

## 원자력을 이용한 수소 생산 전망

이한명, 오근배  
한국원자력연구소

### A Perspective on Nuclear Production of Hydrogen

Han-Myung LEE, Keun-Bae OH  
Korea Atomic Energy Research Institute

#### 요약

수소는 환경친화적이며, 재생 가능한 에너지로서의 특징을 가지고 있으므로 미래 에너지원의 하나로 주목받고 있다. 현재 전세계에서 생산되고 있는 수소의 대부분은 화석연료를 이용하여 제조되고 있으나 제조 과정에서 이산화탄소를 배출함으로써 지구온난화를 가속화시키는 단점을 지니고 있다. 이에 따라 세계 각국은 화석연료 자원에 의존하지 않고 수소를 생산하기 위한 방안들을 개발 중에 있다. 이러한 방안 중에서 원자력은 환경 친화적이며 지속 가능하게 수소를 생산할 수 있는 방안의 하나로 주목받고 있다.

#### 1. 서론

세계의 에너지 소비가 변화해온 추이를 살펴보면 그 주종 형태가 고체에서 액체로, 다시 액체에서 기체로 변하여 가고 있음을 알 수 있다. 즉 19세기 중반까지는 목재가 세계적으로 가장 일반적인 에너지였으나, 이후 석탄의 사용이 급속히 증가하기 시작하였고, 석탄은 19세기 말은 물론, 20세기 초반까지도 에너지의 주종이 되었다. 이후 수송분야에서의 변화, 즉 기차에서 자동차로의 전환이 확산됨에 따라 석유의 사용이 촉진되게 되었으며, 석유는 20세기 중반에는 석탄을 대체하여 에너지의 주종이 되었다. 석유가 현재 에너지의 주종이기는 하나, 석유 역시 이를 대체하는 새로운 에너지 형태, 즉 기체형태인 천연가스로부터 시장을 잠식당하고 있다. 천연가스는 깨끗하고, 가벼우며, 더욱 높은 열량을 가진 장점에 힘입어 에너지원 중에서 가장 높은 증가율을 보이고 있다. 이러한 에너지 시스템의 변화는 탈탄소화(decarbonization) 진행과정으로 해석할 수 있으며, 궁극적으로는 수소가 에너지의 주종이 될 것이라는 점도 예상할 수 있다 1). 현재 전 세계적으로 생산되는 수소의 대부분은 화석연료를 원료 및 에너지원으로 사용하고 있으나 화석연료는 유한하며 환경문제를 야기하므로 화석 자원을 대체하여 수소를 제조할 수 있는 방안이 각국에서 개발되고 있다.

#### 2. 수소의 용도 및 이용 전망

수소는 전 세계적으로 가장 많이 이용되는 비료인 암모니아 ( $\text{NH}_3$ )의 주성분이다 (표 1 참조). 암모니아는 질소와 수소가 결합하여 만들어진다. 통상 비료공장에서 사용하는 수소는 천연가스로부터 제조되고 있다. 화학산업에서 소비하는 수소의 절반에 해당하는 양인 2000억  $\text{m}^3$ , 즉 세계 수소생산량의 40%가 암모니아 제조에 사용되고 있다. 2) 비료 제조업체는 현재 수소의 주요 소비자이기는 하나 이들의 수소 시장 점유율은 향후 크게 늘어날 것으로 전망되지는 않는다. 또한 수소는 원유의 성질을 변화시키기 위하여 사용되며, 중질유를 경질유로 변환하거나, 유해물질의 저장, 유황성분의 제거 등에 이용된다. 석유는 벤젠 ( $\text{C}_6\text{H}_6$ ) 이의

1) Jane A. Peterson, "Hydrogen Futures : Towards a Sustainable Energy System", p14, World Watch Institute, 2001

2) IAEA, Hydrogen as an energy carrier and its production by nuclear power, IAEA-TECDOC-1085 (1999), p169

