

Naphtha의 steam reforming에 의한 수소제조방법에 대한 전과정평가

박희일·, 김 익·, 이병권·, 허 탁·

*전국대학교 화학생물공학부

**한국과학기술연구원 CFC 대체 연구센터

Life Cycle Assessment for Hydrogen Production Method using Steam Reforming of Naphtha

Hee-il Park·, Ik Kim·, Byung Kwon Lee·, and Tak Hur·

*School of Chemical & Biological Engineering, Konkuk University

1 Hwayang-dong, Kwangjin-ku, Seoul, 143-701, Korea

**CFC Alternatives Research Center, Korea Institute of Science and Technology

P.O.BOX 131 Cheongryang, Seoul, 130-650, Korea

ABSTRACT

In this study, it achieved life cycle assessment to estimate environmental performance for naphtha steam reforming that account for the production over 50% of total hydrogen output. Although hydrogen doesn't emit air emissions, especially, CO₂, a large of CO₂ is emitted in hydrogen production process. In the result of this study, it ascertained the truth that CO₂ is emitted at the rate of 6.3kg/kgH₂ and that result from steam reforming reaction and use of fossil fuel in hydrogen manufacturing process. Above all, 57% of total CO₂ emissions is emitted in process of steam reforming of naphtha and so it knew that the principle of steam reforming is key issue in aspect to environment. Also, it compared hydrogen by fuel of fuel cell vehicle with gasoline fuel of general gasoline vehicle to analyze relative environment of hydrogen for fossil fuel during the life cycle. As the result, it might be difficult in improvement of environment because CO₂ emissions during the hydrogen manufacturing process is nearly the same with that during the use of gasoline.

주요기술용어 : LCA(전과정평가), Hydrogen(수소), CO₂(이산화탄소), Steam reforming(수증기 개질), Fuel cell(연료전지)

1. 서 론

대체에너지의 개발과 보급은 고갈되어 가는 화석연료 문제를 해결하기 위한 에너지원의 발굴뿐 아니라, 화석연료의 사용으로 인해 야기된 환경문제를 해결하기 위해서 반드시 필요하다. 특히, 지구온난화의 주원인 물질인 CO₂는 전세계적으로 매년 약 62억 톤이 배출되고 있으며, 이 중 약 75%가 화석연료의 사용으로 인한 것으로 알려져 있다¹⁾.

이러한 문제를 해결하기 위하여 국제적으로 태양열, 지열, 소수력, 조력 등의 여러 가지 대체에너지원으로부터 에너지를 생산하는 다양한 제조방법을 개발하고 있다.

특히, 수소는 사용중 대기배출물이 거의 없고, 같은 무게의 가솔린 보다 3배 많은 에너지를 방출한다. 또한, 현재의 에너지시스템에서 사용되는 거의 모든 분야에 활용될 수 있어 미래의 에너지시스템에 가장 적합한 에너지원으로 인식되고 있다²⁾. 특히, 최근에 활발히 개발되고 있는 연료전지 자동차는 수소를 이용하기 때문에 주행중에 배기가스가 거의 없어 화석연료를 이용하는 자동차의 배기가스 배출문제를 해결할 수 있는 대안으로 부각되고 있다.

이와 같은 장점에도 불구하고, 현재 수소를 제조하는데 세계적으로 가장 많이 사용되고 있는 steam reforming법은 대량생산에는 유리하지만, 제조원리상 필연적으로 대량의 CO₂가 발생하는 단점을 가지고 있다³⁾. 따라서, 이 방법으로 제조된 수소가 연료전지 자동차의 에너지원으로 사용된다면, 주행중에 배기가스가 거의 없다고 하더라도, 궁극적인 환경개선은 기대하기 어렵다는 것을 의미한다.

