

2002년 추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

## 수소에너지 사회 및 원자력의 역할에 관한 전망 Perspectives on Hydrogen Futures and the Role of Nuclear Power

이한명, 송기동, 이만기, 문기환, 김승수, 임채영

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요약

환경 친화적이며, 재생 가능한 특징을 가진 수소는 미래 에너지원의 하나로 주목 받고 있다. 현재 생산되고 있는 수소의 95% 이상은 주로 석유, 석탄 등의 화석연료를 원료로 사용하여 제조되고 있으나 이들 방식은 제조 과정에서 이산화탄소를 배출함으로써 지구온난화를 가속화시키는 단점을 지니고 있다. 이에 따라 세계 각국은 이들 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.

### Abstract

Hydrogen, as an energy carrier, is environment friendly and renewable in its characteristics. Currently, more than 95% of hydrogen produced utilizes fossil resources as a raw material. Consequently carbon dioxide is emitted as a by-product and it accelerates global warming.

To avoid such disadvantages, non-fossil production of hydrogen is being developed in many countries. One of the alternatives is nuclear application in hydrogen production. The nuclear application is being considered as a sustainable manner to supply future hydrogen requirement resulting in clearing environmental issue.

### 1. 서론

수소는 원소중 가장 풍부하며, 연료로서는 깨끗하고, 강력하며 재생가능하고 환경

적으로 무해한 특징을 가지고 있다. 수소가 미래의 주요한 에너지원의 하나로 실용화되기 위해서는 타 에너지원과 비교 우위 이외에도 안전성 확보, 이용 보급을 위한 사회 하부구조가 충족되어야 한다. 수소는 통상 화합물로서 존재하므로, 다른 에너지를 사용하여 분리하여야 한다. 현재 전 세계적으로 생산되는 수소의 대부분은 화석연료를 원료 및 에너지원으로 사용하고 있으나 화석연료는 유한하며 환경문제를 야기하므로 화석 자원을 대체할 수 있는 방안이 강구되어야 한다. 본 고에서는 향후의 수소 시장 성장 규모를 전망하고, 수소 이용 분야 및 제조방안, 수소제조를 위한 원자력의 역할과 요건 등을 분석하였다.

## 2. 수소 이용 현황 및 전망

전 세계의 수소제조 규모는 추정기관에 따라 다소 차이는 있지만 연간 약 4,000억  $m^3$  이상에 이르는 것으로 추정되고 있다. 표-1에 나타난 바와 같이 IAEA 자료에서는 전세계의 수소 제조 규모를 연간 약 5,000억  $m^3$ 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 공정 열 생산을 위한 연료로 사용되는 것으로 집계하고 있다 1). World Watch Institute 자료에서는 세계의 수소제조 규모가 약 4,000억  $m^3$ 에 이르는 것으로 추정하고 있으며, 이 양을 석유로 환산하면 약 3억6천만톤 또는 1999년도 전세계 석유생산량의 10%에 해당하는 것으로 산정하고 있다 2).

미국은 전 세계 수소 수요의 1/5 정도, 즉 1,000억  $m^3$  정도의 수소를 생산하고 있으며, 1999년 현재 미국에서 연간 소비되는 수소를 에너지로 환산하면  $1.5 \times 10^9$  Giga Joule (GJ)에 이르는 것으로 추정되고 있다. 또한 미국 일차에너지 소비량의 1% 이상이 이러한 양의 수소를 생산하기 위하여 사용된 것으로 추정된다. 미국의 수소 소비량은 2010년에는 1999년에 비하여 약 4배 정도 증가하여  $6 \times 10^9$  GJ (수소 약 4,000억  $m^3$ 에 상응)에 이를 것으로 전망되며 이러한 양의 수소를 생산하기 위하여 필요한 에너지는 현재 미국에서 가동중인 전 원자력발전소가 생산할 수 있는 열에너지에 상응하는 막대한 규모로 산정되고 있다 3).