에 여러 종류의 발암물질들을 함유하고 있으며 석유에 수소를 첨가할 경우 이들 유해물질들을 비발암성 연료로 전환할 수 있다. 원유에는 보통 유황 성분이 포함되어 있으며, 저질유는 6% 정도까지의 유황 성분을 함유하고 있다. 석유 정제시설의 촉매 반응을 저하시키는 유황 성분을 제거함으로써 정제시설의 운전 성능을 향상시킬 수 있으며, 또한 유황 성분을 제거함으로써 청정 연료 생산, 엔진의 부식 억제, 엔진 효율 향상 등의 효과를 보게 된다. 또한 수소는 메탄올(CH<sub>3</sub>OH)과 같은 화학품의 제조에도 사용되고 있다. 메탄올 제조에 사용되는 수소의 양은 전 세계 수소 생산량의 5%에 이르는 것으로 추정된다. 그 외 수소는 화학산업용 이외에도 금속생산, 전자산업, 우주로켓의 연료 등을 위하여 전체 수요의 5% 정도가 사용되고 있으며, 미래에는 자동차 연료로서도 필수적인 것으로 전망된다.

<표-1> 수소의 이용분야

구분	용도	내용	비고
화학공정의 원료물질	암모니아 제조	$N_2 + 3H_2 \rightarrow 2NH_3 + 46 \text{ KJ/mol}$	40% 점유
	메탄올 제조	$CO + 2H_2 \rightarrow CH_3OH + 91 \text{ kJ/mol}$	5% 점유
	철광석 환원	$Fe_2O_3 + 3H_2 \rightarrow 2Fe + 3H_2O - 91 \text{ KJ/mol}$	강철제조
	화석연료 처리	$C + H_2 \rightarrow -CH_2-$ (coal to gasoline)	석유정제로 25% 사용
	Fischer-Tro psch 합성	$CO + 2H_2 \rightarrow (-CH_2-) + H_2O + 165 \text{ kJ/mol}$	파라핀-올레핀 합성물
	기타	식품산업의 지방고화, 반도체 도핑가스 등	
연료	난방	낮은 온도로 연소 (700° K)	NOx 발생 억제
	연료전지	양극) $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ 음극) $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$	고분자 전해질형
	수소자동차	ICE(Internal Combustion Engine) - 휘발유 엔진의 25-30% 이상 고효율	액화수소 사용
	가스터빈	화석연료 터빈보다 10% 이상 고효율	

자동차 동력원으로 수소를 이용하는 방법은 수소를 내연기관에서 연소시키는 방법 이외에, 연료전지로 이용하는 방안이 강구되고 있다. 특히 연료전지는 자동차 동력원 이외에, 수소의 저장, 수송 및 보급 확대 수단으로서 주목받고 있다. 기본적으로 연료전지는 소음이 없고 청

정한 에너지 공급원으로, 수소를 직접 사용하는 연료전지는 부산물로 물을 생성할 따름이다. 전기화학적 반응은 연소방식보다 더 효율적으로 에너지를 생성하므로, 연료전지는 내연기관보다 더 높은 효율을 보여준다. 현재의 연료전지의 효율은 40 - 50 %에 이르고 있으며, 열 및 전기의 복합 생산에서는 80%의 효율을 보인 것으로 보고되고 있다 3). 현재 개발중에 있는 수소 이용방안의 하나는 내연기관에서 연소하는 방안 (ICE : Internal Combustion Engine) 이다. 수소를 연료로 사용하는 ICE는 이산화탄소 배출이 없으며, 질소산화물의 배출이 아주 적은 반면 열효율은 높다는 장점을 가지고 있다.

### 3. 수소 수요 및 제조 방법

전 세계의 수소제조 규모는 연간 약 5,000억 m<sup>3</sup>로 추산하고 있으며 이중 48%가 화학산업의 원료물질이나 석유화학 공정의 중간원료 생산 등의 에너지 용도 이외의 분야에 사용되며, 20%는 청정합성연료 생산용, 나머지 32%가 화학산업의 공정열 (process heat) 생산을 위한 연료로 사용되는 것으로 집계되고 있다 4). 한편 미국 DOE의 에너지정보국 (EIA : Energy Information Administration)에서는 전 세계의 수송용 에너지 (transportation energy) 수요가 1999년에는 39 백만 bbl/day에서 2010년에는 52백만 bbl/day, 2020년에는 65 백만 bbl/day로 증가할 것으로 전망하고 있다. 이를 연간 소요량으로 환산하면 2020년의 수송용 에너지 수요는 약 32 억 TOE 또는 1360억 GJ에 상응하며, 이중 10%를 수소로 충당한다면 2020년의 수송용 수소 소비량은 136억 GJ 또는 1조3천600억 m<sup>3</sup> 에 이를 것으로 전망된다 5). 즉 수소 수요는 지속적으로 증가하여 2020년에는 수송분야에서의 수요만으로도 현재 수요의 2.7배에 이르는 신규 수요가 창출될 것으로 유추할 수 있다.

