

소듐냉각고속로 붕괴열교환기의 고온 설계 및 건전성 평가[§]

이형연^{*†}, 어재혁^{*}

* 한국원자력연구원

High-Temperature Design and Integrity Evaluation of Sodium-Cooled Fast Reactor Decay Heat Exchanger

Hyeong-Yeon Lee^{*†} and Jae-Hyuk Eoh^{*}

* Korea Atomic Energy Research Institute

(Received April 12, 2013 ; Revised August 23, 2013 ; Accepted August 25, 2013)

Key Words: Decay Heat Exchanger(붕괴열교환기), Sodium-to-Sodium Heat Exchanger(소듐대 소듐 열교환기), High Temperature Design(고온 설계), 건전성(Integrity), Creep-Fatigue(크리프-피로)

초록: 본 연구에서는 소듐냉각 고속로 붕괴열교환기(DHX)의 고온 설계 및 크리프-피로 손상 평가를 수행하였다. 제 4 세대 소듐냉각 고속로의 능동 및 피동 잔열제거계통에 설치되는 DHX 와 한국원자력연구원의 STELLA-1 시험루프에 설치된 DHX 에 대해 상세설계 및 3D 유한요소해석을 수행하고, 동 결과에 기초하여 고온설계 기술기준인 ASME Section III Subsection NH 와 RCC-MR 코드를 따라 크리프-피로 손상 평가를 수행하였다. 크리프-피로 손상평가 결과에 기초하여 두 설계기준에 대해 비교 분석하고, 설계 기술기준의 보수성 이슈에 대해 토의하였다.

Abstract: In this study, high temperature design and creep-fatigue damage evaluation of a decay heat exchanger (DHX) in the decay heat removal systems of a sodium-cooled fast reactor (SFR) have been performed. Detail design and 3D finite element analysis have been conducted for the DHXs to be installed in active and passive decay heat removal systems in Korean Generation IV SFR, and the DHX installed in the STELLA-1(Sodium integral effect test loop for safety simulation and assessment) at KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute). Evaluations of creep-fatigue damage based on full 3D finite element analyses were conducted for the two Mod.9Cr-1Mo steel heat exchangers according to the elevated temperature design codes of ASME Section III Subsection NH and RCC-MR code. Code comparisons were made based on the creep-fatigue damage evaluation and issues on conservatisms of the design codes were discussed.

1. 서론

제4세대 소듐냉각 고속로(Gen IV SFR)의 설계에서 원자로 정지 사고 시 안전하고 신뢰성 있게 잔열 제거 능력을 실증하는 것은 설계 인허가를 취득하는 데 있어 필수 요건이다.⁽¹⁾ 특히 후쿠시마 원전 사고 이후 잔열제거 능력을 실증하는 것의 중요성은 더욱 부각되고 있다.

본 연구에서는 소듐냉각 고속로에서 안전등급으로 분류되는 잔열제거 계통(Decay Heat Removal

System : DHRS) 내 소듐대 소듐 열교환기(sodium-to-sodium heat exchanger)인 붕괴열교환기(decay heat exchanger : DHX)의 고온 설계 및 건전성 평가를 수행하였다. 한국원자력 연구원(KAERI)은 DHRS 의 성능 및 전산코드 검증을 위해 KAERI 내에 대형 소듐 시험루프인 STELLA(Sodium integral effect test loop for safety simulation and assessment)-1 시설을 구축하였으며, 동 시험시설의 주요 시험대상 기기에는 DHX 가 포함되어 있다.⁽²⁾

본 연구의 구조건전성 평가에서는 3D 유한요소 해석기반의 고온 구조해석을 수행하고, 고온설계 기술기준^(3,4)을 따라 DHX 기기 내 응력이 크게 걸리는 부분에서 크리프-피로 손상평가를 수행하였다.

§ 이 논문은 대한기계학회 신뢰성부문 2013년도 춘계학술대회 (2013. 3. 27.-29., 제주대) 발표논문임.

† Corresponding Author, hylee@kaeri.re.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

KAERI 가 개발 중인 SFR 실증로의 잔열제거계통에는 Grade 91 강 재질의 직관형 전열관을 갖는 한 가지 형태의 DHX 와 두 가지 형태의 소듐-공기 열교환기가 있다.⁽¹⁾ 여기서 소듐-공기 열교환기에는 헬리컬형 전열관을 갖는 공기열교환기(AHX)와 꾸불꾸불한(serpentine) 핀형 전열관(finned-tube)을 갖는 핀형 열교환기(FHX)가 있다. 위의 세 가지 형태 열교환기에 대해 상세설계 및 크리프-피로 손상평가가 수행된 바 있다.⁽⁵⁻⁷⁾

기존의 셸-튜브형(shell and tube type) 열교환기의 고온설계 및 해석에서는 복잡한 구조 형상의 유한요소해석 모델을 2D 모델로 단순화하여 해석을 수행하였으며, 그 결과 과도하게 보수적인 결과가 산출됨에 따라 고온 설계기술기준의 설계요건을 만족시키기 위해 별도의 비탄성 해석을 통해 설계기준을 만족시킨 사례가 있다⁽⁸⁾. 그러나 원자력 기기 설계의 인허가에서 비탄성 절차의 적용은 비용이 많이 소요되는 추가적 검증절차를 거쳐야 하기 때문에 효율적이지 못하다는 단점이 있다.

