

Article

해양바이오수소개발 사업의 상업생산을 위한 예비경제성평가

박세현^{1*} · 유영돈² · 강성균³¹한국해양과학기술원 해양정책연구소

(15627) 경기도 안산시 상록구 해안로 787

²고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터

(17180) 경기도 용인시 처인구 백암면 고안로 51번길 175-28

³한국해양과학기술원 해양생명공학연구센터

(15627) 경기도 안산시 상록구 해안로 787

Economic Feasibility Study for Commercial Production of Bio-hydrogen

Se-Hun Park^{1*}, Young-Don Yoo², and Sung Gyun Kang³¹*Ocean Policy Institute, KIOST**Ansan 15627, Korea*²*Plant Engineering Center, Institute for Advanced Engineering**Yongin 17180, Korea*³*Marine Ecosystem and Biological Research Center, KIOST**Ansan 15627, Korea*

Abstract : This project sought to conduct an economic feasibility study regarding the commercial production of bio-hydrogen by the marine hyperthermophilic archaeon, *Thermococcus onnurineus* NA1 using carbon monoxide-containing industrial off-gas. We carried out the economic evaluation of the bio-hydrogen production process using the raw material of steel mill by-product gas. The process parameter was as follows: H₂ production rate was 5.6 L/L/h; the conversion of carbon monoxide was 60.7%. This project established an evaluation criterion for about 10,000 tonne/year. Inflation factors were considered as 3%. The operating costs were recalculated based on prices in 2014. The total investment required for development was covered 30% by capital and 70% by a loan. The operation cost for the 0.5-year test and integration, and the cost for the first three months in the 50% production period were considered as the working capital in the cost estimation. The costs required for the rental of office space, facilities, and other related costs from the construction through to full-scale production periods were considered as continuing expenses. Materials, energy, waste disposal and other charges were considered as the operating cost of the development system. Depreciation, tax, maintenance and repair, insurance, labor, interest rate charges, general and administrative costs, lubrication and miscellaneous expenses were also calculated. The hydrogen price was set at US\$ 4.15/kg for the economic evaluation. As a result, the process was considered to be economical with the payback period of 6.3 years, NPV of 18 billion Won and IRR of 26.7%.

Key words : bio-hydrogen, *Thermococcus onnurineus* NA1, steel mill by-product gas, commercial production, economic evaluation

*Corresponding author. E-mail : shpark@kiost.ac.kr

1. 서 론

최근 유가의 변동과 기후변화협약 발효 등으로 에너지 문제가 커다란 사회적 이슈로 부각되고 있는 가운데 수소는 미래대체연료나 청정에너지 매개체의 하나로 주목받고 있다. 현재 대부분 화석원료에서 생산되고 있는 수소는 장기적으로 신재생 방식의 수소생산 기술이 요구된다. 이에, 미생물을 이용한 바이오수소 생산기술은 낮은 생산성과 생산효율이 상용화의 걸림돌로 지적받아 왔었지만, 최근 높은 생산효율을 가지고 있는 초고온 고세균 이용 바이오수소 연구가 본격화 되고 있다(해양수산부 2013, 2015; Kim et al. 2010; Lim et al. 2014).

초고온 고세균에 의한 바이오수소 생산 연구는 대부분 해외에서 진행되어져 왔으나, 국내에서는 한국해양과학기술원에서 대양 탐사를 통해 심해 열수구에서 분리한 초고온성 고세균 '써모코커스 온누리누스 NA1(*Thermococcus onnurineus* NA1)' 균주가 염색체 상의 수소화효소의 함량이 기존 바이오수소 생산 균주보다 2배 이상 높다는 유전체 분석결과 발표 이후 활발히 진행되고 있다(Bae et al. 2006; Lee et al. 2008).

최근에는 기존의 알려진 에너지생산 기작을 깨는 독특한 생명현상 및 높은 바이오수소 생산성으로 인해 학계 및 산업계의 커다란 주목을 받고 있다(Bae et al. 2015; Kim et al. 2010; Kim et al. 2013; Lee et al. 2016; Lim et al. 2014).

써모코커스 온누리누스 NA1은 다양한 수소화 효소를 함유하고 있기 때문에 일산화탄소, 개미산, 전분, 유기물 등 재생자원을 이용한 수소생산이 가능하다는 잇점을 가지고 있으며, 특히 제철소, 폐기물 소각로, 화력발전소 등 산업부생가스의 주성분인 일산화탄소를 이용한 바이오수소 생산도 가능한 점을 확인하였다(Kim et al. 2013; Rittmann et al. 2015).

이를 바탕으로, 2011년에는 20 L 규모, 2012년에는 100 L 규모의 고온혐기 바이오수소 생산 파일럿 플랜트를 구축하여 생산 실증시험에 성공하였으며, 2015년에는 톤 규모 배양기를 구축하고 석탄가스화를 통해 생산된 합성 가스를 원료물질로 이용하여 바이오수소의 생산·저장·활용체계 실증시험도 성공하였다(해양수산부 2012, 2014, 2015, 2016).

본 연구는 이와 같은 연구개발 성과를 기초로 Heat & Mass Balance, Piping & Instrument Diagram, Material Selection Diagram, Equipment List and Specification Utility calculation 등을 통한 최적 공정설계로 산출된 플랜트 건설비, 운영비를 바탕으로 해양바이오수소개발 사업의 상업생산을 위한 기술·경제적 개발 가능성을 분석하고자 한다.

제철소로부터 배출된 배기가스를 이용하여 일산화탄소(CO) 투입 유량과 균주농도를 변화시켜 수소 생산성을 제고하고, 상업적 생산 규모에서 경제성을 확보할 수 있는지를 평가하는 방법으로서, 앞으로의 바이오수소 실용화 기술개발에 있어 연구자나 기술자의 기술개발과제와 방향성을 제시하고 제안된 연구개발비를 효과적으로 사용할 수 있도록 기본적인 정책결정의 판단기준으로서의 역할을 수행할 수 있을 것이다.

