

'99 추계학술발표회 논문집  
한국원자력학회

## SMART 원자로덮개의 건전성 평가

### Integrity Evaluation of SMART Central Cover

김강수, 정경훈, 이규만, 박근배

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

원자로 압력용기의 재질은 스테인레스강보다 강도가 큰 탄소강을 주로 사용하고 부식을 방지하기 위해 오스테나이트계 스테인레스강으로 피복(cladding)을 하지만 SMART (System-integrated Modular Advanced Reactor) 원자로 중앙덮개의 개구는 개수가 많을 뿐만 아니라 작고 깊기 때문에 가공 후 스테인레스강으로 피복하기가 어렵다. 따라서 단조된 스테인레스강을 중앙덮개의 재질로 사용한다면 기계가공한 자리에 스테인레스 피복을 하지않아도 되므로 제작상 편리하며 비용도 절감할 수 있다. 이 논문에서는 스테인레스강 원자로 중앙덮개를 axisymmetric solid 요소를 사용하여 2차원 축대칭으로 모델링하고 구멍이 없는 등가탄성판 3차원모델을 해석하는 한편, 실제 형상대로 구멍이 있는 중앙덮개를 1/4 로 각각 모델링하여 IDEAS 코드와 ANSYS 코드로 해석하고 그 결과를 평가하였다. 해석결과는 ASME 코드의 허용기준을 만족하였다.

#### Abstract

The reactor pressure vessel for the nuclear power plant has been made of carbon steel because of its high strength. Since the central cover of SMART includes many penetrations for various components, pipings and instrumentations, it is very difficult to clad on the surface after machining. If the central cover is made of stainless steel, both the corrosion problem and the cladding difficulty may be overcome and the manufacturing cost will be reduced. In this paper, SMART central cover is analyzed using ANSYS and IDEAS code for a 2-D axisymmetric solid element. Also, the central cover is modelled by 3-D equivalent solid plate and 3-D real model with holes, and these models are analyzed using IDEAS code. The analysis results show that stainless steel central cover meets requirements of Section III ASME Code for the design pressure loading.

## 1. 서론

일체형원자로 SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor)의 부품중 중앙덮개는 그림 1에서와 같이 원자로 압력용기의 덮개이며 동시에 가압기 덮개역할을 하며 이 부품은 내부에서 고온, 고압을 받고 있다. 특히 계통구성을 위해 가압기와 질소가스 실린더를 연결하는 지관이 설치되고 제어봉구동장치의 설치를 위한 41개의 노즐, segment gate의 랙-피니언 구동장치의 지관, 가압기의 냉각관에 공급되는 냉각수의 지관, 수위계의 지관, 저항온도계의 지관 그리고 노내 계측기 설치를 위한 지관들이 중앙덮개에 장착된다[1][2]. 이로써 중앙덮개는 그림 2와 같이 많은 개구(opening)가 있는 압력용기 구조물이 된다. 압력용기의 개구부는 그 형상의 불연속으로 인하여 응력집중이 발생하며 용접부에서의 균열가능성등 구조적 건전성에 많은 영향을 끼치므로 세부적 해석이 필요하다.

압력용기의 재질은 스테인레스강보다 강도가 큰 탄소강을 주로 사용하고 부식을 방지하기 위해 오스테나이트계 스테인레스강으로 피복을 하지만 SMART 중앙덮개의 여러개구 즉, Level Gage, Resistance Thermometer, Gas Cylinder, Over Pressure Protection 관이 지나가는 구멍들은 지름(20-22 mm)이 작고 깊기 때문에 가공 후 스테인레스 강으로 피복하기가 매우 어렵다. 따라서 단조된 스테인레스강을 중앙덮개의 재질로 사용한다면 기계가공한 자리에 스테인레스 피복을 하지 않아도 되므로 제작상 편리하며 비용도 절감할 수 있다. 따라서 재질이 스테인레스강이고 많은 구멍을 가진 중앙덮개가 설계압력 17 MPa에 견딜 수 있는지 여부를 IDEAS 코드[3]와 ANSYS 코드[4]로 해석하고 응력강도 값들이 ASME 코드[5]의 설계조건을 만족하는지 확인할 필요가 있다.