본 연구에서는 직관형 전열관을 갖는 DHX 기기에 대해 3D FE 해석을 통해 고온 열교환기의 건전성 평가를 수행하였다. 열교환기에 대해 3D FE 기반 선형 연구^(5,7,9)를 수행한 결과 기존의 단순화된 2D 해석 대비 더욱 실제적이고, 신뢰성 있는 해석 결과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

2. 소듐냉각고속로의 잔열제거계통

소듐냉각 고속로의 잔열제거계통은 안전등급으로 분류된다. KAERI 가 개발 중인 SFR 의 DHRS 는 설계 다양성(diversity) 확보를 위해 Fig. 1 에서와 같이 피동형 잔열제거계통(Passive Decay Heat Removal System : PDHRS)과 능동형 잔열제거계통(Active Decay Heat Removal System : ADHRS)으로 구성된다.

600MWe 급 소듐냉각고속 실증로의 형상은 Fig. 2 에서와 같으며, 원자로 풀 내에는 4 기의 붕괴열교환기(DHX)가 설치된다.⁽¹⁾ 여기서 DHX 는 Mod.9Cr-1Mo (ASME Grade 91)강 재질이고, 외경 및 높이가 각각 0.71m, 2.3m 인 소듐대 소듐 열교환기이다.

SFR 실증로의 잔열제거계통 설계에서는 설계의 다양성 및 다중성(redundancy) 개념에 기초하여 4 기의 DHRS 루프가 설치된다. 각 DHRS 루프에는 1 기의 DHX 와 1 기의 소듐-공기 열교환기가

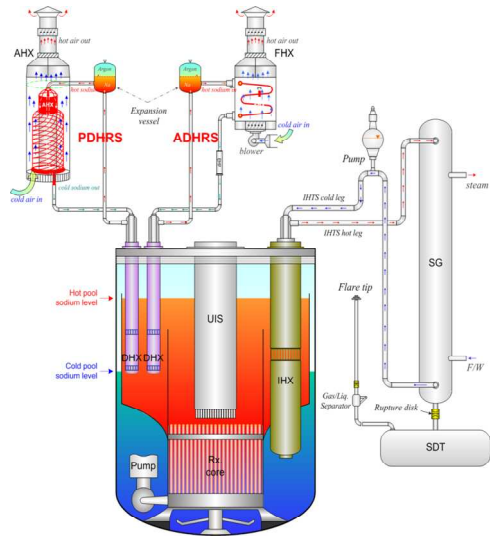


Fig. 1 Schematic of decay heat removal system

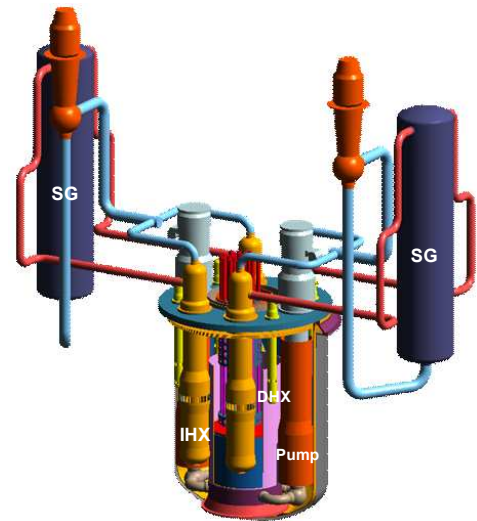


Fig. 2 Arrangements of main reactor components

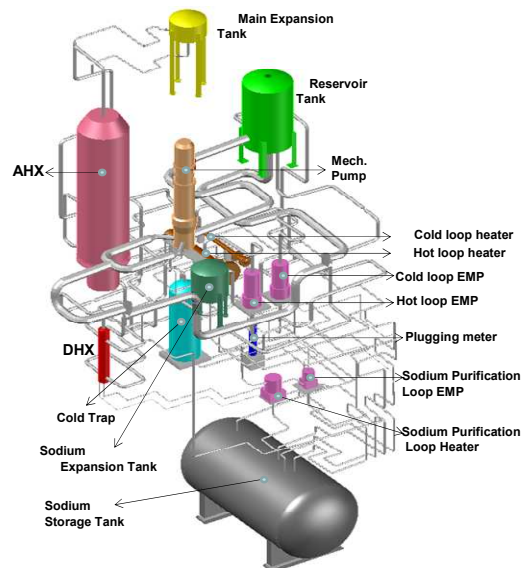


Fig. 3 Schematic of the STELLA-1 sodium test loop

Table 1 Design features of the STELLA-1 sodium test facility

Reference reactor	Korean Demo. SFR ⁽¹⁾
Height and length scale	1/5
Volume scale	1/125
Aspect ratio scale	1/1
Pressure and temperature	1/1 (prototypic condition)
Working fluid	Sodium
Max simulated core power	7% of scaled nominal power
Design code for major component	ASME VIII (2), ASME-NH

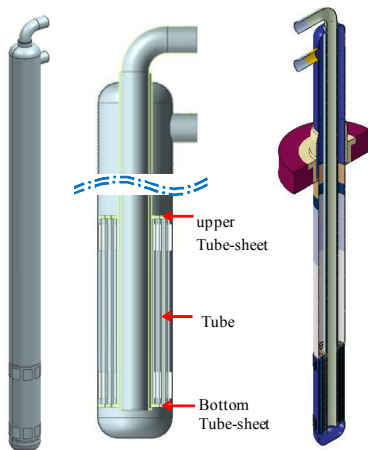


Fig. 4 DHX in Demonstration SFR

설치된다. DHX 가 AHDRS 에서는 핀형 소듐대 공기 열교환기(finned-tube sodium-to-air heat exchanger : FHX)에 연결되고, PDHRS 에서는 헬리컬 전열관형 소듐대 공기 열교환기(sodium-to-air heat exchanger : AHX)에 연결된다.

