

원자력이용 수소생산시스템과 전력사업자 측면의 요소기술

정광국, 김요한, 하상준, 이창섭
 한국전력공사 전력연구원

Key Technologies of Electric Power Corporation and Nuclear
 Hydrogen Development & Demonstration

Kwangkook Jeong, Yohan Kim, Sangjun Ha, Changsup Lee
 Korea Electric Power Corporation

1. 서론

최근의 유가 급등은 기업의 원가상승으로 인한 국제경쟁력 약화 및 물가불안 등을 유발하며 국제 산업경제에 큰 영향을 끼치고 있다. 우리나라의 경우, 통계(표1)에 따르면 주요 에너지 수입국중 석유수입은 3위, 천연가스는 10위 및 석탄은 2위로써 자원의존도가 높을 뿐만 아니라 표2에서와 같이 석유의 경우 가채 년수가 40.6년으로 예상되어 생산량이 정점에 달할 것으로 예상되는 2010~2020년경에는 심각한 에너지 문제가 대두될 것으로 보인다.

표1. 주요 에너지 수입국 현황 (석유는 2001년, 나머지는 2002년 기준)

[자료 : IEA, Key World Energy Statistics 2003]

석유		천연가스		석탄	
수입국	백만톤	수입국	백만m ³	수입국	백만톤
미국	526	미국	113,480	일본	159
일본	209	독일	81,341	한국	70
한국	119	일본	72,637	대만	52
독일	105	이탈리아	59,291	독일	31
이탈리아	91	우크라이나	55,519	영국	29
프랑스	86	프랑스	45,271	인도	25
인도	79	네덜란드	26,771	스페인	25
네덜란드	61	한국	23,280	네덜란드	22

표2. 주요 에너지원의 가채 년수 (2002년 기준)

[자료 : BP Statistical review of world energy 2003]

에너지 자원	석유	천연가스	석탄
가채 년수	40.6년	60.7년	204년

에너지의 안정적 확보를 위한 국가적 대책 마련과 함께 미래 에너지 혁명에 대한 근본적인 대비가 필요하며 대체에너지의 비중을 높이는 등의 방법으로 수입에너지 의존도와 석유 의존도를 낮추어야 한다.

우주에서 가장 흔한 원소이자 물의 구성요소인 수소는 무공해 무진한 무공해 자원이며 전기를 생산하는 연료전지 및 기타 대체에너지의 연료매체로써 사용되므로 가장 각광받는 차세대 2차 에너지로 대두되고 있다. 미국, 일본 및 유럽 등 선진국에서는 이미 수소에너지에 대한 주도권(Hydrogen Fuel Initiative)을 선점하기 위해 범국가적인 예산투자 및 연구개발을 추진하고 있다.

원자력이용 수소생산시스템은 대규모 생산이 가능하고, 무공해 에너지 자원을 이용하며 준국산에너지인 원자력을 이용한다는 점에서 장점을 갖고 있다. 우리나라의 경우, 과학기술부에서는 2004년부터 향후 15년간 ‘원자력을 이용한 수소생산시스템 개발사업’(과학기술부 공고 제2004-8호) 추진에 1조원을 투자할 계획이다. 본 논문에서는 원자력이용 수소생산시스템을 구성요소별로 원자로계통, 수소생산계통 및 전력생산계통 등으로 구분하여 간략히 설명하였으며 국내외 기술동향 및 요소기술 등에 대한 연구결과를 소개하였다.

2. 원자력이용 수소생산시스템 구성기술 및 개발동향

2-1. 원자로계통 (Nuclear Reactor System)

원자력이용 수소생산시스템은 그 구성요소별로 크게 나누어 원자로계통, 수소생산계통 및 전력생산계통 등으로 구분된다. 원자로계통에 적용하는 원자로는 현재 제4세대 원전의 노형 개념들이 대상이 되고 있으며 그중에서 수소생산용으로 적합한 원자로는 가스냉각고속로(GFR; Gas-Cooled Fast Reactor), 초고온가스로나(VHTR; Very-High Temperature Reactor) 그리고 납냉각고속로(LFR; Lead-Cooled Fast Reactor) 등이 있다.

