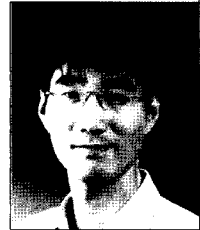


수소생산을 위한 초고온가스로 기술

Very High Temperature Gas Cooled Reactor Technology for Nuclear Hydrogen Production System



김 용 완*

* 한국원자력연구원, 수소생산용원자로기술개발부, 초고온가스로요소기술개발 과제책임자

1. 서 론

에너지 수급에 대한 통계전망은 전 세계적으로 화석에너지 부족에 대한 위기의식을 높이고 있으며, 2008년 초에는 유가가 배럴당 100불을 돌파하여 가파르게 상승하고 있다. 현대문명과 세계 경제의 생명줄인 원유의 생산은 2020년경 절정을 기록할 전망이다. 향후 선진국의 에너지 소비량증가는 미미할 것으로 판단되나 BRICs를 포함한 개도국의 에너지 수요가 확대될 전망이다. 특히, 중국과 인도는 경제개발이 확산되면서 에너지 소비가 급작스럽게 증가하여 2030년경에는 2000년대 초의 두 배에 해당하는 에너지를 소비할 전망이다.¹⁾ 오늘날까지 인류의 에너지 사용을 살펴보면 나무, 석탄, 석유, 그리고 천연가스 순으로 단위 질량당 탄소의 수가 적어지는 탈(脫)탄소화의 방향으로, 사용하기 편리하면서도 보다 깨끗한 에너지를 찾아 변해온 것을 알 수 있다. 탈탄소화 여정의 끝에 탄소가 전혀 포함되지 않은 수소가 있다. 이와 같이 최근 자원 고갈로 인한 고유가와 화석연료의 본질적인 문제로 인한 환경문제가 핵심 쟁점이 되고 있는 가운데 미래 청정에너지원인 수소와 이를 바탕으로 한 수소경제(hydrogen economy)에 대한 관심이 높아지고 있다. 수소는 자원 제약이 없고, 이산화탄소 등 공해물질을 배출하지 않고 연소 후 물로 변환되는 재생가능한 친환경 에너지일 뿐만 아니라, 무엇보다도 지정학적으로 편재되어 있는 화석에너지와 달리 기술만 있으면 누구나 생산해 낼 수 있는 기술주도형 에너지이기 때문이다. 수소는 지구

어디든 존재하며 지표면의 70%를 구성한다. 그러나 석탄, 석유, 천연가와 달리 자유롭게 떠다니는 것이 아니라 화석연료나 물로부터 분리해 내어야 한다. 수소는 에너지 운반체로서 전기처럼 만들어 내야하는 에너지담체(energy carrier)이다. 물을 수소와 산소로 분리하기 위해서는 285KJ/mol의 에너지가 필요하다. 이와 같이 필요한 에너지를 공급하는 가장 효율적인 후보가 원자력이다. 특히, 초고온가스로에서 생산되는 고열을 이용하면 전기분해에 비해 효율적으로 수소를 생산할 수 있다.

국제적인 동향을 보면, 미국의 경우 2005년 8월 통과된 미국의 에너지법안(Energy Bill)에는 2021년까지 원자력을 이용한 상용수소 생산기술개발 완료를 명시하고 있으며 NGNP(Next Generation Nuclear Power) 프로젝트에서 초고온가스로를 이용한 수소생산을 추진하고 있다. 일본은 원자력을 이용한 수소생산을 위해 1998년부터 30 MWt 열출력을 갖는 초고온가스 실험로인 HTTR을 운전 중이다. 950℃의 초고온으로 1주일간 운전 성공하였으며 2008년 후반에는 950℃로 50일 이상 운전하여 장시간 운전데이타를 확보할 계획이다. 또한, 현재 운전 중인 고온가스로 HTTR에 2015년까지 상용기술 실증을 추진하고 있다. 이밖에 프랑스와 중국에서도 수소생산을 위한 원자로의 개발과 기술을 개발하고 있다. 가장 가까운 시일내에 고온가스로를 건설하는 곳은 남아공화국으로서 독일기술을 기반으로 하는 전력생산용 400 MWt급 폐열형 초고온가스로를 건설하는 계획을 추진 중이며 2012년

