

VHTR 초고온기기 설계특성 분석

김용완[†]·김응선^{*}

Design Characteristics Analysis for Very High Temperature Reactor Components

Kim Yong Wan[†] and Eung Seon Kim^{*}

(Received 31 May 2016, Revised 17 June 2016, Accepted 20 June 2016)

ABSTRACT

The operating temperature of VHTR components is much higher than that of conventional PWR due to high core outlet temperature of VHTR. Material requirements and technical issues of VHTR reactor components which are mainly dominated by high temperature service condition were discussed. The codification effort for high temperature material and design methodology are explained. The design class for VHTR components are classified as class A or B according to the recent ASME high temperature reactor design code. A separation of thermal boundary and pressure boundary is used for VHTR components as an elevated design solution. Key design characteristics for reactor pressure vessel, control rod, reactor internals, graphite reflector, circulator and intermediate heat exchanger were analysed. Thermo-mechanical analysis of the process heat exchanger, which was manufactured for test, is presented as an analysis example.

Key Words : Very high temperature reactor (초고온가스로), Reactor pressure vessel (원자로용기), Graphite (흑연), Intermediate heat exchanger(중간열교환기), Control rod (제어봉), Circulator (순환기), Helium coolant (헬륨냉각재), Process heat exchanger(공정열교환기)

1. 서 론

초고온가스로는 냉각재가 헬륨이며 900°C 이상까지 운전하는 제4세대 원자로 중 하나이며,^(1,2) 원자력 에너지로 안전하게 고열을 생산하여 공급할 수 있는 것이 특징이다. 연료의 형태에 따라 크게 블록형(block)과 펄블형(pebble)으로 구분된다. 블록형은 흑연블록에 연필심형태의 핵연료를 삽입한 것이며 펄블형은 핵연료입자를 흑연에 산포시켜 구형으로 제조한 것이다. 피복입자는 약 0.5mm 내외의 산화우라늄알갱이를 흑연과 탄화규소로 세 차례 피복하여

1mm 내외의 구형으로 만든 것이다. 피복입자는 1800°C 이상까지 건전성이 유지되어 방사성물질의 누설을 방지한다. 초고온가스로는 원자로냉각재가 모두 빠져나가는 사고 시에도 원자로표면을 통한 복사과 자연대류로 원자로의 안전성을 유지할 수 있는 특징을 가지고 있다.⁽³⁾

초고온가스로는 상대적으로 기존 원자로에 비해 시스템이 단순하여 사용되는 기기의 개수가 적다. 블록형과 펄블형은 핵연료교환장치와 노내지지구조물을 제외하고는 기기 관점에서 차이는 거의 없다. 초고온가스 설계관점에서 검토되어야 할 사항은 초고온기기의 설계등급분류방식과 이에 따른 설계절차, 그리고 온도조건이다. 초고온가스로의 주요 기기는 Fig. 1에서 보는 것과 같이 원자로압력용기,

[†] 회원, 한국원자력연구원

ywkim@kaeri.re.kr

TEL: (042)868-8981 FAX: (042)868-8767

^{*} 한국원자력연구원

원자로내부구조물 및 흑연구조물, 크로스용기 및 고온가스덕트, 증간열교환기 혹은 증기발생기, 헬륨순환기, 격리밸브, 제어봉구동장치, 정지냉각계통 등이 있다. 정지냉각계통은 열교환기와 순환기, 그리고 격리밸브로 구성되어 있다. 초고온가스로의 용도가 수소생산일 경우, 수소생산에 필요한 황산가스분해기가 중요한 초고온기기이며,⁽⁴⁾ 전력생산이나 공정열을 이용할 경우 증기발생기가 주요기기로 포함된다. 통상 수소생산의 경우 이차계통의 격리밸브까지 원자력등급으로 설계하고 그 이후는 일반 기계기준과 화공기준에 따라 설계한다.

