수소에너지시대를 대비한 대용량 수소생산공정 현황: 원자력 고온열원을 이용한 SI 순환공정

임영일, 박호재

Department of Chemical Engineering, Hankyong National University
456-749 Ansung, Korea
Phone: +82 31 670 5207, Fax: +82 31 670 5445, Email: limyi@hknu.ac.kr

2. 국내, 일본, 미국 및 유럽의 연구현황

지구 온난화 방지를 위한 교토 의정서 ('05년 2월 16일 발효) 에 의한 이산화탄소 저감대책으로서의 대안과 지속적은 석유값 상승에 따라 대체에너지로써의 수소에너지가 큰 관심을 끌고 있다. 각 국은 수소에너지 제조기술을 확보 함으로써 에너지 문제를 해결하고, 국가 경쟁력을 높일 수 있는 대책으로 국가 주도의 수소 에너지 생산 공정에 대한 연구 및 개발에 관심을 갖고 정책적으로 지원하고 있다. 본 장에서는 수소에너지에 대한 전반적인 국내·외의 현황과 SI 순환공정을 통한 수소생산공정에 대한 연구 현황에 대해서 조사하였다.

2.1 외국의 연구현황

2.1.1 미국의 연구현황

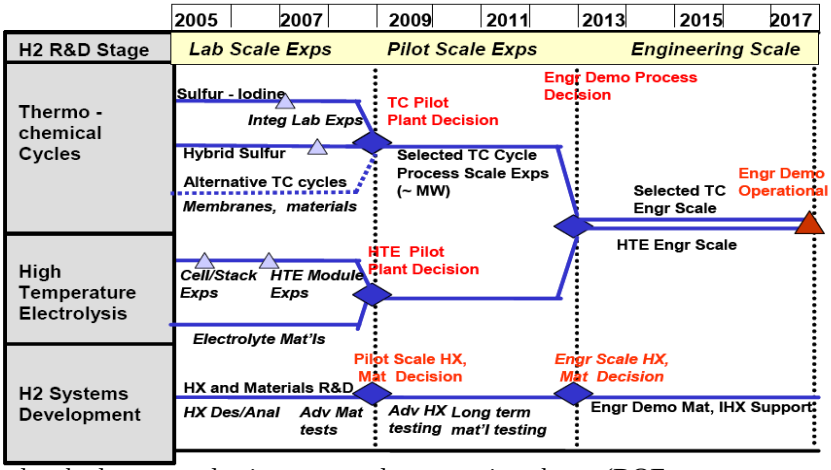
미국의회는 1990 년, 수소의 에너지 매체로서의 역할을 중시하여 이른바 마츠나가 수소법안 (Matsunaga Hydrogen Research and Development Act, www.hydrogen.energy.gov/docs/matsunaga_act_1990.doc) 을 통과시켜, 5 년 계획으로 미국의 에너지성 (DOE ; U.S. Department of energy) 으로 하여금 수소에너지 시대를 대비한 요소기술을 개발하도록 하였다. 이 법안은 학계, 산업계의 수소관련전문가로 구성된, 수소기술자문위원회 (HTAP ; Hydrogen Technical Advisory Panel) 를 설립하여 수소에너지개발에 대한 자문을 하게 하였다 (한국수소 및 신에너지 학회, http://www.hydrogen.or.kr/). 1996 년 미의회는 또 미래수소법안 (Hydrogen Future Act, www.hydrogen.energy.gov/pdfs/hydro-gen_future_act_1996.pdf) 을 통과시켜, 1996 년부터 2001 년까지 1.65 억 달러를 수소의 생산/저장/이용 등에 관한 연구와 실증사업에 투자하도록 하였다. 이러한 법안에 힘 입어 미국에너지성은 수소에너지 프로그램을 진행 중이며, 중장기적인 안목으로 수소를 에너지 체계에 도입하고자 하고 있다. 향후 2025 년까지 단기 (~2005 년), 중기 (~2010 년) 그리고 장기 (~2025 년) 로 나누어 수소도입목표를 정량적으로 제시하고 있으며, 장기목표로서는 2025 년 전체에너지 공급량의 10% 를 태양 등 재생가능에너지로부터 제조된 수소를 공급하는 의욕적인 것이다.

