

SMART 중앙덮개의 응력해석 및 최적설계

Stress analyses and optimal design for SMART central cover

김강수, 정경훈, 이규만
한국원자력연구소

요약

이 논문에서는 SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor) 압력용기의 덮개인 중앙 덮개가 작고 깊은 개구(opening)를 많이 포함하기 때문에 피복(cladding)에 어려움이 있다. 이를 극복하기 위해 재질을 탄소강대신 스테인레스강으로 하고 설계조건에서 응력해석 및 최적설계를 하였다. 스테인레스강 중앙덮개를 전형적인 axisymmetric solid 요소를 사용하여 2차원 축대칭으로 모델링한 다음 IDEAS 코드와 ANSYS 코드로 해석하였다. 또한 구멍이 많은 중앙덮개를 구멍이 없는 등가 탄성평판으로 변환하고 solid 요소를 이용한 등가탄성판 3차원모델을 해석하는 한편, 실제의 형상대로 구멍이 있는 중앙덮개를 1/4 모델링하여 실제 중앙덮개 3차원 모델로도 해석하였다. 또한 SMART 부품중 중앙덮개 및 환형덮개로 구성된 원자로 덮개가 압력용기 내부압력 17 MPa에 대하여 원자로 덮개의 재료가 최소체적이면서 주어진 응력에 견딜 수 있는 중앙덮개의 최적형상을 구하였다.

Abstract

The central cover of SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor) includes many penetrations due to various pipings and instrumentations and is made of the stainless steel instead of the carbon steel due to the difficulty of cladding on small deep holes. In this paper, the stress analyses and the optimal design in the design condition for the stainless steel central cover was performed. The stainless steel central cover was analyzed using 2-D axisymmetric model, 3-D equivalent solid plate model and 3-D real model with holes by ANSYS and IDEAS code. The analysis results showed that the stainless steel central cover met the requirements of Section III ASME code for the design pressure loading. Also, to get the optimal shape of the reactor cover which consists of a central cover and an annulus cover, the optimization was performed using ANSYS code.

1. 서론

압력용기의 재질은 스테인레스강보다 강도가 큰 탄소강을 주로 사용하고 부식을 방지하기 위해 오스테나이트계 스테인레스강으로 피복을 하지만 SMART (System-integrated Modular Advanced Reactor) 중앙덮개(그림 1, 2)의 개구는 개수가 많을 뿐만 아니라 작고 깊기 때문에 스테인레스 강으로 피복하기가 어렵다. 따라서 단조된 스테인레스강을 중앙덮개의 재질로 사용하면 기계가공한 자리에 스테인레스 피복을 하지 않아도 되므로 제작상 편리하며 제작비용도 절감할 수 있다. 따라서 재질이 스테인레스강이고 많은 구멍을 가진 중앙덮개가 설계압력 17 MPa에 견딜 수 있는지 여부를 확인하여 구조적 건전성을 평가할 필요가 있다. 이 논문에서는 스테인레스 강 중앙덮개를 전형적인 axisymmetric solid 요소를 사용하여 2차원 축대칭으로 모델링한 다음 IDEAS 코드[1]와 ANSYS 코드[2]로 해석하였다. 또한 구멍이 많은 중앙덮개를 구멍이 없는 등가 탄성평판으로 변환하고 solid 요소를 이용한 등가탄성판 3차원모델을 해석하는 한편, 실제의 형상대로 구멍이 있는 중앙덮개를 1/4 모델링하여 실제 중앙덮개 3차원 모델로도 해석하였다[3-5]. 또한 SMART 부품중 중앙덮개 및 환형덮개로 구성된 원자로 덮개가 압력용기 내부압력 17 MPa에 대하여 원자로 덮개의 재료가 최소체적이면서 주어진 응력에 견딜수 있는 원자로 덮개 최적설계의 형상을 구하였다.

2. 중앙덮개의 2차원 축대칭모델 해석

2.1 해석모델 및 해석방법

해석하고자 하는 중앙덮개는 그림 2와 같이 지름 2210 mm, 최소 두께 353 mm이고 덮개 아랫부분이 타원형의 형상이며 이 구조물은 ASME Section III NB3221[6]를 만족해야한다.

$$P_m < S_m, P_L < 1.5 S_m, P_L + P_b < 1.5 S_m$$

여기서, P_m = 일반 막응력, P_L = 국부 막응력, P_b = 굽힘 응력, S_m = 응력강도

설계압력은 17 MPa이며 중앙덮개의 재료로 다음 3종류를 고려하였다[7-10].