초고온가스로 기기의 운전조건, 적용 소재 및 기술기준 현황에 대해 분석하였고, 초고온가스로의 주요 기기에 대해 설계특성을 분석하였다. 주요기기에 대한 코드 적용을 검토하고 설계이슈와 현안에 대해 논하였다. 초고온가스로의 기술현안중 하나인 초고온 공정열교환기의 시험용에 대해서는 응력해석을 수행하여 결과를 제시하였다. 초고온가스로 계통의 공정열교환기는 초고온가스로의 열을 수소생산계통

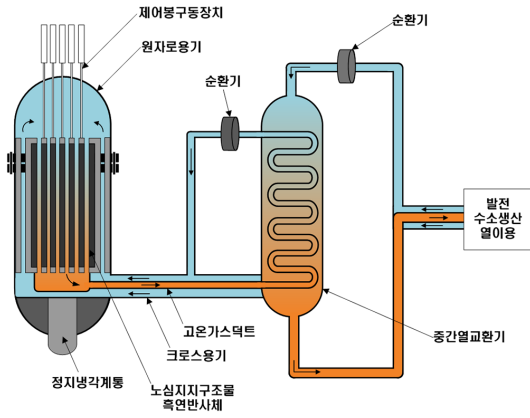


Fig. 1 Major components for VHTR

에서 직접 이용하는 황산가스분해기(Sulfuric acid gas decomposer)를 칭한다.

2. 초고온기기 기술기준 및 적용 소재

2.1 초고온 기기 기술기준

ASME의 Sec.III에서는 경수로를 중심으로 기기의 설계기준을 규정하고 있다. 물론, 노형이나 냉각재의 종류에 상관없이 고온설계에 적용할 수 있는 코드케이스(codecase) N47을 제정하여 고온 1등급 기기 설계에 사용해 왔다. 코드케이스는 1995년에 정식으로 ASME Section III, Subsection NH로 발간되어 액체금속로 ?????와 고온가스로 등 기존의 경수로 온도범위를 벗어나는 고온구조설계에 사용하였다. 그러나 2, 3등급 기기에 대해서는 여전히 코드케이스 형태로 존재하였으며 고온가스로의 반사체와 노심지지구조물로 사용되는 흑연 구조물의 설계방법에 대해서는 코드케이스도 없었다.

ASME는 고온가스로와 액체금속로에 대한 실무위원회(Working Group)을 운용하여 2011년에 ASME Section III, Division 5, High Temperature Reactor를 발간하여 고온로의 설계에 활용할 수 있도록 규정을 제정하였고 현재 2015년판까지 지속적으로 개정되고 있다.⁽⁵⁾ 고온로는 기존의 1, 2, 3으로 구분되는 설계등급을 Table 1에서 보는 것과 같이 A등급(Class A Safety Related), B등급(Class B Nonsafety Related)으로 구분하여 규정하고 있으나 현재 저온부위의 설계등급인 1, 2, 3 CS등과 논리적 일치를 위해 추후 보완을 추진 중이다. 흑연이나, 노심지지구조물 모두 Class A로 분류되고 있으며 Class A기기의 저온설계는 Class 1을 따르도록 규정되어 있다. 이 경우 금속 노심지지구조물과 흑연노심지지구조물의 저온 및

Table 1. Design code and class for VHTR components

경수로		고온가스로(HTGR)		
설계등급	적용기술기준	2011 이전	설계등급	적용기술기준
Class 1	NB	NH	Class A	HB
Class 2	NC	Case N253-9 Case N254	Class B	HC
Class 3	ND	Case N257	N/A	N/A
Class MC	NE	N/A	N/A	N/A
지지구조물	NF		Class A, B	HF
Class CS	NG	Case N201-4 Draft CE(흑연)	Class A	HG(금속) HF(흑연)

고온규정 적용에 ASME 설계등급분류의 기본철학과 논리를 일관적으로 적용하는데 문제가 있다. ASME에서 동일한 설계등급으로 분류된 기기는 동일한 section을 적용하여 설계하므로 고온부위에서 HG, HF로 설계되는 금속노심지구조물과 흑연은 다른 설계등급으로 분류하는 것이 타당하다.

