PGSFR중간열교환기의 정상상태 고온 구조 건전성 평가

이성현[†]·구경회^{*}·김성균^{*}

Evaluation of High Temperature Structural Integrity of Intermediate Heat Exchanger in a Steady State Condition for PGSFR

Seong-Hyeon Lee[†], Gyeong-Hoi Koo^{*} and Sung-Kyun Kim^{*}

(Received 31 May 2016, Revised 17 June 2016, Accepted 27 June 2016)

ABSTRACT

Four cylindrically shaped IHXs(Intermediate Heat Exchangers) are installed in the PHTS(Primary Heat Transfer System) of the PGSFR(Prototype Gen IV Sodium cooled Fast Reactor). As for the IHX, the temperature difference of structure is inevitable result caused by heat transfer between primary coolant sodium and IHTS(Intermediate Heat Transport System) sodium. It is necessary to evaluate the high temperature structural integrity of IHXs which operate at the elevated temperature condition over the creep temperature. In this paper, the high temperature structural integrity of IHX under assumed loading conditions has been reviewed according to ASME code.

Key Words : SFR(소듐냉각고속로), IHX (중간열교환기), IHTS (중간열전달계통), PHTS(일차열전달계통)

기호설명

- K = the section factor for the cross section
- K_t = the factor given by $K_t = (K+1)/2$
- $P_m = a$ primary membrane stress
- P_L = a local membrane stress
- P_b = a primary bending stress
- P_e = expansion stress which result from the constraint of free end displacement
- Q = a membrane + bending stress in the secondary stress
- S_o = the maximum allowable stress of general primary membrane stress intensity under design condition
- S_m = the lowest stress intensity at a given temperature

```
    * 회원, 한국원자력연구원
shyi@kaeri.re.kr
    TEL: (042)868-2362 FAX: (042)866-6171
```

* 한국원자력연구원

- S_{mt} = the allowable limit of general membrane stress intensity to be used as a reference for stress calculation
- $S_t \quad = a \ \text{temperature and time-dependent stress intensity} \\ limit$
- S_y = a yield strength of a material at a given temperature
- t = the total duration of a specific loading Pm at elevated temperature
- $\begin{array}{ll} t_b & = \mbox{ the time value determined by entering Figures} \\ & \mbox{ NH-I-14.4A through NH-I-14.4E at a value} \\ & \mbox{ stress equal to } P_L + P_b/K_t, \mbox{ as shown in Figure} \\ & \mbox{ NH-3224-2}^{(1)} \end{array}$
- t_m = the maximum allowed time under the load stress intensity

T = temperature

- UFS = use fraction sum defined in NH-3224⁽¹⁾
- y = the maximum allowable range of thermal stress

1.서 론

PGSFR(Prototype Gen. IV Sodium cooled Fast Reactor)의 일차열전달계통 고온풀에는 총 4개의 원 통형 중간열교환기(IHX, Intermediate Heat Exchanger)가 원자로 헤드 하부에 설치되며, 노심에 서 생성된 열원을 증기발생기로 전달하는 역할을 한 다. 중간열교환기 내부에는 1,320개의 직관형 전열 관이 배치되며, 노심에서 나온 545℃의 고온 일차냉 각재소듐과 증기발생기로부터 나온 390℃의 저온 중간열전달계통소듐이 전열관 내·외부를 통해 상호 열교환이 일어나도록 설계되어 있다.

중간열교환기에 작용하는 기계적 하중으로는 중 간열교환기 자중, 중간열전달계통 소듐 자중, 소듐-물 반응 압력 하중 등이 있다. 특히 소듐-물 반응 압 력 하중은 증기발생기 전열관의 균열 시 누출된 소 듐과 물이 반응하여 생성된 압력이 중간열전달계통 배관을 따라 중간열교환기 이차측에 작용하는 압력 하중을 말한다. 또한 중간열교환기는 고온의 일차 열전달계통소듐과 저온의 중간열전달계통소듐이 상호 열교환을 수행함에 따라 필연적으로 상대 열 팽창이 발생하며 열팽창 차에 의한 응력 집중이 발 생한다.⁽²⁾

중간열교환기는 545℃의 크리프 온도 이상의 고온 환경에서 중간열교환기에 작용하는 기계하중 및 열 하중에 대해 구조적 건전성이 확보되도록 설계되어 야 한다. 본 논문에서는 설계된 중간열교환기에 대 해 정상운전상태에서의 구조해석 및 열응력 해석결 과와 고온원자로구조평가 코드⁽³⁾에 따른 고온구조건 전성 평가결과를 기술하였다.