까지 데모 원자로를 완공하기위해 2005년 하반기부터 기기 제작 계약을 진행 중이다. 각 국의 독자적인 연구개발과 함께 2002년부터 미국 등 11개국은 제4세대원자로개발계획(GEN IV)을 추진 중이다. 제4세대원자로 개발노형 중 하나인 초고온가스로 VHTR(Very High Temperature Gas Cooled Reactor)은 우리나라 등 9개국이 참여하여 공동연구개발 목표를 설정하고 연구계획을 작성하였으며 세부공동연구계획을 작성하고 합의 중인 상태이다.²⁾ 원자력수소실증사업은 수소생산에 적합한 고온가스를 개발하는 것으로서 제4세대 원자력 VHTR계획과 공통부분이 많다. 우리나라의 입장에서는 외국의 고온가스로에 대한 경험과 실험장치를 공유하고 GIF/VHTR의 목표 중의 하나인 과거 기술의 재현에 동참함으로써 설계, 인허가, 운전에 필요한 방법론과 데이터 베이스의 개발 및 검증, 이를 위한 실험시설의 공동이용을 할 수 있다.

2. 초고온가스로

고온가스로는 독일 Aachen 공대의 Shulten교수가 주창하여 독일 Juelich연구소를 중심으로 개발한 원자로이다. 초고온가스로는 원자로의 노심출구 온도를 950도까지 올리는 것으로 기존의 고온가스로와 구분하고 있다. 원자력 수소생산의 최우선후보인 초고온가스로는 헬륨을 냉각재로, 흑연을 감속재로 사용하는 원자로이다.^{3,4)} 초고온가스로의 가장 큰 장점은 높은 열원의 생산이 가능해 수소생산 등 고온의 열에너지를 다양한 산업적 활용이 가능할 뿐만 아니라, 고효율의 전기생산도 가능하다는 점이다. 사고 시에도 자연현상만으로 최고 수준의 피동안전성을 보장하는 초고온가스로는, 제4세대 원자로 시스템 중에서 가장 가까

운 미래에 실현될 것으로 예상되고 있다. 따라서, 여타 수소생산방법보다 요구되는 부지면적과 수소생산 단가가 작으므로, 국토의 효율적이고 경제적인 이용이 가능하다. 초고온가스로의 개념은 그림 1과 같다.

초고온가스로 및 고온가스로는 사용하는 연료의 형태에 따라 크게 블록형(block)과 펠블형(pebble)으로 구분된다. 블록형의 대표적인 노형으로는 미국에서 개발한 GT-MHR을 들 수 있고 펠블형의 대표적인 예로는 현재 남아프리카공화국에서 건설 추진중인 PBMR이 있다. 두 노형 모두 직경 1mm 정도의 피복 핵연료 입자인 TRISO (tri-isotropic coated fuel)를 기반으로 사용한다. 블록형은 프리즘형이라고도 하는데 TRISO 입자를 분필 모양의 컴팩트로 성형한 후 이것을 육각형의 흑연 블록에 채워 넣은 핵연료를 사용하며, 펠블형은 TRISO 입자를 뭉친 후 외부를 다시 초열탄소로 피복한 직경 6cm의 구형 핵연료를 사용한다. TRISO 기반의 핵연료는 구조 특성상 핵분열 생성물의 누설량이 극히 낮고 핵연료의 재처리가 물리적으로 불가능한 특성을 가지고 있어 안전성이 높고 핵확산성에 대한 저항성이 크다. 블록형의 연료 블록 높이는 약 80cm이며, 원격 핵연료취급장치를 사용하여 장전된다. 블록형 원자로의 노심에는 여러층으로 적층된 다수의 연료 블록이 장전되고 핵연료의 교체는 주기적으로 이루어진다. 펠블형 원자로는 원자로 운전 중에 연료를 연속적으로 장전/방출하는데, 연료의 장전은 공압식으로 노심 상부에서 바로 떨어뜨린다. 노심으로 떨어진 펠블은 중력에 의해 낙하하며 원자로용기 하부의 취출구에서 하나씩 꺼내어 연소도와 손상 여부를 검사한 후 다시 순환 장전된다. 400MWT 급의 PBMR 에는 약 450,000개의 펠블이 장전되며 하나의 펠블은 보통 10회 정도 재장전 된 후 폐기된다. 표 1에서는 경수로와 초고온가스로의 주요 특징을 비교하였으며, 초고온가스로는 효율이 높고 안전하게 고열을 생산할 수 있다는 측면에서 수소생산에 가장 적합하다.