피동간열제거 열교환기와 기계식 소듐 펌프의 성능 검증 및 전산코드 검증을 위해 대형 소듐시설인 STELLA-1 시험루프가 2012 년에 구축이 완료된 바 있다.^(2,10) DHX 가 포함된 STELLA-1 시험루프의 개념도는 Fig. 3 에서와 같다.

STELLA-1 의 참조 노형은 소듐냉각 실증로이며 소듐 시험루프의 설계 인자는 Table 1 에서와 같다.

2. 붕괴열교환기의 형상 및 고온 설계

본 연구에서는 2 기의 붕괴열교환기(DHX)에 대해 고온 설계 및 크리프-피로 손상평가를 수행하였다.

첫 번째 DHX 형상은 SFR 실증로에 설치될 열교환기로서 형상은 Fig. 4 에서와 같다. 원자로플 내에 설치되는 이 DHX 는 상부 관판(upper tubesheet)

Table 2 Design parameters of DHX in Korean demonstration SFR

DHX (Demo. SFR)		Design parameters
Shell-side (Sodium)	No. of unit	4
	Thermal duty (MWt)	9.0
	No. of tubes	250
	Pitch to Dia. (P/D)	1.5
	Tube OD/ID (mm)	21.7 / 18.4
	Thickness (mm)	1.65
	Tube material	Mod.9Cr-1Mo
	Effective tube length (m)	1.73
	No. of spacer grid	2
	Shell ID/OD(m),thickness(mm)	0.69/0.71, 10mm
Heat transfer area (m ²)		29.6
Tube-side (Sodium)	Flow rate (kg/sec)	37.8
	Inlet temp. (°C)	510
	Outlet temp. (°C)	324
Tube-side (Sodium)	Flow rate (kg/sec)	31.6
	Inlet temp. (°C)	254
	Outlet temp. (°C)	474
Pressure drop (kPa)		0.57

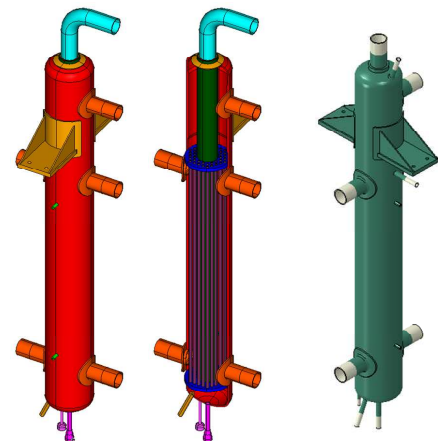


Fig. 5 DHX in STELLA-1 test loop

바로 아래에 다수의 창(window)이 있으며, 소듐은 이 창을 통해 DHX 내부로 유입된 후 소듐은 하부 관판 바로 위에 위치하는 창을 통해 외부로 빠져나간다.

실증로 DHX 의 설계 인자는 Table 2 에서와 같으며, 표에서 보는 바와 9MWt 용량의 DHX 가 총 4 기 설치되며, Mod.9Cr-1Mo 강 재질의 전열관 250 개가 설치된다.

Table 3 Design parameters of DHX in STELLA-1 loop

DHX (STELLA-1)		Design parameters
No. of unit		1
Thermal duty (MWt)		1.0
No. of tubes		42
Pitch to Dia. (P/D)		1.5
Tube OD/ID (mm)		21.7 / 18.4
Thickness (mm)		1.65
Tube material		Mod.9Cr-1Mo
Effective tube length (m)		1.73
No. of spacer grid		2
Shell ID/OD(m),thickness(mm)		0.323/0.288, 17mm
Heat transfer area (m ²)		29.6
Shell-side (Sodium)	Flow rate (kg/sec)	10
	Inlet temp. (°C)	600
	Outlet temp. (°C)	300
	Pressure drop (kPa)	0.20
Tube-side (Sodium)	Flow rate (kg/sec)	10
	Inlet temp. (°C)	300
	Outlet temp. (°C)	600
	Pressure drop (kPa)	0.45

두 번째 DHX 는 STELLA-1 시험루프에 설치된 열교환기로서 DHX 의 형상은 Fig. 5 에서와 같고, 설계인자는 Table 3 에서와 같다. 전열관의 제원은 유지시키고, 전열관의 개수만 42 개로 축소하였다.