'수소경제'라는 말을 처음 사용한 것은 세계 최대 자동차 제조업체 제너럴 모터스 (GM) 로서, 1970 년 수소가 미래 에너지원으로 등장할 가능성에 대해 고려하기 시작한 이래, 지금도 수소미래의 생존력을 확보하기 위해 앞장서고 있다. 최근, 부시대통령은 2003 년 1 월 연두연설에서, 수소를 동력원으로 하는 상용 가능한 연료전지 기술을 개발하여 오염물이나 지구온난화 가스를 배출하지 않는 수송용, 주거용, 산업용으로 사용함으로써 미국의 점증하는 석유 해외의존도를 역전시킬 수 있는 12 억달러에 달하는 FreedomCAR

(Freedom Cooperative Automotive Research) and Fuel Initiative (무공해자동차협력연구 및 연료개발 선도계획, http://www.hydrogen.energy.gov/presidents initiative.html) 을 발표하였다. 이 선도계획 (Initiative) 은 연료전지 자동차와 전력 생산용으로 사용되는 수소를 생산, 저장, 수송하기 위한 기술과 기간시설 (infrastructure) 을 개발하는데 차후 5 년에 걸쳐 신규로 7 억 2 천만 달러를 투자하는 것이다. 이와 함께 이 계획 (FreedomCAR and Fuel Initiative) 은 민간부문과 공동으로 2020 년까지는 많은 미국인들이 연료전지 자동차를 실제적으로 또 비용면에서도 경쟁될 수 있을 만큼 선택 사용할 수 있도록 하기 위하여 차량과 연료 면의 신기술과 인프라의 개발에 역점을 두고 있다. 이 계획으로 수입석유에 대한 의존도를 대폭 감축시킴으로써 미국의 에너지안보 면의 극적인 개선을 이끌어내게 될 것이며, 동시에 이 계획은 청정대기 및 기후변화 전략의 핵심요소가 될 것으로 보고 있다. 이를 뒷받침하기 위해 여러 분야의 국제공동협력을 제안하고 있다 (한국수소 및 신에너지 학회, http://www.hydrogen.or.kr/).

미국 에너지성 (DOE) 은 최근 발표한 2005 년 회계년도 예산안에서 연료전지 자동차 실용화 등 수소에너지기술개발비와 이산화탄소 고정 기술개발비를 대폭 늘릴 것이라고 발표했다 (http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/budget.html). 연료전지 개발과 자동차로의 응용, 풍력을 이용한 수소제조 등 수소에너지기술개발에 2.19 억, 원자력수소 900 만 달러 등 총 2.28 억$로서 전년대비 40%이상 증가된 것이다 (한국가스신문, 2004.2.16 일자).

또한 미국 에너지성 (DOE) 은 열화학 사이클에 의한 수소 제조방법에서 제일 우선적으로 해야 할 실증실험으로 순환물질로 유황과 요오드를 사용한 원자력이용 수소 생산 (SI-cycle hydrogen fuel production) 을 채택하였다. 또한 이 실증실험은 산업체와 정부연구기관이 주도하여 수행하고, 정부와 대학은 지원하는 체재로 할 것을 추천하였다 (김지동, 수소에너지 제조기술현황, 2004). 이 열화학 사이클에 의한 수소 제조 공정에 대한 전체적인 로드맵은 <그림 2-1>과 같다 (DOE, ten year program plan, 2005). 미국 에너지성의 로드맵에 의하면 2009 년까지 실험실 수준의 수소생산공정을 완성하고, 2013 년 까지 pilot scale 의 공정을 완성하게 되면, Engineering demo process 심사를 거쳐 2017 년 이후 가동할 수 있는 계획을 준비 중에 있다 (Brown et al., GA-A23451, 2000; GA-A24266, 2003a; GA-A24285, 2003b; Buckingham et al., 2004).



<그림 2-1> Nuclear hydrogen production process demonstration phases (DOE, ten year program plan, 2005).

