'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

KALIMER IHTS 배관계의 배치 사례연구 및 설계평가

Case study for the arrangement and design evaluation of KALIMER IHTS Piping System

이형연, 김종범, 유 봉
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

본 연구에서는 액체금속로 KALIMER 의 중간열전달계통(IHTS) 배관계의 배치에 관한 사례연구를 통하여 주요 기기의 크기 및 원자로 건물 내 배치 등을 고려한 최적의 IHTS 배관 배치도를 작성하였다. 현재의 개념설계 배치도에서 IHX 중심과 증기발생기 중심 사이의 수평거리는 11.5m 로 설정되었다. 배관계의 설계 건전성 평가를 위해 해외 노형과 본 배치사례에 따른 비탄성 해석을 수행하여 열응력 및 변형도 수준을 비교 평가하였다. 비탄성 해석을 위한 구성방정식에는 Chaboche 모델을 적용하였고, 해석과도는 가상의 원자로 정지 조건으로 설정하였으며 해석시간은 잔열이 제거되는 1000 초 동안으로 설정하여 각 노형 및 배치사례에 대한 비교해석을 수행하였다. 해석결과 현재의 KALIMER IHTS 배관 개념설계 배치도는 해외 노형에 비하여 응력 및 변형률 수준이 비교적 낮은 것으로 평가되었다. 또한 IHTS 배관계에 대한 하중제어 응력의 설계 평가결과도 설계지침을 만족하는 것으로 나타났다.

Abstract

In the present study, the case study on the arrangements of the KALIMER IHTS(intermediate heat transport system) was carried out taking the sizes of the components and arrangements in the reactor building into consideration to determine the optimal arrangements of the IHTS layout. In the present conceptual design of IHTS piping system, various cases of the horizontal distances between the centers of IHX and SG were investigated and the case of 11.5m was selected. A comparison study through the inelastic analyses for the IHTS piping on the foreign reactors and KALIMER has been carried out and the levels of stresses and strains were compared for the evaluation of design integrity for the piping system. The constitutive model of Chaboche was employed for the inelastic analysis. The analysis was carried out for the assumed reactor trip transient for each routing over 1000 seconds of decay heat removal. The analysis results showed that the levels of thermal stresses and strains for the present expansion loop of KALIMER were less than those of the foreign reactors. In addition, the analysis of the IHTS piping design under load controlled stresses showed that the design guideline

was satisfied for the corresponding service levels.

1. 서론

한국원자력 연구소가 개발 중에 있는 150Mwe 급 액체금속로인 KALIMER(Korea Advanced LIquid MEtal Reactor) [1]는 일차 열전달 계통(PHTS)에 배관을 사용하지 않는 풀형 원자로이지만 원자로 용기 내 열교환기(IHX)와 증기발생기(SG)는 이차측 배관계통인 중간열전달계통(intermediate heat transport system :IHTS) 배관에 의해 연결된다. 이 이차배관은 기존의 경수로 대비 저압, 고온(정상상태 511°C)에서 운전되며 특히 이차측 열교환기의 입출구 온도차가 170°C 를 상회하는 등 비교적 큰 열하중을 받는다.

본 연구에서는 KALIMER 중간열전달계통의 주요 기기 및 배관계에 대한 배치설계를 위해 IHX-SG 의 중심거리 및 배관의 배치형상이 다른 몇 가지 경우에 대한 사례연구를 수행하였다. 사례연구에서는 고온 배관의 비탄성 거동 평가를 위하여 스테인리스강 구조물의 고온 비선형 거동을 가장 잘 모사해주는 것으로 알려진 Chaboche 구성 방정식 모델을 이용하여 배관해석을 수행하였다. 또한 KALIMER IHTS 배관의 설계평가를 위해 본 연구에서는 해외의 고온 배관 설계지침을 따라 우선 하중제어 응력 제한치에 대한 평가를 수행하였다.

2. KALIMER 이차배관 사례연구

2.1 기기 및 배관계통의 배치

KALIMER 전체 시스템의 열전달계통은 그림 1 과 같이 일차열전달계통(PHTS), 중간연전달계통(IHTS), 및 증기발생기계통(SGS)으로 구성되어 있다. 그림 1 에서와 같이 IHTS 는 IHX 출구온도가 511°C 이고 입구온도는 339.7°C 로 IHX 의 출.입구 온도차가 171.3°C 에 이르며 운전압력은 현재 2.5 기압으로 설정되어 있는 고온 저압의 열전달 계통이다. 현재의 개념설계 단계에서 전체적인 IHTS 의 형상은 그림 2 에서와 같이 원자로용기 내부에 위치하는 4 개의 IHX 가 2 개의 SG 에 연결되는 2 루프 시스템이다.