이 논문에서는 중앙덮개의 형상을 두가지로 선정하고 전형적인 Axisymmetric Solid 요소를 사용하여 2차원 축대칭으로 각각 모델링하여 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. 해석결과가 설계조건에서 ASME 코드를 만족하는지 여부를 따져 스테인레스강 중앙덮개의 구조 건전성을 평가하였다.

## 2 2차원 축대칭모델 해석

### 2.1 중앙덮개의 형상 및 치수

해석하고자 하는 중앙덮개의 형상 및 치수는 그림 2, 3과 같이 지름 2210 mm, 최소 두께 353 mm이고 덮개 아랫부분이 타원형의 곡률을 가진 모델 1[6]과, 그림 4와 같이 지름 2210 mm, 두께 520 mm이고 덮개의 아랫부분이 곡률이 없는 평판인 모델 2의 두가지이다.

### 2.2 설계한계 및 설계조건

설계한계는 소성붕괴 혹은 연성파괴의 파손모드를 방지하기 위한 것으로서, 구조물이 하중을 받더라도 탄성변형범위 내에서 거동하도록 설계하는 기준이 되며 설계조건(Design Condition)은

ASME Section III NB3221 [5]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

### 2.3 설계하중 및 재료의 성질

설계압력 17 MPa, 설계온도 150 °C 이며 중앙덮개의 재료로 다음 3종류를 고려하였다[7][8][9][10].

	오스테나이트 스텐레스강		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)	138	138	206

### 2.4 해석모델

#### 1) 2차원 축대칭모델

중앙덮개를 응력해석하기 위해 그림 3, 4와 같이 두가지 모델이 선정되었다. 모델 1은 내압을 받는 중앙덮개의 아래부분이 곡률반경을 가지는 타원형 형상이고 모델 2는 중앙덮개 아래부분이 곡률이 없는 평판이다. 모델 1과 모델 2는 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 segmenr gate가 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.

#### 2) 등가 탄성계수 계산

##### (1) T,Slot 방식

중앙덮개는 많은 구멍이 있는 판으로 전체적으로 볼 때 구멍의 패턴은 rectangular pattern이며 참고문헌 [11]에 따라 구멍이 없는 등가 탄성평판으로 변환하여 생각할 수 있다. 중앙덮개를

관통하는 지름이 작은 hole은 무시하였으며 지름이 큰 제어봉집합체 연장봉 안내관(지름 135 mm)을 위한 관통부만을 고려하였다.

$$\text{중앙덜개의 ligament efficiency } \eta = \frac{h}{P} = \frac{80.04}{215.04} = 0.3722$$

여기서  $h$  는 ligament의 폭,  $P$  는 hole 사이의 pitch이다.

참고문헌 [11]에 따라 등가 탄성계수 및 등가 Poisson's ratio는 다음과 같다.

$$E^* = E \times 0.4936 = 86,130 \text{ (MPa)}$$

$$\nu^* = 0.211$$

### (2) ASME 코드 방식

참고문헌 [12]의 A-8132.4 (15)식에 의해서 다공판을 구멍이 없는 등가 탄성평판으로 변환할 수 있다.

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

참고문헌 [12]의 그림 A.8131-1에서

$$E^* = 0.62 E = 108,179 \text{ MPa,}$$

$$\nu^* = 0.29$$

### 3) Hole 내벽의 압력영향 고려

실제 중앙덜개는 41 CEDM Guide Tube가 관통하는 두꺼운 판이지만 구멍이 없는 등가탄성판으로 변환되었기 때문에 구멍내부에 작용하는 내부압력으로 인하여 발생하는 반경 혹은 hoop stress는 고려되어야 한다. 이 응력은 참고문헌 [12]의 A-8132.4에 의해서 계산된다.