이를 규명하기 위해서는 반드시 수소의 전과정을 고려한 환경성의 평가가 필요하다. 전과정평가(Life Cycle Assessment)는 제품의 원료를 채취하고 제조하여 이를 사용하고 폐기하는 제품의 전과정에 걸친 환경영향을 정량화하고 종체적인 환경영향을 파악하는 환경성평가 도구이다. 따라

서, 전과정평가는 수소의 사용단계 뿐만 아니라, 수소의 제조 및 저장단계를 포함하는 수소에너지시스템의 전과정에 대한 환경성을 평가하고, 환경영향의 trade-off를 파악하여 실질적인 환경친화적 제조기술을 개발하기 위한 근거자료를 제공해 줄 수 있는 종체적인 환경영향평가 방법이다.

본 연구에서는 naphtha의 steam reforming을 이용한 국내 수소제조시스템에 대한 전과정평가를 수행하여, LCI D/B를 구축하고 잠재적인 환경영향을 정량화하여 주요 환경이슈를 규명하였다. 또한, 이 결과를 바탕으로 연료전지 자동차의 에너지원인 수소와 일반 승용차의 연료인 휘발유의 전과정에 걸친 환경영향을 간략하게 비교함으로써 steam reforming법으로 제조되는 수소의 상대적인 환경성을 분석하였다.

2. 전과정평가(Life Cycle Assessment)

과정평가는 목적 및 범위정의(Goal and Scope Definition), 전과정목록분석(Life Cycle Inventory Analysis), 전과정영향평가(Life Cycle Impact Assessment)와 전과정해석(Life Cycle Interpretation) 단계를 거쳐 수행된다. 이와 같은 4단계로 구성된 전과정평가의 기본구조를 Fig. 1에 나타내었다⁴⁾.

목적 및 범위정의 단계는 전과정평가 연구결과의 이용분야를 고려하여 연구의 목적을 설정하

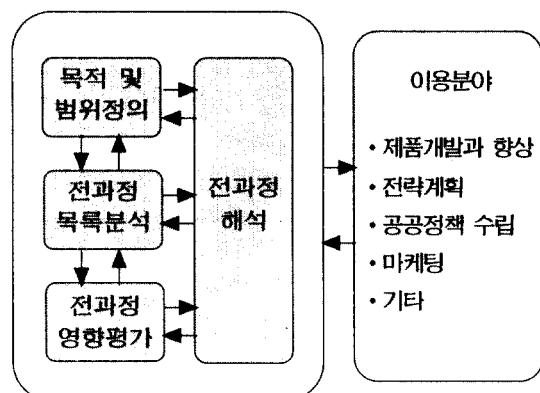


Fig. 1. Basic structure of life cycle assessment.

공급업체로 공급되는 수소의 제조방법을 토대로 공급량을 파악하였다.

Fig. 2에서 보는 바와 같이 naphtha를 steam reforming하여 생산되는 수소가 전체의 50.5%로 가장 많이 차지하고 있으며, 그 다음으로 프로필렌 제조와 병합된 LPG분해법이 37.4%을 차지하고 있다⁵⁾.

따라서, 본 연구에서는 현재 국내에서 가장 많이 사용되고 있는 naphtha의 steam reforming 방법을 연구 대상 수소제조방법으로 선정하였다. steam reforming법에는 CH₄, 벙커C유, naphtha 등의 여러 가지 원료가 사용될 수 있지만, 제조 원리 및 공정의 흐름의 거의 동일하다.

Fig. 2. Domestic state of hydrogen production method.

고, 연구의 목적을 달성하기 위한 시스템경계, 데이터풀질등의 타당한 범위를 설정하는 단계이다. 전과정목록분석에서는 제품이나 서비스 시스템의 전과정에 관련된 투입물과 산출물을 규명하고 정량화하며, 이러한 전과정목록분석의 결과를 환경적인 측면에서 평가함으로써 중요한 잠재적인 환경영향을 규명하는 과정이 전과정 영향평가이다.

전과정해석은 전과정목록분석이나 전과정영향평가의 결과를 연구의 목적과 범위에 맞게 해석함으로써 최종적인 연구의 결론 및 권고사항을 도출하는 과정이다.

