

## 수소경제 실현을 위한 수소최적공급시스템 연구

조 상민<sup>1)</sup>, 부 경진<sup>2)</sup>

### A Study on Optimal Hydrogen Supply System for materialization of Hydrogen Economy

Sangmin Cho, Kyung-Jin Boo

**Key words** : hydrogen(수소), fuel cell(연료전지), market penetration(시장보급률)

**Abstract** : 본 연구는 부문별 수소 및 연료전지의 수요량을 산정하고 원활한 수소공급을 위한 수소제조 원의 최적믹스를 바탕으로 수소 도입 이후의 에너지믹스를 제시하는 것을 목표로 하고 있다. BaU 전망은 에너지경제연구원의 전망을 바탕으로 하였으며 기준안, 고유가안, 저유가안의 세가지 시나리오를 설정하여 각 시나리오별 분석을 수행하였다. 기준안에 따르면 수소 및 연료전지는 2015년 시장에 도입되어 2031년 5%의 시장보급률을 확보한 이후 보급률이 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 수소 연료전지 시장 중 특히 수송부문이 선도적 역할을 할 것으로 기대되며 FCV 보급대수는 2040년 1,132만대로 전체 자동차 시장의 48.4%를 차지할 전망이다. 최종에너지 중 수소의 비중은 2040년 8.7%에 이를 것으로 예측되며 수소의 도입으로 인해 1차에너지 중 신·재생에너지 비중이 BaU 대비 약 5.1%p 증가한 12.1%에 이를 것으로 분석되었다. 총 수소수요량은 777만톤에 이를 전망이다. 고유가안에서는 수소 및 연료전지가 2012년에 시장에 도입되는 것으로 가정하였으며 2040년 FCV 보급대수는 1,633만대에 이를 전망이다. 최종에너지 중 수소 비중은 11.5%에 이를 것으로 예상되며 1차에너지 신·재생에너지 비중은 11.6%로 분석되었다. 수소수요량은 1,015만톤으로 전망된다. 저유가안에서는 수소 및 연료전지가 2018년 도입되는 것으로 가정하였다. 이 경우 2040년 FCV는 641만대가 보급되어 자동차 등록대수의 27.4%를 차지할 것으로 전망된다. 최종에너지 중 수소 비중과 1차에너지 중 신·재생에너지 비중은 각각 5.5%, 9.1%에 이를 것으로 분석되었으며 수소수요량은 496만톤으로 전망된다.

#### Nomenclature

BaU : business as usual  
FCV : fuel cell vehicle  
AHP : Analytic Hierarchy Process  
PPV : People Per Vehicle

#### 1. 서론

세계 각국의 에너지전문가들은 화석연료의 한계로 인해 현재의 탄소 중심의 에너지시스템이 수소를 중심으로 한 지속가능한 미래에너지시스템으로 전환될 것으로 예상하고 있다. 이는 곧 수소경제의 도래를 의미하며 미국을 중심으로 한 일본, EU 등 선진국들은 이미 수소경제로의 이행에 대비한 준비 작업에 박차를 가하고 있다. 우리나라도 수소경제마스터플랜을 수립하여 수소경제로의 효

과적인 이행을 도모하고 있으며 기술개발 및 시범 보급사업을 추진하는 등 이러한 국제적 추세에 발맞추고 있다.

수소경제로의 이행에 있어 가장 중요한 문제 중 하나는 수소 및 연료전지의 수요를 전망하는 것이다. 수소 및 연료전지의 수요를 전망하는 것은 단지 수소 및 연료전지의 시장규모를 예측하는 것에 국한되지 않는다. 수소 및 연료전지 수요에 따라 수소제조 방식, 즉 분산형 수소생산 방식에서 집중형 수소생산 방식으로의 전환 시기를 예측할 수 있고 이를 바탕으로 수소 공급 및 저장 인프라의 구축, 관련 제도 개선 및 신설 등 경제 전반에 거친 변화의 시기와 정도를 가늠케 한다.