2. 유한 요소 해석

2.1 가정

중간열교환기의 구조 및 열 응력 해석을 위한 가 정은 다음과 같다.

a. 일차 및 이차 냉각재 유입/출구부는 균일하다.

- b. 전열관 집합체의 온도는 길이 방향을 따라 선 형적으로 변하고 가정하며 이 때 중간열교환기 실린더의 온도는 CFD(Computational Fluid Dynamics) 해석 결과를 적용하였다.
- c. 중간열교환기 지지플랜지의 온도는 원자로 헤

드 온도 유지 조건을 고려하여 150℃로 적용한다.

- d. 유동이 있는 부위의 열전달계수(thermal film coefficients)는 유속을 고려하여 3,000₩/℃·m² 이고 유동이 정체되어 있는 부위의 열전달계수 는 10₩/℃·m²이다.
- e. 커버가스 부위의 열전달계수는 2.3₩/℃·m²이다.
- f. 중간열교환기 내부 배관과 단열쉬라우드 사이 에는 단열재가 채워지므로 이 부위의 온도경계 조건을 단열조건으로 적용하였다.
- g. 이차냉각재의 무게는 하부 챔버와 상부 튜브시 트에 균일하게 작용한다.
- h. 일차 및 이차 냉각재 정압의 영향은 무시한다.
- i. 전열관 집합체는 해석의 단순화를 위하여 3개
 의 등가 원통 실린더로 구성하였다.
- j. 증기발생기에서 소듐-물반응 기인압력이 중간 열교환기의 중간계통구조물에 동시에 가해지며 그 값은 2.5MPa이다.
- k. 중간열교환기의 일차열전달계통 소듐 및 중 간열전달계통 소듐에 의한 추력 하중은 무시 한다.

2.2 해석 모델

중간열교환기의 기하학적 형상과 ANSYS 15.0을 사용하여 구성한 유한요소 모델을 Fig. 1에 나타내었 다.⁽⁴⁾ 수치해석을 위해 1/4 대칭 모델이 사용되었으며 구조해석을 위해서 SOLID185요소(8-node structural solid element), 열해석을 위해 SOLID70요소(8-node thermal solid element)를 사용하였다.

2.3 하중 조건

본 해석에 고려한 기계적 하중은 중간열교환기 자 중, 증기발생기 소듐-물 반응 압력, 중간열전달계통 소듐 자중이 있다. 증기발생기 소듐-물 반응 압력은 앞서 가정한 바와 같이 중간열교환기 중간계통 구조 물에 적용하였다. 그리고 중간열전달계통 소듐의 자 중은 하부챔버 내면과 상부튜브 시트 상단면에 균일 한 압력으로 적용하였다.

열응력해석에 사용된 온도 하중은 100% 정상운전 상태에서 원자로용기에 작용하는 온도분포하중을 고려하였다.

Table 1에 각 운전조건 별 하중 조합을 나타내 었다.

Event Name	Load Combinations	Service Time (year)	No. of cycle	Max/Min T (°C)
Design Condition	Dead weightDesign pressureSecondary sodium weight	60	-	565
Normal operation (Level A&B)	Dead weightSecondary sodium weightSteady state full power operation	60	240	545/390
Sodium-water reaction (Level C)	 Dead weight Secondary sodium weight Steady state full power operation Sodium-water reaction pressure 	60	25	545/390





Fig. 1 2D drawing of IHX and its finite element model

2.4 경계 조건

중간열교환기의 자중 경계조건을 적용하기 위해 중간열교환기 지지플랜지 하단면의 축방향 자유도 는 구속하고, 중간열교환기 지지물의 지지조건을 고 려하여 반경 반향 자유도는 허용하였다. 하중은 중 간열교환기 자중을 적용하기 위해 축방향으로 중력 9.8m/s²을 부여하였다. 설계압력 및 소듐-물 반응 압 력 하중은 Fig. 2와 같이 이차측의 모든 면에 2.5MPa 의 압력이 작용하도록 하중 경계조건을 적용하였다. 중간열교환기 내부 배관 및 하부챔버 내부 모든 소 듐의 자중은 하부챔버 내면에 압력으로 환산한 7,310Pa 을 적용하였으며, 또한 상부 튜브시트 상단 의 중간열전달계통 소듐의 자중은 상부튜브시트 상 단면에 압력으로 환산한 28,610Pa을 적용하였으며 Fig. 3에 나타내었다.