(1) 가스냉각고속로(GFR; Gas-Cooled Fast Reactor)

핵분열에 사용되는 중성자는 고속중성자이며 냉각재는 헬륨 기체를 사용하고 연료주기로는 폐쇄형(Closed Cycle)을 사용한다. 고속중성자는 장수명 폐기물의 발생을 적게 하고 연료의 활용도를 높이는 장점이 있다. 참조형 원자로의 용량은 전기 출력 288 MW이다. 원자로 출구 온도는 850°C의 고온으로서 중간 열교환기 없이 직접 Brayton 사이클에 따라 터빈을 돌려 고효율 발전을 할 수 있고 필요에 따라 수소 생산이나 지역난방에 활용될 수도 있다. 연료 형태는 몇 가지 후보를 선정하여 연구 중인데 복합 형태의 세라믹 연료, 개량형 입자 연료, 액티나이드 혼합물의 세라믹 피복 연료 등이 있다. 연료에 따라 연료집합체는 프리즘, 핀, 판형 등의 집합체가 가능하고 집합체의 형태에 따라 노심의 형상이 결정될 예정이다. GFR은 부지 내에 핵연료의 가공과 사용후 연료의 처리를 수행할 플랜트를 지어 일체형 연료관리를 하게 된다.

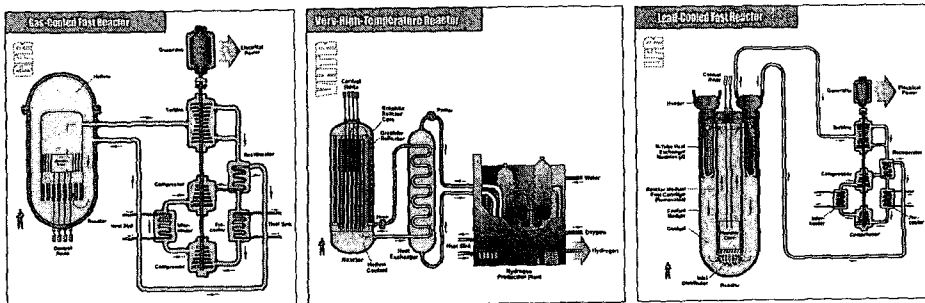


그림1. Concepts of GFR, VHTR and LFR

(2) 초고온가스로 (VHTR : Very-High-Temperature Reactor)

VHTR의 냉각제는 헬륨 기체이고 감속재로는 고품질 흑연을 사용한다. 참조형 원자로 용량은 열출력 600 MW이다. 원자로 출구를 나오는 기체의 온도는 1,000℃ 정도 되는데 증기발생기를 통하여 열을 2차측으로 전달한다. 증기발생기에서 생성된 고온의 수증기는 전력을 발생하거나 수소생산 또는 열병합 발전이 가능하다. 연료 물질로는 우라늄과 플루토늄을 혼용하여 사용할 수 있다. 연료 형태는 현재 일본의 실험로 HTTR에서 사용하는 것과 같은 프리즘 형태와 중국 실험로 HTR-10에서 사용하는 자갈형태(Pebble Bed) 중 하나가 될 것이며 연료 사이클은 개방형이다. VHTR을 수소 생산용으로 사용할 경우 최근 개발된 요드-황산 열화학법에 의한 다량 생산이 가능할 것으로 보인다. 온도가 높아 열효율이 높고, 폐기물 발생량이 적으며 고유 안전성이 매우 크다는 장점이 있다.