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

## 2.5 ANSYS 코드의 해석결과

### 1) 모델 1의 해석결과

모델 1에서는 등가탄성계수가  $E^* = 108,179 \text{ MPa}$ ,  $\nu^* = 0.29$  일 때와  $E^* = 86,130 \text{ MPa}$ ,  $\nu^* = 0.211$  일 때의 각각에 대해서 응력해석하였다. 그림 3과 같이 해석모델의 세부분을 자르고 해석 응력값을 중앙덜개 두께방향으로 선형화하여 막응력과 굽힘응력을 분석하였다. 즉 중앙덜개의 중앙부분인 cut 1 단면, 중앙부분과 Segment Gate가 물리는 부분의 중간지점인 cut 2 단면 그리고 Segment Gate가 물리는 부분인 cut 3 단면을 선형화하였다. 중앙덜개를 구멍이 없는 등가탄성평판으로 변환하여 ANSYS로 응력해석하였고 막응력강도계산은 참고문헌 [12]의 A-8142.1(a)를, 막응력과 굽힘응력 강도계산 절차는 참고문헌[12]의 A-8142.1(b)를 따른다. 구체적인 막응력 및 굽힘응력 계산은 다음과 같다.

(1)  $E^* = 108,179 \text{ MPa}$ ,  $\nu^* = 0.29$  일 때

	$P_m(\text{MPa})$	$P_m + P_g(\text{MPa})$
cut 1 단면	35,640	183,807
cut 2 단면	84,357	100,324
cut 3 단면	86,057	134,112

(2)  $E^* = 86,130 \text{ MPa}$ ,  $\nu^* = 0.211$  일 때

	$P_m(\text{MPa})$	$P_m + P_g(\text{MPa})$
cut 1 단면	32,767	187,545
cut 2 단면	81,654	99.0
cut 3 단면	71,308	142,594

## 2) 모델 2의 해석결과

그림 4와 같이 해석모델의 세부분을 자르고 해석 응력결과값을 중앙덮개 두께방향으로 선형화하여 막응력과 굽힘응력을 분석하였다. 즉 중앙덮개의 중앙부분인 cut 1 단면, 중앙부분과 Segment Gate가 물리는 부분의 중간지점인 cut 2 단면 그리고 Segment Gate가 물리는 부분인 cut 3 단면을 선형화하였다. 모델 2에서는 등가탄성계수  $E^* = 108,179 \text{ MPa}$ ,  $\nu^* = 0.29$  를 사용하였다. 구체적인 막응력 및 굽힘응력 계산은 다음과 같다.

	$P_m(\text{MPa})$	$P_m + P_g(\text{MPa})$
cut 1 단면	51,212	193,235
cut 2 단면	85,444	148,966
cut 3 단면	82,941	99,648

## 2.6 IDEAS 코드의 해석결과

중앙덮개를 그림 3과 같이 IDEAS 코드로 2차원 축대칭으로 모델링 한다음 IDEAS 코드로 해석한 결과를 Color Contour를 사용해서 나타내어 전체 단면의 응력분포를 한눈에 볼 수 있도록 하였다. 그림 5는 해석모델의 주응력 분포를 나타내며 최대 주응력( $\text{Max. } \sigma_1$ )이 105 MPa로 나타났다. 그림 6은 해석모델의 최대 전단응력 분포를 나타내며 최대 전단응력( $r_{\text{max}}$ )은 58.6 MPa로 나

타났다.

### 3. 3차원 모델 해석

그림 7과 8에서와 같이 단면만을 나타낸 2차원 모델이 아닌 3차원으로 실제에 가까운 모델링을 하였다. 중앙덮개에 hole이 없는 3차원 등가 탄성판으로 모델링하는 한편, 다른 또 하나는 실제 중앙덮개 3차원 모델로서 중앙덮개의 hole을 있는 그대로 모델링하되 중앙덮개의 중심축을 중심으로 hole pattern이 대칭이기 때문에 전체 중앙덮개의 1/4만을 모델링하였다.

#### 3.1 등가탄성판 3차원 해석모델

##### 1) 해석모델 및 경계조건

실제 hole이 있는 중앙덮개를 hole이 없는 등가 탄성판으로 변환하고 실제 중앙덮개 치수를 모델링하였다. 등가탄성계수는 앞에서 구한 두 값 ( $E^* = 86,130 \text{ MPa}$ ,  $E^* = 108,179 \text{ MPa}$ )을 모두 적용하여 해석하였고 경계조건은 중앙덮개에 segment gate가 물리는 접촉면에서는 x, y, z 방향의 모든 변위를 구속하였고 torus ring이 용접되는 중앙덮개의 상단 가장자리 용접면에서는 수직방향(y 방향)으로 변위를 허용하고 수평방향(x, z 방향)의 변위는 구속하였다. 적용하중은 내부압력 17 MPa을 적용하였다. IDEAS 코드의 등가탄성판 3차원 해석모델은 그림 7에 나타내었다. 사용한 요소는 quadratic 사면체 solid 요소를 사용하였고 요소수는 15,000개 정도였다.

