

원자력이용 수소생산 기술개발 현황

하상준 | 한국전력 전력연구원(hsj@kepri.re.kr)

1. 원자력을 이용한 수소생산 전망

세계 에너지 소비량은 급격히 증가하고 있는 반면 매장량은 한정되어 있어 에너지 가격 상승과 자원 고갈은 불가피 하고, 석유, 석탄 등 화석 연료의 사용은 지구온난화와 같은 환경 문제를 야기하지만, 현재로써는 이를 해결할 수 있는 기술이 없는 실정이다. 따라서 환경오염을 최소화하면서 고갈되고 있는 석유를 대체할 새로운 에너지의 개발이 필수적인 상황이며, 수소 에너지가 유일한 대안으로 부상하고 있다. 수소는 화석연료를 대체할 잠재력을 지닌 청정연료이고, 지구상에 가장 풍부한 자원이지만 물이나 탄화수소 등 다른 물질들과 화학적으로 결합되어 있어 분리하여 사용하기 위해서는 에너지가 필요하다. 수소생산을 위한 주

요 에너지원으로는 태양광, 풍력 같은 대체에너지와 석탄, 원자력에너지가 고려되고 있고, 대체에너지의 경제성과 석탄 이용시 환경문제 등으로 인해 장기적으로 원자력이 주요 에너지원이 될 것으로 전망하고 있다(그림 1).

원자력을 이용한 수소생산 방안은 크게 3가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 화석연료 증기개질 수소생산시 열 공급원으로 원자력을 이용하는 방안, 두 번째는 물을 전기분해하여 수소를 생산하는데 필요한 전기를 원자력으로 공급하는 방안, 세 번째는 열화학 공정으로 물을 분해하여 수소를 생산하는데 필요한 열을 원자력으로 공급하는 방안이다.

2. 원자력을 이용한 수소생산기술 개발 현황

가. 천연가스 증기개질 수소생산

증기개질 공정은 기존에 널리 쓰이고 있는 수소생산방법으로 검증된 기술이나, 대용량의 천연가스를 이용하므로 부산물로 이산화탄소를 배출한다는 측면에서 장기적으로는 적합하지 않은 수소생산 방안이라고 볼 수 있다. 그러나 이 공정에 원자력을 이용할 경우 이산화탄소의 배출을 현저히 줄일 수 있고, 원자력의 폐열을 이용하여 비교적 낮은 온도에서도 수소생산이

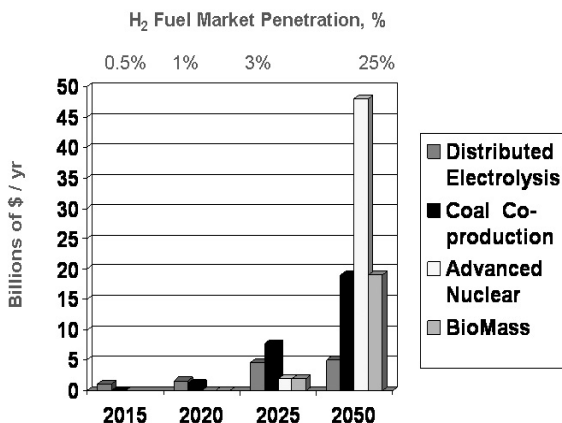


그림 1. 에너지원별 미국 수소 시장 전망(EPRI 백서, 2006)

용이하고, 현 상용 원자료를 활용할 수 있다는 장점이 있다. 독일 Juelich 연구소는 1980년대에 고온가스냉각로를 이용하여 천연가스 증기개질법에 의한 수소생산 연구를 진행한바 있으며, 일본 원자력연구소(JAERI)는 고온공학시험연구로(HTTR)를 이용한 천연가스의 증기개질 공정을 연구하고 있다.

