



[2017-3-PV-008]

태양광 활용 광전기화학적 인공광합성 일산화탄소생산의 경제성평가

김진현¹⁾ · 민병권^{1),2)} · 조용성^{1)*}

Economic Evaluation of Photoelectrochemical Carbon Monoxide Production

Jin Hyun Kim¹⁾ · Byoung Koun Min^{1),2)} · Yongsung Cho^{1)*}

Received 20 January 2017 Revised 13 March 2017 Accepted 14 March 2017

ABSTRACT Because of the widespread demand for a low-carbon society, the necessity of renewable energy is one of the most promising solutions for the future. In keeping pace with other environmental-friendly technologies, artificial photosynthesis is one of the latest technologies that produces chemical fuel and various energy sources without pollution. Because artificial photosynthesis uses carbon dioxide to produce chemical fuels, it has been evaluated as a promising core technology that may also provide a solution for climate change. In this study, artificial photosynthesis with a photoelectrochemical cell was designed and economic analysis on carbon monoxide and oxygen production was performed. In addition, a sensitivity evaluation was performed on the change in discount rate, benefit, and cost. The results showed that with a 10% efficiency rate and 5% discount rate on an artificial photosynthesis device, the artificial photosynthesis device generates 1.414 trillion Won of NPV. Therefore, the artificial photosynthesis device has high economic potential. As the efficiency of the device was changed to 10%, 13%, and 15%, the amount of carbon dioxide used for the reaction increased to as much as 24,309ton, 29,200ton and 36,500ton, respectively. This indicates that the artificial photosynthesis device also has a carbon dioxide reduction effect.

Key words Artificial Photosynthesis(인공광합성), Photoelectrochemical cell(광전기화학전지), Carbon monoxide(일산화탄소)
Economic evaluation(경제성평가)

1. 서론

최근 전 세계적으로 화석연료의 고갈이라는 우려와 함께 기후변화 대응에 대한 중요성이 높아지고 있다. 화석연료의 과다한 사용은 지구 온난화를 야기 하였고, 기존의 화석

연료를 대체하여 사용할 수 있는 에너지원에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이에 따라 화석연료의 대안으로 신 재생에너지가 주목받고 있으며, 그 중 태양에너지는 대표적인 재생에너지원으로 주목받고 있다. 태양에너지는 대기 오염물질 배출이 없는 친환경적인 에너지원이며 기술력만 확보한다면 무한하게 에너지를 공급할 수 있는 장점을 가지고 있다. 태양에너지는 인류가 사용할 수 있는 형태의 에너지로 전환이 필요하며, 이와 관련하여 가장 많이 알려진 방법은 태양전지를 이용하여 전기에너지로의 전환을 통해 전력으로 사용하는 것이다. 하지만 이 방법은 기존 에너지

1) GreenSchool, Graduate School of Energy and Environment, Korea University

2) Clean Energy Research Center, Korea Institute of Science and Technology

*Corresponding author: yscho@korea.ac.kr

Tel: +82-2-3290-3037 Fax: +82-2-929-2619

원에 비해 효율성이 낮다는 단점을 갖고 있다. 또한 전력의 생산만으로는 인류가 필요로 하는 에너지를 모두 충족할 수 없으며, 생산 후 저장 및 송배전시 손실 등 다양한 문제점이 있다.

이와 같은 단점을 보완하기 위해서 태양광을 전기에너지로의 전환이 아닌 지구상 풍부한 이산화탄소를 물과 함께 활용하여 연료나 화학원료 형태의 고부가가치 화합물을 생산하는 방법인 인공광합성 기술이 주목받고 있다. 인공광합성은 기존에 배출가스였던 이산화탄소를 원료로 사용하여 인류에게 필요한 화합물을 생산하는 기술이다. 이는 저탄소사회로 전환하는 현재의 기류와 상응하며 기후변화대응이라는 인류가 직면한 과제를 해결 할 수 있는 핵심기술이라고 할 수 있다.^[1]

2. 광전기화학적 인공광합성 기술

인공광합성이란 자연계 식물들이 일으키는 에너지 변환 과정을 모방하여 태양빛, 이산화탄소 및 물을 이용하여 수소, 탄소 그리고 산소로 구성되는 화학물질을 생산하는 기술로 정의된다. 인공광합성은 인류에게 필요한 화학원료 및 원료를 생성하는 방법으로 현재 전 세계적으로 효율성을 높이기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그 중 가장 효율적이며 생성된 물질의 분리·저장을 용이하게 할 수