##### 2) 해석결과

앞절에서 구한 등가 탄성계수 및 등가 Poisson's ratio의 값이  $E^* = 86,130 \text{ MPa}$ ,  $\nu^* = 0.211$  일 때 등가탄성판 3차원 해석모델의 해석결과는 최대 주응력(Max.  $\sigma_1$ )이 70.5 MPa, 최대 전단응력( $\tau_{\max}$ )이 68.9 MPa이었다. 그리고  $E^* = 108,179 \text{ MPa}$ ,  $\nu^* = 0.29$  일 때 해석결과는 최대 주응력(Max.  $\sigma_1$ )이 66.5 MPa, 최대 전단응력( $\tau_{\max}$ )이 62.5 MPa이었다. 두 해석결과값은 모두 탄성범위내에 있고 큰 차이가 나지 않으므로 등가 탄성계수 및 등가 Poisson's ratio를 결정하기 위해 ASME 코드의 절차에 따른  $E^* = 108,179 \text{ MPa}$ ,  $\nu^* = 0.29$ 를 적용하여 해석한 결과를 Color Contour로 나타내어 전체 단면의 응력분포를 한눈에 볼 수 있도록 하였다. 최대 주응력(Max.  $\sigma_1$ )이 66.5 MPa로 나타났고 그림 9는 해석모델의 한단면에서 최대 전단응력 분포를 나타내며 최대 전단응력( $\tau_{\max}$ )은 62.5 MPa로 나타났다.

#### 3.2 실제 중앙덮개 3차원 해석모델

##### 1) 해석모델 및 경계조건

실제 hole이 있는 중앙덮개는 그림 2와 같이 중앙덮개 중심선을 축으로 하여 좌우대칭이므로 중앙덮개의 1/4만을 모델링하였다. 경계조건은 중앙덮개에 segment gate가 물리는 접촉면에서는 x, y, z 방향의 모든 변위를 구속하였고 torus ring이 용접되는 중앙덮개의 상단 가장자리 용접면에서는 수직방향(y 방향)으로 변위를 허용하고 수평방향(x, z 방향)의 변위는 구속하였다. 그리고 1/4대칭 모델의 한쪽 경계면은 x 변위를 다른쪽 경계면은 z 변위를 구속하였다. 적용하중은 내부압력 17 MPa를 적용하고 또 내부압력 17 MPa와 41개의 제어봉집합체의 자중(한개 제어봉집합체의 자중: 650 kg)을 동시에 적용하였다. IDEAS 코드로 1/4대칭 3차원 해석모델은 그림 8에 표시하였다. 사용한 요소는 quadratic 사면체 solid 요소를 사용하였고 요소수는 40,000개정도 였다.

## 2) 해석결과

내부압력 17 MPa만을 적용한 해석결과는 최대 주응력(Max.  $\sigma_1$ )이 143 MPa, 최대 전단응력( $\tau_{max}$ )이 80 MPa로 나타났다. 그리고 내부압력 17 MPa와 41개의 제어봉집합체의 자중(한개 제어봉집합체의 자중: 650 kg)을 동시에 적용하였을 때 해석결과는 최대 주응력(Max.  $\sigma_1$ )이 140 MPa, 최대 전단응력( $\tau_{max}$ )이 78.4 MPa로 나타났다. 두 해석결과값을 비교할 때 제어봉집합체의 자중을 적용되었을 때 오히려 응력이 작아졌음을 알 수 있고 그 값은 커지않다. 내부압력 17 MPa만을 적용하여 해석한 결과를 Color Contour를 사용해서 나타내어 전체 단면의 응력분포를 한눈에 볼 수 있도록 하였다. 그림 10은 해석모델의 주응력 분포를 나타내며 그림 11과 12는 해석모델의 한단면에서 주응력분포와 최대 전단응력 분포를 나타낸다.