사례연구를 위하여 이차계통 주요 기기의 제원 및 건물 내 배치를 고려하여 IHX 와 SG 사이의 중심거리를 8m, 12m, 16m 및 11.5m 로 바꿔가며 응력해석을 수행하였다. 본 사례해석을 통하여 이 IHX 와 SG 의 중심거리는 11.5m 로 설정하였고, 여기에 맞춰 IHTS 배관의 배치설계를 수행하였다. 그림 3 은 현재의 IHTS 개념설계 배치도로서 중심거리가 11.5m 인 경우이고, 그림 4 는 바로 이전의 배치사례로서 중심거리가 16m 인 경우이다. 현재 단계에서의 기기 배치에 관한 정면도 형상은 그림 5 에 제시되어 있는데 이 그림에서는 그림 2 의 격리밸브가 누락되어 있다. 그림 3 에서와 같이 직경 13m 의 격납돔과 두께가 90cm 인 원자로 벽면 사이의 고온관 및 저온관에는 격리밸브가 각각 하나씩 루프 당 총 4 개가 설치된다.

KALIMER IHTS 배관의 배치도는 그림 5 의 좌측 배관하단에 설치되는 두 개의 IHX 로부터 나온 고온관이 원자로건물 벽면 바깥에서 Tee 배관에 접합된다. 그림 5 에서 상하 두 개의 배관으로부터 Tee 접합부로부터 좌측의 배관은 14”SCH40 의 소구경 배관이고, 접합부로부터 우측의 배관은 20” SCH40 의 대구경 배관이다. 각 배관 규격의 제원은 표 1 에, 그리고 IHTS 배관의 설계 및

운전인자는 표 2 에 나타나 있다.

IHTS 배관 설계에 관한 중요 연계요건으로는 첫째, IHX 와 SG 의 기하학적 중심 높이의 차는 사고시 자연대류에 의한 잔열제거가 가능하도록 11.4 미터 이상을 유지하여야 하고, 둘째는 IHTS 저온관의 최저점과 고온관의 최고점 높이차가 최소한 10m 이상을 유지하여야 한다. 본 설계에서는 IHX 와 SG 의 중심 높이차가 12.4m 이고, 배관의 최대 높이차는 11m 로 설정하였다. 고온배관에서는 가급적 고정 지지구조물을 줄이고 열팽창 응력을 완화시켜주기 위해 hanger 지지 구조물을 주로 채택하였다. KALMER 의 IHTS 배관계에는 7 개의 hanger 지지구조물이 설치된다.

2.2 배관해석 모델링

2.2.1 해석 모델링

그림 2의 IHTS 배관계에서 가장 큰 열하중을 받는 곳은 고온관이며, 고온관의 재질은 현 단계에서는 고온강도가 우수한 316 스테인리스강으로 설정되어 있고, 운전온도가 상대적으로 낮은 흡입관 및 저온관의 재질은 304로 설정되어 있다.

비탄성 해석은 계산시간이 많이 소요되므로 본 해석에서는 유한요소 모델링을 배관계통에서 가장 큰 열응력이 발생하는 고온관에 국한하였다. 고온관의 응력 해석을 위한 ABAQUS[2] 해석 모델은 그림 6 에 제시하였다. 배관요소는 전체적으로 74 절점이고, 직관에 대해서는 PIPE31 을 사용하였으며, 곡관에 대해서는 ELBOW31 요소를 사용하였다.

배관 배치도에서 가장 취약한 부분은 저온관과 고온관이 교차하는 동축배관(co-axial piping) 부분이지만 이 부분의 형상설계를 수행하고 열과도 하중이 결정되면 향후 이에 대한 설계 건전성 평가를 수행할 예정이다.

IHTS 배관계의 설계평가를 위한 ANSYS 해석모델은 그림 7 에 제시되어 있으며 탄성해석 절차를 따르는 ANSYS[3] 해석에서는 배관 전체를 유한요소 모델링하였다.