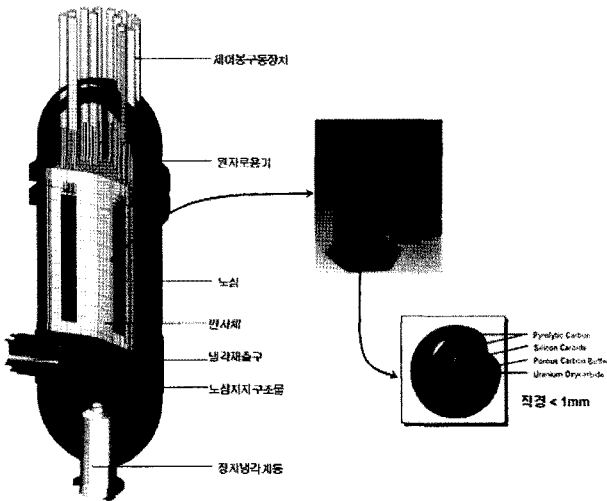


그림 1 초고온가스로개념도와 연료 형상

표 1 경수로와 초고온가스로의 비교

항 목	경수로	초고온가스로
냉각재	물	헬륨가스
최고온도	327℃	950℃ ~ 1,000℃
일차계통 압력	150기압	70 ~ 90기압
핵연료	UO ₂ 핵연료집합체	피복입자
안전 시스템	능동형	피동형

3. 수소생산기술

오늘날 생산되는 수소의 절반 정도가 수증기 개질 공정을 거쳐 천연가스로부터 추출된다. 수증기개질 공정에서 수소원

자들이 떨어져 나오는데 이때 이산화탄소가 부산물로 생성되는 것이 큰 문제점이다. 화석연료를 사용하지 않고도 수소를 생산방법으로는 전기분해를 이용하는 방법, 열화학적으로 물을 직접 수소와 산소로 분해하는 방법, 그리고 이 두 가지를 조합하여 물을 분해하는 방법이 있다. 백년 전부터 이용되어온 전기분해법은 물을 산소와 수소로 분리시킨다. 전기분해는 수증기 개질공정 비용의 서너배에 이르는 전기료 때문에 수증기 개질 공정보다 경쟁력이 떨어지는 상황이다. 전력은 크게 화석에너지, 원자력, 그리고 수력이나 풍력 같은 재생에너지로부터 생산된다. 전기분해가 효율적이기 위해서는 전력생산이 경제성을 가져야 한다. 태양광은 화석에너지를 이용한 전력생산에 비해 두 세배 비싸고 풍력은 지역적인 영향이 크다. 이밖에 수력, 지열에너지, 동식물성 바이오매스도 수소 생산을 위한 재생에너지 후보이지만 절대적인 공급량 혹은 경제성으로 인한 한계점을 극복해야 한다. 이에 따라, 원자력을 이용한 수소생산이 가장 실현성이 높은 방법으로 전 세계적으로 연구되고 있다. 이는 초고온가스로의 고열 또는 고효율 전기를 이용하여 고온 전기분해나, 열화학적 방법으로 물을 직접 분해하여 수소를 생산하는 것이다. 전술한 방법 이외에도 광합성의 마지막 단계에서 수소효소를 사용함으로써 수소를 생산하는 생물학적 방법, 광촉매를 이용하여 물을 분해하는 광화학적 방법, 그리고 고에너지의 빔에 의해 물분자를 분해하는 방사화학적 방법이 있으나 아직까지는 경제성 문제와 기술적 완결성이 추가적으로 확보되어야 한다.

표 2 수소생산방법 비교

원	수소생산방법	비고
천연가스	증기재질법	상용화기술, CO ₂ 문제
Biomass	가스화	CO ₂ 문제
	발효	환경친화성, 경제성문제 연구, 개발단계
석탄	석탄가스화	CO ₂ 문제
풍력에너지	물 전기분해	환경친화성 소용량
태양에너지	물 전기분해	
원자력	물 전기분해	환경친화성, 대용량 실증계획
	물 열화학분해	환경친화성, 대용량 실증계획
광분해	물분해	미 입증기술

4. 기기 및 구조관련 핵심수요기술

4.1 고온재료기술

초고온가스로 개발을 위해서는 950℃에 이르는 노심의 출구온도로 인해 초고온에서 하중을 견딜 수 있는 소재선

정 및 관련데이터의 생산이 우선되어야 한다.⁵⁾ 특히, 고온용으로 개발된 Alloy617의 경우도 초고온에서는 그림 2에서 보는 것과 같이 장시간 크리프수명은 현저히 감소한다.⁶⁾ 고온에서의 크리프 데이터, 피로와 크리프의 연계성이 금속소재에서는 중요하게 되며 온도가 1000℃를 넘어가는 경우나 높은 하중지지능력이 필요한 경우에는 규화탄소와 같은 세라믹소재를 사용하게 된다.

