

고온전기분해시스템의 열교환기 후보재료에 대한 고온증기 환경에서의 부식평가 현황

김민우* · 김동훈* · 장창희† · 윤덕주**

Current Status of Hot Steam Corrosion Evaluation of the Candidate Materials for Intermediate Heat Exchangers of HTSE System

Minu Kim*, Dong Hoon Kim*, Changheui Jang† and Duk-Joo Yoon**

ABSTRACT

Nuclear hydrogen production using high temperature heat of a very high temperature reactor(VHTR) is one of the most attractive ways of mass hydrogen production without greenhouse gas emission. In many countries, sulfur-iodine(S-I) thermochemical process and high temperature steam electrolysis(HTSE) process are being investigated. In such processes, corrosion behavior of Intermediate heat exchanger materials are the most critical issues. Especially in a HTSE system, several heat exchangers will be facing hot steam conditions. In this paper, the status of high temperature corrosion researches in hot steam and supercritical water conditions are reviewed in view of the implication to HTSE conditions. Based on the review, test condition and plan of the hot steam corrosion of the candidate materials are formulated and described in some details along with the schematics of the test set-up. The test results and subsequent evaluation will be used in development of a interface system between the HTSE hydrogen production system and the VHTR.

Key Words : Hot Steam Corrosion (고온증기부식), HTSE (고온전기분해), VHTR (초고온가스), Intermediate Heat Exchanger (중간열교환기)

1. 서론

원자력수소생산은 초고온가스로서 나오는 고온의 열로 물을 분해하는 것으로, 앞으로 다가올 수소 경제 시대를 맞아 경제성과 사업성이 높을 것으로 전망되는 수소 생산 기술이다. 원자력수소생산 방안은 여러 가지가 있는데, 그 중에서 황-요오드 열화학 시스템, 고온전기분해 시스템이 국제적으로 중점 연구되고 있는 상태이다. 특히, 고온전기분해 시스템은 황-요오드 열화학 시스템에 비

해 요구온도가 600~1000℃ 범위로 비교적 낮기 때문에 조기에 경제적인 수소생산이 가능하며, 세계적으로도 기술개발 초기단계이므로 조기에 기술개발에 참여하여 관련 지적 재산권 및 원천기술을 확보할 수 있는 기술이다. 초고온가스로서 중간열교환기 부분에서 일어나는 고온전기분해는 최고 900℃, 9MPa의 조건을 가지는 환경에서 이루어지므로, 고온전기분해의 실용화를 위해서는 중간열교환기에 대한 건전성에 대한 연구가 필요하다. 중간열교환기의 후보 재료는 고온부에는 Inconel 617과 Haynes 230, 저온부에는 Cr 함량이 높은 FMS 등이 거론되고 있는데, 위와 같은 초고온가스로서 중간열교환기를 만족하는 조건에서의 연구 현황은 미비한 상태이다. 따라서 초고온 가스로서 중간열교환기 조건에 대한 후보 재료들의 고온증기 부식실험

† 책임저자, 회원, KAIST 원자력 및 양자공학과
E-mail : chjang@kaist.ac.kr
TEL : (042)350-3824 FAX : (042)350-3810

* KAIST 원자력 및 양자공학과

** 한전전력연구원

이 필요한 실정이다. 본 연구에서는 국제적으로 개발 중인 초고온가스를 이용한 수소생산시스템에 사용될 열교환기 재료의 고온주기 부식실험에 대한 실험조건 및 계획을 소개하였다. 실험 및 연구 결과는 초고온가스와 연계된 고온전기분해를 이용한 수소생산시스템의 개발에 활용될 예정이다.

2. 초고온가스로 및 고온전기분해

2.1 초고온가스로(VHTR)

초고온가스로(VHTR, Very High Temperature gas cooled reactor)는 헬륨 등의 기체를 냉각재로 사용하고 흑연을 감속재로 사용하는, 노심의 출구 온도가 최대 1000℃ 정도 되는 차세대 원자로이다. 높은 냉각재 온도로 인해 열효율이 높으며, 이런 고온을 이용하여 수소를 대량으로 생산할 수 있는 장점이 있어서 앞으로 수소 에너지 시대를 맞이함에 따라 수소 생산용 원자로로 각광받고 있다.

