반의 고도화를 이루어왔다. 반도체 산업에서는 무정형 실리콘과 탄소를 안정화하는 데 수소가 사용되고 있다.

대학과 연구소의 실험실에서도 수소는 학문적 진보의 중요한 도구였다. 헬륨보다 값싼 액화수소를 사용하여 초전도 현상을 연구하고, 자연 상태에서 찾기 힘든 중수소와 삼중수소를 인공적으로 만들어 유기화합물의 구조 분석과 방사성 동위원소 추적 등에 활용하며 화학과 물리학, 생물학, 의학 등 분야에서도 수소는 중요한 역할을 하게 된다.

20세기 들어 과학자들은 수소의 또 다른 가능성에 주목하기 시작했다. 물과 유기화합물의 형태로 어디에나 존재하며 무게당 에너지 밀도 역시 아주 높은 수소는 화석연료와는 달리 환경을 위협하지 않으며, 고갈을 우려할 필요도 없는 이상적인 무한청정 에너지원이 될 수 있음을 인식한 것이다. 원자력잠수함과 달 탐사, 텔레비전과 홀로그램의 등장을 정확히 예언한 쥘 베른의 대담한 상상-수소 문명으로의 초대가 미세먼지와 기상재해에 갇힌 인류에게 이제 또 다른 희망의 근거로 작동하기 시작했다.

이번 차세대리포트에서는 수소에너지에 관한 시대적 논의와 더불어 이러한 에너지 패러다임 전환의 동력은 무엇인지를 알아본다. 특히 수소사회로 나아감에 있어서는 '친환경 수소 생산'이 핵심이기 때문에, 본 보고서에서는 수소의 생산기술에 대해 중점적으로 다루고자 한다. 이번에 참여한 Y-KAST 3인의 차세대회원들은 한결같이 "친환경과 경제성을 함께 담보하는 수소 생산 기술의 확보가 진정한 수소 시대 개막의 관건이 될 것"이라 입을 모으고 있다. 그들의 고민과 해법을 담은 다음의 의제들을 나침반 삼아 대한민국이 수소경제 강국으로 가기 위한 길을 구체적으로 모색해보자.

하이드로젠과 물의 정령

수소의 명명자는 라부아지에이지만 그에 앞서 수소의 존재를 처음 발견한 이는 영국의 헨리 캐번디시(Henry Cavendish)다. 수소 기체가 공기 중의 산소와 반응해 폭발할 때 물이 생성되는 것을 본 그는 1766년 당시까지 원소라 여겼던 물이 실은 화합물이며 수소가 원소라는 논문을 발표했다. 그로부터 30년 뒤 물을 수소와 산소로 분해하는 실험에 성공한 라부아지에는 '가연성 공기'로만 불리던 수소에 '물을 생성하는 것'이란 뜻의 그리스어 하이드로젠(Hydrogen)이란 이름을 붙이자고 제안했다. 현대자동차가 만든 세계 최초의 양산형 수소전기차 넥쏘(NEXO)는 고대 게르만어로 '물의 정령', 스페인어로는 '결합'을 뜻한다. 산소와 수소의 결합으로 순수한 물을 만드는 진정한 친환경 자동차의 의미를 담고 있다.

첫 번째
의제

수소 에너지에 관한 시대적 논의들

I. 왜 수소경제인가?

> 수소경제는 이름 그대로 원자번호 1번 수소를 범용 에너지원으로 활용하려는 것이다. 수소는 가장 가벼운 원소이자 우주 질량의 75%를 차지하는 가장 풍부한 원소이다. 핵융합 반응으로 태양 에너지를 생성하고 산소와 결합해 물을 만들며 지구상의 모든 생명계를 먹여 살리는 존재이기도 하다. 이런 무한청정의 에너지원 수소를 이용해 화석연료 시대를 마감하겠다는 것이 바로 수소경제의 골자다.

수소 에너지에 대한 아이디어가 본격적으로 검토되기 시작한 것은 1970년대 오일 쇼크가 발생한 이후부터다. 하지만 일단의 과학자들은 이보다 훨씬 전부터 지구온난화와 같은 화석연료의 문제점들을 인지하고 있었고 수소가 갖고 있는 무한청정 에너지원으로서의 거대한 가치를 눈여겨봤다.

1920년 논문을 통해 수소의 생산, 저장, 이용 등에 관한 기술을 소개한 영국 과학자 존버든 샌더슨 홀데인이 수소의 가치를 일찍이 알아본 대표적 인물이다. 풍력발전으로 전기를 만들어 물을 분해하고 수소를 액체화해 탱크에 저장한 뒤, 산소와 재결합시켜 다시 전기를 생산하고 이를 가정과 산업용으로 활용한다는 설명은 오늘날의 수소 에너지 이론과 거의 흡사하다. 그는 액화수소가 가솔린보다 3배 이상 발열량이 높고 물과 유기물로부터 생산할 수 있는 양이 무제한에 가깝기 때문에 가장 이상적인 미래 에너지가 될 것이라고 전망했다.

20세기 후반까지 석유의 생산과 공급이 안정적으로 이뤄지며 묻히게 됐던 수소의 가치는 21세기 들어 재조명되기 시작했다. 지구온난화와 급격한 기후변화, 고갈되는 화석연료를 둘러싼 국가 간 분쟁이 연일 세계 언론의 헤드라인을 장식하게 되면서 더 이상 물러설 곳이 없게 된 국제 사회는 주요 선진국들을 중심으로 잊고 있었던 수소 에너지의 잠재력에 다시 집중한다.

2015년 파리기후협약을 통해 2030년까지 온실가스 37%를 의무적으로 감축하겠노라 약속한 주요 선진국들로서는 데드라인이 시시각각 다가오고 있는 것도 또 다른 현실적 압박이었다. 그렇다고 에너지 소비를 극단적으로 줄여 경제성장까지 멈추게 할 수는 없는 노릇이기 때문이다. 이에 따라 대체 에너지에 대한 연구가 활발히 진행됐지만 원자력 발전은 안전성 등에 대한 대중의 정서적 반감이 발목을 잡았고, 태양광과 풍력 등의 신재생에너지는 기대만큼 쉽게 효율이 높아지지 않았다. 수송, 발전, 건설 등 화석연료의 모든 수요처를 대체할 만한 에너지는 수소 밖에 없었다.

2002년 출간된 미래학자 제레미 리프킨의 저서 '수소경제'(Hydrogen economy)는 이런 국제사회의 움직임에 지렛대 역할을 하게 된다. '엔트로피', '3차 산업혁명' 등의 전작을 통해 세계 각국의 정책 결정에 적잖은 영향력을 미쳤던 그는 지구상에서 가장 쉽게 구할 수 있는 자원인 수소가 석유 자원의 소유에 따라 편중됐던 세계의 권력 지도와 인류의 생활상을 근본적으로 뒤바꾸는 에너지원이 될 것이라 주장했다.

[그림 1] 인류의 에너지 역사와 미래

※ 수소에너지의 특징

- 수소는 물 또는 유기물질로부터 생산되므로, 그 양이 거의 무한정에 가까운 친환경연료임
- 수소를 연료로 사용할 경우에 연소시 극소량의 질소산화물(NOx)제외하고는 공해물질이 생성되지 않음
  → 환경오염 우려 최소, CO_2 배출없음
- 산업용의 기초소재로부터 일반연료, 수소자동차, 수소비행기, 연료전지 등 현재의 에너지시스템에서 사용되는 거의 모든 분야에 이용가능
- 수소는 가연한계(λ=10~0.14)가 넓고, 최소점화에너지가 작으므로 불꽃점화기관에 적합함
  희박한 혼합기를 사용하는 경우에도 안정된 연소가 가능

'차가운 불' 수소 에너지

수소는 고온의 연소 없이 에너지를 만든다고 해서 '차가운 불'이라는 별명을 갖고 있다. 수소연료전지에서 사용하는 수소분자(H_2)는 섭씨 70~80도 내외의 실온에서 산소와 반응하며 전기를 발생시킨다. 수소를 위험하다고 여기는 이들의 상당수는 수소폭탄을 떠올리기 때문인데 수소폭탄의 중수소와 삼중수소는 수억 도의 초고온과 초고압에서 만들어지는 동위원소이다. 수소폭탄은 내장된 핵폭탄의 1차 핵분열로 초고온과 초고압 상태를 만들고 중수소와 삼중수소의 핵융합 반응으로 2차 폭발을 유도한다. 이는 우리가 살고 있는 일반적인 환경에서 구현될 수가 없다. 하지만 압축 저장된 수소 분자가 외부의 에너지에 의해 원자로 쪼개지며 산소와 연쇄 반응하게 되면 높은 에너지가 발생하며 폭발이 일어날 수 있다. 하지만 이 역시 수소 농도가 4~75%인 상황에서만 가능하다. 수소 농도가 4% 미만이면 수소 원자가 부족해서, 75% 이상이면 산소 원자가 부족해서 연쇄 반응이 일어나지 못한다. 저장탱크에서 수소가 누출되어도 공기보다 14배 가벼워 빠르게 공기 중으로 확산되고 순식간에 농도가 낮아지기 때문에 격렬한 연쇄 반응의 가능성은 크게 낮아질 수밖에 없다.

