

'99 춘계학술발표회 논문집  
한국원자력학회

## SMART용 $UO_2$ 핵연료 상·하단고정체의 구조건전성 평가

### Structural Integrity Evaluation on the Top/Bottom End Piece of the $UO_2$ -based SMART Fuel

송기남, 정연호, 강홍석  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

송치훈, 김영군  
인턴연구원

#### 요 약

17×17형 KOFA 연료를 근간으로 330MWt급 SMART용  $UO_2$  핵연료가 예비 설계되었다. SMART용  $UO_2$  핵연료의 상·하단고정체에 대하여 4g 설계하중 하에서 구조 건전성을 ANSYS 5.3 Code의 3-D 유한요소를 이용한 유한요소 응력 해석으로 평가하였다. 유한요소 응력해석 결과, SMART용  $UO_2$  핵연료의 상·하단고정체는 4g 설계하중 하에서 설계기준을 만족하고 있어서 구조 건전성이 충분히 유지되고 있다.

#### Abstract

Based on the 17×17 type KOFA, the design features of the top/bottom end piece for the 330MWt SMART have been established. Using the 8 noded-brick element of ANSYS ver. 5.3, finite element models for the top/bottom end piece have been established. And the structural integrity evaluation of the top/bottom end piece has been carried out through finite element stress analyses under the 4g design load. As the result of the stress analyses on the top/bottom end piece, the structural integrity of the top/bottom end piece for the  $UO_2$ -based SMART fuel were maintained under the 4g design load.

## 1. 서 론

근래에 열과 전기를 동시에 생산하며 안전성을 제고하기 위한 방법으로 증기 발생기 및 냉각수펌프를 압력용기 안에 가두는 일체형원자로(System-integrated Modular Advanced Reactor)가 KAERI에서 설계되고 있다. 330MWt급인 이 원자로에 사용될 연료로  $UO_2$  핵연료가 하나의 방안으로 제시되어서 KAERI와 Siemens/KWU사가 공동으로 설계한 17×17형 KOFA 연료가 SMART용  $UO_2$  핵연료의 기준연료로 대두되었다. 그런데 SMART는 노심의 크기, 노심구조물 간의 연계사항이 기존 경수로에 비해 상이하기 때문에 KOFA 연료를 기준연료로 사용한다 하더라도 핵연료의 크기, 구조부품들의 형상이 SMART에 맞게 설계변경 되어야 한다.

SMART용  $UO_2$  핵연료의 상단고정체 및 하단고정체는 그림 1과 같이 핵연료 집합체의 최상단 및 최하단에 위치한 부품으로 5개의 지지격자체들과 더불어 안내관으로 연결되어 골격체를 이루는 주요 구조부품으로서 노심내에서 핵연료봉의 횡방향 간격을 유지하게 해주며 연료봉들이 핵연료집합체의 상·하부로 이탈되지 않도록 하는 기능 외에 핵연료집합체 상·하부로부터 전달되는 여러 하중을 지지하고 하부노심판으로 전달하는 기능을 갖고 있다.

본 연구에서는 KOFA 연료의 상·하단고정체를 기본모형으로 하되 SMART 노심에 부합되도록 SMART용  $UO_2$  핵연료의 상·하단고정체를 개념설계하고[1], 이들 구조부품들이 SMART 원자로의 운전 및 비운전 중에 핵연료에 작용하는 모든 하중 중에서 가장 큰 하중인 4g 설계하중 하에서 구조 건전성이 유지될 수 있는지를 수치해석적으로 평가하고자 한다. 수치해석적 구조 건전성 평가는 ANSYS[2]의 3-D 유한요소를 이용한 유한요소모델에 대하여 응력해석을 수행하고 ASME code Section III[3]에서 규정된 응력강도 기준의 만족여부를 분석하고 평가하였다.

