



신의 영역에 도전하다

인공 광합성

신재생 에너지와 식량 생산의 가능성

목차	01
01. 문제제기	02
01-1. 에너지 문제	
01-2. 환경 문제	
01-3. 식량 문제	
02. 해결방안	10
02-1. 인공 광합성 소개	
02-2. 인공 광합성 활용	
02-3. 인공 광합성 한계	
02-4. 인공 광합성 국내 현황	
02-5. 인공 광합성의 한계를 극복하기 위해서	
03. 국내탐방	18
03-1 한국수소및신에너지학회	
03-2 한국식량안보연구재단	
03-3 한국화학연구원	
03-4 국내탐방 요약 및 탐방 과제	
04. 해외탐방	27
04-1 UN Headquarters	
04-2 JCAP LBNL	
04-3 Weaver Laboratories	
04-4 Nocera Group	
04-5 해외탐방 요약 및 탐방 과제 해결	
05. 결과분석	42
05-1. 에너지 & 환경 문제를 해결하다	
05-2. 식량 문제를 해결하다	
05-3. 정부에게 요청하다	
05-4. 기업에게 제안하다	
05-5. 시민에게 소개하다	
05-6. 인공 광합성, 어떻게 도입할 것인가?	
05-7. 인공 광합성, 이렇게도 활용할 수 있다!	
05-8. 단계별 발전 전망 및 기대효과	
맺음말	51
참고문헌	52

01. 문제제기

19세기 이후 석유, 석탄, 천연가스 등의 화석연료가 주요 에너지원으로 사용되면서 세계적으로 각종 문제점이 발생하기 시작한다. 한정된 화석연료 자원의 특성상 고갈에 대비하여야 하고, 이를 대체할 에너지의 개발이 필요하다. 화석연료의 사용은 지구온난화, 대기오염, 수질오염, 토양오염 등의 환경적 문제를 동반한다. 지구의 자연적 재생 범위를 초과한 환경 문제는 세계적인 기후 변동을 유발하고, 농작물의 생산에도 부정적 영향을 끼친다. 세계 전체 인구는 지속적으로 증가하는 반면, 농작물 생산량은 감소하기 때문에 식량 문제 또한 대두되고 있다.

01-1. 에너지 문제

01-2. 환경 문제

01-3. 식량 문제





전 세계적 화석연료 의존량은 85% 이상?!

19세기 이후 석탄을 에너지로 사용함으로써 산업혁명이 일어나게 되었고, 그 뒤 석유와 천연가스가 발굴되어 화석연료의 사용량이 급격히 증가했다. 20세기 초까지 인류의 중요 에너지 자원은 석탄이었으나 곧 석유와 천연가스에 의한 유체 에너지로 대체되었다. 고체 연료인 석탄에 비하여 사용이 편리하고, 폐기물 처리가 쉬우며 생산기술의 발달로 가격이 낮아졌기 때문이다. 이와 같은 **화석연료는 현재도 세계적으로 총 에너지 의존량의 85% 이상을 차지하고 있으며, 일부는 앞으로도 더욱 증가할 것으로 예상된다.**

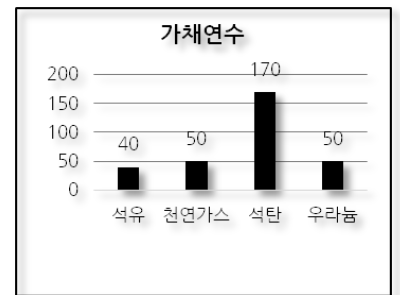
화석연료의 고갈에 대비하여야 한다.

현재 인류가 직면하고 있는 가장 큰 문제 중 하나는 에너지 자원의 한계성이다. 세계적으로 가장 많이 쓰이는 에너지 자원은 화석연료이다. 화석연료는 만들어지는 속도에 비해 10만 배 이상이나 **빠른 속도로 고갈되고 있으며**, 석유 자원의 경우 이미 그 정점을 지나가고 있다고 여겨진다. 우측의 도표로 보아 석유의 경우 약 40년 뒤에 고갈될 것을 알 수 있다.

대한민국의 높은 해외 에너지 의존도

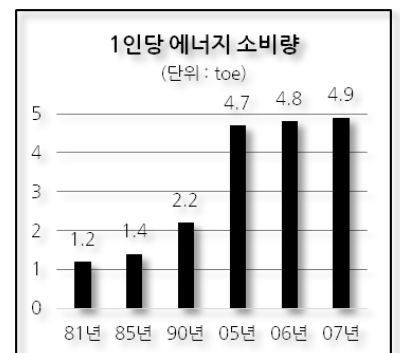
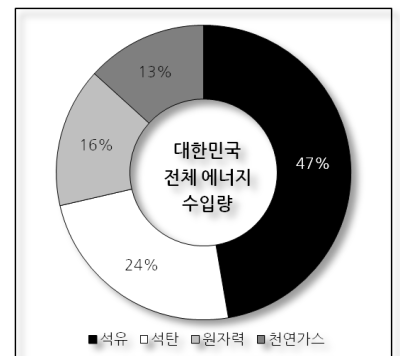
대한민국은 대부분(96.9%)의 에너지를 수입하여 충당하고 있다. 석탄이나 수력과 같은 에너지가 국내에서 생산되기는 하지만, 이는 전체 에너지 공급량의 3.1% 정도에 지나지 않을 정도로 극히 미미하다. 이처럼 에너지 자립도가 낮은 경우 경제적 혼란을 야기할 수 있다. 대표적인 예로는 석유파동(Oil Shock)이 있다.

갈수록 높아지는 대한민국의 1인당 에너지 소비량에 따라 미래에는 더 많은 에너지 자원이 필요할 것으로 예측된다. 이러한 상황에 대비하여 석유 에너지가 아닌 **새로운 에너지를 도입해야 한다.** 대한민국의 전체 에너지 수입량을 보면 석유, 석탄, 천연가스 등의 화석연료가 대부분인 것을 확인할 수 있다. 높은 해외 에너지 의존도도 문제점이지만, 수입 에너지의 대부분이 화석연료라는 것은 더 큰 문제점이 될 수 있다.



가채연수

해당 자원을 얼마 동안 채굴할 수 있는가를 알려주는 지표



대한민국은 현재 화석연료를 대체하기 위해 다양한 에너지를 개발 및 사용하고 있다. 대체 에너지로는 주로 원자력, 바이오, 태양광, 풍력, 조력 에너지 등이 사용되고 있지만, 여러 문제점으로 인해 화석연료를 완전히 대체하기는 쉽지 않다.



원자력 에너지

문제점 1 : 과도한 이산화탄소 배출량

원자력 에너지의 이산화탄소 배출량은 1kWh 당 66g으로써, 다른 대체 에너지와 비교했을 때보다 많이 배출된다.

문제점 2 : 핵폐기물 관리의 우려

원자력 발전은 다른 에너지원과 달리 방사능 물질이 발생한다. 고준위 방사성 폐기물의 처분과 안전한 관리에 필요한 시간이 최소 1만 년 이상으로 자연에 엄청난 부담을 가한다.



국토가 작고, 인구 및 각종 시설이 밀집해 있는 대한민국에서 원자력 사고는 매우 치명적이다.

문제점 3 : 방사능 유출의 위험성

체르노빌·후쿠시마 원전 사고와 같은 대형 사고들이 발생하는 등 방사능 유출의 위험성이 존재한다. 인체에 방사능 물질이 유입될 시 극소량에도 암과 유전자 변이를 일으킨다.



바이오 에너지

문제점 1 : 대한민국에는 부적합한 에너지

생명체를 생산할 수 있는 넓은 영역의 공간과 적합한 기후가 필요하다. 미국, 브라질 등 제한된 국가에서만 현실성이 있다.

문제점 2 : 효율의 문제

바이오 에너지는 효율이 떨어진다. 바이오 에탄올을 생산하기 위해서는 많은 양의 옥수수가 필요한데, 국산 중형차 한 대의 연료통을 채우려면 옥수수가 약 200kg이 필요하다.



옥수수

바이오 연료의 주 재료로 가장 많이 사용된다.

문제점 3 : 식량 가격 폭등의 우려

바이오 에너지는 생명체의 수집 및 성장을 위한 비료 등의 원료를 필요로 한다. 그 결과 화석연료에 비해 지나치게 비싼 가격을 형성하며 인류의 식량자원 생산에 영향을 주어 식량 가격을 상승시키는 문제점을 가진다. 가장 큰 타격을 받는 곳은 주요 식량 보유량이 적은 빈곤국가가 될 것이다.



태양광 에너지

문제점 1 : 기후 조건에 따라 변동되는 효율

날씨의 영향과 일사량에 따라 전력 공급이 크게 영향을 받는다. 일정한 전력을 공급하기 위해서 추가 장치가 필요하다.

문제점 2 : 값비싼 초기 설치비용

태양전지의 가격이 비싸기 때문에 초기 투자 비용이 많이 요구된다.



풍력 에너지

문제점 1 : 설치 구역의 제한성

풍력 발전은 에너지 밀도가 낮아 바람이 없으면 발전을 할 수 없으므로 특별한 지점에만 설치가 가능하다.

문제점 2 : 별도의 저장 장치 필요

풍력의 특성상 지속적인 발전이 불가능하기 때문에 별도의 저장 장치가 설치가 필요하다.



조력 에너지

문제점 1 : 해수 조건에 따라 변동되는 효율

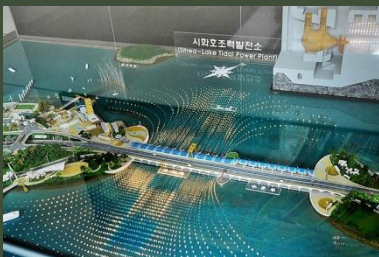
조력 에너지는 해수면의 낙차가 없는 밀물과 썰물의 중간 시기에 가동이 중단된다.

문제점 2 : 생태계 파괴 가능성

갯벌을 잠식하기 때문에 생태계 파괴가 우려된다.

문제점 3 : 설치 구역의 제한성

해수면의 낙차가 큰 곳에서 효율이 높기 때문에 발전소의 위치를 선정하기가 까다롭다.



시하호 조력 발전소

기존의 대체 에너지로 제시되고 있는 원자력, 바이오, 태양광, 풍력, 수력 등의 에너지는 위와 같은 치명적인 문제점으로 인해 화석연료를 대체하지 못하고, 주요 에너지원으로 사용하지 못하고 있다. **미래의 주요 에너지원이 되기 위해서는 높은 효율을 가져야 하고, 환경 오염을 유발하는 부산물이 존재하면 안되며, 언제 어디서나 사용 가능하도록 높은 접근성을 필요로 한다.** 현재 세계는 이러한 조건을 모두 갖춘 에너지의 개발이 필요한 상황에 놓여있다.

19세기 이후 전 세계적으로 화석연료 사용량이 증가하였고, 이에 따라 지구온난화, 대기오염, 수질오염, 토양오염 등 다양한 환경 문제가 발생하고 있다. 환경 문제는 한 국가만의 문제가 아니므로, 세계 차원에서 해결책이 제시되어야 한다.



지구온난화



대기오염



토양오염

지구온난화

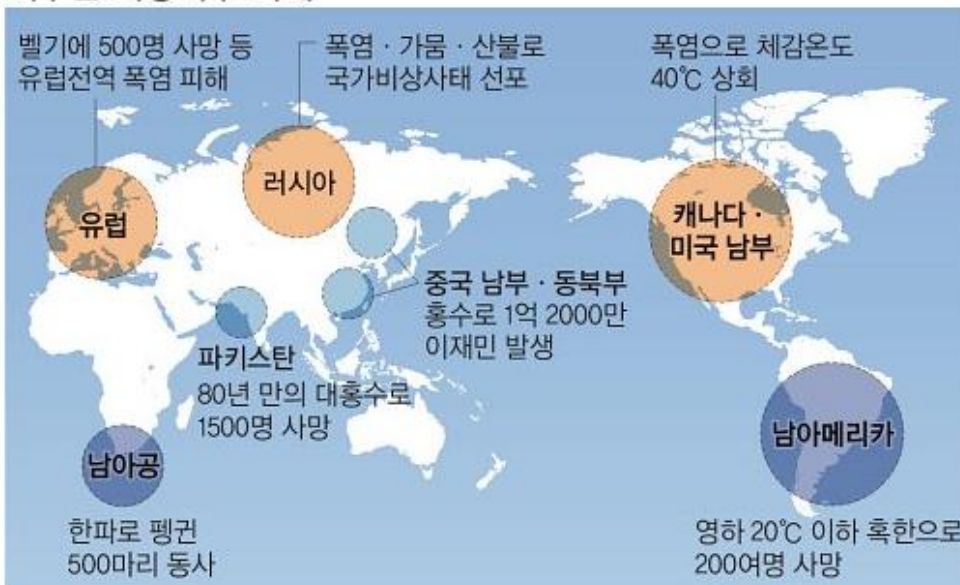
지구온난화는 지구의 표면의 평균 온도가 상승하는 현상이다. 지구의 연평균 기온이 지속적으로 상승함에 따라 땅이나 바다에 들어있는 각종 기체가 대기 중에 더욱 많이 유출된다. 지구온난화에 의해 대기 중 수증기량이 증가하면서 평균 강수량이 증가하며, 이는 **홍수나 가뭄으로 이어질 수 있다**. 기온의 상승으로 인해 남북극의 빙하가 녹으며, 이는 **해수면 상승에 기인한다**. 이는 섬이나 해안에 거주하는 사람들의 생활에 큰 영향을 미치며, 도시 침수 등을 야기한다.



투발루

투발루 정부는 2001년 국토 포기를 선언하였다. 그 이유는 지구온난화로 인한 해수면 상승으로 국토가 사라지고 있기 때문이다. 이로 인해 수몰의 위험에 처한 수많은 환경 난민들이 발생하였다.

지구촌 이상기후 피해



지구온난화에 의한 이상기후 피해

지구온난화로 인한 기후변화는 전 세계적으로 강수량을 증가시켰지만 한편으로 강수 패턴을 변화시켜 지역별로 큰 차이를 만들어 내고 있다. 이로 인해 지구촌 한쪽에서는 물난리를 겪고 있고, 다른 한쪽은 극심한 가뭄에 시달리고 있다. 이는 사막화 현상으로도 이어지고 있다.

대기오염

대기오염은 인구 증가 및 산업화에 따른 난방 증가, 자동차의 급속한 증가가 주요 원인이다. 또한 **철강이나 금속 제련, 석유정제 사업의 규모가 확장되면서 중금속 등의 유해물질이 다량 발생하고 있다.** 이러한 물질들은 미세먼지 또는 초미세먼지로 인체에 직접적인 영향을 준다. 유독가스 산업체의 생산, 저장, 수송 과정에서 돌발적인 사고로 배출되는 대기오염 물질 또한 존재한다.



대기오염의 심각성

대한민국의 질화물 사망률 가운데 유독 호흡기 질환 사망률만이 증가한 것으로 나타났다. 최근 대한민국에서 심각해지고 있는 미세먼지, 오존 등 대기환경 악화와 관련이 있는 것으로 분석된다.

수질오염

서해안 기름 유출 사고를 비롯한 해안 사고로 총 10234KL 이상의 원유가 바다로 유출되었다. 그 결과로 바닷물이 혼탁해지고 용존 산소량이 줄어들면서 바다 생태계에 큰 혼란을 초래했다.

토양오염

산업 쓰레기와 과도한 비료 및 농약의 사용은 필연적으로 토양오염을 동반한다. 토양에 유입된 오염원은 토양구조를 파괴하고 생물의 생육에 장애를 일으키며, 결국에는 먹이사슬을 통해 체내에 중금속을 축적시켜 인간을 포함한 생명체의 건강에 심각한 영향을 미친다.

지구온난화를 줄이기 위한 국가적 노력

교토의정서

지구온난화 규제 및 방지를 위한 국제 협약인 기후변화협약의 구체적 이행 방안으로, 선진국의 온실가스 감축 목표치를 규정하였다.

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)

기후 변화와 관련된 전 지구적 위험을 평가하고 국제적 대책을 마련하기 위해 세계기상기구(WMO)와 유엔환경계획(UNEP)이 공동으로 설립한 유엔 산하 국제 협의체이다.

수질오염을 줄이기 위한 국가적 노력

수질환경보전법

수질오염을 방지하고 수질 보전을 도모하기 위해 제정한 법률. 수질오염의 측정망을 설치하고 수질 오염도를 측정하여 일정한 구역 안의 사업장에 대하여 배출되는 오염 물질을 총량으로 규제할 수 있다.

대기오염을 줄이기 위한 국가적 노력

대기 환경 관리 시스템

2000년대 초반 당시 미세먼지와 이산화질소 등이 대기오염의 원인으로 꼽혀, 각종 수치를 절반으로 줄이기 위해 실시하였다.

다양한 정책 실시

정부에서는 수송, 발전, 산업, 생활 영역에서 국내 대기오염 배출원의 집중 감축, 미세먼지와 CO2를 함께 줄이는 신산업 육성, 주변국과의 환경 협력 미세먼지 예비 경보체계 혁신 등의 대책을 펼치고 있다.