수소제조를 위한 원료물질로는 석유, 천연가스와 같은 화석연료, biomass, 물 등이 있으며, 이들 원료물질을 수소로 변환시키기 위한 공정으로는 열이용, 전기분해, 광분해 방법을 고려할 수 있다. 열이용 공정에서는 화석연료 및 biomass를 원료물질로 사용하고 있으며 전기분해 방법에서는 물을 원료물질로 활용하여 수소를 제조하고 있다. 또한 biomass와 물을 원료로 사용하는 광분해 기술이 개발중에 있다. 천연가스에 포함되어 있는 메탄가스 (CH<sub>4</sub>)를 사용하는 증기개질법은 수소를 제조하기 위하여 전세계적으로 가장 널리 활용되고 있는 방법으로 전세계 생산량의 48% 정도가 이 방법에 의하여 제조되고 있다. 미국의 경우, 천연가스 생산량의 5%가 증기개질에 의한 수소 생산용으로 사용되고 있다. 증기개질법은 메탄가스를 높은 온도(500 - 1,000 °C)상태에서 니켈촉매하에 수증기와 반응시키는 방법을 사용하며 반응부산물로서 수소와 일산화탄소의 혼합물인 합성가스가 만들어지는데, 이는 다른 유기화학 산업의 원료물질로도 이용되고 있다. 물과 열을 이용하여 수소를 제조하는 열화학 방법에서는 현재 다양한 공정이 개발단계에 있으며, 화학반응을 촉진하기 위하여 고열을 필요로 한다. 이중 황화수소 (hydrogen sulfide), 황화요오드 (iodine sulfur : IS) 등을 이용하는 황산 공정이 유망하며, 이러한 반응을 위해서는 800 - 1000 °C 의 고온을 필요로 한다. 현재 일본원자력연구소 (JAERI)에서는 자체 개발한 고온가스로 (High-Temperature Engineering Test Reactor)를 이용하여 수소를 제조하는 공정을 개발중에 있다.

수소제조는 경제성은 제조공정에 사용하는 효율에 크게 좌우된다. 통상 전기분해에 의한 수소제조는 효율은 80% 정도로 매우 높은 편이다. 그러나 이 과정에서 사용하는 전기 생산의 효율을 고려하면 전체적인 효율은 상당히 낮아진다. 즉 통상적인 전기 생산의 열효율 34%

3) A National Vision of America's Transition to a Hydrogen Economy to 2030 and Beyond, p7, USDOE, Feb., 2002

4) IAEA-TECDOC-1085, Hydrogen as an energy carrier and its production by nuclear power (1999), p169

5) 수소 1입방미터의 에너지는 0.01 GJ로 환산

또는 첨단설비의 경우 50%의 열효율을 감안하더라도 전기분해에 의한 수소제조의 전체적인 효율은 25 - 40% 수준에 불과하다. IS 공정의 경우에는 전체적인 효율이 50% 이상에 달할 것으로 예상된다. 또한 수소와 전기를 동시에 생산하는 복합사이클에서는 60% 까지 효율을 높일 수 있을 것으로 전망된다. 열화학방법에 의한 수소제조 비용은 전기분해 방법에 비하여 60% 수준까지 낮아질 수 있을 것으로 예상된다 6). 이는 전기분해 방법에서는 열에너지를 전기로 변환시키기 위한 투자비 및 운영비가 필요하고 다시 전기에너지를 화학에너지(수소)로 변환시켜야 하나, 열화학법에서는 열에너지를 바로 화학에너지, 즉 수소로 변환시킬 수 있기 때문이다 .