## 2. SMART용 $UO_2$ 핵연료의 상·하단고정체 형상설계

17×17형 KOFA 연료의 상·하단고정체에서는 계측기가 핵연료집합체 하단으로부터 삽입되며 24개의 안내관과 1개의 계측기 수용구멍을 갖는 구조로 설계되어 있다. 그런데 SMART 노심에서는 계측기가 핵연료집합체 상부로부터 그리고

정중앙에서 벗어난 곳으로 삽입되고 21개의 제어봉이 삽입될 수 있는 핵연료가 요구되고 있다. 따라서 SMART용  $UO_2$  핵연료의 상·하단고정체는 25개의 안내관 수용구멍을 갖추게 설계되었다. 그림 2는 SMART용  $UO_2$  핵연료 상단고정체 상부유로판의 형상을 그리고 그림 3은 SMART용  $UO_2$  핵연료 하단고정체 하부유로판의 형상을 나타낸 것이다.

### 3. 유한요소 모델

#### 3.1 상단고정체 응력해석

##### 3.1.1 상단고정체 Global 유한요소모델에 대한 응력해석

상단고정체 유한요소 응력해석 모델은 대칭성을 고려하여 상부유로판에 두름판이 부착된 형상의 1/4을 채택하였다. 해석에 사용된 요소는 Isoparametric 3-D solid element로서 ANSYS의 SOLID45이며 상부 유로판은 5층의 nodal plane, 4층의 체적요소 층으로 나누어져 있으며 두름판은 4층의 체적요소 층으로 나누어져 있다. 유한요소모델에서 총 node 수는 6577이며, 총 element 수는 3596이었다. 그림 4는 상단고정체에 대한 Global 유한요소모델을 나타낸 것이다.

상단고정체의 유한요소 응력해석은 계산의 편의성을 높이고 해석시간을 줄이기 위하여 다음과 같은 가정을 도입하였다. 핵연료집합체 자중의 4배에 해당되는 설계하중이 25개의 안내관 수용구멍에 균일하게 분포한다. 치수는 공칭치수를 이용하며 유로구멍, 모서리 및 표면 등에서의 표면조도 및 가공오차 등은 무시한다. 상부유로판의 유로구멍 주변의 가공 챔퍼(chamfer) 등은 무시한다. 대칭성을 고려하여 상부유로판의 1/4을 해석모델로 취한다.

경계조건으로서 유한요소해석을 하고자 하는 상부유로판 및 두름판의 대칭면에서 면에 수직한 변위를 구속한다. 또한 두름판 상단면에 수직한 변위를 구속한다. 하중조건으로서 운전 및 비운전의 여러 조건에서 상단고정체에 작용하는 하중들 중에서 가장 큰 하중은 운송 및 취급시의 설계하중 즉, 4g에 해당하는 핵연료집합체 정하중이 25개의 안내관 수용구멍에 균일하게 작용하는 것으로 가정하였다. 유한요소 응력해석모델에 사용된 재질의 물성치는 다음과 같다.

- 상온에서 SUS 304의 물성치 :

$$\text{탄성계수}(E)=200,000\text{N/mm}^2$$

포와송 비( $\nu$ )=0.3

항복응력( $\sigma_y$ )  $\geq 205\text{N/mm}^2$

인장강도( $\sigma_w$ )  $\geq 500\text{N/mm}^2$

그림 5는 그림 4의 Global 유한요소모델에 대한 응력해석을 수행한 결과, 상부 유로판 아래면에서 응력강도의 분포를 나타낸 것이다. 그림 5에서 보면 최대 응력강도는 상부유로판 중앙 부위에 있는 유로구멍 주변의 1개 절점 주변에서 발생하였는데 상단고정체에서의 최대 응력강도의 크기는 상부유로판 아래면에서  $184.32\text{N/mm}^2$ 이었다. 이 값은 ASME code NB-3000에 규정된 굽힘응력 및 막응력에 대한 설계한계치( $1.5S_m = \sigma_y = 205\text{N/mm}^2$ )의 약 89.9%정도로서 설계기준을 만족하고 있다.

### 3.1.2 상단고정체 Submodel에 대한 응력해석

그림 5에서 보듯이 최대응력이 발생한 부위의 유한요소가 주변의 기하학적 불연속성(즉, 구멍)에 비하여 비교적 크기 때문에 최대응력이 발생한 부위에 대하여 상세응력해석을 수행할 필요가 있다. 따라서 이러한 응력강도의 첨두치가 국부적으로 발생하였는지 아니면 유로구멍 주변의 ligament 두께/너비 전반에 걸쳐서 발생하고 있는지를 알아보기 위하여 최대 응력강도가 발생한 유한요소 주변을 이전의 연구[4]에서 그 유용성이 입증된 ANSYS의 submodel 기법을 이용하여 상세응력해석을 수행하였다.