2.2.2 Chaboche 구성방정식

액체금속로와 같이 이차응력의 변동이 크고 반복 응력이 작용할 경우 기존의 고전 모델들은 실제의 재료거동과는 큰 차이를 보이기 때문에 비탄성 해석을 위한 구성방정식(constitutive equation)을 개발하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있다. 고온환경에서 일반적으로 사용될 수 있는 비탄성 구성방정식의 개발은 사실상 불가능하며 특정용도에 활용하기 위한 새로운 구성방정식 및 관련 프로그램의 개발에 대한 연구가 해외에서는 현재도 수행되고 있다. 본 해석에 적용한 Chaboche 모델[4,5]을 간략히 설명하면 다음과 같다.

비탄성 변형에 대한 Chaboche 모델은 항복 조건식을 갖는 대표적인 통합 점소성 모델로서 동적 특성을 갖는 내부 변수들을 도입하여 재료의 시간에 따른 내부이력을 표현한다. 통합 점소성 구성식의 일반적인 지배방정식[4]에 기초한 Chaboche 통합 점소성 구성방정식은 다음과 같다.

유동응력식 : $\dot{e}^{p}_{ij} = f(J_2(\Sigma_{kl}), k, T)\Sigma'_{ij}$

$$f = \frac{3}{2}\frac{\dot{p}}{J_2(\Sigma_{ij})}, \quad \dot{p} = \left\langle \frac{J_2(\Sigma_{ij}) - k - k}{K} \right\rangle^{n}$$

$$\sum'_{ij} = s'_{ij} - a'_{ij}, \qquad J_2(\sum_{ij}) = \frac{1}{2}\Sigma_{ij}'\Sigma_{ij}'$$

내부변수 지배방정식 : $\dot{a}'_{ij} = h(s_{kl}', a_{kl}', k, e_{kl}, \dot{p}, T)\dot{e}^{p}_{ij} - r(s_{kl}', a_{kl}', k, e_{kl}, \dot{p}, T)\, a_{ij}'$,

$$h = \frac{2}{3}C, \qquad r = g\,\dot{p}$$

$$\dot{k} = \Gamma(p,T)\,\dot{p} + \Theta(p,T)\,\dot{T}, \quad \Gamma = b(Q-k).$$

여기서 s'_{ij}, k 및 a'_{ij}는 각각 편차응력 텐서, 등방경화응력(drag stress) 및 편차 이동경화 응력텐서(deviatoric back stress tensor)를 나타내며, K, n, C, g, b, Q, k 등은 온도에 따른 재료의 상수들이다.

2.3 작용하중

비탄성 해석에서는 배관계에 작용하는 하중으로서 그림 8의 원자로 정지조건에 따른 잔열제거 열하중과 자중이 되었다. 현재의 개념설계단계에서 KALIMER IHTS에 대한 세부 열수력 설계하중이 아직 결정된 상태가 아니므로 본 해석에서는 일본의 모듈형 이중 풀 액체금속로의 출력제어 시스템 기능상실에 따른 열과도 조건을 해석과도로 설정하였다.

또한 탄성해석절차를 따르는 설계평가에서는 각 설계지침의 해당 운전수준(service level)이 요구하는 하중을 해석에 적용하였다.

2.4 사례해석 결과

고온 배관에 그림 8과 같은 열과도 하중이 작용할 때 IHX-SG의 중심거리가 8m, 12m, 16m, 11.5m인 경우의 KALIMER와 일본의 DFBR 및 MDP의 Mises 응력 및 최대 변위량의 계산치는 표 3에서와 같이 나타났다. 현재의 개념 설계 배치도인 배치사례 6에서 Von Mises 응력의 계산치가 6.89 MPa로 DFBR과 MDP에 비하여 낮게 평가되었다. Mises 응력의 분포도는 그림 9에서와 같이 계산되었고 Tee 접합부에서 SG 접속점까지의 변형도는 그림 10에서와 같이 최대 29mm인 것으로 나타났다.

2.5 배관설계지침에 따른 평가

KALIMER IHTS 배관의 설계 타당성을 평가하기 위하여 본 연구에서는 해외의 고온배관 설계지침을 비교분석하고 이들 지침에 따라 하중제어 응력제한치에 대한 평가를 수행하였다.