나. 물 저온전기분해 수소생산

전기분해기술은 저온전기분해기술과 고온전기분해기술로 나눌 수 있고, 저온전기분해기술은 알칼리 전기분해기술과 고체고분자(PEM) 전기분해기술로 구분할 수 있다. 저온전기분해기술은 부가가치가 높은 이차에너지인 전기를 사용하기 때문에 에너지 이용 효율에 문제가 있다는 지적이 있으나, 전력과 물만 있으면 수소를 생산할 수 있다는 편리성 때문에 수소경제 진입 과도기간 중 수소충전소의 수소공급방안으로 기대된다. 현재 미국, 캐나다, 독일 등의 수소충전소에 설치하여 이용되고 있고, 원자력발전소에서 발생하는 여유전력을 이용하면 비교적 저렴하게 수소를 공급할 수 있다는 이점이 있다. 알칼리 전기분해 기술은 전해용액으로 KOH를 사용하고, 효율은 약 75%로 원자력발전소에 적용할 경우 현 원자력발전소의 전기생산효율이 약 32%이므로 물을 전기분해하여 수소를 생산하는 효율은 약 24%, 효율 48%이상의 미래형 원전에 적용할 경우 효율은 36% 정도가 된다. 현재 고성능 전극기술, 용액-가스 저항저감기술, 고전류밀도화 및 대용량화에 대한 연구가 진행되고 있다. Norsk Hydro사는 년 380톤의 수소를 생산할 수 있는 2MW급 설비를 상용화 하고 있고, 미국 전력연구소(EPR)는 원자력발전소와 연계하여 경제성 있는 수소생산을 위해서는 100~200MW급 대용량 설비의 개발이 필요한 것으로 전망하고 있다. 고체고분자(PEM) 전기분해기술은 전

해질 용액 대신에 불소 이온 수지계의 이온교환막을 수소이온 전도체의 고체전해질막으로 사용하는 물 전기분해방법이다. 일본의 WE-NET 프로그램에서는 고전류밀도형의 고효율 장치개발, 내구성 및 신뢰성 향상, 저 비용 장치기술을 개발하고 있다. 일본 H3 Energy사는 2004년도에 세계 최초로 34.5MPa 및 2.5Nm³/h의 성능을 갖는 고압전기분해장치(HHEG)를 개발한 바 있다. 미국 DOE는 GE사 등과 협력하여 신소재 개발을 통하여 저비용 물 전기분해 수소생산 기술을 개발하고 있고, 2010년까지 압력 34.5MPa, 효율 73% 및 일일 250kg의 수소생산 능력을 갖는 전기분해 장치개발을 목표로 하고 있다. 독일의 MTU Friedrichshafen사, 노르웨이의 Norsk Hydro Electrolysers사 그리고 벨기에의 Prime Membrane Technology사는 공동으로 소형 고압전기분해 기술개발(HYSTRUC)을 추진하고 있다. 우리나라의 에너지기술연구원은 2003년부터 5Nm³/hr급 물 전기분해 기술개발을 추진하고 있다.

다. 물 고온전기분해 수소생산

고온전기분해기술은 산소 이온을 선택적으로 투과하는 안정화 지르코니아(Zirconia)와 같은 산소이온 전도성 고체전해질을 이용하여 800~1,000℃의 고온수증기를 전기분해하여 수소를 생산하는 기술이다. 원자로부터 발생하는 고온의 열을 이용하여 수증기를 만든다. 고온에서 물을 전기분해할 경우 분해전압이 낮아 수소생산효율을 높일 수 있는 장점이 있으나(그림 2), 대형화가 어렵다는 단점이 있다. 유럽에서는 박막형 SOFC 기술과 SOEC 등 신재료 기술을 적용하여 고효율 고온 전기분해 수소생산(Hi2H2) 기술을 개발하고 있다. 미국의 INEEL에서는 SOFC 기술을 접목한 고온 수증기 전기분해 기술을 개발하고 있고, 러시