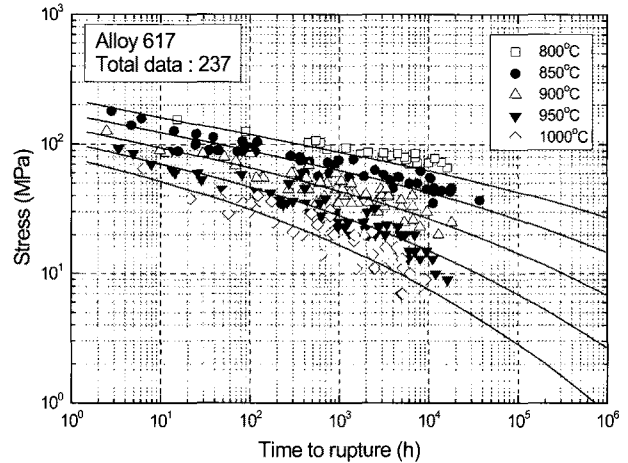


그림 2 Alloy617의 고온 크리프 강도

4.2 설계 기술기준

초고온가스로 기기 및 구조물이 수명동안 건전성을 유지하면서 운전하기 위해서는 설계단계에서 적절한 사용재료 및 신뢰성 있는 설계기준을 사용해야 한다.⁵⁾ 현재 국내원자로설계기술기준인 전력산업기술기준에는 고온에 대한 설계기준이 없는 상황이다. 미국의 ASME 코드에서는 고온에서 1등급 기기의 설계를 위한 Section III Subsection NH가 제정되어 있다.⁷⁾ 그러나 아직 적용 가능한 소재가 한정되어 있고 소재에 따라 최대 적용온도가 다르다. 현재 ASME-NH를 적용할 수 있는 구조재료로는 304SS, 316SS, 2.25Cr-1Mo, Alloy 800H 및 Mod.9Cr-1Mo강이 있으며 볼트 재료로써 Inconel 718이 있다. 국제공동연구인 GEN IV프로젝트에서는 이러한 설계기준의 보완을 위한 연구를 시작하였다.

크리프 발생온도 이하에서 운전되는 원자로구조물 설계코드인 Section III Subsection-NB와 주요한 차이점은 하중제어 응력에 대한 제한요건을 만족시켜야 하는 외에 수명 동안의 비탄성 변형을 제한요건을 만족시켜야 하고 크리프-피로 손상과 고온 좌굴 요건을 만족시켜야 한다는 것이다. 2등급 및 3등급기기의 고온설계는 Code Case N-253-9를 적용하고 노심지지구조물은 Code Case N-201-4를 적용해야 하는데 N-201의 경우에는 ASME-NH와 거의 유사한 구조와 내용을

포함하고 있다. 1989년에 초고온 환경에 적용할 수 있는 Alloy 617에 대한 설계기준을 Draft Code Case로 제정했다가 중단되었는데 최근 다시 개정 노력이 시작되고 있다. 이는 Alloy 617을 982℃까지 적용할 수 있도록 하기 위함이었다. 기본적인 코드의 골격은 ASME-NH의 전신인 Code Case N-47을 따랐다.