2.2 초고온소재

초고온가스로의 가장 큰 기술적 한계 중의 하나는 초고온소재로 간주 되었다. 기본적으로 노심의 출구 온도가 950℃까지 올라가므로 일차 측과 접하는 소재의 온도가 950℃에서 구조적 건전성과 강도를 유지할 수 있는 소재로 설계되어야 한다. Gen-IV 국제 공동연구에서는 초고온 재료실험결과를 데이터베이스화하여 참여국이 공동 활용하고 있다. 특히, 기술 기준에 준해 설계하기 위해서는 소재의 특성이 ASME에 등재되어 있어야하나 Table 2에서 보는 것과 같이 현재 원자력설계에서 가장 고온 소재로 등재된 것은 Alloy 800H이다.

초고온가스로서 가장 문제가 되는 초고온재료는 950℃이상에서 사용이 가능한 중간열교환기 소재이다. 현재 금속 소재로는 가장 유력한 후보소재는 Alloy 617이다. Alloy 617은 ASME의 일반기계기술 기준인 Section VIII에 982℃, 10만 운전시간(약 12년)까지 사용할 수 있는 규정이 있다. 이를 기초로 원자력 기기설계인 Section III에 등재하기 위해 ASME에서는 Alloy 617 Task Group을 운용 중이며 2017년판 ASME에 코드케이스로 등재될 예정이다. 이와 병행하여 탄화규소 소재를 사용한 인쇄형 열교환기가 논의 되고 있다. 그러나 탄화규소 열교환기는 접합, 제조, 코드 등 여러 가지 기술적문제가 산재하여 실용화에는 상당한 시간이 필요하다.

원자로 압력용기 소재는 기존 경수로 소재인 SA508, Mod 9Cr-1Mo강, 2·1/4크롬강을 후보소재로 선정하였다. 원자로소재의 선정은 관련 설계의 기술성 및 안전성 뿐 만 아니라 소재의 수급성, 제조성,

그리고 경제성 측면까지 고려되어야 한다. 2·1/4크롬강 및 9Cr-1Mo 강 경우, 고온강도에 장점이 있으나 경제성이 나쁘고 제작기술의 완성도 측면에서 불확실성이 높다. 또한, ASME Section III Division 5에 물성치가 미비한 부분이 많으므로 향후 연구와 보완이 필요하다.

제어봉의 핵심 고온재료는 Alloy 800H로 설계 제작되고 있다. 향후 1000℃ 이상에 사용하기 위해서는 탄소/탄소 복합재료를 적용하기 위한 연구가 진행 중이며 ASME에서 기술기준을 개발하기 위한 실무위원회가 운용 중이다. 고온가스덕트는 외부 압력용기인 크로스베슬 압력을 유지하고 고온관(hot leg)과 저온관(cold leg)의 열차폐와 기밀을 유지하는 기능이 있는 소재를 사용하며 Alloy 800H, 흑연 그리고 단열재를 적용한다. 고온가스덕트 외부 압력경계인 크로스베슬(cross vessel)의 소재는 원자로압력용기, 중간열교환기와 동일한 소재를 사용하여 설계를 적용하여 용접, 제작, 설계측면에서 단순화한다. 일차측 순환기, 정지냉각계통의 열교환기와 순환기는 경제성측면에서 문제가 없으면 일차계통 냉각계통의 소재와 동일한 것을 적용한다.

초고온가스로서 반사체와 노심지구조물로 사용되는 흑연은 2011년에 ASME Section III Division 5 HG에서 확률론을 기초로 한 설계기술기준을 제정하여 등재하였다. 1990년대에 제안된 흑연 설계 코드 케이스 예비안은 결정론적 방법을 적용하였으나 2011년에 정식 코드를 제정할 때는 취성이 크고 강도의 물성의 산포도가 큰 것을 반영하여 확률론적인 설계방법을 택하였다.

3. VHTR 기기 초고온설계 분석

3.1 초고온가스로서 기기 운전조건

초고온가스로서를 구성하는 주요기기의 기본적인 설계요건에서는 정상운전 및 사고 시의 온도, 압력, 작동유체, 설계수명, 조사특성이 중요한 변수가 된다.