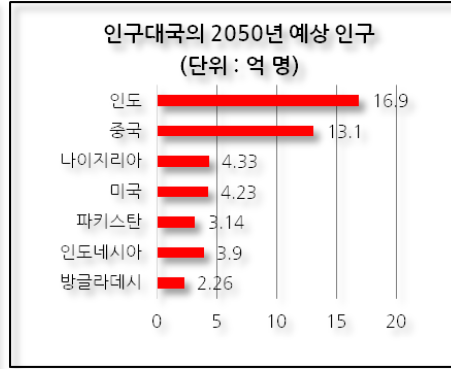
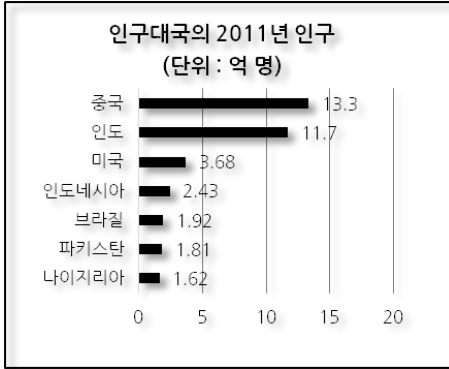
토양오염을 줄이기 위한 국가적 노력

토양, 지하수 오염원 인벤토리 및 토양오염 평가 기반 구축 사업

토양, 지하수의 잠재 오염원에 대한 자료수집과 데이터베이스화, 국토배경 오염지도 제작, 우선 관리지역 평가 및 토양 환경정보 통합 관리를 추진하고 있다. 이를 통해 토양, 지하수 오염의 예방적 관리에 필요한 체계적 토양 환경관리 정책지원 기반을 구축한다.

인구 증가로 인한 식량 문제

세계 인구는 200년 만에 7배 늘어났다. UN은 현재의 인구 증가 추세를 감안하면 2050년의 세계 인구는 약 100억 명에 도달할 것으로 예측하고 있다. 매년 9000만 명의 인구가 증가하고, 이 인구가 살아가기 위해서는 연간 2800만 톤의 곡물을 추가로 생산해야 한다. 즉, **2050년에는 전 세계 인구의 생존을 위해서는 현재보다 약 70%의 농산물을 추가로 생산해야 한다.**



아프리카의 식량 문제

기후 변화로 인한 식량 문제

기후 변화로 인한 기온 상승, 자연재해, 기상 변동, 해수면 상승 등은 농업에 부정적인 영향을 미치고, 이에 따라 식량 생산이 감소할 것으로 예상된다. 기후의 균형과 질서에 따라 농작물을 생산해 온 대부분의 지역은 식물의 적응 능력을 넘어선 기후 변화로 급격한 생산성 감소와 함께 중대한 식량 위기 상황에 직면할 것이다.



미국, 호주, 러시아 등 대규모 농업을 하는 국가에서 가뭄과 홍수가 발생한다. 이로 인해 곡물 생산량이 감소하고 있다.



중국, 인도 등 인구대국을 필두로 세계적인 인구 증가가 예상된다. 이로 인해 2030년경에는 식량이 약 1억 톤이 부족하게 될 것이다.



아프리카와 아시아는 급속한 사막화가 진행되면서 농업 생산에 어려움을 겪고 있다.



2008년 발생한 아이티의 식량 폭동

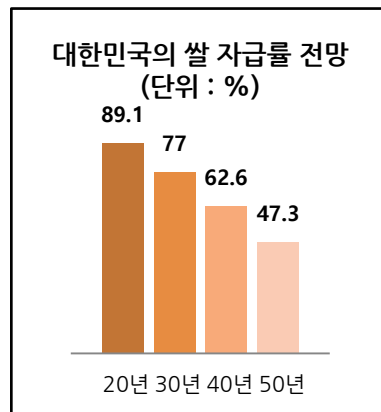
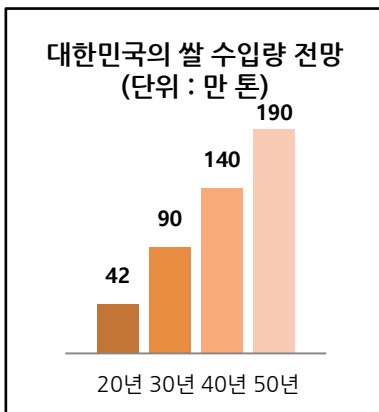
식량 가격이 급등한다면?

기후 변화로 인해 식량 생산량이 감소하고, 인구 증가로 인해 식량 수요량이 증가하면 식량 가격은 상승한다. 이러한 현상이 심해지면 식량 가격이 급등하고, 애그플레이션 현상이 발생할 수 있다. 애그플레이션으로 인해 사회불안과 갈등이 심화되고 최악의 경우 폭동이나 전쟁이 일어날 수 있다.

세계 전체 인구 10명 중 1명은 굶주림과 싸우고 있다.

UN의 통계에 따르면, 만성적인 영양부족 상태에 놓인 사람들은 세계 전체 인구의 약 11%에 해당하는 8억 1500만 명으로 집계되었다. 기아에 시달리는 인구는 대륙 별로 아시아가 5억 2천만 명, 아프리카 2억 4300만 명, 중남미 4250만 명으로 나타났다.

식량 안보 상황은 동남아시아, 서아시아, 사하라 사막 이남의 아프리카 지역에서 눈에 띄게 악화되었다. 이 지역에서는 기후 변화와 연관된 가뭄, 홍수 또는 분쟁 등이 원인으로 작용하였다.



대한민국은 식량 문제에 대해 안전한가?

한국농촌경제연구원에 따르면 지구온난화가 현재 속도로 진행된다면 **대한민국의 쌀 자급률은 2010년 기준으로 47.3%까지 급락할 것으로 예측하고 있다.** 반면에 쌀 수입량은 2050년 예상 190만 톤으로 지금보다 4배 이상 증가한다고 한다. 쌀 자급률이 감소하는 상황이 지속된다면 대한민국은 더 이상 식량의 안전지대가 아닐 것이다.

애그플레이션(Agflation)

농업(agriculture)과 인플레이션(inflation)의 합성어로 농산물 가격 급등으로 일반 물가가 상승하는 현상을 말한다. 2007~2008년 식량 파동 당시 방글라데시 등 12개국에서 폭동이 발생하며 애그플레이션 현상이 발생했다.



한국농촌경제연구원

대한민국 농림경제 및 농촌사회를 종합적으로 조사, 연구하여 농업·농촌 정책수립 방향을 제시한다.

02. 해결방안

앞서 언급한 에너지, 환경, 식량 문제를 해결하기 위해서 그리닝팀은 인공 광합성 기술을 도입한다.
자연의 힘은 인간이 생각했던 것 이상으로 강력하다. 식물에서의 광합성 또한 그러하다.
그리닝팀은 인공 광합성 기술을 탐구하면서 다시 한 번 자연의 위대함을 느낀다.

02-1. 인공 광합성 소개

02-2. 인공 광합성 활용

02-3. 인공 광합성 한계

02-4. 인공 광합성 국내 현황





자원 고갈



환경 오염



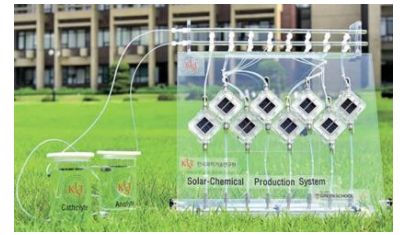
식량 부족

이 모든 문제를 한 번에 해결하는 방법



인공 광합성

(Artificial Photosynthesis)



인공 광합성 디바이스 시스템
KIST청정에너지연구센터가 2017년 7월에 개발하였다.

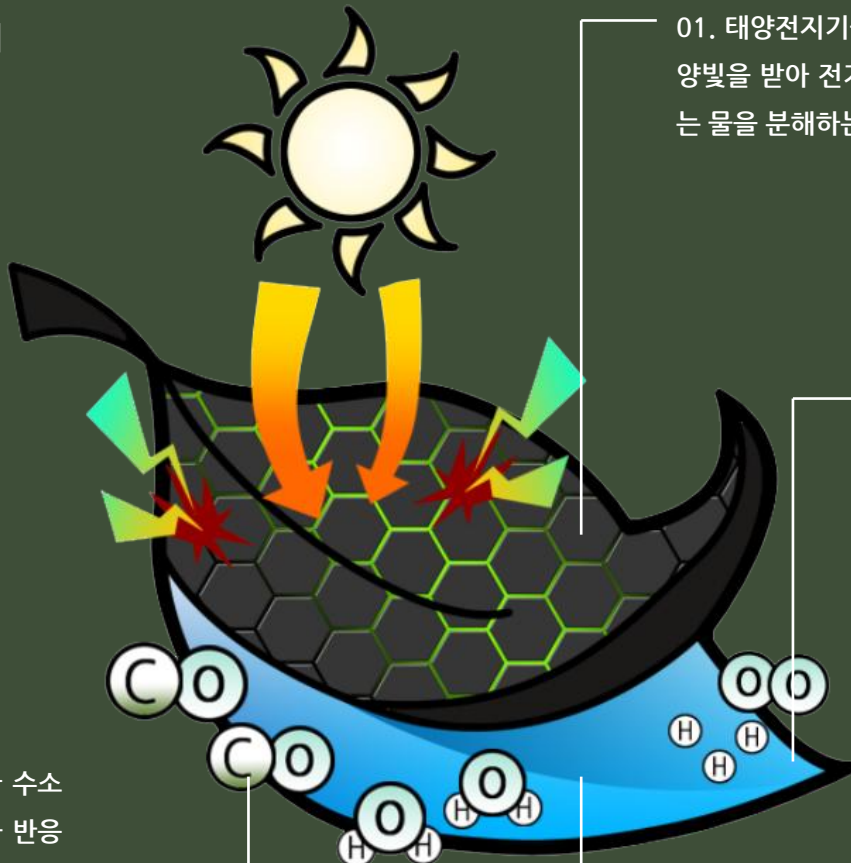
인공 광합성(Artificial Photosynthesis)이란?

식물에서 발생하는 자연 광합성을 모방한 기술로 태양광, 물, 이산화탄소를 이용하여 수소, 메탄올과 같은 화학연료 또는 고부가 가치의 유기합성 물질을 생산할 수 있다. 막대한 에너지를 지닌 태양을 에너지원으로 사용하기 때문에 적합한 기상 조건에서는 인위적으로 에너지를 공급할 필요가 없어 친환경 신기술로 각광받고 있다.



Daniel Nocera 교수
2008년, 세계 최초로 인공 잎 개발에 성공하였다.

인공 광합성의 원리



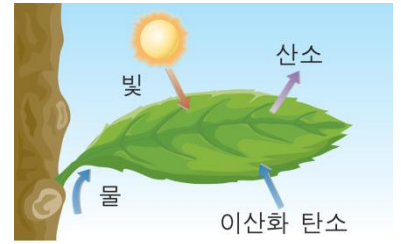
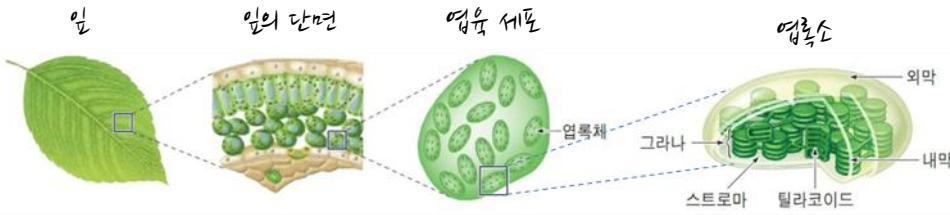
01. 태양전지기술을 이용한 판은 태양빛을 받아 전기를 만든다. 이 전기는 물을 분해하는 데 사용된다.

02. 물에 전기를 가해 분해한다. 분해된 물은 산소 분자와 수소 이온으로 나누어진다. 산소는 산업용으로 사용할 수 있다.

03. 수소 이온만 통과할 수 있는 투과막을 설치한다. 이를 통해 수소 이온을 걸러낸다.

04. 투과막을 통과한 수소 이온이 이산화탄소와 반응하여 물(H₂O)과 일산화탄소(CO)로 합성된다. 여기서 물을 인공 광합성을 하는데 쓰이며, 일산화탄소는 화학원료로 사용한다.

자연 광합성에서 일어나는 화학 작용?



자연 광합성

자연 광합성의 과정을 간단히 나타낸 그림으로 태양광, 물, 이산화탄소를 이용하여 산소를 배출한다.

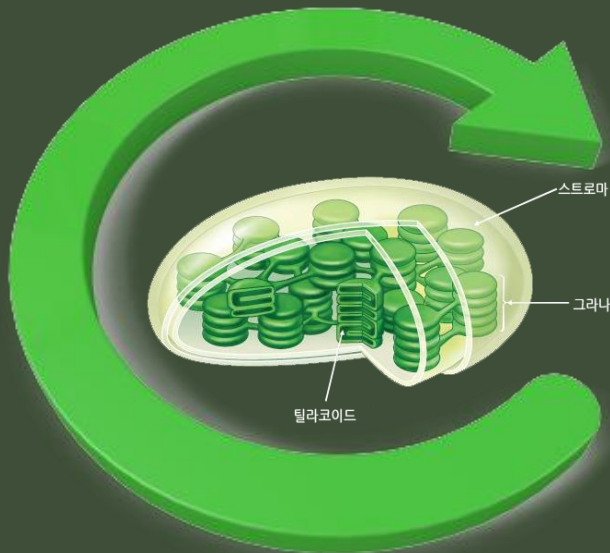


자연 광합성은 녹색 식물의 엽록소에서 태양광, 물(H₂O), 이산화탄소(CO₂)를 이용하여 녹말 등의 유기 화합물을 합성하는 과정으로, 명반응과 암반응 두 단계로 구성되어 있다.

명반응

식물의 엽록소는 태양광을 받으면 명반응을 통해 물을 분해하여 전자를 방출한다. 이 전자는 전자 전달계를 거치며 연쇄적으로 화학반응을 일으키면서 환원 에너지(ATP, NADPH)를 생산한다. 이 과정에서 산소와 수소 이온이 함께 만들어진다.

▶ 틸라코이드에서 발생



암반응

암반응은 햇빛이 없는 밤에 낮에 생산했던 에너지를 이용하여 이산화탄소를 포도당으로 만드는 과정을 말한다. 명반응에서 만들어진 화학 에너지를 이용해 이산화탄소를 환원시켜 포도당(탄수화물)을 생산한다.

▶ 스트로마에서 발생

자연 광합성

태양빛, 물, 이산화탄소가 필요하다.
별도의 외부 에너지가 필요하지 않다.
생성물로 산소가 배출된다.
환경친화적이다.

인공 광합성

생성물 : 포도당
발생지 : 엽록소
효율 : 1%

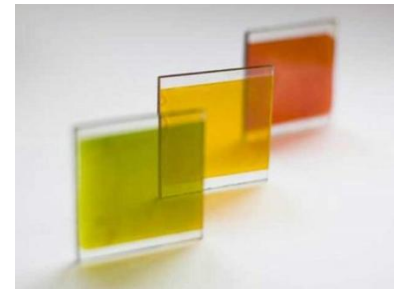
생성물: 전자, 이산화탄소, 수소, 메탄올 연료 등 다양한 무기 유기 화합물
발생지 : 태양전지 내부
효율 : 10% 이내 (현재 기술 수준)



현재 인공 광합성 기술은 염료감응 태양전지 분야에서 가장 많이 활용되고 있다. 반응기가 전기화학적 환원과 유사한 구조를 구성하고 있으나, 한 쪽은 광전극으로 불리는 반도체 계열의 물질로 구성되어 있다. 이 광전극은 외부에서 조사된 빛을 흡수하여 전자와 정공을 생성하며, 이때 생성된 전하에 의해 환원 반응이 발생한다. 물 분해의 경우 광촉매 표면에서 산소가 발생하며, 이산화탄소 환원의 경우 일산화탄소가 생성된다.

염료감응 태양전지의 장점

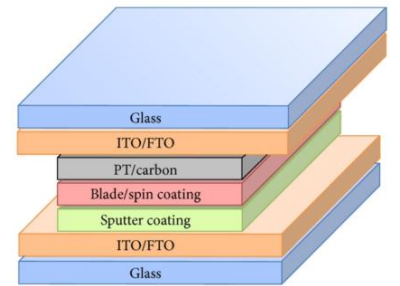
1. 전기화학적 원리에 의해 전기를 생산하므로 에너지 효율이 이론적으로 33%이다.
2. 친환경적이기 때문에 그린 에너지로 가장 적합한 태양 전지이다.
3. 전기를 발생시킬 수 있는 시간 범위가 넓다.
4. 다른 태양전지에 비해 생산 단가가 현저하게 낮다.
5. 건물 곡선 면에도 적용 가능하며 투명하고 색상이 다양해 응용 범위가 넓다.



