

자동차 연료로서 수소의 전과정 환경성/경제성 분석

이 지용^{1)*}, 차 경훈²⁾, 유 무상³⁾, 이 수연⁴⁾, 허 탁⁵⁾, 임 태원⁶⁾

Environmental and economic life cycle analysis of hydrogen as Transportation fuels

Jiyong Lee, Kyunghoon Cha, Moosang Yu, Sooyeon Lee, Tak Hur, Taewon Lim

Key words : Life cycle assessment, LCA(전과정평가), Life cycle cost analysis, LCCA(전과정 비용 분석), Hydrogen pathway(수소 경로)

Abstract : 화석연료의 점진적 고갈과 그 사용에 따른 지구온난화 그리고 에너지 안보를 해결하기 위하여 세계 각국에서는 대체에너지 개발에 노력을 기울이고 있다. 그 중 수소는 가장 주목받고 있는 대체에너지 원으로 현재 기술개발을 통하여 상업화 시기를 앞당기려고 하고 있다. 다시 말해서, 현재는 수소에너지 시대의 진입 시점이라고 할 수 있다. 이러한 수소는 다양한 소스에서 생산될 수 있으며, 수송연료로 연소 시, 유해 배출물이 거의 나오지 않는 장점이 있다. 그러나 수소는 그 생산 경로에 따라서, 다양한 환경성 및 경제성을 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 국내 수소 생산 방식으로 개발/상업화 되어 있는 NGSR, Naphtha SR, WE에 대하여, LCA와 LCCA 방법을 통하여, 수소 경로 전반 즉, 원료채취에서부터 자동차로 주행하였을 때까지를 포함하여 각 대상 수소 경로의 환경성과 경제성을 평가하였다. LCA와 LCCA 결과를 살펴보면, Naphtha SR 및 NGSR 수소 경로에서는 지구온난화와 화석자원 소모 부문 모두 기존연료와 비교해보았을 때 개선효과가 뚜렷하게 나타났으나, WE 수소 경로에서는 오히려 환경부하가 증가되는 것으로 나타났다. 또한 비용적인 측면에서 살펴보면, 수소에 가솔린과 동일한 연료 세율을 부과하더라도 수소가 가솔린에 비하여 주행 시 연료 비용이 저감되어 연료로서 가격경쟁력을 확보하였으며, 연료세를 부과하지 않는다면, Naphtha SR로 생산하여 유통한 수소가 수송연료로서 가장 비용 효율적인 것으로 나타났다.

subscrip

Naphtha SR: naphtha steam reforming
NGSR: natural gas steam reforming
WE: water electrolysis
LCA: life cycle assessment
LCCA: life cycle cost analysis
RAP: regulated air pollution
FCV: fuel cell vehicle
NG: natural gas
LNG: liquified natural gas
VOC: volatile organic compounds

1. 서론

21C에 들어오면서 화석자원의 고갈로 배럴 당 \$70에 육박하는 고유가를 나타내고 있으며, 또한 화석연료의 사용으로 인한 지구온난화에 대한 국제적인 관심이 고조됨에 따라 수소에너지가 미래

의 대체에너지원으로 주목받고 있으며, 세계 각국의 정부 및 기업, 연구소와 학계에서 수소의 제조와 사용에 관한 연구를 진행 중에 있다. 국내 역시 세 가지 화석연료(원유, 천연가스, 석탄)를 모두 수입하는 국가로서 증가되고 있는 에너지

-
- 1) 소속: 건국대학교 화학생명공학부
E-mail : jiyong77@empal.com
Tel : (02)447-6760 Fax : (02)453-6710
 - 2) 소속, Tel, Fax:상동
E-mail : sorrowheart@hanmail.net
 - 3) 소속, Tel, Fax:상동
E-mail : cosmosoahc@hanmail.net
 - 4) 소속, Tel, Fax:상동
E-mail : psike84@empal.com
 - 5) 소속 : 상동
E-mail : takhur@konkuk.ac.kr
Tel : (02)450-3503 Fax : (02)447-6710
 - 6) 소속 : 현대기아 연구개발본부
E-mail : twlim@hyundai-motor.com
Tel : (031)369-7080 Fax : (031)369-7122

