2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

3-Pin FTL 노내시험부 관통부 구조물의 열응력 해석

Thermal-Stress Analysis of 3-Pin FTL IPS Penetration Structure

이종민, 박국남, 지대영, 박수기, 안성호, 심봉식, 이정영, 김영진
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

핵연료 노내조사시험을 위하여 하나로에 설치예정인 3-Pin FTL 은 노내시험부와 노외공정부로 구성되어 있으며, 17.5Mpa, 350℃의 고온·고압으로 설계되었다. 노내시험부와 노외공정부를 연결하는 하나로 갤러리 구역은 파단제외구역으로 규정되며 이에 따른 관통부 배관은 ASME 코드의 안전등급 1 로 설계되어 있다. 관통부 배관은 PCW 배관, MCW 배관 및 이들의 연결부로 구성된다. 본 연구에서는 관통부 냉각수를 통해 상온으로 유지되는 PCW(관통부냉각수)배관과 고온의 주냉각수가 흐르는 MCW(주냉각수)배관에 대하여 정상운전 상태시 열응력 거동을 살펴보고 이를 ASME Section Ⅲ NB Code 에 적용하여 비교·분석하였다. 이를 통하여 관통부 구조물은 코드의 허용응력 이내의 범위에 있음을 확인하였다.

Abstract

3-Pin Fuel Test Loop (FTL) composing the In-pile test section (IPS) and Out-pile system (OPS) has been developed for fuel rod irradiation test in HANARO and designed 17.5MPa, 350℃. Pipes installed in the pipe gallary connect the IPS and OPS are designed as a break exempt area and they have been designed according to the ASME code SC-1. Penetration pipe is composed of PCW pipe, MCW pipe and connection parts

In this study the penetration pipes in the pipe gallery composing the outer pipe that holds room temperature and the main cooling water pipe that holds transient temperature from 30℃ to 312℃ has been studied for its thermal-stress behavior in case of normal operation of FTL. Furthermore these results are applied to the ASME SectionⅢ NB code. Consequently it is concluded that the design of penetration pipe was in reasonable agreement with those code.

1. 서론

하나로(HANARO)[1]에 설치될 3-Pin 용 FTL[2]은 120kW 의 열제거 능력과 설계압력 17.5Mpa, 설계온도 350℃ 및 수화학 조절기능 등의 계통 운전조건을 보유하고 있는 정상상태 핵연료조사시험용 루프시설로서 노내시험부(In-Pile Test Section)와 노외공정설비(Out-pile System)로 구성되어 있다.

노내시험부는 원자로의 내부에 설치되는 핵연료 노내 조사시험 설비로서 외부압력관, 내부압력관, 내부조립체, 시험핵연료 운반체 등으로 구성되어 있으며 최대 3 개의 핵연료봉까지 장착할 수 있는 구조로 되어있다. 한편 시험핵연료의 조사조건 즉 압력, 온도, 유속, 수화학적조건 등을 유지하는 노외공정설비는 주냉각수계통, 비상냉각수계통, 기기냉각수계통 등 다수의 공정계통으로 구성된다.

이와 같은 노내시험부와 노외공정설비를 연결해 주는 연결 배관은 원자로를 둘러 싸고 있는 콘크리트에서 기기실 사이의 배관갤러리에 위치하게 되며, 특히 이 영역에서는 배관파열사고가 없도록 하기 위하여 ASME Code 의 안전등급 1(SC-1) 배관요건을 적용하게 된다. 관통부는 2 중의 배관으로 구성되어 있다. 외부배관은 콘크리트로 둘러싸여 있고 온도가 제한 온도 이상 상승하지 않도록 하나로의 수조수를 이용한 별도의 관통부냉각계통이 설계되어 있으며, 내부배관은 FTL 의 주냉각수가 흐르는 배관으로 정상운전시 압력은 17.5MPa, 온도는 최고 312℃까지 상승하는 과도하중을 받도록 설계되어 있다. 또한 배관 사이에는 단열재가 채워져 있어 외부배관의 온도 상승을 억제하도록 되어있다. 이들 배관은 외부배관의 끝단이 내부배관의 표면에 용접되는 구조로 되어 있어 정상운전시 연결부위에서는 온도차이로 인한 열응력을 발생시키게 된다.