있는 광전기화학적 인공광합성 기술이 주목 받고 있다.^[1] 이 기술은 태양전지기술 발전과 더불어 효율 향상이 함께 이루어진다는 장점을 갖고 있으며, 다른 기술들에 비해 상용화에 가장 근접한 기술로서 평가되어 최근 관련 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

광전기화학적 인공광합성 기술이란, 태양광을 흡수하여 전자·정공 쌍을 만드는 물질 및 산화, 환원 반응의 촉매 역할을 하는 물질 등이 전극 형태로 구성되어 전기화학적 원리에 의해 작동되는 방법을 통칭한다. Fig. 1의 개념도에서 보듯이 태양광을 흡수하여 전자·정공 쌍을 생성하기 위해서는 산화 및 환원전극 중 적어도 하나는 빛을 흡수할 수 있는 광전극으로 이루어져야 한다. 또한 산화 및 환원전극 모두 각각 반응의 과전압을 최소화하기 위해 촉매 특성을 지녀야 한다.

산화 및 환원 전극에서 생산된 화학종들이 반대 전극의 반응에 참여하는 것을 방지하고 생성물의 분리를 원활하게 하기 위해 분리막이 필요하다. 태양빛을 받아 물분해 과정에 의해 생성된 수소 이온은 환원전극으로 이동하며 수소 이온이 직접적인 환원이 일어나게 되면 수소기체가 생성된다. 그리고 물속에 용해되어 있는 이산화탄소가 수소 이온과의 경쟁 환원반응을 통해 개미산, 일산화탄소, 메탄, 메탄올, 에틸렌 등 다양한 화학적 합성물이 생성된다. 어떠한 물질이 생성되는가는 각각 반응 선택도가 다른 촉매들의

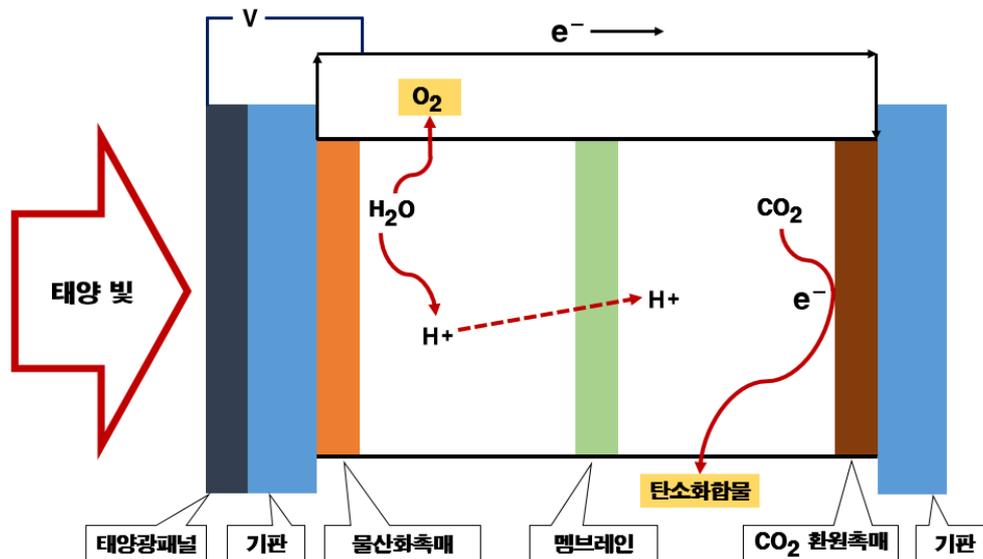


Fig. 1. 광전기화학적 인공광합성 개념도([2]의 내용을 재구성)

특성에 따라 달라지기 때문에 어떤 촉매를 적용하느냐가 인공광합성에 중요한 영향을 미치게 된다.^[2]

전 세계적으로 촉매에 대한 많은 연구가 이루어진 결과, 이산화탄소의 환원반응에 따른 생성물질 및 해당 촉매는 Table 1과 같이 정리 할 수 있다.