2. 경제성 평가방법

시스템 개요 및 처리량

개발 시스템은 반응시스템, 분리시스템, 압축시스템, 파이프라인 수송, 환경수처리설비 등으로 구성되어 있다.

먼저 제철소로부터 배출된 부생가스(LDG)로부터 수소 연간 10,000톤을 생산하기 위해 330톤 처리용량의 반응기 10기에, NA1 균주를 접종하고 LDG가스(H_2 2%, CO 64.2%, CO_2 17.8%, N_2 15.9%)를 공급해 주어 수소 생산성 5.6 H_2 L/L/h 규모로 수소(H_2), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO_2), 질소(N_2)의 혼합가스(H_2 29.3%, CO 18.5%, CO_2 40.7%, N_2 11.5%)를 생산한다고 추정하였다(조 등 2009). 이후, 물리흡착법에 의한 분리·회수기술로서 제올라이트를 이용한 PSA(Pressure Swing Adsorption) 법으로 수소(H_2)를 분리·회수하여 연간 10,000톤의 수소가스(H_2)를 생산하는 것으로 가정하였다.

생산된 수소가스는 수송의 편리성을 도모하기 위해 압축기(Compressor)를 이용하여 30 MPa까지 승압한 후, 26 B의 압력배관용 탄소강 강관 파이프라인을 통하여 수송 저장조까지 1 km를 수송하는 것으로 상정하였다. 그 외, 반응시스템에서 배출된 용액은 환경수처리설비를 통하여 정수처리과정을 거쳐 배수되는 것으로 가정하였다.

기술 파라미터의 가정

부생가스 상압운전 기준에서 현재 기술수준 250 mmol/L/h 경우, 연간 수소 생산량은 20 L 반응기 실운전을 기반으로 다음과 같은 실험조건으로 추정되었다. CO 이용 수소생산성 데이터는 100% CO를 이용한 실험결과이지만, 본 연구에서는 원료가스물질로서 100% CO 대신 부생가스(LDG)를 사용하여 해당 수소 생산성을 달성하였음을 가정하여 경제성을 분석하였다. 100% CO로부터 바이오수소 생산 실험 조건 및 결과는 다음과 같다.

- MM1 배지(yeast extract 10 g/L 함유), 연속식 배양, 조업부피 10 L
- 반응온도 85°C, 가스(100% CO) 공급속도 1.5 L/min, 희석속도 0.1 h⁻¹

- 34시간 동안 평균가스 함량은 H₂ 28.4%, CO 40.7%, CO₂ 29.1%

실험결과 34시간 동안 평균 수소 생산성은 5.6 H₂ L/L/h으로 나타났으며, 이때의 CO 전환률은 60.7%로 추정되었다. 부생가스(LDG)를 원료물질로 사용하여 CO 전환율 60.7%를 가정하였을 경우, NAI에 의해 생산되는 혼합가스의 조성은 다음과 같다: H₂ 29.3%, CO 18.5%, CO₂ 40.7%, N₂ 11.5%.

20 L 반응기 실험결과를 바탕으로 반응기 1기당 수소 생산성 5.6 H₂ L/L/h로 가정할 경우, 연간 수소 생산량은 11,088,000 kL(990톤)로 추정된다. 실운전 기준으로 연간 330일(운전시간 7,920시간)을 조업일수로 설정한다면, 조업부피(working volume)는 250톤으로 추정되고, 연간 10,000톤 상업 수소생산 규모로 확장하여 공정설계를 해 본다면, 총부피 330톤 처리규모의 반응기 10기가 요구된다.

경제 파라미터의 가정 개발일정

자금조달은 총 투자자금의 30%를 자기자본으로, 그 잔여부분 70%는 차입금으로 조달하는 것으로 가정하였다.

개발시스템은 건설에서부터 경제적 조업까지 총 23년을 설정하였다. 플랜트 건설에 2년, 0.5년간의 테스트 가동을 거쳐 0.5년간 50% 생산, 4년째부터 20년간 100% 생산하는 스케줄을 설정하였다. 개발시스템의 건설 계약과 동시에 연락사무소 설치, 사원 기술교육 실시, 약간의 R&D비용 등과 차입금의 이자를 전부 합쳐 준비금(Continuing Expenses)으로 설정하였다.

또한, 테스트 가동기간 중에는 운전자금으로서 0.5년간의 운전비를 계상하고, 50% 생산체계에 들어갈 때 운전자금으로서 3개월분을 준비하였다(박과 양 2009). 여기에

서 3개월분의 운전자금의 의미는 수소생산 대금이 회수되는데 3개월이 걸린다고 보았기 때문이다. 전체적인 조업 스케줄을 Fig. 1에 나타낸다.

스케일 계산법

플랜트 건설비의 계산방법은 개별적산법, 단가법, 비율법, 지수법 등이 있으며 각각에는 장단점이 있다. 여기서는 플랜트 및 단일기기의 비용은 용량에 산술비례하는 것이 아니라 지수비례에 변동한다는 특성을 이용해 아래와 같이 지수법을 채택하였다. n은 정수(0.5~0.9)이며, 본 연구에서는 0.6을 적용하였다(자원·에너지 개발프로젝트 비용추정 정밀도를 위한 지수선택은 0.6~0.7이 가장 많이 사용되고 화학플랜트에 있어서는 0.6이 추정 정밀도가 가장 높은 것으로 보고되고 있다(Japan Coal Energy Center 1993)).

$$P_1 = P_2 \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^n \tag{1}$$

P₁: 신규 플랜트 또는 기기의 비용, P₂: 기존 플랜트 또는 기기의 비용, L₁: 신규 플랜트 또는 기기의 용량 크기, L₂: 기존 플랜트 또는 기기의 용량 크기

원가요소의 설정

원가요소는 다음과 같이 설정하고 다년에 걸쳐 경제성 분석을 실시하였다. 운전비의 산출에 있어서는 2014년도를 기준년도로 설정하고, 인플레이션은 최근 5년간('10~'14년)의 평균치인 3%를 적용하였다.