3. 국내 수소제조공정에 대한 전과정평가

3.1 국내 시장 현황

국내의 수소는 대부분 대규모 석유화학단지에서 제조되고, 그대로 자체 소비되고 있기 때문에, 정확한 생산량과 소비량을 파악하는 것이 매우 어려운 실정이다. 그러나, 전기, 전자, 반도체 등의 산업용으로 사용되는 수소는 공급업체를 통하여 사용업체로 공급되기 때문에, 본 연구에서는

Table 1. Function and functional unit

기능	산업용가스, 에너지원
연구와 관련된 기능	에너지원
기능단위	120MJ의 에너지
기준흐름	수소 1kg

3.2 목적 및 범위 정의

3.2.1 목적 정의

본 연구의 목적은 국내의 수소 제조방법으로 가장 많이 사용되고 있는 naphtha의 steam reforming방법에 대한 LCI D/B를 구축하고, 전과정에 걸친 환경영향을 정량화함으로써 주요 환경측면의 이슈를 규명하는 것이다. 특히, 공정의 특성을 고려하여, CO₂를 포함한 온실가스의 배출량과 이로 인한 환경영향을 규명하는데 초점을 두었다.

3.2.2 범위 정의

기능 및 기능단위 설정

수소의 기능은 산업용 가스로서의 기능과 에너지원으로서의 기능이 있다. 이 중 본 연구와 관련된 기능은 에너지원이며, 따라서, Table 1에서 보는바와 같이 기능을 정량화하는 기능단위는 에너지량인 120MJ의 에너지로 설정하였으며, 기능단위를 만족시키기 위한 기준흐름은 수소 1kg이된다.

시스템경계 설정

시스템경계는 이미 구축되어 있는 휘발유에 대한 국내 D/B와 동일하게 설정하기 위하여

Table 2. System boundaries

항 목	수소제조공정	상위흐름
시간적 경계	2000년도	① 2000년도 D/B ② 최근 5년 이내의 D/B ③ 수집가능한 D/B중 가장 최근 D/B
지리적 경계	데이터 수집 대상업체	① 국내 D/B ② 생산지와 유사한 지역 D/B
기술적 경계	수소제조 방법 license	① 동일한 기술 수준의 D/B ② 가능한 유사한 기술의 D/B

Table 2와 같이 설정하였으며, 특히 상위흐름공정에 대한 시스템경계는 시간적, 지리적, 기술적 경계별로 우선순위를 두어 설정하여 효율적인 데이터 수집을 하고자 하였다.

데이터 범주

본 연구에서 고려되는 데이터 범주는 수소를 생산하는데 필요한 투입물로서 원료, 에너지, 화학

Table 3. Initial data quality.

수소제조 공정	2000년도 연보, 구매장부, 세부 공정 데이터	
상위흐름 공정	Naphtha	국내 D/B
	Electricity	
	Utility	
	LNG	국외 D/B
	국내 수송	
	국외 수송	

물질, 유틸리티, 기타(포장재 등)으로 구분하였으며, 산출물은 제품, 부산물, 대기배출물, 수계배출물, 고형폐기물, 기타로 구분하였다.

초기 데이터 품질 요건

초기 데이터 품질 요건은 수소제조공정과 상위흐름공정으로 구분하였다. 수소제조공정에 대한 데이터는 2000년도 현장데이터를 사용하였으며, 상위흐름공정에 대한 데이터는 시스템 경계에서 설정한 우선순위에 따라 Table 3과 같은 데이터를 이용하였다.

할당

할당은 최종적으로 생산되는 제품(product)과 부산물(co-product)들이 얼마만큼의 환경영향에 대한 책임을 지는가의 문제이다. 이러한 문제가 발생하는 경우에 가장 일반적인 처리방법은 제품과 부산물의 생산량 비에 의하여 할당이 이루어진다. 본 연구에서는 부산물에 대하여 제품에 지나치게 적은 환경영향이 부담되는 것을 방지하기 위해 경제적 가치를 고려하여 아래와 같이 할당인자(A · F)를 산출하였다.

$$A \cdot F = \frac{C_i \times P_i}{\sum_{i=1}^n (C_i \times P_i)} \quad (1)$$

- A · F : 할당인자
- Ci : i의 경제적 가치
- Pi : i의 생산량

영향범주 및 영향평가 방법론

본 연구에서는 연구의 CO₂등의 온실가스 배출에 따른 GWP(Global Warming Potential)에 초점을 맞추어 전과정영향평가를 수행하였으며, 방법론은 IPCC의 특성화 지수를 적용하여 GWP 특성화 값을 산출하였다.