소비와 높은 에너지 수입의존도로 인하여, 정책적으로 석유 의존도를 2030년까지 35%로 낮추는 정책을 마련하고 신·재생에너지원인 수소/풍력/태양광 등의 의존도를 높이려는 방안을 모색하고 있다. 그 중 수소는 사용 시, 환경배출물이 적고 특히, 수송부문에서 연료로 사용할 경우, 가솔린과 디젤을 대체할 에너지원으로 예측되고 있으며, 현재 미, EU, 일본 및 국내에서도 수소를 연료로 구동하는 연료전지 자동차(H₂ FCV)와 그 기반 시설을 구축하여 수소 제조 및 저장, 유통, 이용, 즉 수소의 전과정(원료채취-자동차의 연료로서 사용)을 모니터링하며, 상용화로 진입하기 위한 연구를 진행 중에 있다. 따라서, 국내의 수소 경제 진입을 위한 최적의 수소 공급 인프라 시스템을 구축하기 위해서는 수소를 제조하기 위한 다양한 원료, 제조, 저장·유통 방법을 고려하여 어떤 수소 경로가 수송 연료로서 가격 경쟁력을 확보할 수 있는지를 분석해 볼 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 전과정평가(LCA)와 전과정 비용분석(LCCA)기법을 적용하여 국내의 기존 수소 제조 경로와 연구 개발 중인 수소 제조 경로들을 파악하여 수소가 수송연료로서, 환경적인 개선 측면과 연료로서 사용할 수 있는 가격 경쟁력을 가질 수 있는지를 규명하였다.

2. 대상시스템

본 연구의 시스템경계는 수소를 제조하기 위하여 사용되는 원료 채취로부터 수소가 수소스테이션에 저장되어 자동차에 주유되어 연료로 사용하기까지의 연료의 전과정을 고려하였다.⁽¹⁾ 대상 수소 제조 시스템은 국내의 수소 제법 중 대표적인 Naphtha SR 수소제법과 수소스테이션용으로 연구

개발 중인 NGSR 수소제법, 마지막으로 화석연료를 원료원으로 하지 않는 WE 수소제법으로 하였다. 수소의 수송연료로서 가격 경쟁력과 환경성 개선효과를 분석하기 위하여 기존 연료인 가솔린과 디젤의 전과정 역시 연구의 대상 시스템에 포함하였다.

2.1 H₂ via Naphtha SR

본 연구에서 고려한 Naphtha SR 수소 제법은 대량생산[중앙집중] 방식으로 국내 이미 상용화 되어 있으며, 국내 전체 수소 생산 점유율도 가장 높은 수소 제법이다. Naphtha SR 수소 경로는 Fig 1에 나타낸 것과 같이, 원산지에서 Crude oil을 채취한 후, Oil-Tanker로 수입하여 정제과정에서 얻은 납사와 스팀의 개질반응을 통하여 수소를 생산하여 유통하기 위한 고압 가스 압축(200bar) 및 저장하여 400bar로 차량에 충전되어 연료로 사용되는 것이 Naphtha SR에 의한 수소의 전과정이며, 이 일련의 과정을 평가 대상 시스템으로 고려하였다.

2.2 H₂ via NGSR

NGSR은 국내에 상용화된 플랜트는 존재하지 않으나, 수소 경제로의 전환을 위하여 수소스테이션용 소형 리포머가 개발되어 한국가스공사 내 수소스테이션에 설치 운전 준비중에 있다.²⁾ NGSR 수소 경로는 천연가스를 LNG상태로 수입하여 NG로 전환한 다음, 수소스테이션까지 파이프라인으로 공급하여 스테이션내의 리포머에서 수소를 생산하여 압축(400bar)한 후, FCV에 공급하게 된다.