4.3 원자로 용기

압력용기 소재의 선정은 관련 설계의 기술성 및 안전성 뿐만 아니라 소재의 수급성, 제조성 및 경제성 측면까지 고려되어야 한다. 9Cr1Mo 강은 고온내성이 강하므로 압력용기 설계를 단순화할 수 있다는 장점이 있으나, 수급, 제조, 경제성 측면에서 불확실성이 높고, ASME 코드에 완전하게 등재되지 않았다는 단점이 있다. 반면, SA-508 강은 경수로에 사용되고 있는 소재로 많은 제조 경험을 보유하고 있으며, 소재의 수급, 제조, 경제성 측면에서 큰 장점이 있으나, 설계온도가 낮다는 단점이 있다. 따라서 정상상태 압력용기 온도 최소화를 위하여 흑연구조물 내부로 냉각재 유로를 형성하여야 하며, 압력용기 냉각계통의 추가설계와 사고조건에서 원자로 잔열제거를 위하여 원자로공동 냉각계통 성능 개선 설계 등이 추가적으로 요구된다. ASME에서는 CodeCase N499-1에서는 SA-508로 설계하는 경우 사고 시에 압력용기의 온도가 일시적으로 올라가는 것을 허용하고 있다.

4.4 원자로 내부구조물

원자로용기 내부의 대부분은 흑연 노심이 차지하고 있다. 블록형 원자로에서 노심은 금속 노심지지배럴 안에 위치하게 되어 수평방향으로 지지되며, 노심과 노심지지배럴 사이에는 노심 외곽의 불균일 형상과 원통 노심지지배럴 사이를 채울 수 있는 형태의 측면 흑연반사체가 설치된다. 노심 하부에는 흑연으로 된 지지기둥들이 설치되며 그 아래에는 금속 노심지지구조물이 설치되어 노심을 지지한다. 노심지지배럴과 노심지지구조물은 원자로용기에 의해 지지되는 구조이다. 노심의 상단에는 금속으로 된 상부노심구속 구조물이 설치되는데 노심과 마찬가지로 육각기둥 형태들로써 키(Key)로써 서로 연결되며 노심지지배럴에도 키로 연결된다. 폐블형 원자로에서도 원자로용기 내부의 대부분의 공간은 흑연반사체와 당구공 크기의 페블핵연료가 차지하고 있다. 원자로 내부구조물의 설계에서 가장 중요한 핵심은 흑연 노재 구조물에 대한 진동 및 내진평가기

술이다. 블록형 원자로에서는 레고블록처럼 쌓여진 구조에 대한 해석기술이 중요하며 일본에서는 하나의 블록, 1열의 블록, 그리고 전체 블록시스템에 대한 실험을 수행하고 독자적인 해석프로그램을 개발하여 보유하고 있다. 상용프로그램을 이용하여 단순 적층흑연블록에 대한 해석이 그림 3이다.⁸⁾

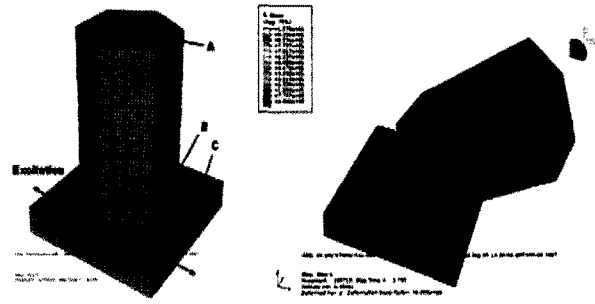


그림 3 흑연블록 내진해석 모델

4.5 중간열교환기 및 순환기

중간열교환기는 950℃ 고온에서 약 70bar 압력의 원자로계통과 약 40bar 압력의 중간루프를 연결하는 기기이다. 중간열교환기는 나선형 튜브열교환기, 판-핀형, 그리고 판형열교환기의 변형인 PCHE(Printed Circuit Heat Exchanger)가 주요 대상이다. 나선형 튜브 형태의 열교환기는 크기가 너무 커 열적, 기계적 성능이 문제가 있으며 초고온에서는 높은 차압을 견딜 수 없으나 가동중 검사에는 장점이 있다. 반면 치밀한 구조인 PCHE는 작은 공간에 설치가 가능하고 높은 차압을 견딜 수 있으나 가동 중 검사가 현실적으로 어렵다.

원자로계통 루프와 중간루프로 구성된 간접루프 형태의 원자력수소계통에서 헬륨을 순환시키는 순환기의 용량은 전체 수소생산효율에 큰 영향을 미치는 주요 인자이다. 헬륨가스분위기에 사용되는 순환기기술의 핵심은 베어링으로서 오일베어링, 가스베어링, 전자기베어링으로 구분할 수 있다. 가장 오래된 오일베어링은 높은 하중을 지지할 수 있으나 밀봉이 어렵다는 문제가 있으며 가스베어링은 높은 하중을 지지할 수 없다. 최근에는 전자석베어링을 많이 채택하고 있으나 고온에서의 전자석의 수명과 제어기술의 완성도를 필요로 한다.