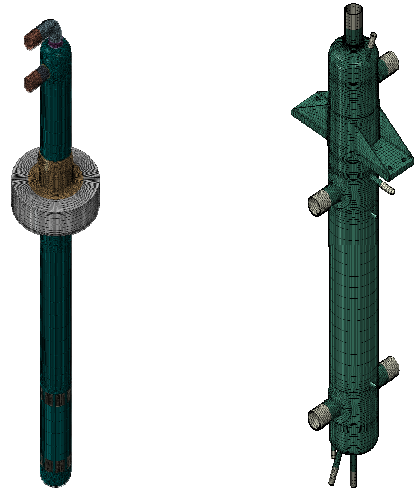
STELLA-1 시험루프에는 원자로용기가 설치되지 않기 때문에 1 차측 소듐은 소듐 풀로부터 유입되지 않고, DHX 셸 상부에 좌우로 부착된 배관을 통해 유입된다. DHX 내부로 유입된 소듐은 하부의 좌우 배관을 통해 빠져 나간다. 2 차측 소듐은 최상부 배관 및 중앙의 다운커머(downcomer)를 통해 DHX 내부로 유입된 후 열교환 과정을 거쳐 셸 부분 우측 최상부에 위치한 배관을 통해 빠져 나간다.

3. DHX 의 3D 유한요소해석

3.1 실증로 DHX

실증로 DHX 의 3D 유한요소(FE) 해석 모델은 Fig. 6(a)에서와 같이 하부의 DHX 부분, 원자로헤드 위에 지지되는 DHX 플랜지 부분, 플랜지와 DHX 를 연결하는 지지 원통(support cylinder)부 및 상부 배관 연결부까지 모델링을 하였다. 실증로 DHX 의 FE 모델은 255,988 개의 3D 요소와 378,732 개의 절점으로 구성되어 있다.

열하중 조건으로는 Fig. 7 에서와 같이 1 차측



(a) DHX in Demo.SFR (b) DHX in STELLA-1

Fig. 6 Finite element models of the DHXs

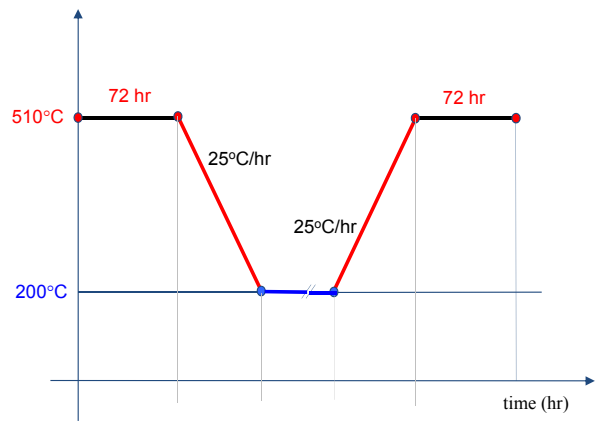


Fig. 7 Thermal loading conditions in primary sodium side of DHX in Demonstration SFR

소듐은 고온 510°C 를 유지하다 25°C/hr 의 속도로 재장전 온도인 200°C 까지 냉각된 후 저온 정상상태를 유지하다 다시 25°C/hr 속도로 510°C 까지 가열된 후 정상상태를 유지하는 과도조건을 해석 대상으로 설정하였다. 이는 1 차측 소듐의 열하중 조건이고, 2 차측 소듐은 Fig. 7 과 유사한 형태이며, 최고 온도는 475°C 이고, 최저온도는 200°C, 그리고 냉각 및 가열속도는 일차측 소듐과 동일하게 25°C/hr 로 설정되었다.

또한 작용하중으로서 DHX 에 연결된 DHRS 배관의 시스템 하중과 DHX 의 자중도 고려하였다.

해석 구간은 Fig. 7 의 열과도 조건에서 가장 큰 열하중이 걸리는 가열 구간 중 490°C 부터 510°C 최고온도에 도달하는 48 분간이고, 이로부터 열응력 해석 및 크리프-피로 손상평가를 수행하였다.

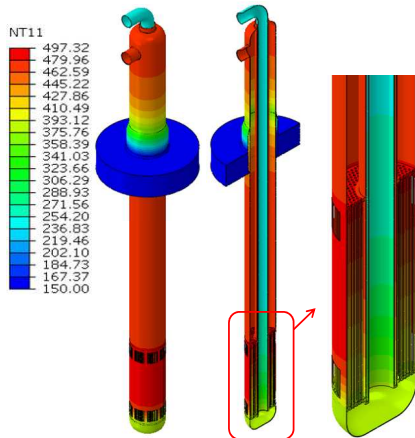


Fig. 8 Temperature distribution at the end of heat-up

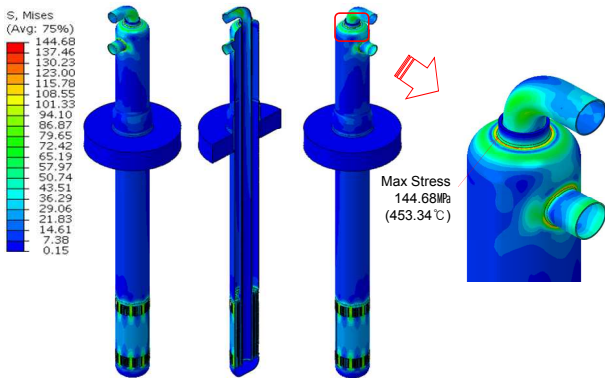


Fig. 9 Distribution of Mises stress intensities at the end of heat-up

열전달 및 응력해석에는 ABAQUS⁽¹¹⁾를 사용하였으며, Fig. 7 에서 가열이 끝나고 510°C 정상온도에 막 도달하는 순간의 열전달 해석에 따른 온도분포는 Fig. 8 에서와 같이 최고 온도는 고온 소듐이 유입되는 하부 DHX 전열관 부위에서 497.32°C 로 계산되었고, 중앙의 원자로 헤드와 접하는 플랜지 부분은 150°C 저온 분포를 보였다. 또한 Fig. 8 의 맨 우측 그림에서와 같이 전열관 상부에서는 고온 분포를 보였고, 2 차 소듐이 내려오는 중앙의 다운커머 라인은 상대적으로 저온 분포를 보였다.