본 연구에서는 관통부 냉각수를 통해 상온으로 유지되는 바깥쪽 배관과 고온의 주냉각수가 흐르는 배관에 대하여 정상운전 상태시 열응력에 대한 구조물의 거동을 살펴보고 이를 ASME Code[3]와 비교·분석하여 관통부 배관 설계의 타당성을 확인하고자 하였다.

2. 관통부의 모델링

2.1 유한요소 모델링

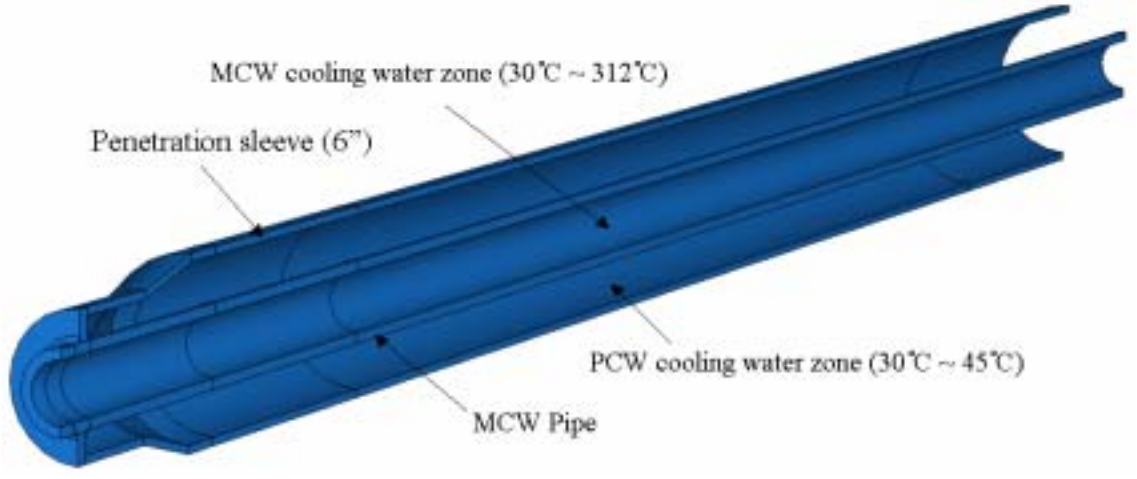

그림 1. 수조수 관통부의 모델링

관통부는 원주방향으로 대칭 형상을 이루고 있으므로 2 차원 축대칭 요소를 사용하였으며 그림 1 에 개략적인 형상[4]을 나타내었다. 콘크리트는 열응력 해석에 미치는 영향이 없는 것으로 가정하였으며, 단열재 부분 또한 구조해석에는 적용을 하지 않았다. 관통부 배관은 외경이 1.68m, 내경이 1.54m, 길이는 2m 이며 열과도하중이 적용되는 주냉각수배관은 외경이 73cm, 내경이 53cm, 길이는 2.5m 로 모델링을 하였다. 열전달해석에 있어서 연결부는 삼각요소(DCAX6)를 사용하였으며 나머지 부분은 사각요소(DCAX8)를 사용하였다. 해석은 범용 유한요소해석 코드인 ABAQUS6.4-1 를 사용하였으며, 해석모델은 1320 개의 8-절점 축대칭 열전달 요소 DCAX8, 44 개의 6 절점 축대칭 열전달 요소 DCAX6, 5200 개의 절점으로 구성되었다. 열전달 해석결과 구한 온도분포에 대하여 열응력 해석을 수행할 때는 CAX8, CAX6 요소를 사용하였다.