#### 4. 원자력을 이용한 수소제조

원자력을 이용하여 수소를 제조하는 방법으로는 전기분해, 열 전기분해, 증기개질, 열화학법 등이 고려되고 있다. 물을 전기분해하여 수소를 제조하는 방법은 이미 오래전부터 사용되고 있는 방법으로 매우 순도가 높은 수소가 필요할 때나, 여러 곳에서 수소가 필요하나 그 소요량이 적을 때 사용되고 있다. 이 방법은 원자력발전만이 아니라 화력발전이나 수력 발전 등에서 생산된 전기를 사용하는 이미 개발된 기술이나, 대규모로 수소를 제조하기에는 경제성 측면에서 경쟁력이 없다. 전기분해법이 대규모 수소제조용으로 미래에 활성화될 수 있을지 여부는 전기분해 시설의 투자비와 효율에 의해 결정될 것이다. 현재 전기분해 시설의 투자비는 \$ 600/kW에 이르고 있으나 장차 \$350/kW 까지 내려갈 수 있을 것으로 예상된다 7). 재래식 알카리 전기분해법은 70 - 85%의 효율을 보이고 있으며, 고분자 전해질 전기분해 (proton exchange membrane electrolyzer) 방식은 80 - 90%의 효율을 보일 수 있을 것으로 전망되고 있다. 따라서 심야에 발생하는 잉여 전력을 값싸게 이용할 수 있고, 전기분해 효율이 더욱 개선되고, 전기분해 시설의 투자비가 저감되면 전기분해에 의한 수소제조 방법은 향후 널리 보급될 수도 있을 것이다. 전기분해에 사용되는 전기에너지중 일부를 열에너지로 대체하기 위하여 전기분해 장치를 700 - 900 °C의 고온으로 운전하는 기술도 개발되고 있다. 일반적으로 열에너지의 가격은 전기에너지의 가격보다 저렴하므로, 고온 전기분해법은 재래식 전기분해법에 비하여 더 낮은 가격으로 수소를 생산할 수 있다. 고온 전기분해를 위해서는 수소 제조 시설과 열을 공급하기 위한 원자로를 같은 장소에 설치하여야 한다. 그러나 이 기술은 아직 개발 초기단계로서 시설의 투자비는 \$1300/kW로 재래식 전기분해 방법의 투자비 \$600/kW 보다 매우 높다.

현재 수소 제조를 위해 가장 널리 사용되고 있는 천연가스의 증기개질법은 고온의 열을 필요로 하는 흡열반응이다. 천연가스는 수소 제조를 위한 원료물질로 투입되며, 동시에 열을 공급하기 위하여 연소되고 있다. 따라서 고온 열 공급을 원자로가 담당한다면 천연가스의 소요량을 대폭 감축시킬 수 있다. 화석연료를 수소 생산을 위한 원료나 공정에 필요한 에너지원으로 사용하지 않는 방법중의 하나가 물의 열화학적 분해공정이며, 이 공정에서는 원자로부터 발생하는 열을 에너지원으로 이용할 수 있다. 수소 생산용 원자로가 갖추어야 할 조건으로는 고온발생과 높은 열전도를 우선 고려할 수 있다. 수소 생산용으로 이용하기 위해서는 750 - 1000 °C의 열이 필요하며 온도가 높을수록 화학반응이 촉진되므로 경제성 측면에서도 더 유리하다.

6) Forsberg et al., Why Hydrogen Production from Nuclear Power (Is Nuclear Energy Compatible with Hydrogen Production), March 2002, American Institute of Chemical Engineers

7) Forsberg et al., Why Hydrogen Production from Nuclear Power (Is Nuclear Energy Compatible with Hydrogen Production), March 2002, American Institute of Chemical Engineers

미국의 주도로 추진되고 있는 제4세대 원자로 개발을 위한 국제공동 연구인 GIF (Generation IV International Forum)에 참여하고 있는 회원국들은 전력생산, 비전력 응용, 액티나이드 원소 관리를 GIF에서 추진하는 3가지 주요 임무라는 공감대를 형성하고 있다. 비전력 응용이란 전력생산 이외에 공정열 (process heat) 등을 이용하기 위한 것으로 화학품 제조, 수소 및 담수생산 등을 위한 열 이용이 포함된다. GIF에 제안되어 국제협력을 통한 장기적인 개발대상으로 선정된 원자로들은 표-2 에서 보는 바와 같은 6가지 개념의 원자로이다 8). 이들 원자로형중에서 수소 제조용으로 이용될 수 있는 노형은 Pb Alloy, MSR, GFR 및 VHTR 의 4가지이다. 원자로를 이용한 수소제조 공정은 I-S 공정 (Iodine Sulfur 공정)과 Ca-Br 공정 (Calcium Bromide 공정)이 현재 검토되고 있다. I-S 공정용으로는 냉각재 출구온도가 850℃ 이상인 GFR과 VHTR이 적합한 것으로 평가되고 있다. Ca-Br 공정은 700 ℃ 이상에서 적용 가능한 바, Pb Alloy가 적합한 것으로 평가되고 있으며 부차적인 선택방안으로 MSR과 GFR을 Ca-Br 공정에 이용하는 것도 가능한 것으로 평가되고 있다. 수소 제조용으로 이용할 수 있는 것으로 평가된 노형중 가장 먼저 상업적 이용이 가능하리라고 예상되는 노형은 VHTR이며 낙관적으로 전망할 경우 2020년에는 이용이 가능할 것으로 전망된다.