## 4 해석결과의 검토

### 4.1 2차원 축대칭모델

#### 1) 곡률반경을 가지는 모델 1

중앙덮개 구멍은 rectangular 배열이므로 참고문헌 [11]에 따라 구멍이 없는 등가 탄성평판으로 변환한  $E^* = 86,130 \text{ MPa}$ ,  $\nu^* = 0.211$  일 때의 해석결과와 중앙덮개를 triangular 배열로 간주하고 ASME 코드 Section III의 그림 A.8131-1에서 구한  $E^* = 108,179 \text{ MPa}$ ,  $\nu^* = 0.29$  값으로 해석한 결과를 비교하였을 때 큰 차이가 나지 않았다. 그러므로 중앙덮개는 구멍배열이 rectangular 배열이지만 triangular 배열로 간주하고 ASME 코드 Section III Appendix A, Article A-8000의 절차에 따라 설계하여도 무리가 없음을 알 수 있다. 곡률반경을 가지는 모델 1에서 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 나

타났다. 이 값은 A240의 허용응력강도값  $1.5S_{ms}=207 \text{ MPa}$  아래에 있다. 그러므로 중앙덮개 모델 1의 응력해석 결과값들은 ASME 코드의 요건을 만족하므로 그림 2, 3의 중앙덮개는 구조적으로 건전하다고 말할 수 있다.

#### 2) 곡률이 없는 평판 모델 2

중앙덮개를 그림 4와 같이 곡률이 없는 평판으로 모델링하고  $E^* = 108,179 \text{ MPa}$ ,  $\nu^* = 0.29$ 으로 해석한 결과를 검토하면 다음과 같다. 곡률이 없는 평판 모델 2에서 막응력( $P_{ms}$ )이 가장 높게 나타나는 부위는 cut 2 단면으로서  $85,444 \text{ MPa}$ 이고 이값은 오스테나이트계 스테인레스강 A240의 허용응력강도값  $S_{ms} = 138 \text{ MPa}$  아래에 있다. 막응력과 굽힘응력을 합한 값( $P_{ms} + P_b$ )이 가장 높게 나타나는 부위는 중앙덮개의 중앙부분인 cut 1단면이며 이 값은  $193,235 \text{ MPa}$ 로 나타났다. 이 값은 A240의 허용응력강도값  $1.5S_{ms} = 207 \text{ MPa}$  아래에 있다. 그러므로 중앙덮개 모델 2의 응력해석 결과값들은 ASME 코드의 요건을 만족하므로 그림 4의 곡률이 없는 평판 모델 2인 중앙덮개는 구조적으로 건전하다고 말할 수 있다. 따라서, 곡률이 없는 평판 중앙덮개는 곡률반경을 가지는 중앙덮개보다 제작상에 많은 잇점과 비용절감이 기대된다.

### 4.2 3차원 해석모델

#### 1) 등가탄성판 3차원 해석모델

그림 9에서 알 수 있듯이 주응력이 가장 높게 나타나는 부위는 중앙덮개의 중앙부위와 Segment Gate가 접촉하는 중앙덮개 가장자리이므로 Segment Gate 설계시 재료를 고강도 강을 사용해야 함을 알 수 있다. 2차원 축대칭모델의 주응력 Colour Contour(그림 5)와 등가탄성판 3차원 해석모델의 주응력 Colour Contour를 비교할 때 2차원 축대칭모델의 최대 주응력값이 다소 높게 나타났고 전체적인 응력분포도는 거의 같으므로 2차원 축대칭모델의 결과를 해석결과로 선택한다는 것은 보수적인 설계를 하는 셈이 보수성측면에서 2차원 축대칭 모델이 더 바람직하다. 2차원 축대칭모델의 전단응력 Colour Contour(그림 6)와 등가탄성판 3차원 해석모델의 전단응력 Colour Contour(그림 7)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 A240의 항복값 아래에 있으므로 탄성 구조적측면에서 안전하다고 말할 수 있다. Segment Gate 부위에서 실제 중앙덮개 3차원 해석모델의 응력값 수준은 등가탄성판 3차원 해석모델의 응력값 수준과 거의 같으므로 2차원 축대칭 모델, 등가탄성판 3차원 해석모델은 구조건전성 평가를 위해 적합한 해석모델임을 알 수 있다.