2.2 경계조건

열전달 해석을 위한 경계조건으로 PCW 배관의 안쪽온도는 정상운전을 위한 가열시간 동안 30°C에서 45°C까지 상승하는 것으로 설정하였다.[5] 배관 외부온도는 대기온도 30°C로 일정하게 유지되는 것으로 가정하였으며, 단열재와 접하는 부분은 완전단열로 가정하였다. 주냉각수배관은 1.6kg/s 의 물의 유동과 17.5MPa 의 수압에 기인하는 열전달계수를 사용하였고, 외부표면은 단열재에 기인하는 완전단열을 사용하였다. 주냉각수는 5 시간 동안 30°C에서 312°C로 증가하여 4 주간 유지되고 다시 5 시간 동안 30°C로 낮아져서 1 주일간 유지되는 열과도 하중이 작용하는 경계조건을 주었다.

Table 1 에서는 배관의 온도에 따른 열전달계수를 나타내었다 PCW 배관중 대기와 접하는 면의 열전달계수는 유동이 없는 대기중의 열전달계수를 사용하였다.[1] PCW 배관중 대기와 접하는 부분의 열전달계수는 유동이 없는 대기중의 열전달계수를 사용하였다.

Table 2 에서는 응력해석을 위한 경계조건 및 하중을 나타내었다. 축대칭 모델을 사용하였으며 따라서 원주방향으로의 변위는 나타나지 않게된다. 연결부위 쪽에 있는 MCW 배관은 지지대에 의하여 고정된 것으로 가정하여 축방향(Y-방향)으로의 변위를 구속하였다. 또한 콘크리트에 의하여 둘러싸인 PCW 배관부위는 완전구속된 것으로 설정하였다. Primary stress 경우와 Primary+Secondary stress 경우에 대한 코드적용을 위하여 압력만 작용하는 경우와 압력 및 열하중이 작용하는 경우에 대하여 해석을 수행하였다.

Table 1. Boundary conditions for heat transfer analysis

Location	Sink Temperature	Heat transfer coefficient	
Air surface	30°C	5 W/m^2K	
PCW Pipe	30°C	955.3 W/m^2K	
MCW Pipe	30°C	30°C	955.3 W/m^2K
		312°C	7263.6 W/m^2K

Table 2. Loads and boundary condition for stress analysis

Load case	Load	Value
Boundary condition	Bottom of MCW Pipe	Fixed in axial direction
	Concrete part of PCW Pipe	Fixed in all direction
Initial condition	Initial temperature – whole model	30°C
Pre-load	Pressure in MCW Pipe (5 hours)	0 MPa ~ 17.5 MPa
Pressure	Pressure in MCW Pipe (Normal operation)	17.5 MPa
Pressure+Thermal	Pressure in MCW Pipe (Normal operation)	17.5 MPa
	Temperature in PCW Pipe (Normal operation)	30°C ~ 45°C ~ 30°C
	Temperature in MCW Pipe (Normal operation)	30°C ~ 312°C ~ 30°C

2.3 재료물성

관통부의 PCW 배관과 MCW 배관은 원자로 배관에 주로 사용되는 316 스테인레스강으로 되어 있으며 해석에 사용된 재료의 기계적 물성은 Table 3 에 나타내었다. ASME Secton III에 따라 탄성계수는 저온상태로 가정하였으며 변형률이 1% 이상인 경우는 보수적 해석을 위하여 완전소성으로 가정하였다. Table 4 에는 열응력 해석을 위한 물성을 나타내었다.

Table 3 Mechanical porperties of 316 stainless steel

Young's modulus (GPa)	Yield stress (MPa)	Possion's ratio
193	124 179 191	0.3

Table 4 Thermal porperties of 316 stainless steel

Temperature (°C)	Conductivity (k)	Density (kg/m^3)	Specific heat (c)
30	13.655	7963.54	472.33
150	15.519	7908.18	509.70
312	18.193	7938.98	547.17

3. 관통부의 유한요소 해석

3.1 열전달 해석

그림 2 에는 정상운전상태의 조건에서 열전달해석 결과를 전체 모델에 대하여 나타내었다. 연결부의 온도는 307°C ~ 289°C까지 분포하였으며 PCW 배관을 따라 온도는 점차 감소하여 테이퍼 부분에서는 약 132°C ~ 69°C를 나타내었다.