Table 1에서 보듯이 첫 번째 그룹에서는 주로 일산화탄소를 생산해내고 두 번째 그룹에서는 HCOO-를 생성한다. 두 그룹의 이산화탄소 환원과정 모두 비교적 간단한 2전자 반응으로 금속의 종류에 따라 높은 선택성을 보이는 경우가 많다. 세 번째 그룹의 경우 이산화탄소의 환원보다는 수소생성에 높은 활성을 보인다. 마지막으로 구리(Cu)는 메탄, 에틸렌, 에탄올 등 탄화수소를 생성한다. 탄화수소란 탄소, 산소, 수소 등의 원소로 이루어져 있는 화합물을 통틀어 지칭하는 말이다.^[1]

통상적으로 일산화탄소를 생성하는데는 금 촉매가 가장 효과적이라고 알려져 있다. 하지만 비싼 가격으로 인해 가격 대비 생성물질의 경제성이 낮다는 한계점이 있었다. 최근 연구결과 은(Ag) 나노 입자를 탄소 담지체(카본페이퍼)에 직접 성장시켜, 이산화탄소를 일산화탄소로 전환시키는 고효율 저비용 촉매가 새롭게 개발되었다. 기존 은(Ag) 촉매의 단점이었던 낮은 효율이 개선되었고, 기존의 장점이었던 저렴한 가격(금 촉매 가격의 1/65 수준)이 더해졌다. 특히 은 나노구조화를 통해 기존 금 촉매 성능의 90%이상 수준까지 보고가 되고 있어, 인공광합성의 주요 촉매로서 주목을 받고 있다.^[3,4]

하지만 인공광합성의 중요성, 가까운 시일 내의 상용화 가능성 등에도 불구하고 인공광합성 시스템을 대상으로 한 경제성분석 연구는 소수에 그치고 있다.

김봉진, 김중욱(2008)은 광생물학적 광합성 방법으로 수소생산을 하는 시스템의 경제성 평가를 진행하였다. 수명주기(life cycle)에 기초한 비용 분석방법을 사용해서 수소

제조가격을 산출하였다.^[5] 동 연구에서는 수명주기 방법을 사용하여 산출한 수소 제조비용을 대리 변수로 하여 광전기화학적 수소 생산 시스템의 경제성을 평가하였다.^[6] 한편 김봉진, 김중욱(2010a)은 광전기화학적 인공광합성 수소 생산시스템 중 Immersing Type의 수소 제조비용을 산출하였다.

그 외 김봉진, 김중욱(2010b)은 태양전지를 이용한 Window Type 광전기화학 수소생산의 경제성을 평가하였다.^[7] 세 논문 모두 아직까지 기존 수소 생산시스템의 경제성과 비교해서 부족한 것으로 분석 되었으며, 이후 개선점으로 시스템의 변환효율, 시스템 지속시간 그리고 초기투자비를 꼽았다. 본 논문은 기존 연구와 달리 일산화탄소의 생산과 부수적으로 생성되는 순산소를 생산물의 기준으로 설정하였고, 대용량의 태양광단지 수준의 시스템 단지를 대상으로 경제성을 분석하였다.

3. 인공광합성 디바이스의 경제성평가

본 논문에서는 효율이 개선된 은 촉매를 활용하여 일산화탄소, 순산소 등을 생성하는 인공광합성 디바이스를 가정한 후 경제성을 평가하였다.

인공광합성 디바이스의 경제성을 평가하기 위해서는 초기투자비, 연간판매수입, 연간운영비, 잔존가치, 시스템 수명, 할인율, 시스템효율 등 다양한 요소들을 고려해야한다. 아래의 Fig. 2는 경제성분석의 기본적인 현금흐름을 나타낸다.

Table 1. 각 금속별 이산화탄소 환원 물질표^[1]

촉매금속	주 생성물
Au, Ag, Zn	일산화탄소
Pb, Hg, In, Sn, Cd, Ti, Bi	HCOO-
Pt, Ni, Fe, Ti	H2
Cu	Hydrocarbon

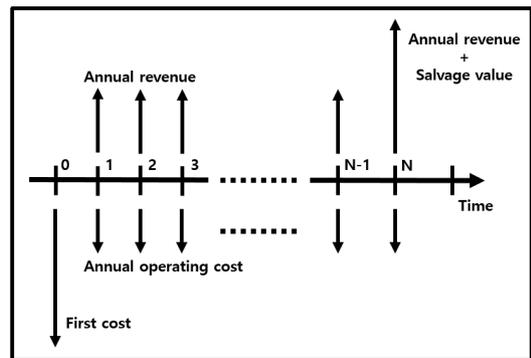


Fig. 2. 경제성분석의 현금흐름도([7]의 내용을 재구성)

3.1 경제성분석의 기본 전제

새롭게 디자인 하는 디바이스의 크기는 가로 1.5m, 세로 1m 정도의 크기로 디자인 하였다. 태양광 발전 패널과 비슷한 크기다. 아래 Fig. 3은 실제 인공광합성 디바이스의 모습이며, Fig. 4는 해당 디바이스의 개략도다.