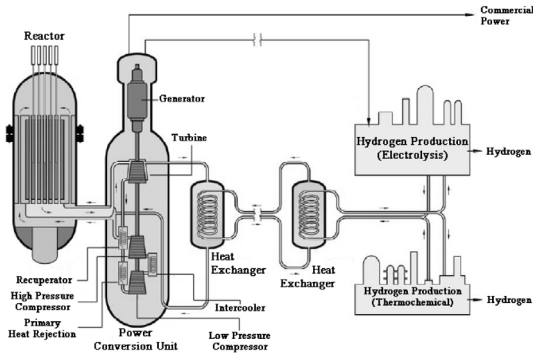


Fig. 1 Schematics of a VHTR connected to hydrogen production system¹⁾

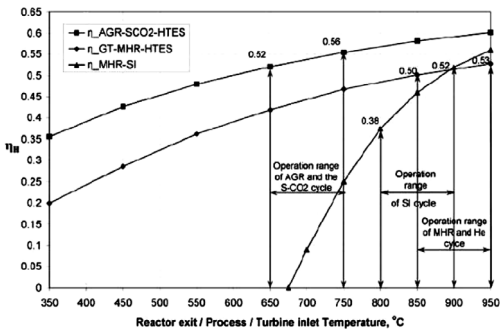


Fig. 2 Hydrogen production efficiency vs. steam temperature (I-S vs. HTSE)²⁾

초고온가스를 이용한 원자력수소생산 시스템은 Fig. 1에서와 같이 크게 원자로, 전력변환장치, 1차/2차 중간열교환기, 수소생산 시스템으로 이루어져 있다.¹⁾ 수소 생산 시스템과 직접적으로 관련 있는 부분은 2차 열교환기 부분으로, 이 부분의 열에너지가 통하여 수소 생산이 이루어진다.

현재 국제적으로 중점적으로 연구되고 있는 수소 생산 시스템은 황-요오드 열화학 시스템과 고온전기분해 시스템이다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이, 900℃ 이상의 온도에서는 황-요오드 열화학 시스템이 수소 생산 효율이 높은 것으로 나타났고, 900℃ 이하의 온도에서는 반대로 고온전기분해 시스템이 효율이 높은 것으로 나타나고 있다.²⁾ 따라서 이 두 시스템은 적용 온도에 따라 상호 보완적으로 적용할 수 있을 것으로 보인다. 본 논문에서는 이 중 고온전기분해에 초점을 두고 있다.

2.2 고온전기분해(HTSE)

초고온가스를 이용한 수소생산 시스템 중의 하나인 고온전기분해 시스템은 고체산화물 전해조(solid oxide electrolysis cell, SOEC)로, 물 분해에 필요한 열의 일부로 전기 대신에 진보된 원자력 반응기 시스템이나 적합한 태양에너지 시스템으로 배출되는 고온의 수증기를 이용하는 시스템이다. 고온전기분해 시스템은 Fig. 3과 같이 저온에서 물을 전기분해 하는 것보다 이른 전해전압을 낮추게 되어 더욱 낮은 전력을 이용하여 수소를 더 효율적으로 생산할 수 있게 한다.³⁾ 또 고온에서의 수소

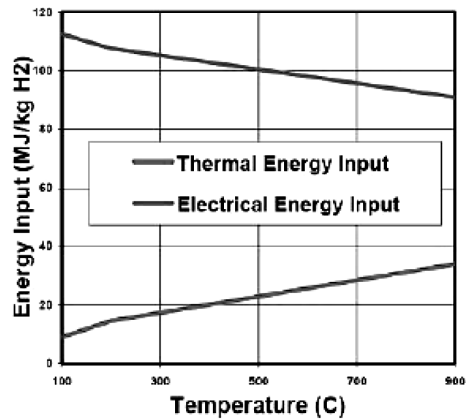


Fig. 3 Thermal and electrical energy inputs vs. steam temperature in a HTSE system³⁾

제조는 물 분해에 필요한 에너지의 1/3을 열에너지로 대체하고 빠른 전극반응을 이용하여 제조 단가를 낮출 수 있는 장점이 있어 중요성이 점차 증대되고 있다.

고온전기분해에 필요한 고온의 열은 VHTR에서 중간열교환기, 증기발생기, 과열기 등을 통해 SOEC 측으로 전달되면서 공급이 된다. 이 중에서 중간열교환기 부분은 높은 온도와 원자로와 수소공정 간의 압력차에도 견딜 수 있어야 하기 때문에 이 부분의 장기적인 건전성을 유지하는 것이 필요하다. 또한 VHTR은 기체를 냉각재로 사용하므로 열교환기의 장치의 부피를 줄일 수 있어야 한다. 이런 조건을 극복할 수 있는 유력한 대안 중의 하나는 인쇄회로형 열교환기(Printed Circuit Heat Exchanger, PCHE) 이다.⁴⁾ 여기에 쓰이는 재료는 고온과 증기 환경에 노출이 되기 때문에 중간열교환기의 후보 재료에 대한 고온증기부식 실험이 필요한 실정이다.