1) 에너지경제연구원  
E-mail : smin0621@keei.re.kr  
Tel : (031)420-2223 Fax : (031)420-2161  
2) 에너지경제연구원  
E-mail : kjboo@keei.re.kr  
Tel : (031)420-2139 Fax : (031)420-2161

한편 수소를 어떠한 원료를 이용하여 어떠한 방식으로 제조할 것인가도 지속가능한 에너지믹스의 실현을 위해 아주 중요한 문제이다. 수소를 LNG나 석탄과 같은 화석에너지에 전적으로 의존하여 제조한다면 이는 화석에너지시대의 연장에 불과할 것이다. 하지만 재생에너지를 이용한 수소제조는 생산비용이 전통에너지원에 비해 작게는 2-30%, 크게는 10배 정도로 높으며 획기적인 기술 돌파구가 마련되지 않는다면 근 시일내에 저가의 대규모 생산은 기대하기 힘든 것으로 평가되고 있다. 따라서 수소 제조원의 비용뿐만 아니라 기타 사회문화적 요인, 정치적 요인 등을 고려하여 적정 수소제조 믹스를 선택해야 할 것이다.

본 연구에서는 이러한 배경하에 2005년도에 연구보고서인, “수소경제의 국가비전 및 실행계획 연구”에서 제시된 장기전략과 로드맵에 기초하여 부문별 수소 및 연료전지의 수요량을 산정하고 원활한 수소공급을 위한 수소제조원의 최적믹스를 바탕으로 수소 도입 이후의 에너지믹스를 제시하는 것을 목표로 하고 있다.

## 2. 주요 연구내용 및 방법론

본 연구에서는 확산모형을 이용하여 수소수요량 및 에너지 대체량, 연료전지 보급량을 산정하고 이를 바탕으로 최종에너지믹스 변화, 1차에너지믹스 변화를 분석하였다. 확산모형을 이용함에 있어서 가장 중요한 개념은 시장보급률(market penetration)이다. 시장보급률은 특정 시점에 특정 상품이나 기술이 시장에 보급된 비율을 의미한다. 시장보급률의 산정은 첫째, 분석 대상이 대체할 것으로 예상되는 제품 또는 기술의 목표시장(target market) 또는 교체대상시장(market to be replaced)을 선정하고 둘째, 목표시장 중 분석 대상으로 대체가 가능한 시장 즉, 대체시장의 크기를 설정한 후 셋째, 분석 대상의 보급량 또는 보급률을 산정하는 과정을 거치게 된다.

본 연구에서는 확산모형 중 Lawrence-Lawton 확산모형을 채택하였다. Lawrence-Lawton 확산모형은 비교적 새로운 제품과 비교적 성숙된 기술간의 차이를 잘 설명하여 기술확산속도를 예측하는 방법으로 잘 알려져 있다.

$$S_t = \frac{1+P}{1+(1/P)e^{-RV}} - P$$

여기서  $S_t$  : t시점의 누적 채택률

$P$  : 초기시장 파라미터

$R$  : 확산 속도 파라미터

$V$  : 현재년도 + 성숙도 - 기준년도

아직 국내는 물론 세계적으로 연료전지의 시장이 형성되어 있지 않기 때문에 주요변수의 추정에 문제가 있다. Collantes(2006)의 연구에 의하면 미국 내 연료전지 관련 전문가 및 정부담당자 등을 대상으로 설문조사를 실시한 결과 연료전지 자동차의 시장도입시기는 2015년, 연료전지 자동차의 5% 시장보급시기는 2031년으로 나타났다. 본 연구에서는 이 결과를 확산모형에 인용하여 연료전지 시장보급률 및 보급대수를 산정하였으며 연료전지 수명을 고려하여 신규 및 누적도입대수 또한 산정하였다.

대체시장은 각 부문별 특성을 고려하여 설정하였다. 산업부문과 가정·상업부문은 전력 시장을 교체대상시장으로 파악하고 그 중 분산형 전원 시

장을 대체시장으로 설정하였다. 열에너지 시장은 부수적으로 대체시장에 편입시켰다. 산업부문 및 가정·상업부문의 대체시장은 다음과 같다.

Table 1 산업부문 및 가정·상업부문 대체시장 (단위 : 천TOE)

	2010년	2020년	2030년	2040년
산업부문	3,580	3,995	5,534	6,848
가정부문	1,121	1,283	1,762	2,179
상업부문	2,609	3,176	4,640	5,840
전력량 중 비중	21.2%	18.0%	19.7%	20.7%

반면 수송부문은 전체 자동차 시장을 교체대상 시장 및 대체시장으로 설정하였으며 이는 연료전지 자동차가 기존의 화석연료 자동차를 모두 대체할 수 있을 것으로 전망되기 때문이다. 2040년까지의 차종별 등록대수는 한국교통연구원(2006)의 2020년까지의 전망 결과를 2040년까지 연장하여 전망하였다. 자동차 등록대수 전망결과는 다음과 같다.