(3) 납냉각고속로 (LFR : Lead-Cooled Fast Reactor)

LFR은 납 또는 공융(共融) 납-비스무스를 액체 냉각제로 하는 고속 중성자 원자로이다. 폐쇄 연료 주기를 채택하여 연료 전환 및 폐기물 처리가 가능하다. 사용후 연료를 부지 내의 플랜트에서 재처리 가공하여 순환 사용이 가능하게 함으로써 액티나이드 폐기물을 처리할 수 있다. 3가지 원자로형이 고려되고 있는데 소형은 50-150 MWe의 배터리 형이고 중형은 350 MWe의 모듈형 원자로이고 대형은 1,200 MWe의 발전로이다. 연료는 우라늄과 플루토늄 및 장수명 폐기물을 혼합하여 금속 연료로 만들거나 질소화합물로 만든다. 납 냉각제 온도는 550℃ 정도인데 구조물 재료가 개선되면 800℃도 가능할 것으로 보인다. LFR은 발전로 뿐 아니라 수소생산용으로도 가능하다. LFR의 소형 배터리 원자로는 공장에서 생산한 완제품을 현장에서 조립 건설하는 발전소로서 재장전 기간이 15-20년으로 길고 사용후 현장에서 폐기하든지 원자로 자체를 교체할 수 있다. 전력망 규모가 작은 개발도상국의 시장에 알맞고 또 핵연료 사이클 기술 기반이 없는 나라에 적합한 노형이다.

이상과 같이, 원자로계통에 대하여 각 노형개념별로 설명하였으며, 현재 추진되고 있는 국내의 기술개발과 더불어 전력산업 측면에서는 URD(Utility Requirements Documents) 개발, 외부요인(External Events)에 대비한 안전해석 그리고 개발된 원자로의 전력생산용으로의 활용 등의 기술개발이 필요할 것으로 사료된다.

2-2. 수소생산계통 (Hydrogen Production System)

기존 화석 연료를 이용한, 즉 매질을 분해/합성하는 수소생산 방법은 이미 정유/화학공장과 같은 곳에서 널리 쓰이고 있을 정도로 보편화되어 있다. 이렇듯 생산/소비되는 수소가 현재 연간 5,000만톤을 넘고 있으며, 해마다 10%이상 그 수요가 증가하고 있다. 그러나 이와 같은 수소생산 방법은 필연적으로 이산화 또는 일산화탄소를 생산하게 된다. 이러한 문제점에도 불구하고 수소 자체는 청정연료이므로 이를 이용한 운송수단 등에 대한 연구는 지난 20여년 동안 꾸준히 진행되어 왔으며, 이중 연료전지에 대한 연구는 실용화 단계에 이르게 되었다.

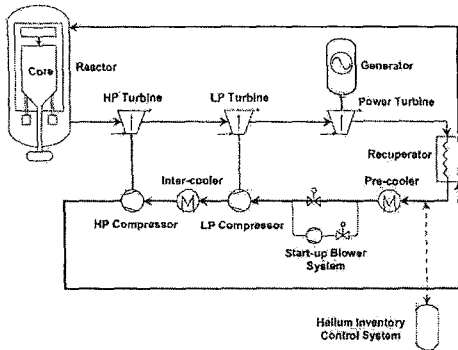
표3. 수소생산공정 비교표

Splitting process	Chemical reactions with enthalpy change [kJ/mol]	Theoretical reduction of CO ₂ emissions [%]	Minimum enthalpy required for the production of hydrogen [kJ/mol]
Methane steam reforming	$CH_4 + 2H_2O = CO_2 + 4H_2 - 165$	20.6	41
Butane steam reforming	$C_4H_{10} + 8H_2O = 4 CO_2 + 13H_2 - 486$	18.3	37
Coal steam reforming	$C + 2H_2O = CO_2 + 2H_2 - 90$	22.8	45
Methane thermal cracking	$CH_4 = C + 2H_2 - 76$	9.5	38
Water electrolysis	$H_2O = H_2 + 1/2O_2 - 242$	CO ₂ free	242
Chloralkali electrolysis	$2NaCl + 2H_2O = 2NaOH + H_2 + Cl_2 - 453$	CO ₂ free	453
Iodine-sulfur process	$2HI = H_2 + I_2 - 10$ $I_2 + SO_2 + 2H_2O = 2HI + H_2SO_4 + 40$ $H_2SO_4 = H_2O + SO_2 + 1/2O_2 - 272$	CO ₂ free	282
Sulfuric acid hybrid process	$H_2SO_4 = H_2O + SO_2 + 1/2O_2 - 272$ $H_2O + SO_2 + H_2O = H_2SO_4 + H_2 + 30$	CO ₂ free	272
Metal-metal hydride hybrid process	$2Li + H_2O = 2LiH + 1/2O_2 - 50$ $2LiH = 2Li + H_2 - 192$	CO ₂ free	242