고온 배관의 설계에는 고온 비탄성 변형 및 피로, 탄성추종, 크립-피로, 좌굴, LBB[6] 등을 고려해야 하며 이의 평가를 위한 지침으로서 1차 배관에 대해서는 미국의 ASME Section III NH-3600[7]과 일본의 BDS[8] 및 프랑스의 RCC-MR RB-3600[9] 지침이 제시되어 있고, 이차배관에 대해서는 ASME Code Case N-253-6[10]과 RCC-MR RC-3600[11] 지침을 사용할 수 있다. 그러나 이 지침들 중의 일부는 완성되지 않은 상태로 있어 고온 배관설계에 사용하기에 적합하지 않다.

본 연구에서는 KALIMER IHTS 배관의 설계평가를 위해 미국, 프랑스 및 일본[12]의 고온 배관/용기 설계지침을 따라 우선 하중제어 응력 제한치에 대한 평가를 수행하였다. 변형률 제어에

따른 변형률 제한치, 크립-피로 손상 제한치 등의 평가는 현재 수행 중에 있다.

KALIMER IHTS 배관은 코드 등급에서 1 등급 배관과 2 등급 배관의 지침에 따라 설계평가를 수행하였다. IHTS 배관계의 하중제어 응력에 대한 평가결과는 표 4 에서와 같이 각 지침에 대해 모두 허용치 이내로 평가되었다.

3. 결론

본 연구에서는 KALIMER 중간열전달계통의 주요 기기와 배관계의 최적 배치도를 작성하기 위하여 IHX 와 SG 의 중심간 거리를 8m, 12m, 16m, 11.5m 로 정한 후 배관 배치도를 바꿔가며 6 가지 경우에 대한 사례해석을 수행하고 이 해석결과들을 일본의 DFBR 및 MDP 해석결과와 비교하였다. 평가결과 현재의 IHTS 개념설계 배치도인 중심거리 11.5m 인 경우가 비교대상인 일본 노형들보다 응력 및 변형률 수준이 낮은 것으로 평가되었다.

또한 이 배관계의 설계평가를 위하여 각국의 설계지침에 따라 하중제어 응력에 따른 설계지침을 검토한 결과 계산치는 모두 허용치 이내인 것으로 평가되었다.

향후의 연구과제는 적절한 열과도 하중을 고려하여 고온배관 설계지침에 따라 크립-피로, 탄성추종 등에 대한 평가를 수행하는 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

참고문헌

1. KALIMER Design Concept Report, KAERI/TR-888/97, 1997.
2. ABAQUS Version 5.8, 1999, H.K.S.
3. ANSYS Version 5.5, 1999, ANSYS Inc.
4. J.Lemaitre and J-L. Chaboche, Mechanics of solid materials, Cambridge university press, 1990.
5. Samson Youn, Soon-Bok Lee, Jong Bum Kim, Hyeong-Yeon Lee, Bong Yoo, “Implementation of visco-plastic constitutive equations into the finite element code ABAQUS,” Proceedings of the Korean Nuclear Society, ’98 Autumn, 1998.
6. 김종범, 이형연, 유봉,”KALIMER 원자로 구조물 및 부품의 파단전 누설 개념적용연구,”한국원자력학회, ’98, 춘계학술대회, 1998.
7. ASME Section III Subsection NH, Class I components in elevated temperature service,1995.
8. Structural Design Guides for class 1 components for high temperature service, PNC, 1984
9. RCC-MR Subsection B, Design and Construction Rule for FBR, AFCEN, 1985.
10. ASME Code Case N-253-6, Construction of class 2,3 components for elevated temp.1991.
11. RCC-MR RC-3600, Addendum No.2, part II, 1993.

12. 김종범, 이형연, 유봉, "미국, 프랑스, 일본의 액체금속로 구조물의 크립-피로 손상평가 방법 비교분석," 한국원자력학회, '98 춘계학술대회, 1998.

Table 1. KALIMER 중간열전달계통 주요기기 제원

		Design feature of KALIMER
Large bored piping (Hot Leg/Cold Leg)	O.D Thickness Pipe spec. Radius of curvature	0.58 m 1.506 cm 20"SCH40 0.762 m
Small bored piping (Hot Leg/Cold Leg)	O.D Thickness Pipe spec. Radius of curvature	0.3556 m 1.113 cm 14"SCH40 0.5334 m
Horizontal distance of IHX-SG		11.5 m

Table 2. KALIMER IHTS 배관 설계인자

Parameters		Design features
Design pressure		2.5 Mpa
Operating pressure		0.35 Mpa
Faulted pressure		15.5 MPa
Design temperature	Hot leg	530°C
	Cold leg	395°C
Operating temperature	Hot leg	511°C
	Cold leg	339°C