가정 및 제한사항

본 연구에서 사용된 주요 가정과 제한사항은

다음과 같다.

- 수소플랜트 건설과 국내 수송을 위한 파이프 라인의 건설은 고려하지 않았다.
- 국내 수송을 위한 pipeline의 거리는 대상 업체의 조언에 따라 3km를 적용하였다.
- 공정데이터 중에서 상위흐름 환경데이터 베이스가 없는 경우에는 기본흐름으로 가정하였다.
- 투입되는 화학물질은 용도명과 기능명으로 구분하고 기본흐름으로 가정하였다.
- 촉매는 실제 교체주기를 고려하여 투입량 계산하였다.
- 수소의 유통과 관련된 수송은 고려하지 않았다.

3.3 전과정 목록분석

ISO14041(Environmental management - Life cycle assessment - Goal and scope definition and inventory analysis)에서 언급한 전과정 목록분석 수행절차 따라 전과정 목록분석을 실시하였다.

3.3.1 단위공정설정 및 단위공정흐름도 작성

데이터 수집의 기본 단위인 단위공정의 결정 및 공정흐름도 작성은 전과정목록분석에 있어서 매우 중요하다. 이는 연구의 목적 및 범위정의에 맞게 작성되어야 한다.

본 연구에서는 대상업체의 수소제조공정에 대한 데이터가 통합적으로 관리되고 있어서 하나의 단위공정으로 설정하였다.

3.3.2 데이터 수집

연구 초기에 공정의 이해와 투입/산출물 파라미터를 규명하기 위하여 연구대상업체에서 보유하고 있는 공정설명자료를 수집하였다.

또한, 설문지를 연구 대상업체에 직접 방문하여 플랜트 관리자와 함께 직접 작성함으로써

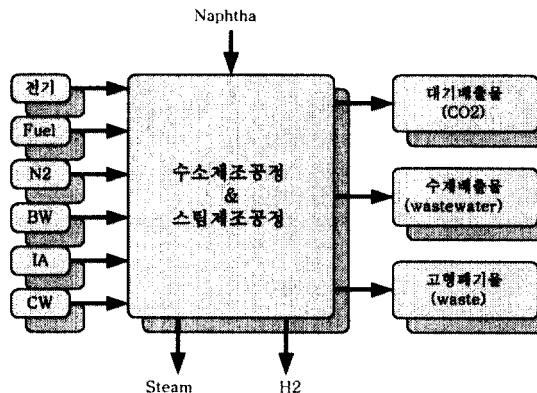


Fig. 3. Unit process flow diagram.

전과정목록분석시 투입/산출물의 양뿐만 아니라, 각 항목별 용도, 출처, 관리형태 등을 파악함으로써 충분한 정보를 확보하였다. 그리고, 관리되지 않는 대기배출물을 파악하기 위하여 대기배출물의 발생원인 연료의 종류 및 성상에 대한 자료를 수집하였다.

기술계에서 투입되거나 산출되는 물질에 대해서는 상위흐름 및 하위흐름을 연결시키기 위하여 관련된 국내, 국외 D/B를 수집하였으며, 본 연구에 사용된 D/B는 다음 Table 4와 같다.

3.3.3 데이터 검증

수집된 데이터의 신뢰성을 판단하기 위하여 물질수지, 물수지, 에너지 수지를 검토하여, 정량적인 데이터 값의 누락여부를 판단하였다. 대상업체에서 관리되지 않아 누락된 데이터의 경우 투입물과 산출물 간의 인과관계를 파악하여 기입하였다.

3.3.4 데이터 계산

활 당

본 연구 대상 수소제조공정에서는 수소와 함께 공정 내에서 생산되는 스팀의 일부가 다른 공정에서 사용되고 있기 때문에 제품인 수소와 부산물인 스팀 사이에 활당을 하였다.

