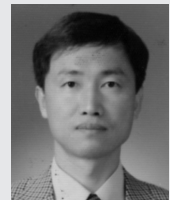


# 원자력 수소생산 기술개발 현황



김 태 욱  
한국수력원자력(주) 중앙연구원 성장동력개발팀장

## 1. 개 황

기후변화 및 화석연료 고갈은 인류사회 전체의 당면 위기이다. 1992년 주요 국가들이 브라질 리우에 모여 기후변화에 관한 유엔 기본협약을 체결하였지만

자발적인 제한에 의존하고 있는 실정이라서 온실 가스 감축이 불투명하다. 전 세계 주요 자원의 확정 매장량은 원유 54년, 천연가스 63년, 석탄 112년에 불과하다.<sup>1)</sup> 세계 인구도 현재 71억<sup>2)</sup> 명에서 2050년 이면 90억 명에 이를 것으로 전망되고 있어 새로운

1) 현재의 기술과 경제성을 기준으로 생산 가능성이 90% 이상인 자원, BP Statistical Review of World Energy, June 2012

2) <http://www.census.gov/> 2013년 3월 기준

에너지원의 발굴 및 에너지믹스의 변화가 불가피하다. 미래의 인구를 부양하고 인류의 지속가능한 발전을 보장하기 위해서는 전력 및 에너지 수요를 충족시켜야 한다. 이를 해결할 수 있는 탁월한 과도기적 에너지원이 바로 원자력이다.

2001년 7월 주요 원자력기술 선진국은 지속성, 안전성, 경제성, 핵확산 저항성이 향상된 혁신 개념의 원자로 개발 필요성을 인식하고 제4세대 원자력시스템 국제포럼(GIF<sup>3)</sup>)을 공식 출범하였다. GIF는 6개의 4세대 원자로를 선정하였는데 그중 하나인 VHTR<sup>4)</sup>에 2006년 우리나라 등 8개국이 참여하여 10년간 국제공동연구를 수행하기로 서명하였다.

VHTR은 원자로 출구온도가 900~1,000℃에 이르며 전력, 수소 및 산업 공정열을 동시에 생산할 수 있다. 수소는 물로부터 열화학, 전기화학 및 하이브리드 공정으로 생산할 수 있으며, 고온의 출구온도는 화학, 석유, 철강 산업에도 매력적이다.

VHTR의 기초기술은 이전의 고온가스로인 미국의 Peach Bottom, Fort Saint-Vrain 및 독일의 AVR<sup>5)</sup>, THTR<sup>6)</sup> 원형이 존재하며, 남아프리카(PBMR<sup>7)</sup>), 중국(HTR-PM<sup>8)</sup>, GTHTTR 300C<sup>9)</sup>), 일본(HTR<sup>10)</sup>), 프랑스(ANTARES<sup>11)</sup>), 한국(NHDD<sup>12)</sup>), 미국(GT-MHR<sup>13)</sup>), NGNP<sup>14)</sup>)에서 중단기 프로젝트를 통해 개발되고 있다.

지구에 존재하는 화석자원은 단순히 연료로서만 사용되는 것이 아니다. 기초 화학제품, 합성수지 및 합성 고무, 화학섬유, 비료 및 농약, 의약품, 화장품, 고무

및 플라스틱 제품 등 산업 및 생활용품의 재료들이 모두 석유 및 천연가스로부터 제조된다. 따라서 인류의 지속가능한 발전을 위해 화석자원을 최대한 후손에게 물려줄 수 있도록 에너지로서 화석자원의 사용은 최대한 억제하고, 원자력이나 재생에너지 자원을 사용하도록 노력하여야 할 것이다.

그러므로 원자력 선진국들이 공동으로 제4세대 원자로 VHTR을 이용한 고온의 열공급 또는 수소생산 기술을 개발하는 것은 매우 고무적인 일이다. 우리나라는 2008년 제1차 국가에너지기본계획을 수립하여 녹색성장 구현을 위한 10대 이행과제의 하나로 '수소 경제로의 이행 기반 구축'을 추진 중에 있다.

## 2. 현황

미국은 Energy Policy 법(EPAAct-2005)에 따라 NGNP 프로그램을 추진하고 있으며, 2021년까지 NGNP 최종 상세설계, 건설 및 기동운전을 하도록 규정하였다. NGNP 산업연합은 SC-HTGR을 최적의 설계로 선정하였는데, 이는 전기 생산뿐만 아니라 산업계가 사용하는 공정열을 생산할 수 있기 때문이다.

일본은 2010년 30MWth HTTR 실험로로 950℃에서 50일간 시험운전에 성공하여 기술을 입증하였으며, 2020년까지 열화학 수소생산시설과 HTTR 실험로 연결을 추진 중이다. OECD/NEA는 HTTR을 이용한 안정성 입증시험 국제공동연구에 착수하였는

3) the Generation IV International Forum, 미국, 일본, 프랑스 등 원자력기술 선진 9개국이 참여하여 협력약정을 맺음.