Fig. 2 Boundary condition of sodium-water reactor pressure of steam generator





전체적인 열하중 경계조건은 Fig. 4와 같이 나타내 었다. Fig. 4에 나타낸 바와 같이 열하중 경계조건을 적용하기 위하여 고속 유동이 있는 부위의 대류열전



Fig. 4 Thermal boundary conditions of IHX

달계수는 보수적으로 3,000W℃·m²을 사용하였고, 저속 유동이 있는 부위는 10W/℃·m²을 사용하였다. 또한 커버가스와 접하는 모든 구조물 표면은 가스온 도 450℃와 대류열전달계수 2.3W/℃·m²를 사용하였 다. 일차냉각재의 유입부는 고온소듐의 온도인 545℃ 를 적용하였고 일차냉각재의 출구부 온도는 390℃를 적용하였다. 내부배관과 하부챔버의 온도는 이차측 유입온도인 332℃를 적용하였으며, 열교환이 끝나고 이차냉각재가 지나가는 부위인 상부튜브시트부터 출구까지는 528℃를 적용하였다. 중간열교환기 외부 실린더의 온도는 일차냉각재에 대하여 CFD 해석을 통해 산출된 온도 데이터를 직접 적용하였다. 또한 중간열교환기 지지부인 중간열교환기 지지 플랜지 하단에는 원자로 헤드 표면 온도인 150℃를 부여하 였다.

2.5 해석 결과

2.5.1 구조해석 결과

Fig. 5와 같이 중간열교환기의 자중에 의한 최대 응력 강도는 중간열교환기 지지플랜지 Y-연결부에 서 11.5MPa로 가장 높게 나왔으며 이 때 최대 변위 는 0.1 mm 로 나타났다. Fig. 6은 설계압력에 대한 응력 분포를 나타낸 것으로 중간열교환기 상부 튜브 시트와 외부실린더 연결부에서 최대 응력강도 167MPa가 나오는 것을 알 수 있으며 이 때의 최대 변위는 1.1 mm 이다. Fig. 7은 2차 소듐하중에 의한 응력 강도 분포를 나타낸 것으로 중간열교환기 지지 플랜지 Y-연결부에서 최대응력이 2.4MPa로 나타났 으며 이 때 최대 변위는 0.02 mm 이다.



Fig. 5 Stress intensity distributions for the dead weight



Fig. 6 Stress intensity distributions for the design pressure



Fig. 7 Stress intensity distributions for secondary sodium weight

2.5.2 열해석 결과

중간열교환기의 최고 온도는 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 실린더에서 545℃ 로 나타났으며 중간열교환 기 지지플랜지 Y-연결부에서 높은 온도구배가 나타 났다. 이는 원자로 헤드의 냉각 요건인 150℃ 에 기 인하며 Fig. 9와 같이 420MPa의 높은 열응력이 발생 하였다.



Fig. 8 Temperature distributions of IHX



Fig. 9 Thermal stress distributions of IHX

3. 고온 구조 평가

앞에서 수행한 구조 및 열 해석 결과를 사용하여 중간열교환기의 고온 구조 건전성 평가를 ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III-Division 5 HB 절차에 따라 수행하였다. 9Cr-1Mo-V강을 사용 한 중간열교환기는 금속온도에 따라서 세부적인 설 계 기준을 적용하는데, 금속온도가 371℃이하인 경 우는 Subsection HB, Subpart A를 적용하며 371℃이 상인 경우는 Subsection HB, Subpart B를 적용한다.

3.1 평가 단면 선정

중간열교환기의 구조건전성 평가를 위해 앞에서 수행한 구조해석 및 열해석 결과로부터 응력집중이 발생하는 몇몇 지점을 평가 단면으로 선정하였다. Table 2와 Fig. 10은 선정된 3개의 평가 단면에 대한 위치 및 정보를 나타낸다.