2. 수소경제 선점을 향한 총성 없는 과학기술 전쟁

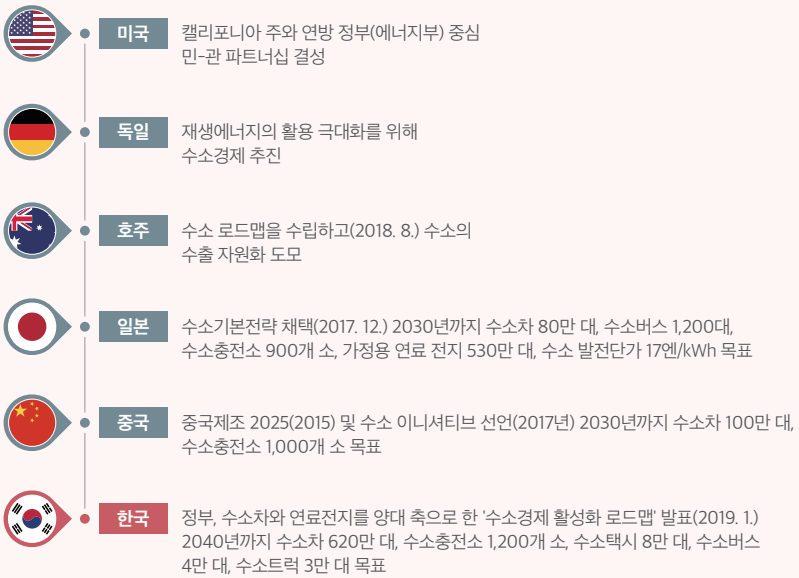
> 수소를 아직까지 보편적인 에너지원으로 사용하고 있지 않은 이유는 무척 많다. 심지어 에너지가 맞는지 '정의'를 의심해봐야 할 정도이다. 순수한 수소는 어디에도 없기 때문이다. 결국 순수한 수소를 만들기 위해서 또 다른 에너지인 전기를 투입해야 한다. 전기는 발전소를 통해 만들 수 있는데 화석연료에 대한 비중이 85.2%나 된다. 그렇게 해서 만든 전기에너지로 물을 분해하여 수소를 만든다. 전기를 만들기 위해 전기를 써야 한다는 의미이다. 이러한 프로세스는 두 가지의 문제를 가지게 된다. 첫 번째는 환경문제이다. 친환경 에너지인 수소를 만드는 과정이 결코 친환경적이지 않기 때문이다. 두 번째는 효율의 문제이다. 모든 에너지는 전환 과정을 거치면서 줄어들기 마련이다. 수소를 만들기 위해 전기를 쓰고, 만들어진 수소로 전기를 만들면 에너지의 총량은 줄어들 수밖에 없다. 이런 수소에너지의 역설을 해소하려면 '기술적인 조치'가 필요하다.
>
> - 권순우 저, <수소전기차 시대가 온다> 中에서

현재 세계 각국은 수소경제 시대의 주도권을 쥐기 위해 치열한 각축전을 벌이고 있다. 시기적으로 가장 먼저 움직이기 시작한 것은 미국이다. 2002년 부시 행정부는 제레미 리프킨의 책 이름 '수소경제'를 정부 차원의 새로운 에너지 정책으로 공식화하며 수소경제 전환 로드맵을 구축했다. 이어 2003년에는 이를 국제적으로 확산하기 위해 전 세계 16개국이 참여하는 '국제 수소경제 파트너십'(IPHE) 창립을 주도한다.

전통적인 수소기술 강국 일본의 속도전도 만만찮다. 특히 최악의 원전 사고를 겪고 난 후 2014년 세계 최초의 수소사회 실현을 공약한 일본은 가장 적극적인 행보를 보이고 있다. 현재 25만 가구에 난방용 수소연료전지를 설치한 데 이어 내년 도쿄 올림픽에서는 수소로 성화를 밝혀 수소경제 선진국의 이미지를 전 세계에 각인시킨다는 계획이다. 이런 자신감의 배경에는 수소연료전지 관련 특허의 세계 최다 보유국이라는 자신감이 깔려 있다.

[그림 2] 세계 수소경제 전망과 주요국가 동향

수소차, 수소선박 등 모빌리티 분야가 시장 확대를 견인하고, 연료전지로 빠르게 성장하여 2050년 연 2.5조 달러 시장과 3,000만 개 일자리 창출이 예상됨(2017년 매킨지)에 따라 각국은 수소경제 로드맵 수립에 나서고 있다.



출처 : 한국과학기술한림원(2019), 혁신성장을 위한 새로운 도전, 수소경제가 온다, 한림원의 창 2019 봄 Vol.123, p.28

전 세계의 에너지 블랙홀인 중국은 시진핑 주석이 수소경제로의 전환을 직접 챙기며 세계 각국의 수소기술 인력들을 대규모로 흡수 중이다. 유럽은 2004년 베를린에 첫 수소충전소를 가동하고 현재까지 50개의 수소충전 네트워크를 설치한 독일을 중심으로 유럽 전역의 가스 그리드를 활용하는 수소 공급망 등 수소경제 가치사슬 구축을 위한 프로젝트들이 추진되고 있다.

아이슬란드의 무한도전

"내 소망은 아이슬란드가 다음 세대에 희망을 제시하는 최초의 나라가 되는 것이다." 30년 간 수소 에너지를 연구해온 아이슬란드대학 화학과 브라기 아르나손 교수가 1980년 한 국가의 전면적인 수소 경제체제를 처음 제안했을 당시 많은 사람들은 그가 미쳤다고 생각했다. 하지만 이제 그는 국가적 영웅이다. 아이슬란드 정부는 그의 연구결과에 기반을 둔 거대한 구상을 국정과제로 채택해 1999년 세계 최초로 국가의 모든 에너지를 수소로 충당한다는 '2040 수소사회' 프로젝트를 내놓았다. 2040년까지 모든 화석연료 사용을 중단하고 온실가스를 제로로 만들겠다는 선언이다. 이 역사적인 실험의 현장을 확인하기 위해 지난 몇 년 간 수많은 과학자와 정치인, 투자자와 기자들이 아이슬란드를 방문했다. 화산의 나라이자 빙산이 깎아 놓은 아찔한 높이의 물길이 국토 전역에 산재한 아이슬란드는 이미 20세기 초반부터 적극적으로 지열과 수력 에너지를 사용해 왔다. 현재 국가 전력의 80%를 수력, 20%를 지열에서 만들고 있다. 이런 풍부한 재생 에너지를 이용해 전기를 생산하고, 이 전기로 물을 분해해서 수소를 만들어 자국의 전력소비를 충당한 후 수출까지 하겠다는 계획을 차근차근 이뤄가는 중이다. 인구 30만 명의 소국에서 세계의 수소경제 시대를 견인하는 에너지 대국으로 거듭나겠다는 전략이다.

새로운 에너지 패러다임을 선점하려는 선두 다툼이 점점 더 격화되고 있는 가운데 우리나라 역시 올해 1월 대대적인 '수소경제 활성화 로드맵'을 발표하며 수소경제 주도권 경쟁에 뛰어들었다. 2030년 수소전기차와 연료전지에서 모두 세계시장 점유율 1위를 차지하는 게 목표다. 이를 위해 현재 연 2천 대 수준인 수소전기차의 생산량을 620만 대로 확대하고, 핵심 인프라인 수소충전소는 1,200개 소로 늘린다는 계획이다. 발전용 연료전지와 가정용 연료전지 역시 각각 15GW, 2.1GW(94만 가구) 보급을 목표로 하고 있다. 여기에 필요한 대규모 수소 공급을 위해 수소의 생산량 역시 526만 톤 이상으로 확대할 예정이다.

[표 1] 수소경제 활성화 로드맵(2019. 1.)