수소와 스팀의 생산량과 경제적 가치는 업체에

Table 4. Collected upstream D/B.

Naphtha	국내 환경 D/B (산업자원부, 2000)
Electricity	국내 환경 D/B (산업자원부, 1998)
LNG	Simapro D/B (PWMI/APME, 1997)
Utility	국내 환경 D/B (산업자원부, 1998)
국내 수송	Gabi3 v2 D/B (1999)
국외 수송	Simapro D/B (chalmers, 1997)

서 제공한 데이터를 이용하였다.(Table 5참조)

대기배출물

다음과 같은 우선순위에 따라 데이터를 작성하였다.

- 대상 업체에서 제공한 실측치
- 대상 업체의 배출계수를 이용한 계산치
- 연소방정식을 이용한 계산치
- IPCC 연소식을 이용한 예상치

본 연구의 대상이 되는 steam reforming법을 이용한 수소제조공정에서는 reforming반응에 의한 대기배출물과 화석연료의 사용에 의한 대기배출물로 크게 구분할 수 있다.

전자의 경우, 업체에서 제공한 실측치와 배출

Table 5. Allocation factor and ratio.

	수 소	스 텁
생산량	4.527E+7 kg	5.467E+8 kg
경제적 가치	1158원/kg	21원/kg
합당비	0.82	0.18

계수를 이용한 계산치를 혼용하여 데이터를 작성하였으며, 후자의 경우, CO₂ 배출량이 업체에 관리되고 있지 않기 때문에, 이론적인 연소방정식을 이용한 계산치를 적용하였다.

기능단위별 데이터 구축

계산된 투입, 산출물 데이터를 최종 제품인 수소의 생산량으로 나누어 제품 1kg당으로 투입, 산출물 데이터로 환산하였다.

상위 및 하위흐름 D/B 연결 및 전과정목록 표 작성

구축한 “gate-to-gate” D/B를 “cradle to gate” D/B로 전환하기 위하여 기술계에서 투입되고 배출되는 항목에 대하여 상위흐름 데이터베이스를 연결하여 최종적인 국내 수소제조공정에 대한 LCI D/B를 구축하였다.

3.4 전과정 영향평가

LCI D/B는 단순한 투입량과 산출량만을 나타내므로 제품의 잠재적인 환경영향을 평가하기 위해서는 전과정 영향평가를 수행해야 한다.

본 연구에서는 전과정 목록분석을 통하여 파악된 온실가스 파라미터에 대하여 지구온난화 영향 범주로 분류(classification)한 후, 분류된 파라미터들이 지구온난화에 미치는 영향을 크기를 정량화하는 특성화(characterization)를 수행하여, 잠재적인 환경영향을 정량화하였다.

GWP는 각각의 온실가스를 범주지표인 적외선 흡수능력에 따라 CO₂에 상응하는 값으로 전환하며, 이 값의 총합이 본 연구대상 시스템의 GWP 가 된다⁶⁾.

$$GWP_j = Load_j \cdot eqv_j \quad (2)$$

$$\begin{aligned} GWP_{total} &= \sum_i GWP_i \\ &= \sum_j (Load_j \cdot eqv_j) \end{aligned} \quad (3)$$

- GWP_j : 온실가스 j의 GWP (kgCO₂-eq/f.u)
- Load_j : 온실가스 j의 배출량(kg/f.u)
- eqv_j : 온실가스 j의 GWP 상용인자
(kgCO₂-eq/kg)

3.5 전과정 해석

본 연구의 목적에 따라 주요 환경측면의 이슈를 규명하기 위해서 전과정 목록분석과 전과정 영향평가의 결과를 이용하여 각 공정별 대기배출물과 GWP(Global Warming potential)의 기여도를 분석하였다.

4. 결과 및 고찰

Table 6은 공정별 대기배출물 목록과 배출량을 보여주고 있는데, naphtha의 steam reforming에 의한 방법으로 수소 1kg을 생산하는데 전과정에서 발생하는 총 CO₂배출량은 약 6.3kg정도로 전체 대기배출물의 99wt% 이상을 차지하고 있으며, 수소제조단계의 제조공정내에서 가장 전체 대기배출물의 약 76wt%이상이 발생하고 있다.