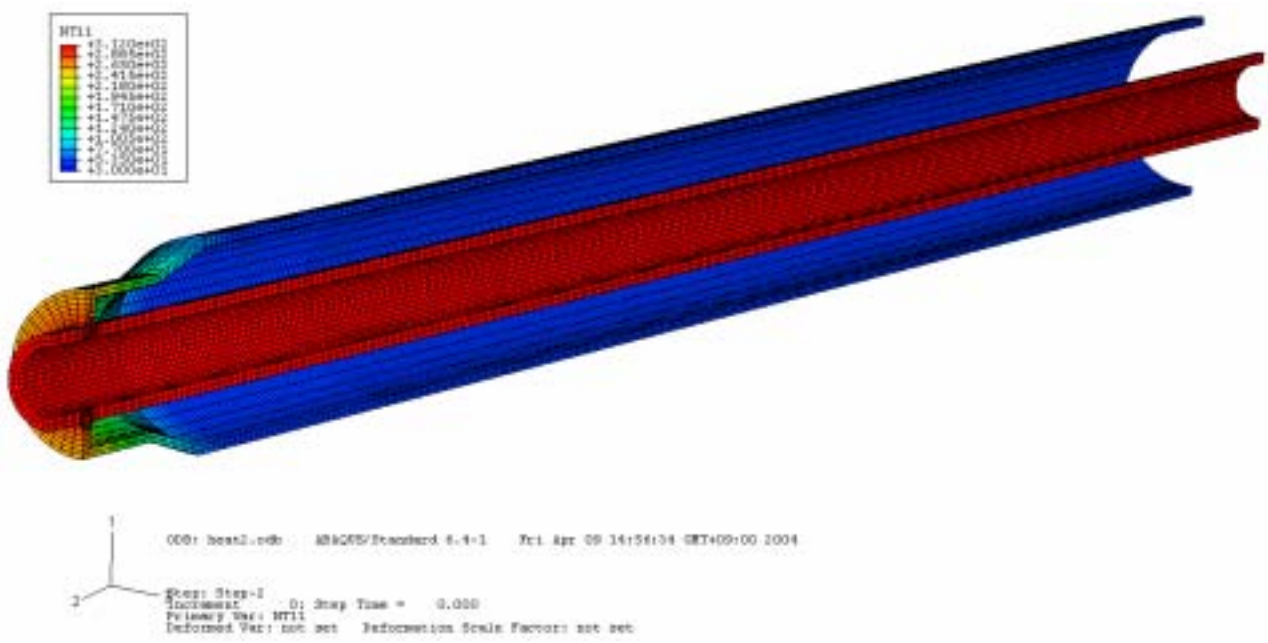

그림 2 Temperature profile of rotationed penetration pipe (180°)

3.2 응력해석

3.2.1 압력하중에 의한 응력해석

그림 3과 그림 4는 압력하중에 대한 연결부분의 Tresca 응력을 나타내었다. Tresca 응력은 최대주응력과 최소주응력의 차이 값의 반인 최대전단응력이 단일인장응력시험의 전단항복응력($\tau = \sigma_y/2$)과 같을 때 소성변형이 일어난다는 해석으로 ASME Code 에서 정의된 응력집중(Stress intensity)과 동일한 의미를 갖게 된다.

Tresca 응력에서 압력으로 인한 MCW 배관은 내부에서는 최대 76Mpa 의 응력을 나타내고 있으며 연결부위에서는 36 Mpa ~ 12 MPa 의 응력분포를 보이고 있다. 따라서 압력에 의한 관통부 구조물은 허용응력집중 범위 이내에 있음을 확인하였다.