온도분포를 고려하여 가열 종료시점에서 계산한 열응력 해석 결과는 Fig. 9 에서와 같이 나타났다. 이차하중을 고려한 응력해석 결과 최대 Mises 응력강도는 144.68MPa 로서 비교적 작게 계산되었으며, 최대 응력강도 발생 위치는 Fig. 9 에서 보는 바와 같이 상부 노즐 부위이었으며, 동 위치에서의 벽면 온도는 453.3°C 로 나타나 Mod.9Cr-1Mo 강 기준 고온 크리프 손상 평가가

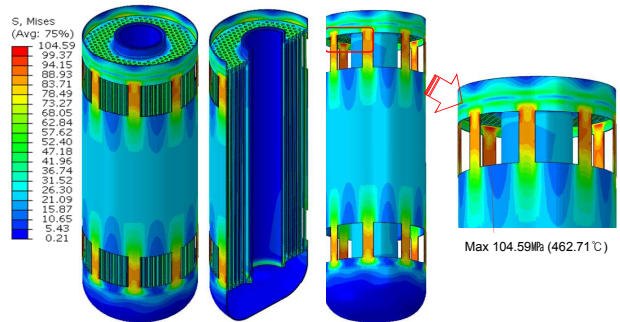


Fig. 10 Distribution of Mises stress intensities near the inlet and outlet of the DHX

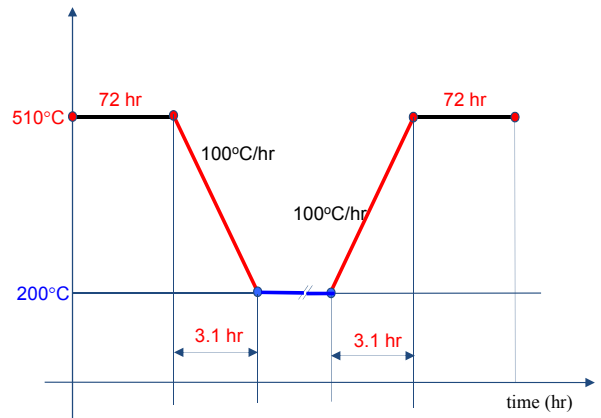


Fig. 11 Thermal loading conditions in primary sodium side of DHX in STELLA-1 test loop

요구되는 온도인 371°C 를 초과하였고, 이에 따라 이 부위에서는 크리프-피로 손상 평가를 수행했다. 한편 셸-튜브형 열교환기에서는 통상 전열관-관판(tubesheet) 접합부에서 높은 응력이 걸리는 것으로 알려져 있다.⁽⁸⁾ 본 해석에서 DHX 의 전열관-관판 접합부위의 응력분포를 보면 Fig. 10 에서와 같이 비교적 응력이 작게 걸렸으며, 104.59MPa 의 최대 응력강도가 걸린 부분은 관판 접합부가 아닌 소듐 유입 창(window)의 형상 불연속부위이었다. DHX 에 대해 상세 3D FE 모델 기반 해석을 수행한 결과 전열관-관판 접합부위에서의 응력은 비교적 작게 걸리는 것으로 나타났다.

3.2 스텔라 DHX

스텔라 시험루프 내 설치된 DHX 의 3D FE 해석 모델은 Fig. 3 및 Fig. 6(b)에서와 같이 시험루프 내에 설치되기 때문에 배관 연결을 위한 노즐이 부착된다.

스텔라 DHX 의 FE 모델은 255,511 개의 3D 요소와 290,790 개의 절점으로 구성되어 있다.

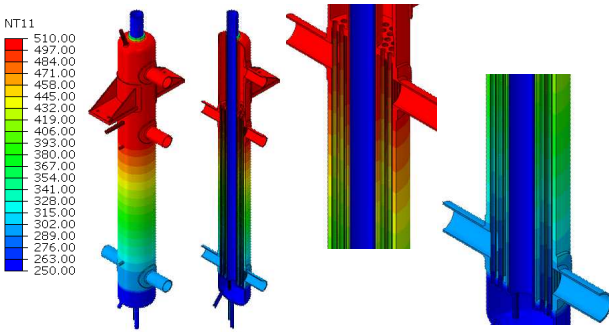


Fig. 12 Temperature distribution at the end of heat-up

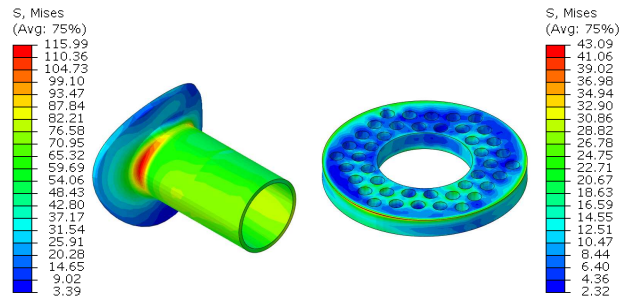


Fig. 14 Stress intensity near the N4A nozzle and top tubesheet at the end of heat-up