Fig. 4. CO₂ emissions by life cycle stages.

압도적으로 많은 양이 배출되고 있는 CO₂에 대하여 공정별로 분석하여 보면, Fig.4에서는 전체 CO₂배출량의 전과정 단계별 배출 비율을 보여주고 있는데, 전체 CO₂의 92%가 수소제조단계에서 발생하고 있다.

Fig. 5에서는 수소제조단계에서 좀 더 세분하여 공정별 CO₂배출량을 분석한 결과를 보여주고 있는데, 소제조공정내, 즉, naphtha의 steam reforming반응과 화석연료의 사용으로 인한

Table 6. Air emissions by life cycle stages and processes.

큰 결점을 가지고 있는 것을 알 수 있다.

Table 7에서는 전과정영향평가를 수행하여 수소 1kg을 생산하는데 배출되는 온실가스에 의한 GWP(Global Warming Potential)에 대한 기여도를 각공정별로 산출하였다. GWP에 있어서도 CO₂배출량이 다른 온실가스에 비해 절대적으로 많기 때문에 CO₂에 의한 영향이 약 99.9%로 거의 대부분이다. 따라서, CO₂배출량과 비례하여 제조공정내의 GWP 기여도가 약 76%로 가장 높은 것으로 나타났다. 제조공정 다음으로는 공정 수인 BW의 사용과 수소제조공정에서 필요한 전기에너지의 사용에 따라 CO₂가 배출되고 있다.

위의 결과를 바탕으로 연료전지 자동차의 에너지원으로서의 수소와 일반승용차의 연료인 휘발유에 대하여 전과정에 걸친 CO₂배출량을 비교하였다. 이 비교를 위해서는 제품의 특성과 데이터 수집의 한계로 인하여 다음과 같은 몇 가지 가정 및 제한 사항이 필요하다⁷⁻⁸⁾.

- 수소와 휘발유는 사용중에 소모되는 에너지이므로 폐기 단계는 고려하지 않는다.
- 비교 대상 자동차는 동일하며, 다만, 휘발유 자동차의 엔진과 연료탱크 부분이 연료전

Fig. 5. CO₂ emissions by processes in hydrogen manufacturing stage.

CO₂ 배출량이 압도적으로 많은 것을 알 수 있다. 특히, steam reforming 반응에 의해서 발생하는 CO₂배출량이 약 3.4kg로 전체 CO₂배출량의 약 57%를 차지하고 있어서, 국외 뿐만 아니라 국내에서도 수소생산에 가장 많이 이용되고 있는 steam reforming 법은 근본적으로 환경측면에서

Table 7. Contribution rate of GWP by life cycle stages and processes.

Table 8. Life cycle phase and data source.

	전과정 단계	데이터 출처
수소	원료채취 및 제조 단계	본 연구 수행 결과 D/B
	사용 단계	Transportation Table* (Canada, 1998)
휘발유	원료채취 및 제조 단계	국내 환경 D/B (산업자원부, 2000)
	사용 단계	Simapro D/B (IDEMAT, 1997)

Fig. 6. CO₂ emissions per 100km navigation.

지자동차에서 연료전지, 모터, 기타 조절장치로 대체되었다고 가정하여 대상 자동차의 제조단계에서의 환경영향은 고려하지 않는다.

- 현재, 연료전지의 제조 단계는 업체의 대외비이기 때문에 공개되지 않을 뿐만 아니라, 전체 환경영향이 상대적으로 작으므로, 고려하지 않는다.

Fig. 7. CO₂ emissions according to increase of navigation distance.