2.1.2 일본의 연구현황

일본은 최근 20 년간 화석연료의 고갈 및 지구 환경 오염 문제를 해소하기 위한 신에너지 개발을 적극적으로 추진해 왔다. 이러한 노력중의 하나가 통상 산업성에 의하여 1992 년에 제안된 수소 이용 국제 클린 에너지 시스템 기술 (World Energy Network ; WE-NET, http://www.enaa.or.jp/WE-NET/) 이다. WE-NET 은 세계적으로 편재해 있는 재생 가능 에너지를 이용해 물로부터 수소를 제조하고, 이것을 수송 가능한 매체로 전환해 에너지 다소비 지역에 공급하는 등 세계적인 규모의 효율적인 에너지 이용을 목적으로 추진되었다.

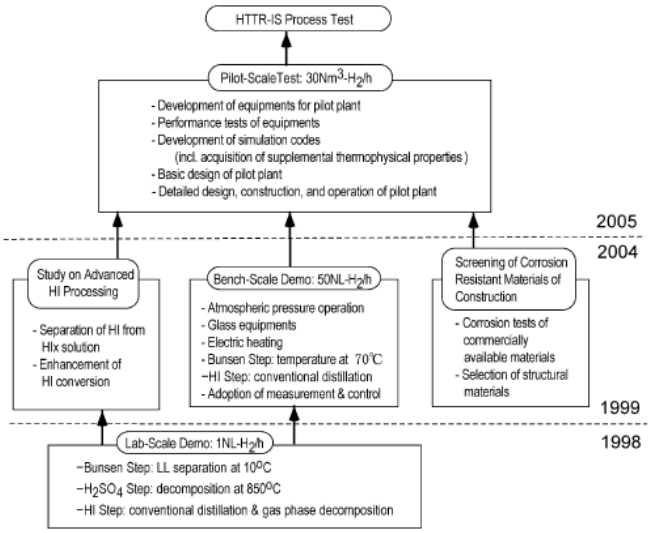
신 에너지산업기술 종합 개발 기구에 의하여 추진된 WE-NET 은 당초에, 1993~2020 년까지의 28 년간을 I, II, III 기로 구분하여 24 억$을 투입, 연구·개발을 실시할 계획이었다. 1993~1998 년까지의 WE-NET I 기에서는 조사 연구, 기초 연구 및 요소 기술 연구를 실시하여 수소에너지의 실용화를 목적으로 총 780 억원, 년 평균 130 억원의 예산을 들여 대규모 수소 제조 기술, 수소 수송·저장 방법, 수소 이용 기술에 관한 기초 기술의 확립을 목표로 하였다.

1999~2003 년까지 5 년 간의 예정으로 시작된 제 II 기 계획에서는 당초 계획을 견지하면서 수소에너지의 단계적 도입을 위하여 총 810 억원, 평균 203 억원의 예산을 갖고 중·단기 실용화를 목표로 하는 수소 자동차 시스템, 수소 공급 스테이션, 자동차용 수소저장 재료, 고체 고분자형 연료 전지 및 수소 디젤 엔진의 개발을 포함시켜 연구를 추진해 왔다.

제 II 기 연구·개발은 2003 년도까지로 예정되었었지만 1 년 앞당겨진 2002 년도에 종료하고, 새로운 수소 안전 이용 등 기반기술 개발 사업을 2003 년부터 2007 년까지 5 년간에 걸쳐 수소의 안정성과 관련되는 데이터의 취득과 안전 기술의 확립 등 수소용 기기들의 국산화 및 수소의 제조·수송·저장 등과 관계되는 기술 개발을 시작하는 등, 수소 에너지 분야를 국가 경제 부흥의 계기로 삼고자 국가적 지원을 아끼지 않고 있다 (김지동, 수소에너지 제조기술현황, 2004).

일본에서 열화학적 수소생산 공정은 JAERI (Japan Atomic Research Institute, http://www.jaeri.go.jp/) 의 주도하에 연구·개발이 이루어지고 있다 (Kubo et al., 2004a; Kubo er al., 2004b; Ozturk et al., 1994; Kasahara et al., 2003; Hwang et al., 2003).