	오스테나이트 스테인레스강		탄소강
	SA 240 Type 321	SA 336 Class F321	SA 508 Class 4
Yield Strength (MPa)	205	207	483
Modulus of Elasticity (MPa)	173,103	173,103	183,448
Poisson's Ratio	0.27	0.27	0.3
Stress Intensity (MPa) 150 °C	138	138	206

유한요소해석 모듈을 갖춘 IDEAS 코드를 사용하여 모델링한 후 해석하고 그 모델을 ANSYS 입력자료로 변환하여 ANSYS 코드로 동시에 응력해석하였다. 중앙덮개는 축대칭이므로 2차원 axisymmetric 모델을 이용하고 경계조건은 중앙덮개에 걸쇠(segment gate)가 물리는 절점의 모든 변위(x, y, z 방향)를 구속하고 torus ring이 용접되는 절점에 수직방향(y 방향)으로 변위를 허용하고 수평방향(x, z 방향)의 변위는 구속하였다(그림 3).

참고문헌 [11]의 A-8132.4 (15)식에 의해서 다공판을 구멍이 없는 등가 탄성평판으로 변환할 수 있다. Ligament 효율은 다음과 같다.

$$\eta = \frac{h}{P} = \frac{h + (2E_t/E)t_t}{P} = 0.586$$

참고문헌 [11]의 그림 A.8131-1에서 $E^* = 0.62E = 108,179 \text{ MPa}$, $\nu^* = 0.29$ 이다. 구멍이 없는 등가탄성판으로 변환되었기 때문에 구멍내부에 작용하는 내부압력으로 인하여 발생하는 반경 혹은 hoop stress는 다음과 같이 계산되었다.

$$\sigma_{\theta} = \sigma_r = \sigma_{\theta} = \frac{h}{P} \frac{(P - h - 2t_t)}{[h + 2(E_t/E)t_t]} p_i = 4.468 \text{ (MPa)}$$

2.2 해석결과

1) ANSYS의 해석결과

그림 3과 같이 해석모델의 세부분을 자르고 해석 응력값을 중앙덮개 두께방향으로 선형화하여 해석한 결과 막응력과 굽힘응력은 다음과 같다.

	P_m (MPa)	$P_m + P_b$ (MPa)
cut 1 단면	35.640	183.807
cut 2 단면	84.357	100.324
cut 3 단면	86.057	134.112

2) IDEAS 코드의 해석결과

IDEAS 코드로 해석한 결과는 최대 주응력(Max. σ_1)이 105 MPa로 나타났고, 최대 전단응력 (τ_{\max})이 58.6 MPa이었으며 그림 4에 최대 전단응력 분포를 나타내었다.

3. 중앙덮개의 3차원 모델 해석

3.1 등가탄성판 3차원 해석모델

1) 해석모델 및 해석방법

중앙덮개에 hole이 없는 3차원 등가 탄성판으로 모델링하였다. 등가탄성계수는 앞에서 구한 값

($E^* = 108,179 \text{ MPa}$, $\nu^* = 0.29$)을 적용하여 해석하였고 적용하중은 내부압력 17 MPa를 적용하였다. IDEAS 코드의 등가탄성판 3차원 해석모델은 그림 5에 나타내었다.

2) 해석결과

해석결과는 최대 주응력(Max. σ_1)이 66.5 MPa이었고 최대 전단응력(τ_{\max})은 62.5 MPa이었으며 그림 6에 전단응력 분포를 나타내었다.

3.2 실제 중앙덮개 3차원 해석모델

1) 해석모델 및 해석방법

실제 hole이 있는 중앙덮개는 그림 2와 같이 중앙덮개 중심선을 축으로 하여 좌우대칭이므로 중앙덮개의 1/4만을 모델링하였다. 적용하중은 내부압력 17 MPa를 적용하고 또 내부압력 17 MPa와 41개의 제어봉집합체의 자중(한개 제어봉집합체의 자중: 650 kgf)을 동시에 적용하였다. IDEAS 코드로 1/4대칭 3차원 해석모델은 그림 7과 같다.