Table 3. 사례해석 결과

	DFBR	MDP	KALIMER					
			Case I*	Case II*	Case III*	Case IV**	Case V***	Case VI****
Mises σ (MPa)	26.7	51.0	73.5	50.0	23.7	21.4	22.2	8.69
Max Disp (mm)	25.6	7.28	18.7	22.8	25.3	19.1	40.0	29

IHX-SG 중심거리 * : 8m, ** : 12m, *** : 16m, **** : 11.5m

Table 4. 각 설계지침에 따른 KALIMER IHTS 배관의 평가결과

설계지침	events	관련코드 or equation	설계공식만족여부	적용범위
ASME NH-3200	Design Condition Level A,B Level D	Eqs. (1), (2) Eqs. (3),(4),(5) Eq.(12)	Yes Yes Yes	1 차 배관
ASME CC N-253	Design Condition Level A,B	Eq. (8) Eqs. (9),(10),(11)	Yes Yes	2 차 배관
BDS	Design Condition Level A,B	Eqs. (5.2.1), (5.2.2) Eqs. (5.2.3),(5.2.4)	Yes Yes	1 차 배관
RCC-MR RC-3600	Design Condition Level A,B	RC 3651.1.1 RC 3651.2	Yes Yes	2 차 배관

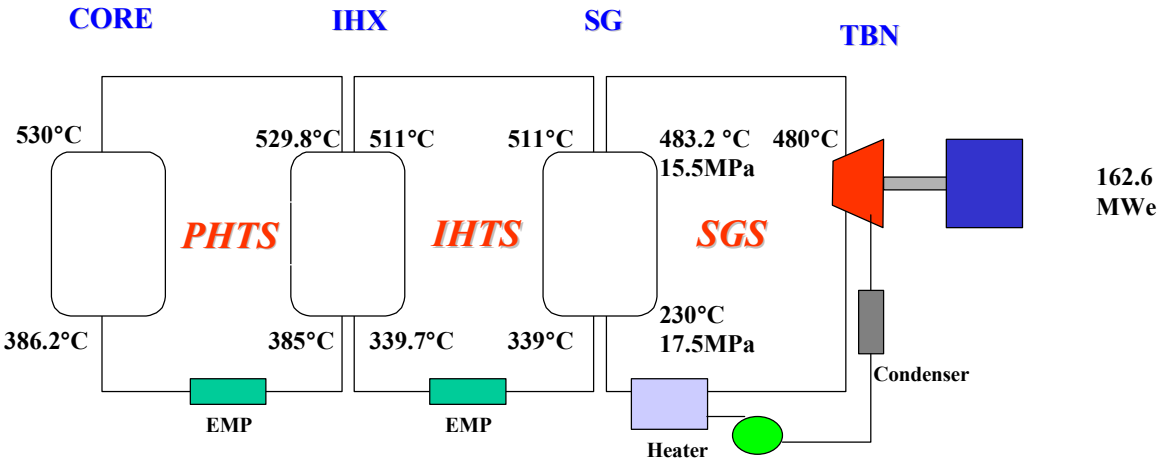

Fig. 1 Normal operation Condition of KALIMER

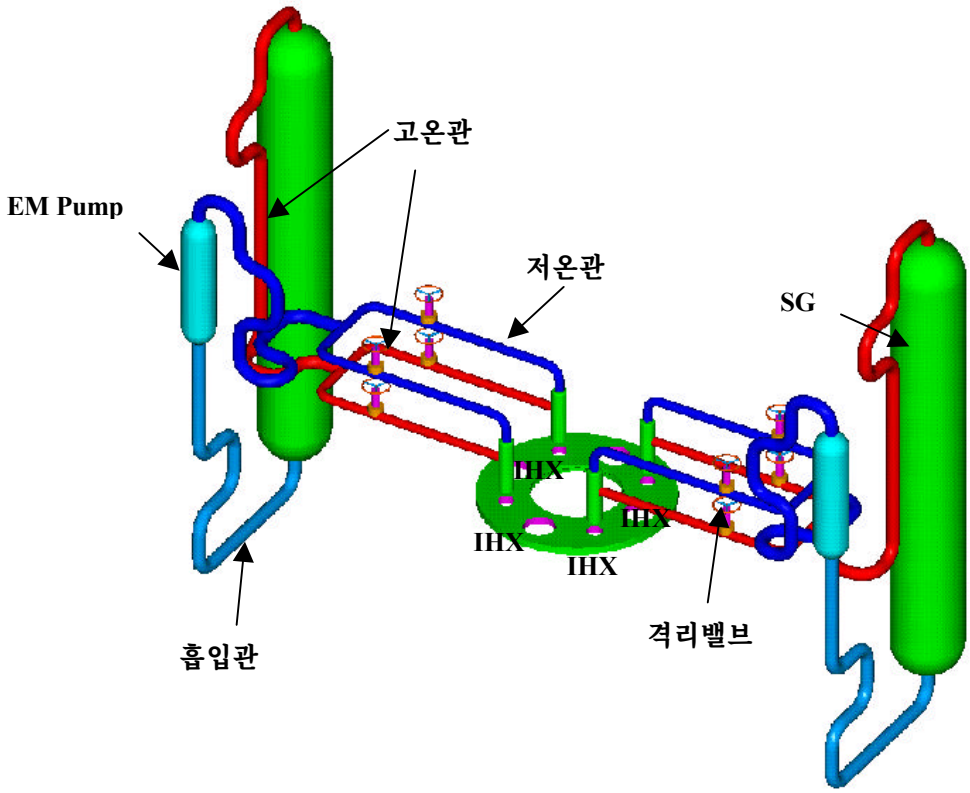

Fig. 2 KALIMER IHTS 배치도 (IHX-SG 중심거리 : 11.5m '99.11)

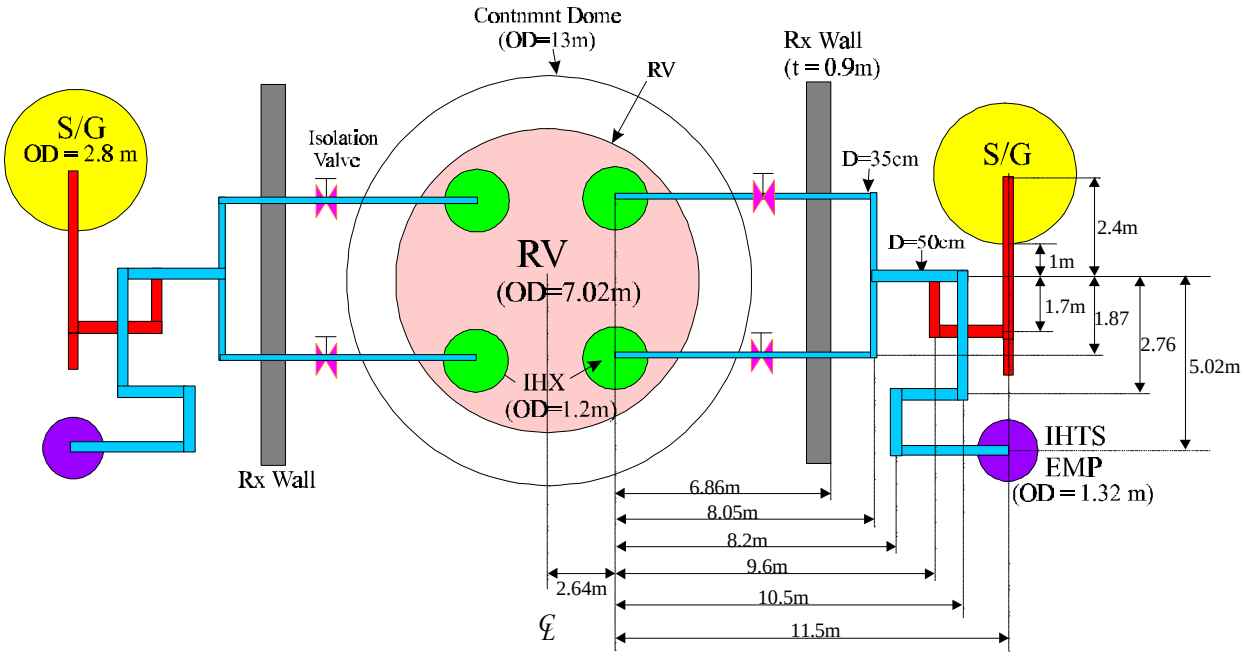

Fig. 3 KALIMER IHTS 배치도 (IHX-SG 중심거리 : 11.5m)