## 5. 결론

- 1) 그림 3과 같은 치수 및 형상의 스텐인레스강(A240)인 중앙덮개의 응력해석결과 ASME 코드 Section III, NB3221 Design Condition을 만족하므로 초벌설계에서의 구조적 건전성은 입증된다.
- 2) 그림 4와 같은 치수 및 형상의 스텐인레스강(A240)인 중앙덮개의 응력해석결과 ASME 코드 Section III, NB3221 Design Condition을 만족하므로 초벌설계에서의 구조적 건전성은 입증된다. 곡률이 없는 평판이므로 제작이 간편하여 비용 절감이 기대되므로 향후 상세설계 및 설계개량을 거쳐 SMART의 중앙덮개로 추천할 수 있다.
- 3) 실제 중앙덮개 3차원 해석모델에서 41개의 제어봉집합체의 자중은 중앙덮개의 응력분포에 거의 영향을 미치지 않는다.
- 4) 2차원 축대칭모델의 주응력이 등가탄성판 3차원 해석모델의 주응력보다 다소 높게 나타났으나 전체적인 응력분포도는 거의 같으므로 2차원 축대칭모델의 결과를 해석결과로 선택하는 것은 보수적인 설계이다. 2차원 축대칭모델의 전단응력은 등가탄성판 3차원 해석모델의 전단응력 거의 같은 수준으로 나타났으며 전체적인 응력분포도는 거의 같으므로 중앙덮개의 2차원 축대칭 모델링은 적합하다. 또한 실제 중앙덮개 3차원 해석모델의 응력값 수준은 국부적인 구멍 주변을 제외 하면 등가탄성판 3차원 해석모델의 응력값 수준과 거의 같다. 그러므로 2차원 축대칭 모델과 등가탄성판 3차원 해석모델은 중앙덮개의 구조건전성 평가를 위해 적합한 해석모델임을 알 수 있다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

## 참 고 문 헌

1. SMART-ME-SR440-00, 일체형원자로 가압기 계통설계요건서, 한국원자력연구소, 1998.1.30
2. SMART-ME-SD440-00, 일체형원자로 가압기 계통설명서, 한국원자력연구소, 1998.9.22
3. I-DEAS FEM User's Guide, Structural Dynamics Research Corporation, Inc., 1994.
4. "ANSYS", Swanson Analysis System Inc., Version 5.4
5. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components, Division 1, Subsection NB, Class 1 Components, 1995.
6. SLDWG-440-00-003, Rev. 00, CENTRAL COVER, 한국원자력연구소, 1998.8.29
7. ASME Code, 1989 Edition with 1989 Addenda, Section III Appendices, Table I-1.2
8. SMART-CD-MS640-07, 08Cr18Ni10Ti 스텐인레스강 plate, sheet, strip, 한국원자력연구소, 1998.8.29
9. SMART-CD-MS640-15, 08Cr18Ni10Ti 고온 고압용 단조 스텐인레스강, 한국원자력연구소, 1998.8.7
10. SMART-CD-MS640-05, 15Cr2MoVA-A 압력용기용 재료시방서, 한국원자력연구소, 1998.3.31
11. T. Slot, W.J. O'Donnell, "Effective elastic Constants for Thick Perforated Plates with square and Triangular Penetration Patterns", Journal of Engineering for Industry, ASME

paper Number 71-PVP-17,  
 12. ASME Section III Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components Division I -  
 Appendicies, 1989 Edition