"강점이 있는 수소차·연료전지를 양대 축으로 수소경제를 선도하겠다"

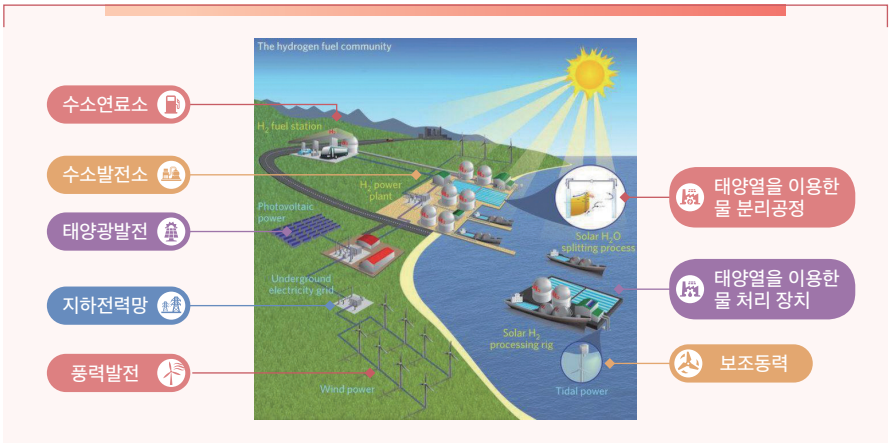
			2018년	2022년	2040년
목표	수소차 (수출) (내수)		1.8천 대 (0.9천 대) (0.9천 대)	8.1만 대 (1.4만 대) (6.7만 대)	620만 대 (330만 대) (290만 대)
	연료전지	발전용 (내수)	307MW (전체)	1.5GW (1GW)	15GW (8GW)
		가정·건물용	7MW	50MW	2.1GW
	수소공급		13만 톤/年	47만 톤/年	526만 톤/年 이상
	수소가격		-	6,000원/kg	3,000원/kg
추진 방안	활용		모빌리티	① 수소차 양산체계 구축 및 보급 확대 ② 수소 택시·버스 등 대중교통 전환 ③ 공공부문 수소 트럭 활용 ④ 수소충전소 전국 확대 및 자생력 확보 ⑤ 선박, 열차, 드론 등 기타 활용분야 확대	
			에너지	① 발전용 연료전지 보급 확산 및 수출산업화 ② 가정·건물용 연료전지 확대 ③ 수소가스터빈 기술개발 및 상용화	
	생산		Grey 수소	부생수소 활용 및 대규모 추출수소 생산	
			Green 수소	① 수전해 대량 생산 및 경제성 확보 ② 해외 CO_2 free 수소 본격 도입	
	저장·운송		저장	고압기체 외에 고효율 액체·액상·고체 저장으로 다양화	
			운송	파이프라인 전국망 구축, 수소운반선 등 대규모 유통 추진	
	안전		수소안전에 대한 국민 인식 제고 및 수소 전주기 안전관리 체계 확립		

에너지 패러다임 시프트의 기술적 동력들

1. 인공 나노나무에서 '그린 수소'를 수확하다

"수소경제는 석유와 셰일가스를 갖지 못한 우리에게는 아주 큰 기회입니다. 지식과 기술만으로 얼마든지 새로운 에너지 패러다임의 주도권을 쥘 수 있기 때문이지요. 아주 공정하고 평등한 출발선이 열린 셈입니다. 관건은 친환경적이면서 경제성 있는 수소 생산 기술의 개발입니다. 생산 과정에서 온실가스가 발생하는 '그레이 수소'가 아니라 이산화탄소가 발생하지 않는 물 분해, 그중에서도 전기 사용을 최소화하는 '그린 수소' 기술이 환경과 비용 부담 모두에서 자유로운 수소경제 시대의 마중물이 될 것입니다."

[그림 3] 수소 연료 커뮤니티



에너지자원의 다각화와 에너지 자립도 제고가 필요한 우리에게 수소경제 시대는 더없이 매력적인 미래다. 수소는 대기와 지각의 구성 물질로 지구상에 풍부하게 존재한다. 대부분의 원소와 화합물을 형성하며 물과 탄화수소 등의 유기화합물은 수백만 가지나 알려져 있다. 단위 무게당 연소열은 143 kJ/g으로 무연탄(27 kJ/g), 메탄(64 kJ/g), 휘발유(47 kJ/g)보다 월등히 크다. 수소 기체는 연소 후 물이 생성될 뿐 오염물질도 만들지 않는다. 하지만 규모의 경제를 이룰 만큼의 대량 생산이 그리 간단하지는 않다.

자연 상태의 수소는 대부분 기체가 아닌 화합물로 존재하기 때문에 인위적으로 분리해야 한다. 현재 수소 생산방식은 크게 3가지다. 석유화학·철강 산업에서 부산물로 나오는 부생수소, 메탄 등의 탄화수소를 고온의 수증기로 열분해하는 추출수소, 그리고 물의 전기분해(수전해)가 있다. 가장 친환경적인 방법은 지구온난화의 주범 이산화탄소가 발생하지 않는 수전해 방식이다. 하지만 전기 사용량이 상당하다. 수소를 연료로 사용하기 위해 더 많은 에너지를 투입해야 하는 딜레마에 빠지게 된다.

[표 2] 수소 생산 방법

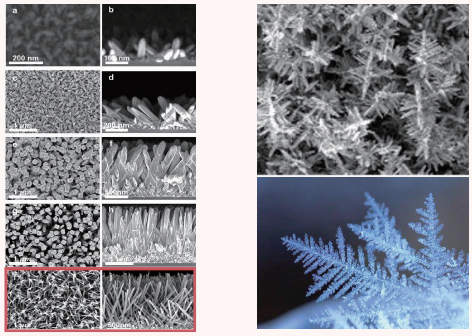
	수증기 개질, 가스화 (추출수소)	전기분해 (수전해)	부생수소 (화학·철강공정 부산물)
에너지원	화석 연료 (천연가스, 석탄)	신재생에너지, (태양력, 풍력, 조력, 파력) 원자력	주로 화석 연료
장점	대량생산 가능 저렴한 생산단가 안정된 기술	친환경성 다양한 에너지원 활용 가능, 대량 생산 가능 CO_2 미발생	폐가스 활용
단점	CO2 발생 多 에너지 안보 취약	높은 생산단가 지역적 제한 낮은 에너지 효율 대량생산 곤란, 원자력 거부감 일부 기술개발 중	정제 필요, 생산량 확대 곤란

현재 우리 정부의 수소경제 활성화 로드맵은 초기 단계에서 안정적인 수소 생산과 공급을 위해 부생수소와 추출수소를 주요 수소 공급원으로 활용할 계획이다. 이어 수소 수요량 증가와 수소경제 활성화의 근본 취지인 친환경 에너지원 육성에 맞춰 수전해 수소 생산량의 점진적인 확대를 목표로 하고 있다. 탄소경제에서 수소경제로의 전환은 국가적 당면과제이기도 하다. 우리나라는 교토의정서의 뒤를 이어 2016년 공식 발효된 유엔기후변화회의 파리협정에 따라 2030년까지 이산화탄소 배출 전망치 8억 톤 중 37%인 3억 톤을 의무적으로 감축해야 한다.

이에 따라 더욱 속도를 낼 것으로 전망되고 있는 분야가 전기 대신 태양광과 바이오매스 등 자연의 에너지를 이용해 물을 분해하는 연구이다. 이런 아이디어들은 태양 에너지를 이용한 광합성만으로 생물의 99% 이상을 차지하며 사실상 지구 생태계의 지배자로 군림해온 식물의 시스템을 주의 깊게 관찰하는 데서부터 출발하고 있다. 식물은 지구상에서 스스로 에너지를 생산할 수 있는 유일한 생명체다. 먹이사슬의 가장 아래에서 태양빛과 물, 이산화탄소만으로 모든 동식물의 기초 에너지원인 탄수화물을 공급해 왔다.

지금 소개하는 태양광 물분해 수소 생산기술 연구는 그중에서도 특히 '나무'에 주목하고 있다. 모든 부분이 태양광을 고르게 잘 받도록 자라는 나무의 3차원 구조, 즉 피보나치 수열을 모사한 인공 나노나무의 광전기화학(Photoelectrochemical, PEC) 반응으로 수소를 생산하고자 하는 것이다.