상세응력해석은 최대 응력강도가 발생한 유한요소 주변을 sub region으로 선택하여 선택된 sub region에서 유한요소의 크기가 Global 모델의 유한요소 크기보다 1/4이 되도록 유한요소를 세분하였다. 그림 6과 그림 7은 상부유로판 아래면에서 첨두응력이 발생한 부위의 유한요소를 세분한 상세응력해석용 유한요소 submodel을 나타낸 것이고, 그림 8과 그림 9는 응력강도의 분포를 나타낸 것이다. 그림 8과 그림 9에서 보듯이 재료의 항복응력을 초과하는 부위의 크기는 상부유로판 두께방향으로 약 1.8mm, ligament 너비방향으로 약 0.13mm 그리고 ligament 길이방향으로는 약 1.04mm 정도로서 매우 국부적임을 알 수 있고, 또한 최대 응력강도의 값이  $238.26\text{N/mm}^2$ 이었다. 따라서 ASME code NB-3000에 규정된 국부응력에 대한 설계기준( $3.0S_m = 410\text{N/mm}^2$ )보다 훨씬 작아서 SMART

용  $UO_2$  핵연료의 상단고정체의 구조 건전성은 유지되는 것으로 볼 수 있다.

### 3.2 하단고정체 응력해석

ANSYS를 이용한 하단고정체 유한요소해석 모델은 대칭성을 고려하여 하부유로판에 다리가 부착된 형상의 1/8 section만을 채택하였다. 해석에 사용된 요소는 Isoparametric 3-D solid element(SOLID45)이며 하부유로판은 5층의 nodal plane, 4층의 체적요소 층으로 나누어져 있으며 다리는 7층의 체적요소 층으로 나누어져 있다. 유한요소모델에서 총 node 수는 11018이며, 총 element 수는 6999이었다. 그림 10은 하단고정체에 대한 유한요소모델을 나타낸 것이다.

해석을 위해 도입한 가정은 상단고정체와 동일하며 응력해석을 위한 경계조건으로서 하부유로판 및 다리의 대칭면에서 면에 수직한 변위를 구속한다. 또한 다리 하단면에 수직한 변위도 구속한다. 하중조건으로서 운송 및 취급시에 하단고정체에 작용하는 설계하중 즉, 4g에 해당하는 핵연료집합체 정하중이 25개의 안내관 수용구멍에 균일하게 작용하는 것으로 가정하였다. 해석에 사용된 하단고정체 재료의 물성치는 상단고정체의 그것과 동일하다.

응력해석을 수행한 결과, 최대 응력강도는 하단판과 다리 접합부 근처에서 발생하였으나( $120,64N/mm^2$ ) 이 부위는 구조적으로 크게 주목받을 부위는 아니다. 그림 11은 하부유로판 윗면에서 응력강도의 분포를 나타낸 것으로 그림 11에서 보면 하부유로판에서 최대 응력강도는 하부유로판 중앙 부위에 있는 유로구멍 주변의 1개 절점 주변에서 발생하였는데 최대 응력강도의 크기는  $92,88N/mm^2$  이었다. 이 값은 ASME code NB-3000에 규정된 굽힘응력 및 막응력에 대한 설계한계치( $1.5S_m$ )의 약 45.3%정도로서 설계기준을 충분히 만족하고 있다. 따라서 SMART용  $UO_2$  핵연료의 하단고정체의 구조 건전성은 유지되는 것으로 볼 수 있다.

## 4. 결 론

330MWt급 SMART용  $UO_2$  핵연료의 상·하단고정체를 개념설계하고 이들 부품에 대해 4g 설계하중 하에서 구조 건전성을 ANSYS code를 이용한 유한요소 응력해석을 통하여 수치해석적으로 평가하였다. 상·하단고정체에 대한 유한요소

응력해석 결과는 다음과 같다.