한편 1999년 현재 세계의 에너지 수요는 연간  $400 \times 10^9$  GJ 정도이며 2020년에는

---

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

2) Jane A. Peterson, "Hydrogen Futures : Towards a Sustainable Energy System", p28, 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

600 x 10<sup>9</sup> GJ로 증가할 것으로 전망되고 있다. 수송부문은 총에너지 수요의 20% 정도를 사용하고 있으며 2020년에는 150 x 10<sup>9</sup> GJ에 이를 것으로 예측되며, 이중 10% 정도를 수소연료가 담당한다면 연간 15 x 10<sup>9</sup> GJ, 즉 수송부문에서 연간 약 1조 m<sup>3</sup>의 수소시장이 형성될 것으로 전망된다.

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

<표-1> 세계의 수소 소비량

용도	화학원료 및 석유화학 공정의 중간 생산물	청정합성연료 제조용	화학산업의 공정열 생산용 연료	합계
소비량 (10억 m <sup>3</sup> /년)	240	100	160	500
점유율 (%)	48	20	32	100

### 3. 수소의 용도

수소는 전 세계적으로 가장 많이 이용되는 비료인 암모니아의 주성분이다. 암모니아는 질소와 수소가 결합하여 만들어진다.



통상 비료공장에서 사용하는 수소는 천연가스로부터 제조되고 있다. 화학산업에서 소비하는 수소의 절반에 해당하는 양인 2000억 m<sup>3</sup>, 즉 세계 수소생산량의 40%가

암모니아 제조에 사용되고 있다.<sup>4)</sup> 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 저감, 유황성분의 제거 등에 이용된다. 지하에 매장된 원유는 고온으로 추출되며 이후 냉각되면서 매우 점성이 높은 상태로 변하여 열을 가하거나 경질유로 용해시켜야만 흘러보낼 수 있게된다. 석유에 포함된 수소의 비율은 탄소와의 상대 비교로 표시할 수 있으며 중질유의 경우 0.8 이며 석유 정제 시설에서는 수소를 첨가하여 탄소대비 수소의 비율을 1.5 내지 2 로 높은 경질유를 이용하여 휘발유, 디젤유, 제트오일 등과 같은 다양한 수송용 연료를 제조할 수 있다. 경질유는 휘발유와 같이 가벼운 제품일수록 더 많은 수소를 필요로 하며 근래에는 bunker-C와 같은 중질유나 난방용 기름보다는 경질의 수송용 연료에 대한 수요가 더욱 증가하는 추세를 보이고 있다. 수소는 저질유 정제 과정이나 천연가스로부터 생산되고 있으며, 현재 전세계 정유시설에서 생산할 수 있는 수소의 양은  $11.5 \times 10^9 \text{ ft}^3/\text{day}$  이다 <sup>5)</sup>. 이를 연 생산량으로 환산하면 1200억 $\text{m}^3$  규모에 상당하며 전세계 수소 생산량의 약 1/4에 이른다. 따라서 이러한 방법 이외에 추가적으로 수소를 생산하게 되면, 원유로부터 제조할 수 있는 수송용 경질유의 양을 상당히 증대시킬 수 있다.

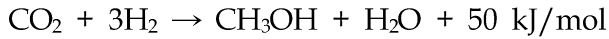
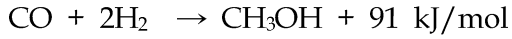
석유는 벤젠 ( $\text{C}_6\text{H}_6$ ) 이외에 여러 종류의 발암물질을 함유하고 있으며 석유에 수소를 첨가할 경우 이들 유해물질들을 비발암성 연료로 전환할 수 있다. 원유에는 보통 유황 성분이 포함되어 있으며, 유황 성분이 높은 저질유는 6% 정도까지의 유황 성분을 함유하고 있다. 석유 정제시설의 촉매 반응을 저하시키는 유황 성분을 제거함으로써 정제시설의 운전 성능을 향상시킬 수 있으며, 또한 유황 성분을 제거함으로써 청정 연료 생산, 엔진의 부식 억제, 엔진 효율 향상 등의 효과를 보게 된다. 이들 유황은 원유에 수소를 첨가함으로써 제거될 수 있다. 즉 유황은 수소와 결합하여  $\text{H}_2\text{S}$ 로 변환되며  $\text{H}_2\text{S}$ 는 다시 산화반응에 의하여 황산이라는 부산물로 변환시킬 수 있다.