Table 2 차종별 등록대수 전망

(단위 : 천대)

	2010년	2020년	2030년	2040년
자가승용	13,450	18,566	19,485	18,581
택시	401	482	419	409
자가승합	962	477	316	171
영업승합	98	125	128	122
자가화물	3,230	3,858	3,700	3,506
영업화물	396	530	543	514
특수차	57	72	74	70
합계	18,595	24,112	24,665	23,372
PPV	2.65	2.07	2.00	2.00
자가승용 PPV	3.66	2.69	2.53	2.52

수소제조방법의 최적믹스는 에너지기술연구원의 계층화 우선순위 분석(AHP) 결과를 바탕으로 각 제조원별 공급 잠재량을 고려하여 산출하였다. AHP분석 방법론은 현존하는 의사결정 기법 중 유용성의 측면에서 이론적으로 높이 평가되고 가장 광범위하게 활용되고 있는 방법론이다. AHP 분석에 의한 수소에너지 제조원별 최적믹스는 다음의 표와 같다.

Table 3 수소에너지 제조원별 최적믹스

	가중치	순위
천연가스	0.185	3
여유전력	0.125	4
부생가스	0.088	5
신재생	0.295	1
석탄	0.071	6
원자력	0.235	2
합계	1.000	

### 3. 연구결과

본 연구에서는 총 3개의 시나리오를 설정하여 각 시나리오별 연료전지 보급대수와 수소수요량을 산정하고 에너지믹스의 변화를 산출하였다. 시나리오 분석에 앞서 분석의 기본이 되는 BaU 전망을 선정하여야 하는데 본 연구에서는 에너지경제연구원의 2030년까지의 장기수요 전망을 2040년까지 연장하여 이를 BaU로 설정하였다. 기준안의 경우 Collantes의 연구결과를 인용하여 2015년 연료전지가 도입되는 것으로 가정하였으며 수소제조원은 사회적 수용성을 고려하여 AHP분석 결과에서 원자력을 제외하였다. 고유가안에서는 유가상승으로 인해 수소 및 연료전지의 도입이 2012년으로 당겨지고 급증하는 수소수요를 감당하기 위해 수소제조에 원자력도 이용되는 것으로 가정하였다. 마지막으로 저유가안에서는 수소 및 연료전지의 도입이 2018년으로 지연되고 수소제조원 중 원자력이 제외되는 대신 상대적으로 저렴한 석탄의 비중이 증가하는 것으로 가정하였다.

우선 수소도입으로 인한 부문별 에너지 대체량을 살펴보면, 수송부문 최종에너지 대체량은 기준안의 경우 2040년 기준 2,404만 TOE로 도로부문 에너지사용량의 54.1%를 대체하는 것으로 나타났으며 수소에너지 투입량은 1,202만 TOE로 전망된다. 연료전지자동차(FCV) 도입대수는 1,132만대로 전체 자동차 등록대수의 48.4%에 달할 전망이다. 고유가안의 경우 3,156만TOE를 대체하며 저유가안은 1,413만TOE를 대체하는 것으로 분석되었다.

산업부문 연료전지의 시장보급률은 기준안의 경우 2040년 73.2%로 보급설비용량은 9,456MW, 보급대수 31,669대로 전망되었다. 이로 인한 에너지 대체량은 501만 TOE로 나타났다. 고유가안의 산업부문 연료전지 보급용량은 10,417MW로 전망되며 이로 인한 최종에너지 대체량은 597만TOE로 분석되었다. 저유가안은 7,057MW의 연료전지가 보급되어 358만TOE의 에너지 대체가 발생하는 것으로 나타났다.

가정·상업부문의 연료전지 시장보급률은 기준안의 경우 2040년 가정부문이 36.8%, 상업부문이 65.6%에 이를 것으로 전망되고, 보급용량은 11,267MW로 나타났다. 에너지대체량은 681만 TOE에 이를 전망이다. 고유가안과 저유가안의 보급용량은 각각 15,075MW, 7,169MW로 전망되며 에너지 대체량은 각각 874만TOE, 448만TOE로 나타났다.

수소수요량은 기준안의 경우 2040년까지 777만톤으로 추산되며, 이 중 수송부문이 45.6%, 산업부문이 28.0%, 가정상업부문이 26.4%를 차지할 것으로 예상된다. 고유가안의 경우, 수소수요량은 1,015만톤으로 기준안에 비해 늘어나며, 저유가안의 경우 496만톤으로 전망된다.