3. 관련 연구 현황

3.1 중간열교환기 후보 재료에 대한 연구 현황

3.1.1 공기중 및 헬륨 조건에서의 고온산화실험

중간열교환기의 후보 재료로 거론되고 있는 Inconel 617, Haynes 230이나 Cr 함량이 높은 FMS 등의 금속은 고온에서 크립 등의 기계적 특성에서 우수한 성질을 보인다. 그렇기 때문에 이들 물질은 초고온가스로서 고온가스덕트의 후보 재료로 거론되기도 한다. 초고온가스로서 개념 자체는 최근에 들어서 생겨난 것이 아니라 오래 전부터 있어왔기 때문에 고온의 공기 중이나 고온가스로서의 냉각재로 쓰이는 헬륨 조건에서의 산화에 대한 연구는 이미 전부터 이루어지고 있는 상태이다. Table 1에는 지

Table 1 Impurities reported in the helium coolant during steady-state operation of HTGRs (in ppm)

Reactor	H ₂ O	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	O ₂	N ₂
DRAGON	0.1	0.1	0.05	0.02	0.1	0.1	0.05
Peach Bottom	0.5	10	0.5	<0.05	1.0	-	0.5
Fort. St. Vrain	1	7	3	1	0.1	-	-
AVR	0.15	9	45	0.25	1		22
THTR	<0.01	0.8	0.4	0.2	0.1		0.1

금까지 운전되었던 고온가스(HTGR)에 사용된 헬륨내의 불순물 양을 나타내었다.⁵⁻⁸⁾

최근에 수행된 연구로는 프랑스의 CEA Saclay 연구단지와 AREVA에서 750~980℃ 상압의 공기 및 불순물이 각각 다르게 함유된 헬륨 환경들에서 니켈기 합금을 대상으로 한 고온산화에 대한 연구가 있다.⁹⁻¹²⁾ 각 후보 재료들의 산화 경향의 비교와 헬륨 중의 불순물 등이 온도에 따른 재료 안정성에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 독일에서는 OWI사에서 950~1000℃ 상압의 공기 환경에서 Al이 함유된 니켈-크롬기 합금을 대상으로 산화의 경향성이 재료의 수명에 미치는 영향에 대하여 분석한 바 있다.¹³⁾ 국내에서는 KAIST에서 900~1100℃ 상압의 공기 및 불순물이 함유된 헬륨 환경에서 Inconel 617 합금을 대상으로 한 고온산화 실험을 실시하였다.¹⁴⁾ 이를 통해 온도에 따른 산화 경향과 더불어 인장 조건이 산화에 미치는 영향을 분석한 바 있다. 하지만 최근 들어서는 고온증기전기분해를 이용한 수소 생산에 관심이 모아지고 있어, 이를 고려한 고온의 스팀 조건에서 이루어지는 연구 결과들이 필요한 시점이다.

3.1.2 고온증기산화실험

다양한 중간열교환기 후보 재료들에 대한 고온에서의 부식실험 및 연구가 수행되고 있다. 미국에서는 전력연구소(EPRI)를 중심으로 초임계수 조건에서 ferritic, austenitic 강이나 니켈기 합금에 대한 부식시험이 수행중이다. 이들 시험은 초임계수 조건에서 수행되지만 실험결과는 고온증기에서의 부식거동을 이해하는데 활용될 수 있을 것으로 생각된다. 또한 그 후속 작업으로 Table 2와 같이 다양한 합금들의 초임계증기 산화실험을 수행하고 있다.¹⁵⁾

미시간대에서는 최대 550℃의 수소가 포함된 증기 상압 조건에서 니켈기 합금에 대한 증기 부식 실험 및 인장시험이 연구된 바 있다.¹⁶⁾ 증기 중에 포함된 수소량에 따른 산화물의 조성비율, 형태들의 변화들에 대한 분석을 통해 내부로의 산소 확산에 의한 산화물의 성장이 입계에서 일어났고 Ni/Ni(OH)₂ 경계면에서 균열이 발생하여, 이러한 요소들이 입계응력부식균열 양상에 영향을 준다는 사실이 밝혀졌다.

일본에서는 동북대에서 560~700℃의 순수한 증

Table 2 Planned steamside oxidation test materials for ultra super-critical power boilers¹⁵⁾

Slot	650°C (1202°F)	800°C (1472°F)	900°C (1652°F)
1	P92 (F)	P92 (F)	P92 (F)
2	230 (A)	230 (A)	230 (A)
3	HR-120 (A)	HR-120 (A)	HR-120 (A)
4	SAVE 25 (A)	SAVE 25 (A)	SAVE 25 (A)
5	Alloy 617 (A)	Alloy 617 (A)	Alloy 617 (A)
6	Super 304H (A)	Super 304H (A)	Super 304H (A)
7	Alloy 740 (A)	Alloy 740 (A)	Alloy 740 (A)
8	HR6W (A)	HR6W (A)	HR6W (A)
9	SAVE 12 (F)	SAVE 12 (F)	SAVE 12 (F)
10	304H (A)	304H (A)	304H (A)
11	T23 (F)	T23 (F)	Nimonic 263 (A)
12	“9Cr” (F)	214 (A)	214 (A)
13	Nimonic 263 (A)	310HCbN (A)	310HCbN (A)
14	800HT (A)	347HFG (A)	RA602CA (A)
15	Coated 1	Coated 1	Coated 1
16	Coated 2	Coated 2	Coated 2
17	Coated 3	Coated 3	Coated 3
18	Coated 4	Coated 4	Coated 4
19	Coated 5	Coated 5	Coated 5
20	Coated 6	Coated 6	Coated 6