Table 2. Very high temperature materials registered in ASME

재료	ASME Sec.III (NB)	ASME Sec.III (NB)	ASME Sec.III (Div.5)	ASME Sec.VIII
Alloy 800H	427℃	427℃	760℃	899℃
Alloy X(R)	427℃	427℃	-	899℃
Alloy 617	-	-	-	982℃
Alloy 230	-	-	-	982℃

Table 3 Operation conditions of VHTR major components

초고온기기	정상온도, °C	사고온도, °C	압력, MPa	유체	조사, n/mm ²
원자로 용기	371	538	7-9	헬륨	1×10 ¹⁹
연료체	600 -1250	1600	<1	헬륨	2.7×10 ²¹
교체형 반사체	1100	1600	<1	헬륨	2.7×10 ²¹
영구반사체	600 -1100	1200	<1	헬륨	2.0×10 ²⁰
노심지지흑연	1000	1000	<1	헬륨	5.0×10 ¹⁸
노심지지배럴	600	700	<1	헬륨	1×10 ¹⁹
제어봉	1100	1600	<1	헬륨	4.3×10 ²¹
고온가스덕트	600	660	<1	헬륨	2.0×10 ¹⁷
고온가스덕트 단열재	600 -950	1000	-	헬륨	2.0×10 ¹⁷
중간열교환기압력용기	371	538	5-9	헬륨	N/A
유효전열구조	950	980	2-4	헬륨	N/A
순환기	400	-	7-9	헬륨	N/A
정지냉각열교환기	800 -950	-	5-9	헬륨/공기	2.0×10 ¹⁷
정지냉각순환기	350	-	7-9	헬륨	2.0×10 ¹⁷
정지냉각밸브	800 -950	-	7-9	헬륨	2.0×10 ¹⁷
공정열 교환기	850	-	5	헬륨 SO ₃	N/A

초고온가스로의 설계개념과 설정된 변수를 바탕으로 원자로, 내부구조물, 중간열교환기, 순환기, 그리고 정지냉각계통의 주요 기기에 대해 운전조건을 분석하여 Table 3에 제시하였다.

3.2 원자로용기

노심출구온도에 근접하는 초고온환경에서 수명 60년 이상 견디면서 초고온가스로의 일차측 압력경계를 유지하는 것은 매우 어렵다. 초고온가스로 설계에서는 이 문제를 해결하기 위한 방안으로 압력경계와 온도경계를 분리하였다. 특정 노심지지구조물의 온도는 950°C 이상 올라가지만 원자로용기는 설계온도를 낮게 설계하여 압력하중을 지탱하도록 하는 개념이다. 냉각재 저온부위유로를 원자로압력용기 주변으로 배치설계하고 압력용기 냉각기능을 설계에 반영함으로써 기존의 경수로 압력용기 소재인 SA508을 그대로 사용하는 것이다. 다만, Table 4에서 보는 것과 같이 사고 시에 371°C~427°C는 3000시간, 427°C~538°C는 1000시간만 허용하도록 ASME

Table 4. Comparison for reactor vessel candidate material

항목	SA508/533	Mod.9Cr-1Mo
경험	경수로 압력용기 경험	배관 및 얇은 기기 부분적 사용
ASME 코드	Sec. III NB Codecase N499 Sec. III Div. 5	Sec. III Div.5
R&D	He불순물 영향	He불순물 영향 제작성
온도	정상운전 371°C 371°C~427°C(3000hr.) 427°C~538°C(1000hr.)	649°C

Section III Division 5에서 규정하고 있다. 원자로 압력용기는 ASME Section III Division 5에서 Class A로 설계되며 371°C이하 저온 부위는 기존 경수로의 Class 1기준인 NB로 설계한다.