먼저, 부생가스 원료 도입비는 현대제철소에 의뢰하여 LDG 1 Nm³당 20.3원의 원가를 상정하였다. 수소 10,000톤 생산 시 전체 LDG의 원가를 고려하면 현재와 같이 60% 전환율에서는 3.1억 Nm³가 요구되고, 총 부생가스 원가는 63.2억원으로 추정된다. 변동비는 배지(Yeast

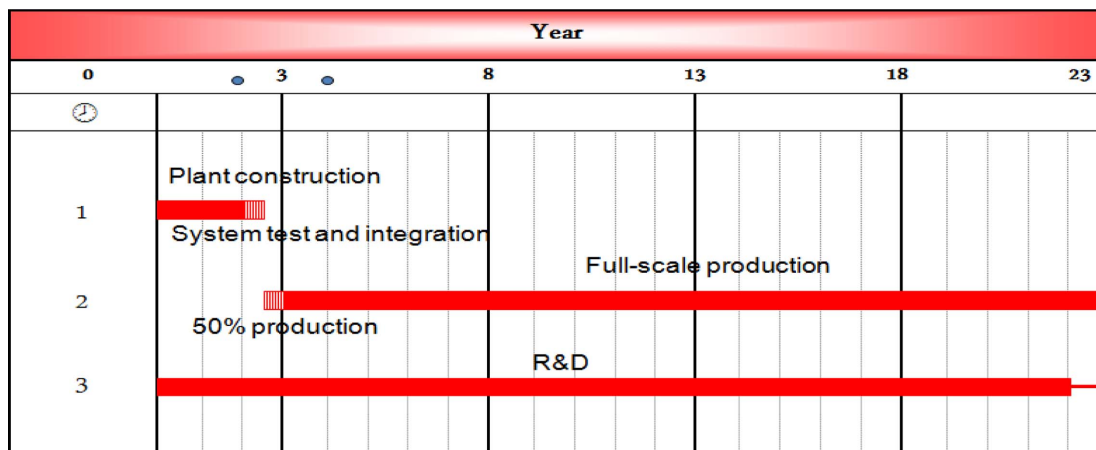


Fig. 1. Project schedule

Extract), 전기·수도 등 유틸리티비, 수처리비 등을 고려한다. 주요 변동비로는 연간 1만톤 생산 시 배지는 연간 266톤이 소요되고 1톤당 1,650,000원으로 책정하였다. 또한, 전력량은 연간 51,948 kWh가 소요되고 전력요금은 산업용(갑) 고압 A 기준으로 중간부하 요금의 평균값으로 산정하여 73.9원/kWh로 책정하였다. City water는 가스냉각 열교환기의 냉각수 보충량(make-up), Boiler feed water로서 연간 55,317톤, Sea water는 26,613톤이 소요되고, 용수요금은 1톤당 490원을 적용하였다. 본 공정에서 혐기성소화여액을 사용할 경우 처리비용은 50,000원/톤을 적용하였다.

감가상각비는 설비투자액에 의해 고정화된 자산은 빠른 시간 내에 감가상각에 의해 유동화 하는 것이 유리하기 때문에 스피드가 빠른 정률법을 적용하여 감가상각을 실시했다. 기획재정부 고시의 내용년수에 의거하여 감가상각을 실시하고 잔존가치율은 허용 가능한 5%를 준용하였다. 개발시스템은 탄산가스·산소 제조설비에 해당하는 것으로 가정하여 반응설비, 압축설비, 가스수송을 위한 파이프라인 설비, 액체가스 저장 설비 등을 내용연수 20년, 감가상각율 0.109로 설정하여 적용하였다(한국감정원 1999).

수선비에 대해서는 탄산가스·산소 제조설비에 적용되는 내용을 준용하여 H₂ 반응·생산, 압축 등의 시스템과 다른 부대설비에 대해서는 제조설비 투자액의 5%를 적용하였다(박 등 2005). 인건비는 플랜트에 종사하는 인력은 개발 시스템 운전에는 필요한 노무종류에 맞추어 추정하였다. H₂ 반응·생산, 압축시스템에 조업노무, 간접노무(안전), 관리감독, 사무공통 등을 평가하여 필요한 노무량에 급료를 적용하여 산출하였다. 손해보험비는 플랜트 제조설비에 대해서는 석유화학 플랜트의 기획설계에 사용되는 제조설비 투자액의 1%를 적용하고 작업원에 대한 보험료를 추가하여 설정하였다.

재산 및 종합토지세는 개발시스템 플랜트, 건축물에 대하여 지방세법 제234조에 의거하여 과세(시가)표준액의 0.3%를 재산세, 종합토지세로서 또한 과세표준액의 0.3%를 적용하였다. 금리는 차입금의 금리에 대해서는 우량기업의 기업대출 평균금리를 적용하여 연 4%로 적용하고 차입금은 12년내에 변제하는 것으로 상정하였다. 변제금은 일정금액으로 상정하고 여유분은 임시비로 보유하는 것으로 가정하였다.

일반관리비는 바이오수소 플랜트의 운전비용의 5.5%를 적용하였고, 공장관리비 및 잡비로서 플랜트의 제조설비 투자액의 1.0%를 적용하였다. 판매비 및 마케팅비는 표준산업분류 C201 기초화학물질 제조업(산업용 가스 제조업)의 산정비율을 참조하여 매출액의 5.26%를 적용하였다.

마지막으로 원천징수세는 생산되는 부가가치에 대해 부

과되는 일반소비세로서 부가가치세법 14조에 의거하여 세율은 총 판매액의 10%를 과세하였으며, 법인세 및 지방세는 법인세법 55조에 의거하여 25%를 법인세로서 적용하고, 지방세 법령에 의거하여 법인세의 10%를 지방세로서 적용하였다. 또한 이 세금은 당해년도까지 결손이 있었던 경우에는 이익이 발생했던 시점에서 손실을 보전한 후 남은 이익에 부과하였다.