[그림 4] 수열합성법을 이용한 TiO2 나노막대 합성



물을 분해하여 수소를 얻는 과정은 흡열반응이다. 연구자들은 이 흡열반응에 필요한 에너지원으로 전기 대신 무한 에너지인 태양광을 이용하는 광전기화학적 물분해 기술 개발에 주력하고 있다. 태양에너지를 물 분해 반응에 이용하려면 효율이 높은 광양전극과 광음전극이 필요하다. 이 광전극들이 물속에서 태양광을 받으면 전자와 정공이 발생해 전류가 흐르며 물을 분해하게 되고, 광양전극에서는 수소. 광음전극에서는 산소가 각각 발생하게 된다.

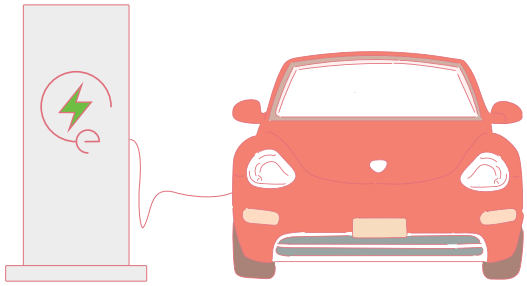
이해를 돕기 위해 나무로 표현되지만 실제 이 광전극은 육안으로 보이지 않는 반도체 물질이다. 현미경을 통해 관찰하면 태양광을 완벽히 흡수하고 생성된 전자와 정공이 잘 이송될 수 있도록 수 마이크로 높이의 수많은 나노구조 인공나무가 기판(Substrate) 위에 박혀 있다.

현재 이 나노나무의 형태는 잔디나 갈대의 모습과 비슷한 1차원 구조다. 연구자들은 이를 나뭇잎이 태양광을 흡수하고, 가지와 줄기에 해당하는 부분에서는 전기를 이동시키는 3차원 사과나무 형태로 발전시키려 하고 있다. 관건은 각각의 기능에 맞는 최적의 소재들을 찾아 나노 수준에서 결합이 이뤄질 수 있도록 설계하고 합성하는 일이다.

수소가 발생하는 광양전극은 전자가 다수인 n형 반도체, 산소가 발생하는 광음전극은 정공이 다수인 p형 반도체를 이용하고 있다. n형 반도체는 값이 싸고 안정된 산화물인 경우가 많다. 반면 p형 반도체는 상대적으로 그 숫자가 적으며 전하이동도 등이 현저히 떨어진다. 이에 연구자들은 반응면적을 증가시키는 나노 구조 전극과 전이금속 칼코지나이드 기반의 촉매, 그리고 이들의 이종접합을 통한 전극·촉매 복합 구조의 우수한 광전극을 만들기 위해 원자 수준의 소재 분석 및 제어기술 개발에 주력하고 있다. 이러한 기술개발이 성공하면 다음 단계는 크기를 키워(대면적화) 본격적으로 친환경 수소를 생산할 수 있는 공정기술의 개발이 이어질 계획이다.

2. 도심 속 작은 발전소, 움직이는 공기청정기?

> 수소연료전지는 그 자체가 작은 발전소입니다. 수송용으로 사용하면 대기 중에서 산소를 공급받아 발전하면서 미세먼지와 오염물질을 정화해 움직이는 대형 공기청정기 역할을 합니다. 고정형은 화력, 풍력처럼 거대한 장치 없이 도심과 산업단지 등 필요한 곳에서 소규모 발전소로도 운용할 수 있습니다. 전기화학적 방식은 친환경적일뿐만 아니라 에너지 밀도가 높아서 생산 시간이 고르지 않은 신재생에너지와 남아도는 심야전기 등의 잉여전력을 저장했다 사용하는 에너지저장시스템(ESS) 기술로도 매우 높은 가능성을 지니고 있습니다. 또 화학물질인 수소는 1년 이상 오랜 기간 저장할 수도 있지요. 이렇게 작은 수소연료전지 발전소들을 곳곳에 두면 대규모 발전시설과 송전시설에 필요한 건설비용은 물론 송전 중 사라지는 전력 손실도 대폭 줄일 수 있게 됩니다.

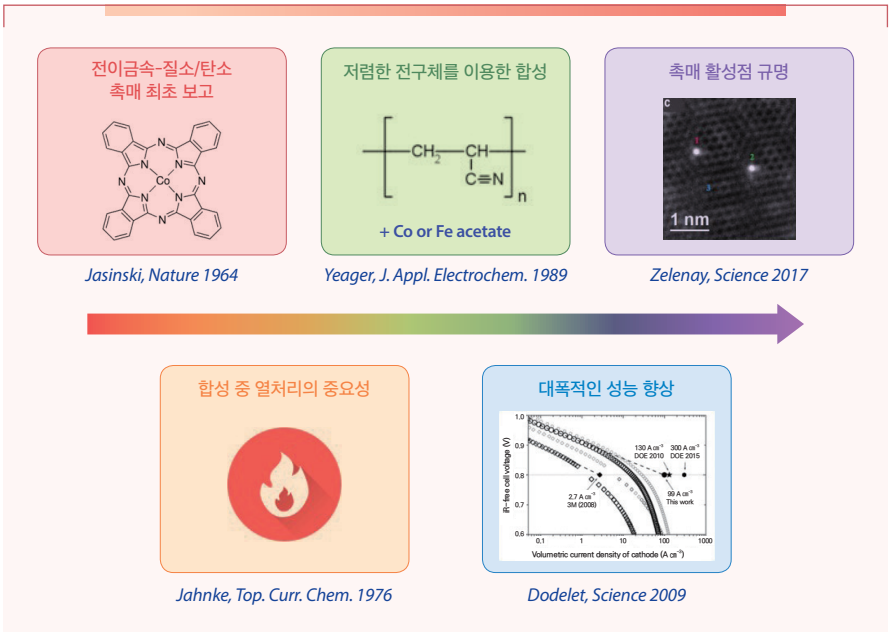


전 세계적으로 수소 충전과 생산이 동시에 이뤄지는 '온사이트 수소스테이션'이 큰 관심의 대상이 되고 있는 것도 이 때문이다. 수소 공급은 크게 오프사이트(Off-site)와 온사이트(On-site) 두 개의 방식으로 나뉜다. 오프사이트는 특정 지역에서 수소를 대량생산해 고압탱크와 파이프라인 등으로 수요지역에 공급하는 방식이다.

반면 온사이트는 각 수요 지역별로 수소충전소를 설치하고 수소를 자체 생산·사용하는 방식이다. 수소의 생산과 이송, 저장, 활용에 이르는 전주기 시스템이 시민들의 생활과 직접 밀착되는 수소 도시 생태계 구축에 더 적합한 모델인 것이다. 그에 따라 함께 주목받고 있는 수소 생산기술이 고분자수전해장치(PEMWE, Polymer Electrolyte Membrane Water Electrolyzer) 기술이다.

PEMWE의 가장 큰 특징은 액체가 아닌 고체 상태의 고분자 전해질을 사용한다는 점이다. 현재 주로 이용되고 있는 알칼리 수전해 기술보다 수소발생 반응의 고유 활성이 높으며 비귀금속 촉매에서도 수소발생반응이 활성을 나타낸다. 하지만 백금, 이리듐, 루테늄 등의 비싼 촉매와 담지체가 큰 걸림돌이다. 담지체는 촉매 입자의 활성 면적을 증가시키는 분산제 역할과 함께 정박효과(Anchoring effect)를 통해 부식성이 높은 환경에서 촉매의 내구성을 높인다.

◆❁ [그림 5] 산소환원반응 촉매의 최신 연구동향

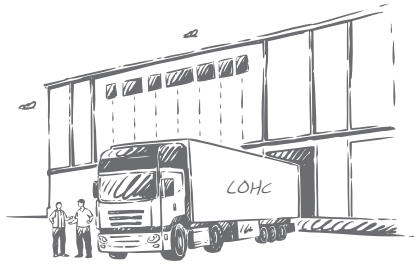


따라서 이를 대체할 고효율·고내구성의 경제성 있는 촉매 및 담지체 개발이 중요해 지고 있다. 특히 수소발생반응의 짝반응인 산소발생반응은 더 많은 전자의 이동을 수반하고 반응속도가 느려 이를 상쇄하기 위해서는 그만큼 귀금속 촉매를 더 많이 사용해야 한다. 이에 따라 산소반응발생 촉매 및 담지체 개발이 PEMWE의 상용화를 앞당기는 데 중요한 역할을 하게 될 것으로 보인다. 하지만 전 세계적으로 활발한 수소발생반응용 촉매 및 담지체에 관한 연구에 비해 산소발생반응용 촉매 및 담지체에 관한 연구는 빈약한 상태다.