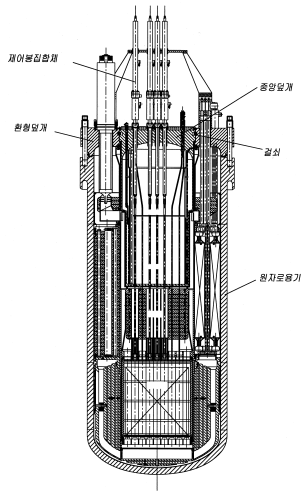


그림 1. 중앙노즐개위치

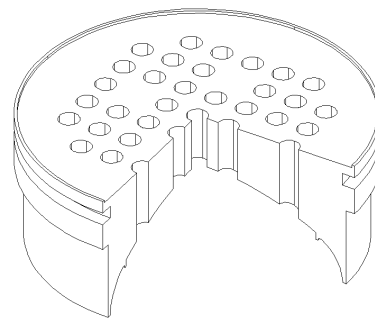


그림 2. 중앙노즐개 형상

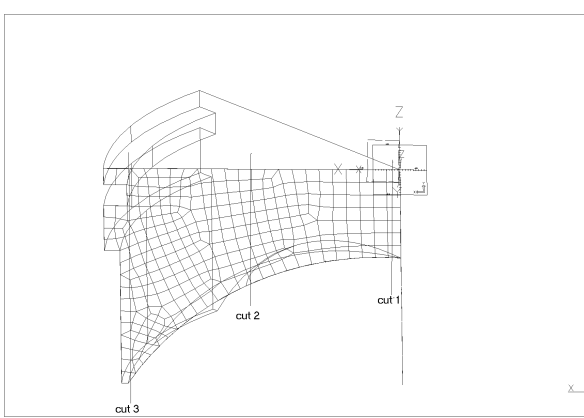


그림 3. 2차원축대칭 모델 1

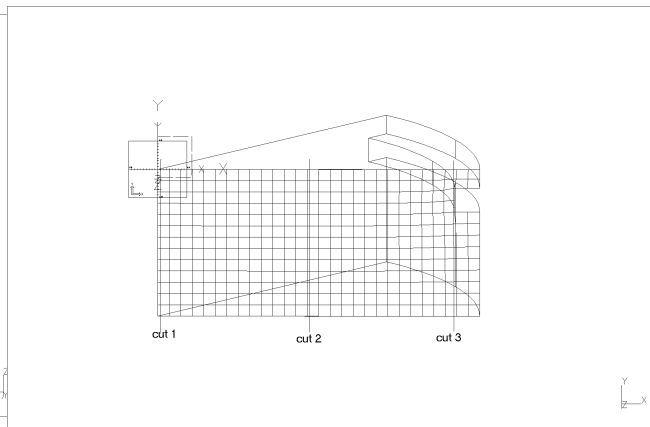


그림 4. 2차원축대칭 모델 2

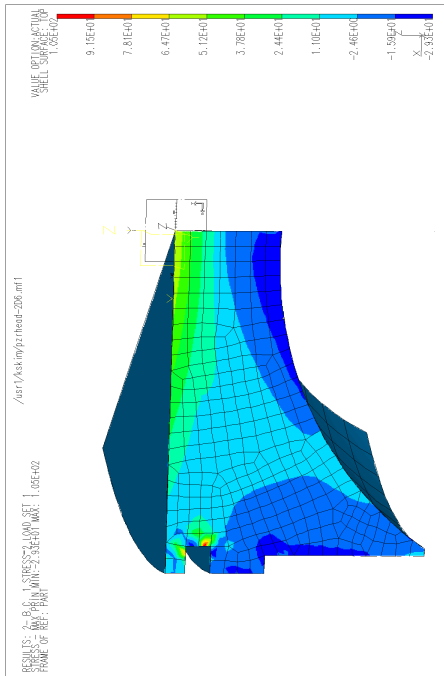


그림 5. 2차원모델(주응력분포)

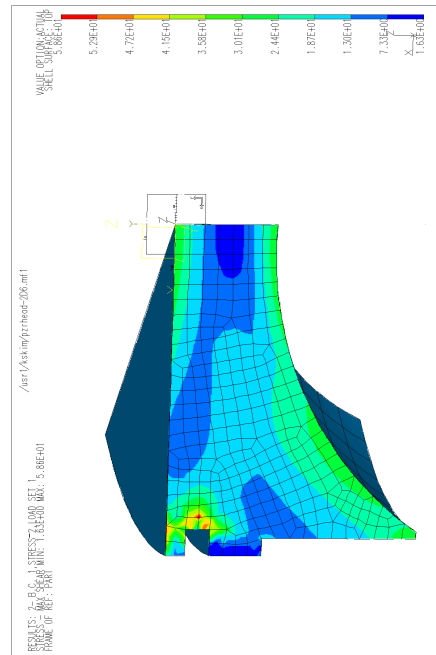


그림 6. 2차원모델(최대전단 응력분포)