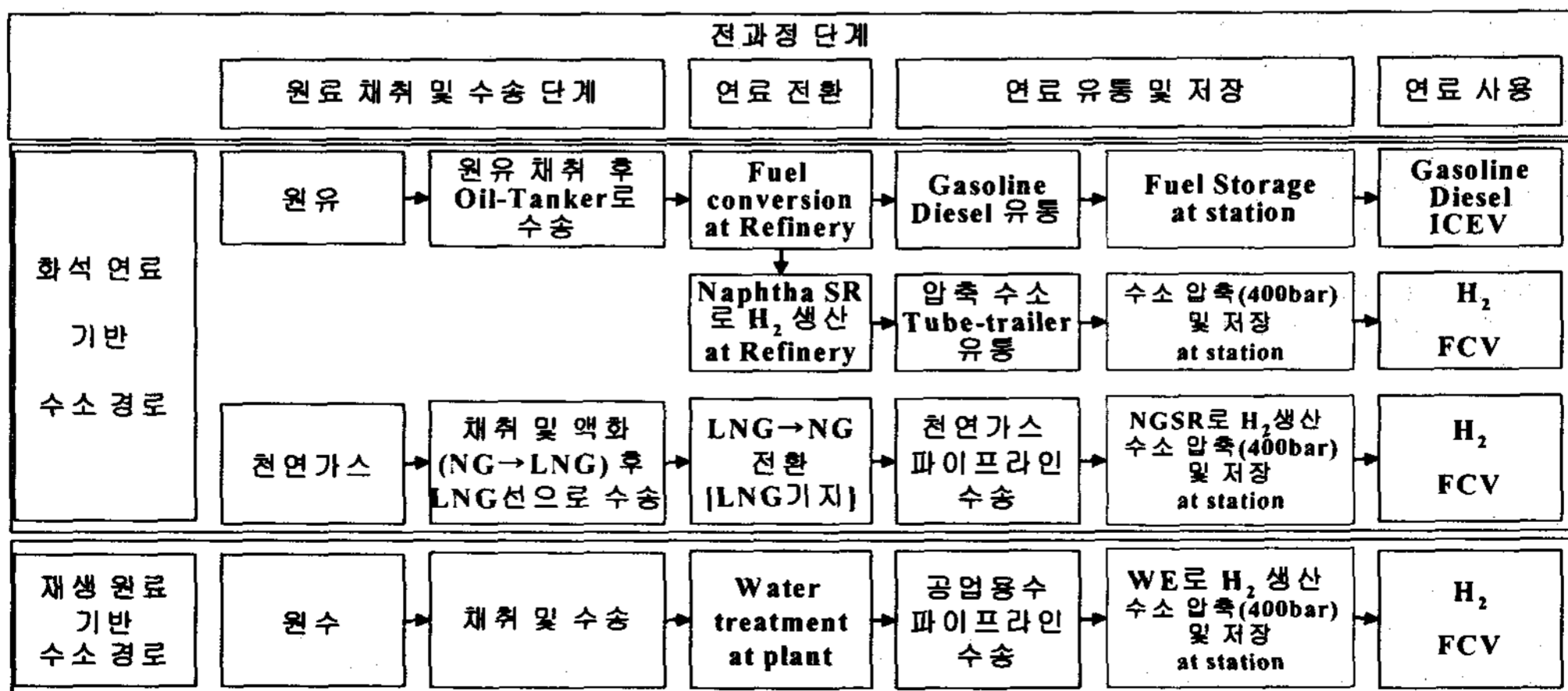


Fig. 1 Target fuel pathways

2.3 H2 via WE

전기분해 방식 수소 생산은 전기화학적 반응을 통해서 물을 수소와 산소로 분리하는 것으로 제조 시 대기오염물질이 배출되지 않는 장점이 있다. 물 전기분해에 의한 수소 경로는 원수를 끌어올려 공업용수로 전환한 다음 파이프라인으로 수소스태이션에 공급하여 수소를 생산하고 압축·저장하여 차량에 공급하여 연료로 사용하게 된다.

2.4 Gasoline/Diesel

가솔린과 디젤의 경로는 각 원산지 별로 원유를 수입량과 거리를 고려하여 원료 채취 단계와 수송단계를 적용한 다음, 국내 정유공장에서 정제 공정과, 제조 후 송유관을 통해서 일정 거점까지 동일하게 운반 후, 탱크로리로 수요처인 주유소로 유통하는 단계, 내연기관 자동차에서 사용되는 것까지의 일련의 과정을 모두 고려하였다.

3. 연구 방법론

3.1 연구 방법론

전과정평가(LCA)는 대상 시스템의 전과정에 걸친 투입물과 산출물을 정량화하고, 이러한 투입물 및 산출물과 관련된 총체적인 잠재적 환경영향을 평가함으로써 환경영향의 이동(trade-off)을 규명하고 환경측면의 이슈를 규명할 수 있는 환경성평가방법으로 본 연구에서는 ISO에서 제시하고 있는 절차에 의거하여 진행하였다.³⁾⁴⁾

전과정평가는 Fig 2와 같이 4단계로 구성되어 있으며, 전과정 비용 분석 역시 연구의 일관성을 유지하기 위하여, 동일한 절차로 진행하였다. 본 연구의 진행방법은 아래 Fig 3과 같다.