 Table 2 Information of sections for structural integrity evaluations

Sections	Locations	Nodes
А	Y-junction structure #1	Node279-Node285
В	Upper chamber	Node762-Node761
С	Lower chamber	Node462-Node453

3.2 고온 구조 평가 결과

선정된 3개의 평가 단면에 대하여 설계 조건, 정상 운전 조건, 사고조건에서 고온 구조 건전성 평가를 수행하였다. 본 평가에서 설계여유도(Margin)는 식 (1)과 같이 정의하였다.



Margin = (Allowable value/Calculated value) - 1(1)

3.2.1 설계조건

Table 3은 설계조건에 대한 고온 구조건전성 응력 평가 결과를 나타낸다. 선정된 3개의 평가 단면에서 가정한 설계 온도는 고온 일차냉각재소듐 온도인 54 5℃에 설계여유도를 적용한 565℃이므로 Subsection HB, Subpart B를 적용하여 평가 하였다.

응력 평가 결과 선정된 평가 단면 중 최소 설계여 유도가 나타난 평가 단면 B(절점 761)의 경우 주요 평가 항목인 Pm과 PL+Pb의 설계여유도가 각각 0.46, 1.17으로 허용기준을 만족하는 것을 확인하였다.

3.2.2 정상운전조건(운전 수준 A&B)

Table 4는 정상운전조건(운전 수준 A&B)에 대한 고온 구조건전성 응력 평가 결과를 나타내며 Table 5 는 UFS(Use Fraction Sum) 평가 결과를 나타낸다. 평 가 조건에서 단면C의 절점 462의 경우 온도가 344.6℃ 이므로 Subsection HB, Subpart A를 적용하여 평가 하였고, 그 외 단면들에 대해서는 Subsection HB,

Table 3. Stress evaluation results of structural integrity for each section under design condition

Sections	Nodes	Stresss [MPa]	Calculated value	Allowable value	Margin	(°C)
	270	Pm	32.35	$S_{o} = 89.40$	1.76	5(5.0
	279	P _L +P _b	26.82	$1.5S_{o} = 134.10$	4.00	305.0
А	295	Pm	32.35	$S_{o} = 89.40$	1.76	565.0
	283	$P_L + P_b$	39.56	$1.5S_{o} = 134.10$	2.39	505.0
	762	Pm	61.10	$S_{o} = 89.40$	0.46	565.0
п	/02	$P_L + P_b$	60.53	$1.5S_{o} = 134.10$	1.22	505.0
D	761	Pm	61.10	$S_o = 89.40$	0.46	565.0
	/01	$P_L + P_b$	61.67	$1.5S_{o} = 134.10$	1.17	505.0
	460	Pm	23.11	$S_o = 89.40$	2.87	565.0
C	462	$P_L + P_b$	70.43	$1.5S_{o} = 134.10$	0.90	505.0
C	452	Pm	23.11	$S_0 = 89.40$	2.87	565.0
	433	P _L +P _b	40.62	$1.5S_{o} = 134.10$	2.30	505.0

Table 4.	Stress e	evaluation	results	of	structural	integrity	for	each	section	under	service	level	А	\$	В
----------	----------	------------	---------	----	------------	-----------	-----	------	---------	-------	---------	-------	---	----	---

Sections	Nodes	Stresss [MPa]	Calculated value	Calculated value Allowable value		(°C)
		P _m	6.94	$S_{mt} = 113.51$	15.35	
	279	$P_L + P_b$	8.00	$KS_m = 215.70$	25.98	506.5
		PL+Pb/Kt	7.39	$S_t = 113.51$	14.36	
A		Pm	6.94	$S_{mt} = 115.04$	15.57	
	285	$P_L + P_b$	10.44	$KS_m = 216.67$	19.75	504.9
		PL+Pb/Kt	9.53	$S_t = 115.04$	11.07	
		Pm	2.47	$S_{mt} = 91.40$	36.03	
	762	$P_L + P_b$	1.33	$KS_m = 201.01$	150.57	530.6
р		PL+Pb/Kt	1.40	$S_t = 91.40$	64.08	
Б		P _m	2.47	$S_{mt} = 83.45$	32.81	
	761	$P_L + P_b$	4.05	$KS_m = 194.99$	47.13	540.6
		PL+Pb/Kt	3.73	$S_t = 83.45$	21.34	
	4(2)	P _L +P _b +P _e +Q	197.21	$3S_m = 563.97$	1.86	244.6
	402	Thermal Ratcheting	280.62	$y*S_y = 1.24e6$	4416.21	344.0
С		Pm	0.13	$S_{mt} = 181.78$	1376.85	
	453	P _L +P _b	0.14	$KS_m = 272.68$	1920.91	382.7
		PL+Pb/Kt	0.10	$S_t = 304.39$	3095.29	

Subpart B를 적용하여 평가 하였다.