염료감응 태양전지

(Dye Sensitized Solar Cell, DSSC)

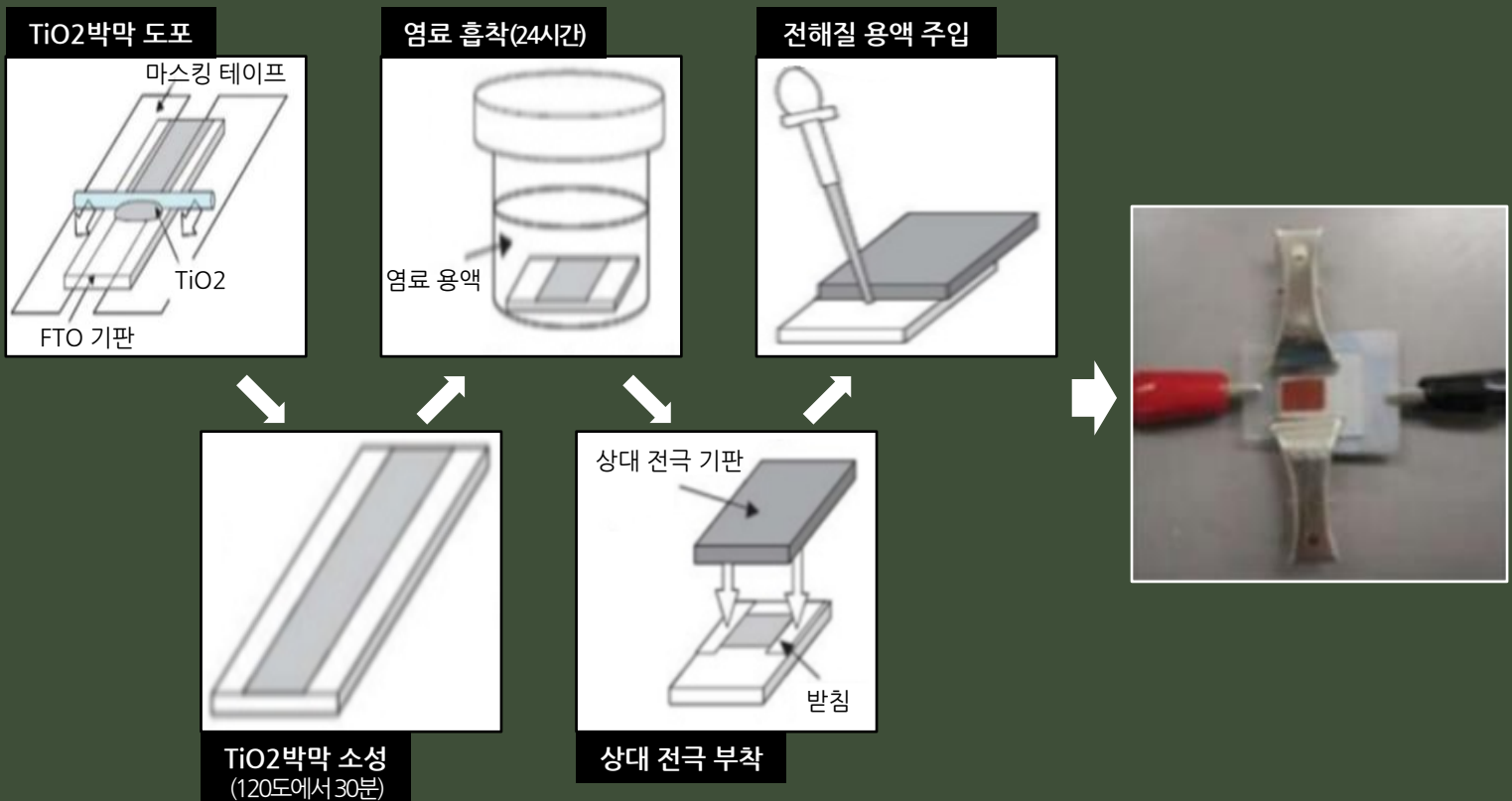
얇은 유리 막 사이에 특수 염료를 넣어 마치 식물이 광합성을 하듯 빛을 흡수해 전기를 생산하는 광감응성 태양전지



염료감응 태양전지의 구조

광촉매 TiO2층과 FTO/ITO, 유리로 덮여져 있다.

염료감응 태양전지 제작 과정



FTO 기판 : 광산란 및 투과 효율성이 뛰어나 최근 태양광 분야에서 활용도가 높아지고 있는 DSSC의 핵심 부품
 소성 : 가열 조작의 일종. 외부에서 열을 가해 탈수, 기타의 분해를 일으켜 휘발 성분을 분리

현재 인공 광합성 기술의 효율은 약 8%로 매우 낮다. 이러한 낮은 효율로 인해 아직 상용화되지 못하고 있다. 인공 광합성 기술이 상용화가 되기 위해서는 효율이 적어도 20%는 되어야 한다.

염료감응 태양전지의 한계

한계 1 : 반도체 소자의 한계

실리콘 태양전지에 비해 전력 생산 효율이 다소 떨어지며, 초기 투자 비용이 높다. 2000년대에 일부 상용화에 성공하였으나, 효율이 낮아 보급화에 어려움을 겪었다.

한계 2 : 염료의 한계

염료감응 태양전지의 광 변환 효율은 재료의 특성에 크게 의존하고 있다. 전체 효율에 가장 많은 영향을 미치는 인자로는 염료를 들 수 있다.

이산화탄소 환원의 어려움

이산화탄소 환원의 경우 생성물끼리 환원 퍼텐셜의 차이가 크지 않아, 광화학적 환원으로는 높은 선택도를 이루기 어렵다. 이와 더불어 흔히 알려진 반도체를 광전극으로 사용하는 경우 가시광선을 제대로 활용하지 못하며, 이에 따라 효율이 저하된다.

광촉매의 한계

광촉매로는 보통 전이금속이 포함된 반도체가 이용되는데, 반응물의 산화환원 퍼텐셜을 만족하면서도 태양광 스펙트럼과 유사한 흡수 스펙트럼을 보이는 반도체가 드물다. 물 분해를 통해 생산된 산소와 수소의 산화환원 퍼텐셜은 각각 0eV과 1.23eV인데, 널리 알려진 반도체 중 이 조건에 부합하는 물질은 존재하지 않는다.

산화환원 퍼텐셜

양전하를 띤 이온이 중성 또는 낮은 양전하 이온으로, 중성 원자가 음전하를 띤 이온으로 환원할 때 나타나는 전위의 저하. 환원 퍼텐셜이 클수록 생성 가능한 물질이 많아진다.

염료감응태양전지용 염료의 상용화 조건

조건 1 : 가시광선과 근적외선 전 영역의 빛을 흡수할 수 있어야 한다.

조건 2 : 금속 산화물의 표면과 견고한 화학결합을 이루고 있어야 한다.

조건 3 : 열 및 광학적 안정성을 지니고 있어야 한다.

광촉매의 상용화 조건

조건 1 : 가격이 저렴해야 한다.

조건 2 : 1만 시간 이상의 수명을 가져야 한다.

조건 3 : 안정성이 보장되어야 한다.

조건 4 : 태양빛을 10% 이상 전환시킬 수 있는 효율을 가져야 한다.

인공 광합성 연구는 크게 세 가지 단계로 세분화된다.

- 1단계 : 태양 에너지를 전기 에너지로 변환하는 과정
- 2단계 : 전기 에너지로 물을 분해해 수소와 산소를 만드는 과정
- 3단계 : 이산화탄소를 환원해 다른 물질로 만드는 과정

대한민국의 인공 광합성 연구 현황

현재 국내 인공 광합성 연구는 자연 광합성의 명반응에 해당하는 물 분해를 통한 수소 연료 생산에 초점을 두고 있다. 이를 위해 광촉매 효율을 향상시키기 위한 연구가 주를 이루고 있다. 아직까지는 이산화탄소를 활용하여 유기물을 합성하는 연구는 부진한 편이다.

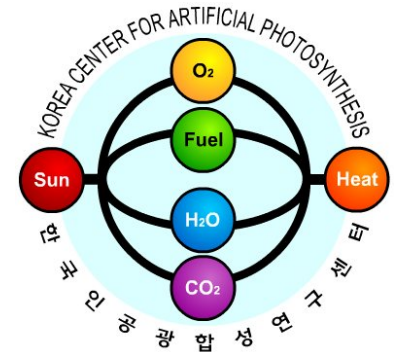
대한민국의 대표 인공 광합성 연구 기관 KCAP

대한민국의 대표적인 인공 광합성 연구센터로 서강대학교에 위치한 KCAP이 있다. KCAP은 2009년 '기후변화대응 기술개발사업' 이란 이름의 국가 R&D 과제의 일환으로 연구를 진행 중이다. KCAP는 사업이 종료되는 2019년까지 인공 광합성을 상용화하기 위한 기반을 완성하고, 2030년 상용화에 기여하는 것이 최종 목표이다. 현재는 태양광 발전으로 얻은 전기를 이용해 물과 이산화탄소에서 메탄올 등 액체연료를 고효율로 생성할 수 있는 원천기술을 개발하는데 몰두하고 있다.



서강대학교

KCAP은 서강대학교의 포스코 프랜차이즈관에 위치해 있다.



KCAP이외에도 서울대학교, 울산과학기술대학교(UNIST), 한국과학기술원(KAIST) 등 다양한 대학 연구팀에서 인공 광합성 효율을 향상시키기 위한 촉매 개발 연구에 집중하고 있다.

2016. 05. 26

[뉴시스] KAIST, 인공광합성 구현 광촉매 개발

2016. 10. 30

[네이버뉴스] 수소·화학연료 생산하는 新나노 광촉매 기술 개발 (울산과학기술원)

2017. 01. 17

[뉴스핌] 숙명여대 최경민 교수팀, 인공 광합성 신소재 촉매 개발

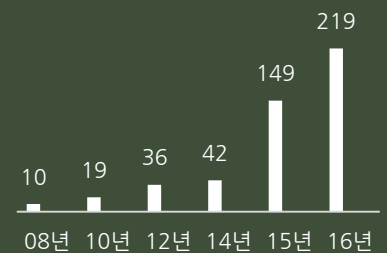
2017. 02. 24

[서울신문] 광합성 원리 모방한 망간 촉매 물질 개발 (서울대학교)

2017. 06. 12

[대학저널] 경북대학교, 값싼 구리로 수소 연료 생산하는 광촉매 기술 개발

인공 광합성 관련 기사



인공 광합성 관련 기사는 10년 전부터 꾸준히 증가하고 있다. 이산화탄소를 재료로 하여 대체 에너지를 생산할 수 있는 만큼 미래에 필수적으로 필요한 기술이기 때문이다.



자원 고갈



환경 오염



식량 부족

인공 광합성은 태양 에너지를 사용하므로 자원이 고갈될 우려가 없다.

인공 광합성은 부산물이 물과 산소인 친환경 기술이다. 환경 오염 유발 물질을 전혀 배출하지 않는다.

인공 광합성 기술로 포도당 생산이 가능하다면, 식량 부족 문제를 해결할 수 있다.

위와 같이 에너지, 환경, 식량 문제를 해결하기 위해서 그리닝팀은 생각했다.

“인공 광합성 기술의 부족한 효율을 향상시키는 방법은?”

“인공 광합성 기술로 포도당을 합성하여 식량을 생산할 수 있을까?”



03. 국내탐방

그리닝팀은 세계적인 에너지 문제와 식량 문제의 심각성을 파악하기 위해 국내의 기관을 탐방한다.

화석 연료에 치중된 에너지 사용을 극복할 수 있는 대안으로 수소 에너지에 주목한다.

수소 에너지는 인공 광합성으로 생산할 수 있는 대표적인 에너지이다.

한국수소및신에너지학회에서 인공 광합성으로 생산한 수소 에너지의 활용 방안을 모색한다.

국내 및 세계 식량 문제의 현황을 확인하기 위해 한국식량안보연구재단에 방문한다.

대한민국은 세계적으로 우수한 인공 광합성 기술을 보유하고 있다.

인공 광합성 기술만을 다루는 그룹이 있는 한국화학연구원에 방문한다.

03-1 한국수소및신에너지학회

03-2 한국식량안보연구재단

03-3 한국화학연구원

03-4 국내탐방 요약 및 탐방 과제





기관 소개

한국수소및신에너지학회는 수소 및 신재생 에너지에 관련된 연구의 결과를 공유하는 것을 목적으로 한다. 세계 최초로 수소 및 연료전지 분야에 특화된 <월간수소경제> 전문 잡지를 출간하는 등 다양한 활동을 추진한다. 최근에는 기후변화 대응을 위한 수소사회구축 사업 기획을 추진하는 등 연구 분야를 더욱 확장하고 있다.

탐방 목적

1. 현재 대한민국 및 세계의 에너지 문제 현황과 그 심각성을 이해한다.
2. 인공 광합성 기술로 생산한 수소 에너지의 운송 및 보관 방법에 대해 알아본다.



한국수소및신에너지학회 고문
(주) 덕양
임희천 연구소장

수소 에너지의 장점과 단점은 무엇입니까?

수소는 지구상에 가장 많이 존재하는 물로부터 제조될 수 있어 자원의 제약이 없고, 연소 생성물이 오직 물인 청정 원료로서의 특징을 가지고 있습니다. 또한, 수소는 직접 연소하거나 연료전지의 연료로 활용하게 되면 전기에너지로 쉽게 전환하여 사용할 수 있습니다. 아울러 수소는 가스나 액체로 만들어 쉽게 수송할 수 있고 다양한 형태와 높은 에너지 밀도를 가진 상태로 저장이 가능합니다.

다만, 수소는 타 에너지원으로부터 얻어지는 2차 에너지원이기 때문에 다른 에너지원이 필수적으로 요구되며, 수소 기체는 보관 시 가연성 성질을 가지고 있기 때문에 주의가 필요합니다.

현재 수소 에너지는 어떻게 생산하고 있습니까?

일반적으로 사용되는 방법은 물, 화석연료, 바이오매스 등으로부터 수소를 생산하는 것입니다. 상용화된 수소 생산기술로는 수전해, 천연가스 수증기 개질, 탄화수소 부분 산화, 석탄가스화 및 부생가스 등이 있습니다. 개발이 진행되고 있는 새로운 기술로는 천연가스 직접 분해 기술, 수증기 분해, 열화학 분해, 광전기 화학 분해, 광생물학 분해, 바이오매스 열분해 등이 있습니다.



월간수소경제

한국수소및신에너지학회에서 수소 및 연료전지 분야에 특화된 전문 잡지를 세계 최초로 출간



임희천 소장님과의 인터뷰

수소 에너지의 응용 범위는 어디까지 확장할 수 있습니까? 기존 화석연료의 영역을 대체할 수 있습니까?

수소 에너지는 기존 화석연료 중심의 에너지 시스템을 큰 충격 없이 흡수할 수 있습니다. 신재생 에너지가 기존의 화석 에너지 시스템을 대체하는 경우, 수소 에너지는 기후 및 계절에 따라 영향을 받는 풍력, 태양 에너지 등과 같이 자연 에너지의 수급 불균형 상태를 가장 경제적으로 조절할 수 있습니다. 이외에도 수소 연료전지 발전기술을 통하여 분산형 전원, 에너지 저장매체, 자동차 동력원 등 그 응용 범위가 매우 넓습니다. 따라서 **수소 에너지는 향후 에너지 시장을 주도할 대표적 에너지로 예측되고 있습니다.**

인공 광합성 기술로 수소를 생산하는 것에 대해서는 어떻게 생각하십니까?

아직 기술 수준이 미약한 수소 생산 부분에서 활용할 수 있을 것 같습니다. 하지만 **현재 인공 광합성 기술의 효율로 보았을 때, 상용화하기에는 힘들 것으로 예상됩니다. 수소 생산의 효율 문제와 비용 문제를 해결할 수 있다면, 수소 생산 기술 부분에서 획기적인 발전을 할 수 있다고 생각합니다.**

미래의 수소 에너지 시장 동향은 어떻습니까?

현재 수소 에너지는 석유화학산업, 반도체 제조공업, 제철공업, 우주항공산업 등 한정된 영역에서만 사용되고 있습니다. 하지만 **미래에는 기존 화석연료 기반의 경제체제에서 수소연료 기반의 경제체제로 전환될 것입니다.** 이 말은 단순한 에너지 시스템의 변화가 아닌 우리 사회의 모든 것이 변화한다는 것을 의미합니다. 이러한 변화를 대비하기 위해 새로운 산업구조를 제시해야 하며, 수소 에너지 기술의 개발과 보급을 위해 많은 관심과 투자가 필요합니다.

현재 대한민국 수소 에너지 시스템에서의 한계는 무엇입니까?

현재 대한민국 수소 에너지 시스템은 에너지 산업 분야에서 산업과 학술적 기반이 취약합니다. 그러나 향후 재생 에너지를 기반으로 하는 저탄소 녹색사회로 접어들 때, 세계적으로 에너지 기술의 우위를 점하기 위해서는 반드시 필요한 기술입니다. 수소 에너지의 기술 선점을 위해서는 실용화 기술이 필요합니다. 실용화 기술의 가장 중요한 부분은 수소, 연료전지 분야에 대한 기술개발입니다. 아직도 **기술 수준이 미약한 수소 생산, 저장에 대한 기반기술을 확보해야 합니다.** 또한 연료전지 분야에서의 산업화 기술, 즉 장수명화 및 신뢰성에 대한 기술 개발에도 적극 투자해야 합니다. 이 밖에도 법 제도 정비, 교육 및 대중의 이해도 향상 또한 필요합니다.