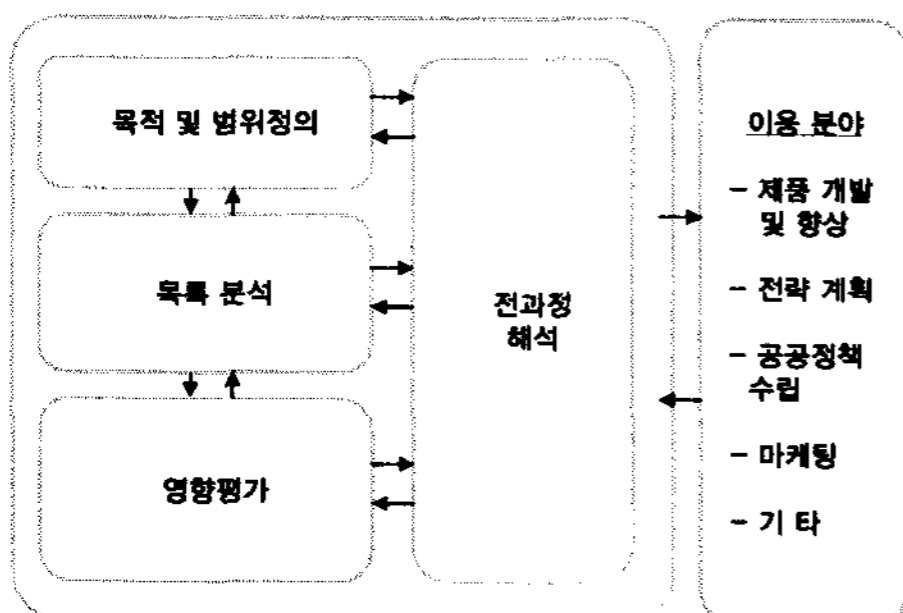


Fig 2. Basic structure of LCA

3.2 평가 기준

전과정 평가에서는 여러 대안들을 동등하게 비교하기 위하여 평가의 대상이 되는 제품 및 시스템에 대해서 기능 및 기능단위를 설정하고 기능단위를 기준으로 평가를 수행한다. 본 연구에서는 기존 연료인 가솔린과 디젤과의 동등한 비교를 위하여 평가 기준을 자동차 배출허용기준 및 수명과 평균 주행거리를 고려하여, 160,000km를 주행할 때, 발생하는 환경부하와 비용을 비교 분석하였다.