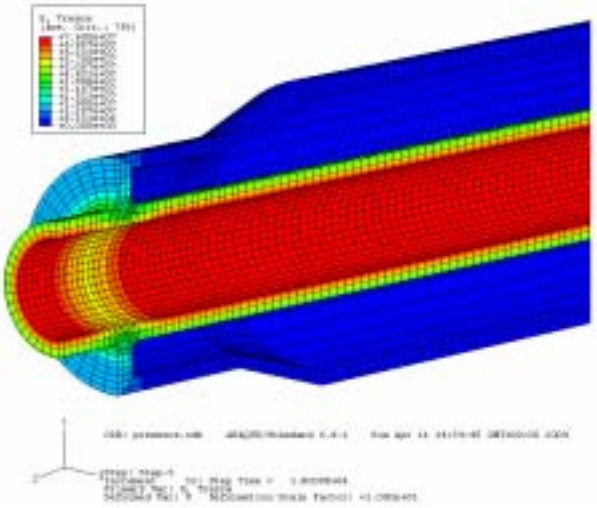

그림 3 Inside tresca stress

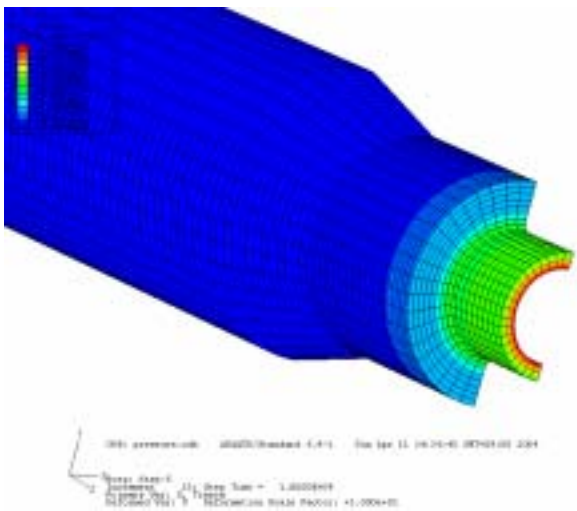

그림 4 Outside tresca stress

연결부에서 압력하중에 의한 응력은 원주방향응력(S33)이 지배적으로 작용하는 것으로 나타났으며 이를 막응력과 굽힘응력으로 나타내면 그림 5 및 그림 6과 같이 나타난다. 수직방향에 대하여 막응력은 30 MPa, 막응력+굽힘응력은 43 MPa 을 나타내었으며, 수평방향으로의 막응력이 18.6 MPa, 막응력+굽힘응력은 21.7 MPa로 나타났다.