한국수소및신에너지협회 요약

- ✓ 대한민국은 현재 광범위한 수소 에너지의 응용 범위에 비해 한정된 영역만 사용하고 있다. 수소연료 기반 경제체제 전환을 위해 향상된 기술 개발이 필요하다.
- ✓ 인공 광합성 기술로 수소 연료를 생산하는 것이 상용화된다면, 수소 생산 기술 부분에서 획기적인 발전을 이룰 것이다.



기관 소개

세계적인 기후변화와 바이오 연료 생산 등으로 세계의 곡물 수요가 생산량을 훨씬 초과하여 평균 재고량이 30%에서 15% 이하로 바닥을 드러내고 있다. 2007년 곡물 파동은 급격한 곡물 가격의 상승을 초래하였으며, 이로 인해 일부 국가에서는 정권이 무너지는 현상 또한 나타났다. 이러한 세계적인 식량 대란 속에서 대한민국은 무풍지대로 식량의 부족을 모르고 살고 있다. 한국식량안보연구재단에서는 대한민국의 시민에게 식량 안보에 대해 인식시키고, 식량 문제를 개선시키는 노력을 하고 있다.

탐방 목적

1. 현재 대한민국 및 세계의 식량 문제 현황과 그 심각성을 이해한다.
2. 인공 광합성 기술이 식량 문제를 어떻게 해결할 수 있을지 확인한다.
3. 신기술을 적용하여 생산된 식량에 대한 소비자의 인식을 파악한다.

한국 곡물 및 식량자급률 추이 (단위: %)

- 곡물자급률: 사료용을 포함한 국내 농산물 소비량 대비 국내 생산량 비율
- 식량자급률: 사료용을 제외한 국내 농산물 소비량 대비 국내 생산량 비율



국내 및 세계의 식량 문제 원인은 무엇입니까?

식량 문제의 원인은 크게 3가지가 있습니다. 첫 번째는 **지구온난화로 인한 기상 이변으로 농업 생산량과 농경지가 감소하기 때문**입니다. 두 번째로 **신흥 중진국(중국, 인도 등)이 경제 성장을 하면서 육류의 수요가 증가하고 있기 때문**입니다. 고기 100g을 만들기 위해 곡물이 약 7배 정도 필요합니다. 세 번째는 **바이오 연료 생산을 위해 식량자원을 사용하기 때문**입니다. 2008년 바이오 연료를 생산하기 위해서 막대한 양의 곡물을 사용한 결과 세계적인 곡물 파동이 발생하였습니다.

현재 대한민국 식량안보 상황은 어떻습니까?

현재 대한민국의 농업 부분이 식량자급률에 차지하는 부분은 50% 미만입니다. 나머지 50%는 수입에 의존하고 있습니다. 곡물자급률이 50~60% 정도는 되어야 국가가 식량 부분에서 안정을 취할 수 있습니다. 따라서 **곡물자급률이 25%인 대한민국의 식량 안보는 현재 불안정한 상황**입니다.



한국식량안보연구재단
이철호 이사장

국내 및 세계의 식량 문제를 해결할 수 있는 방법은 무엇입니까?

현재 가장 가능성 있는 해답은 GMO(Genetically Modified Organism)라고 생각합니다. GMO란 유전자 변형 농산물로서 일반적으로 생산량 증대 또는 유통 및 가공 상의 편의를 위하여 유전공학 기술을 이용, 기존의 육종방법으로는 나타낼 수 없는 형질이나 유전자를 지니도록 개발된 농산물을 말합니다. 제초제의 내성을 가진 콩과 해충 저항성을 가진 옥수수를 개발하여 전 세계적으로 재배하고 있습니다. 그리고 지구온난화로 인한 해수면 상승에 대비하여 염분을 견딜 수 있는 작물들 또한 개발하고 있습니다. GMO 기술을 통해서 21세기의 식량난을 해결할 수 있습니다.

GMO에 대한 소비자들의 인식은 어떻습니까?

현재 GMO에 대한 소비자들의 부정적인 인식이 강합니다. 이러한 이유는 유기농 식품업체와 그린피스와 같은 시민단체가 GMO에 대한 근거 없는 비판을 하기 때문입니다. 따라서 GMO에 대한 소비자의 인식을 개선하는 것이 우선적이라고 생각합니다.

저희는 인공 광합성 기술로 식량 문제를 해결할 수 있다고 생각합니다.

이에 대해서 어떻게 생각하십니까?

“인공 광합성으로 포도당을 합성”이라는 말은 무기물을 유기물로 만든다는 말이군요. 정말로 흥미로운 주제이지만 문제점이 있다고 생각합니다. 생명공학 기술로 이미 광합성 효율을 향상시킨 작물들이 생산되고 있습니다. 이러한 작물들과 비교했을 때 **효율이라는 측면에서 경제성이 떨어진다고 생각합니다.** 그리고 무엇보다 소비자의 수용성이 중요하다고 생각합니다. 생명공학 기술로 만들어낸 GMO 작물들은 소비자들에게 많은 거부감을 가지고 있습니다. 인공 광합성 기술로 식량을 생산하는 기술 또한 GMO와 비슷한 문제를 가질 것이라 생각합니다. 즉, **인공으로 합성해서 만들어낸 식량 또한 소비자들의 인식은 부정적일 것입니다.** 이러한 경제적 효율 문제와 소비자 인식 문제를 먼저 해결해야 한다고 생각합니다.



이철호 이사장님과의 인터뷰

한국식량안보연구재단 요약

- ✓ 현재 대한민국의 식량 안보는 불안정하다. 곡물 파동이 일어날 경우 엄청난 피해가 발생할 수 있기 때문에 식량 자급률을 높이는 것은 필수적이다.
- ✓ 인공 광합성 기술로 식량 생산의 경제성을 이끌어내기 위해서는 효율이 중요하다.
- ✓ 소비자들은 생명공학 기술로 만들어진 GMO식품에 대해 부정적인 인식을 가지고 있다. 인공 광합성 기술로 생산된 식량도 예외는 아닐 수 있다. 소비자 인식 문제가 먼저 해결되어야 한다.



KRICT 한국화학연구원

기관 소개

한국화학연구원에는 인공 광합성 기술을 집중적으로 연구하는 인공광합성연구그룹이 존재한다. 태양광 에너지를 이용하여 온실가스를 화학제품으로 전환시키는 인공 광합성 기술을 개발하고, 광촉매와 생촉매가 융합된 고부가 화학제품을 선택적으로 제조하는 태양광 화학 발전소를 설립한다. 또한 태양광 수소 제조 기술에도 집중하고 있으며, 광촉매를 이용하여 청정 수소 에너지를 생산하고, 여기에 사용되는 고효율 광촉매 소재 개발도 진행 중이다.

탐방 목적

1. 현재 한국화학연구원에서 집중하는 인공 광합성 연구 기술을 알아본다.
2. 인공 광합성 기술의 전반적인 국내 및 세계 현황을 확인한다.
3. 대한민국 인공 광합성 기술의 한계와 극복 가능성을 확인한다.
4. 인공 광합성 기술을 이용한 식량 생산의 가능성을 확인한다.



한국화학연구원
인공광합성연구그룹
김재영 선임연구원

인공 광합성에 대한 한국화학연구원의 정의는 무엇입니까?

인공 광합성은 태양빛, 물, 이산화탄소를 이용하여 화합물을 만들고 활용하는 기술입니다. 현재 기술력으로는 외부에서 전기 에너지를 가해야 인공 광합성이 이루어집니다. 하지만 궁극적으로 전기 에너지 없이 모든 과정을 완료하는 것이 목표입니다.

현재 인공 광합성 기술의 한계는 무엇이며, 이를 극복하기 위해선 어떻게 해야 합니까?

현재 인공 광합성 기술은 효율이 낮아 상용화하기 어렵습니다. 낮은 효율을 극복하기 위해서 전기화학적 에너지를 사용하고 있습니다. 그리고 **인공 광합성의 광화학 반응을 촉진시켜 효율을 높이기 위해 광촉매를 사용합니다.** TiO₂를 사용한 광촉매가 효율이 높지만 아직 상용화할 수 있는 수준은 아닙니다.

인공 광합성에서 광촉매의 역할

광촉매는 물을 분해하거나 이산화탄소를 환원하는 과정에 필요하다. 특히 이산화탄소를 환원 시킬 때 에너지가 많이 필요하기 때문에, 에너지 사용을 최소화하기 위해서는 효율이 뛰어난 광촉매가 필요하다.

TiO₂를 사용한 광촉매를 상용화하기 위해서는 어떻게 해야 하나요?

TiO₂의 단점은 태양광의 일부분인 자외선만 이용할 수 있다는 것입니다. 태양광의 대부분을 차지하는 가시광선을 이용할 수 있는 새로운 물질을 찾아야 합니다. 현재는 태양광의 가시광선까지 이용할 수 있는 물질인 BIVO₄가 가장 적합한 광촉매라고 생각합니다. 물질을 개발하는 부분은 이미 포화상태이기 때문에 더 좋은 물질을 발견 또는 개발하기는 쉽지 않을 것이라 생각합니다. 따라서 BIVO₄를 사용한 광촉매를 발전시키거나 다른 시스템을 연구하는 것이 효율적입니다.

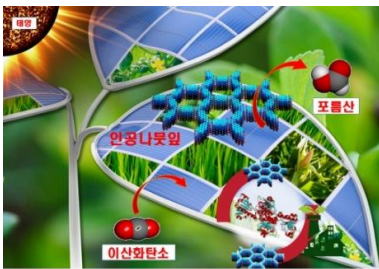
인공 광합성 기술의 상용화까지는 얼마나 걸릴 것으로 예상하십니까?

현재 인공 광합성 연구는 각각의 구성 요소에 대한 연구가 별개로 진행될 뿐, 아직 전체적인 시스템 연구는 손을 대지 못하고 있는 상황입니다. 그렇기 때문에 인공 광합성 시스템 전체를 상용화하기 위해서는 최소 20~30년은 더 걸릴 것으로 예상하고 있습니다. 그러나 인공광합성이 상용화되어 태양광 발전과 함께 적용된다면 태양 에너지를 훨씬 효율적으로 이용할 수 있습니다. 빛으로 움직이는 화학 발전소, 물에서 생산하는 화학 연료, 태양이 있는 한 무한히 얻을 수 있는 전력까지. 인공 광합성은 여러 분야에서 활약할 수 있을 것으로 기대하고 있습니다.

인공 광합성은 물을 분해시켜 수소를 얻을 수 있습니다. 하지만 자연 광합성은 이산화탄소를 환원 시켜서 포도당을 생산합니다. 이처럼 인공 광합성 기술로 무기물을 유기물로 만드는 과정을 현실적으로 가능한지 알고 싶습니다. 그리고 만약에 가능하다면 현재 기술력은 어느 정도이며, 식량 생산까지 확장할 수 있을지 궁금합니다.

인공 광합성은 단순히 물을 분해해서 수소를 얻는 과정이 아니라 태양빛과 물, 이산화탄소를 이용해서 무언가를 만들어내는 모든 과정을 통칭합니다. 그리고 요즘 인공 광합성에서는 수소를 생성하는 과정을 제외하는 추세입니다.

무기물을 유기물로 만드는 과정은 충분히 가능하기 때문에 식량 생산은 가능합니다. 현재 한국화학연구원에서는 포름산, 메탄올 계열의 액체 연료를 생산하는 것에 초점을 맞추고 있습니다. 대부분의 연구소에서 탄소가 하나인 물질은 생산이 가능합니다. 하지만 탄소 6개가 결합되어 있는 포도당은 현재의 기술력으로 어렵다고 생각합니다.



포름산 생산이 가능한 인공 광합성 기술 모식도

인공 광합성 기술로 포도당 등의 유기 화합물을 만드는 분야에 대한 연구 성과를 접해본 적이 있으신가요?

현재 인공 광합성 연구는 포름산으로부터 출발해서 1단계 생산물이 에탄올을 생성에 연구를 하고 있습니다. 즉, 인공 광합성 기술로 포도당을 생산하는 기술을 접해본 적이 없습니다. 인공 광합성을 이용하는 것은 아니지만, 에탄올, 메탄올 등을 포도당으로 변환하는 연구는 이미 존재하고 있습니다.



김재영 선임연구원님과과의 인터뷰



오바마 전 대통령의 국정연설

미국의 오바마 전 대통령은 2011년 국정연설 당시, 인공 광합성 연구를 “우리 시대의 아폴로 프로젝트”라 언급하며 그 중요성을 강조했다.

미국과 비교해 보았을 때, 정책적인 관점에서 대한민국의 인공 광합성 연구의 어려움은 무엇이라고 생각하십니까?

대한민국의 인공 광합성 연구를 미국과 비교해보았을 때, 기술적으로 부족한 부분은 없다고 생각합니다. 하지만 정책 부분에서는 대한민국이 조금 더 열악합니다. **대한민국은 도전적인 연구와 실용적인 연구 중 당장 사용할 수 있는 실용적인 연구에 집중하는 경향이 있습니다.** 빠른 기간 내에 눈으로 확인이 가능한 결과를 원하기 때문입니다. 따라서 장기적인 연구가 요구되는 인공 광합성 연구는 다른 연구와 비교해보았을 때, 정책적으로 부족한 부분이 있습니다.

한국화학연구원 요약

- ✓ 현재 대한민국의 인공 광합성 연구는 광촉매의 효율 향상에 주력하고 있다.
- ✓ 효율이 높은 광촉매의 물질을 개발하는 부분은 이미 포화상태이다. 따라서 이미 발견된 광촉매를 발전시키거나 다른 시스템을 연구하는 것이 더욱 효과적이다.
- ✓ 인공 광합성 기술을 이용한 포도당 생산은 가능하다. 하지만 장기적인 연구가 요구되며, 현재 기술력으로는 불가능하다.
- ✓ 인공 광합성 분야는 화학·생명·전자 등 다양한 학문이 융합되어 있기 때문에 아직 전체적인 시스템 연구는 시작하지 못하고 있다.
- ✓ 현재 대한민국은 결과를 바로 확인할 수 있는 실용적인 연구 위주로 투자한다. 장기적인 연구가 요구되는 인공 광합성 연구의 지원은 부족하다.

탐방 과제 1 : 인공 광합성의 상용화를 위한 기술 개발 → 미국은 어느 정도의 기술 개발이 되어있는가?

- ✓ 촉매 효율 향상에 집중하고 있는 대한민국, 미국의 연구 진행 방향은 어디로 향하고 있는가?
- ✓ 예상하고 있는 상용화 시기는 언제인가? 상용화 도달을 위해 해결해야 하는 과제는 무엇인가?

탐방 과제 2 : 우리나라의 인공 광합성 연구, 기관·학회와의 연계부족 → 미국은 어떻게 연결되어 있는가?

- ✓ 미국의 대표 인공 광합성 연구소인 JCAP CALTECH와 JCAP LBNL은 왜 분리되어 있으며, 어떻게 연계되어 있는가?
- ✓ 국내외의 대학 및 연구소의 협동 연구는 주로 어떤 방식으로 이루어 지는가?

탐방 과제 3 : 2019년에 만기 되는 KCAP의 연구개발(R&D) 지원 → 국가의 연구 지원을 이끌어 내기 위해 앞으로의 기술 개발 연구는 어떤 방향으로 나아가야 하는가?

- ✓ JCAP의 정부 지원금은 얼마나 되며, 어떠한 지원을 받고 있는가?
- ✓ 미국에서 인공 광합성 연구개발의 최종 목표는 무엇인가?

탐방 과제 4 : 실용화 연구에 집중하는 대한민국, 도전적 연구인 인공 광합성 연구의 정부 지원을 어떻게 이끌어 낼 것인가? → 미국에서의 도전적 연구에 대한 인식 수준은?

- ✓ 미국 정부는 인공 광합성 연구를 어떤 인식으로 받아들이고 있는가?
- ✓ 인공 광합성 연구가 필수 불가피한 이유는? 인공 광합성은 미래에 우리에게 어떤 도움을 줄 수 있는가?

탐방 과제 5 : 인공 광합성으로 식량을 생산했을 때 소비자들의 인식 → 인공 광합성에 대한 소비자들의 관심과 부정적 인식을 어떻게 극복할 것인가?

- ✓ GMO 식품의 안정성은 입증되었지만, 여전히 소비자들에겐 부정적이다. 인공 광합성으로 만들어진 식량은 이 문제를 어떻게 극복할 수 있는가?
- ✓ 10년 가까이 진행된 연구이지만, 시민들에게는 아직 생소하다. 시민들에게 인공 광합성을 어떻게 소개할 것인가?



04. 해외탐방

그리닝팀은 선진 인공 광합성 기술을 탐구하기 위하여 미국의 연구소 및 기업에 방문한다.
UN 본부에 방문하여 세계 환경 및 식량 문제의 현황을 파악하고, 국제적으로는 어떠한 노력을 기울이는지 알아본다.
JCAP에 방문하여 미국 인공 광합성 기술의 현황을 파악하고, 대체 에너지로 활용이 가능한지 확인한다.
NC State University의 Weaver Lab에 방문하여 인공 광합성 기술로 포도당을 생산할 수 있는지 확인한다.
Harvard University의 Nocera Group에 방문하여 인공 광합성 기술의 핵심 내용을 정리한다.