3.3 제어봉 및 구동장치

제어봉구동장치(control rod drive mechanism)는 초고온가스로의 중성자제어집합체(neutron control

assembly) 상부에 설치된다. 전동기와 감속기로는 직류모터와 감속비를 갖는 드라이버가 사용되며 연결된 드럼에 감긴 케이블을 이용해 제어봉을 상하로 이송한다. 하중계로 케이블에 걸리는 하중을 상시 감시하여 케이블의 손상여부를 판단한다. 제어봉 급속삽입 시 제어봉 낙하속도를 제한하여 낙하충격으로 인한 제어봉의 파손을 방지하는 충격방지장치 설계에 반영된다. 제어봉구동장치의 설계수명은 60년이나 이는 전동기 권선과 절연재의 온도와 환경에서의 수명에 따라 결정하며 교체 할 수 있는 개념을 설계에 반영한다. 설계에서 기술적인 어려움은 제어봉의 구조제에 있다. 제어봉의 표면 구조제는 일반적으로 Alloy 800H로 제작한다. 950°C까지 운전한 일본의 HTTR의 경우 제어봉 설계온도는 900°C로서 설계온도 이상의 환경에 노출된 제어봉은 교체한다. 원자로내부의 핵연료영역의 최대온도는 1100°C이므로 제어봉의 건전성을 위하여 제어봉 긴급삽입은 두 단계로 나누어 수행한다. 즉 상대적으로 온도가 낮은 노심주변의 핵연료사체영역에 위치한 제어봉을 먼저 삽입하고 노심의 온도가 750°C 이하로 낮아진 후 노심영역에 있는 제어봉을 삽입하여 반응도를 제거한다⁶⁾. 즉, 고온의 문제를 운전 방식에서 해결한 방안으로서 근본적으로 소재와 기기의 설계를 통한 기술적 해결이 요구된다. 최근 핵연이나 탄화규소 복합재료를 이용한 제어봉과 제어봉 안내관을 개발하고 있으며 ASME에서 기술기준도 개발 중이다. 초고온가스로서는 물리적으로 독립된 노심정지계통으로 RSS(Reserved Shutdown System)을 설계에 반영한다. RSS는 비상시 호퍼에 충전되어 있는 중성자 흡수체로 만든 다량의 작은 구슬을 노심에 있는 안내관으로 쏟아 부어 노심을 정지시키는 개념으로 설계되었다. 호퍼 안내관이 고온의 노심에 위치하므로 핵연 혹은 고온 소재를 사용하나 압력경계가 아니므로 압력하중은 없다. 이러한 노심 반응도 조절장치는 방사선 및 고온의 헬륨가스 환경에서 액체유회제 없이 긴 수명과 높은 신뢰도의 작동성을 확보해야 하는 장치이다. 이를 위한 주요 요소기술로는 고체유회 기술, 방사선 및 고온 환경에서 작동하는 모터설계 및 제어기술, 주요 작동부의 고온재료기술, 헬륨가스 밀봉기술, 긴급삽입 후 충격흡수장치기술이 있다. 핵심기술은 노심의 초고온에 견디는 소재와 이를 고려한 설계해법이다.

3.4 중간열교환기

중간열교환기는 950°C 고온에서 약 70기압 압력의 원자로계통으로부터 약 40기압 압력의 중간루프로 열에너지를 전달하는 기기이다. 중간열교환기는 나선형 튜브열교환기, 판-편형, 그리고 판형열교환기의 변형인 인쇄형열교환기 (Printed Circuit Heat Exchanger) 등이 주요 후보로 검토되고 있다. 나선형 튜브 형태의 열교환기의 경우 초고온 및 높은 차압을 만족시키려면, 크기가 너무 커져 경제성 및 제작에 어려움이 있다. 그러나 원자로 정비 시 유지 및 보수가 용이한 장점이 있다. 반면 치밀한 구조인 인쇄형 열교환기는 작은 공간에 설치가 가능하고 높은 차압을 견딜 수 있으나, 유지 보수가 현실적으로 매우 어렵고 반경 0.5~1.5mm 내외의 좁은 유로는 분진 및 불순물에 의해 유로가 좁아져서 압력강하가 증대될 수 있는 단점이 있다.

초고온에서 작동되는 중간열교환기도 압력경계와 온도경계를 분리하는 개념으로 설계한다. 중간열교환기가 전열판이거나 판형이거나 상관없이 유효전열지역은 일차측 차압에 설계 여유도를 반영한 압력으로 설계하고 전체 압력은 저온의 압력용기가 견디도록 설계한다. 유효전열지역은 설계온도와 설계압력은 950°C 이상, 일차측 차압 30기압 이상으로 설계한다. 유효전열지역과 압력용기 사이에 압력하중은 지탱하지 않고 단순 열차폐기능을 하는 Alloy 800H 소재로 설계된 열차폐구조물을 두고 외부는 SA508 압력용기로 저온 설계를 하는 개념이다. 향후 가장 큰 기술현안은 유효전열지역에 사용될 초고온 재료의 등재 및 나아가서 성능과 수명을 입증하는 것이다. 중간열교환기는 ASME Division 5의 Class A로 설계한다. Alloy 617소재는 고온크리프 특성이 기존에 등재된 소재와 달라서 크리프설계절차를 새로이 개발하는 것이 필요하다. ASME에서는 Alloy 617 코드케이스를 개발하면서 탄성완전소성개념을 이용한 크리프설계절차가 제정중이다.