응력	평가	결과	최소	설계	여귀	우도는	평가	단면	С
(절점	462)	에서	나타	났으며	며극	주요	평가	항목	인

Table	5	UFS	eva	luation	results	of	stru	ictural	integr	ity
		for e	each	section	under	serv	vice	level	A&B	

Sections	Nodes	UFS	Evaluation	Т (°С)
	270	t/t _m	$\frac{t}{tm} = \frac{5.26e5hr}{2.71e6hr} \cong 0.19 < 1$	506 5
	279	t/t _b	$\frac{t}{tb} = \frac{5.26e5hr}{2.70e6hr} \cong 0.19 < 1$	500.5
A	295	t/t _m	$\frac{t}{tm} = \frac{5.26e5hr}{2.73e6hr} \cong 0.19 < 1$	504.0
	285	t/t _b	$\frac{t}{tb} = \frac{5.26e5hr}{2.68e6hr} \cong 0.20 < 1$	304.9
	762	t/t _m	$\frac{t}{tm} = \frac{5.26e5hr}{2.55e6hr} \cong 0.21 < 1$	520 6
D	/62	t/t _b	$\frac{t}{tb} = \frac{5.26e5hr}{2.58e6hr} \cong 0.20 < 1$	550.0
В	761	t/t _m	$\frac{t}{tm} = \frac{5.26e5hr}{2.46e6hr} \cong 0.21 < 1$	540.6
	/01	t/t _b	$\frac{t}{tb} = \frac{5.26e5hr}{2.43e6hr} \cong 0.22 < 1$	340.0
С	452	t/t _m	$\frac{t}{tm} = \frac{5.26e5hr}{1.37e7hr} \cong 0.04 < 1$	2027
	453	t/t _b	$\frac{t}{tb} = \frac{5.26e5hr}{1.37e7hr} \cong 0.04 < 1$	362.7

P_L+P_b+P_e+Q와 열적 라체팅의 설계여유도가 각각 1.86, 4,416으로 허용기준을 만족하는 것을 확인하였 다. 또한 t/t_m, t/t_b의 합으로 정의되는 UFS 평가 결과 모든 평가 지점에서 그 값이 모두 1 이하로 허용 기 준을 만족하는 것을 확인하였다.

3.2.3 사고조건(운전 수준 C)

Table 6는 운전 수준 C에 대한 고온 구조 건전성 응력 평가 결과를 나타내며 Table 7은 UFS 평가 결 과를 나타낸다. 여기서 운전 수준 C는 Table 1에서 제시된 바와 같이 운전 수준 A&B를 모두 포함하는 하중 조건이 적용된 운전 조건이다. 운전 수준 A&B 와 마찬가지로 평가 조건에서 단면 C의 462번 절점 의 경우 온도가 344.6℃이기 때문에 Subsection HB, Subpart A를 적용하여 평가 하였고, 그외 단면들에 대해서는 Subsection HB, Subpart B를 적용하여 평가 하였다.

응력 평가결과 최소 설계 여유도는 평가단면 B(절 점 761)에서 나타났으며 주요 평가 항목인 Pm, PL+Pb, PL+Pb/Kt, t/tm, t/tb 모두 허용 기준을 만족하는 것을 확인하였다. 또한 UFS 평가 결과 모든 평가 지 점에서 그 값이 모두 1 이하로 허용 기준을 만족하 는 것을 확인하였다.