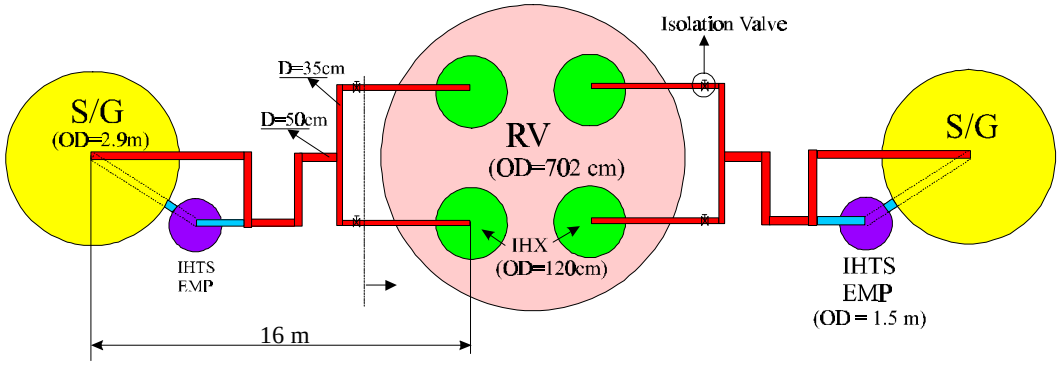

Fig. 4 KALIMER IHTS 배치도 (IHX-SG 중심거리 : 16 m)