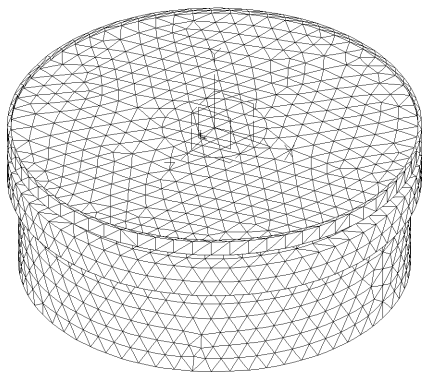


그림 7. 등가탄성판 3차원모델

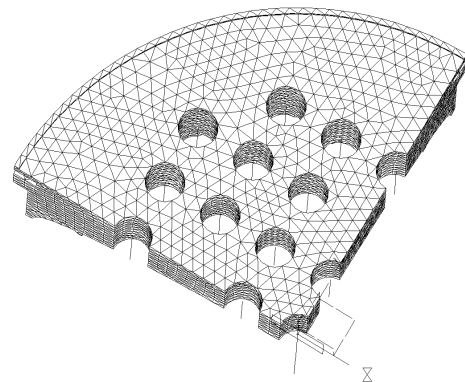


그림 8. 실제 3차원모델

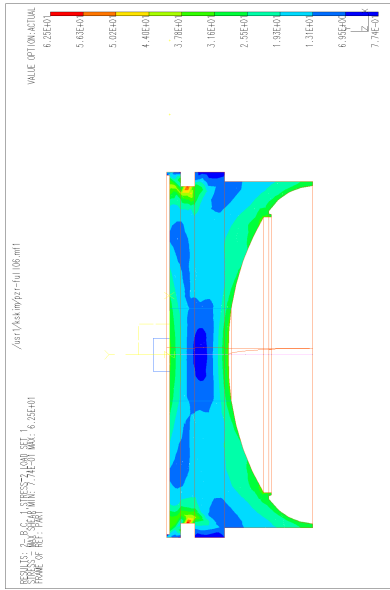


그림 9. 등가탄성판 3차원 전단응력분포

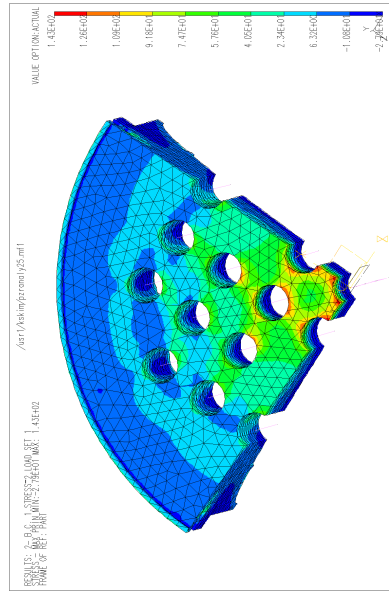


그림 10. 실제 3차원 주응력분포

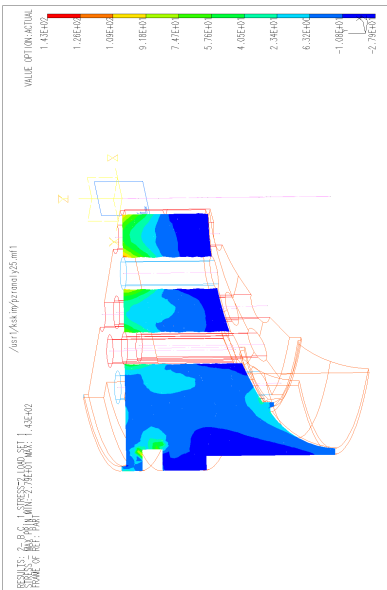


그림 11. 실제 3차원 단면 주응력분포

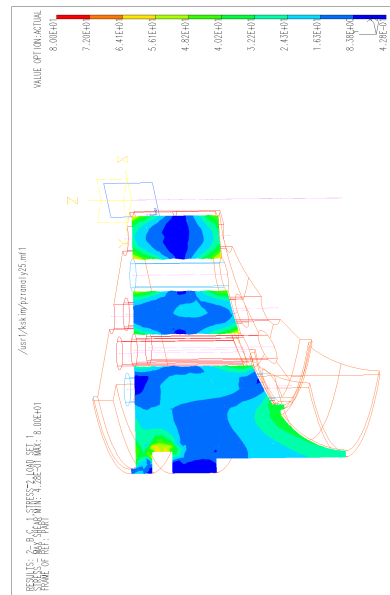


그림 12. 실제 3차원 단면 전단응력분포