현재 은 나노입자를 활용한 광전기화학적 인공광합성 기술의 목적은 일산화탄소를 생산하는데 있다. 일산화탄소를 생산하면서 부수적으로 순산소가 함께 생성되는 디바이스 형태다. 현재 디바이스 크기 1.5m², 디바이스 효율(태양광-일산화탄소 전환효율) 10%, 하루 운전시간 3.6시간을 가



Fig. 3. 인공광합성 디바이스

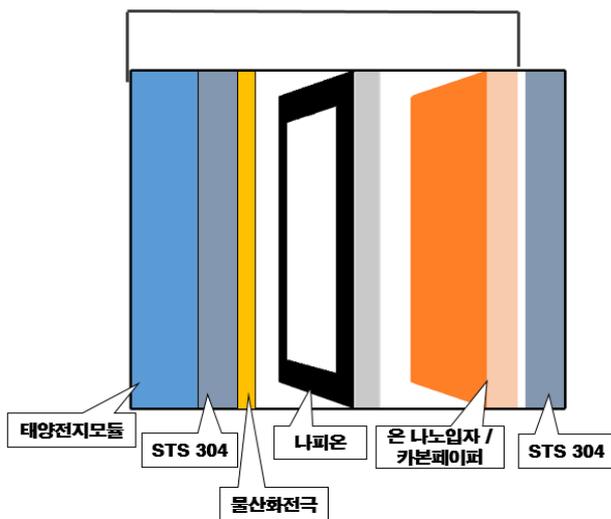


Fig. 4. 인공광합성 디바이스의 개략도

정하여 계산했을 때, 일산화탄소는 하루에 212g이 생산되며, 순산소는 하루에 84.7L가 생산된다. 해당 디바이스의 구성 요소는 광전극, 산화전극, 환원전극, 분리막, 프레임으로 구성되며, 각 구성요소의 재료는 다결정 Si 태양전지 모듈, 나노구조 스테인레스 스틸, 은 나노입자 / 카본 페이퍼, 나피온 멤브레인, 폴리카보네이트 프레임으로 구성된다. 구성 요소와 그 재료에 대한 내용은 Table 2와 같다.

Table 2. 각 금속별 이산화탄소 환원 물질표

구성요소	재료
광전극	다결정 Si 태양전지 모듈
산화전극	나노구조 스테인레스 스틸(STS)
환원전극	은 나노입자/카본페이퍼
분리막	나피온 멤브레인
프레임	폴리카보네이트

본 논문에서는 촉매 성능을 향상 시키기 위해 나노 구조화 되어있는 STS 및 은 나노입자 전극을 실제 디바이스에 적용하지만, 본 경제성 분석에서는 나노구조화 공정 비용요소는 생략하고 소재에 대한 측면만 고려하였다.

태양전지 모듈은 태양빛을 흡수하여 일산화탄소를 생성하는 산화-환원 과정의 시작점 역할을 한다. 폴리카보네이트 프레임과 STS304는 기본적인 디바이스의 외각 구성을 담당하는 지지체 역할을 하며, 은 나노입자는 이산화탄소를 일산화탄소로 환원시키는 특성을 가진 촉매로서 역할을 한다. 카본페이퍼는 은 나노입자를 고정하는 담지체의 역할을 하고, 나피온은 산화전극과 환원전극에서 서로 각자의 반응이 섞임 없이 잘 일어나도록 분리막 역할을 한다.