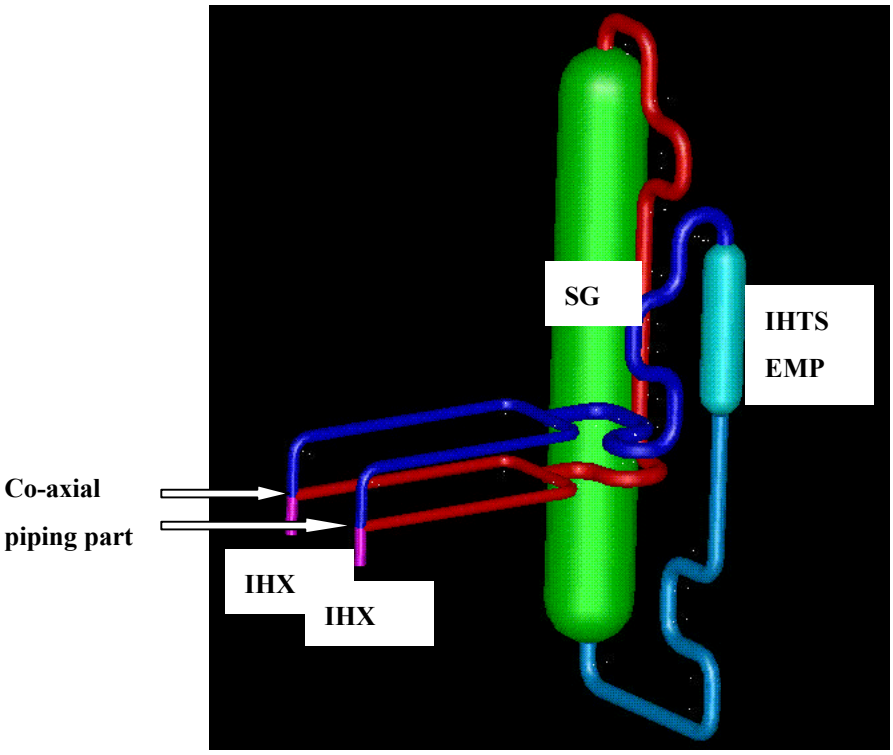

Fig. 5 KALIMER IHTS 정면도

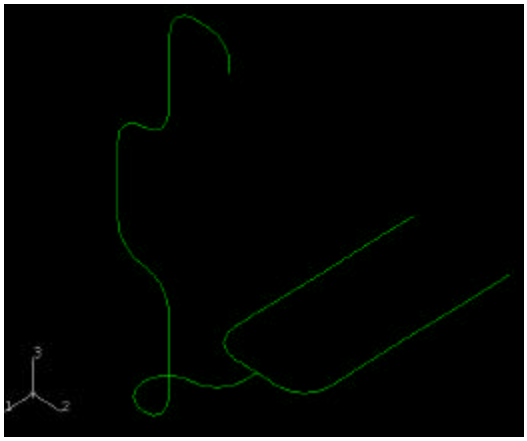

Fig. 6 비탄성 해석용 ABAQUS 해석 모델

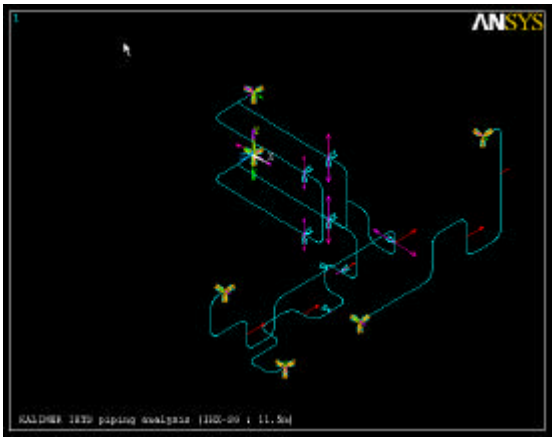

Fig. 7 탄성해석용 ANSYS 해석모델

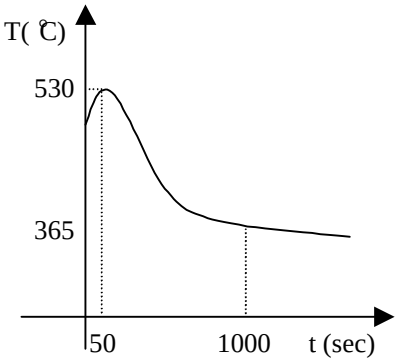

Fig. 8 해석과도 – 원자로정지

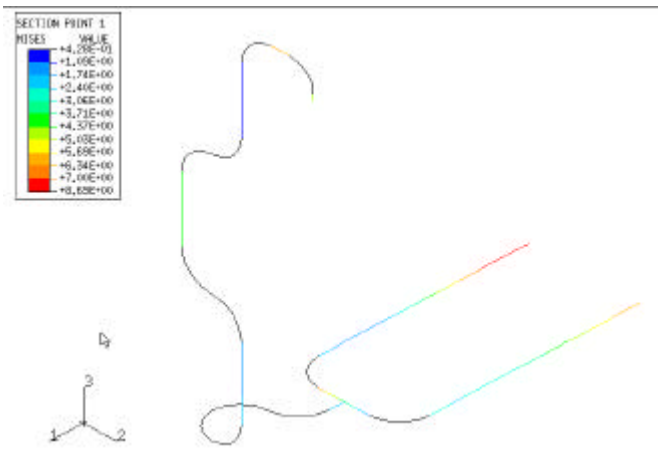

Fig. 9 Von Mises 응력분포

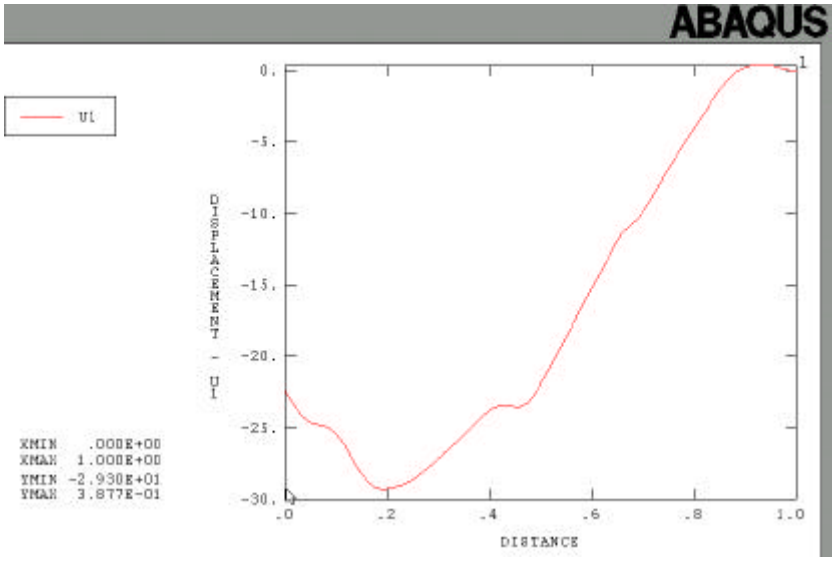

Fig. 10 Tee 접하부에서 SG 지지점까지의