Table 4 시나리오별 수소수요량

	기준안	고유가안	저유가안
수소수요량	7,769	10,154	4,961

수소제조원별 제조량을 살펴보면 기준안의 경우 신·재생에너지가 405만톤으로 가장 큰 비중을

차지할 것으로 전망되며 다음으로 천연가스가 254만톤, 석탄이 98만톤, 부생가스가 20만톤으로 분석되었다. 고유가안의 경우 기준안과 마찬가지로 신·재생에너지가 373만톤으로 가장 비중이 큰 것으로 나타났으나 저유가안의 경우 석탄이 186만톤으로 가장 많은 것으로 분석되었다.

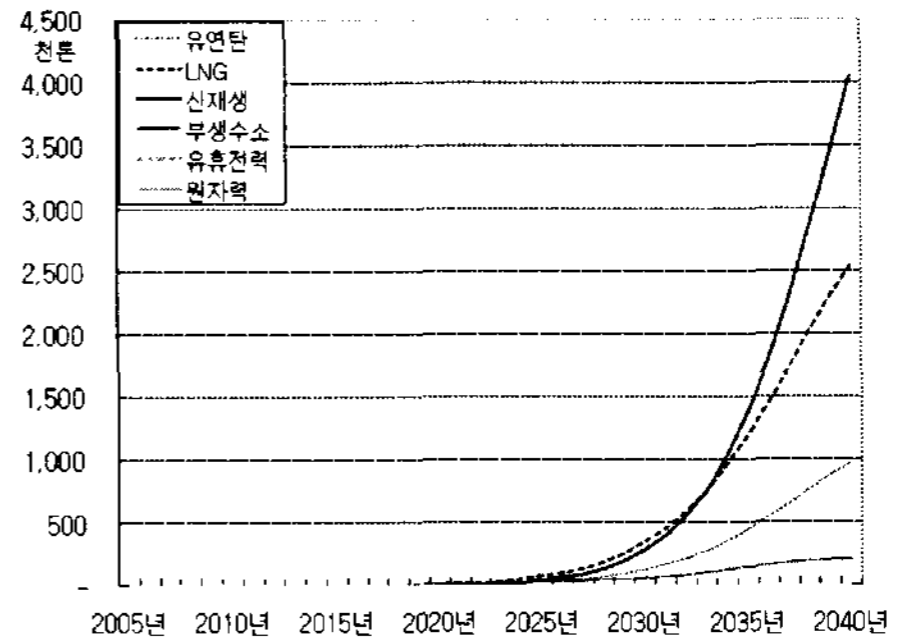


Fig. 1 기준안의 제조원별 수소 생산량

수소에너지 도입으로 인한 2040년 최종에너지 믹스 변화를 살펴보면 기준안의 경우 BaU에 비해 최종에너지사용량이 952만TOE 감소하는 것으로 나타났으며 석유의 비중이 BaU 대비 6.5%p 감소한 40.0%에 그칠 것으로 분석되었다. 최종에너지 중 수소가 차지하는 비중은 8.7%에 이를 전망이다. 고유가안의 경우 1,345만TOE가 감소하는 것으로 나타났으며 석유의 비중은 36.5%로 크게 낮아지는 것으로 분석되었다. 수소의 비중은 11.5%에 이를 것으로 전망된다. 저유가안의 최종에너지 절감량은 538만TOE로 나타났으며 수소의 비중은 5.5%로 분석되었다.

Table 5 시나리오별 최종에너지믹스

	BaU	기준안	고유가안	저유가안
석탄	27,803	27,803	27,803	27,803
석유	145,727	121,692	112,572	131,595
도시가스	40,251	40,251	40,251	40,251
전력	72,355	62,711	60,343	65,785
열	5,378	3,199	2,677	3,886
신·재생	21,873	21,873	21,873	21,873
수소	0	26,337 (8.7%)	34,421 (11.5%)	16,815 (5.5%)
계	313,387	303,865	299,939	308,008

마지막으로 수소도입에 따른 1차에너지믹스를 살펴보면, 2040년까지 기준안의 경우 석유와 LNG가 각각 17.3%, 9.6% 줄어들고, 석탄은 4.9% 증가하는 것으로 나타났다. 신·재생에너지는 77.7% 증가하여 1차에너지 중 12.1%를 차지할 것으로 전망된다. 이에 따라 이산화탄소배출량도 2040년에 2,044만TC 감소할 것으로 기대된다. 고유가안의 경우 2040년 1차에너지 중 신·재생에너지 비중이 11.6%로 나타났으며 저유가안은 9.1%로 상대적으로 낮게 나타났다.