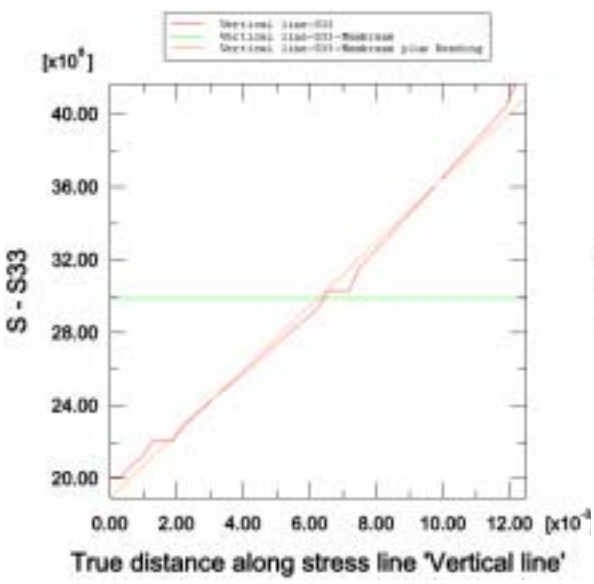

그림 5 Stress linearization along Vertical line

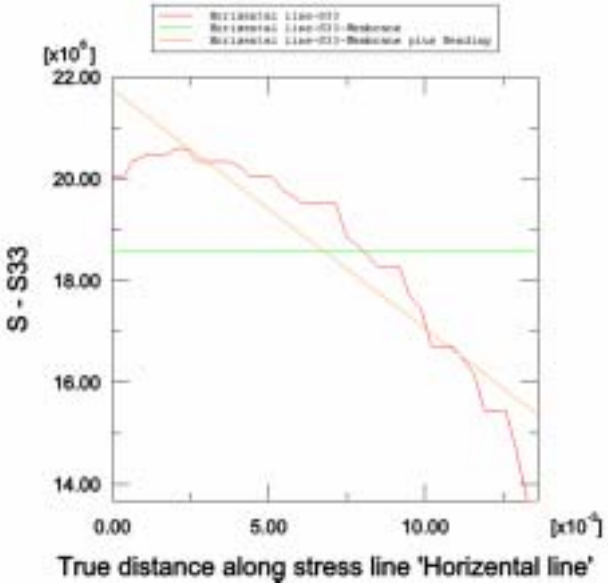

그림 6 Stress linearization along Horizental line

3.2.1 압력하중 및 열하중에 의한 응력해석

압력과 열하중에 대한 관통부의 변형을 50배 확대하여 그림 7에 나타내었다. 변형은 주로 연결부 주위에서 발생되며, 특히 MCW 배관에 의해 가해지는 압력과 온도분포는 PCW 배관 끝부분을 바깥쪽으로 변형되게 하며 이때 최대 변위는 약 0.34mm 정도로 나타났다.

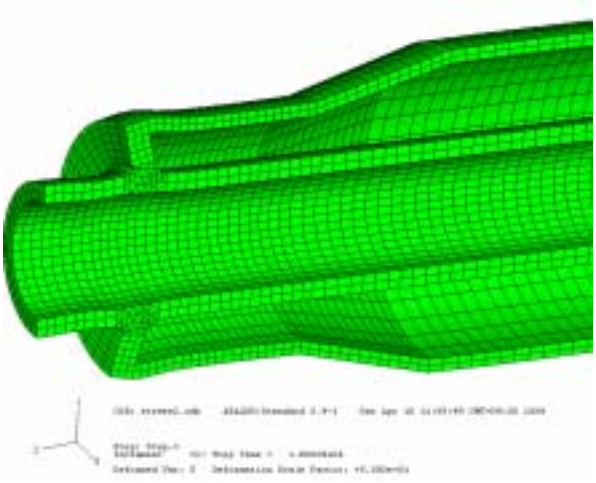

그림 7 Deformed shape of penetration pipe

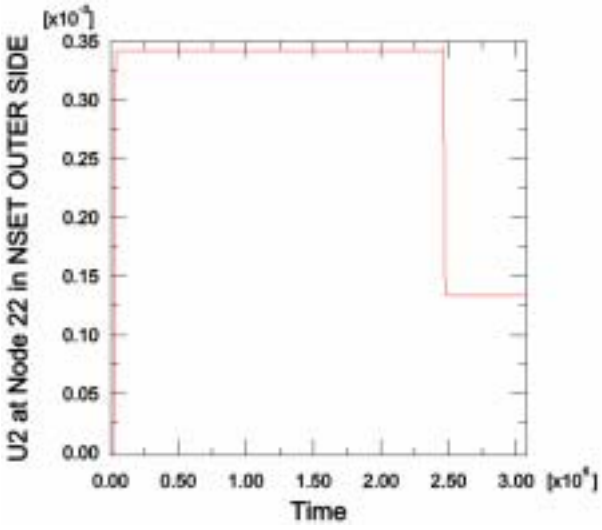

그림 8 Displacement of node 22

그림 9 와 10 에서는 온도하중 및 압력하중에 의한 관통부 내부와 외부의 Tresca 응력을 나타내었다. 최대 응력은 불연속 부위인 연결부분에서 최대로 나타났다. 그러나 이는 허용된 응력집중을 초과하지는 않았으며 이 영역을 제외한 부분에서는 이보다 훨씬 낮은 응력을 나타내었다.