4) very high temperature reactor : 초고온가스로

5) arbeitgemeinschaft versuchsreaktor 원자로

6) thorium high temperature reactor

7) pebble bed modular reactor

8) high-temperature pebble bed modular nuclear reactor

9) gas turbine high temperature reactor 300-cogeneration

10) high temperature test reactor

11) 아레바의 고온가스냉각로

12) nuclear hydrogen development and demonstration 시스템

13) gas turbine modular helium reactor

14) next generation nuclear plant : 미국차세대원자력발전소

데 우리나라와 미국 등이 참여하고 있다.

우리나라는 2008년 제255차 원자력위원회의 미래 원자력시스템 개발 장기추진계획에 따라 VHTR의 개발이 추진되었으며, 2009년에는 산업체 참여를 위하여 원자력수소협회의체가 결성되었다. 그러나 예산 미확보로 2010년 개념설계 착수에 이르지 못했다.

이에 따라 2011년 제258차 원자력위원회에서 개념설계 착수를 위한 예산 확보방안(산업체 참여 등) 강구 및 정부주도의 개념설계 추진 등이 의결되었으며, 2012~2016년 동안 핵심기술개발 위주로 연구개발을 추진하게 되었다. 원자력수소 생산시스템 실증 사업도 산업체 참여를 전제로 이 기간 내에 착수하며, 실증로 건설 착수(2022년), 실증 완료(2030년)를 목표로 하고 있다. 포스코는 2010년 철강업계와 컨소시엄을 구성하여 2020년까지 수소환원제철 공정을 개발한다는 계획을 발표하였다.

VHTR의 고열원을 이용한 주요 수소생산 기술로는 전기화학 공정인 HTSE<sup>15)</sup>, 열화학 공정인 SI<sup>16)</sup> 및 하이브리드 공정인 HyS<sup>17)</sup> 등이 있다. HTSE 공정은 물을 고온의 상태에서 전기분해 함으로써 변환효율을 높이는 기술이며, SI 공정은 고온의 열원만을 이용하여 수소를 생산하는 열분해 기술이고, HyS 공정은 전기분해와 열분해를 함께 이용하는 기술이다. 우리나라 VHTR은 KAERI에서 개발하고 있고, 이를 이용한 수소생산 기술인 SI 공정은 한국에너지기술연구원(KIER)에서 고온증기전기분해(HTSE) 공정은 한수원-한전 협약연구를 통해 개발해왔다.

SI 열화학공정은 1970년대 미국 GA사에서 개발하였는데 분젠반응, HI 분해반응, 황산분해 반응으로 진행되며, 미국, 일본, 중국, 한국 등에서 활발하게 연구되고 있다. 분젠반응에서 부반응을 억제하기 위해 사용되는 과량의 요오드, 황산상과 HI상의 분리

후 정제, 농축, 기화 반응 특히, 요오드와 물 제거 공정의 열손실 최적화, 황산분해반응의 촉매 개발 및 재료부식 문제 등이 해결하여야 할 과제이다.

미국은 DOE의 지원 하에 SNL, GA, 프랑스 CEA의 공동연구를 통하여 2008년 5기압, 50L/h의 수소 생산을 1시간에 걸쳐 확인한 바 있다. 우리나라는 KIER에서 2013년 50 L/h 규모의 SI 수소생산 운전/성능평가를 마치고 2016년에 파일럿 규모의 SI 수소 생산계통 건조 및 운전/성능평가를 목표로 연구 개발 중에 있다.

HTSE 공정은 SOFC<sup>18)</sup>의 역반응 공정으로 연료전지의 기술을 상당 부분 이용할 수 있어 수소생산 및 연료전지 기술의 동시 발전이 기대된다. 그러나 전 세계적으로 고체산화물 전해질의 장기운전에 문제가 되고 있는 공기층의 박리현상, 대면적화, 세라믹의 고온 안전성, 규모의 경제에 따른 대형화 타당성 등이 선결과제이다.

미국은 아이다호국립연구소(INL)에서 2003년 단위 셀 연구를 시작으로, 2008년 10cm×10cm, 3모듈(720셀)로 이루어진 15kW급 수소생산시스템의 실험 운전에서 1,080시간 동안 평균 1.2m<sup>3</sup>/h의 수소생산을 실증하였고, 2009년에는 10셀 스택으로 2,500시간 장시간 운전 성공하였다. INL은 2009년 독립팀의 권고에 따라 HTSE를 NGNP의 수소생산 우선 기술로 선택한 바 있다.

한수원은 전력연구원과의 협약연구를 통해 2008~2011년에 HTSE 1단계 연구를 수행하여 2011년 미국 INL에서 장기운전의 장애요인으로 지적했던 HTSE 공정의 셀 박리현상 문제를 해결하고 68 L/h 규모로 최장 3,600시간 연속운전에 성공하였다. 장기 운전실적 측면만으로 볼 때는 우리나라가 세계 우위의 기술을 보유하고 있다고 판단된다.