3.5 공정열교환기

공정열교환기는 황-요오드 열화학 공정으로 수소를 생산하는 경우, 삼산화황 가스를 이산화황과 산소로 분해시키기 위해 중간열교환 계통의 열에너지를 황산분해공정에 공급하는 열교환기이다. 따라서 이 열교환기는 운전온도가 850-920°C의 초고온 및

20-40bar의 차압을 견디고, 부식성이 큰 황산가스에 대한 내식성이 요구된다. 삼산화황 분해를 위한 공정열교환기는 원자력수소생산의 핵심기술로서 여러 국가에서 각각 독자적인 기술로 기술경쟁을 하고 있다. 일반적으로 공정열교환기의 재료가 금속일 경우 세라믹 코팅이 필수적이거나 고온 조건에서 코팅면이 손상되는 치명적인 문제점을 가지고 있다. 재료가 세라믹일 경우에는 제작성이 좋지 않고, 열팽창에 취약한 문제점을 가지고 있다. Fig. 2에서 보는 것과 같이 내식성금속재의 황산가스 접촉 표면을 개질한 공정열교환기를 개발하여 시험 중에 있다.

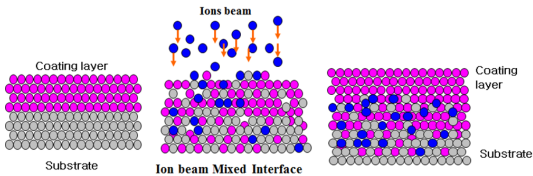


Fig. 2 Ion beam mixing to enhance corrosion resistance of heat exchanger⁽⁷⁾

일반적인 세라믹 코팅의 경우 고온 조건에서 코팅층과 금속 모재의 열팽창계수 차이에 의해 코팅층이 손상되는 문제점이 있다. 고온 조건에서 코팅층과 금속 모재 사이의 열응력 감소를 위해 금속 모재 표면에 탄화규소를 전자빔으로 코팅하고, 계면을 이온빔으로 조사시켜 금속 모재의 분자와 코팅층의 분자를 혼합시킨 후 재차 탄화규소를 전자빔으로 코팅하는 표면 개질 방법을 개발하여 특허를 등록하였다.⁽⁷⁾

3.6 시험용 공정열교환기 열응력해석

앞 절 3.5에서 제시된 개념을 시험하기 위해서 제작한 시험용 공정열교환기에 대해 응력해석을 수행하였다. 전체 열교환기는 크로스형태의 유로를 가지며 일차유로와 이차유로가 교대로 적층된 형태이다. 하나의 적층판은 각각 30개의 유로로 구성되어 있다. 열교환기의 열적치수산정을 수행한 유체온도⁽⁸⁾를 사용하여 구조물의 온도를 계산하였다. 공정열교환기의 온도해석을 위하여 일차측과 이차측은 각각의 유로를 400개로 분리하고 그 사이는 보간하여 구한 온도를 입력하였다. 다만, 유로를 제외한 부분에 대해서는 단열이 되어 있는 것으로 간주하여 해석 하였다. 온도해석을 하기 위해서는 유체의 온도와 표면에서의 열전달계수가 필요하며, 공정열교환기 열설계로부터 도출한 실제 각 유로에서 유체의 온도입력은 Fig.3 및 4와 같다.