04-1 UN Headquarters

04-2 JCAP LBNL

04-3 Weaver Laboratories

04-4 Nocera Group

04-5 해외탐방 요약 및 탐방 과제 해결



UN본부 UN HEADQUARTERS

기관 소개

UN은 제2차 세계대전 이후 국제 평화와 안전 보장을 목적으로 결성된 범세계적 국제기관이다. UN은 총회를 비롯하여 사무국, 안전보장이사회, 경제사회이사회, 신탁통치이사회, 국제사법재판소 등 주요 기구와 그 산하에 많은 보조 및 전문 기구가 있다. 국제 평화와 안전을 유지하며, 국가 간의 우호 관계를 발전시키고, 경제적·사회적·문화적 또는 인도적 성격의 다양한 국제 문제를 해결하기 위해 노력한다. 그리닝팀은 UN 본부 방문을 통해 세계 에너지, 환경, 식량 문제의 심각성을 인지하고, 인공 광합성 기술이 문제 해결에 기여할 수 있는지 확인한다.

탐방 목적

1. 세계 에너지, 환경, 식량 문제의 현황을 파악하고, 심각성을 인지한다.
2. 에너지 문제를 해결하기 위한 UN 산하 기구 IAEA, UNIDO에 대해 알아본다.
3. 환경 문제를 해결하기 위한 UN 산하 기구 UNEP, IPCC, WMO에 대해 알아본다.
4. 식량 문제를 해결하기 위한 UN 산하 기구 WFP, FAO, IFAD, UNICEF에 대해 알아본다.



UN본부
문두리 공보정보관



UN-Energy

에너지 분야에서 기관 간 협력을 위한 메커니즘으로 지속적인 에너지 시스템을 구축한다.

UN은 세계 에너지 문제를 해결하기 위해서 어떠한 일을 하고 있습니까?

UN 산하 기관 중 에너지 문제를 직접적으로 다루는 기관은 국제원자력기구(IAEA), 유엔산업개발기구(UNIDO)가 있습니다. 에너지는 지속 가능한 경제 성장과 개선된 인간 복지에 필수적입니다. IAEA는 원자력 에너지의 평화적인 이용을 장려합니다. UNIDO는 산업 발전을 촉진시키려는 노력을 하고 있습니다. 또한 UN사무국의 경제 사회부와 함께 IAEA, UNIDO 등 UN 전문기구, UN 프로그램, UN 기금, 여러 NGO가 참여하는 UN-Energy가 있습니다. 규모가 작아서 아직 UN 시스템에 등록되어 있지는 않지만, **UN-Energy는 세계 에너지 문제에 많은 노력을 기울이고 있습니다.**

UN은 세계 환경 문제를 해결하기 위해서 어떠한 일을 하고 있습니까?

UN은 세계 환경 문제를 해결하기 위해서 1992년 기후변화협정(UNFCCC)을 최초로 개최했습니다. 기후변화 협정은 **대기 중의 온실가스 농도를 줄이는 것을 목표로 합니다.** 그리고 1997년 일본 교토에서 열린 제3차 당사국총회에서 교토의정서와 2015년 파리에서 개최된 제21차 당사국총회에서 파리기후협약을 체결하였습니다. UN의 환경 관련 산하 기관은 유엔환경계획(UNEP)과 세계기상기구(WMO)가 있습니다. UNEP은 지구 환경 문제를 다루기 위한 전담 국제기구이며, WMO는 기상 관측망을 구성하는데 필요한 범세계적인 협력관계를 도모합니다.

UN은 세계 식량 문제를 해결하기 위해서 어떠한 일을 하고 있습니까?

2050년의 세계 인구는 100억이 넘을 것으로 예상하고 있습니다. **UN의 식량 관련 기관은 증가하는 인구를 대비하고, 개발도상국에 농업 생산량을 증진시키기 위해 노력합니다.** 실질적으로 기금을 마련하고 농민들 생활수준 향상을 위해서 많은 도움을 주고 있습니다. 그리고 식량 원조와 긴급 구호 활동을 진행 중입니다. UN의 식량 관련 기관으로는 유엔세계식량계획(WFP), 유엔식량농업기구(FAO), 국제농업개발기금(IFAD), 유엔아동기금(UNICEF)이 있습니다. WFP는 우리 세대에 기아를 퇴치한다는 뜻으로 제로헝거(Zero Hunger)를 슬로건으로 활동하고 있습니다. UNICEF는 전 세계 개발도상국에서 어려운 처지에 놓인 어린이를 위하여 영양, 보건, 식수 공급 및 위생, 기초 교육 분야에서 다양한 도움을 주고 있습니다.



세계 에너지 문제를 해결하기 위한 UN의 기관

국제원자력기구(IAEA) : 원자력의 평화적 이용을 위한 연구와 국제적인 공동관리를 위하여 설립된 국제기구입니다. 원자력 발전의 경제성 및 안전성 제고를 위한 국제적 협력을 목적으로 합니다.



유엔산업개발기구(UNIDO) : 개발도상국의 산업개발 및 공업화 지원, 개도국과 선진 공업국 간 및 개도국 상호 간 기술협력 촉진, 산업개발을 위해 설립되었습니다. 개발도상국의 공업 개발에 필요한 연구·조사·계획작성 및 기술원조를 행하고, 공업 관계 표준화, 데이터 정보를 수집·분석·발행합니다.



세계 환경 문제를 해결하기 위한 UN의 기관

유엔환경계획(UNEP) : 지구 환경 문제를 다루기 위해 창설된 환경 문제 전담 국제기구입니다. 주요 역할은 지구 환경을 감시하고, 각 국가 정부를 비롯한 국제 사회가 환경의 변화에 따라 적절한 조치를 취할 수 있도록 돕고, 환경 정책에 대한 국제적 합의를 이끌어내는 것입니다.



기후변화대응(IPCC) : 기후 변화와 관련된 전 지구적 위험을 평가하고 국제적 대책을 마련하기 위해 세계기상기구(WMO)와 유엔환경계획(UNEP)이 공동으로 설립한 유엔 산하 국제 협의체입니다. 기후 변화 문제의 해결을 위한 노력이 인정되어 2007년 노벨 평화상을 수상하였습니다.



세계기상기구(WMO) : 세계 기상사업의 조정 및 표준화를 도모하고, 국가 간 기상정보의 효과적인 교환을 장려하고, 각국에 대한 기상 조사 및 훈련을 촉진시킬 것을 목적으로 설립되었습니다.



세계 기아 문제를 해결하기 위한 UN의 기관

유엔세계식량계획(WFP) : 1961년 유엔총회와 유엔식량농업기구(FAO)의 결정에 의해 설립되었으며 세계식량회의(WFC)의 결의를 신속하게 실행하기 위해 각국의 의견을 조정합니다. 세계 식량안보와 극빈국의 농업개발 문제, 식량개발에 관한 정책 토의, 식량원조 모금, 개발도상국의 식량 자급 정책에 관한 지원이 주 역할입니다.



유엔식량농업기구(FAO) : 모든 국민의 영양상태 및 생활수준을 향상시키고, 식량(농작물)의 생산 및 분배 능력을 증진시키기 위해 설립되었습니다. 식량 및 농업에 관한 과학적, 기술적, 사회적, 경제적 연구와 더불어 각국 정부가 요청하는 기술원조를 제공합니다.



국제농업개발기금(IFAD) : 개발도상국의 농업 개발을 위해 설립되었습니다. 개발도상국과 저소득 국가의 농촌 개발, 농촌 인프라 구축, 농사 교육, 지도자 교육, 가축 및 어업 지원, 연구 및 교육 훈련을 주요 업무로 맡고 있습니다. IFAD 기금을 통하여 개발도상국에 직접적인 도움을 제공합니다.



유엔아동기금(UNICEF) : 국적이거나 이념, 종교 등의 차별 없이 어린이를 구호하기 위해 설립되었습니다. 개발도상국 어린이들을 위하여 긴급구호, 영양, 예방접종, 식수 및 환경개선, 기초교육 등의 사업을 펼치고 있습니다.



기관 소개

2010년, 미국 에너지 혁신 사업의 일환으로 설립된 JCAP(Joint Center for Artificial Photosynthesis)은 세계 최대의 인공 광합성 연구 기관이다. JCAP은 태양빛, 물, 이산화탄소만을 사용하여 새롭고 효율적인 방법으로 연료를 생산하는 것을 목표로 한다. JCAP CALTECH와 JCAP LBNL로 나누어지며, 각 기관이 관련 정보를 공유하며 연구를 진행하고 있다. 특히 JCAP은 Joint Center라는 이름에 걸맞게 전 세계적으로 인공 광합성 기관들과 협력하는 것으로 유명하다. 대한민국에서는 KCAP와 협력하여 연구를 진행 중이다. 그리닝팀은 JCAP LBNL을 방문하여 인공 광합성에 대한 전반적인 내용을 확인하고, 특히 인공 광합성 기술을 활용한 에너지 생산 분야에 관련하여 집중적으로 알아본다.

탐방 목적

1. 인공 광합성의 개념 및 전반적인 내용을 학습한다.
2. 현재 인공 광합성 기술을 에너지로 활용하는 분야에서 가장 큰 문제점이 무엇인지 확인한다.
3. 미국의 인공 광합성 기관은 서로 어떻게 협력하는지 알아본다.



JCAP LBNL

Frances Houle 책임연구원



JCAP LBNL

Jason Cooper 연구원



Chu Hall

JCAP LBNL의 주요 실험이 진행되는 연구소이다.

JCAP은 LBNL과 CALTECH 두 연구기관으로 나누어져 있으며, SERC 또한 연계되어 있습니다. 그 이유는 무엇이며 어떻게 협력하고 있습니까?

인공 광합성 프로젝트는 매우 큰 규모를 자랑합니다. 이 때문에 여러 대학과 연구소들이 협력하고 있습니다. 연구 과정에서 업무를 배분하고 전문 분야에 집중하기 위해서 JCAP LBNL과 CALTECH로 나누어졌습니다. 각각의 기관들이 서로 협력하면서 연구에 최선을 다하고 있습니다. 인공 광합성 연구는 복합적 분야로 화학, 물리, 재료, 반도체, 생물학 등 다양한 분야가 집약되어 있습니다. 따라서 다양한 분야의 연구기관들이 협력하는 것은 매우 중요합니다. JCAP의 두 연구기관은 각 부서끼리 정기적으로 온·오프라인 회의를 가지고 있으며, 의견을 교류할 수 있는 기회가 자주 있습니다. 참고로, 대한민국의 KCAP과 같은 해외의 협력 기관과는 MOU(양해각서)를 바탕으로 협력하고 있습니다.

인공 광합성 연구는 JCAP LBNL, CALTECH, SERC 외에도 SLAC, UC Irvine 등 다양한 연구소가 참여하고 있습니다. 이 연구소 모두 중요한 연구를 진행 중이며, 각각의 강점을 가지고 있습니다. JCAP LBNL은 전기화학 시스템 구축, JCAP CALTECH는 광전기 촉매 작용과 물질 발견, SLAC은 전기 촉매 작용 분야에서 우수합니다. 이러한 여러 연구소들이 각각 연구를 진행하고, 이를 종합하면서 커다란 인공 광합성 연구가 완성되어가는 것입니다.

현재 JCAP LBNL에서 집중하고 있는 연구는 무엇이며, 얼마나 진행되어 있는 상태입니까?

JCAP LBNL이 설립된 2010년 이후 5년간, 저희는 수소를 만들기 위한 물 분해에 집중했습니다. 하지만 2015년부터는 연구의 초점을 이산화탄소 환원으로 변경하였고, 이를 통한 액체연료 생산에 집중하고 있습니다. 현재는 액체연료 중 메탄올(CH₃OH) 생산에 주력하고 있습니다. 이의 효율을 향상시키기 위해 광전자 화학 시스템 연구를 진행 중입니다. 세부적으로는 원자를 추출하기 위한 멤브레인(막), 효율을 높이기 위한 촉매 개발 등 물질의 구조를 최적화시키는 작업을 진행하고 있습니다.

현재 다양한 기관에서 효율이 높은 광촉매를 개발하는데 집중하고 있지만, 고효율의 촉매를 찾는 것은 쉽지 않습니다. 이것은 인공 광합성의 상용화에 가장 큰 걸림돌입니다. 현재 JCAP의 효율은 어느 정도이며, 여기서 가장 큰 한계는 무엇입니까?

인공 광합성 상용화에 필요한 효율은 20%입니다. 현재 JCAP에서는 일반적으로 10%의 효율이 나타나며, 높을 때는 14%까지 도달한 적도 있습니다. 효율을 높이기 위해서는 다양한 장애 요소를 제거해야 합니다. JCAP에서는 촉매 물질의 구조를 변경하여 흡수할 수 있는 빛의 파장을 조절하는 최적화 작업을 진행하고 있습니다. 또한 비싼 반도체의 가격을 낮추기 위해 다양한 연구를 진행하고 있습니다.



JCAP 연구소에 대해 설명해주는 Jason Cooper 연구원님

미국에서, 인공 광합성 기술이 상용화되는데 얼마나 걸릴 것으로 예상하십니까?

언제 인공 광합성 기술이 상용화될지는 제 입장에서 함부로 말할 수 없습니다. 현재 인공광합성 기술은 초기 연구 단계에 있습니다. 상용화하기 위해서는 효율 문제와 가장 중요한 비용 문제가 있습니다. 20%의 효율에 도달하면 상용화할 수 있는데, 효율이 높아도 인공 광합성을 위한 반도체 생산에 많은 비용이 들어간다면 상용화가 불가능할 것입니다. 또한 다양한 환경에서도 일정하게 작용할 수 있는 안정성과 1만 시간 이상의 수명 또한 중요한 고려 사항입니다. 이러한 이유 때문에 언제 상용화될지 판단하는 것은 설부른 판단입니다.



DOE(Department of Energy)

미국에너지국이라 불리며, 에너지, 환경, 핵안보에 관한 업무를 담당하는 미국 정부 행정기관이다.

JCAP에 대한 정부 예산의 현재 수준은 무엇이며 미국 정부는 어떤 기대를 갖고 있습니까?

JCAP에 대한 정부의 지원은 상당히 좋은 상태입니다. 오바마 행정부 시절, 미래사업인 친환경 에너지 사업 부분과 관련하여 많은 관심과 지원을 받았습니디. 그래서 JCAP이 설립된 2010년부터 5년 동안 약 1억 2000만 달러를, 2015년부터 5년 동안 약 7,500만 달러를 DOE로부터 지원받고 있습니다.

현재 미국 정부에서 기대하고 있는 것은 탄소 배출량 감소입니다. 탄소 배출량을 감소시키고, 화석연료를 대체하기 위한 새로운 에너지를 찾기 위해 많은 노력을 기울이고 있습니다. 미국 정부는 새로운 신재생 에너지 찾을 때까지 지원을 멈추지 않을 것이라고 생각합니다.

JCAP 요약

- ✓ 인공 광합성은 다양한 기술이 복합적으로 결합되어 있기 때문에, 관련 기관들의 협력이 필수적이다.
- ✓ JCAP은 현재 인공 광합성 기술을 통한 액체 연료 생산에 집중하고 있다.
- ✓ 인공 광합성 연구의 핵심은 효율이다. JCAP은 효율을 높이기 위해 물질 구조를 변경시켜, 흡수할 수 있는 빛의 파장을 조절한다.



NC State University Weaver Laboratories

기관 소개

NC State University의 Weaver Laboratories에서 근무하는 Hao Lu 박사는 인공 광합성 기술을 이용한 포도당 생산 연구를 진행 중이다. 대부분의 인공 광합성 연구 기관들은 에너지 생산 연구에 초점이 맞추어져 있으나, Hao Lu 박사는 에너지가 아닌 포도당 생산을 통해 식량 문제를 해결하는 것을 목적으로 하고 있다. 그리닝팀은 Hao Lu 박사의 논문 하나를 확인하고 그의 의견을 듣기 위해 지구 반대편에서 찾아가는 모험을 한다.

탐방 목적

1. 인공 광합성 기술로 포도당 생산이 가능한지에 대해 알아본다.
2. 만약 포도당 생산이 가능하다면, 식량 문제를 해결할 수 있는지 알아본다.
3. 인공 광합성 기술로 식량 생산이 상용화되기까지의 기간을 알아본다.



NC State University
Weaver Laboratories
Hao Lu 박사

현재 인공 광합성 연구는 대체 에너지에 초점이 맞추어져 있습니다. 하지만 Hao Lu 박사님은 포도당 생산에 초점을 맞춘 연구를 진행하고 있습니다. 대체 에너지와 포도당 생산 연구 분야의 다른 점은 무엇입니까?

인공 광합성의 연구 분야는 매우 광범위합니다. 대부분의 연구소에서는 NADPH 생성에 집중하고 있습니다. 하지만 저는 <단백질 기반의 인공 광합성 시스템에서 포도당 합성> 논문에서 보셨다시피 포도당 생성에 집중하고 있습니다.

인공 광합성은 명반응과 암반응 두 부분으로 나눌 수 있습니다. 명반응에서는 NADPH, ATP를 합성합니다. 암반응에서는 ATP를 사용하여 포도당을 생성합니다. 대부분의 연구소에서는 NADPH를 생성하는 명반응에 집중하고 있지만, 저는 명반응과 암반응의 전체적인 과정을 다루고 있습니다. ATP 사용량에 따른 포도당의 생산량을 확인하는 것이 저의 연구의 목표입니다. 포도당의 생산량은 ATP뿐만 아니라 빛의 양과 온도에 영향을 받습니다.