<표-2> 제4세대 원자로 특성

약어	명칭	냉각재 출구 온도 (℃)	수소제조 적합성		가동시기
			I-S 공정	Ca-Br 공정	
Na LMR	Sodium Liquid Metal-Cooled Reactor System	550	-	-	2020
SCWR	Supercritical Water-Cooled Reactor System	550	-	-	2025
Pb Alloy	Lead Alloy-Cooled Reactor System	550 - 800	-	적합	2025
MSR	Molten Salt Reactor System	700	-	가능	2030
GFR	Gas-Cooled Fast Reactor System	850	적합	가능	2025
VHTR	Very High Temperature Reactor System	1000	적합	-	2020

## 5. 결론

수소는 청정에너지 및 재생 가능한 에너지로서의 장점을 지니고 있지만, 수소 이용이 정착되기 위해서는 새로운 에너지 형태의 이용이 수반하는 장애 요인들을 제거할 수 있어야 한다. 이러한 장애 측면으로는 새로운 하부구조, 기존 시장과의 경쟁, 국가의 정책적 지원측면을 고려할 수 있다. 하부구조와 관련하여서는 최종소비자의 이용을 촉진할 수 있는 수소의 수송 및 저장 시설 등이 보급되어야하며, 기술적, 경제적 측면에서 시장에 침투할 수 있어야 한다. 이에 반하여 기존 화석연료 시장은 이미 투자가 완료되어 있으며 수소에 비하여 상대적으로 저렴한 에너지를 공급하고 있다. 또한 수소의 이용확대를 위해서는 정부가 에너지

8) A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems : Technical Roadmap Report (Draft Interim Roadmap), July 2002, USDOE

부문의 환경 규제 요건을 설정하고 환경 친화적인 에너지 사용을 촉진하는 정책을 사전에 확정할 필요가 있다.

원자력에 의한 수소 생산은 환경 친화적인 방법으로 미래의 에너지 공급에 기여할 것으로 전망된다. 이러한 비발전 분야에의 원자력응용은 지속 가능한 에너지 수급체제를 충족시킬 수 있는 방안의 하나라 할 수 있다. 고온가스로를 이용한 물의 열화학적 분해방법이 실용화 되기까지는 향후 30년 정도가 소요될 것이라는 점을 고려하면 이 기간 동안에는 기존의 원자력 기술을 수소생산에 응용하는 방안을 고려할 필요가 있다. 이러한 방안으로는 원자력 발전에 의해 생산된 잉여 전력을 이용하여 물을 전기 분해하는 방안이나 화석연료의 증기개질에 필요한 열원을 원자력으로 공급하는 방안을 고려할 수 있다 .

### 참고문헌

1. IAEA-TECDOC-1085, Hydrogen as an energy carrier and its production by nuclear power, IAEA, 1999
2. Jane A. Peterson, "Hydrogen Futures : Towards a Sustainable Energy System", World Watch Institute, 2001
3. Charles W.Forsberg and K. Lee Peddicord, Hydrogen Production as a major nuclear energy application, Discussion paper prepared for non-classical technical working group Generation IV Roadmap, USDOE, June 16, 2001
4. A National Vision of America's Transition to a Hydrogen Economy to 2030 and Beyond, USDOE, 2002
5. Nuclear Production of Hydrogen, OECD/NEA, 2000
6. A National Vision of America's Transition to a Hydrogen Economy to 2030 and Beyond, USDOE, 2002
7. IEA Agreement on the Production and Utilization of Hydrogen, 1996 Annual Report
8. Forsberg et al., Why Hydrogen Production from Nuclear Power (Is Nuclear Energy Compatible with Hydrogen Production), March 2002, American Institute of Chemical Engineers
9. A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems : Technical Roadmap Report (Draft Interim Roadmap), July 2002, USDOE