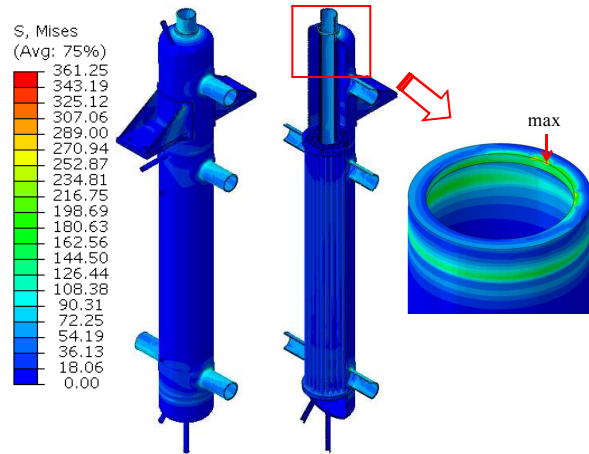


Fig. 13 Stress intensity at the end of heat-up under secondary loads

열하중 조건으로는 Fig. 11 에서와 같이 1 차측 소듐은 고온 510°C 를 유지하다 100°C/hr 속도로 재장전 온도인 200°C 까지 냉각된 후 저온 정상상태를 유지하다 다시 100°C/hr 로 속도로 정상상태, 510°C 까지 가열되는 과도조건을 해석 대상으로 설정하였다. 실증로에서는 가열 및 냉각 속도가 25°C/hr 였는데, 시험루프에서는 보다 보수적으로 가열조건을 설정하였다. 이는 1 차측 소듐의 열하중 조건이고, 2 차측 소듐은 Fig. 11 과 유사한 형태이며, 최고 온도 500°C, 최저 온도 200°C 이고, 냉각 및 가열속도는 일차측 소듐과 동일하게 100°C/hr 로 설정되었다. 또한 스텔라 DHX 에 연결된 배관계통의 시스템 하중을 고려하였고, DHX 의 자중도 고려하였다.

스텔라 DHX 의 해석에서 열전달 해석 구간은 Fig. 11 의 열과도 조건에서 일차측 소듐의 온도가 200°C 로부터 510°C 최고온도에 도달하는 가열과도 구간으로 선정하였다. 해석 결과 가열(heat-up) 종료시점에서의 온도분포는 Fig. 12 에서와 같이 고온 소듐이 유입되는 입구 노즐 부위가 고온

분포를 보였고, 하부의 출구 쪽에서 저온 분포를 보였으며, 이차 측에서는 저온 소듐이 유입되는 중앙 다운커머 라인에서 저온 분포를 보였다. 스텔라 DHX 의 열하중, 자중 및 연결 배관의 시스템을 고려하여 응력해석을 수행하였다. 전체적으로 이차하중을 고려하였을 때의 응력강도 분포는 Fig. 13 에서와 같이 최대 361.25MPa 이 발생하였다. 스텔라 DHX 의 관관 부위에서도 Fig. 14 에서와 같이 응력강도는 최대치가 43MPa 로 매우 낮게 나타나 단순화된 2 차원 모델에서의 매우 높은 응력 분포⁽⁸⁾와는 대조를 이루었다.

4. 크리프-피로 손상평가

본 연구에서는 실증로 및 스텔라 시험루프의 DHX 에 대한 위의 열응력 해석 결과를 이용하여 고온 설계 기술기준인 ASME Section III Subsection NH⁽³⁾ 및 프랑스의 RCC-MR⁽⁴⁾을 따라 크리프-피로 손상 평가결과를 수행하였다.

선형손상합산법칙(linear damage summation rule)에 기초한 크리프-피로 손상평가 절차에 대한 두 설계기술 기준의 기본 개념은 다음의 식 (1)을 이용하는 것으로 동일하다.

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

여기서 D 는 총 크리프-피로 손상, p 는 다른 사이클 형태, $(n)_j$ 는 사이클 형태 j 에 대한 횟수, $(N_d)_j$ 는 사이클 형태 j 에서의 설계허용 사이클, q 는 크리프 손상 계산의 시간 간격 개수, $(\Delta t)_k$ 는 크리프-피로 하중 사이클 형태 k 에서의 유지시간, $(T_d)_k$ 는 시간 간격 k 동안의 과단응력선도로부터 결정된 허용 유지시간이다.

실증로 및 스텔라 시험루프의 DHX 의 재료는 Mod.9Cr-1Mo 강이며, 이 재료에 대해 ASME-NH

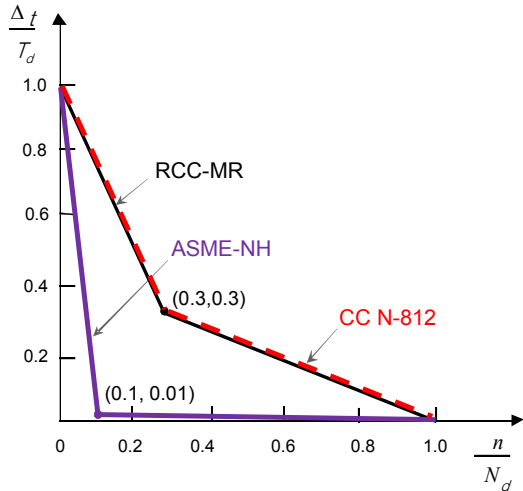


Fig. 15 Creep-Fatigue Damage Envelope for Mod.9Cr-1Mo steel

및 RCC-MR 가 제시하고 있는 크리프-피로 손상 허용선도는 Fig. 16 에서와 같다. 그림에서 ASME-NH 가 RCC-MR 에 비해 훨씬 허용 영역이 작은 것을 알 수 있으며, 크리프-피로 손상평가가 절차는 다소 차이가 있지만, 전체적으로 ASME-NH 는 특히 Mod.9Cr-1Mo 강에서 RCC-MR 에 비해 더 보수적인 것으로 알려져 있다. Fig. 15 에서 보면 ASME-NH 의 크리프 손상 허용영역은 RCC-MR 대비 1/30 로 현저히 작다는 것을 알 수 있다.