수소가격

수소가격은 US\$ 4.15/kg로 설정하고 환율은 2014년 평균치인 US 1\$당 1,053원으로 상정하였다(김 2015).

평가모델의 시스템 구성

반응·분리시스템

본 연구의 반응·분리시스템은 제철소로부터 배출된 CO 함유의 배기가스를 수소 생산 10,000톤을 위해 330톤 반응기 10기에 주입하고, NA1 규주를 접촉하여 수소(H₂), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂), 질소(N₂)의 혼합가스(H₂ 29.3%, CO 18.5%, CO₂ 40.7%, N₂ 11.5%)를 생산한 후, 물리흡착법에 의한 분리·회수기술의 하나인 제올라이트를 이용한 PSA법에 의하여 고순도 수소(H₂)를 생산하는 프로세스를 말한다.

반응기로부터 생산된 수소(H₂), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂), 질소(N₂)의 혼합가스로부터 수소(H₂)를 분리·회수하는 방법은 화학흡수법, 물리흡착법, 저온증류법, 가스분리막법 등이 유용한 기술로서 평가되고 있다(박 등 2005). 현재의 상업적 생산기술로서는 물리흡착법에 의한 분리·회수기술인 제올라이트를 이용한 PSA법이 압도적으로 실적이 많고 중소규모에서의 경제성, 운전 조작성이 뛰어난 것으로 평가되고 있다. 그러나, 대규모 처리 실적이 많지 않다는 점, SO_x, NO_x, H₂O 등이 이산화탄소(CO₂) 보다 흡착되기 쉬운 경향이 있기 때문에 이들의 사전 제거 필요성에서 나타난 것과 같이 구성성분과 불순물의 차이가 효율적 조업을 곤란하게 한다는 것이 문제점으로 지적되고 있다(박 등 2005).

이에 비해, 화학흡수법은 화력발전소와 같이 상업에서 비교적 저농도 이산화탄소(CO₂)에 대한 대규모 처리가 쉽고, 일산화탄소(CO) 흡수능력이 높다는 장점을 가지고 있다. 그러나 이산화탄소(CO₂)를 분리·회수할 때 다량의 에너지(증기)가 필요하다는 것이 문제점으로 지적되고 있다.

이러한 장단점에 근거하여, 본 연구에서는 상업적 생산 실적과 경제성을 고려하여 물리흡착법을 분리시스템에 적용하여 경제성 분석을 실시해 보았다. 반응시스템의 공정 개요는 Fig. 2와 같다.

반응시스템 설비의 건설비는 기존 열화학적 공정의 건설비와 운영비를 바탕으로 탭조류, 탱크류, 열교환류, 냉

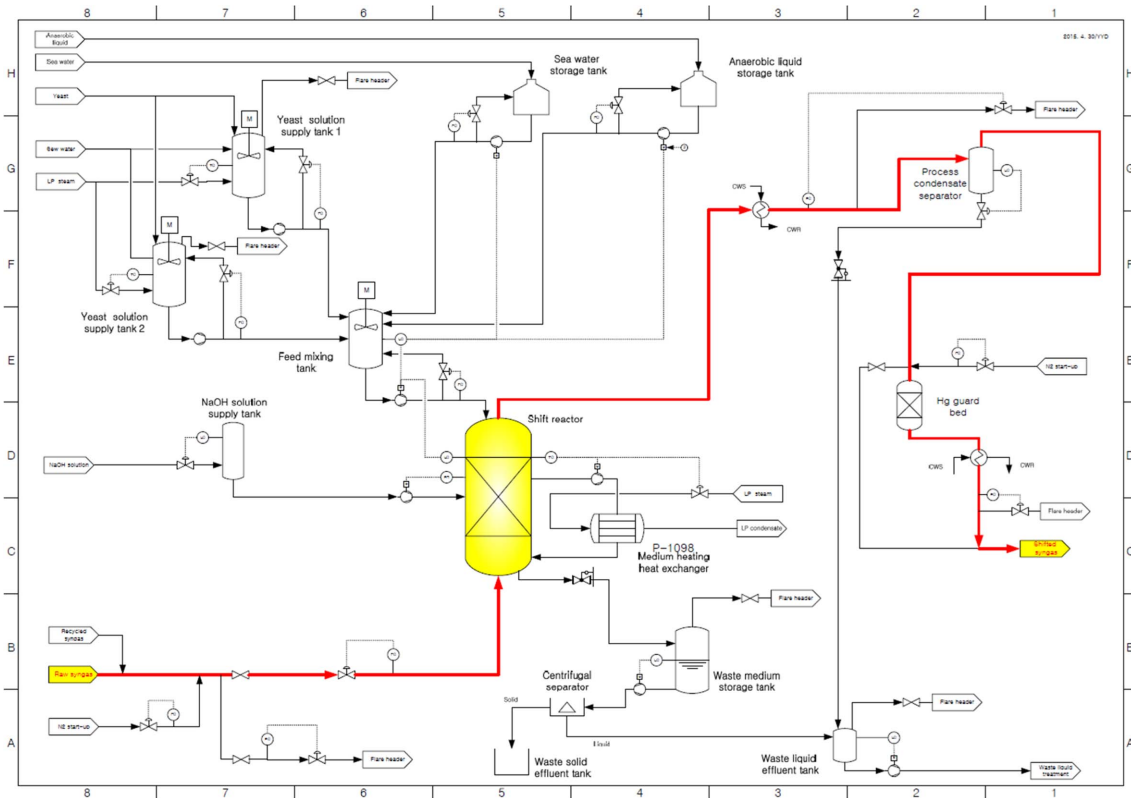


Fig. 2. Process flow diagram for the regenerator of the Hydrogen

각탑, 회전기기류, 전기, 경장비기기류 등의 플랜트비와 토건, 배관, 가설, 지붕, 보온·도장, 설계 등의 공사비, 그 외의 추가 부대설비비 등이 고려되었다(CES 2015). 이를 바탕으로 10 bar 기준 반응시스템의 플랜트 건설비는 Reactor, Yeast supply tank, Separator system 등의 Equipment, Piping & Insulation, Instrument, Electric &

Control system, Structure, Engineering fee, Overhead and profit 등을 합하여 149.4억원, 분리시스템은 Feed blower, 펌프, cooler 등을 합하여 121억원으로 추정되었다.