그럼 현재 인공 광합성 기술로 포도당 생산이 가능하다는 것입니까?

물론입니다. 연구 진행 과정에서 이산화탄소와 물을 사용해서 포도당을 생산할 수 있다는 것을 확인하였습니다. 하지만 여러 조건으로 인해 포도당 생산이 쉽지는 않습니다. 예를 들어, 2개의 단백질 효소가 있는데, 이 효소의 가격은 매우 비쌉니다. 또한 효소는 약 4~5도의 저온에서만 활성화됩니다. <단백질 기반의 인공 광합성 시스템에서 포도당 합성> 논문 연구 중 저는 두 개의 다른 효소를 결합하려 노력하였습니다. 이 두 효소는 F0-F1 ATP와 BR(박테리아 로돕신)인데, 인공 광합성에서 매우 중요한 역할을 합니다.

ATP

아데노신 삼인산 (Adenosine triphosphate). 다량의 에너지를 저장하고 있으며 방출시 생물활동에 사용된다. 에너지 대사에 매우 중요한 역할을 한다.

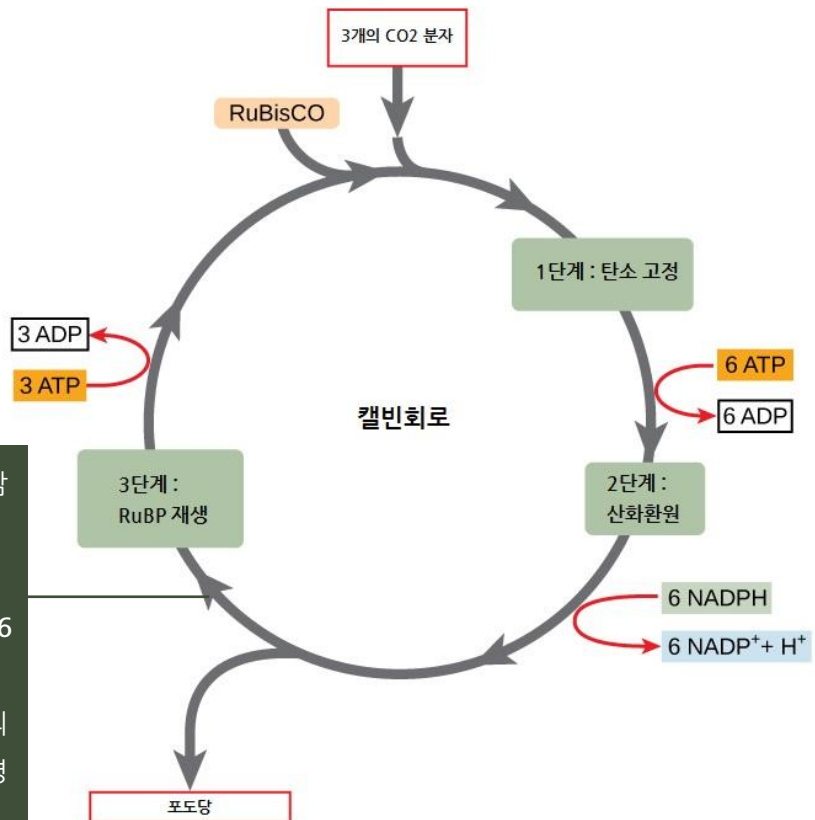
NADPH

이산화탄소의 환원과 포도당 합성 반응에 관계하고 있는 산화환원 효소. 전자를 전달하는 역할을 하며 전달된 전자는 ATP의 합성을 유도한다.

자연 광합성에서 포도당(C₆H₁₂O₆) 합성은 암반응의 캘빈회로를 통해 진행된다.



포도당 1분자를 생성하기 위해서는 18개의 ATP와 12개의 NADPH가 필요하며, 이들은 명반응을 통해 생성된다.





Hao Lu 박사님의 인터뷰

축합반응

두 분자가 결합하여 생성물을 내놓는 반응

인공 광합성 기술을 이용하여 포도당을 생산하는 과정은 무엇입니까?

인공 광합성은 자연 상태의 나뭇잎에서 일어나는 광합성과 매우 유사합니다. 나뭇잎은 태양빛을 이용합니다. 이는 자연 상태에서 이산화탄소의 흡수를 가능하게 하며, 암반응을 통해 이산화탄소를 포도당과 같은 유기 화합물과 산소로 변환시킵니다. 인공 광합성에서의 포도당 합성 또한 캘빈회로를 모방한 단백질 기반 인공 광합성 시스템에서 이루어지며, 이 과정에서 ATP와 NADPH를 사용합니다.

Hao Lu 박사님의 연구에서 포도당 합성을 위해 사용된 단백질 기반 인공 광합성 시스템의 한계는 무엇입니까?

포도당을 합성하기 위해서 요구되는 조건이 굉장히 까다로운데, 이것이 포도당의 원초적인 화학적 특성 때문인지 아니면 기술적 한계 때문인지는 아직까지는 알 수 없습니다. 우선 포도당 합성은 온도에 민감해서 적정 온도인 40 ℃를 유지해야 하며, **녹색 LED 조명 없이는 포도당을 검출할 수 없습니다.** 단백질 기반 인공 광합성에서 사용된 효소가 빛과 온도에 매우 민감하기 때문입니다. 이 중 하나라도 만족하지 못하면 포도당 합성량이 급격하게 떨어집니다.

인공 광합성 기술로 포도당 생산을 할 수 있다면, 식량 생산도 가능합니까?

물론입니다. 우리가 일반적인 에너지원으로 섭취하는 탄수화물, 즉 녹말은 포도당이 축합반응을 일으키면서 길게 연결되어 만들어지는 다당류입니다. 인공 광합성 기술로 생산해낸 포도당을 녹말화 할 수 있는 기술이 적용된다면 충분히 식량 생산이 가능할 것이라고 생각합니다.

인공 광합성 기술을 이용한 포도당 생산이 상용화되기까지에는 어느 정도의 시간이 걸릴 것으로 예측합니까?

저도 확실하게는 대답할 수 없습니다. 현재까지 인공 광합성 분야에서 포도당 생산을 연구하는 기관은 전 세계적으로 단 두 곳입니다. 또한 포도당 생산을 연구하기 시작한 지 5년도 지나지 않았습니다. 연구 기간도 오래되지 않았고, 관련 기관이 없어 정보를 공유하기 힘든 상황입니다. 미래에는 상용화가 반드시 될 것입니다. 하지만 저는 최소 몇 십 년이 걸릴 것으로 예상합니다.

Weaver Laboratories 요약

- ✓ 인공 광합성을 이용한 포도당 생산은 가능하다. 하지만 포도당 합성을 위해서는 ATP 농도와 빛의 양, 온도 등 외부 요인이 크게 작용한다.
- ✓ 포도당을 이용한 녹말 합성이 실제로 가능하다면 식량 생산도 가능할 것이다.
- ✓ 포도당 합성 연구를 진행하는 기관이 거의 없고, 연구 기간도 매우 짧은 편이다. 따라서 상용화 시간은 예측 불가능하다. 하지만 포도당 합성의 기대 효과를 고려해볼 때, 상용화는 반드시 이루어질 것이다.

A large white diamond-shaped frame is centered over a dark, semi-transparent photograph of a meeting. Inside the diamond, the text "Harvard University Nocera Group" is written in white. The background photo shows several people sitting around a table with laptops, engaged in a discussion. One person in the background is pointing towards a whiteboard.

Harvard University Nocera Group

기관 소개

Harvard University의 Nocera Group은 생물학과 화학에서의 에너지 전환 기본 원리를 연구한다. 유기 초분자 구조체에서 무기 조정, 유기 금속 및 확장된 층상 화합물에서부터 에너지 전환에 대한 물리적 및 화학적 문제를 조사할 수 있는 생체 분자에 이르기까지 다양한 화합물과 물질을 합성한다. 특히, 인공 광합성 기술의 발전에 큰 기여를 한 인공 잎(Artificial Leaf)을 최초로 개발하였으며, 현재는 이를 심화시킨 바이오닉 잎(Bionic Leaf) 연구를 진행 중이다.

탐방 목적

1. 인공 광합성 기술을 이용한 식량 생산의 2가지 방법(포도당 생산 후 직접 식량 생산, 인공 비료를 이용한 수확량 증가를 바탕으로 한 식량 공급)에 대해 알아본다.
2. 태양광 에너지로부터 수소를 생산하기 위해 인공 광합성 기술 개발을 목표로 한 Sun Catalytix사의 실패 이유를 확인하고, 이를 개선한다.



Harvard University
Chemistry & Chemical Biology
Daniel Nocera 교수

현재 Nocera Group에서는 주로 어떠한 연구를 진행하고 있습니까?

저희는 최근 오직 태양빛, 공기(Air), 물만을 사용하여 다양한 화합물을 합성하는 연구를 진행하고 있습니다. 여기서 보통은 태양빛, 이산화탄소, 물을 사용하여 인공 광합성 연구를 진행하는데, 저희는 이산화탄소가 아닌 공기(Air)를 필요로 합니다. 자세한 이유는 뒤에서 다루겠습니다. 이 연구의 결과로 에너지 문제를 해결하기 위해 노력하고 있으며, 최근에는 식량 문제에도 관심을 가지고 있습니다.

현재 Nocera Group에서 진행하는 인공 광합성 연구는 무엇입니까?

보통의 인공 광합성 연구는 태양빛, 이산화탄소, 물을 사용하여 에너지를 생산하는 것이 목표입니다. 이는 저희가 개발한 인공 잎(Artificial Leaf)에서 기술로 구현하였습니다. 인공 잎에서 태양빛을 받으면 물을 분해하여 산소와 수소가 생성됩니다. 여기서 보통 수소를 연료로 사용하는데, 저희는 여기서 생산한 수소를 박테리아에게 섭취시켜 바이오매스 또는 연료를 생산합니다. 이 전 과정을 제가 개발한 바이오닉 잎(Bionic Leaf)에서 기술적으로 구현하였습니다. 요약하면, 인공 잎에서는 일반적인 인공 광합성 기술로 수소를 생산하고, 바이오닉 잎에서 이 수소를 이용하여 연료를 생산합니다.



태양빛



인공 잎



수소 생산



바이오닉 잎



연료 생산



Harvard University
Nocera Group
Dilek Dogutan 책임연구원

Nocera Group은 2008년 세계 최초로 인공 잎(Artificial Leaf) 개발에 성공하였습니다. 이는 획기적인 기술로 큰 화제를 몰고 왔으며, 지금도 수많은 관련 연구가 진행되고 있습니다. 하지만 현재 Nocera Group에서는 인공 잎 관련 연구를 찾아보기 쉽지 않습니다. 이유가 무엇입니까?

매우 좋은 질문입니다. 현재는 시카고대학교 등 다양한 대학 및 연구소에서 인공 잎 연구가 진행되고 있습니다. 저는 현재의 인공 잎을 발전시키는 연구보다는 바이오닉 잎처럼 새로운 분야를 개척할 수 있는 연구를 선호합니다. 기존의 연구는 다른 훌륭한 연구원분들이 진행하실 수 있다고 생각합니다. 즉, 저는 새로운 발견을 하고, 그 분야를 개척하면 한 차원 더 높은 연구를 진행합니다.

바이오닉 잎

물 분해 촉매와 수소를 소비하는 *Ralstonia eutropha* 박테리아와 쌀을 결합한 2세대 인공 잎

발생 생리학

개체발생에 나타나는 생리현상을 연구하는 생리학의 1분야. 생리학을 넓은 뜻으로 해석해 개체발생의 인과분석적 연구 전부를 포용하는 분야를 가리킨다.



박테리아와 태양빛, 물, 공기로 비료를 생산하는 바이오닉 잎의 도움을 받아 재배된 오른쪽 작물은 무게가 50% 더 나간다.

바이오닉 잎(Bionic Leaf)은 무엇입니까?

1세대 인공 잎은 태양빛을 모아 전력을 만들어내고, 이 전기 에너지를 이용해 물을 전기분해하여, 수소 연료를 생산하는 일종의 태양전지입니다. 하지만 1% 내외의 낮은 효율로 상용화하기에는 어려움이 있었기 때문에 인공 잎에 박테리아를 결합한 2세대 바이오닉 잎을 만들게 되었습니다.

바이오닉 잎은 박테리아에 발생 생리학을 적용하여 바이오 연료를 만드는 기술입니다. 제가 앞서 설명할 때 보통의 인공 광합성은 태양빛, 물, 이산화탄소를 사용한다고 했는데, 저는 이산화탄소가 아닌 공기를 사용한다고 했습니다. 그 이유가 여기에 있습니다. 바이오닉 잎은 이산화탄소만 사용하지 않습니다. **박테리아에 제공하는 성분에 따라 합성 결과물이 달라집니다.** 박테리아에 질소를 제공하면, 이 박테리아가 질소를 분해하고 암모니아가 생성되어 인공비료를 만들 수 있습니다. 즉, **바이오닉 잎은 박테리아를 선택하고, 박테리아에 주입하는 유전자에 따라 다른 합성물을 만들 수 있습니다.** 예를 들어, 우리는 보통 플라스틱을 만들 때 화석연료를 사용합니다. 그러나 이 기술을 이용하면 태양빛과 공기만을 가지고 박테리아가 플라스틱을 만들 수 있다는 것입니다.

인공 광합성 기술을 이용하여 포도당을 생산하는 것이 가능합니까? 만약 포도당 생산이 가능하다면, 현재 세계적인 식량 문제를 해결할 수 있습니까?

앞서 설명한 기술을 사용하면 매우 쉽습니다. **박테리아에 유전자를 주입하고 포도당, 설탕, 녹말을 생산하여 식량 문제를 해결할 수 있습니다.** 어떤 유전자를 박테리아에 주입해야 포도당, 설탕, 녹말이 생산되는지 현재 하버드 의학 대학교와 협력하여 실험을 진행하고 있습니다. 이렇게 직접적으로 포도당을 생산하는 방법은 사막 등 척박한 환경에서도 활용이 가능한 좋은 방법입니다.

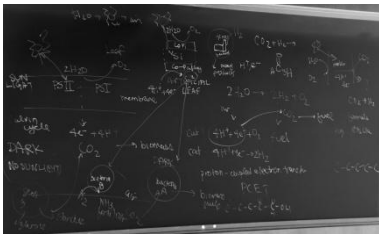
식량 문제를 해결하는 또 다른 방법은 인공비료를 사용하는 것입니다. 바이오닉 잎으로 인공비료를 만들고, 이를 사용하여 식량의 수확량을 증가시킬 수 있습니다. 이 두 방법 모두 태양빛, 물, 공기만 있으면 가능합니다.

인공 잎, 바이오닉 잎이 상용화되기까지는 어느 정도의 시간이 소요될 것으로 예상하십니까?

모든 사람이 저에게 묻는 질문입니다. 저는 2년 이내에 사람들이 기술을 직접적으로 접할 수 있도록 원형(Prototype)을 제작하고, 본격적인 상용화를 시도할 계획입니다. 현재 Lockheed Martin과 협력하여 연구 및 상용화를 추진하고 있습니다.



Daniel Nocera 교수님, Delek Dogutan 책임연구원님과과의 인터뷰



직접 관련 내용을 필기하고, 설명 해주신 Nocera 교수님

Nocera 교수님께서서는 2009년 인공 광합성 기술을 이용해 전기를 생산하는 Sun Catalytix를 설립하셨습니다. 하지만 현재 Sun Catalytix는 Lockheed Martin의 에너지 부서로 합병되었습니다. 그 이유는 무엇입니까?

Sun Catalytix는 태양빛을 이용한 물 분해를 통해 수소 연료를 생산하는 시스템을 구상하는 벤처기업입니다. 이 기업의 목표는 “개인화된 에너지(공장에서 생산하는 에너지가 아닌 개인이 독자적으로 생산하는 에너지)”를 제공할 수 있는 주거용 외부 태양 전지 시스템을 만드는 것이었습니다. 이러한 장치는 고립 지역의 가정에 전력을 공급할 수 있습니다. 또한 태양이 비치지 않아도 연료 전지를 통해 전기를 공급받을 수 있습니다.

그러나 2012년 5월부터 연구개발을 중지했는데, **태양광 기반 시설의 건설이 여전히 기존 에너지를 대체하기에 너무 비쌌기 때문입니다.** 따라서 시장에 출시하는 것에 어려움을 겪었고, 현재는 Lockheed Martin의 에너지 부서로 합병되었습니다.



Nocera 교수님께서 생각하시는 **옳은 미래란 무엇입니까?**

미래는 희망적이고 밝습니다. 세상에는 수많은 훌륭한 과학자들이 미래를 아름답게 만들기 위해 노력 중입니다. 신재생 에너지를 개발하고, 지구의 에너지 문제, 환경 문제 등을 해결하는 것은 그 과정 중 하나입니다. 10년 전에는 그 누구도 물 분해조차 하지 못했습니다. 하지만 과학 기술이 발전하고, 지금은 더욱 훌륭한 기술들이 나오고 있습니다. 이러한 과학적인 노력이 저는 옳은 미래라고 생각합니다.