또한 수소는 메탄올 ( $\text{CH}_3\text{OH}$ )과 같은 화학품의 제조에도 사용되고 있다. 메탄올 제조에 사용되는 수소의 양은 전 세계 수소 생산량의 5%에 이르는 것으로 추정된다.

---

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

5) 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



그 외 수소는 화학산업용 이외에도 금속생산, 전자산업, 우주로켓의 연료 등을 위하여 전체 수요의 5% 정도가 사용되고 있으며, 미래에는 자동차 연료로서도 필수적일 것으로 전망된다. 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.

#### 4. 수소제조 방법 및 비용

현재 수소의 대부분은 석유정제시설이나 화학 단지에서 제조되고 있다. 제조된 수소는 통상 제조된 현장에서 소비되고 있으며 주로 석유 정제, 암모니아 비료, 수지(resin), 플라스틱, 용매 등을 제조하기 위하여 사용된다. 제조 현장 외부로 수소를 유통하기 위해서는 기체 또는 액체형태의 수소를 파이프라인이나 트럭으로 운송하며, 그 비율은 약 5% 정도이다.<sup>6)</sup> 표-2에 정리한 바와 같이 수소제조를 위한 원료물질로는 석유, 천연가스과 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.

<표-2> 수소제조 원료 및 변환공정

		변환공정		
		열	전기	광분해
원료	화석연료	√		
	biomass	√		√
	물	√	√	√

천연가스에 포함되어 있는 메탄가스 (CH<sub>4</sub>)를 사용하는 증기개질법은 수소를 제조하기 위하여 전세계적으로 가장 널리 활용되고 있는 방법으로 전세계 생산량의

6) World Watch Institute 보고서에서는 이 정도에 해당하는 양으로도 2-3백만대의 연료전지 차량에 필요한 수소를 충당할 수 있는 것으로 추산하고 있다.

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 반응부산물로써 수소와 일산화탄소의 혼합물인 합성가스가 만들어지는데, 이는 다른 유기화학 산업의 원료물질로도 이용되고 있다.

물과 열을 이용하여 수소를 제조하는 열화학 방법에서는 현재 다양한 공정이 개발 단계에 있으며, 화학반응을 촉진하기 위하여 고열을 필요로 한다. 이중 황화수소 (hydrogen sulfide), 황화요오드 (iodine sulfur : IS) 등을 이용하는 황산공정이 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.

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

표-3에 나타난 바와 같이 수소 제조 비용은 천연가스를 원료로 한 증기개질 (steam reforming) 이나 부분산화 (partial oxidation) 공정에서 6-8 \$/GJ 수준이며, 바이오매스나 석탄을 이용할 경우는 10-17 \$/GJ, 전기분해나 태양전지를 이용할 경우에는 20-40 \$/GJ까지 상승한다. 수소연료의 실용화를 위해서는 경제성이 해결되어야 하며, 미국 DOE는 2025년까지 이산화탄소를 배출하지 않는 방식으로 제조한 수소의 가격을 천연가스와 같은 9.5\$/GJ로 공급할 것을 목표로 하고 있다.

<표-3> 수소 제조 비용

제조방법	천연가스 (수증기개질, 부분산화)	바이오매스	석탄가스화	전기분해	태양전지	풍력
생산비용 (\$/GJ)	6 - 8	10 - 17	10 - 12	20 - 24	40	20

7) 이병권외, 수소에너지 기술현황 및 향후전망, 공업화학 전망 제5권 제1호 (2002)

## 5. 원자력발전의 역할

통상적으로 대규모 에너지 생산지역과 대규모 소비지역은 일치하지 않으며, 이러한 현상으로 인해 다음과 같은 해결방안이 강구되고 있다. 즉 현장에서 직접 에너지를 생산하는 방안, 전력생산 및 생산된 전력을 송전하는 방안, 에너지를 수소나 메타놀과 같은 화학에너지원으로 변환하는 방안, 수소를 직접 제조하여 이를 배관망을 통하여 수송하는 방안 등을 고려할 수 있다. 현재 가장 보편적으로 사용되고 있는 화석에너지원은 부존자원의 한계 및 환경오염과 같은 문제점을 야기하고 있으며 미래에는 수력, 원자력, 태양에너지, 풍력, 지열 등의 비화석 에너지의 사용이 더욱 증가할 수밖에 없다. 특히 원자력발전은 다른 대체에너지원의 개발이 실용화되기 전까지 온실가스 배출을 저감할 수 있는 가장 현실적인 에너지원의 하나로 주목받고 있다.