일본은 열화학 수소생산공정의 가장 앞선 기술을 보유한 나라로서 이미 0.03 m^3/hr 규모의 수소생산공정의 시운전에 성공하였다 (Kubo et al., 2004b). 2005 년 현재 수소생산공정에 필요한 고온열원반응기 (HTTR) 를 제작하였고, 이 반응기로부터 950 °C 의 헬륨가스가 SI cycle 공정으로 공급된다. 또한 HTTR-SI 공정흐름도에 관한 기초설계 (basic design) 를 위하여 공정모사기를 개발하였고, 이 공정흐름도를 바탕으로 30m^3/hr pilot-scale HTTR-SI 공정은 설계 중에 있다 (<그림 2-2>참조, Kubo et al., 2004b). 1978 년 미국의 General Atomic Co. 가 특허등록한 공정 (Norman et al., US patent: 4,080,940; 1978) 과 다른점은 HI-I_2-H_2O 혼합용액에서 HI 를 분리/농축을 위하여 electrodialysis 기술을 사용하는 것이다. 양이온교환분리막을 이용한 HIx (HI-I_2-H_2O mixture) 로부터 HI 를 분리/농축하는 전기투석법 (elecrodialysis) 공정은 전체공정의 열효율을 향상시키는 것으로 보고되었다 (Hwang et al., J. Membrane Science, 2003). 본공정은 또한 미국특허로 출원(Nomura et al. US patent application: US 2005/0000825, 2005) 중 이다.



<**그림 2-2**> R&D stage for the IS process at JAERI (Kubo et al., 2004b).

3) 유럽의 연구현황

유럽의 경우 많은 국가들이 다양한 프로젝트를 수행 중에 있으나 대표적으로 연료 전지 버스를 운영하기 위한 CUTE (Clean Urban Transport for Europe) 프로그램 (http://europa.eu.int/comm/energy_transport/en/cut_en.html) 에 18.5million 유로를 투자하여 진행 중이다. 9개도시(런던, 마드리드, 암스테르담, 함부르크 등) 에서 30여대의 버스를 운영하기 위해 다양한 방식의 수소 공급 station 을 설치하고 있으며, 부생 수소 이용방식, 천연가스 & 메탄올 수증기개질방식, 대체에너지 (풍력, 태양광, 지열, 수력 등) 를 활용한 물-전기분해 방식 등 다양한 방식의 수소 공급 station 을 시도 중이며 2003년부터 실증 시험을 진행 중이다 (김지동, 수소에너지 제조기술현황, 2004).

열화학적 수소생산 공정에 관한 연구는 독일 RWTH Aachen 공대의 Knoche 교수가 1980년대 SI cycle 공정흐름도에 관한 최적화에 기여하였고, reactive distillation column 을 이용한 HI 분리/농축공정에 대한 기초연구를 수행하였다 (Engels, Knoche and Roth, 1986). 또한 프랑스도 현재 프랑스원자력연구원 (CEA) 의 주도하에 SI cycle 공정에 대한 시운전을 미국과 함께 수행 중이다.

2.2 국내의 연구현황

우리나라에서 수소에 관한 연구는 1970년대 말부터 관련 기초연구가 시작되었으며, 1989년 과기처의 지원으로 한국에너지기술연구소 (2001년 1월 한국에너지기술연구원으로 개칭) 가 연구를 총괄하여 수소에너지 관련 기초연구를 대학 및 연구소에서 공동으로 수행하였으나, 1단계의 연구지원으로 마감되었고, 1989년부터 1992년까지 특정과제로 추진되었던 연구내용은 수소의 제조기술, 수소의 저장기술 및 수소의 안전대책기술 관련으로 9개의 연구과제가 수행되었다. 한편 1988년부터 시작된 대체에너지 기술개발사업에 따라 1992년부터 수소에너지 분야의 연구·개발도 지원되기 시작하였는데, 대부분이 대학에서 기초연구 수준으로 진행되고 있다.