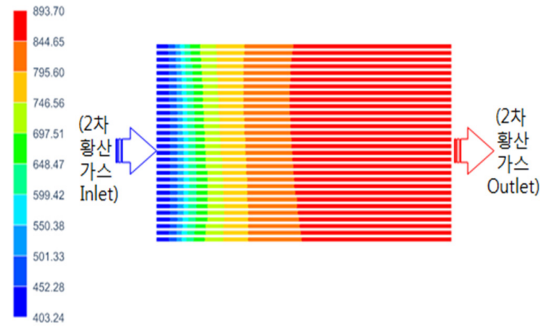


Fig. 3 Helium coolant temperature profile

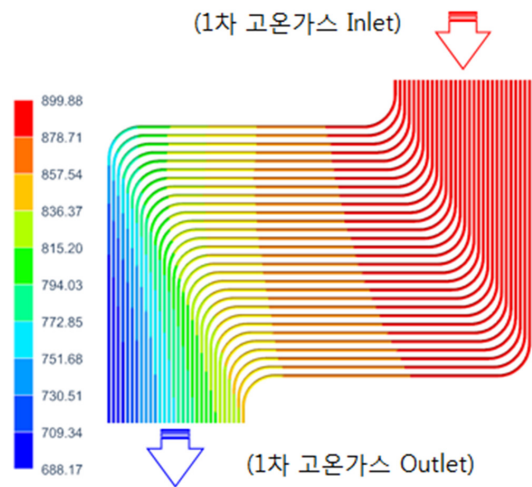


Fig. 4 Sulfuric acid gas temperature profile

ABAQUS를 이용하여 응력해석을 수행한 단위 판의 von-Mises응력을 Fig. 5에서 보여준다. ASME의 절차에 따라 30개 유로채널사이의 응력을 선형화하여 비교한 값중 가장 큰 값은 다음과 같다.

- 일차막응력: 2.05MPa
- 일차국부응력: 2.16MPa
- 이차응력: 16MPa

유효전열부위에서는 기준을 만족하였으나 헤더모서리부위에서는 열응력값이 크게 나와서 곡을 반경을 증대시켜 형상을 최적화함이 필요하다. Alloy 617 합금의 피로와 크리프 손상곡선 및 평가절차는 다음 식을 기준으로 ASME에서 연동효과를 제정 중이다.

$$\sum_{j=1}^p \left(\frac{n}{N_d} \right)_j + \sum_{k=1}^q \left(\frac{\Delta t}{T_d} \right)_k \leq D \tag{1}$$

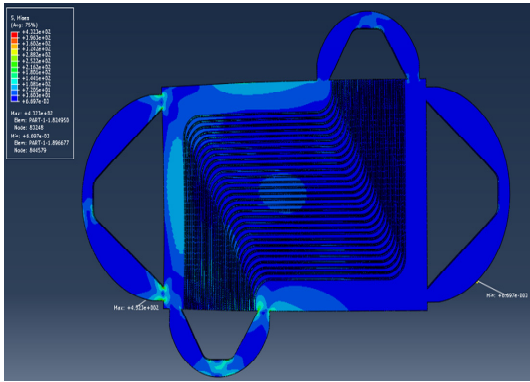


Fig. 5 Von-Mises stress contour of unit plate

3.7 순환기

초고온가스로는 일차계통과 이차계통의 냉각재인 헬륨을 순환시키는 순환기의 용량이 전체 수소 생산효율에 큰 영향을 미치는 주요 인자이다. 순환기의 구성 요소중에서 핵심기술은 헬륨가스분위기에 사용되는 베어링이다. 헬륨순환기에 사용할 수 있는 베어링은 오일베어링, 가스베어링, 전자기베어링으로 구분할 수 있다. 상용화된 기술은 오일베어링은 높은 하중을 지지할 수 있으나 밀봉이 어렵고, 윤활유를 필요로 한다. 가스베어링은 윤활유가 필요하지는 않지만, 높은 하중을 지지할 수 없어 초고온가스로의 용량 증대에는 한계가 있다. 이러한 기술적 이슈를 극복하기 위해서 전자식베어링 순환기가 유리하나 초고온가스로의 고온 운전 조건에서 베어링에 설치된 전자식의 수명과 제어 기술에 대한 신뢰성 확보가 필요하다. 순환기설계는 권선의 발열문제로 수냉을 하는 구조가 채택되므로 구조물 자체의 초고온설계에 대한 기술적 난제는 없다.