기의 1~10MPa 범위의 가압 조건에서 여러 ferritic 강을 대상으로 한 증기산화실험을 실시한 바 있다.¹⁷⁾ 증기부식 온도와 산화 활성화 에너지의 관계에 대한 연구를 수행하였다. 이 연구를 통해 600°C 이상에서의 온도에서 합금 속의 chrome이 산화 방지에 기여하며, 온도와 화학 조성 외에도 증기 압력의 증가가 570~600°C 사이의 온도에서 산화에 부정적인 영향을 준다는 것을 밝혀내었다. 또한, 나고야 대학에서 650°C의 순수한 증기 상압 조건으로 ferritic 강을 대상으로 한 증기산화 실험이 있다.¹⁸⁾ 전-산화(pre-oxidation) 처리가 증기산화 중에 일어나는 수소 용해에 초점을 두었다. 전-산화 처리의 영향은 증기부식을 억제하는 효과를 보였으나, 증기산화 시간이 길어지면서 이러한 억제 성향은 감소하여 나중에는 거의 나타나지 않는 것으로 보고되었다.

프랑스에서도 Ecole des Mines de Douai에서 600~650°C에서 여러 ferritic 강을 대상으로 한 증기산화실험이 수행되었다.¹⁹⁾ 약 12%의 chrome 함량을 가지는 새로운 ferritic 강 몇 종류를 만들어 기존의 강과 증기산화에 대한 저항성을 연구하였

다. 통상적인 산화 저항 경향을 보이는 재료 그룹과 비교적 좋은 산화 저항 경향을 보이는 재료 그룹을 비교하기 위해 성분 분석을 실시하였으나, 산화에 미치는 각 성분의 영향이 복합적으로 작용하기 때문에 그 상관관계를 밝히지는 못한 상태이다.

또한, 합금의 표면을 코팅 처리한 ferritic 강이나 니켈기 합금에 대한 증기산화실험이 일본이나 인도, 스페인에서 수행된 바 있다.²⁰⁻²²⁾ 실험 내용은 코팅 처리된 재료의 산화 경향을 코팅 처리되지 않은 재료의 산화 경향과 비교한 것이며, 코팅 재료는 주로 Al, Aluminide, 또는 NiCrAlY 등 알루미늄이 들어간 물질을 대상으로 하고 있었다.

3.2 중간열교환기 유사 환경에 대한 연구 조사

지금까지 수행되어 보고되었던 중간열교환기 후보 재료에 대한 증기부식 관련 실험은 주로 화력 발전소의 조건을 모사하여 실험이기 때문에, 적용 온도가 초고온가스로의 중간열교환기에 적용할 수 있는 온도보다 낮은 상태이다. 따라서 초고온가스로의 온도 환경에서 수행할 수 있는 실험 조건을 가지는 연구 보고들이 필요한 상태이다. 이렇게 중간열교환기와 유사한 온도 환경에서 이루어지는 연구는 주로 경수로의 클래딩에 사용되는 지르코늄 합금과 그와 유사한 재료를 대상으로 하여 이루어지고 있다.

미국 ANL에서는 1200°C의 상압 조건에서 증기산화 실험을 실시하여 조사 전후의 지르코늄 합금의 산화 과정이 다르게 일어난다는 것을 알았다.²³⁾ 실험 장비 중에서 고온의 환경에 노출되는 hot cell

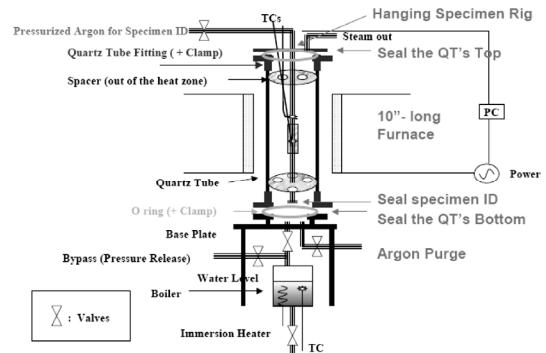


Fig. 4 Schematic illustration of the oxidation resistance test system²³⁾

부분은 Fig. 4와 같이 원형 전기로 안에 퀴즈 튜브를 넣어서 실험 시편이 퀴즈 튜브 안으로 들어가도록 제작되었다.²³⁾ 스팀은 보일러에서 생성되어 hot cell 부분을 거친 뒤, 바로 출구로 빠져나오는 형태로 되어 있다.