이와 같은 ASME-NH 의 과도한 보수성 문제를 보완하기 위해 ASME 코드위원회에서는 조건부로 교점 (0.1,0.01)의 이직선 대신 RCC-MR 에서와 같이 교점 (0.3,0.3)의 이직선도를 사용할 수 있도록 규정하고 있는 Code Case 를 제시하였다. 이는 Mod.9Cr-1Mo 강을 대상으로 하는 ASME Code Case N-812⁽¹²⁾이다. 이 CC N-812 에서는 ASME-NH 절차에서 첫째, 탄성평가 절차(T-1340⁽⁹⁾), 둘째 등시성 곡선(isochronous curve, T-1800⁽³⁾)을 사용할 경우 Fig. 15 에서와 같이 교점 (0.3,0.3)의 이직선도를 사용할 수 있다고 규정하고 있다.

4.1 실증로 DHX

3D FE 해석 기반 DHX 의 열응력 해석 결과를 이용하여 ASME-NH 및 RCC-MR 을 따라 크리프-피로 손상 평가결과를 수행하였다.

양 기술기준을 따라 Fig. 16 에서 응력이 상대적으로 크게 걸리는 저온관 노즐 및 고온관 노즐에 대해 ASME-NH 및 RCC-MR 을 따라 크리프-피로 손상평가를 수행하였다. 실증로 DHX 에 대해 ASME-NH 를 따라 손상 평가를 수행한 결과는 식 (2)에서와 같고, RCC-MR 을 따른 평가 결과는 식

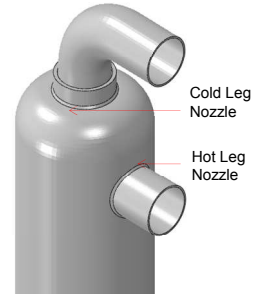


Fig. 16 Significant locations in demonstration SFR

(3)에서와 같이 나타났다.

두 코드 평가 결과를 비교해보면 ASME-NH 의 피로수명은 77,222.7 회로 RCC-MR 의 약 920 만 사이클 대비 보수적으로 나타났고, 크리프 파단 수명에서도 ASME-NH 에서는 2059.6 시간으로 RCC-MR 에서의 30 만 시간 이상보다 압도적으로 보수적인 것으로 나타났다.

$$\frac{n}{77,222.7} + \frac{\Delta t}{2059.6} \leq D \tag{2}$$

$$\frac{n}{9,204,718.6} + \frac{\Delta t}{>3 \times 10^5} \leq D \tag{3}$$

실제 ASME-NH 를 따른 DHX 의 설계 평가결과가 식 (2)에서와 같이 나타날 경우 설계 수명기간 동안 크리프 파단수명 시간이 2059.6 시간에 불과하여 설계 기술기준을 만족시키지 못하게 되는 반면 RCC-MR 을 따른 경우 설계요건을 만족시킬 수 있는 것으로 나타났다.

Grade 91 강에 대해 ASME-NH 가 이와 같이 과도하게 보수적이기 때문에 CC N-812 가 제시됐는데, 동 Code Case 도 Fig. 15 의 크리프-피로 허용선도만 확장시켜줄 뿐 피로 및 크리프 수명을 변화시켜주는 절차는 아니다.

4.2 스텔라 DHX

스텔라 DHX 에서는 응력이 비교적 크게 걸리는 부위가 Fig. 17 에서 다운커머 노즐 및 고온관 노즐로 나타났으며, 본 크리프-피로 손상평가에서는 고온 영역에 해당되는 고온관 노즐 부위에 대해 손상 평가를 수행하였다.

스텔라 DHX 에 대해 ASME-NH 를 따라 손상 평가를 수행한 결과는 식 (4)에서와 같고, RCC-MR 을 따른 평가 결과는 식 (5)에서와 같이 나타났다. 두 코드평가 결과를 비교해보면 피로수명은 ASME-NH 와 RCC-MR 에서 모두 10⁷ 사이클 이상으로 나타났고, 크리프 파단 수명은 ASME-NH

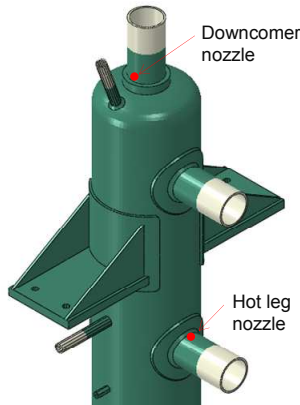


Fig. 17 Significant locations in STELLA-1 loop

에서 1,463 시간으로 RCC-MR 의 130,539 시간 대비 현저히 보수적인 것으로 나타났다.