2) 해석결과

내부압력 17 MPa만을 적용한 해석결과는 최대 주응력(Max. σ_1)이 143 MPa, 최대 전단응력(τ_{\max})이 80 MPa로 나타났다. 그리고 내부압력 17 MPa와 41개의 제어봉집합체의 자중(한개 제어봉집합체의 자중: 650 kgf)을 동시에 적용하였을 때 해석결과는 큰 차이가 없었다. 그림 7은 해석모델의 주응력 분포를 나타내며 그림 8은 해석모델의 한단면에서 최대 전단응력 분포를 나타낸다.

4. 중앙덮개의 2, 3차원 해석결과의 검토

4.1 2차원 축대칭모델

막응력(P_m)이 가장 높게 나타나는 부위는 cut 3 단면으로서 86.057 MPa이고 이 값은 오스테나이트계 스테인레스강 A240의 허용응력강도값 $S_m=138 \text{ MPa}$ 아래에 있다. 막응력과 굽힘응력을 합한 값($P_m + P_b$) 이 가장 높게 나타나는 부위는 중앙덮개의 중앙부분인 cut 1 단면이며 이 값은 183.807 MPa로 나타났다. 이 값은 A240의 허용응력강도값 $1.5S_m=207 \text{ MPa}$ 아래에 있다. 중앙덮개의 응력해석 결과값들은 ASME 코드의 요건을 만족하므로 그림 2의 중앙덮개는 구조적으로 건전하다고 말할 수 있다.

4.2 3차원 해석모델

1) 등가탄성판 3차원 해석모델

주응력이 가장 높게 나타나는 부위는 중앙덮개의 중앙부위와 결쇠가 접촉하는 중앙덮개 가장

자리이므로 결쇠의 설계시 재료를 고강도 강을 사용해야 함을 알 수 있다. 등가탄성판 3차원 해석 모델보다 2차원 축대칭모델의 최대 주응력값이 다소 높게 나타났고 전체적인 응력분포도는 거의 같으므로 2차원 축대칭모델의 해석결과가 보수적이다. 2차원 축대칭모델의 전단응력 Colour Contour(그림 4)와 등가탄성판 3차원 해석모델의 전단응력 Colour Contour(그림 6)를 비교할 때 최대 전단응력값이 거의 같은 수준으로 나타났고 전체적인 응력분포도는 거의 같으므로 2차원 축대칭모델의 결과를 해석결과로 선택하는 것이 바람직하다.

2) 실제 중앙덮개 3차원 해석모델

구멍이 있는 실제 중앙덮개 3차원 해석모델에서의 최대 주응력과 최대 전단응력은 구멍의 가장자리에서 나타났고 매우 국소적이다. 또한 모든 값들은 스테인레스강 SA240의 항복값 아래에 있으므로 탄성 구조적측면에서 안전하다고 말할 수 있다. 결쇠부위에서 실제 중앙덮개 3차원 해석 모델의 응력값 수준은 등가탄성판 3차원 해석모델의 응력값 수준과 거의 같으므로 2차원 축대칭 모델, 등가탄성판 3차원 해석모델은 구조건전성 평가를 위해 적합한 해석모델임을 알 수 있다.

5. 원자로 덮개의 최적설계

5.1 이차원 축대칭모델의 예비응력해석

그림 2에서와 같이 원자로 덮개의 반경이 1850 mm이고 두께가 350 mm 일정한 스테인레스 다공판을 구멍이 없는 등가탄성 평판($E^* = 108179$ MPa, $\nu^* = 0.29$)으로 변환하고 ANSYS 코드를 사용하여 2차원 axisymmetric solid 요소로 모델링하였다. 작용하중은 내부압력 17 MPa이 적용되었고 경계조건은 원자로용기와 환형덮개가 연결되는 면의 모든 변위(x, y 방향)를 구속하였다.