앞서 제시한 인공광합성 디바이스의 경제성을 평가하기 위해 순현재가치법(Net Present Value; NPV)을 사용하였다. NPV 방법은 어떤 사업의 가치를 나타내는 척도 중 하나로서, 최초의 투자를 시작한 이래로 사업이 끝나는 시점까지의 연도별 순편익(편익에서 비용을 뺀 값)의 흐름을 일정한 할인율을 적용하여 현재가치로 환산한 것이다. 이 현재가치로 환산한 매년의 가치를 모두 합한 값이 총 순현재가치이며 이 값이 '0'보다 클 경우 경제성이 있는 사업이라고 판단한다.

$$NPV = \sum_{t=1}^N \frac{C_t}{(1+r)^t} - C_0$$

- t : 현금흐름의기간
- N : 사업의 전체 기간
- r : 할인율
- C_t : 시간 t에서의 순현금흐름
- C₀ : 투자자본(투자액)

C_t는 해당 기간에서 발생한 편익에서 비용을 차감한 순 편익을 나타낸다. 사업의 전체기간(N)동안 할인율(r)을 적용하여 사업의 타당성 여부를 결정한다.

3.2 분석 자료

본 논문에서는 새로운 인공광합성 디바이스를 대상으로 하여 경제성 평가를 수행하였다. 구성요소별 조건은 다음과 같다. 해당 디바이스를 제작하기 위해서 꼭 필요한 필수 구성요소는, 3.1절에서 설명한대로 은 나노입자 / 카본페이퍼, STS304, 태양전지 모듈, 폴리카보네이트 프레임, 나피온 여섯가지다. 아래 Table 3은 1개 디바이스 제작 시 필요한 각 구성요소별 필요량과 금액을 나타낸다.

산화-환원 반응을 일으키도록 태양빛을 흡수하는 태양 광패널은 1m × 1.5m 크기로서 광전극으로는 실리콘 전극을 사용하는 것으로 가정하였다. 가격은 현재 시장에서 통용되고 있는 가격인 137,500원으로 책정하였다. 반응 촉매로는 일산화탄소를 생산하는 촉매인 은 나노입자를 사용하였다. 원래는 금 촉매가 가장 효율이 좋다고 알려져 있지만, 은 나노 입자를 탄소 담지체에 직접 성장시켜, 이산화탄소를 일산화탄소로 전환시키는 고효율 저비용 촉매가 새

Table 3. 디바이스 제작에 필요한 구성요소별 가격과 필요량 (1대 기준)

구성요소	필요량	가격
은 나노입자	1.00g	\$ 4.02
카본페이퍼	1m × 1.5m	1,640,000 원
나피온	1m × 1.5m	1,600,000 원
폴리 카보네이트 프레임	1m × 1.5m	16,500 원
STS304	1m × 1.5m	14,200 원
태양광패널	1개	137,500 원
디바이스 생산 가격		3,412,670원/대

롭게 개발 되었으므로 해당 기술을 적용 시켰다.

해당 기술을 적용하여 디바이스 1대를 만드는데 필요한 은의 양은 1,00g이며^[4] 가격은 \$4.02로 책정하였다. 또한 은 나노입자의 담지체 역할을 하는 카본페이퍼의 가격은 1,640,000원으로 책정하였다.

인공광합성 디바이스의 지지체 역할을 하는 폴리카보네이트 프레임과 STS304의 경우, 1m × 1.5m의 크기로 제작하는 것을 기준으로 하였으며, 각 요소의 가격은 1개당 각각 16,500원, 14,200원으로 조사되었다.

산화-환원 전극 사이에서 각각의 반응을 용이하도록 도와주는 멤브레인(membrane)은 나피온을 사용하였으며 가격은 1,600,000원으로 책정하였다. 요소별 가격책정은 모두 각 요소별 판매사와의 전화인터뷰로 진행하였으며, 더 정확한 정보가 필요한 경우 견적서를 요청하여 산정하였다.

아직까지 인공광합성을 대규모로 건설한다는 가정하에 경제성을 평가한 연구는 존재하지 않는다. 본 논문에서는 이런 상황을 감안하여 국내 3MW 용량의 대용량 태양광발전단지에 인공광합성 디바이스로 대체·설치하는 것으로 가정하였다.