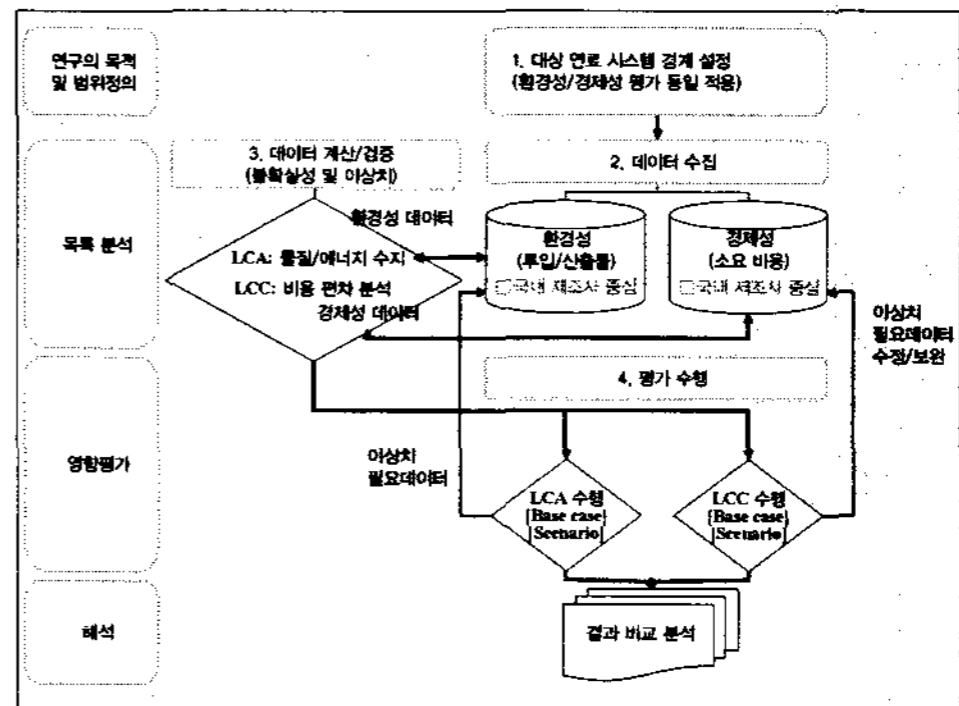


Fig 3. The procedure of this study

Table 1 Function and Functional unit

대상 시스템	H ₂	H ₂ via Naphtha SR, H ₂ via NGSR, H ₂ via WE
		화석 연료
기능	수송 연료	
기능단위	160,000km 주행	

3.3 평가 항목

3.3.1 LCA 부문

환경성 부문에 있어서, 수송연료로 발생하는 가장 심각한 영향인 화석연료 소모 부문과 지구온난화 그리고 주요 규제대상 대기배출물에 대하여 평가하였다.

■ 지구온난화 가스 배출

- CO₂, CH₄ (21 gCO₂-eq/gCH₄)
- N₂O (310 gCO₂-eq/gN₂O), IPCC 기준

■ 화석자원 소모

- Crude oil, Coal, Natural gas

■ 규제 대상 대기 배출물

- VOCs, CO, SO_x, NO_x, Dust

3.3.2 LCC 부문

일관성 있는 전과정 비용 분석을 위하여, 먼저 원료 채취-수소제조-스테이션 내 저장까지는

- 인건비 ■ 원자재 비
 - 에너지 비 ■ 생산 장비
 - 유지 및 보수 비용
 - 기타(세금, 이자, 보험 등)을 고려하였으며,
- 수소가 수송연료로 사용되는 단계에 대해서는
- 연료 비용 ■ 연료 세를 고려하였다. ⁽⁵⁾⁽⁶⁾

연료전지 자동차는 아직 상용화가 되지 않고 현재 제조원가가 상용화되었을 때를 반영하지 못하므로 분석에서 제외하였다.

3.4 데이터 품질

대상 시스템들에 대하여 신뢰도 있는 평가를 수행하기 위하여 Table 2에 나타낸 데이터 품질을 적용하였다.

Table 2 Data Quality

대상	구분	시간적 경계	지역적 경계	기술적 경계
Gasoline Diesel		2004	국내(SK, S-oil)	상용화
	Naphtha SR	2006	국내(SK, Oil-bank)	상용화
H ₂	NGSR	2006	국내(KOGAS, SK)	20Nm ³ /hr
	WE	2005~6	국내(엘켄텍), 국외(Stuart Energy)	5Nm ³ /hr, 20 Nm ³ /hr급

4. 결과

4.1 LCA 결과

■ 지구온난화 (g CO₂ equiv./16만 km 주행)

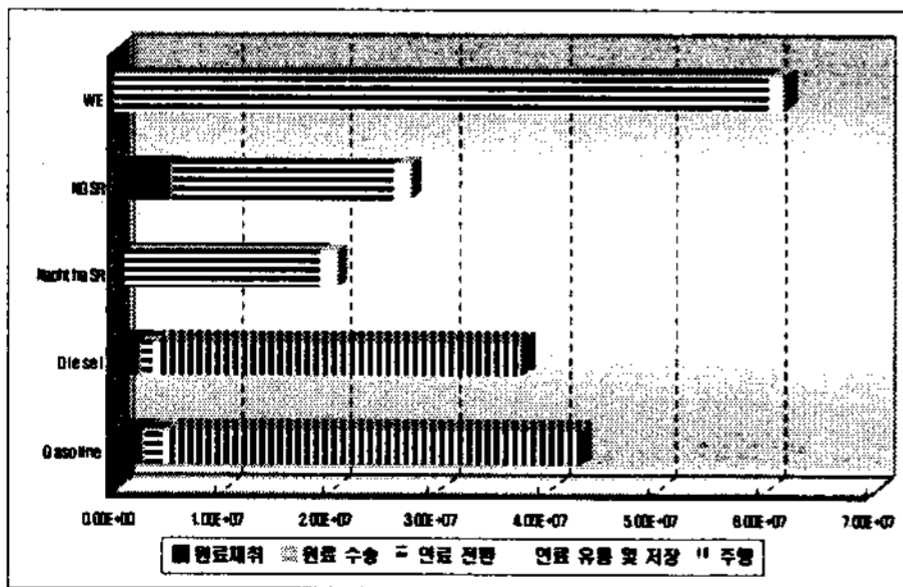


Fig 4. GWP of each fuel pathway

Fig 4를 보면 알 수 있듯이, 비록 SR공정에서 CO₂를 많이 배출하지만, 연료로 사용 시, 높은 에너지 효율로 수소 사용량이 적고, 주행 시 지구온난화 가스가 나오지 않는 장점으로 인하여, 중앙 집중방식 Naphtha SR과 스테이션 방식 NGSR 수소