5.2 이차원 축대칭모델의 예비응력해석 결과

그림 9와 10은 상기 모델의 응력해석 결과이며 그림 9는 주응력의 분포, 그림 10은 응력강도 (Stress Intensity)의 분포를 나타낸다. 그림 9에서 알 수 있듯이 모델의 중간영역에서의 주응력은 80 MPa이고 원자로용기와 환형덮개가 만나는 경계조건에 가까운 곳의 주응력은 120 MPa 이고 경계조건에서 주응력값은 460 MPa에서 522 MPa로 나타났다. 그림 10에서 알 수 있듯이 모델의 중간영역에서의 응력강도는 50 MPa이고 원자로용기와 환형덮개가 만나는 경계조건에 가까운 곳의 주응력은 190 MPa 이고 경계조건에서 주응력값은 564 MPa에서 634 MPa로 나타났다. 이 결과에서 알 수 있듯이 모델의 경계조건에 가까울수록 응력값이 높아져 재료의 항복값을 초과하기 때문에 탄성한도에 있도록 설계하기 위해서는 경계에 가까울수록 평판의 두께가 증가해야 함을 알 수 있다.

5.3 최적화를 위한 해석방법

그림 11에서와 같이 원자로 덮개의 반경이 1850 mm이고 두께가 350 mm 일정한 스테인레스 다공판을 구멍이 없는 등가탄성 평판($E^* = 108179$ MPa, $\nu^* = 0.29$)으로 변환하고 ANSYS 코드를 사용하여 2차원 axisymmetric solid 요소로 모델링하였다. 작용하중으로서 내부압력 17 MPa이 적용되었고 경계조건은 원자로용기와 환형덮개가 연결되는 면의 모든 변위(x, y 방향)를 구속하였

다. 최적화를 위해 주응력을 상태변수로 선정하였을 때, 최대응력값을 주응력 170 MPa, 최대처짐 3.5 mm로 제한하였다. 또한, 응력강도를 상태변수로 선정하였을 때, 최대응력값을 응력강도값 200 MPa, 최대처짐 3.5 mm로 제한하였다.

1) 설계변수

단면을 5등분하여 각 단면의 두께를 설계변수로 두었다. 최초의 두께는 350 mm이다. 즉, T17=350, T28=350, T39=350, T410=350, T511=350 이다.

2) 상태변수(state variables)

상태변수(state variables)는 최대응력값이며 최대응력값을 주응력일 때는 170 MPa, 최대처짐 3.5 mm로 제한하고 응력강도값일 때는 200 MPa, 최대처짐 3.5 mm로 제한하였다.

3) 목적함수(objective function)

목적함수(objective function)는 원자로덮개의 체적이며 이것을 최소화한다.

5.4 해석결과

1) 주응력 170 MPa, 최대처짐 3.5 mm로 제한하였을 때의 결과

First Order Method의 11번째 반복작업에서 주어진 제한에 대해 수렴하였으며 이 때의 주응력 값은 153.24 MPa이다. 원자로덮개의 체적을 최소화하는 설계변수의 값은 다음과 같다.

설계변수	각 단면의 두께 (mm)
T17	919.42
T28	436.41
T39	436.90
T410	515.66
T511	435.07
T612	350.00

2) 응력강도 200 MPa, 최대처짐 3.5 mm로 제한하였을 때의 결과

First Order Method의 21번째 반복작업에서 주어진 제한에 대해 수렴하였으며 이 때의 응력강도값은 169.05 MPa이다. 원자로덮개의 체적을 최소화하는 설계변수의 값은 다음과 같다.

설계변수	각 단면의 두께 (mm)
T17	919.18
T28	477.60
T39	392.63
T410	457.84
T511	350.00
T612	350.00

6. 결론

- 1) 스테인레스강(SA240)인 중앙덮개의 응력해석결과 ASME 코드 Section III, NB3221 Design Condition을 만족하므로 예비설계에서의 구조적 건전성은 입증된다.
- 2) 실제 중앙덮개 3차원 해석모델에서 41개의 제어봉집합체의 자중은 중앙덮개의 응력분포에 거의 영향을 미치지 않는다.
- 3) 2차원 축대칭 모델과 등가탄성판 3차원 해석모델은 중앙덮개의 구조건전성 평가를 위해 적합한 해석모델임을 알 수 있다.
- 4) ANSYS 코드의 최적화 모듈을 이용하여 압력용기 내부압력 17 MPa에 대한 원자로 덮개(중앙 덮개와 환형덮개)의 재료가 최소체적이면서 주어진 응력에 견딜수 있는 원자로 덮개 최적의 형상을 구하였다. 이 형상은 상세설계시 원자로덮개의 최적설계에 반영될 것이다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. I-DEAS FEM User's Guide, Structural Dynamics Research Corporation, Inc., 1994.
2. ANSYS, Swanson Analysis System Inc., Multi-purpose Finite Element Commercial Code, Rev. 5.4
3. K.S.Kim, K.H.Jeong, G.M.Lee, K.B.Park, "Integrity Evaluation of SMART Central Cover", Proc. of Korean Society Autumn Meeting, Section 10, Seoul Korea, October 1999.
4. KAERI/TR-1173/98, "Preliminary Stress Analysis for SMART Central Cover", November, 1998.
5. KAERI/RR-1888/98, "Development of Advanced Reactor Technology", March, 1999.
6. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components, Division 1, Subsection NB, Class 1 Components, 1995.