일본의 오사카 대학에서는 미국의 Oak Ridge 국립연구소 등과 함께 1300℃의 상압 조건에서 지르코늄을 대상으로 정적인 조건의 증기부식실험과 인장 조건의 증기분사시험을 실시하여 부식과 침식 메커니즘을 예측하였다.²⁴⁾ 위 실험을 수행하기 위한 실험 장비는 정적인 조건의 경우, 튜브 전기로 안에 세라믹을 설치하여 실험 시편을 올려놓을 수 있도록 한 후에 증기가 함유된 공기를 직접 흘려주는 방식으로 되어 있다. 인장 조건의 증기분사 시험의 경우, 인장 기구로 고정된 실험 시편의 중간 부분과 증기 분사 파이프가 겹쳐 지나가는 방식으로, 앞의 정적인 조건과 같이 한 번 흘린 증기는 바로 빠져 나가도록 되어 있다.

프랑스 CEA-Saclay에서는 산화된 지르코늄 합금의 잔류 연성/인성 등 여러 기계적인 특성을 알아보기 위해 1100℃의 상압 조건으로 증기산화 실험을 실시하였다.²⁵⁾ 실험에 사용된 실험 장치도 마찬가지로 튜브 전기로 속에 실험 시편을 넣어 그 속으로 스팀을 흘려주는 형태이다. 이 실험 장치의 특징은, 튜브 전기로를 세로로 세우는 방식을 취함으로써 전기로 밑에 냉각조를 설치하여 실험 후 급냉할 수 있도록 하였다라는 점이다.

스위스의 Paul Scherrer Institute에서 지르코늄 합금의 증기산화가 수소 흡수에 미치는 영향을 알아보기 위하여 1000~1400℃ 범위의 고온에서 실험을 진행한 바 있다.²⁶⁾ 이 연구에 쓰이는 실험 방법도 마찬가지로 전기로 안에 직접 아르곤 가스가 포함된 증기를 시편에 흘려주도록 되어 있다.

또한, 국내 원자력연구원에서도 미국 Westinghouse 등과 함께 500℃의 10MPa 압력을 가지는 증기조건과 25MPa 압력을 가지는 초임계수 조건에서 화학 조성에 따른 산화 경향을 알아보기 위해 지르코늄 합금으로 장기간에 걸쳐 고온 증기부식 실험을 수행한 바 있다.²⁷⁾ 이 조건은 앞선 조건보다는 3.1.2 절의 조건과 유사한 온도 조건을 가지고 있어 autoclave 형태의 반응 용기를 만들어 압력을 올릴 수 있었던 것으로 보인다.

Table 3 Comparison of required condition and previous researches in terms of temperature and pressure

	요구조건 (최대)	유사재료 연구	유사온도 연구
온도	~900℃	~700℃	~1400℃
압력	~9MPa	~10MPa	1 atm

4. 고온증기 부식실험 조건 및 계획

4.1 중간열교환기 환경에서의 실험 필요성

앞서 언급한 바와 같이, 초고온가스로의 중간열교환기에 대한 유사한 연구에 대한 배경과 현황은 어느 정도 진행되고 있는 상태이다. 그러나 초고온가스로의 중간열교환기의 환경 조건은 이보다 더욱 까다로운 조건을 필요로 한다. Table 3에서와 같이, 지금까지의 연구 현황은 주로 화력발전소 조건을 모사하여 실험을 수행하였거나 연료봉 피복관의 환경조건 안에서 실험을 수행하였다. 따라서 실험 조건은 온도 환경에서 필요조건보다 미진하거나 또는 압력 환경에서 필요조건보다 미진한 양상을 보인다.

하지만 앞으로 초고온가스로의 중간열교환기에서의 후보재료의 건전성을 예측하기 위해서는 900℃까지 올라가는 요구 온도와 가압의 환경 조건을 모두 만족하는 까다로운 환경에서의 실험 결과들이 필요하다. 이제까지의 이러한 조건의 연구 결과들의 부족에는 까다로운 환경 조건을 만족할 수 있는 실험 장비 설계의 디자인이 어렵기 때문인 것으로 보인다. 따라서 이런 조건을 모두 만족할 수 있는 실험 장비 설계에 대한 아이디어가 필요한 실정이다.

4.2 고온증기부식 실험 장비 설계

초고온가스로의 열교환기는 증발기 및 과열기 구성될 것으로 예상된다. 따라서 부식특성평가에 쓰일 후보 재료에는 증발기 조건(~500℃ 이하)에서 사용될 FMS 강 및 과열기 조건(~900℃)에서 사용될 니켈기 합금(Inconel 617, Haynes 230) 등이 포함될 예정이다.

실험 조건은 최종적으로는 수소가 포함된 최고 900℃의 고온 수증기 환경에 최대 9MPa의 압력 조건에서 고온증기부식 실험을 수행할 예정이다.