Table 6 시나리오별 1차에너지믹스

	BaU	기준안	고유가안	저유가안
석탄	98,465	103,256	102,876	107,582
석유	147,490	121,971	112,490	132,346
LNG	80,235	72,565	66,672	72,062
수력	1,364	1,364	1,364	1,364
원자력	88,837	88,837	106,900	88,837
신재생	29,921 (6.7%)	53,179 (12.1%)	51,334 (11.6%)	40,158 (9.1%)
계	446,312	441,172	441,636	442,349

#### 4. 요약 및 향후 연구과제

기준안에 따르면 수소 및 연료전지는 2015년 시장에 도입되어 2031년 5%의 시장보급률을 확보한 이후 보급률이 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 수소 연료전지 시장 중 특히 수송부문이 선도적 역할을 할 것으로 기대되며 FCV 보급대수는 2040년 1,132만대로 전체 자동차 시장의 48.4%를 차지할 전망이다. 최종에너지 중 수소의 비중은 2040년 8.7%에 이를 것으로 예측되며 수소의 도입으로 인해 1차에너지 중 신·재생에너지 비중이 BaU 대비 약 5.4%p 증가한 12.1%에 이를 것으로 분석되었다. 총 수소수요량은 777만톤에 이를 전망이다. 각 시나리오별 주요 분석 결과를 정리하면 다음의 표와 같다.

Table 7 시나리오별 주요 분석 결과

	기준안	고유가안	저유가안
연료전지 도입시기	2015년	2012년	2018년
FCV 보급대수 (천대)	11,323 (48.4%)	16,328 (69.9%)	6,410 (27.4%)
수소수요량 (천톤)	7,769	10,154	4,961
최종에너지 중 수소비중	8.7%	11.5%	5.5%
1차에너지 절감량 (천TOE)	5,140	4,676	3,963
1차에너지 중 신·재생에너지 비중	12.1%	11.6%	9.1%
CO2 저감량 (천TC)	20,437	32,243	7,800

본 연구에서는 수소수요량 및 공급방식을 분석함으로써 수소도입으로 인한 부문별 에너지믹스 및 사용량에 대한 영향을 분석하였다. 하지만 경제사회 전반에 걸친 접근을 위해서는 부문별 접근과 함께 시스템 전체를 아우르는 시스템적 접근이 필요하다. 수소경제의 인프라 구축도 수소제조로부터 시작하여 생산설비, 운반 및 저장 인프라를 통하여 수요처에 이르는 일련의 로지스틱스

(logistics) 문제를 내포한다. 따라서 시스템적 접근은 수소경제의 비용효과적 이행을 위해서는 필수적 연구과제이다. 추후 본 연구의 결과를 기반으로 한 시스템적 접근에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

#### References

- [1] Collantes, Gustavo O., 2006, Incorporating stakeholders' perspectives into models of new technology diffusion: The case of fuel-cell.
- [2] Melendez, M., 2006, Transitioning to a Hydrogen Future: Learning from the Alternative Fuels Experiences. National Renewable Energy Laboratory.
- [3] Melendez, M. and A. Milbrandt., 2006, Hydrogen Infrastructure Transition Analysis. National Renewable Energy Laboratory.
- [4] OECD/IEA., 2005, Prospects for Hydrogen and Fuel Cells.
- [5] USDOE, 2003, Hydrogen from Natural Gas and Coal: The Road to a Sustainable Energy Future. Hydrogen Coordination Group. June 2003.
- [6] 고효율수소에너지제조·저장·이용기술개발사업단, 2005, 수소 제조, 저장 및 이용 기술개발 사업 (기획보고서).
- [7] 수소연료전지사업단. 2004. 수소경제 지향 국가 Vision 및 보급목표 달성을 위한 실행방안. 기획보고서.
- [8] 에너지경제연구원/산업자원부, 2005, 수소경제 국가비전 및 실행계획 수립 연구.
- [9] 한국교통연구원, 2006, 기후변화협약대비 교통 부문 온실가스 저감정책의 효과분석(2단계)