경로에서는 지구온난화 저감효과가 나타나고 있다. WE 수소 경로는 물 전기 분해 시, 사용되는 전기 사용량에 의하여, 오히려 CO₂ 증가 효과가 발생하는 것으로 나타났다. 그러나 이것은 국내 발전량 중 40%에 육박하는 화력 발전으로 인하여 발생하는 CO₂에 의한 것으로 전력원 구성을 재생 에너지로 전환한다면, WE 수소 경로 역시 CO₂ 개선효과가 발생할 것으로 예상된다.

■ 화석 자원 소모(MJ 소모/16만 km 주행)

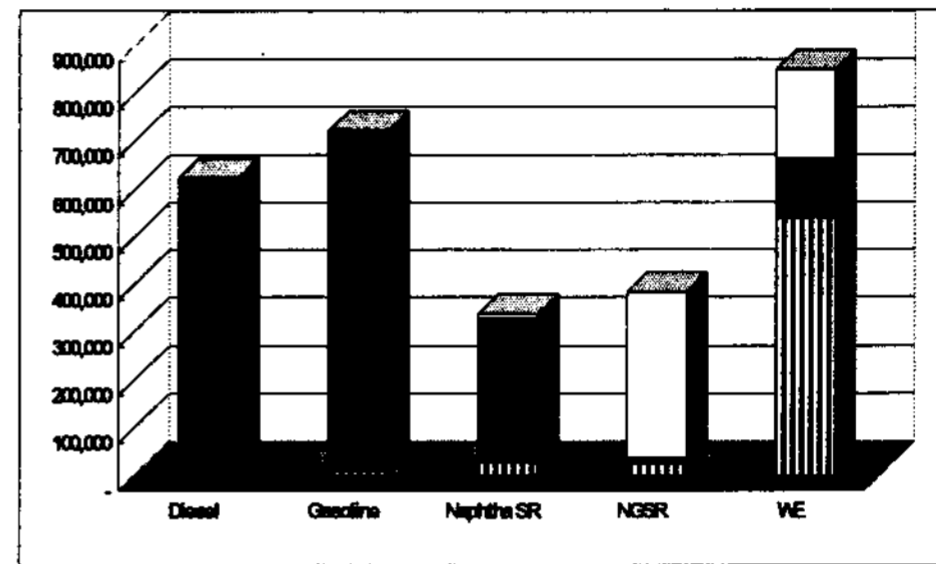


Fig 5. Fossil resources consumption of each fuel pathway

화석자원 소모량 비교는 연료 경로 별, 원유, 석탄, 천연가스 소비량을 에너지 단위로 환산하여 16만km 주행 시, 투입되는 에너지 량으로 나타내었다. 각 연료 별, 원료물질들의 소모량이 가장 많이 소모되는 것으로 나타나고 있으며, WE의 경우 앞서 언급한 것과 같이 수소 제조 시 투입되는 에너지 중 화력발전으로 인하여, 석탄 소모량이 가장 많이 나타나는 것을 알 수 있다.