운전비는 배지(Yeast Extract), Feed blower, 펌프 등에 사용하는 전기와 ARU feed blower cooler, Lean cooler, Acid gas cooler 등에 사용하는 냉각수 및 제올라이트,

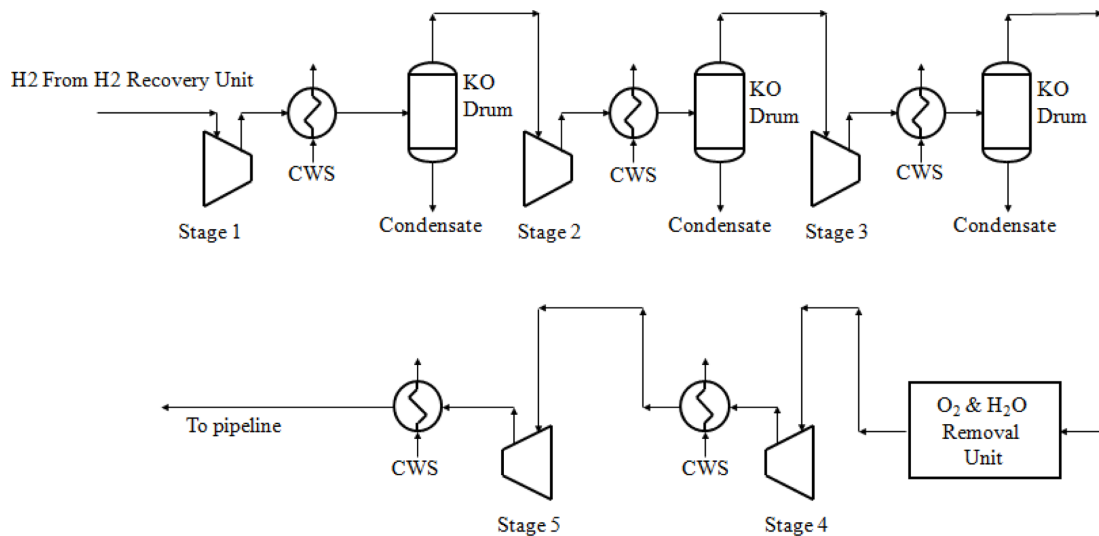


Fig. 3. Conceptual flow scheme of H₂ compression

Liquid effluent 등이 고려되었다.

압축시스템

생산된 수소(H₂)를 수요처로 운송하기 위해서는 수소(H₂)를 고순도로 정제하고 압축된 기체로 전환이 필요하다. 특히, 파이프라인에 의한 수송을 위해서는 파이프라인 내의 온도를 10~20°C로 가정하면 30 MPa 정도의 압력으로 가스상태로 압축하여 송출할 필요성이 있다. 또한 파이프라인의 부식방지를 위해서는 수분을 10 ppm까지 건조할 필요성이 제기된다.

본 연구에서는 이러한 점들과 처리용량 등을 고려하여 왕복압축기에 의한 5단계 압축을 실시하는 공정모델로 설계하였다. 생산된 수소(H₂)는 고압 압축기를 이용하여 3단계의 압축에 의해 응축수를 분리하고, 습윤기를 통해 충분히 수분을 제거한 후, 4번째의 압축기를 이용하여 15 MPa 정도의 압력하에서 압축기체를 만들었다. 그리고, 파이프라인 수송 중의 압력 손실을 고려하여 5번째의 압축기를 이용해 30 MPa까지 가압하는 시스템 공정을 구축하였다. 압축시스템의 공정흐름은 Fig. 3과 같다.

물과 수소(H₂)의 혼합물에 의한 부식을 고려하여 재질은 스테인레스를 사용하고, 흡입압력, 배출압력, 유량 등을 고려하여 압축기 소요동력을 산출하였다(Ebara corp. 2014).

파이프라인에 의한 육상수송

압축한 수소(H₂) 기체를 공급처까지 수송하기 위해서는 저장탱크 시설이 필요하다. 수소(H₂) 저장탱크의 입지 장소는 경제성에 적지 않은 영향을 미칠 수도 있어 중요한 파라미터가 될 수도 있지만, 본 연구에서는 기본 모델 구축을 목적으로 하기 때문에 구체적인 검토는 생략하고 파이프라인에 의한 단거리 육상수송 후, 공장 주변까지 단거리 육상수송 후, 수소(H₂) 저장 탱크는 설치가 가능한 것으로 가정해 모델을 구축하였다.

파이프라인에 의한 육상수송에서는 파이프라인의 직경을 파이프내의 압력이 수송 중에 300 atm(≈30 MPa)으로 떨어지지 않도록 해야 한다.

본 연구에서는 Suzuki (2014)의 가정에 따라 비중 1.24, 온도 20°C, 압력 30 MPa의 압축 수소(H₂)를 1 km 수송하는 것으로 가정하여, 직경은 26 B(외경 660.4 mm, 두께 12.7 mm, Roughness 0.0457 mm)의 압력배관용 탄소강관 파이프라인을 이용하여 수송하는 것으로 설계하였다(Suzuki 2014).

압축 수소(H₂) 저장설비의 건설비는 구형탱크, 재액화 장치, 충전펌프 등이 고려된 기존의 수소가스 저장설비 내역으로부터 저장 용량에 맞게 조정하여 산정하였다(Air products and chemicals Inc. 2014).