즉, 35,000m²규모의 유희부지에 10,000개의 인공광합성 디바이스를 설치한다는 것을 가정하였다. 이에 대한 설비설치비용은 김봉진, 김중욱(2008)의 가정을 참고하여 패널의 10,000개 생산요소 비용의 15%를 가정하였다. 연간 운영비용은 부경진(2006)의 연구에서 가정한 태양광발전단지 책정비용을 고려하여 10,000개의 생산요소 비용과 설비

Table 4. 경제성분석 가정

시스템효율	10%, 13%, 15%
할인율	3%, 5%, 7%
경제성분석방법	NPV
사업기간	20년
설비내구연수	20년
디바이스 크기	가로1.5m 세로1.0m
패널설치 수	10,000개
Benefit	일산화탄소, 순산소, 이산화탄소
Cost	1. 디바이스 생성에 필요한 물질요소 2. 시공비용 : 요소투자비용의 15%가정 3. 운영비용 : 직접투자비용의 1%가정과 membrane의 교체가격

설치비용을 합한 총 초기투자비용의 1%로 가정하였다.^[8]

할인율은 5%를 기준으로 3%와 7%까지 민감도 분석을 진행하였으며, 디바이스의 효율도 현재 10%를 기준으로 앞으로 효율이 개선되었을 때를 가정하고 13%와 15%일 때의 변화까지 책정하였다.

또한 시스템의 용량을 기본가정인 10,000개 패널 설치에서 각각 50%, 30%로 줄인 규모의 NPV분석도 함께 진행하여, 비교적 소규모의 단지에서의 경제성도 함께 분석하였다.

경제성 분석을 위한 인공광합성 디바이스의 편익(Benefit)으로는 해당 디바이스에서 생성되는 일산화탄소와 순산소, 그리고 이산화탄소를 포함시켰다. 기존의 다른 경제성 평가에서는 이산화탄소는 배출가스로 간주하여 비용으로 처리하였다. 본 연구에서는 기존 연구와 달리 인공광합성 디바이스는 이산화탄소를 연료로 사용하여 일산화탄소와 순산소를 생산하는 system이라는 점을 감안하여 탄소감축효과가 발생하는 또 다른 편익으로 고려하였다.

일산화탄소 판매수익, 순산소 판매수익, 그리고 이산화탄소 감축량을 화폐가치로 환산하였다. 판매 가격의 경우, 일산화탄소는 132만원/ton^[10], 순산소의 가격은 375원/L^[11], 그리고 이산화탄소 감축에 따른 편익은 현재 탄소배출권 거래가격인 톤당 19,000원을 적용하였다. 단 이산화탄소 감축량은 인공광합성 디바이스의 반응에서만 쓰인 양을 기준으로 분석하였다.

현재 기준 효율 10%, 하루 일조시간을 3.6시간 기준으로 계산 했을 때, 일산화탄소와 순산소는 각각 212g/day, 84.7L/day가 생산되며, 이를 위해 소비되는 이산화탄소의 양은 333g/day로 측정되었다. 편익으로 책정된 요소들의 가격 및 생산, 소비량에 대한 정보는 Table 5와 같다.

3.3 경제성 분석 결과

현재 기술력인 10% 효율과 5%의 할인율을 적용 했을

Table 5. 편익 요소들의 단위 가격 및 생산량

이산화탄소	일산화탄소	순산소
<ul style="list-style-type: none"> ■ 감축량 : 333g/day ■ 가격 : 17,000원/ton 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 생산량 : 212g/day ■ 가격 : 132만원/ton 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 생산량 : 84.7L/day ■ 가격 : 375원/L

때, 일산화탄소를 생산하는 인공광합성 기술의 경제성분석을 진행하였다.

10,000개의 패널 생산비용은 약 341억원으로 추산되었다. 이에 따라 설비설치 비용은 341억의 15%인 약 51억원으로 가정하였다. 기타 운영비용은 패널생산비용과 설비설치비용을 합친 직접투자비용의 1%인 약 3억원으로 책정되었다. 기타 운영비용에는 분리막의 교체비용과 설비의 보수비용 등이 포함된다. 총 초기 투자비용은 약 395억원이고, 매년 발생하는 운영, 유지비용은 약 3억원으로 책정되었다.

3.2절에서 언급한 내용을 바탕으로 1년간의 편익을 추정해 보았을 때, 이산화탄소 감축 효과의 화폐적 가치는 약 2,3천만원, 일산화탄소 생산에 따른 수익은 약 10억원 그리고 순산소 생산에 따른 수익의 크기는 약 1,159억원으로 추산되었다. 이에 따라 연간 총 편익은 약 1,169억원으로 추정되었다.

위에 기술한 내용을 적용하여 할인율 5%로 사업기간 20년의 경제성의 값을 NPV로 구하면 14,140억원이 도출된다. 즉, 20년간의 NPV가 '0'보다 크기 때문에 경제성이 있다는 것을 알 수 있다. 또한, 이산화탄소를 연료로 사용하는 것은 자연스럽게 배출가스인 이산화탄소를 감축한다는 것을 의미한다. 사업기간인 20년 동안 인공광합성 디바이스를 사용할 경우 이산화탄소 감축량은 총 24,309ton으로 추정되었다.