7. ASME Code, 1989 Edition with 1989 Addenda, Section III Appendices, Table I-1.2
8. SMART-CD-MS640-07, 08Cr18Ni10Ti 스테인레스강 plate, sheet, strip, 한국원자력연구소, 1998.8.29
9. SMART-CD-MS640-15, 08Cr18Ni10Ti 고온 고압용 단조 스테인레스강, 한국원자력연구소, 1998.8.7
10. SMART-CD-MS640-05, 15Cr2MoVA-A 압력용기용 재료시방서, 한국원자력연구소, 1998.3.31
11. ASME Section III Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components Division1- Appendices, 1995.

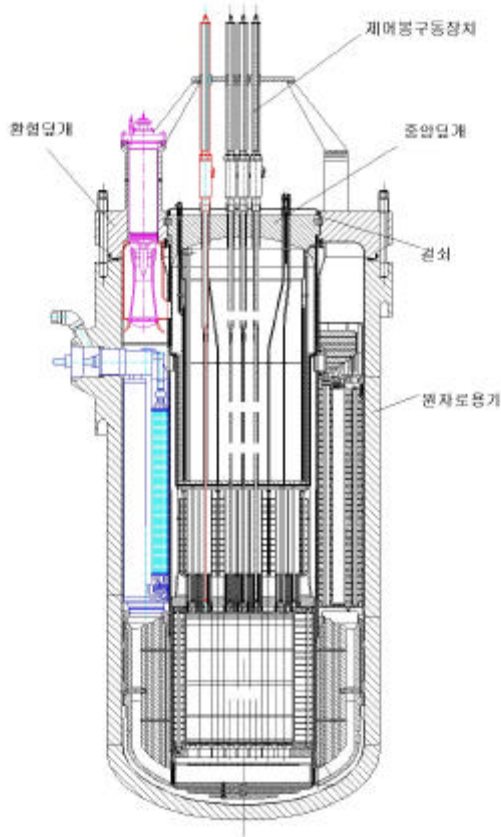