15) High Temperature Steam Electrolysis : 고온증기전기분해, 물을 고온에서 전기분해하여 수소와 산소를 생산

16) Sulfur Iodine : 요오드와 황의 열화학 사이클을 이용한 물 분해 수소 제조기술

17) Hybrid Sulfur : 황산혼합공정, 전기분해와 열화학 사이클을 이용한 물 분해 수소 제조기술

18) Solid Oxide Fuel Cell : 고체산화물연료전지

### 3. 향후 계획

2008년에 600MWth급 4개 모듈로 이뤄진 플랜트의 가능한 조합에 따라 수소생산 시스템을 구성하여 진행된 경제성 분석 결과를 보면 수소생산 방법에 따라 생산단가는 \$2.2/kg~\$4.3/kg로 다양하게 나타났다. 이처럼 생산단가의 범위가 넓은 이유는 건설비, 우라늄 원광, 전력, 자본부담률 등 수소생산 비용에 영향을 주는 요소가 많기 때문이다. 이는 \$2.5/kg 이하로 판단되는 메탄수증기개질 공정에 의한 수소생산 단가에 비하여 다소 높은 가격이다. 그렇지만 현재로서는 아직 비용의 불확실성이 크므로 경제적 판단을 하기에는 이른 점이 있다.

미국의 경우 최근 셰일가스 채굴기술의 발달로 천연가스 가격이 하락하여 수증기메탄개질의 수소생산 단가는 약 \$1/kg까지 내려갈 것으로 예상되고 있다. 그러나 천연가스를 사용하여 수소를 생산하는 것은 지구 온난화 방지에 역행하는 것이다. 또한 향후 가격의 변화 가능성이 있으며, 우리나라의 경우 천연가스 액화 및 수송비로 인하여 높은 가격으로 수입하고 있어 가격하락을 기대하기 어렵다. 그리고 원자력을 이용한 수소생산 방법을 현재의 메탄수증기개질 수소생산 공정과 단순히 생산단가로 비교하기보다는 인류에 기여하는 바를 고려하는 것이 바람직 할 것이다.

수소연료전지차는 점진적으로 수송연료를 수소로 대체할 것으로 예상된다. 우리나라의 현대자동차를 비롯 GM, 혼다, 토요타 등에서 현재 고가인 수소연료전지차의 가격을 2015년에 5만 달러 수준으로 낮추어 상용화하고, 2020년에 120만대 보급을 목표로 삼고 있다.


수소연료전지차는 기술이 비약적으로 발전하고 있는데, 현재 1회 연료주입으로 400~500km를 주행할 수 있으며, 충전 시간도 3~5분에 불과하다. 이는 전기자동차의 주행거리 200km 이하, 충전시간 30여 분

에 비하면 획기적인 성능이다.

미국은 최근 INL의 DOE NHI(nuclear hydrogen initiative) 및 NGNP 프로젝트로 2012년까지 수행한 HTSE 실험을 마지막으로 이미 HTSE 공정, SI 공정, H<sub>2</sub>S 공정에 대한 파일럿 실증 전 단계까지의 연구가 끝났고, 2013년부터는 CANDU<sup>19)</sup>형에 적합한 캐나다 주도의 CuCl 열화학 공정에 대한 연구가 진행 중에 있다.

반면 우리나라는 SI 공정개발만 정부과제로 진행되고 있다. HTSE 공정개발은 한수원-한전의 1단계 연구를 끝으로 중지되어 있는 상황이다. 지속적으로 전해질 대면적화, 장수명화 연구에 착수, 2022년까지 200MWt급 수소생산시스템 실증시설을 건설하는 연구를 검토할 필요가 있다고 판단된다.

원자력수소생산기술은 미래 화석연료 고갈에 대비한 대량의 청정수소연료 생산을 위한 핵심기술로 2040년 원자력수소 300만 톤 공급 시 연간 8조7천억 원의 석유수입 대체, 2천6백만 톤의 이산화탄소가 저감될 것으로 예상하고 있다.

이 기술이 상용화되면 수송용 및 발전용 연료전지에 사용될 수소를 친환경적으로 공급하게 되고, 우리나라는 새로운 성장동력을 창출하게 될 것으로 전망된다. 

#### [참고문헌]

1. 국가에너지위원회, “제1차 국가에너지기본계획,” 2008.
2. 미래원자력시스템 연구개발 5개년계획, 2011.
3. 제4차 원자력진흥종합계획, 2012.
4. 한국수력원자력, “원자력이용 고온전기분해 수소생산기술 개발(I),” 2011.
5. 배기광, “SI 열화학 수소생산 공정,” NICE, 27, 5, 528-531, 2009.
6. GIF, “GIF R&D Outlook for Generation IV Nuclear Energy Systems,” 2009.
7. Dominion Engineering, Inc., “NGNP Hydrogen Technology Down-Selection - Results of the Independent Review Team Evaluation, 2009.
8. 에너지경제연구원, 미래 수소경제 실현을 위한 기반구축 연구 - 원자력을 이용한 수소 제조비용 추정, 2008.

19) Canada deuterium uranium reactor