3.4 민감도분석 결과

인공광합성 일산화탄소 생산 디바이스에 영향을 줄 수 있는 주요 요인은 해당 디바이스의 효율성과 할인율이다. 본 논문에서는 인공광합성 기술의 발전을 고려하여 효율성이 13%, 15%로 상승하는 조건과 할인율이 3%로 낮아졌을 때 혹은 7%로 상승했을 때의 조건을 적용하여 NPV값이 어떻게

Table 6. 편익 및 비용의 산정

사업기간의 총 비용		
패널생산비용	설비설치비용	매년운영비용
341억원	51억원	3.3억원/년
사업기간의 총 편익		
이산화탄소	일산화탄소	순산소
2.3천만원/년	10억원/년	1,159억원/년

Table 7. 효율변화에 의한 편익의 변화

	이산화탄소 감축량	일산화탄소 생산량	순산소 생산량
효율 10%	333g/day	212g/day	84.7L/day
효율 13%	400g/day	276g/day	110.1L/day
효율 15%	500g/day	318g/day	127L/day

Table 8. 민감도 분석 결과

민감도변화 (NPV)		효율		
		10%	13%	15%
할인율	3%	16,958억원	22,177억원	25,649억원
	5%	14,140억원	18,512억원	21,421억원
	7%	11,961억원	15,678억원	18,150억원
이산화탄소 감축량		24,309ton	29,200ton	36,500ton

게 변화하는지 살펴보았다. 또한 설비용량을 50%와 30%로 각각 줄인 소규모로 분석한 NPV값의 변화도 살펴보았다.

효율성의 변화에 따른 이산화탄소 감축량, 일산화탄소 생산량 및 순산소의 생산량 변화는 Table 8에 나타나 있다.

Table 8에 나타나 있듯이 현재 실험실 규모의 수준(효율 10%)에서 할인율이 3%로 낮아진 경우 NPV 값이 약 16,958 억원으로 증가하였고, 할인율이 7%로 올라간 경우에는 약 11,961 억원으로 감소될 것으로 추정되었다. 또한 효율성이 13%로 증가할 경우, 할인율 5%로 분석한 값도 효율성이 10%일 때보다 약 1,554억원 상승한 약 18,512 억원으로 추정되었다. 반면 효율성이 13%로 상승한 상황에서 할인율이 3%와 7%로 변화한 경우, 각각 약 22,177 억원과 약 15,678 억원으로 추정되었다. 효율성이 15%로 상승한 경우, 할인율이 3% 일 때의 NPV값은 약 25,649 억원으로 추정되었고, 5%일 때는 21,421 억원, 그리고 7%로 상승한 경우에는 18,150 억원으로 추산되었다.

한편 디바이스의 효율 변화에 따라 감축되는 이산화탄소의 양도 변화 했다. 기준 효율 10%에서는 24,309ton이 감축 되었으며, 효율이 13%, 15%로 상승한 이후에는 각각 29,200ton, 36,500ton 까지 이산화탄소 감축효과가 상승한 것으로 산정 되었다.

기존의 10,000개 패널을 설치한다는 가정에서 50%와 30%로 각각 설비용량을 감축했을 때의 npv값은 아래 Table 9에 정리하였다. 효율은 현재 수준인 10%를 기준으로 분석

Table 9. 설비용량을 감축했을 때의 NPV변화

민감도변화 (NPV)		할인율		
		3%	5%	7%
설비	30% 감축	5,086억원	4,241억원	3,588억원
용량	50% 감축	8,476억원	7,068억원	5,979억원

하였다.

설비용량을 30%로 감축하였을 때의 NPV값은 할인율 3%, 5%, 7% 일 때 각각 5,086억원, 4,241억원, 3,588억원으로 분석 되었다. 또한 50%로 감축하였을 때의 NPV값은 8,476억원, 7,068억원, 5,979억원으로 분석 되었다. 비교적 소규모의 설비용량에서도 NPV값이 양으로 나온 것으로 분석되어 경제성이 있는 것으로 확인되었다.