*1998년에 캐나다에서 개발한 연료전지 자동차 평균 효율⁹⁾

각 단계별로 사용된 데이터의 출처는 다음의 Table 8과 같다. 100km 주행시 CO₂배출량을 비교하여 보면, Fig. 6에서 보는 바와 같이, 연료전지 자동차에서는 사용되는 수소의 원료채취와 제조단계에서만 다량의 CO₂가 배출되며, 휘발유 자동차의 경우, 원료채취 및 제조단계에서는 소량의 CO₂만이 배출되고, 대부분 사용단계에서 배출되는 것을 알 수 있다. 결과적으로 전체 CO₂배출량은 거의 비슷하게 나타났다. 수소의 경우 주행 중에 CO₂가 배출되지는 않지만, 주행하는데 소모되는 수소를 제조하는데 발생하는 CO₂량이 많아진다. 반면, 휘발유의 경우 주행하는데 발생하는 배기ガ스가 늘어나게 된다¹⁰⁾.

Fig. 7에서는 주행거리에 따른 CO₂배출량을 나타내었다. 일반자동차의 경우에 연료전지 자동차보다 약간 많은 양의 CO₂를 배출하게 된다. 그러나, 전과정에서 배출되는 총 CO₂량에서 수소와 휘발유의 차이가 크지 않기 때문에, 수소의 저장 및 유통 등을 고려하면, steam reforming 법에 의한 수소가 휘발유보다 환경측면에서 우수하다고는 단정할 수 없다. 따라서 보다 환경친화적인 수소제법에 대한 연구가 필요하다.

5. 결 론

국내에서 가장 많이 사용되고 있는 Nathpha의 steam reforming법에 대하여 전과정평가를 수행한 결과, 수소 1kg을 생산하는 전과정에서 약 6.3kg정도의 상당히 많은 양의 CO₂가 발생하며, 이 중 steam reforming반응에 의해서 발생하는 CO₂가 총 배출량의 절반을 넘는 약 3.4kg정도이다. 이는 화석연료와의 비교분석의 결과에서 나타난 바와 같이 화석연료의 사용 중에 발생하는 CO₂량과 비슷한 양이다.

미래의 청정한 대체에너지원으로 기대되는 수소는 사용과정에서 CO₂를 배출하지 않으므로, 환경성이 화석연료보다 우수한 것처럼 보이나, 실질적으로는 제조방법에 따라 수소제조과정에서 많은 양의 CO₂를 배출하기 때문에 오히려 환경측면의 개선을 기대하기 어려울 수도 있다.

따라서, 수소가 실질적으로 청정한 대체에너지로서 활용되기 위해서는 보다 환경친화적인 수소제조방법의 개발이 필요하며, 개발 초기부터 전과정평가와 같은 환경성 평가 도구를 이용하여 개선의 기회를 확보함으로써 보다 친환경적인 수소제조시스템의 구축을 유도하는 것이 중요할 것이다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단의 대체에너지 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 1) 한국원자력연구소 <http://kis21.kaeri.re.kr>.
- 2) 한국에너지기술연구원 <http://www.kier.re.kr>.
- 3) Pamela L. Spath, Margaret. Mann : "Life

Cycle Assessment of Hydrogen Production via Natural Gas Steam Reforming", National Renewable Energy Lab., USA, 2000.

- 4) ISO 14040 : Life cycle assessment-Principles and framework, 1998.
- ISO 14041 : Life cycle assessment-Goal and scope definition and inventory analysis, 1998.
- ISO 14042 : Life cycle assessment - Life cycle impact assessment, 2000.
- ISO 14043 : Life cycle assessment - Life cycle interpretation, 2000.
- 5) Gas Journal, 기획기사 "수소 시장 현황", Korea, 2000
- 6) Lars-Gunnar Lindfors et. al. : "Nordic Guidelines on Life-Cycle Assessment", Nord 20, 1995.
- 7) Yasunari Matsuno et al. : "Life cycle assessment case study for fuel cell vehicle", National Institute of Advanced Industrial Science, Japan, 2000.
- 8) Ballard annual report, Canada, 1997.
- 9) David Suzuki : "A Comparison of the Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions for Selected Fuel Cell Vehicle Hydrogen Production Systems", The Pembina Institute Climate-Friendly Hydrogen Fuel, Canada, 2000.
- 10) R. C. Dante et al. : "Life cycle analysis of hydrogen fuel : a methodology for a strategic approach of decision making", International Journal of Hydrogen Energy, 2002.