Table 4 Comparison hot steam corrosion experiment set-up type

종류	Simple Type	Complex Type
Test Cell	Tube	Autoclave
Loop System	Open Loop	Closed Loop

하지만 이러한 고온 고압의 조건을 유지할 수 있는 환경 조성을 만든다는 것 자체가 대단히 힘든 일이다. 거기에 수소까지 포함이 될 경우, 실험 환경은 매우 어려운 조건에 노출이 되는 것이다. 실험 조건에서 가장 중요한 부분은 온도이기 때문에, 우선적으로는 최고 900℃ 상압의 고온 수증기 환경을 계획하고 있다. 이와 더불어 실험 시편이 들어가기 때문에 고온증기부식 환경에 마찬가지로 노출되는 hot cell 부분의 안정성을 확보하는 것도 또한 중요하다. 따라서 이 부분에 대한 고온 가압 테스트를 실시하여 고온 가압의 증기 조건에 부합되는 hot cell의 형태 등의 요건을 찾아야 할 것이다. 이어서 고온 가압 조건의 증기부식실험과 더불어 수소를 첨가한 hot cell 부분의 안정성 테스트도 수행할 예정이다.

위 과정이 성공적으로 수행되면, 최종 목표인 수소가 포함된 최고 900℃의 고온 수증기 환경에 9 MPa의 압력 조건에서 고온증기부식 실험이 가능할 것으로 보인다. 이와 같은 실험을 위해 적절한 실험 장치를 설계중이며 본 연구에서는 Table 4와 같이 반응 용기 종류와 순환 시스템 측면을 고려하여 하였다. 각각의 조합에 따라 각기 장점과 단점이 존재하기 때문에, 실험의 목적과 조건에 따라서 선택할 수 있는 반응 용기와 순환 시스템을 달리할 수 있다. 이를 비교할 수 있는 장단점 비교표는 Table 5와 Table 6에 나타나 있다.

최종 실험 목표에 부합하는 실험 장치의 방향은 autoclave 형태의 test cell에 closed loop system이다. 그러나 실험 자체의 안전성과 장비의 보수성을 용이하게 하기 위해서 일단은 tube 형태의 test cell에 open loop system으로부터 실험 장치 구성을 시작하기로 하였다. 실험 최종 목표에 맞는 실험 장치는 나중에 이 부분에서 보수 과정을 통해 이루어질 예정이다.

실험 장비는 Fig. 5와 같이 구성될 예정이다. 증류수를 저장해두는 tank에 용존 산소량을 최소한으로 줄이기 위하여 Ar gas를 불어넣을 수 있도록 하

Table 5 Comparison of advantage and disadvantage for the test cell type

Test Cell	Tube	Autoclave
장점	재료 선정 쉬움	가압 조건 용이 디자인 제한 없음
단점	가압 조건 어려움 디자인의 제한	금속만 사용 가능 (부식 가능성 있음)

Table 6 Comparison of advantage and disadvantage for the loop system type

System	Open Loop	Closed Loop
장점	단순한 구조 조작 용이성	자원 소모 줄임 실제 환경과 유사
단점	자원 소모 심함 실제 환경과 상이	복잡한 구조 변잡한 조작

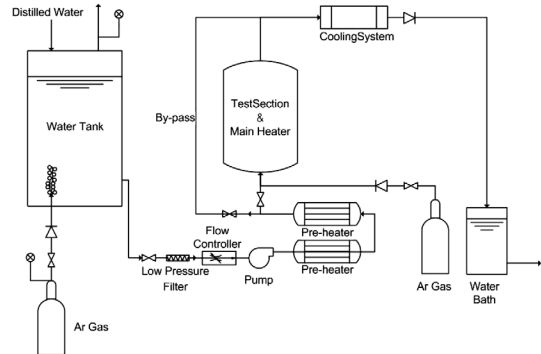


Fig. 5 Schematics of hot steam corrosion experiment facility

였다. 그 후에 low pressure filter를 통해 다른 불순물들을 제거하여 pure steam을 만들기 위한 화학 조성을 만들었다. 유량 조절을 위하여 flow controller가 실험 장비 구성 안에 있고, pump로 압력을 유지할 수 있도록 하였다. 온도는 최고 900℃이기 때문에 main heater에서 한 번에 온도를 올리기는 힘든 상황이다. 따라서 pre-heater를 통해 이 부분에서 온도를 올리고 main heater에서는 그 온도를 유지해 주는 역할을 하게 된다. Pre-heater에서 증기가 실험 온도로 올라오기 전에는 by-pass로 증기를 통과시키고, 그 동안에 test section 및 main heater 부분에 Ar gas를 흘려주어 시편에 반응이 일어나지 않도록 해주었다. 실험이 끝난 증기는 cooling system에서 온도를 낮춰준 후에 water bath를 통해 밖으로 나올 수 있도록 하였다.