4. 결론

본 논문에서는 태양광을 이용한 일산화탄소 생산 인공광합성 디바이스를 새롭게 디자인하여 경제성 평가를 수행하였다. 새롭게 은 나노 촉매를 개발한 연구진과의 미팅을 통해 효율별 일산화탄소, 순산소의 생산량과 이산화탄소감축량을 산정하였으며, 이를 기초로 하여 NPV평가 방법에 시장에서의 가격을 도입해 해당시스템의 경제성을 평가하였다.

새롭게 디자인한 인공광합성 디바이스는 효율10%, 할인율 5%의 일반적인 조건에서 14,140억원의 NPV값을 가지고, 24,309ton의 이산화탄소감축효과를 보이는 것으로 산정되었다. 가장 낙관적인 예상 수치인 효율 15%, 할인율 3%의 조건에서는 25,649억원의 NPV값을 가지며, 이산화탄소 감축량은 36,500ton을 나타냈다. 가장 보수적인 조건인 효율 10%, 할인율 7%에서는 11,961억원의 NPV 값을 가지며 낙관적인 조건의 시나리오와 큰 차이를 보였다. 하지만 가장 보수적인 시나리오에서조차도 큰 NPV 값을 가지며, 이산화탄소 감축효과도 있는 것으로 확인되었다.

또한 설비용량을 30%로 감축하였을 때의 NPV값은 할인율 3%, 5%, 7% 일 때 각각 5,086억원, 4,241억원, 3,588 억원으로 분석 되었다. 또한 50%로 감축하였을 때의 NPV 값은 8,476억원, 7,068억원, 5,979억원으로 분석 되었다. 기존의 설비용량보다 작은 설비용량에서도 경제성이 확보

되는 것으로 분석되었다.

현재 인공광합성의 개발은 주로 수소생산에만 국한되어 있었다. 하지만 산업계 전반적으로 사용 가능하고, 또한 전환하여 인간에게 필요한 에너지로도 활용 가능한 일산화탄소를 생산하는 방법을 활용하는 것도 충분히 경제성이 있는 것을 확인하였다. 현재 투자비에서 가장 큰 부분을 차지하는 나피온을 대체할 수 있는 membrane의 개발과 새로 개발된 일산화탄소를 생산하는 은 나노 촉매의 보급, 그리고 이를 위한 정책적 지원책이 함께 발전해야 인공광합성의 빠른 보급이 이루어 질 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 KU-KIST스쿨 운영지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

- [1] 민병권, 황윤정, 박현서, 2016, 광전기화학적 인공광합성 촉매 기술, NICE(News & Information for Chemical Engineers), 한국화학공학회, 34권 2호, pp. 131-139.
- [2] 황윤정, 민병권, 정광덕, 2013, 기획특집: 에너지 하베스팅, 인공광합성, 공업화학전망, 16권 4호, pp. 1-17.
- [3] 한국과학기술연구원 KIST 홍보팀, 2015, 이산화탄소 자원화를 위한 고효율 은 나노 촉매 개발, KIST 보도자료.
- [4] Cheonghee Kim, Hyo Sang Jeon, Taedaehyeong Eom, Michael Shincheon Jee, Hyungjun Kim, Cythia M. Friend, Byoung Koun Min, and Yun Jeong Hwang, 2015, Achieving Selective and Efficient Electrocatalytic Activity for CO₂ Reduction Using Immobilized Silver Nanoparticles, *J. Am. Chem. Soc.*, 137 (43), pp. 13844-13850.
- [5] 김봉진, 김종욱, 2008, 국내 광생물학적 수소생산의 경제성 평가, 한국수소 및 신에너지학회 논문집, 19권 4호, pp. 322-330.
- [6] 김봉진, 김종욱, 2010a, 국내 광전기화학 수소생산의 경제성 평가, 한국수소 및 신에너지학회 논문집, 21권 1호, pp. 64-71.
- [7] 김봉진, 김종욱, 2010b, 태양전지를 이용한 국내 Window Type 광전기화학 수소생산의 경제성 평가, 한국수소 및 신에너지학회 논문집, 21권 6호, pp. 595-603.
- [8] 부경진, 2006, 태양광발전 시스템의 경제성 분석, 신재생 에너지전문가 연수교육 발표자료, 에너지관리공단 신재생 에너지센터.
- [9] 녹색기술센터, 2015, 이산화탄소를 활용한 21세기 연금술, 인공광합성, *Green Tech Horizon*, 6호, p. 12.
- [10] (사)한국물가협회, www.kprc.or.kr