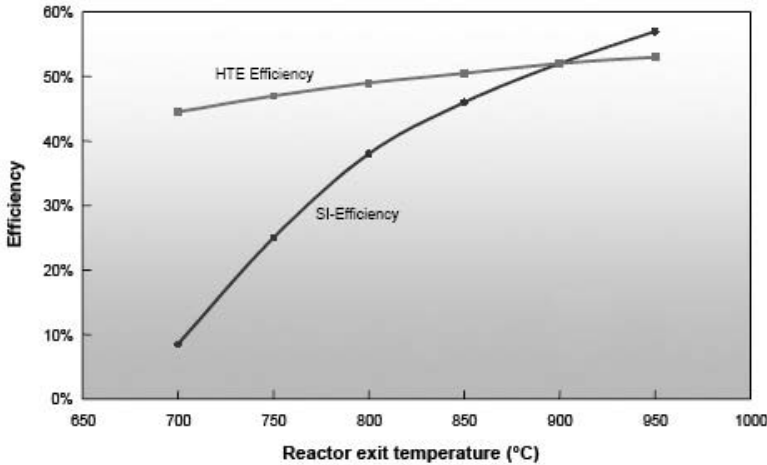


그림 2. 고온전기분해 및 열화학 수소생산 기술의 수소생산 효율(INEEL, 2004)

아의 Kurchatov 연구소는 고온전기분해 소자개발에 성공하고 대형화를 모색하고 있다.

라. 물 열화학분해 수소생산

열화학법은 여러 가지 화학반응을 조합하여 열에너지를 이용하여 물을 분해하여 수소를 생산하는 기술로 200가지 이상의 다양한 방법들이 제안되고 있다. 실용화 가능성이 가장 큰 기술로 유체기반의 황산기반 SI(Sulfur-Iodine)공정과 고체기반의 Ca-Br 공정 등이 있고, 금속산화물의 종류에 따라 요구온도에 차이가 있으며 SI (800-1,000°C), Calcium-Bromine(750°C), Copper-Bromine(550°C) 등의 공정이 개발되고 있다. SI공정은 수소생산 단가가 저렴하고 대용량 수소생산에 적합하여 특히 고온가스냉각로와 연계하여 기술개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 황산분해에 900°C 이상의 고온의 열이 필요하며, 분해된 SO₂와 I₂가 반응하여 HI를 만들고 HI를 분해하여 수소를 생산하는 기술이다(그림 3). 수소생산 효율은 원자로 출구온도가 900°C일 경우 약 50% 정도로 높다(그림 2). 실용화하기 위해서 높은 온도에서 폐

사이클을 연속 운전하는 기술과 강산성 분위기에서 견딜 수 있는 재료개발이 필요하고, 현재 일본, 미국, 유럽 및 우리나라에서 가압 순환사이클에 대한 실증이 진행 중이다.

미국 NHI(Nuclear Hydrogen Initiative)에서는 고온가스냉각로(NGNP) 개발과 연계하여 SI공정을 개발하고 있다. 미국 GA사는 1980년 초에 SI공정을 제안하고 기초실험을 완료하였으며, SNL, 프랑스 CEA와 함께 2006년부터 San Diego에

폐사이클 건설을 추진하고 있다. 일본 JAERI는 2004년에 SI공정을 대기압에서 실증하고 가압조건에서 공정을 개발하고 있다. 국제공동연구인 INERI에서는 황산분해 촉매기술, SI공정 장치재료 기술, 멤브레인 기술 등 SI공정에 필요한 핵심기술을 개발하고 있다. 우리나라는 2004년부터 에너지기술연구원과 과학기술연구원을 중심으로 SI공정을 개발하고 있으며 기초실험을 완료하고 1,000 L/hr급 가압 폐사이클 실증을 진행하고 있다.