4.3 고온증기부식 실험 계획

부식저항성 평가는 기본적으로 무게증감 및 U-bend 시편의 응력부식균열 저항성을 비교하여 수행될 예정이다. 여기에서는 실험 온도나 증기의 flow rate가 부식저항성 평가에 대한 변수가 될 것으로 보인다. 아울러 XPS나 EDS 등을 통한 분석 등으로 상세한 부식기구에 대한 연구를 수행할 예정이다. 시간과 온도에 따른 부식생성물들의 구성과 형태 등의 변화들이 관찰될 수 있을 것이다. 또한 저온부 재료의 경우, 위에서 언급된 부식 경향성과 더불어 시간에 따른 재료 물성의 변화를 small punch test 등을 통하여 분석할 예정이다. 이 연구를 통하여 재료에 따라 시간, 온도와 압력 등의 변수가 고온 증기부식에 미치는 영향에 대해 알 수 있을 것으로 보인다. 이러한 연구 결과로부터 초고온가스와 연계된 고온전기분해를 이용한 수소생산시스템의 개발에 활용될 수 있을 것으로 보인다.

5. 요약

본 논문에서는 국제적으로 개발 중인 초고온가스와 연계하여 대량의 수소를 생산하기 위한 방안의 일환으로 국내에서 개발 중인 고온증기전기분해 시스템에 사용될 열교환기 재료의 고온증기 부식실험에 대해 소개하였다. 이를 위해 관련된 국내의 연구현황을 조사분석한 결과를 요약하여 소개하였으며 마지막으로 현재 수행중인 고온증기부식 연구의 실험조건 및 계획을 제시하였다. 실험 및 연구결과는 초고온가스와 연계된 고온전기분해를 이용한 수소생산시스템의 개발에 활용될 예정이다.

후 기

본 연구는 한국수력원자력(주)의 지원으로 한전 전력연구원이 수행하는 “원자력수소생산시스템을 위한 고온전기분해 전해조 기술개발 및 고온증기 부식 실험” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Herring, J. S., O'Brien, J. E., Stoots, C. M., Lessing, P. A., Anderson, R. P., Hartvigsen, J. and Elangovan, S., 2004, "Hydrogen Production from Nuclear Energy via High-Temperature Electrolysis," ICAPP 04, Pittsburgh, PA, USA
- Yildiz, B., Kazimi, M. S., 2003, "Nuclear Energy Options for Hydrogen and Hydrogen-Based Liquid Fuel Production," MIT Report: MITNES-TR-001
- Herring, J. S., et. al., 2005, "High-Temperature Electrolysis for Hydrogen Production Using Nuclear Energy," Global 2005, Tsukuba, Japan, Paper 501
- Luo, L., Fan, Y. and Tondeur, D., 2007, "Heat Exchanger: from Micro to Multi-Scale Design Optimization," *Inter. J. of Energy Research*, Vol. 31, pp. 1266-1274
- Burnette, R.D. and Baldwin, N. L., 1980, "Primary Coolant Chemistry of the Peach Bottom and Fort St. Vrain High Temperature Gas-cooled Reactors," Specialists Meeting on Coolant Chemistry, Plate-out and Decontamination in Gas Cooled Reactors, Juelich, Germany, IAEA, Vienna, IWGGCR-2, pp. 132~137
- Simon, R. A. and Capp, P. D., 2002, "Operating Experience with the Dragon High Temperature Reactor Experiment", Proceedings on High Temperature Reactors, Petten, Netherlands, IAEA, Vienna, HTR-2002. pp.1~6
- Nieder, R. and Stroter, W., 1988, "Long-term Behavior of Impurities in an HTR Primary Circuit", *VGB Kraftwerstechnik*, Vol. 68, pp. 671~676
- Nieder, R., 1980, "Prediction on an HTR Coolant Composition After Operational Experience with Experimental Reactors", Specialists Meeting on Coolant Chemistry, Plate-out and Decontamination in Gas Cooled Reactors, Juelich, FRG, IAEA, Vienna, IWGGCR-2, pp. 144~152
- J. Chapovaloff, D. Kaczorowski and G. Girardin., 2008, "Parameters Governing The Reduction of Oxide Layers On Inconel 617 in Impure VHTR He Atmosphere," *Materials and Corrosion*, Vol. 59, No. 7, pp. 584~590
- Cabet, A. Terlain, P. Lett, L. Guetaz and J.-M. Gentzittel, 2006, "High Temperature Corrosion of Structural Materials under Gas-Cooled Reactor Helium," *Materials and Corrosion*, Vol. 57, No. 2, pp. 147~153
- F. Rouillard, C. Cabet, K. Wolski and M. Pijolat,