한국에너지기술연구원에서는 지속적으로 수소에너지 관련 연구를 수행하고 있으며, 수소제조에 대한 장기적 원천기술 (열화학적, 생물학적 및 광촉매를 이용한 물로부터 수소 제조) 확보를 목표로 과기부에서 2000년 10월부터 5년간 60억을 지원하는 국책사업으로 고효율 수소제조기술개발을 시작한 이후, 이를 1단계로 조기 종료하고, 2003년 9월부터 프론티어사업 (고효율 수소에너지 제조·저장·이용·기술사업단, http://www.h2.re.kr/) 으로 확대 개편하여 수소에너지 제조, 저장, 이용 (연료전지 제외) 기술 전반에 대하여 연 100억 규모를 10년간 투자하는 기술개발 프로그램을 시작하였다. 산업자원부에서도 단기적 실용화 가능 과제를 중심으로 2003년 12월 수소연료전지사업단 (http://www.h2fc.or.kr/) 을 구성하여 향후 5년간 2500억 원이 투입되며 2010년경 상용화를 목표로 수소경제시대를 대비하고 있다 (김종원, 2004, <표2-1> 참조).

한국과학기술부는 2004 년 1 월 원자력연구개발사업 공모에서 <원자력을 이용한 수소생산시스템개발사업>에 투자를 시작하였고, 2005 년에는 90 억원의 예산을 배정하였다 (http://nuclear.kistep.re.kr). 2004 년 3 월부터 시작된 본 연구는 2 년간 4 개의 세부과제로 되어있고, 사실상 국내 최초의 SI cycle 공정에 관한 연구로 여겨진다 (임영일, 2005).

제 1 세부과제는 원자력수소생산공정에 대한 전반적인 실효성평가이고, 제 2 세부과제는 수소생산공정에 고온 열원을 공급하게 될 신형 반응기 HTGR (high-temperature gas-cooled reactor) 공정개발에 관한 것으로 한국원자력연구소가 주축이다. 즉 이 두 세부과제에서는 수소생산공정을 지원할 신형 고온가스냉각반응기 (HTGR) 의 설계 및 제작과 이러한 원자력반응기와 수소생산공정간 (HTGR-SI process) 의 호환성을 해결하는데 중점을 둘 것으로 보인다 (임영일, 2005).

제 3 세부과제는 한국에너지기술연구원 (KIER) 주도로 Bunsen reactor, HI extractive distillation column, cation-exchange membrane 공정에 대한 기술개발과 공정재료 및 촉매 성능분석을 수행한다. 제 4 세부과제는 한국과학기술연구원 (KIST) 주도로 황산 분리/농축/분해 공정에 대한 핵심기술개발을 목적으로 하고 있다. 따라서 제 3 과제와 제 4 과제는 본연구와 매우 밀접한 연관을 갖고 있지만, 이들 세부과제에서는 열역학적 모델개발과 공정모사는 제외된 것으로 보인다 (임영일, 2005).

그 동안 국내에 SI cycle 공정에 큰 관심을 보여온 기관은 한국에너지기술연구원 (KIER: Korea Institute of Energy Research) 의 Hydrogen Energy Research Center 로써 김종원 연구원은 이미 일본원자력연구원 (JAERI) 과의 전기투석법에 의한 HI 분리/농축에 관한 연구(Hwang et al., J. Membrane Science, 2003) 를 수행하였다 (임영일, 2005).

<표 2-1> 국내 수소프로그램과 투자 규모

기 획 부 처	내 용
산업자원부	-대체에너지개발 및 이용.보급 촉진법 ('87제정,'02개정) -1992~2002년까지 총 사업비 6,459백만원 (정부 4,788백만원, 민간 1,671백만원), 2002년까지 14과제 종료 - 수소연료전지사업단 2004년 7월 출범, 5년간 1500억 규모 투자 예상
과학기술부	- 국책과제 고효율 수소제조기술개발사업 (3년으로 종료) 2000.10부터 2003.10월까지 3년간 30억 투자, 열화학적, 생물학적 및 광촉매 이용 수소제조 등 3개 과제 -프론티어사업단(고효율수소에너지 제조·저장·이용·기술개발사업단), 연간 100억 규모로 9년 6개월 동안 투자 예정 - 원자력 수소, 1차년도 20억 규모로 2004년 3월 시작

2.3 결 론

지금까지 각국의 수소에너지 개발 현황에 대해서 알아 보았다. 연구경험이 많고 연구성과가 높은 일본기술이 미국의 기술에 비하여 3~4 년 정도 앞선 기술로 생각되고, 우리나라의 기술수준은 선진국들의 연구·개발수준에 비하여 수소생산 제조 공정과 관련된 기초연구가 미흡함을 알 수 있다. 앞으로 철저한 문헌조사를 통하여 모델링 및 공정모사를 수행해 나간다면 머지않은 미래에 선진국 수준의 기술을 보유 할 수 있을 것으로 예상된다 (<표 2-2>참조).