이런 가운데 국내에서는 현재 수소발생반응용 촉매 및 담지체, 산소발생반응용 촉매 및 담지체, 이온을 전도시키는 분리막, 다수의 단위전지를 적층해 적합한 수준의 전기를 발전시키는 스택(연료전지)까지 PEMWE 시스템 전반의 혁신 기술 개발을 위해 재료, 화학, 기계공학 등 다양한 전문분야 간 공동연구가 점차 활발해지고 있다.

PEMWE 상용화의 걸림돌을 제거하기 위한 이들의 연구는 친환경 수소경제 시대를 앞두고 점점 더 그 중요성을 더해가고 있다. PEMWE 장치에서 핵심이 되는 산소발생반응 촉매의 단가를 크게 낮출 수 있을 뿐만 아니라, 장치 구동에 필요한 과전압을 크게 낮춰 부가적인 비용 또한 크게 절감시킬 수 있을 것으로 기대되기 때문이다.

실제 물 분해 반응과정 중 전해질 속에서 촉매의 특성을 분석하는 방법은 매우 중요하지만 접근하기 어려웠던 이슈다. 이에 따라 연구자들은 기존에 보유 중인 '전기화학 주사현미경을 이용한 촉매 표면 분석법' 기술을 통해 전해질 속에서 촉매 표면을 원자단위로 분석할 수 있도록 하여 반응 물질의 정확한 특성과 메커니즘을 규명할 수 있을 것으로 기대하고 있다. 또한 정박효과(Anchoring effect)를 이용한 전략과 다공성 담지체 개발을 통해 부식성이 높은 환경에서 촉매의 내구성을 크게 향상시키는 한편, 내부까지 효과적으로 전해질이 용이하게 침투시키며 생성된 산소와 수소를 빠르게 제거하는 구조로 실제 상용화에 근접하는 높은 성능을 구현하려 하고 있다.



수소 저장과 운송

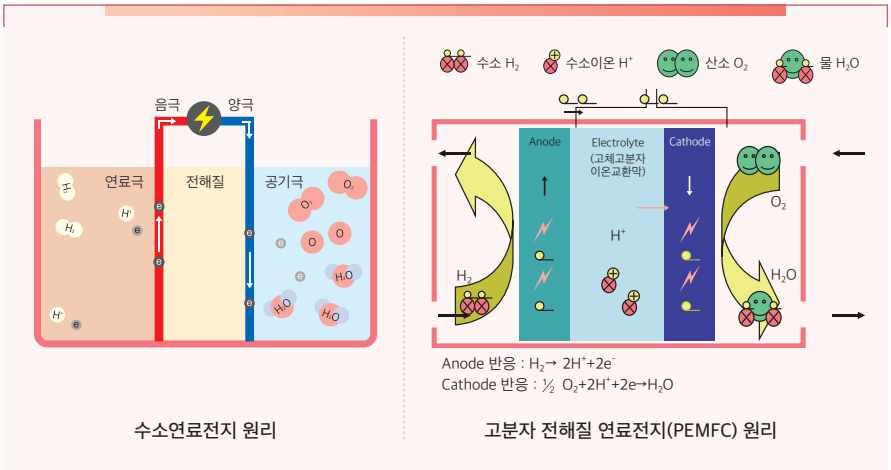
수소는 세상에서 가장 가벼운 원소이다. 또한 무게당 에너지 밀도는 아주 높지만 쉽게 액화되지 않기 때문에 부피당 에너지 밀도는 다른 연료에 비해 적은 편이다. 따라서 수소를 실용적인 에너지 운반체로 사용하기 위해서는 같은 부피에 많은 양의 수소를 저장·운송하는 기술개발이 이뤄져야 한다. 현재 가장 대표적인 수소 저장·운송 기술은 수소를 -253℃로 액화해 고압수소탱크로 옮기는 방법이다. 수소 기체는 팔라듐(Pd) 등의 희토류 및 전이 금속에 아주 잘 흡수된다. 이 성질은 수소의 정제와 저장에 유용하게 이용되기도 하지만 수소가 흡수된 금속이 부서지기 쉬워 수소 기체용 배관이나 저장 탱크의 고안에 어려움을 야기하기도 한다. 이에 따라 값싸고 저장 용량이 큰 금속 또는 합금의 개발과 함께 수소 기체를 암모니아나 제3의 물질로 바꿔서 저장·수송한 뒤 다시 수소로 바꿔서 사용하는 방법이 연구되고 있다. 현재 독일과 일본만 보유하고 있는 액상유기물수소저장체(Liquid Organic Hydrogen Carrier, LOHC) 제조기술이 대표적이다. LOHC 기술은 액체 상태 화합물에 수소를 결합해 저장·운송하는 기술로 액상화합물이 수소의 저장체로 이용되기 때문에 별도의 특수용기가 필요하지 않으며 통상 "수소가 액상화합물에 업혀간다"고 표현되곤 한다. 이 기술의 핵심은 액상화합물, 즉 모든 조건을 만족하는 수소 저장물질의 확보에 있다.

3. 비 귀금속 촉매로 경제성을 확보하라

> 수소연료전지 시스템에서 촉매가 차지하는 가격 비중은 굉장히 높습니다. 현재 수소전기차를 1천 대 생산하면 촉매의 비중이 대략 20% 정도입니다. 하지만 재미있는 건 1만 대, 10만 대, 100만 대로 규모의 경제가 이뤄지면 다른 부품은 모두 생산단가가 낮아지는데 고가의 백금계 촉매는 가격비중이 떨어지지 않고 오히려 높아진다는 것입니다. 현재 백금은 수소연료전지의 촉매 반응에서 어떤 물질과도 비교할 수 없을 만큼 좋은 성능을 보입니다. 그래서 수소연료전지의 촉매를 연구하는 사람들의 목표는 아주 명확합니다. 어떻게든 백금 사용량을 줄이거나 다른 물질로 대체하면서도 비슷한 성능을 낼 수 있는가를 고민하는 것이지요.

수소연료전지의 전기 발생 원리는 비교적 간단하다. 물에 전기를 가해 수소와 산소가 분리되는 물 분해의 역반응이다. 이러한 변화가 일어나는 에너지 변화장치가 바로 연료전지(Fuel cell)이다. 수소연료전지는 연료극과 공기극의 2개 전극과 그 사이 수소이온을 전달하는 분리막(멤브레인) 등으로 구성된다.

[그림 6] 수소연료전지 및 고분자 전해질 연료전지의 원리



수소연료전지 원리 | 고분자 전해질 연료전지(PEMFC) 원리

이중 연료극(산화극)에 수소를, 공기극(환원극)에 산소를 주입하며 연료극에 주입된 수소(H_2)는 수소이온(H+)과 전자(-)로 분리돼 분리막을 통해 산소가 있는 공기극으로 이동을 한다. 이때 전자는 분리막을 통과하지 못하고 음극에 남게 되는데, 이때 두 극 사이의 전위차에 의해 전자가 음극에서 양극으로 이동하며 전기가 발생하고 각각 다른 경로를 통해 공기극으로 이동한 수소이온과 전자는 산소와 만나 물(H_2O)이 된다.

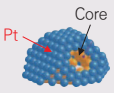
수소연료전지는 구동온도와 전해질에 따라 다양한 종류가 있는데 최근 가장 큰 관심을 끌고 있는 것은 고분자 전해질 연료전지(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells, PEMFC)이다. PEMFC의 연료극에서 일어나는 수소산화반응의 경우 반응속도가 빨라 소량의 백금 촉매를 사용해도 충분한 성능을 낼 수 있다. 하지만 공기극에서 발생하는 산소환원반응은 수소산화반응에 비해 반응속도가 백만 배 정도 느리기 때문에 반응속도를 높이기 위해 많은 양의 백금촉매를 사용해야 한다.

하지만 그램당 최소 5만 원이 넘는 값비싼 백금을 촉매로 사용하는 것은 연료전지의 가격 상승으로 이어진다. 예를 들어 수소전기차를 1백 대 생산한다고 가정할 경우 고분자 전해질 연료전지 전체 시스템에서 촉매는 가격의 23% 정도이지만, 연간 생산대수를 50만 대로 가정할 경우, 촉매 가격은 오히려 43%로 증가하게 된다. 이는 백금의 전 세계적인 매장량이 한정되어 있고 남아프리카공화국과 러시아 등 일부 지역에 90% 이상 몰려 있기 때문에 백금의 수요량이 늘어날수록 가격이 높아지는 구조에 기인한다.