3.8 내부구조물

초고온가스로의 내부구조물은 흑연반사체와 흑연노심지지구조물 그리고 금속 노심지지구조물로 구성된다. 블록형과 폐블형의 가장 큰 차이가 노심구조물이다. 블록형 원자로에서 노심은 금속 노심지지배럴 안에 설치되어 수평방향으로 지지된다. 노심과 노심지지배럴 사이에는 노심 외곽의 불균일 형상과 원통 노심지지배럴 사이를 채울 수 있도록 측면 흑연반사체가 설치된다. 노심 하부에는 흑연으로 된 지지기둥들이 설치되며 그 아래에는 금속 노심지지구조물이 설치되어 노심을 지지한다. 최종적으로 노

심지지배럴과 노심지지구조물은 원자로용기에 의해 지지되는 구조이다. 노심의 상단에는 금속으로 된 상부노심구속 구조물이 설치되는데 노심과 마찬가지로 육각기둥 형태의 키로써 서로 연결되며 노심지지배럴에도 키로 연결된다. 폐블형 원자로에서도 원자로 내부의 대부분의 공간은 흑연반사체와 직경 60mm의 폐블핵연료가 차지하고 있다. 원자로 내부 구조물의 설계에서 가장 중요한 핵심 설계 기술은 흑연 노심구조물에 대한 진동 및 내진평가기술이며, 단위 블록에 대한 건전성평가와 블록 층의 내진 응답해석과 실험 수행이 설계에 필수적이다. ASME 설계 기술기준에서 흑연 노심지지구조물을 Class A로 분류하고 있다. 이에 대해 흑연은 압력경계소재가 아니고, 일반 금속소재고온기기의 일차압력경계가 주요 대상인 Class A와 설계등급 분류취지와 일치하지 않는다고 이점이 ASME에서 지속적으로 제기되어 추후 개정될 것이다.

4. 결 론

초고온가스로의 고온설계를 위한 소재요건 및 설계특성을 분석하였다. 초고온가스로를 구성하는 원자로용기, 중간열교환기를 비롯한 개별 초고온기기의 설계특성과 기술현안을 검토하고 분석하였다. 기술기준 측면에서는 초고온재료와 흑연이 ASME기술기준에 등재됨에 따라 중요한 소재현안이 상당히 해소되었다. 초고온기기의 열경계와 압력경계를 분리하는 것이 VHTR 설계에서 고온문제를 해결하는 중요한 설계 기법으로 활용되고 있다. 열경계와 압력경계를 분리하는 설계 구성, ASME 초고온로 설계등급의 고온부와 저온부 규정 개선, Alloy 617 코드의 제정, 초고온기기의 수명에 대한 입증과 보장, 인쇄형열교환기 등 새로운 기기에 대한 검사방식과 품질보증 등이 일차적인 기술적 이슈이다.

후 기

This study was supported by Nuclear Research & Development Program of the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean government (MSIP). (Grant code: NRF-2012M2A8A2 025682).

참고문헌

- (1) OECD/NEA Generational IV International Forum, 2014, Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems
- (2) Futterer, M.A., Li, F., Sink, S., Groot, S., Pouchon, M., Kim, Y.W., Carre, F., Tachibana, Y., 2014, "Status of the Very High Temperature Reactor System," Nucl. Eng. & Tech. Vol.77, pp.1-16.
- (3) Kim, Y.W., et al., 2015, Development of Key Technologies for Nuclear Hydrogen, KAERI/RR-3936/2014.
- (4) 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., "A Study of a Nuclear Hydrogen Production Demonstration Plant," Nucl. Eng. & Design, Vol.39, No.2, pp.111-122, 2007.
- (5) ASME, 2015, ASME Boiler and Pressure Vessel Code
- (6) Tachibana, Y., Sawahata, H., Iyoku, T., Nakazawa, T., 2004, "Reactivity Control System of the High Temperature Engineering Test Reactor," Prog. in Nucl. Energy, Vol.233, pp.89-101
- (7) J.W. Park et al., 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, 2006
- (8) Kim, C.S., Process heat exchanger thermal design, NHDD-KT_CA-15-007, KAERI, 2015