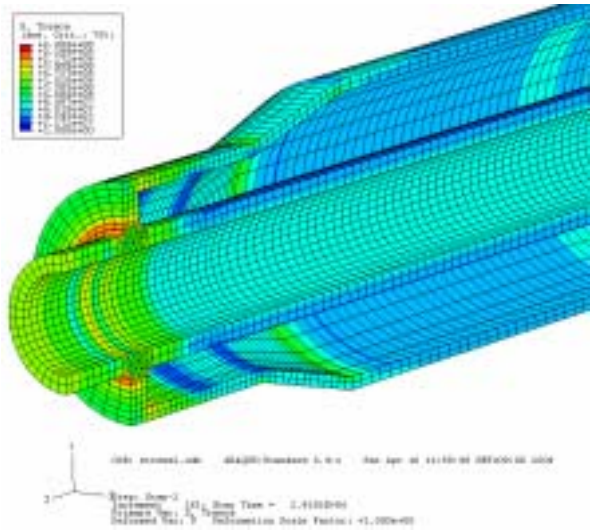

그림 9 Inside tresca stress

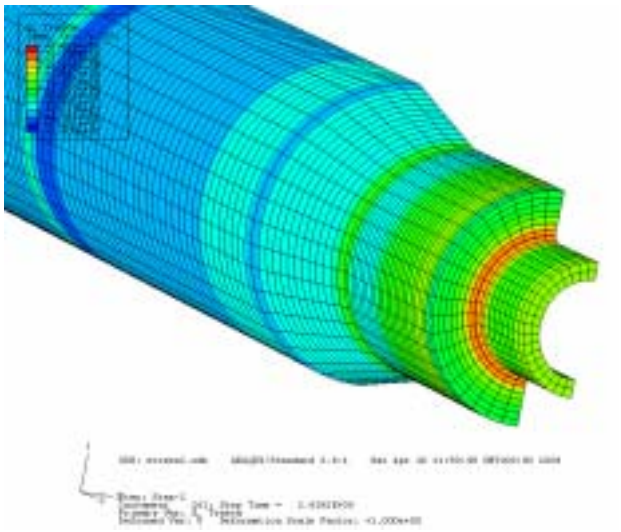

그림 10 Outside tresca stress

연결부에서 압력하중 및 온도하중에 의한 응력은 수직방향의 경우 모든 방향의 응력(S11, S22, S33)이 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 원주방향응력(S33)이 가장 크게 작용하는 것으로 나타났다. 이에 대한 막응력+굽힘응력은 그림 11 에 나타내었으며 최대 208 MPa 을 나타내었다. 수평방향의 경우는 반지름 방향 응력(S11) 및 원주방향 응력(S33)이 주로 영향을 미치는 것으로 나타났으며 그림 12 에 막응력과 굽힘응력을 나타내었다. 최대 응력은 약 265 MPa 정도로 나타났다.