이에 따라 고분자 전해질 연료전지 전체 시스템의 가격 경쟁력을 높이기 위해서는 백금의 사용량을 줄이거나 백금을 사용하지 않는 공기극 촉매를 개발해야 한다. 백금계 공기극 촉매를 대체하는 연구는 지난 수십 년 간 백금 저감과 비백금계 촉매 개발의 두 가지 방향으로 진행되어 왔다. 백금 저감을 위해서는 백금과 니켈, 코발트 등 값싼 전이금속의 합금 촉매, 전이금속-백금 코어-쉘 구조의 촉매가 가장 널리 연구되어 왔다. 이러한 촉매들은 백금의 사용량을 현저히 줄일 수 있을 뿐만 아니라 산소환원반응 촉매 활성을 기존의 탄소 담지 백금촉매에 비해 수~수십 배 향상시킬 수 있다. 하지만 여전히 백금이 사용되기 때문에 촉매의 가격 경쟁력 문제를 완전히 극복할 수 있는 것은 아니다.

이에 따라 현재 큰 관심을 끌고 있는 것은 비백금계 촉매의 개발이다. 대표적인 비백금계 촉매로는 전이금속-질소 도핑 탄소(M-N/C), 전이금속 산화물-탄소복합체, 나노구조 탄소 등이 연구되고 있는데 그중 M-N/C 촉매는 백금계 촉매에 가장 근접하는 높은 성능을 보여 향후 백금계 촉매를 대체할 가능성이 가장 높은 것으로 주목받고 있다.

[표 3] 백금계, 저백금계, M-N/C계 촉매의 개발현황 및 상용화 과제

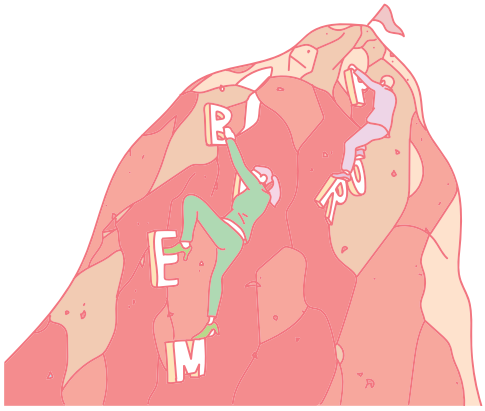
촉매 종류	장점	남아있는 과제
백금	• 성숙한 기술	• 자동차용 연료전지 적용을 위한 백금양 저감 • 촉매층 내구성 향상
백금 합금	• 성숙한 기술 • 백금 대비 향상된 촉매 활성 • 향상된 막/MEA 안정성	• 자동차용 연료전지 적용을 위한 백금양 저감
코어-쉘 	• 백금 합금 대비 향상된 질량 활성 • 백금 대비 향상된 내구성 • 가장 높은 활성 표면적	• 쉘층의 안정성 유지 • 코어층의 용출 방지
형상 조절된 나노입자	• 백금 대비 15배 이상 향상된 질량 활성 • 코어-쉘 촉매에 비해 대량 합성 용이	• 대량 합성 초기 단계 • 불확실한 안정성 개선 • MEA 성능 검증 필요
나노프레임 / 나노케이지	• 백금 대비 15배 이상 향상된 질량 활성 • 백금 대비 향상된 내구성	• 대량 합성 초기 단계 • 고전류에서의 MEA 성능 검증 필요
비귀금속 촉매	• 가격 대폭 절감 • 피독 물질에 대한 안정성	• 비자동차용 연료전지 목표 달성 가능

고성능 탄소(M-N/C) 촉매를 합성하기 위해서는 반응 표면에 노출된 촉매 활성점의 수를 극대화하고, 전기 전도도가 우수하며, 반응물인 산소와 생성물인 물의 물질전달이 원활한 기공 구조를 형성하는 합성법 개발이 중요하다. 주목할 만한 점은 최근 개발된 고성능 탄소 촉매의 경우 상용 탄소 담지 백금 촉매의 성능에 근접하거나 일부 조건에서는 능가하는 등 매우 우수한 성능을 보이고 있다는 점이다.

하지만 고성능 탄소 촉매를 PEMFC 단위전지에 적용할 경우 반쪽 전지에서 보였던 높은 산소환원반응 성능이 완전히 구현되지 못한다는 것이 숙제로 남아 있다. 이에 따라 국내에서도 탄소 촉매의 성능 향상을 위한 연구가 한창인 가운데 난제로 꼽히고 있는 전체 수소연료전지 시스템 내에서의 고성능 탄소 촉매의 성능 구현에서 상당한 성과를 보이고 있다. 또한 관련 연구를 수행하는 중에 산업용 기초 화학물질인 과산화수소를 높은 효율로 얻을 수 있는 생산법을 개발하는 등 의외의 소득을 거두기도 했다. 수소에너지 원천기술의 연구가 비단 미래의 수소경제 활성화뿐만 아니라 산업과 생활 전반에서도 현실적인 파급효과를 불러올 수 있음을 시사하는 대목이다.

세 번째
의제

수소에너지 시대를 향해



"쓸데없는 일을 잔뜩 하지 않으면
새로운 것이 태어나지 않는다"

리튬이온 배터리 개발의 공로로 25번째 일본인 노벨상 수상자가 된 요시노 아키라의 수상 소감이다. 그는 말한다. 당장 눈앞에 보이는 성과가 없을지라도 장기간에 걸쳐 연구할 수 있는 환경이 과학강국·기술대국 일본의 비결이라고 말이다. 한국연구재단이 최근 10년간 노벨상 수상자들의 추이를 조사한 바에 따르면 수상에 결정적인 역할을 한 핵심 논문 생산에는 평균 17년이 걸렸다. 이는 다시 말해 노벨상 수상자들이 17년간 때로는 쓸데없는 일이란 핀잔 속에서도 무수히 많은 실패를 거듭하며 끈기 있게 경험을 쌓았다는 이야기다. 대부분 3년, 길어도 5년 안에 성과를 강요당하는 사회에서 연구자는 지식도, 경험도 축적할 틈이 없다. 우리나라가 목표로 삼고 있는 수소 강국의 길 역시 대단한 끈기가 필요한 여정이란 점에서 예외일 수가 없다.

1. 예측 가능한 정책이 도전정신 북돋는다

친환경 수소생산과 연료전지 등의 수소경제 핵심기술은 관련 연구자들의 입장에서 더없이 매력적이며 순수한 도전정신을 고양하는 연구 주제이다. 수소가 가장 궁극적이며 이상적인 친환경 에너지원이기 때문이다. 사회 기여라는 과학기술인의 이상과 현실이 잘 조화를 이루는 테마이기도 하다.

하지만 수소경제에 대한 작금의 큰 관심과 지원이 과연 지속 가능한 것인지에 대한 불확실성은 연구자들의 몰입을 방해하는 걸림돌이 되고 있다. 현재 수소경제 관련 핵심기술 개발에 집중하고 있는 연구자들은 2008년을 전후해 이차전지 R&D에 지원이 집중되며 연료전지 분야가 상대적으로 소외되던 어려움 속에서도 끈기 있게 연구에 매진해온 이들이다. 최근의 수소경제 활성화 정책을 통해 다시 관심의 대상이 되고 있지만 언제 또 이 열기가 사그러들지 알 수 없는 환경 속에서 불안한 연구를 이어가고 있는 것이다.

심한 경우 정부가 바뀌면 지원 자체도 사라지는 경우도 많다. 정책의 연속성이 깨지고 오랜 시간 주력해야 할 분야의 연구과제들이 하나둘씩 사라지는 현상을 경험하게 되면서 연구자는 물론, 해당 분야에서 미래를 설계하던 후진들도 위축되어 다른 길을 모색하게 되는 것이 우리의 현실이다. 수소경제와 관련한 R&D 프로젝트는 기초과학과 공학에 걸쳐 다양한 학제간 융합연구가 필요한 까닭에 정책의 연속성이 결여될 경우 오랜 기간 공들여 쌓아온 유기적인 협업 시스템 역시 한순간에 무너질 가능성이 크다. 연구자들이 꾸준히 몰입할 수 있는 지원의 풍토가 만들어져야 한다.

2. 꾸준한 소액연구가 수소경제 마중물

우리나라의 연구개발 지원제도는 산업화 시대 '과제중심'의 성격이 여전히 유지되는 경향이 있다. 과거 한국의 R&D는 경제개발을 위해 정부가 주도적으로 연구개발 사업을 기획하고 과제 수행기관을 지정하는 방식으로 성장해왔다. 반도체, 디스플레이, 자동차, 조선 등 한국의 주력산업 대부분이 이런 정부 주도 대형연구개발 사업을 통해 배출됐다.