4.6 초고온가스로와 수소생산계통 연계기술

원자로계통과 수소생산계통을 연결하는 기기가 공정열교환기로 칭하는 황산가스분해기이다. 열화학방법으로 수소를

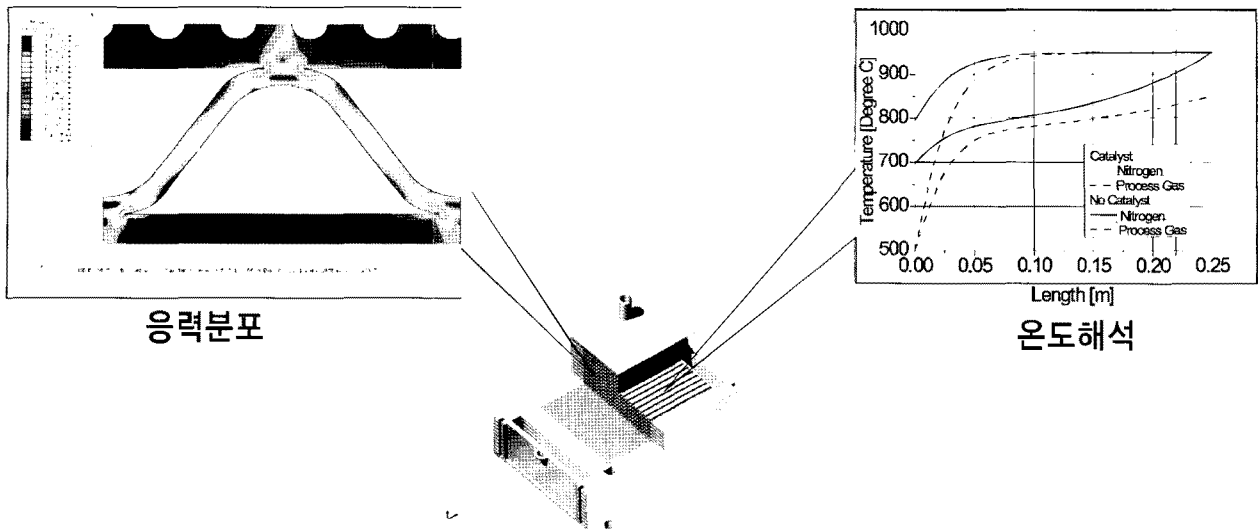


그림 4 황산가스분해 열교환기 개념과 해석결과

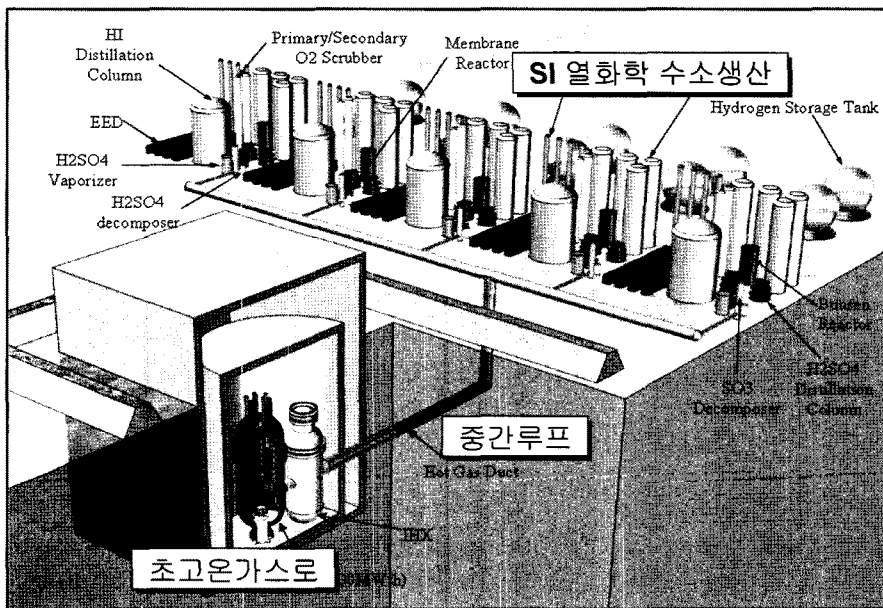


그림 5 초고온가스로를 이용한 원자력수소생산 시스템

생산하기 위해서는 황산을 증발시키고 황산가스를 분해해야 하는데 이 과정에 초고온가스로의 고열이 이용된다. 공정열교환기는 한쪽은 헬륨 반대쪽은 황산이나 황산 가스가 흐른다. 따라서 이 열교환기는 운전온도가 850~920℃의 초고온이며, 20~40bar의 차압을 견뎌야 하며, 부식성이 큰 SO₃ 가스에 대한 내식성이 요구된다. 원자력수소생산의 핵심기술로서 미국, 일본, 프랑스가 각각 독자적인 기술로 기술경쟁을 하고 있다. 한국원자력연구원에서는 금속재표면에 탄화규소를 이온빔으로 코팅한 후 계면을 이온빔을 이용하여 믹싱하는 독자적인 기술을 개발하여 미국 NGNP프로젝트에 기술을 소개하였다.⁹⁾ 열교환기는 그림 4에서 보는 것과 같은 하이브리드 형태로 개발하여 황산가스분해를 위한 축매공간과 높은 차압

을 견딜 수 있는 구조로 개발 중이다.

4.7 국내의 원자력수소개발 계획

우리나라에서는 에너지 자립을 위한 미래원자력 기술로서 수소에너지 생산기술 확보를 위해 과학기술부의 지원 아래 “원자력 수소생산 기술개발 및 실증사업”을 2004년부터 착수하였으며 현재 전체 시스템에 필요한 기술을 정의하고 원천기술 확보를 위한 연구를 수행중이다. 원자력 수소생산시스템은 그림 5에서 보는 것과 같이 초고온가스로와 물을 분해하여 수소를 생산하는 화학플랜트로 구성된다.²⁾ 초고온가스로 기술개발 및 수소생산 실증을 통해 2020년까지 연간 3만톤

규모의 수소를 생산할 수 있는 원자력 수소생산 실증모듈 개발을 목표로 하고 있다. 이를 위해 한국원자력연구원(원자로계통 개발), 한국에너지기술연구원(열화학 수소생산 공정 개발), 한국과학기술연구원(황산분해공정 실증) 등 3개 기관을 중심으로 국내외 학계·연구소·산업계가 협력체계를 구축하고 있다.

5. 맺음말