Table 6. Stress evaluation results of structural integrity for each section under service level C

Sections	Nodes	Stresss [MPa]	Calculated value Allowable value		Margin	(°C) T
		P _m	32.35	$1.2S_{\rm m} = 172.56$	4.33	
	279	$P_L + P_b$	26.82	$1.2KS_m = 258.84$	8.65	506.5
		$P_L + P_b/K_t$	27.74	$S_t = 238.15$	7.59	
А		Pm	32.35	$1.2S_{\rm m} = 173.34$	4.36	
	285	$P_L + P_b$	39.56	$1.2KS_{m} = 260.01$	5.57	504.9
		$P_L + P_b / K_t$	38.03	$S_t = 240.39$	5.32	
		P _m	61.10	$1.2S_{\rm m} = 160.81$	1.63	
	762	$P_L + P_b$	60.53	$1.2KS_m = 241.21$	2.99	530.6
р		PL+Pb/Kt	60.64	$S_t = 205.14$	2.38	
Б		P _m	61.10	$1.2S_{\rm m} = 155.99$	1.55	
	761	$P_L + P_b$	61.67	$1.2KS_{m} = 233.99$	2.79	540.6
		$P_L + P_b/K_t$	61.56	$S_t = 192.44$	2.13	
		Pm	23.11	$1.2S_{\rm m} = 225.59$	8.76	
	462	PL	23.11	$1.8S_{\rm m} = 338.38$	13.64	344.6
C		PL+Pb	70.43	$1.8S_{\rm m} = 338.38$	3.80	
С	Pm	23.11	$1.2S_{\rm m} = 218.14$	8.44		
	453	PL+Pb	40.62	$1.2KS_m = 327.21$	7.06	382.7
		PL+Pb/Kt	29.57	$S_t = 322.54$	9.91	

Sections	Nodes	UFS	Evaluation	T (°C)
	270	t/t _m	$\frac{t}{tm} = \frac{12.50hr}{2.19e6hr} \cong 0.00 < 1$	506.5
	219	t/t _b	$\frac{t}{tb} = \frac{12.50hr}{2.29e6hr} \cong 0.00 < 1$	500.5
A	285	t/t _m	$\frac{t}{tm} = \frac{12.50hr}{2.21e6hr} \cong 0.00 < 1$	504.0
	285	t/t _b	504.9	
	762	t/t _m	$\frac{t}{tm} = \frac{12.50hr}{1.22e6hr} \cong 0.00 < 1$	520.6
D		t/t _b	$\frac{t}{tb} = \frac{12.50hr}{1.23e6hr} \cong 0.00 < 1$	550.0
В	761	t/t _m	$\frac{t}{tm} = \frac{12.50hr}{1.06e6hr} \cong 0.00 < 1$	540.6
	761	t/t _b	$\frac{t}{tb} = \frac{12.50hr}{1.05e6hr} \cong 0.00 < 1$	540.0
G	152	t/t _m	$\frac{t}{tm} = \frac{12.50hr}{1.27e7hr} \cong 0.00 < 1$	2027
	453	t/t _b	$\frac{t}{tb} = \frac{12.50hr}{1.24e7hr} \cong 0.00 < 1$	302.7

 Table 7 UFS evaluation results of structural integrity for each section under service level C

4. 결 론

본 연구에서는 정상운전 조건과 소듐-물반응 사고 조건에 대한 중간열교환기의 고온 구조 건전성 평가 를 수행하고 결과를 고찰하였다. 평가에 고려된 하 중은 중간열교환기 자중, 증기발생기 소듐-물 반응 압력 하중, 중간열전달계통 소듐 자중과 같은 기계 하중과 100% 정상운전 상태에서의 온도 분포 하중 이다. 주어진 하중에 대하여 응력 해석을 수행하였 고 그 결과에 대한 고온 구조 건전성 평가를 ASME BPV Sec. III Division 5에 따라 수행하였다. 평가 결 과 정상상태 운전 조건 시 중간열교환기는 ASME Code의 응력요건을 모두 만족하는 것을 확인하였다. 향후 과도 운전 조건 및 중대 사고 조건 시 고온에 서의 변형률 요건과 크리프-피로 손상요건에 대한 고온 구조 건전성 평가를 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 미래창조과학부 원자력연구개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- ASME, 2013, "Rules for construction of nuclear facility components," ASME B&PV Sec. III, Div. 1 Sub. NH, 2013ed.
- (2) Part, C. G., Kim, J. B. and Lee, J. H., 2009, "Design Study of an IHX Support Structure for a Pool-Type Sodium-Cooled Fast Reactor," *Nucl. Eng. & Tech.*, Vol. 41, No. 10, pp. 1323~1332.
- (3) ASME, 2013, "Rules for construction of nuclear facility components," ASME B&PV Sec. III, Div. 5, 2013 ed.
- (4) ANSYS Users manual, Release 15, ANSYS Inc., 2013.