화석연료를 수소 생산을 위한 원료나 공정에 필요한 에너지원으로 사용하지 않는 방법중의 하나가 물의 열화학적 분해공정이며, 이 공정에서는 원자로에서 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. C 의 열이 필요하며 온도가 높을수록 더 유리하다. 원자로에서 생산된 고열은 수소 생산을 위한 변환시설로 열손실을 최소화하여 수송되어야 한다. 원자로와 변환시설은 환경에 방출되면 유해한 물질들을 보유하고 있으므로 이들 시설은 상호간에 상대 시설로 부터의 위험 발생 가능성에 대해 보호되어야 한다.

미국 에너지부 (US DOE)에서 추진중인 GEN-IV 기술분과에서 소개된 내용에 의하면 열화학 공정용으로 이용할 수 있는 원자로의 개념으로 3가지가 제안되고 있으며 8), 최우선적으로 만족시켜야 할 요건은 고온의 열 공급이다. 제안된 노형중 한가지는 고온가스 냉각로 (HTGR : High Temperature Gas-cooled Reactor) 이다. 이러한 유형의 원자로로는 pebble-bed형 원자로와 hexagonal fuel-block 사용 원자로 등이 있다. 두 번째 노형은 신형고온원자로 (AHTR : Advanced High Temperature Reactor) 이다. 이 원자로는 모듈형으로 용융염 (molten salt)을 냉각재로 사용한다. ATHR은 HTGR과 유사하며 주요한 차이점은 HTGR에서 사용하는 높은 압력의 헬륨 냉각재 대신에 낮은 압력의 용융염을 사용한다는 것이다. 이 노형은 HTGR보다 약간 더 높은 온도로 운전할 수 있으며 냉각재는 대기압 상태로 운전된다. 세 번째 노형은 납냉각 고속로 (Lead-cooled fast reactor) 이다. 이 원자로의 운전온도는 HTGR보다 조금 더 낮다. 납을 사용하는 것은 나트륨 (Na) 이 883. C에서 끓어 버

---

8) 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

리는 것을 대체하기 위한 방안이나, 수소 제조 공정열로 이용하기에는 온도가 다소 낮은 편이다.

## 6. 결론

현재 비료 및 석유화학 분야에서는 세계적인 대규모 수소 시장이 형성되어 있고 그 규모는 계속해서 커질 것으로 전망된다. 또한 수소는 수송분야를 중심으로 에너지 분야에서 그 역할을 더욱 넓혀 나갈 것으로 기대된다. 이와 같은 수소에너지 사회가 정착되기 위해서는 새로운 수소 생산방법의 개발 이외에 이의 보급과 이용을 촉진할 수 있는 하부구조도 충족되어야 한다.

원자력에 의한 수소 생산은 환경 친화적인 방법으로 미래의 에너지 공급에 기여할 것으로 전망된다. 이러한 비발전 분야에의 원자력응용은 지속 가능한 에너지 수급 체제를 충족시킬 수 있는 방안의 하나라 할 수 있다. 고온가스로를 이용한 물의 열화학적 분해방법이 실용화되기까지는 향후 20년 이상이 더 소요될 것이라는 점을 고려하면 이 기간 동안에는 기존의 원자력 기술을 수소생산에 응용하는 방안을 고려할 필요가 있다. 이러한 방안으로는 원자력발전에 의해 생산된 잉여 전력을 이용하여 물을 전기 분해하는 방안이나 화석연료의 증기개질에 필요한 열원을 원자력으로 공급하는 방안을 제시할 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. 이병권의, 수소에너지 기술현황 및 향후전망, 공업화학 전망 제5권 제1호, 2002
5. A National Vision of America's Transition to a Hydrogen Economy to 2030 and Beyond, USDOE, 2002
6. Nuclear Production of Hydrogen, OECD/NEA, 2000