하지만 수소경제 시대의 도래를 앞둔 지금 R&D 지원철학 역시 그에 맞게 변화해야 한다는 목소리가 높다. 집중적인 연구비 투입과 단기간 성과 창출이라는 과거의 성공방식이 통하지 않기 때문이다. 과제중심의 연구는 짧은 기간 당면한 문제해결에 효과적이지만 끈기 있는 연구가 필요한 수소사회 핵심기술 개발에는 적합지 않다. 현재의 R&D 지원체계에서는 평균 3년의 연구지원기간이 끝나면 과거 연구주제와 차별화되는 주제로 새롭게 연구과제를 신청해야 하고 연구비 확보를 위해 다수의 연구과제를 수행하다보면 한 가지 주제에 몰입하기도 힘든 실정이다.

따라서 이 같은 문제점을 인식하고 기존 연구자에게는 장기적·안정적인 연구 환경을, 수소경제 관련 연구개발에 진입하고 싶어 하는 신진연구자들에게는 도전의 기회를 제공하는 소액연구 트랙을 확대해 주어야 한다. 쓸데없고 사소해 보이는 연구라도 10~20년 쌓였을 때 어떤 결과를 낳을 수 있는지는 일본의 끊임없는 노벨상 수상을 통해서도 확인할 수 있다.

3. 수소사회 구현을 위한 인적네트워크 '수소살롱'

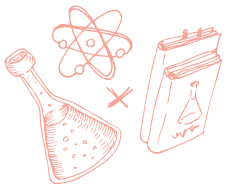
외부 변화에 상관없이 20년 이상 착실하게 수소경제 로드맵의 초기 기조를 유지하고 있는 미국과 일본을 보며 연구자들은 아쉬움이 클 수밖에 없다. 2000년대 초반 일었던 수소연료전지에 대한 국내의 관심이 중간에 끊이지 않고 지금까지 이어졌다면 현재 어떤 결과로 이어지고 있을지에 대한 아쉬움이다. 특히 연구지원이 특정 이슈가 발생한 쪽으로 집중되는 쏠림현상으로 인해 그간 수소 에너지 기술 관련 전문가들의 저변이 얇아진 것도 안타까운 현실이다. 이에 따라 막상 많은 전문가들이 필요한 때 품귀현상이 빚어지고 있는 것이다.

최근 늘어나고 있는 수소경제 핵심기술 개발 관련 연구과제들은 자신의 의지와 상관없이 프로젝트를 '갈아타야' 했던 연구자들의 관심을 되돌리기 시작했다. 전문가들은 이러한 때 필요한 것이 해당 분야에 대한 관심과 아이디어들을 공유할 수 있는 커뮤니티 구축이라고 강조한다. 수소경제 활성화의 네 바퀴에 해당하는 산·학·연·관 관계자들이 자유롭게 의견을 나누고 정보를 교환할 수 있는 인적네트워크 구축이 시급하다는 의견이다.

지난 2012년 대전에서 혁신신약 관련 전문가 모임에서 출발해 현재 판교, 오송, 대구, 송도 등의 지역별 모임이 활발하게 열리고 있는 '혁신신약살롱'이 좋은 참고가 될 만하다. 5개 지역별 모임을 합쳐 약 5천여 명 규모의 멤버로 성장한 혁신신약살롱은 관련 연구자와 기업인, 공무원, 언론인, 학생, 예비창업자까지 다양한 참가자들의 폭넓은 소통을 통해 신약개발과 관련한 다양한 담론을 주도하며 오늘날 의약바이오 융성의 중요한 동력원 중 하나가 됐다는 평가를 받고 있다.

수소사회 주역, 젊은 과학도에게 …

촉매 반응은 혼자 일어나지 않는다

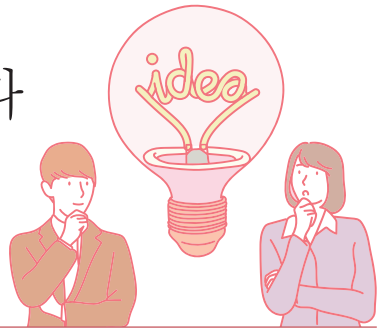


최근 이집트에서 스티브 잡스와 닮은꼴 인물이 등장해 화제가 된 바 있다. 얼마나 비슷했는지 2011년 사망한 그가 아직 살아 있는 게 아니냐는 음모론까지 등장할 정도였다. 한편으로 이번 해프닝은 사후에도 여전한 스티브 잡스의 세계적인 영향력을 재확인하는 계기가 되고 있다. "과학기술과 인문학의 교차로에는 마법이 존재한다"며 서로 전혀 달라 보이는 영역의 연결지점에서 새로운 세계를 발견하고자 했던 그의 믿음은 결국 21세기 혁신의 아이콘이 된 애플을 탄생시켰고 인류의 생활양상에 거대한 변화를 불러일으키게 된다. **'창의성'은 융합이 힘든 이질적인 재료의 이종접합이라고도 할 수 있다.**

수소경제 시대의 주역이 될 젊은 과학도에게는 무엇보다 이런 발상의 전환이 필요하다. 친환경 수소의 생산과 저장, 운송, 사용에 관한 연구가 모두 다른 영역인 듯 보이지만 실은 서로 긴밀히 연계되어 있어 어느 한곳이라도 엉성하면 미래 수소사회에서 뒤쳐질 수 밖에 없다. 서구사회에서는 심리학자와 경제학자가 컴퓨터 사이언스 대학의 설립을 주도하고, 불문학자와 사회학자가 물리학의 태두가 되기도 하는 학문의 융합 현상이 지극히 자연스럽다. 하지만 안타깝게도 우리나라는 유독 문과와 이과를 구분하고, 기초학문과 실용학문을 구분하고, 화학과 물리와 소재와 기계를 구분하기 좋아한다. 좋아할 뿐만 아니라 영역을 나누고 담을 쌓고 배척하는 경향이 강하다. 하지만 나무 혼자 숲을 이룰 수 없다. 다양한 수종의 나무들이 건강한 숲의 생태계를 조성하듯 수소경제 시대의 과학기술은 다양한 분야의 협업이 필수적이다. 예를 들어 연료전지 분야는 촉매만 보면 화학공학의 지식이 가장 많이 필요할 것 같지만 실제 연구를 진행하다보면 화학자, 물리학자, 전자공학자 등 다양한 전문가들의 시각이 필요하다. 단위전지를 스택으로 만들기 위해서는 기계공학자와의 협업이 절대적이다.

한편 지능(知能, Intelligence)은 학문별로 조금씩 정의가 다르지만 대체적으로 '문제를 해결하는 능력'이라는 것에 의견이 일치한다. 지능이란 전에 알지 못하던 새로운 문제와 부딪혔을 때 얼마나 합리적으로 사고하고 효율적으로 해결할 수 있는지에 관한 능력이다. 많은 학자들은 이런 지능이 상당 부분 '경험'과 '기억'에서 비롯된다고 이야기한다. 유전적으로 타고나는 두뇌도 무시할 수 없는 요소이지만 살아가면서 직접 경험하거나 학교, 친구, 책, 동료와 같은 외부 환경요인에서 얻는 간접 경험을 통해 문제를 해결하는 능력, 즉 지능이 쌓인다는 것이다. 이런 다중지능의 집합체인 창의성은 곧 문제를 색다른 관점으로 볼 수 있는 능력이다. 다양한 지식과 기술의 융합이 필요한 수소경제 시대의 과학자, 공학도들은 한 가지 지식만 파면 안 된다. 내 연구실뿐만 아니라 다른 연구실의 일에도 흥미를 갖는 T자형의 인재가 되려고 노력할 필요가 있다. 우리가 잘 안다고 생각하는 '촉매'도 결코 저 혼자 반응하는 법이 없다. 외부의 자극과 에너지가 촉매를 촉매답게 하는 것이다.

우문현답 :
우리의 문제는
현장에 답이 있다



●● 수소경제의 도래와 과제

2019년 2월 18일, 한국과학기술한림원과 한국과학기술단체총연합회는 산업통산 자원부에서 발표한 '수소경제 활성화 로드맵'이 성공적으로 이뤄질 수 있도록 지원하기 위해 제133회 한림원탁토론회를 개최했다. '수소경제의 도래와 과제'를 주제로 정부, 산업계, 학계의 수소 관련 전문가들이 참석한 가운데 수소경제의 국내외 현황과 비전에 대한 다양한 목소리를 들을 수 있었다.