■ 규제대상 대기배출물

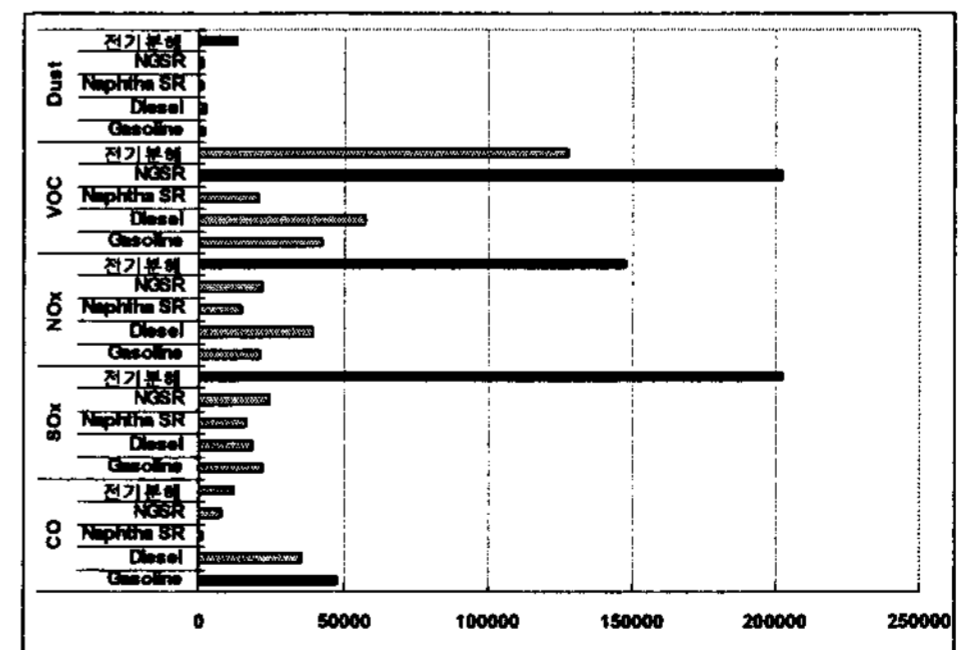


Fig 6. RAP of each fuel pathway

모든 수소 경로가 CO 배출물에서는 저감 효과를 나타내고 있으며, Naphtha SR 수소 경로의 경우, 그 외 모든 대기배출물에서도 기존 연료들보다 저감 효과를 나타내고 있다. NGSR 수소 경로

는 CO와 Dust, NOx 부문에서 저감효과를 나타내고 있는 반면, WE 수소 경로는 CO를 제외한 모든 부문에서 기존 연료보다 다량의 대기배출물을 발생시키는 것으로 나타나고 있다.

4.2 LCCA 결과

Well to Tank 부문 (원/MJ fuel)

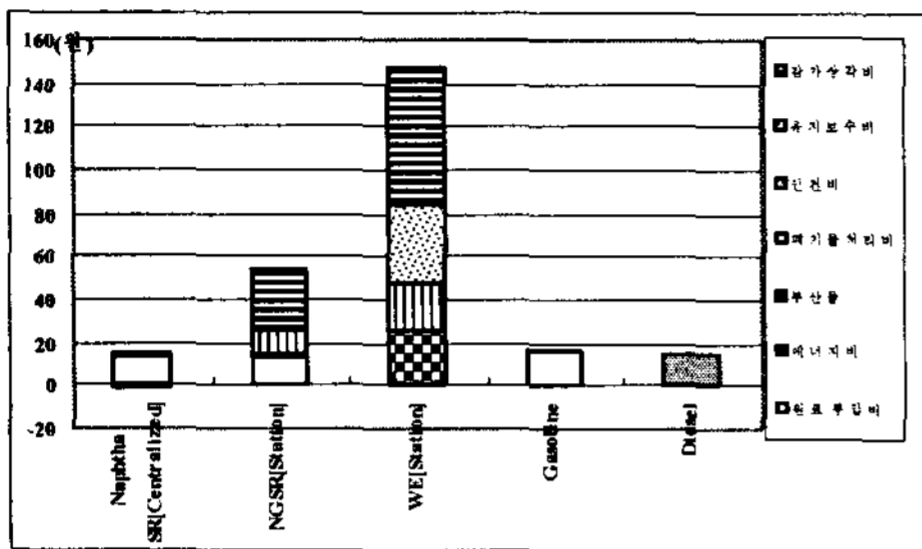


Fig 7. Well to tank costs of each fuel pathway

연료의 제조 비용(원료채취 - 연료 제조)을 알아보기 위하여, 화석연료 소모 부문 분석과 마찬가지로 Fig 7에 MJ당 원가로 비용을 나타내었다.

Naphtha SR 수소 경로만이 기존 연료와 가격 경쟁력을 가지고 있었으며, 현재 시점에서 그 외 수소 경로에서는 아직 상용화 되지 않은 수소 제조 및 저장, 충전 장치의 높은 감가상각비와 유지보수 비로 인하여 가격 경쟁력을 확보하고 있지 못함을 알 수 있다.