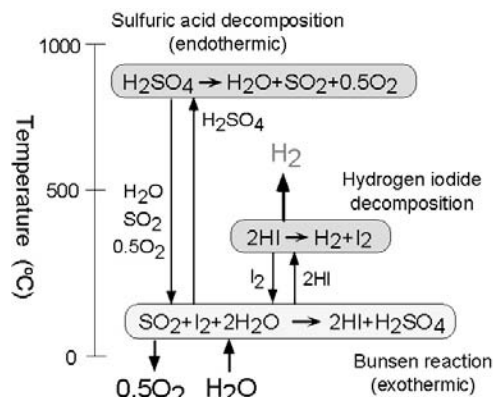


그림 3. SI열화학수소생산 개념도

3. 수소생산용 원자로 기술개발 현황

원자력을 이용한 수소생산기술은 원자로 출구온도와 출구온도에 적합한 수소생산기술로 구성되어 진다. 원자로 출구온도가 현재 가동중인 원자력발전소와 같이 저온(300℃)일 경우 저온전기분해기술이 적합하고, 출구온도가 500~700℃일 경우 저온열화학공정, 출구온도가 800℃이상일 경우 고온전기분해와 고온열화학 공정이 적합한 것으로 알려져 있다. 장기적 측면에서 높은 효율과 적은 환경오염을 고려할 때 열화학 반응 및 고온전기분해에 의한 수소생산이 적합하다고 볼 수 있다. 현재 개발되고 있는 원자로 중 고온가스냉각원자로는 원자로 출구 온도가 950℃ 이상이므로 고온의 열을 이용하여 대량의 수소를 경제적이고

안전하고 친환경적으로 제조할 수 있다. 원자로형은 펄스형(Pebble Bed) 및 프리즘형이 개발중이며, 300MWe급 내외의 모듈로 구성된다. 핵연료는 초열탄소막으로 피복한 TRISO 핵연료이며, 냉각재로는 화학반응이 없고, 중성자단면적이 극히 적은 헬륨을 사용한다. 고온가스와 수소생산공정은 그림 3과 같은 개념으로 설계되고 있고, 시스템의 안전성을 확보하기 위하여 원자로와 수소생산 플랜트는 각각 지하와 지상으로 분리하여 건설하고, 두 시스템간에 충분한 거리를 두어 사고시 영향이 상호 파급되지 않도록 설계하고 있다.

미국은 고온가스로 Fort St. Vrain을 개발하여 1988년까지 운전한 경험이 있고, 2003년부터 NGNP를 추진하여 초고온가스로를 개발중이다. NGNP는