단기적으로 수소는 심야전력대를 비롯한 여유 전력을 이용한 물의 전기 분해를 통해 생산 함으로 원자력을 비롯한 기저 부하의 활용도를 제고하는데 쓰일 수 있다. 장기적으로는 700-900°C가량의 고온의 출구를 생산하는 원전을 이용하여 보다 효율이 높고 잔열의 효율 성이 좋은 열화학반응을 통해 수소를 생산할 수 있다. 현재 정유/화학 공정에서 필요로 하는 수소생산을 열화학 반응으로 환산한다면 200 GWth 정도가 소요되며 이는 미국내 전 원 전의 용량을 합한 것과 같다. 수소의 석유와 천연가스에 대비해서 환경비용까지 고려한 총 비용이 경쟁력을 가질수록 수소의 소비는 급격히 증가할 것으로 예측되며, 이 때문에 대용 량 생산을 위해 환경영향에서 절대적으로 우위에 있는 원자력을 이용한 수소생산이 필요한 것이다. 미국의 경우 현재 연간 11 MT의 수소를 생산/소비하고 있는데 수송수단의 연료를 모두 천연가스나 석유에서 수소가스로 대체한다면 연간 200 MT의 수소를 생산해야 한다. 11 MT의 수소생산을 위해 사용되는 천연가스 매질 생산 방법(미국내 천연가스 소비의 5% 가 여기에 쓰인다.)이 74 MT의 이산화탄소를 배출하므로, 원자력이 아닌 현재의 방법에 의 한 수소생산은 어마어마한 환경오염을 야기할 수 있다.

2-3. 전력생산계통 (Power Conversion System)

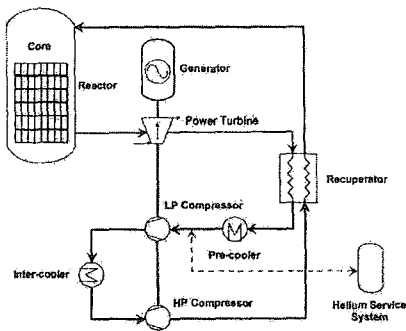
남아프리카공화국에 건설중인 PBMR(Pebble Bed Modular Reactor)은 현재 HTGR(High Temperature Gas Cooled Reactor)을 수소생산에 활용한다는 연구동향과는 달리 전력생산을 주 용도로 하고 있다. 265MWth의 한 모듈은 116.3 MWe를 생산할 수 있을 것으로 전망되 어 약 45.3%의 효율을 가지고 있다. 노심 온도는 536/900°C이고 운전 압력은 7 Mpa 정도이 다. 따라서 열화학 반응에 의한 수소생산시스템으로써의 요건을 갖추고 있다.



Thermal Power	MWth	265
Generator Power	MWe	116.3
Reactor Mass Flow	kg/s	140
Cooling Water Temp.	°C	22
Maximum Pressure	MPa	7.07
Core Outlet Temp.	°C	900
Efficiency	%	45.3
Core Outlet Density	kg/m ³	2.90
Specific Power	kJ/kg	831
Power Density	kg/m ³	2,409

그림2. PBMR 사이클 개략도 및 성능개요

GT-MHR은 Pebble 형태의 고정식 연료가 아닌 6각 블록에 프리즘 형태의 연료를 넣는 노형으로 일본에서 운전중인 HTTR과 같은 설계 개념을 가지고 있으며, GA사를 주축으로 러시아 MINATOM, 프랑스 Framatome, 일본 Fuji Electric 등이 개발하고 있다.