Nocera Group 요약

- ✓ Nocera Group의 인공 광합성은 다른 연구 기관과 다르게 이산화탄소(CO2) 대신 공기(Air)가 필요하다.
- ✓ 바이오닉 잎은 효율을 높이기 위해 기존의 인공 광합성 기술에 박테리아를 도입하여 연료를 생산한다.
- ✓ 박테리아에 특정 유전자를 주입하여 원하는 물질을 생성할 수 있다.

탐방 결론 1 : 인공 광합성의 상용화를 위한 기술 개발

- ✓ 아직은 예측하기 어려운 상용화 도달 시기 : 세계는 아직도 상용화 도달을 위해 다양한 방법을 시도하고 있다. 상용화에 적합한 새로운 촉매를 개발하는 것 이외에도 개발된 촉매의 단점을 보완하기 위해 융합 시스템을 개발하여 효율 높이에 집중하고 있다. 따라서 시급한 인프라의 구축과 적극적인 연구개발 활동 및 이에 대한 국가적인 지원이 필요하다.

탐방 결론 2 : 대한민국 인공 광합성 연구 기관·학회와의 연계

- ✓ 국내외 대학 및 연구소의 협동 연구 필요성 : 인공 광합성은 기술 융합이 필수적인 복합적 연구이다. 따라서, 관련 기관의 연구 분야를 인공 광합성 영역까지 확대 및 통합시킬 수 있도록 촉구해야 한다.
- ✓ 부족한 연구 기관 및 인력 : 현재 인공 광합성 연구는 KCAP과 몇 개 대학교의 연구팀으로 한정되어 있다. 국가 차원의 연구 기관을 확대하고 관련 분야의 전문가들을 양성하여 프로젝트를 확대하고 연구 분야를 다양화 해야 한다.
- ✓ 연구 규모의 확대와 활발한 정보 공유 : 현재 인공 광합성 연구에 여러 대학이 참여하고 있지만 정보를 공유하는 커뮤니티가 부재하다. 많은 분야가 응용되는 만큼 활발한 의견 교류 및 회의가 필요하므로 정보 공유의 장을 위한 시스템을 구축해야 한다.

탐방 결론 3 : 2019년에 만기 되는 KCAP의 연구개발(R&D) 비용

- ✓ 상용화를 위한 기반 완성. 그 이후는? : KCAP의 연구 계획에 따르면 2019년도에 상용화를 위한 기초 기술의 기반은 완성될 것이라 전망하고 있다. 향후 본격적인 상용화 및 성공적인 신재생 에너지 시장 도입을 위해 정부의 지원을 이끌어내야 한다.
- ✓ 기술적 우위를 확보하기 위한 집중 투자! : 수소, 메탄올 분야는 세계 시장 잠재력이 크기 때문에 기술적 우위 확보가 시급하다. R&D 집중투자를 통해 기술 우위권을 선점하여 새로운 성장 동력과 에너지 보만의 초석을 다져야 한다.

탐방 결론 4 : 도전적 연구에 대한 정부 지원 이끌어 내기

- ✓ 연구의 필요성을 이끌어내기 : 인공 광합성 기술은 촉매의 종류에 따라 다양한 고부가 가치의 유기 및 무기 화합물을 만들어낼 수 있다. 생성된 에너지는 사용 후 다시 이산화탄소가 되고 다시 반응물로 사용되는 탄소 순환 시스템이 만들어진다. 이러한 친환경성 및 순환성을 강조하여 연구의 필요성을 이끌어내고 국가의 적극적인 지원 및 투자를 요청한다.

탐방 결론 5 : 인공 광합성으로 식량을 생산했을 때 사람들의 긍정적인 인식 이끌어내기

- ✓ 시민들에게 아직 생소한 기술 : 인공 광합성은 신재생 에너지로 관련 분야의 전문가들에게는 긍정적인 전망을 기대받고 있으나, 아직 시민들은 인공 광합성 기술을 접할 기회가 부족하다. 다양한 신재생에너지포럼 및 캠페인을 통해 인공 광합성을 친숙하게 알릴 필요가 있다.
- ✓ 기술의 친환경성 제시 : 인공 광합성은 태양빛, 물, 공기만을 이용하고 환경 오염 물질이 전혀 배출되지 않는 친환경 기술이다. 인공 광합성의 친환경성을 강조하여 (GMO의 사례와 같이) 인공적으로 생산한 식품에 대한 소비자의 부정적 인식을 극복한다.

05. 결과분석

- 05-1. 에너지 & 환경 문제를 해결하다
- 05-2. 식량 문제를 해결하다
- 05-3. 정부에게 요청하다
- 05-4. 기업에게 제안하다
- 05-5. 시민에게 소개하다
- 05-6. 인공 광합성, 어떻게 도입할 것인가?
- 05-7. 인공 광합성, 이렇게도 활용할 수 있다!
- 05-8. 단계별 발전 전망 및 기대효과





인공 광합성 기술로 생산한 수소연료

최근 2015년 파리 기후변화 협정을 기점으로 미래 자동차인 전기차와 수소차가 큰 주목을 받고 있다. 기존의 화석연료 중심에서 수소연료 중심의 시스템으로의 이동이 예상되는 가운데, 청정연료인 수소연료는 환경오염 문제를 해결하는데 큰 도움을 줄 것이다. **인공 광합성 기술을 이용해 생산된 수소연료는 이산화탄소를 반응물로 이용하여 만들어진 것으로, 온실가스의 재활용화와 동시에 청정원료 생산의 일석이조의 효과를 낳는다.**

이산화탄소 환원을 통해 생산한 탄화수소와 메탄

이산화탄소 환원을 통해 생산할 수 있는 탄화수소 연료는 비행기 연료와 같은 고급 연료로 사용된다. 이는 원유 수입량을 대폭 감소시켜 해외 에너지 의존도를 감소시키고 자주적인 에너지 보급을 가능하게 한다. 그리고 이산화탄소 환원으로 생성된 메탄은 천연가스의 성분 중 가장 많은 비중을 차지하고 있는 물질이다. 즉 인공 광합성 기술은 기존 화석연료 중심의 에너지를 충분히 뒷받침 할 수 있는 친환경 신기술이다.

이산화탄소를 포집하여 제로 탄소에 도전하다

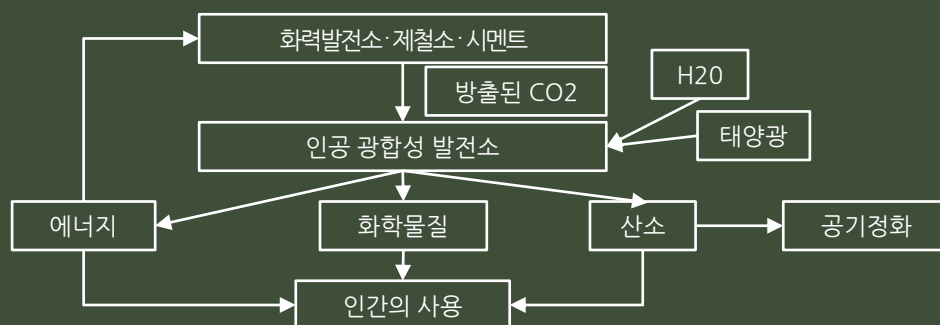
화력발전소, 제철소, 시멘트에서 생산되는 다량의 이산화탄소는 기후 변화 및 환경 오염에 큰 영향을 끼친다. **인공 광합성 기술을 이용하여 산업 활동으로 생산된 이산화탄소를 포집하여 새로운 화합물질을 만든다면 제로 탄소가 실현될 것이다.**



수소전기차
현대자동차가 최근 공개한 차세대 수소전기차

탄화수소 연료

포화 탄화수소라고도 하며, 탄소 원자가 전부 단일 결합으로 이루어진 것을 말한다



식량 문제를 해결하다

그리닝팀은 Weaver Laboratories와 Nocera Group에서 인공 광합성 기술로 포도당과 인공 비료의 생산이 가능하다고 확인하였다. 이 결과를 바탕으로 세계적인 식량 문제의 해결 방안을 제시한다.

해결방안 1 : 직접적인 탄수화물 생산

다당류인 탄수화물(녹말)을 구성하는 기본단위는 단당류인 포도당이다. 탄수화물은 포도당이 연쇄적으로 결합되어 있는 구조이기 때문에, **인공 광합성 기술로 생산한 포도당을 결합하여 탄수화물을 생성할 수 있을 것으로 예측한다.** 하지만 현재 포도당을 탄수화물로 합성하는 연구는 진행 중이지 않아 실현 가능할지는 미지수이다.

해결방안 2 : 포도당 캔디 보급

포도당 합성을 통한 직접적인 탄수화물 생산이 불가능하다면 **포도당을 압축하여 보급하는 방법이 있다.** 대표적인 예시는 포도당 캔디이다. 포도당 캔디는 부피가 작아 대용량의 운송이 가능하고 섭취하기 편리하며 신속하게 당을 보충할 수 있다는 장점이 있다. 포도당 캔디를 식량처럼 섭취할 수는 없지만, **비상식량으로 사용될 수 있기 때문에 해외구호개발사업에 도움을 줄 수 있을 것이다.**



포도당 캔디

해결방안 3 : 인공비료 사용으로 농작물 수확량 증가

식량 문제가 심각한 빈국에서는 작물을 키우면서 비료를 충분히 주지 못해 작황이 나쁜 경우가 많다. 이때 **대기 중 질소 고정 능력을 가진 바이오닉 잎을 배포한다면, 수확량을 늘려 식량 문제를 해결할 수 있다.** 바이오닉 잎은 토양오염 없이 비료를 생산할 수 있는 인공 나뭇잎이다. 바이오닉 잎은 태양빛, 물, 공기가 공급되는 이상 계속해서 비료를 생산할 것이기에, 지력을 고갈시키지 않는다. 즉, 기존의 인공비료처럼 토양을 오염시키는 일이 없이 식량 생산성을 높일 수 있다. 바이오닉 잎이 제3세계에 보급된다면 각 나라의 식량 자급률을 높여 자주적인 식량 공급이 가능하게 될 것이다. 하지만 이것이 실제로 보급되기 위해서는 현재 5% 남짓에 불과한 에너지 효율을 조금 더 개선하고 가격을 낮춰야 하는 현실적 문제가 남아 있다.



인공비료

정부에게 요청하다



인력 양성

현재 대한민국에서 인공 광합성 관련 연구 인력은 매우 부족한 상황으로, 이를 해결하기 위해서는 다양한 분야의 전문가들이 협력할 필요가 있다.

추가적으로 기존 나노 바이오 기술 관련 인력을 인공 광합성 분야로 유도할 필요가 있다. 전문인력을 양성하기 위해 대학 전문학과 개설 및 대학원 실험실 지원과 연구의 자율성을 보장하여 인적 자원을 확보한다.

기술 개발

기술로는 상용화를 위한 촉매 기술 개발이 가장 중요하다. 또한 각 단계별로 에너지 손실을 줄이는 기초연구가 필요하며, 정밀 화학 물질로의 전환을 위한 효율적인 공정 및 시스템 구축 등 다양한 분야의 응용연구가 연계되어 함께 진행되어야 한다. 산업화에 가장 접근하기 쉬운 분야를 우선적으로 공략함으로써 세계적 주도권을 확보하는 전략도 필수적이다.

인프라 구축

다양한 분야를 포함하고 있는 인공 광합성의 기술적 특성을 고려해야 한다. 한국 인공 광합성 연구센터 KCAP을 중심으로, 연구시설 및 인적 인프라의 확충이 반드시 필요하다. 원천기술이 확보된 경우 실증을 위한 중규모 인프라 구축에 연구비를 투자해야 한다. 인공 환경의 계측과 제어 장비 개발 및 이의 산업화를 위한 연구단지와 협력단 구성도 필요하다.

관련 기관의 협력체계와 연구 영역 확대

대한민국 정부에서는 다양한 환경 문제와 농수산물에 대한 연구는 활발히 진행 중에 있으나 아직 인공 광합성에 대한 인식의 부재로 인해 해당 연구 분야는 진행 중이지 않다. 선진국에서는 정부 차원에서 지원하고 있는 것처럼, 우리나라도 장기적인 기술 개발이 가능하도록 협력체계를 공고히 해 나가야 한다. 이와 함께 현재 KCAP 프로젝트로 진행되고 있는 공동연구를 확대하고 연구 분야도 다양화해야 한다.

요청하다

정부 기관



환경부

기후변화 대응, 환경 문제 해결에 기여



농림축산식품부

식량 생산으로 식품 산업 진흥에 기여



미래창조과학부

미래원천 기술의 혁신 기반 강화



국립환경과학원

새로운 환경정책 안착을 위한 실용 연구



KEITI 한국환경산업기술원

친환경적 생활 확산, 환경 보건 증진에 기여



KIAT 한국산업기술진흥원

산학 협력 및 국제 기술 협력 요청



한국환경공단

환경 문제 해결에 직접적인 기여



녹색인증

녹색인증을 통해 신성장동력 유망 기술 투자

연구 기관

기업에게 제안하다

친환경 관련 사업으로 기업 이미지 향상

녹색산업에 대한 관심 증가와 날이 갈수록 증가하는 환경 규제 강화로 친환경 관련 사업이 활성화되고 있다. **인공 광합성은 친환경 사업에 속하므로 관련 연구 개발은 장기적으로 기업의 이윤을 창출할 뿐만 아니라, 시민에 대한 기업의 이미지 향상에도 큰 도움이 될 것이다.**

어느 기업에서도 시도하지 않은 분야

인공 광합성 기술로 식량을 생산하는 분야는 현재 어떠한 기업에서도 시도하지 않았다. 이러한 최신 기술일수록 먼저 연구개발에 착수하여, 기술 및 시장을 **선점화하는 것이 중요하다.** 추가적인 비용이 발생하지 않는 태양광, 물, 이산화탄소를 자원으로 식물을 생산하고, 소비자에게 판매한다면 큰 이윤을 창출할 수 있을 것이다.

ESS (Energy Storage System)

발전소에서 과잉 생산된 전력을 저장해 두었다가 일시적으로 전력이 부족할 때 송전해 주는 에너지 저장장치를 말한다.

BMS(Battery Management System)

배터리의 상태를 모니터링하여 최적의 조건에서 유지/사용할 수 있도록 배터리 시스템을 자동 관리하는 시스템



LG그룹에 제안하다

LG화학 : 인공 광합성으로 생성된 에너지를 효율적으로 관리하기 위해서 ESS기술 연구에 집중한다. 에너지를 효율적으로 저장하여 **일사량의 제약을 극복**함으로써 시간과 장소에 관계없이 에너지를 적극적으로 활용할 수 있도록 개발한다.



LG이노텍 : 염료감응 태양전지(DSSC)의 상용화를 위해 **효율-수명-안전성 개선이 필요**하므로 이에 관련된 **연구개발을 추진**한다. 또한 수소 배터리의 안정성 확보를 위해 BMS를 적극적으로 활용한다.



팜한농 : **인공 광합성 기술을 통해 친환경 인공비료를 생산**한다. 이를 통해 대한민국의 식량 생산을 늘리고 식량 안보의 사각지대에서 벗어날 수 있도록 이끈다. 또한 제3세계 기아 문제를 해결하기 위해 UNICEF, World Vision과 같은 자선 구호 단체와 연합하여 기부활동을 펼치는 것도 기업의 이미지 향상에도 큰 도움이 될 것이다.

시민에게 소개하다

신재생 에너지의 필요성을 제고하다

누구나 화석연료에 의존하고 있는 에너지 체계에 대해 문제가 많다고 생각하지만, 적극적으로 문제를 해결하려는 노력은 들이고 있지 않다. **현재의 에너지 문제를 인식하고 이를 해결하려는 시민들의 적극적인 노력이 신재생 에너지의 보급화를 촉진시키는 첫 발걸음이 될 것이다.** 그렇기 위해서는 신재생 에너지 관련 교육과 더불어 활발한 캠페인 및 포럼이 선행되어야 한다.

숭실대학교는 한국 신재생에너지협회와 협력해 2017년 2학기부터 '신재생에너지' 교과목을 운영한다. 본 교과목에서는 태양광, 풍력, 연료전지, 지열 등 신재생 에너지 전반에 대해 산업체에서 활동하고 있는 각 분야 전문가가 직접 학생들을 가르친다. 타 학교까지 그 영역을 넓혀 학생들의 관심을 촉구한다.

매년 부안 신재생 에너지 단지에서 기후 환경 변화와 환경 이슈의 해결을 위해 신재생 에너지 기술 개발의 중요성을 알리는 신재생 에너지 국제포럼이 개최된다. 이처럼 다양한 홍보를 통해 시민들의 적극적인 참여를 유도한다.

인공 광합성을 소개하다

신재생 에너지 포럼

태양열, 풍력, 바이오, 파력, 지열 등 다양한 신재생 에너지가 소개되고 있지만 인공 광합성 기술은 아직 그렇지 못한 현실이다. 신재생 에너지 포럼에 참가하여 인공 광합성 기술에 대해 알리고 미래의 탄소 자원화가 가능한 친환경 에너지로서 그 가능성을 소개한다.

캠페인 진행

인공 광합성 기술을 통해 만들어진 식품은 사람들에게 부정적으로 다가올 수 있다. 사전에 이를 방지하기 위해 인공 광합성 기술의 친환경성과 안전성을 강조하는 캠페인을 진행하여 긍정적인 반응을 유도할 수 있도록 한다.