환경처리설비

환경처리설비는 반응시스템으로부터 배출된 폐수를 처리하는 공정을 말하는 것으로서 폐수처리설비는 피트, 중화탑, 산화조, 응집조, 시크너, 드럼 필터, pH 조정조, 소석회 용해조, 응집제 용해조 등으로 구성되어 있다. 공정 설비 비용은 총 8억 정도가 소요될 것으로 예상된다.

이상의 경제파라미터를 고려해서 산출한 바이오수소 개발시스템의 시스템별 비용내역과 총 소요비용 내역을 Table 1, Table 2에 각각 나타낸다.

Table 1. Development system cost

Capital costs	Production of 10,000 ton
Reaction system	149.4
H ₂ Separation system	121.0
Compression system	96.0
Environmental disposal facilities	22.2
Pipeline	28.4
H ₂ storage facilities	21.9
Headquater	40.0
Total	478.9 hundred million won
Operating costs	
CO gas	63.2
Yeast extract	7.5
Utility (electricity, city water)	19.0
Wages and benefits	54.3
Maintenance and Repair	33.6
Insurance	14.9
Lubrication & Miscellaneous	4.8
General & administrative	14.4
Sales promotion & Marketing cost	11.1
Headquater, R&D	8.0
Total	230.8 hundred million won

Table 2. Total investment cost for commercial production of Bio-hydrogen

Item	Production of 10,000 ton	
	Capital costs	Operating costs
Reaction system	149.4	72.0
H ₂ Separation system	121.0	58.3
Compression system	96.0	46.2
Environmental disposal facilities	22.2	
Pipeline	28.4	
H ₂ storage facilities	21.9	
Headquater	40.0	54.1
Sub-total	478.9 hundred million won	230.8 hundred million won
Continuing expenses		57.3
Working capital		57.7
Total		593.9 hundred million won

3. 기본적 수익판단법

기본적 수익판단법은 자본회수법(Payback Periods), 순현재가치(Net Present Value), 내부수익률(Internal Rate of Return) 등으로 평가하였다. 먼저, 자본회수법은 세금공제 후 이익과 감각상각비의 합계 금액의 연간 누적액이 자산 투자액에 도달하는 년수를 구하여 판단하였다.

또한, 순 현재가치는 산정된 모든 지출과 수입의 현금흐름(Cash flow)을 현재가치로 환산해 최초의 투자자본과 수익의 차에 의해 구한다. 정부에서는 국고지원 대상사업에 대해 공공사업간의 상호비교가 가능하도록 공공투자사업의 적정할인율을 적용하도록 되어 있는데 그 수준은 기술가치평가 실무가이드를 바탕으로 할인율(r)은 WACC(기술위험 & 규모위험프리미엄)로 상정하고, 자기자본비용 × 자기자본비용 + 세전타인자본비용 × (1 - 법인세율) × 타인자본비용로 산출하였다. 자기자본비용은 상장기업 CAPM + 사업화 위험프리미엄 + 안정성 위험프리미엄 + 규모 프리미엄으로 산정되는데 법인세율 2억 이하 10%, 2억 - 200억 20%, 200억 초과 22% 등에 의거하여 산출하고 있다.

따라서 본 연구에서는 자기자본비용(비상장 대기업)

13.33%, 타인자본비용(비상장 대기업) 9.4%, 자기자본비용(포스코에너지) 37.39%, 법인세율 25%을 적용하여 최종 할인율 9.57%를 적용하여 분석하였다.

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+i)^t} - \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+i)^t} \quad (2)$$

B_t : 수익(= 감각상각비 + 세금공제후 이익 - 차입금변제),
 C_t : 투자자본, i : 할인율(5.5%), n : 프로젝트 년수(23년),
 t : 년차

마지막으로, 내부수익률은 산정된 모든 지출과 수입의 현금흐름(Cash flow)을 현재가치로 환산해 최초의 투자자본과 수익이 일치하는 할인율을 구하여 판단하였다.

$$\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+i)^t} = \sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+i)^t} \quad (3)$$

4. 분석결과

NAI 균주를 활용하여 부생가스 상압운전 기준에서 수소 생산성 5.6 H₂ L/L/h로 가정할 경우의 경제성 분석 결

Table 3. Economic feasibility study results for the commercial production of bio-hydrogen

Sensitivity factor	Bio-hydrogen development									
	H ₂ productivity	Payback periods (year)	NPV (one hundred million won)	IRR (%)						
	5.6 H ₂ L/L/h	6.3	180.4	26.7						
(Unit: one hundred million won)										
Item	Operation periods									
	1 st year (50% Production)	2 nd year	3 rd year	4 th year	5 th year	6 th year	7 th year	8 th year	9 th year	10 th year
Sales (A = B + C)	216	433	433	433	433	433	433	433	433	433
Operation income (B)	216	433	433	433	433	433	433	433	433	433
Other income (C)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cost of sales (D = E1 + E2 + F + G)	177	302	304	307	309	312	316	320	326	331
Variable cost (E1)	79	164	169	174	179	184	190	195	201	207
Maintenance cost (E2)	23	48	49	51	52	54	55	57	59	61
Depreciation cost (F)	52	46	41	37	33	29	26	23	21	18
VAT·Property tax (G)	22	45	45	45	45	45	45	45	45	45
Gross margin (H = A - D)	39	131	129	127	124	121	117	113	107	102
Marketing·General management cost (I)	13	26	27	28	29	30	31	31	32	33
Operating profit (J = H - I)	26	105	102	99	96	92	87	81	75	69
Interest income (K)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Interest payment (L)	0	17	15	14	12	11	9	8	6	5
Ordinary income (M = J + K - L)	26	88	87	85	83	81	77	74	69	64
Corporate tax·Local tax (N)	0	24	24	23	23	22	21	20	19	17
Net profit during the term (O = M - N)	26	64	63	62	61	59	56	54	50	47