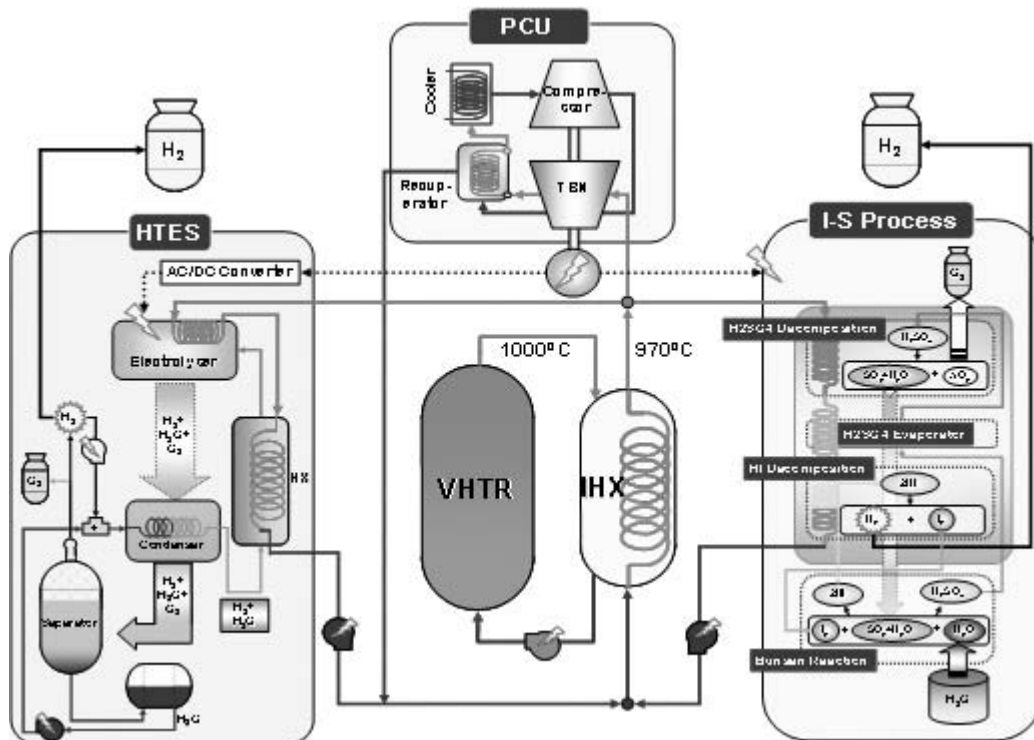


그림 4. 고온가스냉각로를 이용한 수소생산 개념도

2021년까지 950℃의 열을 생산하는 원자로를 건설하고 고온 수증기 전기분해 기술과 열화학 수소생산기술을 이용하여 수소생산을 실증할 계획이다. GA사는 발전용 고온가스로인 GT-MHR 개념을 제안했으며, Texas 대학에 실험로 HT3R을 건설할 계획이다. 독일 Juelich 연구소는 AVR을 건설하여 출구온도 950℃로 운전한 경험이 있으며, 토륨을 핵연료로 사용하는 THTR을 개발하여 운전한 경험이 있다. 일본 JAERI는 1980년대말부터 고온가스로에 대한 연구에 착수하여 HTR을 건설하여 950℃ 운전에 성공한바 있으며 지속적으로 관련 기술개발을 추진하고 있다. 중국 과기부는 HTR-PM과 수소생산용 HTR-X를 16대 성장동력 기술의 하나로 채택하여 중점 개발하고 있다. 중국 INET은 1990년대부터 고온가스로 연구에 착수하고 출구온도 750℃의 증기발생 고온가스로 HTR-10을 건설하여 2000년부터 운전중이고, 현재 가스터빈용 고온가스로 HTR-GT를 개발중이다. 중국 화능원자력발전주식회사는 2012년까지 발전용 고온가스로 HTR-PM을 건설할 계획이다. 남아프리카 공화국은 1990년대부터 고온가스로연구에 착수하고 2005년부터 전력생산용 PBMR 건설을 국가과제로 선정하여 2012년 운전개시를 목표로 사업을 추진중이다. 출구온도는 900℃를 목표로 하고 있다. 미국 웨스팅하우스사는 남아프리카 공화국의 PBMR을 황산하이브리드 수소생산공정과 접목하여 수소생산에 활용할 계획이다. 프랑스 Framatome ANP는 CEA와 협력하여 열 이용 고온가스로 ANTARES를 개발하고 있으며, 850℃급을 개발하여 조기 시장진입을 목표로 하고 있다. 러시아는 1960년대말부터 열이용을 목표로 VGR의 개념설계를 수행하고 OKBM을 중심으로 고온헬륨가스루프를 건설하여 기기실증을 수행 중이고, 1990년 이후에는 무기급 플루토늄연소로인 GT-

MHR의 개념설계와 관련기기개발에 착수하여 소형기 실증을 완료하였다. 국제공동연구인 제4세대 원자로개발계획(Gen-IV)에서는 한국, 미국 등 9개국이 참여하여 초고온가스냉각로 계통평가기술, 안전성평가기술, 고온재료기술 등의 핵심기술을 개발하고 있다. 우리나라는 한국원자력연구소가 2004년부터 원자력이용 수소생산 핵심기술 개발에 착수하여 고온가스냉각로 설계기술, 피복입자핵연료 제조기술 등의 기술을 개발하고 있다.

4. 결어

우리 정부는 기후변화협약에 대응하고 에너지안보를 강화하기 위해 수소경제로의 조기진입을 목표로 2005년 3월 수소경제시대 원년을 선언한 바 있다. 원자력을 이용한 수소생산기술은 환경오염 유발가능성이 적고, 대용량의 수소를 경제적으로 공급할 수 있는 주요 에너지원이 될 전망이다. 수소생산에 원자력에너지의 이용은 에너지 자립능력을 제고할 뿐 아니라 에너지 수급의 불안정성으로부터 자유로울 수 있다. 따라서 향후 지속적인 경제성장과 에너지 안보확보를 위해 원자력 이용에 대한 국민적 합의와 함께 원자력이용 수소생산기술 실증 등 체계적인 기술개발을 추진하여 수소경제를 대비하여야 한다.



• 1985 - 현재 : 한전 전력연구원 원자력발전 연구소 책임연구원