- 2007, "Oxide-Layer Formation and Stability on a Nickel-Alloy in Impure Helium at High Temperature," *Oxidation of Metals*, Vol. 68, No. 3-4, pp. 133~148
12. Cabet, C., Chapovaloff, J., Rouillard, F., Girardin, G., Kaczorowski, D., Wolski, K. and Pijolat M., 2008, "High Temperature Reactivity of Two Chromium-Containing Alloys in Impure Helium," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 375, No. 2, pp. 173~184
 13. Ackermann, H., Teneva-Kosseva, G., Kohne, H., Lucka, K., Richter, S. and Mayer, J., 2008, "Oxide Scale Formation on Al Containing Ni-Cr-Based High Temperature Alloys during Application as Flame Tube Material in Recirculation Oil Burners," *Materials and Corrosion*, Vol. 59, No. 5, pp. 380~388
 14. Jang, C., Lee, D. and Kim, D., 2008, "Oxidation Behaviour of an Alloy 617 in Very High-Temperature Air and Helium Environments," *Inter. J. of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 85, No. 6, pp. 368~377
 15. Sarver, J. M. and Tanzosh, J. M., 2003, "Steam Oxidation Testing of Candidate Ultrasupercritical Boiler Materials," Presented to 28th International Technical Conference on Coal Utilization and Fuel Systems, Clearwater, Florida, USA
 16. Capell, B. M. and Was, G. S., 2007, "Selective Internal Oxidation as a Mechanism for Intergranular Stress Corrosion Cracking of Ni-Cr-Fe Alloys," *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 38, No. 6, pp. 1244~1259
 17. Yi, Y. S. et al., 2001, "Oxidation Rate of Advanced Heat-Resistant Steels for Ultra-Supercritical Boilers in Pressurized Superheated Steam," *Trans. of the ASME, J. of Pressure Vessel Technology*, Vol. 123, pp. 391~397
 18. Nakai, M., Nagai, K., Murata, Y. and Morinaga, M., 2006, "Improvement in Steam Oxidation Resistance of Fe-10%Cr-0.08%C Steel by Suppressing Hydrogen Dissolution," *Corrosion Science*, Vol. 48, No. 1, 3869
 19. Lepingle, V., Louisa, G., Allué, D., Lefebvre, B. and Vandenberghe, B., 2008, "Steam Oxidation Resistance of New 12%Cr Steels: Comparison with Some Other Ferritic Steels," *Corrosion Science*, Vol. 50, No. 4, pp. 1011~1019
 20. Sundararajan, t., Kuroda, S., Itagaki, t. and Abe, F., 2003, "Effect of Thermal Sprayed AL on the Steam Oxidation Resistance of 9Cr-1Mo Steel," Proceeding of International Thermal Spray Conference 2003, Orlando, USA, pp. 503-508
 21. Leal, J., Alcalá, G., Bolivar, F. J., Sánchez, L., Hierro, M. P. and Pérez, F. J., 2008, "Simulation and Experimental Approach to CVD-FBR Aluminide Coatings on Ferritic Steels under Steam Oxidation," *Corrosion Science*, Vol. 50, No. 7, pp. 1833~1840
 22. Singh, H., Puri, D., Prakash, S. and Srinivasm, M., 2006, "Characterisation of High Temperature Oxide Scales for Plasma Sprayed NiCrAlY Coated Ni- and Fe-based Superalloys," *Anit-Corrosion Methods and Materials*, Vol. 53, No. 5, pp. 283-295
 23. Yan, Y., Strain, R. V., Bray, T. S. and Billone, M. C., 2002, "High Temperature Oxidation of Irradiated Limerick BWR Cladding," 29th Annual Nuclear Safety Research Conference, Washington, DC, USA
 24. Ueno, S., Ohji, T. and Lin, H. T., 2007, "Corrosion and Recession Behavior of Zircon in Water Vapor Environment at High Temperature," *Corrosion Science*, Vol. 49, No. 3, pp. 1162-1171
 25. Brachet, J. C., Pelchat, J., Hamon, D., Maury, R., Jacques, P., and Mardon, J.-P., 2001, "Mechanical Behavior at Room Temperature and Metallurgical Study of Low-Tin Zy-4 and M5TM (Zr-NbO) Alloys after Oxidation at 1100°C and Quenching," Proceeding on Fuel behavior and LOCA conditions organized by IAEA, IAEA-TECDOC-1320
 26. Grosse, M., Steinbrueck, M., Lehmann, E. and Vontobel, P., 2008, "Kinetics of Hydrogen Absorption and Release in Zirconium Alloys During Steam Oxidation," *Oxidation of Metals*, Vol. 70, No. 3, pp. 149~162.
 27. Jeong, Y. H., et al., 2005, "Corrosion of Zirconium-Based Fuel Cladding Alloys in Supercritical Water," 12th International Conference on Degradation of Materials in Nuclear Power Systems - Water Reactors, TMS, Salt Lake City, UT