Table 3. Continued

Item	Operation periods									
	11 th year	12 th year	13 th year	14 th year	15 th year	16 th year	17 th year	18 th year	19 th year	20 th year
Sales (A = B + C)	433	433	433	433	433	433	433	433	433	433
Operation income (B)	433	433	433	433	433	433	433	433	433	433
Other income (C)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cost of sales (D = E1 + E2 + F + G)	336	344	350	358	365	373	382	392	400	433
Variable cost (E1)	213	220	226	233	240	247	255	263	270	278
Maintenance cost (E2)	62	64	66	68	70	72	74	77	79	81
Depreciation cost (F)	16	15	13	12	10	9	8	7	6	29
VAT·Property tax (G)	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
Gross margin (H = A - D)	96	89	83	75	68	59	50	42	33	0
Marketing·General management cost (I)	34	35	36	37	39	40	41	42	43	45
Operating profit (J = H - I)	62	54	46	37	29	20	10	0	-10	-45
Interest income (K)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Interest payment (L)	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0
Ordinary income (M = J + K - L)	59	52	46	37	29	20	10	0	-10	-45
Corporate tax·Local tax (N)	16	14	13	10	8	5	3	0	0	0
Net profit during the term (O = M - N)	43	38	34	27	21	15	7	0	-10	-45

과를 Table 3에 나타낸다.

실운전 기준으로 운전시간은 7,920시간, 330톤 반응기 10기를 가동하여 연간 10,000톤의 수소를 생산한다면, 자본회수기간(Payback periods) 6.3년, 순 현재가치(NPV) 180억원, 내부수익률(IRR) 26.7%로 나타났다. 내부수익률(IRR)에 의한 수익판단법으로만 보았을 때 해양바이오수소개발 사업은 기술위험 프리미엄 수익률 9.57%나 민간 기업 신규투자 가능 사업의 기대 수익률 15%를 뛰어 넘는 높은 경제적 이익이 기대되면서 경제성을 확보할 수 있는 것으로 분석되었다.

구체적으로 분석결과를 살펴보면 연간 10,000톤의 수소를 20년간 생산 시, 매년 433억원의 매출을 통해 총 8,443억원의 수익을 달성할 수 있다. 이때, 매출원가는 총 6,735억원이 소요될 것으로 추정되고, 따라서 매출 총이익은 1,708억원으로 예상된다. 매출 총이익에서 마케팅비용과 일반관리비를 뺀 영업이익은 1,034억원으로 전망하고, 대출이자 등을 뺀 경상이익은 933억원으로 나타났다. 마지막으로 법인세 및 지방세를 뺀 당기 순이익의 총 합계는 약 670억원으로 기대된다.

본 연구와 같은 상업적 생산을 위한 경제성 분석에서는 수소 생산성, 생산규모 등의 기술적 요인 변동과 수소가격, 할인율, 이자율 등 경제적 요인 변동에 따른 경제성 변화량을 추정하는 민감도 분석이 중요한 의미를 차지한다. 그러나, 현재 톤 규모 파일럿 플랜트 생산실증을 추진 중에 있는 이유로 인하여 사업타당성 분석(Feasibility

study)에 이용할 수 있는 경제성평가 모델을 구축하는 단계에 머물렀다. 향후 상업생산의 사업 판단을 위한 의사결정을 위해서는 본 논문에서 가정하여 기술한 현장실증 실험 데이터를 확보하고, 이를 바탕으로 보다 정밀하고 다양한 경제성 분석결과 도출이 필요하다 하겠다.

5. 결 론

본 연구는 해양바이오수소개발 사업의 상업생산에 대한 사업타당성 분석에 이용할 수 있는 경제성평가 모델을 구축하는 단계에 머물렀다. 그러나 구축된 모델은 개발시스템에 구성되어 있는 기술요소의 우열 판단이나 기술개발이 필요한 요소를 탐색해 그 도입효과를 예측하고 요소기술개발 목표치 설정의 기술적 도구로 활용할 수 있는 장점을 가지고 있다.

현재, 해양바이오수소개발 연구는 제철소 부생가스를 이용한 톤 규모 파일럿 플랜트 생산실증이 가동 중에 있다. 신재생에너지는 전 세계적으로 이슈가 되고 있는 만큼 현장적용 실증데이터 확보를 통해 본 연구의 객관성과 결과의 합리성을 증명할 필요가 있지만, 해양바이오수소개발 사업은 세계 최초의 톤 규모 파일럿 플랜트로서 생산성은 세계 최고수준의 생산이 가능하다는 것이 입증된 것만으로도 의의가 있다 하겠다.

향후 해양극한 미생물의 극한 적응현상 이해와 이를 활용한 응용기술 개발의 활성화가 이루어진다면 해양미생물

을 이용한 친환경 청정에너지 생산 방법으로서 육상자원 고갈, 기후변화, 해상활동 증가, 쾌적한 연안 및 해양이용에 대한 수요의 증가 등은 해양자원을 활용한 산업 수요를 더욱 증가시킬 것으로 전망하고 있으며, 이는 국민의 삶의 질 향상과 경제성장을 이끌어갈 술한 가치와 의미를 적극적으로 창조해 나아가는 발판이 될 것이다.

사 사

본 연구는 해양수산부의 지원으로 수행된 ‘해양고세균 이용 바이오수소 생산 실용화기술개발(PM59170)’ 연구의 일환으로 수행되었습니다. 논문의 완성도를 높이기 위해 의견을 주신 심사위원들과 논문게재과정에서 도움을 주신 편집위원회에 감사드립니다.