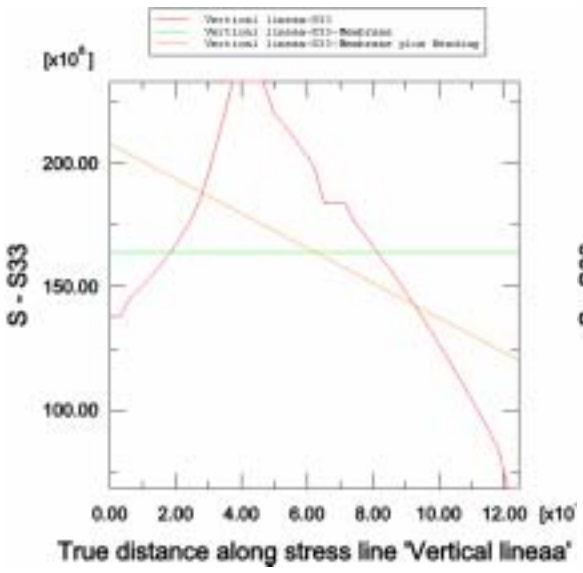

그림 11 Stress linearization along Vertical line

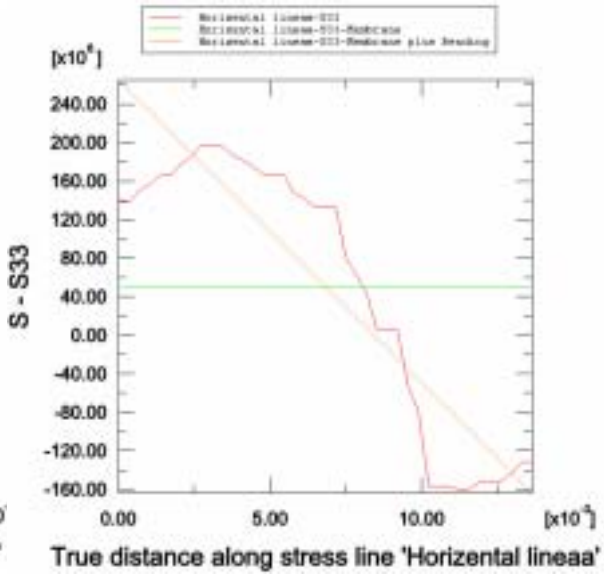

그림 12 Stress linearization along Horizental line

4. ASME SectionⅢ, Div Ⅰ, NB의 응력평가

ASME SectionⅢ NB 에서 언급된 응력강도는[5] 유한요소해석에서 계산된 Tresca 응력과 동등한 것으로 허용된 응력강도는 Table 2 에 주어졌다. 일차응력은 기계적인 하중에 기인하는 것으로 열하중은 제외되며 자체 한계를 갖지 않는 특징을 갖는다. 이차응력은 자체구속 또는 인접한 재료의 구속에 의해 발생되는 것으로 주로 열하중에 기인하게 된다.

Table 2 Allowable stress intensities

Stress Intensity	Tabulated value	316 Stainless steel
Design stress	S_m	117 MPa
Primary stress	$1.5\times S_m$	175 MPa
Primary + secondary stress	$3\times S_m$	351 MPa

일반적으로 막응력은 단면에서의 평균응력을 나타낸다. 관통부 유한요소 모델에서 막응력에 대한 해석은 연결부위를 기준으로 수직·수평부분에 적용하였고 그 결과, 연결부의 영향을 받지 않는 MCW 배관부에서는 압력하중으로 인한 막응력은 설계응력강도에 비하여 낮은 58 MPa 로 나타났다.

국부적인 막응력과 굽힘응력은 주로 단면이 변하는 부위 즉, 관통부의 두께방향을 따라 응력분포의 차이를 발생시키는 불연속 구조물의 형상으로 인하여 발생한다. 본 해석 모델에서 압력하중에 의한 연결부에서의 막응력과 굽힘응력의 최대값은 43 MPa 로서 허용값인 175 MPa 에 비하여 낮은 값으로 나타났다.

압력하중과 열하중을 모두 고려한 경우에는 일차응력과 이차응력의 합이 $3S_m$ 보다 작을 것을 요구하고 있는데 이 경우 국부응력집중으로 인한 첨두응력(peak stress)은 고려하지 않는다. 본 해석에서 일차+이차응력의 최대값은 연결부에서 265 MPa 이 발생하는데 이는 설계 제한값이 $3S_m$ 보다 작아 충분한 설계여유를 확보하고 있는 것으로 평가 되었다.

5. 결론

본 연구에서는 3-Pin FTL 관통부의 불연속 부위에 대하여 열응력 유한요소 해석을 수행하였으며 이를 ASME SectionⅢ NB 에 따른 응력평가를 하였다. 그 결과 압력에 의한 불연속 부위에서의 막응력과 굽힘응력은 43MPa 로서 $1.5\times S_m$ 이하로 나타났으며, 압력 및 온도하중에 의한 일차응력과 이차응력의 고려시에도 응력은 265 MPa 로서 $3\times S_m$ 이하로 나타났다. 따라서 관통부에 대한 설계는 타당한 것을 판단되며, 앞으로 주냉각수 배관의 가상배관파단사고 시 과도하중에 대한 상세해석이 요구된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 사업의 지원에 의하여 수행된 연구 결과입니다.

참고문헌

[1] Korea Atomic Energy Research Institute, HANARO Safety Analysis Report, KAERI/ TR-710/96, 1996.

[2] B. S. Sim et, Design of the Fuel Test Loop in the HANARO, Proceedings of 6th IGORR, 1998.

[3] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Appendix 1, 1998.

[4] MCW Supply and CCW Suction Isometric Drawing, FL-200-PD S002, Rev. 3, 1994

[5] D. Y. Chi, “Heat transfer in the In-Pile Test Section and Penetration Region of 3-Pin Fuel Test Loop”, KAERI/ TR-2624/2003, 2003.