<표 2-2> 2005 년 2 월 현재 각국의 기술 수준 비교표 (임영일, 2005; 100 점 만점기준).

	기초연구			공정설계		설비재료 개발	시운전		평균
	실험	모델링	공정모사	기초설계	상세설계		단위공정	전체공정	
일본	100	70	70	100	100	100	100	100	92.5
미국	60	90	90	80	90	80	90	70	81.25
유럽	90	90	80	70	80	80	90	60	80
한국	50	30	30	30	80	80	50	30	47.5

열역학 제조공정에 대해서 보다 상세한 내용은 제 3장 SI-cycle process 의 실험적 연구 현황에서 다룰 것이고, 제6장 강산성 전해질 용액의 열역학적 상평형과 평형모델, 제 7장 SI-cycle의 공정 모델링 모사 그리고 설계 부분에서는 미국의 General Atomic Co. 회사의 연구 보고서 (Brown et al., GA-A23451, 2000; GA-A24266, 2003a; GA-A24285, 2003b) 를 중심으로 SI-cycle공정 모델링 및 모사를 수행 할 예정이다.

참고문헌

김종원 (2004), 수소에너지 전망과 국제협력, *화학공학기술정보지 (NICE)*, 2004 년 4 월호, p112-117

김지동 (2004), 수소에너지 제조기술 동향, 한국과학기술 연구원. (고경력 과학기술자 홈페이지 기술동향 게재 논문: http://www.reseat.re.kr/main/newsbrief/news_view.php?FCI=D&FBI=1256).

임영일 (2005), 과학기술국제화사업 과제 계획서 : 원자력을 이용한 수소연료 생산을 위한 열화학적 물 분해 순환공정의 컴퓨터 모사 및 실효성평가, 내부문서.

Brown et al. (2000), High efficiency generation of hydrogen fuels using nuclear power, GA-A23451, General Atomics technical report, USA.

Brown et al. (2003a), Alternative flowsheets for the sulfur-iodine thermochemical hydrogen cycle, GA-A24266, General Atomics technical report, USA.

Brown et al. (2003b), High efficiency generation of hydrogen fuels using nuclear power, GA-A24285, General Atomics technical report, USA

Buckingham et al. (2004), High efficiency hydrogen production form nuclear energy: Laboratory demonstration of S-I water splitting, Year two annual report, SNL/CEA/GA, USA.

DOE Office of Nuclear Energy (2005), Nuclear hydrogen initiative ten year program plan: NHI, USA

Hwang et al. (2003), Improvement of the thermochemical water-splitting IS (iodine-sulfur) process by electro-eclectrodialysis, J. Membrane Science, 220, 129-136.

Kubo et al. (2004a), A demonstration study on a closed-cycle hydrogen production by the thermochemical water-splitting iodine-sulfur process, *Nuclear Engineering and Design*, 233, 347-354.

Kubo et al. (2004b), A pilot test plant of the thermochemical water-splitting iodine-sulfur process, *Nuclear Engineering and Design*, 233, 355-362.

Nomura et al. (2005), Process for efficient hydrogen production by thermochemical water-splitting using iodine and sulfur dioxide, US patent application, US2005/0000825 A1.

Ozturk et al. (1995) An Improved process for H_2SO_4 decomposition step of the sulfur-iodine cycle, *Energy Convers*, 36(1), 11-21.

관련 Web-sites

고효율 수소에너지 제조·저장·이용·기술사업단, http://www.h2.re.kr/

수소연료전지사업단, http://www.h2fc.or.kr/

한국 수소 및 신에너지 학회, http://www.hydrogen.or.kr/

CUTE (Clean Urban Transport for Europe), http://europa.eu.int/comm/energy_transport/en/cut_en.html

DOE (U.S. Department of energy), http://www.eere.energy.gov/

JAERI (Japan atomic energy research institute), http://www.jaeri.go.jp/

WE-NET (World Energy Network), http://www.enaa.or.jp/WE-NET/