Well to Wheel 부문

기존 연료와 수소가 각각 ICEV와 FCEV에서 연료로 사용될 경우, 주행 시 비용 차이를 분석해보았다. Fig 8을 보면 알 수 있듯이, 수소에 가솔린과 같은 세율을 부과할 경우와 부과하지 않았을 경우 두 가지 경우에 대해서 분석하였다.

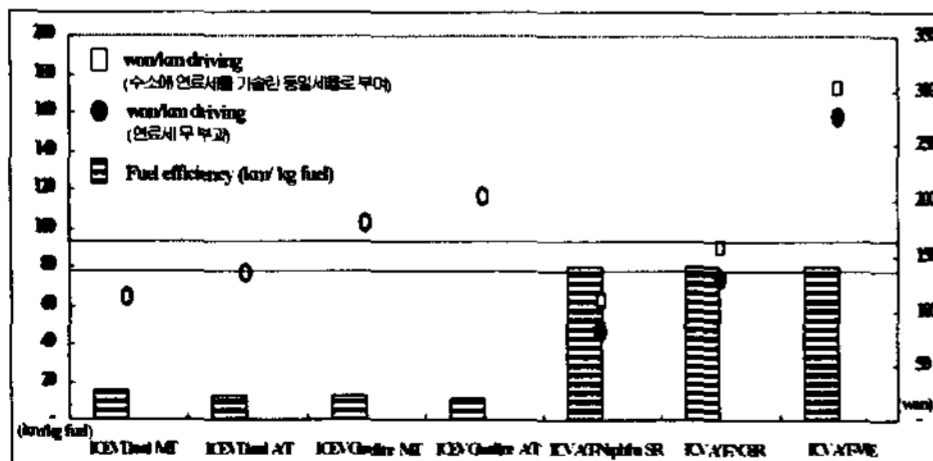


Fig 8. Well to wheel costs of each fuel pathway

먼저, 수소에 연료세를 부과할 경우, Naphtha SR, NGSR 수소 경로는 가솔린 ICEV (M/T, A/T)로 주행하였을 경우보다 연료 비용이 낮게 나타났으며, 연료세를 부과하지 않았을 경우에는 Naphtha SR 수소 경로의 경우, 기존 연료를 포함하더라도

연료 중 가장 연료 비용이 적게 드는 것으로 나타났다.

5. 결론

LCA 결과, 환경성 측면에서는 수소 경로들이 기존 연료보다 지구온난화 영향과 화석 연료 소모, 규제 대상 대기배출물 범주에서 모두 저감효과를 나타내는 것을 확인 할 수 있었다. 다만, WE 수소 경로의 경우, 전기의 다량 소모로 인하여 오히려, 기존 연료보다 환경부하가 증가되는 현상을 보이므로, WE를 사용할 시에는 재생에너지를 활용하는 방안을 함께 염두해 두어야 할 것이다. LCCA 분석 결과를 보면, 수소의 경우, 에너지원으로는 아직 Naphtha SR 수소 경로를 제외하고는 대체에너지로서 가격 경쟁력을 확보하고 있지 못하고 있지만, 수송 연료로서는 스테이션 방식인 NGSR 수소 경로 역시 가격경쟁력을 가지는 것으로 나타나, 수소 인프라 중 가장 마지막 단계인 FCV가 상용화 되어 FCV 제조 비용이 저감된다면, 수소 경제의 보급·확산은 환경적·경제적 개선 효과를 가져다 줄 수 있을 것으로 예상된다. LCA 및 LCCA와 같은 평가 방법을 사용하여, 개발되고 있는 많은 대체에너지와 그 기반시설, 경로들을 총체적으로, 전과정적인 관점에서 분석한다면, 효과적인 수소 및 대체에너지 인프라 구축 및 정책 수립을 할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 신재생에너지기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] GM Corporation, 2002, GM well to wheel analysis of energy use and greenhouse gas emissions of advanced fuel/vehicle systems-a european study.
- [2] 이영철, 30Nm³/hr급 수소스테이션 건설 및 실증 연구, 2007, 수소·연료전지사업단 Workshop.
- [3] ISO 14040: Life cycle assessment - Principles and framework, 2006
- [4] ISO 14044: Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines, 2006
- [5] D. Simbeck, E. Chang, 2002, Hydrogen supply : cost estimate for hydrogen pathways - scoping analysis, National Renewable Energy Laboratory.
- [6] Tax policy services group of Ernst & Young, 2003, An economic analysis of various hydrogen fuelling pathways from a Canadian perspective.