김 봉 석

산업통상자원부 에너지 신산업과 총괄팀장

저희는 대한민국이 향후 2030년쯤에는 수소차, 연료전지 시장 분야 세계 시장 점유율 1위를 달성할 것으로 전망하고 있습니다. 그리고 **화석연료 자원 빈국에서 그린 수소 산유국으로 진입**할 수 있다는 비전을 가지고 이 전략을 추진할 것입니다.

김 민 수

서울대학교 교수

다른 과학기술 정책도 그렇지만 수소경제 정책 역시 장기적이고 일관성 있게 이어 나가기란 쉽지 않은 일입니다. 여러 가지 다양한 변수가 있기 때문인데요. 사실 이것을 없앨 수 있는 가장 좋은 방법이 있습니다. 바로 **정부가 기술의 중립성을 지키는 것**이지요. 어떤 기술에 대해서 단순히 좋다, 나쁘다에 따라 흔들리지 않고 중립적인 입장을 이어가는 것, **정책의 기본을 지키면서 옵션과 분산을 늘려주는 것이 필요**하다고 생각합니다.

김 진 우

클래리베이트 애널리스트 지사장

수소경제는 향후 에너지의 패러다임을 바꿀 굉장히 복잡한 기술이 요구됩니다. 특히 수많은 기술들이 관련되어 있고 이것이 혁신(Innovation)과 연결되면 각각의 기술에 따른 무수히 많은 연구 분야들과 이어지기 때문에 '과연 어떤 연구 분야에 집중할지? 어떤 연구분야가 핵심으로 떠오를지?'를 판단하는 것이 가장 중요한 화두라 할 수 있죠. 이때 특정 연구 및 기술의 포트폴리오를 토대로 수소경제를 성공적으로 이끌어 가기 위한 **전체적인 분석을 거치고 틀을 세워 체계적으로 진행**한다면 효율적인 투자와 위험 관리로 이어질 수 있을 거라 생각합니다.

류 석 현

두산중공업 고문

발전용 수소연료전지의 경쟁력을 결정짓는 요소는 크게 효율향상, 원가경쟁력, Product line-up 그리고 납기 단축입니다. 이상의 네 가지를 우리가 어떻게 확보할 수 있느냐에 따라서 대한민국이 수소경제 선도국가로 도약할 수 있느냐 없느냐가 좌우되지 않을까 생각됩니다. 특히 원가경쟁력 부분은 규모의 경제인만큼 정부 차원의 보다 확실한 전략과 의지를 보여주시길 부탁드립니다.

배 중 면

KAIST 산학협력단장

현재 지구상에서 수소를 생산해내는 방법은 두 가지입니다. 휘발유, 경유 등에서 수소를 추출해내는 방식으로 약 80%의 효율을 갖고 있습니다. 그 다음으로 물을 쪼개서 수소를 만들어내는 방식인데 그것은 집어넣는 전기에너지보다 쓰는 수소에너지가 늘 적습니다. 그것이 우리 인류의 열역학적인 운명이 될 것이라 생각합니다.

안 현 실

한국경제신문사 논설위원

이 세상에 제일 어리석은 말이 바로 승자독식입니다. 현실적으로 가능하지도 않고, 승자가 된 순간부터 모든 사람은 다 적으로 바뀌기 때문이죠. **수소경제 부분 역시 한국과 일본이 손을 잡고 일단 시장을 넓히고 난 후에 경쟁**을 할 수도 있는 겁니다. 어떻게 보면 우군처럼, 때로는 경쟁자처럼 파트너처럼 하는 전략이 굉장히 중요하다고 생각합니다. 예를 들어 현대자동차와 도요타가 경쟁은 하겠지만 시장을 키워야 되는 측면에서 보면 파트너거든요. 그런 면에서 조금 통 큰 전략이 필요합니다, 누가 표준을 선점하느냐는 문제는 어쩌면 하나도 중요하지 않을 수 있습니다.

현 영 석

한남대학교 명예교수

수소경제는 에너지는 물론 환경 그리고 산업에 있어 새로운 대안이라 할 수 있습니다. 각 나라마다 기술과 경제, 정책 등이 다르기 때문에 국가별 경쟁 역시 복잡한 양상이 나타나게 될 것으로 전망되는데요. 다른 나라가 잘하는 것을 따라가지 말고 조금 위험하지만 무엇이든 먼저 시작하는 것에 의미를 두었으면 합니다. 오늘날 한국의 이동통신산업과 스마트폰의 리더가 된 것처럼 **수소경제도 결국 하나의 특화된 기술 선택이 큰 성과로 돌아올 것**이라 생각합니다.

홍 성 안

GIST 석좌교수

다소 늦은 감이 있지만 수소경제 진입을 위한 구체적 국가 비전과 실행계획을 제시하며 정부의 확고한 의지를 표명한 것은 다행이라고 생각합니다. 물론 계획 보다 중요한 것이 바로 실행입니다. **정책에서 지속성, 신뢰성이 제일 중요한 만큼 이를 위해 정부 아젠다가 아닌 국가 아젠다로 승화시켜 수소경제법이 제정되었으면 합니다.** 또한 수소경제 정책만을 위한 전담기구와 컨트롤 타워가 필요하다고 생각합니다.

참고문헌

˚산업자원부(2019), 수소경제 활성화 로드맵

˚포스코경영연구원(2019), 수소경제의 경제적 기술적 이슈, POSRI 이슈 리포트

˚에너지경제연구원(2019), 이종민, 미래에너지 수소경제 시대는 오는가

˚한국과학기술한림원·한국과학기술단체총연합회(2019), 수소경제의 도래와 과제

˚오동희·최석환·황시영 외(2019), “수소사회-미래에너지 리포트”, 머니리포트

˚권순우(2019), “수소전기차 시대가 온다”, 가나출판사

˚제레미 리프킨(2003), “수소혁명-석유시대의 종말과 세계경제의 미래”, 민음사

˚김미선(2005), “수소혁명의 시대”, 살림출판사

˚KISTEP(2018), 이선명·김선재, 수소전기차, 기술동향브리프, 2018-2호

˚STEPI(2018), 용홍택, 사람 중심의 R&D 정책방향, 과학기술정책, 2017-4호

˚KB금융지주경영연구소(2019), 미세먼지로부터 자유로운 도시, 수소도시의 미래

˚월간수소경제(2019), “수소경제 본격화되나… 물꼬 틀 사업 줄줄이 예약”

차세대리포트

2018 젊은 과학자들을 위한 R&D 정책은 무엇인가(上)
젊은 과학자들을 위한 R&D 정책은 무엇인가(下)
과학자가 되고 싶은 나라를 만드는 방법
영아카데미, 한국 과학의 더 나은 미래를 위한 엔진
10년 후 더 건강한 한국인을 위해 필요한 과학기술은 무엇인가?

2019 머신러닝, 인간처럼 보고 생각하고 예측하라

한국과학기술한림원은,

과학기술 분야 한국을 대표하는 석학단체로서 1994년 설립되었습니다. 1,000여 명의 각 분야 연구리더들이 한림원의 회원이며, 각자의 역량과 지혜를 결집하여 기초 과학진흥을 위해 뛰고 있습니다. 국회와 정부 등 국가정책기관에 전문가 의견을 제시하고, 과학기술 분야 국제교류와 민간외교 활성화를 위해 노력 중이며, 국민들에게 한 발 더 다가가는 기관이 되기 위해 고민하고 있습니다.

한림석학정책연구는,

우리나라의 중장기적인 과학기술정책과 주요 현안에 대해 한림원 회원들이 직접 참여하는 연구 프로젝트로서 각 분야 전문가들의 지식과 의견을 담고 있습니다. 주제 및 보고서의 특징에 따라 한림연구보고서(중·장기 비전 마련을 위한 정책연구 보고서), 차세대리포트(차세대회원들의 의견과 아이디어를 담은 정책제안서) 등으로 다채롭게 발간하고 있으며, 국회, 정부 등 정책 수요자들에게 꼭 필요한 지식을 제공하기 위해 꾸준히 노력하고 있습니다.

한림원에 대해 더 자세한 내용보기

홈페이지
www.kast.or.kr

블로그
kast.tistory.com

포스트
post.naver.com/kast1994

페이스북
www.facebook.com/kastnews

이 사업은 복권기금 및 과학기술진흥기금 지원을 통한 사업으로 우리나라의 사회적 가치 증진에 기여하고 있습니다.

KAST 한국과학기술한림원
The Korean Academy of Science and Technology

(13630) 경기도 성남시 분당구 돌마로 42
Tel 031-726-7900 **Fax** 031-726-7909 **E-mail** kast@kast.or.kr

ISSN 2635-716X