참고문헌

- 김봉진 (2015) 보조금과 수소가격을 고려한 국내 연료전지차의 경제성 분석. 한국수소 및 신에너지학회 **26(1)**:35-44
- 박세현, 오위영, 권문상 (2005) CO₂ 해양격리시스템의 기술·경제적 가능성 평가. Ocean Polar Res **7(4)**:451-461
- 박세현, 양희철 (2009) 심해저 망간각 개발의 경제성 평가. Ocean Polar Res **31(2)**:167-176
- 조한창, 홍정구, 조길원, 김기홍 (2009) 제철 부생가스의 산소부화 연소기술. RIST 연구논문 **23(2)**:71-75
- 한국감정원 (1999) 유형고정자산 내용년수표. ISBN 89-88365-01-1, 425 p
- 해양수산부 (2012) 해양 초고온 고세균 이용 바이오수소 생산기술 개발. 한국해양과학기술원, 안산, 289 p
- 해양수산부 (2013) 해양 초고온 고세균 이용 바이오수소 생산기술 개발. 한국해양과학기술원, 안산, 293 p
- 해양수산부 (2014) 해양 초고온 고세균 이용 바이오수소 생산기술 개발. 한국해양과학기술원, 안산, 299 p
- 해양수산부 (2015) 해양 초고온 고세균 이용 바이오수소 생산기술 개발. 한국해양과학기술원, 안산, 627 p
- Air products and chemicals Inc. (2014) Form 10-K report, 48 p
- Bae SS, Kim YJ, Yang SH, Lim JK, Jeon JH, Lee HS, Kang SG, Kim S-J, Lee J-H (2006) *Thermococcus onnurineus* sp. nov., a hyperthermophilic archaeon isolated from a deep-sea hydrothermal vent area at the PACMANUS field. J Microbiol Biotechn **16(11)**:1826-1831
- Bae SS, Lee HS, Jeon JH, Lee J-H, Kang SG, Kim TW (2015) Enhancing bio-hydrogen production from sodium formate by hyperthermophilic archaeon, *Thermococcus onnurineus* NA1. Bioproc Biosyst Eng **38(5)**:989-993
- CES (2015) Reaction system cost for biohydrogen production using steel mill waste gas, Personal Communication, 10 p
- Ebara corp. (2014) Power calculator for gas compressor report, elliott group, 20 p
- Japan Coal Energy Center (1993) Economic evaluation for coal resources development, Tokyo Publishing Company, 208 p (In Japanese)
- Kim YJ, Lee HS, Kim ES, Bae SS, Lim JK, Matsumi R, Lebedinsky A, Sokolova TG, Darya AK, Cha SS, Kim SJ, Kwon KK, Imanaka T, Atomi H, Bonch-Osmolovskaya EA, Lee JH, Kang SG (2010) Formate-driven growth coupled with hydrogen production. Nature **467(7313)**:352-355
- Kim M-S, Bae SS, Kim YJ, Kim TW, Lim JK, Lee SH, Choi AR, Jeon JH, Lee JH, Lee HS, Kang SG (2013) CO-dependent H₂ production by genetically engineered *Thermococcus onnurineus* NA1. Appl Environ Microb **79(6)**:2048-2053
- Lee HS, Kang SG, Bae SS, Lim JK, Cho Y, Kim YJ, Jeon JH, Cha SS, Kwon KK, Kim HT, Park CJ, Lee HW, Kim SI, Chun J, Colwell RR, Kim SJ, Lee JH (2008) The complete genome sequence of *Thermococcus onnurineus* NA1 reveals a mixed heterotrophic and carboxydutrophic metabolism. J Bacteriol **190(22)**:7491-7499
- Lee SH, Kim M-S, Lee J-H, Kim TW, Bae SS, Lee S-M, Jung HC, Yang T-J, Choi AR, Cho Y-J, Lee J-H, Kwon KK, Lee HS, Kang SG (2016) Adaptive engineering of a hyperthermophilic archaeon on CO and discovering the underlying mechanism by multi-omics analysis. Sci Rep **6**:22896
- Lim JK, Mayer F, Kang SG, Müller V (2014) Energy conservation by oxidation of formate to carbon dioxide and hydrogen via a sodium ion current in a hyperthermophilic archaeon. P Natl A Sci USA **111(31)**:497-502
- Rittmann SK, Lee HS, Lim JK, Kim TW, Lee JH, Kang SG (2015) One-carbon substrate-based biohydrogen production: microbes, mechanism, and productivity. Biotechnol Adv **33(1)**:165-177
- Suzuki N (2014) Diameter design of the pipeline, personal communication. Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMECT), Tokyo (In Japanese)

국문 참고자료의 영어 표기

English translation / Romanization of references originally written in Korean

Kim BJ (2015) An economic analysis of domestic fuel cell vehicles considering subsidy and hydrogen price. The

- Korean Hydrogen and New Energy Society **26**(1):35–44
- Park SH, Oh WY, Kwon MS (2005) Economic feasibility study for CO₂ ocean sequestration, *Ocean Polar Res* **7**(4):451–461
- Park SH, Yang HC (2009) A technical and economic evaluation of cobalt-rich manganese crusts, *Ocean Polar Res* **31**(2):167–176
- Cho HC, Hong JG, Cho KW, Kim KH (2009) Oxygen-enriched combustion technology of steel mill waste gas. *RIST Res Paper* **23**(2):71–75
- Korea Appraisal Board (1999) *The service life table of the tangible fixed assets*, ISBN 89-88365-01-1, 425 p
- Ministry of Oceans and Fisheries (2012) Development of technology for biohydrogen production using hyperthermophilic archaea. KIOST, Ansan, 289 p
- Ministry of Oceans and Fisheries (2013) Development of technology for biohydrogen production using hyperthermophilic archaea. KIOST, Ansan, 293 p
- Ministry of Oceans and Fisheries (2014) Development of technology for biohydrogen production using hyperthermophilic archaea. KIOST, Ansan, 299 p
- Ministry of Oceans and Fisheries (2015) Development of technology for biohydrogen production using hyperthermophilic archaea. KIOST, Ansan, 627 p
-
- Received May 17, 2016*
Revised Aug. 31, 2016
Accepted Sep. 12, 2016