그림 1 SMART 원자로집합체

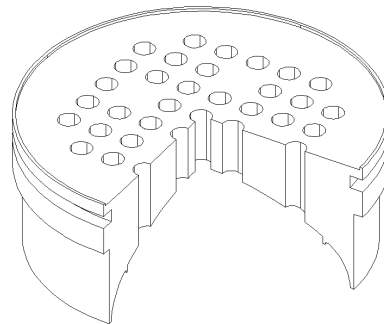


그림 2 중압덮개

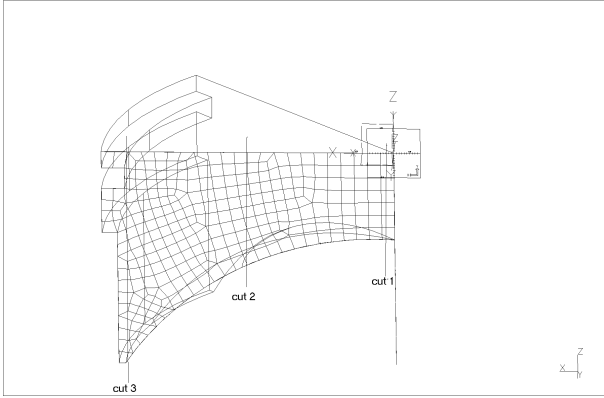


그림 3 이차원(2-D) 축대칭모델

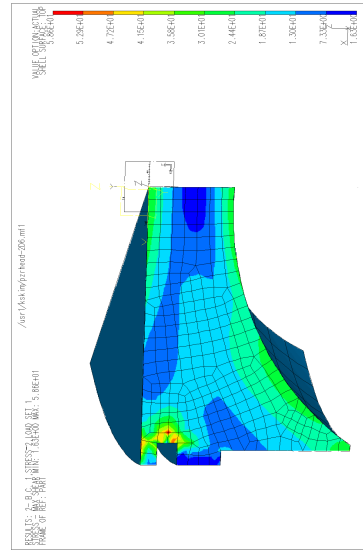


그림 4 최대전단응력 분포(2-D)

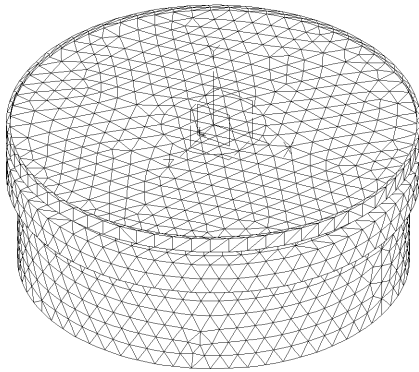


그림 5 삼차원(3-D)등가탄성판 모델

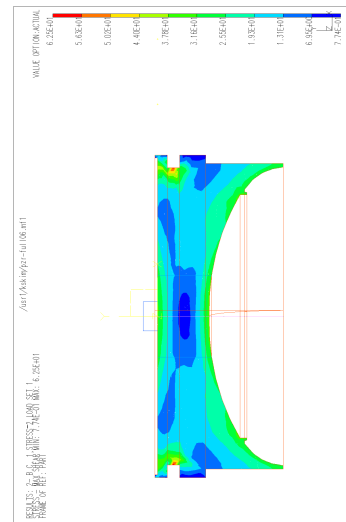


그림 6 최대 전단응력 분포
(3-D 등가탄성판 모델)

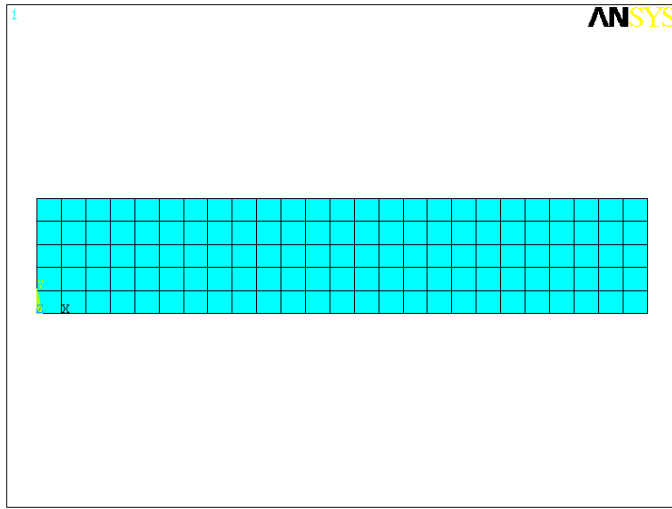


그림 11 원자로덮개의 최초 형상

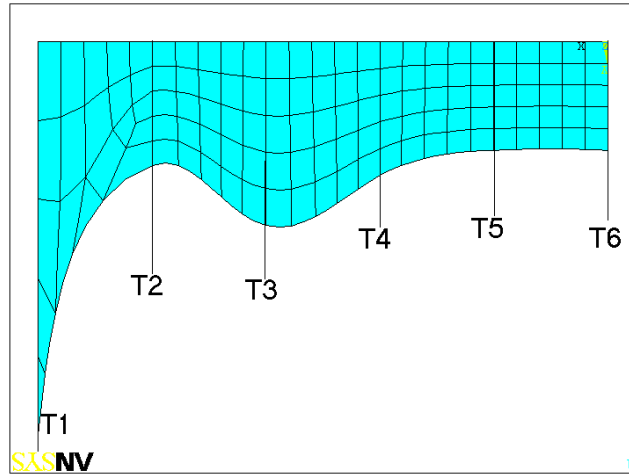


그림 12 원자로덮개의 최적형상(주응력을 제한한 경우)