$$\frac{n}{10,753,904} + \frac{\Delta t}{1,463} \leq D \quad (4)$$

$$\frac{n}{>10^7} + \frac{\Delta t}{130,539} \leq D \quad (5)$$

스텔라 시험장치에 설치되는 DHX 에서 크리프-피로 손상 평가결과를 보면 ASME-NH 의 경우 허용영역이 작아 피로하중이 동반된 크리프 유지시간이 수십 또는 수백 시간 지속될 경우 손상허용치를 초과할 가능성이 있지만, RCC-MR 의 경우 시험장치로서는 의도하는 운전조건에서 허용치가 만족되는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 논문에서는 소듐냉각 고속로의 잔열제거 계통에 설치되는 봉괴열교환기(DHX)와 STELLA-1 시험시설 내 설치된 DHX에 대해 고온 설계를 수행하고, 고온설계 기술기준인 ASME-NH와 RCC-MR를 따라 3D 유한요소 해석 기반 크리프-피로 손상평가를 수행하였다. DHX의 재질은 고온 설계코드 등재 재료인 Mod.9Cr-1Mo강이다.

실증로 DHX 및 스텔라 DHX의 고온 설계 평가와 관련하여 RCC-MR을 따라 손상평가를 수행한 결과 크리프-피로 손상 계산 결과가 모두 허용치 내에 들어오는 것으로 평가되었다. 그러나 ASME-NH를 따라 평가를 수행한 결과 피로손상은 2기 DHX에서 모두 무시할 수준으로 계산되었지만, 크리프 손상은 수명기간 중 허용치를 넘어서는 것으로 나타났다. 따라서 현 ASME-NH 절차의 고온 설계 요건을 만족시키기 위해서는 비탄성 평가절차를 적용하는 것이

필요한데, 동 비탄성 절차가 인허가를 받기 위해서는 비용이 많이 소요되는 별도의 실험적 검증이 수반되어야 한다.

설계코드의 보수성 비교와 관련하여 ASME-NH가 RCC-MR보다 더 보수적인 것으로 알려져 있지만, 본 연구에서 수행한 Mod.9Cr-1Mo강 재질의 DHX 고온 설계평가에서는 ASME-NH의 보수성이 훨씬 큰 것으로 나타났다. 이 재료는 ASME-NH에서 과도한 보수성이 현안이 되어 보수성 완화를 위해 최근 Code Case N-812가 제시됐는데, 본 논문에서는 이에 대해서도 간략히 소개하였다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부의 지원을 받아 2013년도 원자력연구개발사업 및 국제화기초조성사업을 통해 수행되었음(2012M2A8A2025638, 2011-0001561).

참고문헌

- (1) Kim, Y. I., Jang, J.W., Lee, J.H., Kim, S.J., Kim, S.O., Kim, J. B., Jung, H.Y. and Lee, H.Y., 2012, Conceptual Design Report of SASFR Demonstration Reactor of 600MWe Capacity, KAERI/TR-4598/2012.
- (2) Lee, H. Y., Lee, J. H., Lee, T. H., Eoh, J. H., Kim, T. J. and Lee, Y.B., 2010, "Construction of a High Temperature Grade 91 Sodium Component Test," *Materials Science Forum*, Vols. 416-419, pp. 528~531.
- (3) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, 2010, Section III, Div. 1, Subsection NH, Class 1 Components in Elevated Temperature Service.
- (4) RCC-MRx Subsection B: Class N1RX Reactor Components, Its Auxiliary Systems and Supports, Draft 2010 AFCEN RCC-MRx code, December, 2010.
- (5) Lee, H. Y., Kim, J. B. and Park, H. Y., 2012, "Creep-Fatigue Damage Evaluation of Sodium to Air Heat Exchanger in Sodium Test Loop Facility," *Nuclear engineering and Design*, Vol. 250, pp.308~315.
- (6) Lee, H. Y., Kim, J. B. and Park, H. Y., 2012, "High Temperature Design and Damage Evaluation of Mod.9Cr-1Mo Steel Heat Exchanger," *Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of ASME*, Vol. 133, Oct. pp.051101~10.
- (7) Lee, H.Y., Eoh, J.H. and Lee, Y.B., 2013, "High-Temperature Design of Sodium-to-Air Heat Exchanger in Sodium Test Loop," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 37, No. 5, pp. 665~671.
- (8) Chellapandi, P., R. Srinivasan, Vaze, K.K., Chetal, S.C, Bhoje, S.B., 1989, "Structural Design of the IHX for

- PFBR,” *10th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMIRT-10)*, Anaheim, CA, USA, August 14-18.
- (9) Lee, H.Y, Eoh, J.H, Lee, Y.B, 2013, “High Temperature Design and Damage Evaluation of a Helical Type Sodium-to-Air Heat Exchanger in a Sodium-Cooled Fast Reactor,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, in press, April, 2013.
- (10) Eoh, J.H, Lee, H.Y, Kim, T.J, Jeong, J.Y, Lee, Y.B, 2013, “Design Features of a Large-scale Sodium Thermal-hydraulic Test Facility: STELLA,” *International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles*, 4~7 March 2013, Paris.
- (11) ABAQUS Users manual, 2010, Version 6.10, Dassault Systems, USA.
- (12) ASME Code Case N-812, 2010, Alternative Creep-Fatigue Damage Envelope for Grade 91, ASME.