숭실대학교의 '신재생에너지' 교과목 강의 현장

현장맞춤형 교육으로 신재생 에너지 분야의 전문가를 육성한다.



신재생 에너지 포럼

신재생 에너지 분야의 관련 정보를 공유한다.

인공 광합성 태양광 모듈을 도심에 설치하기

일반적인 태양광 발전의 경우 태양전지 모듈의 변환 효율을 12퍼센트로 가정하면 1kW의 전력을 생산하기 위한 최소 면적은 8.3 제곱미터이다. 여기에 태양광 모듈의 이격 거리 및 전력변환 장치의 설치 면적 등을 모두 고려한다면 최소 3배 이상의 면적이 필요하다. 대한민국은 국토 면적이 작고, 특히 건물이 많은 도심 지역에는 실질적으로 적용하기 힘들다. 하지만 **인공 광합성 염료감응 태양전지(DSSC)는 건물 곡선 면에도 적용 가능하며, 투명하고 색상이 다양하기 때문에 도심 속에서 활용이 가능하다.**

예시 1 : 건축물에 적용하기

건축물(외벽, 창문 등)에 DSSC를 설치하여 태양광을 효과적으로 흡수할 수 있도록 설계한다. 태양광을 흡수한 DSSC는 전기를 생산하여 건물에 보급한다. DSSC 설치를 위한 추가적인 장소가 요구되지 않아 효율적이다.

예시 2 : 가로등에 적용하기(분산 배치형)

도심에 많이 설치되어 있는 구조물인 가로등을 적극 활용하여 인공 광합성 기술을 도입한다. 낮에는 태양광, 밤에는 가로등에서 나오는 불빛을 이용해 24시간 에너지를 생산할 수 있다.

한계 : 태양광은 일사량에 의존하기 때문에 일사량이 좋지 않은 우천 시나 야간에는 발전을 할 수 없다. 따라서 **일사량이 낮을 때에도 효율을 높이는 태양전지의 개발이나 기존에 흡수했던 에너지를 저장하기 위한 고성능 배터리 기술의 개발 등이 필요하다.**



태양광 발전소에 이산화탄소 포집 기술 적용하기

공기 중의 이산화탄소를 이용하여 태양광 발전소를 가동시키기에는 효율이 매우 낮아질 우려가 있다. 따라서 **CCU 기술을 도입하여 인공 광합성 기술을 효과적으로 사용할 수 있도록 시스템을 구상한다.**

한계 : CCU 기술이 해결해야 할 기술적 난제로는 비용 절감을 들 수 있다. CCU 비용에 있어서, 이산화탄소 포집 및 저장 비용은 이산화탄소 1톤당 40~90달러이다. 즉, 현재의 CCU 기술로 이산화탄소를 처리하기에는 비용이 너무 높다. 따라서 **상용화된 CCU에 대한 혁신적 개념을 도입한 새로운 기술 개발이 필요하다.**



건축물에 적용된 DSSC

DSSC를 적용한 에너지 자립형 유리온실

분산 배치형

모듈 배치를 건물 및 여러 유휴지로 분산시켜 설치 면적의 효율을 높이는 태양광의 설치 형태

CCU 기술

(Carbon Capture & Utilization)

지구온난화를 완화하기 위한 가교 기술. 화석연료에서 발생하는 이산화탄소를 대기로 배출하기 전에 추출한 후 압력을 가해 액체 상태로 만들어 저장하는 포집 저장 기술을 말한다.

우주 영역에 인공 광합성을 적용한다면!?

2015년 9월 28일, 미항공우주국(NASA)은 화성에 얼음과 액체 상태의 물이 흐르고 있다고 발표했다. 이를 통해 인류의 화성 식민지화 가능성이 주목받고 있는 가운데, 그리닝팀은 화성에 인공 광합성 기술을 도입하는 아이디어를 제시한다.

화성의 식민지화

화성의 풍부한 이산화탄소와 물을 이용하여 초대형의 인공 광합성 발전소를 설립한다. 화성에서 생산된 에너지는 지구와 화성을 연결해 줄 연료 역할을 할 것이며, 고부가가치의 화학제품과 화성에서 생산된 연료는 인류의 삶을 더욱 풍족하게 만들어 줄 것이다. 인공 광합성 기술로 식량 생산 또한 가능하므로, 인류가 직접 화성에 거주할 수도 있을 것이다.

사용하는 효소와 촉매에 따라 생산 물질이 달라지는 인공 광합성

활용 1 : 포름산 (고무제품, 섬유염색, 세척제, 향료, 살충제, 연료전지의 연료)

비스무트(Bi) 촉매를 사용하여 포름산(Formic acid)을 생산할 수 있다. 기존에 포름산을 만들기 위해서는 화석연료에서 합성된 메탄올이 원료로 사용되었다. 그러나 인공 광합성 기술을 활용하면 태양광과 이산화탄소가 원료 자원이 되므로 자연 친화적이다. 참고로, 태양광 에너지로 포름산 1톤을 만들 때마다 이산화탄소가 0.96톤이 줄어든다.

활용 2 : 공기정화

최근 연구에서 에너지로 활용이 가능한 화학 물질을 생산함과 동시에 온실 가스를 청정 공기로 바꿀 수 있는 방법이 발견되었다. **이 기술을 활용하면 에너지를 생산하면서 공기를 정화시킬 수 있을 것이다.** 추가적으로 장비의 소형화가 가능해지면, 대기를 깨끗하게 함과 동시에 에너지를 생산하여 가정에 전원을 공급할 수 있을 것이다.

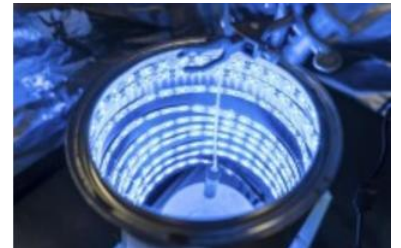
활용 3 : 신약원료물질

다양한 효소 중에서 산화환원 효소는 기존의 촉매로는 거의 불가능한 광학이성질체 또는 신약원료물질의 합성정밀화학물질로 사용할 수 있다고 기대된다. 예시로 산화환원 효소를 이용하면 당뇨병 치료제나 에이즈 치료제의 원료물질 등을 생산할 수 있다. 염료감응 태양전지를 이용해 전기를 생산하는 대신에 NADP+로부터 NADPH를 재생한 후 산화환원효소 반응과 연결시키면 고부가가치의 정밀 화학물질 생산이 가능하다.



화성

화성의 주요 대기 성분은 이산화탄소이며, 대기의 96%를 차지한다. 화성은 태양광, 물, 이산화탄소가 모두 존재하므로 인공 광합성 기술을 적용할 수 있다.



UCF 연구진은 파란색의 LED 광 반응기를 이용해 이산화탄소를 태양 연료로 변환시켰으며, 이와 동시에 공기가 정화됨을 보여주었다.

NADPH

산화환원 효소 반응의 전자전달체로서 작용하는 보조 효소의 일종으로 환원·합성 반응에 관계하고 있다.

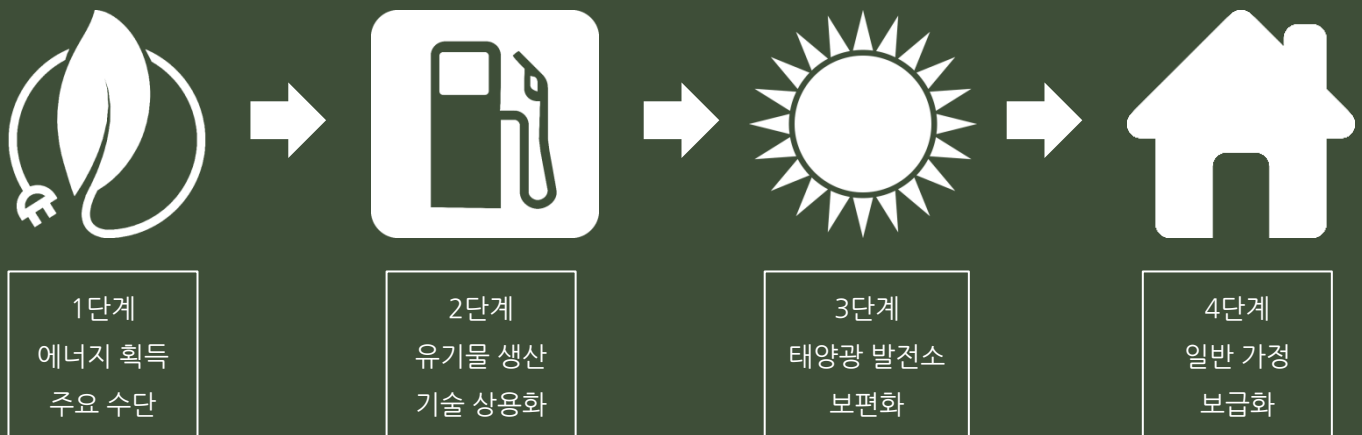
인공 광합성 기술의 확산점 도달 시기

전문가들을 대상으로 인공 광합성 기술의 확산점 도달 시기를 델파이 조사하였다. 그 결과 **세계 기준으로 미국에서 2026년, 국내 기준으로 2030년에 해당 기술이 사회적으로 확산될 것으로 예측되었다.** 참고로, 인공 광합성 기술의 확산점은 해당 기술을 이용한 제품 생산이 기존 시장을 대체하는 비율의 3%가 되는 시점으로 보았다.

델파이 조사(Delphi Survey)

설문조사를 통해 장래에 전개될 상황을 미리 예측하는 기법. 동일한 전문가 집단을 대상으로 3~4회에 걸친 설문지 조사를 통해 진행된다.

인공 광합성 기술의 확산점 도달 이후 단계별 발전 전망



1단계 : 인공 광합성 기술이 사회적으로 확산되는 초기에는 액체 연료를 생산하여 에너지를 발생시킬 것이다. 이는 에너지 획득의 주요 수단이 될 것이다. 또한 다전자 광촉매 분야, 전자 및 양성자 동시 수송 분야, 분자 분리 멤브레인 분야, 나노 융복합 기술 분야 등의 관련 산업이 크게 발전할 것이다.

2단계 : 유기물 생산 기술이 상용화된다면 기존 산업을 대체하여 정밀 화학제품을 제조할 수 있다. 이 과정에서 이산화탄소를 활용하므로 이산화탄소가 감축되고, 2020년 즈음에는 1조 달러 이상의 경제적 효과를 보일 것으로 예상된다.

3단계 : 무한한 에너지원인 태양광을 이용해 화학물질을 생산하는 태양광 발전소가 보편화될 것이다. 신약 원료물질, 광학 이성질체와 같은 고부가가치의 물질들을 친환경적으로 생산할 수 있다.

4단계 : 소형 인공 잎의 개발로 개인이 대기 중에 존재하거나 포집된 이산화탄소를 이용해 에너지를 발생시킬 수 있을 것이다. 최종적으로는 탄수화물과 같은 식량원을 손쉽게 얻을 수 있을 것이다.

최종 기대효과

기대효과 1 : 인공 광합성을 통해 생산한 대체 연료가 주요 에너지원으로 채택 ▶ **에너지 문제 해결**

기대효과 2 : 인공 광합성은 환경 오염을 유발하는 부산물이 생성되지 않음 ▶ **환경 오염 해결**

기대효과 3 : 인공 광합성을 통한 포도당 생산 또는 인공비료 사용 ▶ **식량 문제 해결**



자연의 힘은 우리가 생각했던 것보다 훨씬 더 강력합니다. 모든 것들이 유기적으로 조화를 이루고 있으며, 이러한 자연스러움을 인간이 모방하는 것은 매우 어려운 과정입니다. 자연 광합성을 모방하는 인공 광합성은 다양한 기술이 복합적으로 연계된 어려운 주제였습니다. 인공 광합성만 전문적으로 연구하는 전문가들도 어려워하는 분야인데, 전공자가 아닌 그리닝팀은 더욱 접근하기 어려웠습니다.

쉽지 않은 도전이었습니다. 초반에는 뜻대로 되는 것이 거의 없었기에 하늘이 그리닝팀의 도전을 막는 것이 아닌가 하는 생각이 들 정도로 좌절했습니다. 하지만 시간이 지날수록 하나둘씩 긍정적인 답을 보내주신 관계자분들과 LG글로벌챌린저의 전폭적인 지원 아래에 그리닝팀은 탐방을 서서히 완성해나갈 수 있었습니다.

우선 그리닝팀의 가능성을 보고 탐방을 허가해주신 LG글로벌챌린저 및 사무국 분들에게 감사의 인사를 드립니다. 탐방 초반에 유일하게 저희를 믿고 응원해주신 국민대학교 성영락 교수님께 감사드립니다. 학회에 참석하신 와중에 잠깐의 인터뷰 시간을 내주신 한국수소및신에너지학회 임희천 소장님께 감사드립니다. 탐방을 무사히 완료하면 식사라도 한 번 같이 하자고 제안하셨던 고려대학교 한국식량안보연구재단 이철호 이사장님께 감사드립니다. 바쁜 업무에도 불구하고 인터뷰에 응해주신 한국화학연구원 인공광합성그룹 김재영 선임연구원님께 감사드립니다. UN 본부에서 친절하게 관련 기관들을 소개해주신 문두리 공보정보관님께 감사드립니다. 가장 먼저 해외탐방 인터뷰에 흔쾌히 수락해주신 JCAP LBNL의 Frances Houle 책임연구원님, Jason Cooper 연구원님께 감사드립니다. 단 하나의 논문에 대한 방문으로도 기쁘게 맞이해주신 노스캐롤라이나 주립대학교 Weaver Lab의 Hao Lu 박사님께 감사드립니다. 대한민국에 좋은 기억을 가지고, 방문을 흔쾌히 허락해주신 하버드대학교 Nocera Group의 Daniel Nocera 교수님, Dilek Dogutan 책임연구원님께 감사드립니다.

본 보고서의 핵심 목적은 기술적 전달이 아닙니다. 다만, 누군가 단 한 명이라도 이 보고서를 읽고 인공 광합성의 무한한 가능성에 대해 긍정적인 반응을 보여준다면, 그것보다 큰 기쁨은 없을 것입니다. 본 보고서가 인공 광합성의 발전에 조금이라도 도움이 되고, 옳은 미래로 다 함께 나아갈 수 있는 출발점이 되었으면 좋겠습니다. 감사합니다.

옳은 미래 LG글로벌챌린저 그리닝팀

참고 기사 및 사이트

[기후변화 이야기]/ 사막화, 가뭄, 산불

<http://terms.naver.com/entry.nhn?docId=1397088&cid=42444&categoryId=42444>

[동아사이언스]/ 빛으로 자원을 만든다! 인공 광합성

<http://dongascience.donga.com/news.php?idx=7980>

[중앙일보]/[지식충전소] 햇빛만으로 알코올·식량 만든다..21세기 연금술 '인공 광합성'

<http://news.joins.com/article/21025483>

청소년을 위한 미래과학 교과서 - 신재생에너지/신재생에너지는 과연 희망적이기만 할까?

<http://terms.naver.com/entry.nhn?docId=1982601&cid=47340&categoryId=47340>

[핵융합에너지 정책 백서]/ 새로운 에너지를 찾아라

<http://terms.naver.com/entry.nhn?docId=3343347&cid=58167&categoryId=58167>

[ACS]”A ‘bionic leaf’ could help feed the world

<https://www.acs.org/content/acs/en/pressroom/newsreleases/2017/april/bionic-leaf-could-help-feed-the-world.html>

JCAP (Joint Center for Artificial Photosynthesis)

<https://solarfuelshub.org/>

[PYSORG]/Scientist invents way to trigger artificial photosynthesis to clean air

<https://phys.org/news/2017-04-scientist-trigger-artificial-photosynthesis-air.html>

참고 논문

광촉매 환원/ 오정현, 김수영

기술이 세상을 바꾸는 순간/ 한국화학연구소/ 217- 224

농어촌과 환경 식량안보/ 이철호

식품과학과 산업/ 이철호

유유기 인공광합성 소재 및 활용/ 이남훈, 김성수, 이상명

이산화탄소 환원과 물 메커니즘/ 오정현, 김수영

이산화탄소 환원과 물 분해/ 오정현, 김수영

인공 광합성/ 황윤정, 민병권

인공광합성 광전극연구 효율향상과 플라즈몬 효과/ 박준모, 백정민

인공광합성을 위한 반도체 그래피틱 카본 나이트라이드/ 송지윤, 전영시

인공광합성 태양전지/ 김환규, 서강득

전기화학적 환원/ 오정현, 김수영

전력분야 수소에너지 이용 및 향후 전망/ 임희천

최근 물 분해 광음전극 연구동향 (2)-FTO-photocatalyst / 권기창, 김수영

Lu et al 2015 Appl Biochem Biotechnol/ Hao Lu

Direct synthesis of methane from CO₂/H₂O in an oxygen-ion conducting solid oxide electrolyser/ Kui Xie, Yaoqing Zhang, Guangyao Meng, John T.S. Irvine

Nanowire–Bacteria Hybrids for Unassisted Solar Carbon Dioxide Fixation to Value-Added Chemicals/ Chong Liu, Joseph J. Gallagher