가까운 시일에 다가올 수소경제시대에 부존자원이 적고 국토가 좁은 우리나라에서 청정한 방법으로 대용량의 수소에너지를 안정적으로 값싸게 공급하는 유일한 방법은 초고온가스를 이용한 원자력수소생산이라 할 수 있다. 어떤 면으로 보든 우리나라는 세계의 어떤 나라보다 수소 경제로의 전환에서 앞게 될 수혜효과가 큰 나라이다.

참 고 문 헌

1. Jeremy, R., 2002, The Hydrogen Economy.
2. Chang, J.H., Kim, Y.W., Lee, K.Y., Lee, Y.W., Lee, W.J. Noh, J.M. Kim, M.H., Lim, H.S., Shin, Y.J., Bae, K.K., Jung K.D., 2007, "A Study of a Nuclear Hydrogen Production Demonstration Plant," Nuclear Engineering and Technology, Vol.39, No.2, pp.111-122.
3. 장중화, 2004, "수소생산에 적합한 제4세대 원자력시스템 초고온가스로(VHTR)," 원자력산업, 2004년 9월호, pp.22-30.
4. 장중화 외, 2005, 수소생산용 초고온가스로 예비개념설계 및 요소기술개발, KAERI/RR-2666/2005.
5. 김용완 외, 2006, 초고온가스로 요소기술개발, KAERI/RR-2789/2006.
6. W.G. Kim, 2007, "Analysis of the Creep Rupture Data of Alloy 617 for a High Temperature Gas Cooled Reactor," Proceedings of ASME PVP 2007.
7. ASME PVP Code Section III, 2004.
8. 김동욱 외, 2007, "Dynamic Equation of Motion of a Flexible Single Block on a Rigid Surface," 한국원자력학회 2007 추계학술대회, 평창.
9. Park, J.W. et al., 2006, Coating and Ion Beam Mixing Apparatus and Method to Enhance the Corrosion Resistance of the Materials at the Elevated Temperature Using the Same, PCT Patent, PCT/KR2006/0042366, 