Thermal Power	MWth	595
Generator Power	MWe	278
Reactor Mass Flow	kg/s	318
Cooling Water Temp.	°C	20
Maximum Pressure	MPa	7
Core Outlet Temp.	°C	850
Efficiency	%	47
Core Outlet Density	kg/m ³	3.00
Specific Power	kJ/kg	874
Power Density	kg/m ³	2,622

그림3. GTMHR 사이클 개략도 및 성능개요

터빈 또는 컴프레서 측면에서 보면 PBMR은 2단 내지 3단의 다단형을 사용하고 있고, GT-MHR은 예열기까지 모두 하나의 기기에 들어가는 일체형을 사용하고 있다. PBMR의 경우 최근 다단 다축 중형의 계통을 다단 단축의 횡형 컴프레서로 설계를 변경하였다.

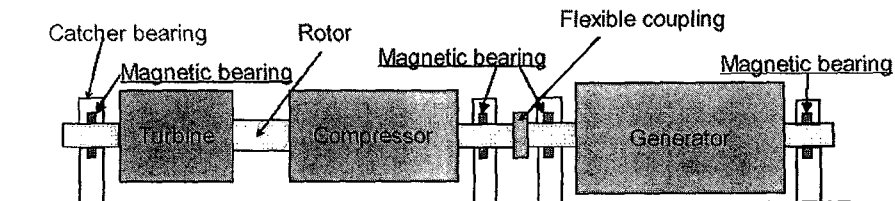


그림 4. 단일축 터빈-컴프레서-발전기 개략도

전력생산계통 개발을 위한 핵심기술로써는 헬륨터빈의 성능 최적화, 헬륨라인의 누기 최

소화, 헬륨 가스 압축기의 공기역학적 성능, 고부하에 견딜 수 있는 마그네틱 베어링, 마그네틱 베어링으로 지지되는 로우터 성능 그리고 밀폐형 사이클 가스터빈계통의 운전성능 및 제어성능 등이 대두되고 있다.

3. 결론

수소에너지는 차세대 에너지원으로써 주목받고 있는 무공해의 무한에너지원이며 선진국에서는 수소에너지에 대한 주도권(Hydrogen Fuel Initiative)을 선점하기 위해 범국가적인 예산투자자와 연구개발을 추진하고 있다. 원자력이용 수소생산시스템을 구성요소별로 원자로계통, 수소생산계통 및 전력생산계통 등으로 구분하여 간략히 설명하였으며 국내외 기술동향 및 요소기술 등에 대한 연구결과를 소개하였다. 원자로계통 및 전력생산계통 등에 대하여 전력산업 측면에서 고려해야 할 대상기술 들을 제시하였다. 향후, 전력산업 인프라 구축을 위하여 개발되고 검증된 기술들을 수소에너지 및 인프라 개발에 활용함으로써 개발기술의 신뢰성 및 경제성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

4. 참고문헌

1. U.S.DOE : "A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems" (2002)
2. GIF : "Generation IV Roadmap ; R&D Scope Report for Gas-Cooled Reactor Systems" (2002)
3. Korea Nuclear Society : "Workshop on High Temperature Gas Cooled Reactor and Hydrogen Production" (2004)
4. Lin-Gen Chen et al. : "Power, power density and efficiency optimization for a closed cycle helium turbine nuclear power plant", Energy Conversion and Management, Vol. 44 (2003)
5. Takakazu Takizuka et al. : "R&D on ther power conversion system for gas turbine high temperature reactors", Nuclear Engineering and Design (2004)