1. Global/Sub-model 기법을 이용하여 SMART용  $UO_2$  핵연료의 상단고정체에 대하여 유한요소 응력해석을 수행한 결과, ASME code NB-3000의 응력설계 기준을 만족하고 있어서 SMART용  $UO_2$  핵연료의 상단고정체는 4g 설계하중 하에서 구조 건전성이 유지되고 있다.
2. SMART용  $UO_2$  핵연료의 하단고정체에 대하여 응력해석을 수행한 결과, ASME code NB-3000의 응력설계 기준을 만족하고 있어서 SMART용  $UO_2$  핵연료의 하단고정체는 4g 설계하중 하에서 구조 건전성이 유지되고 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

## 참 고 문 헌

1. 송기남외 5인, "SMART용  $UO_2$  핵연료 부품의 구조건전성 평가", KAERI/TR-1265/99.
2. ANSYS ver. 5.3, 1994.
3. ASME Boilers and Pressure Vessel Codes Section III, NB-3000.
4. 손동성, 송기남외 11인, "핵연료 부품기술개발", KAERI/RR-1026/90.

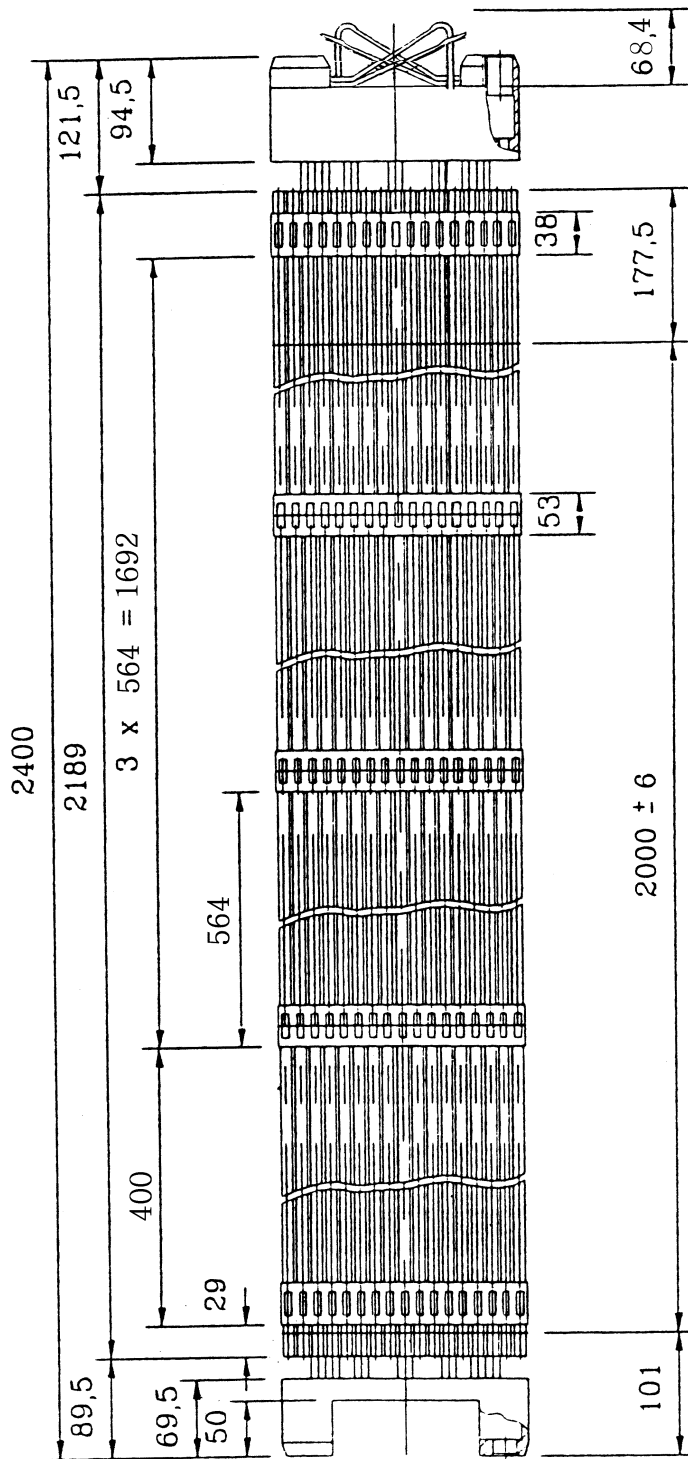


그림 1. SMART용  $UO_2$  핵연료집합체

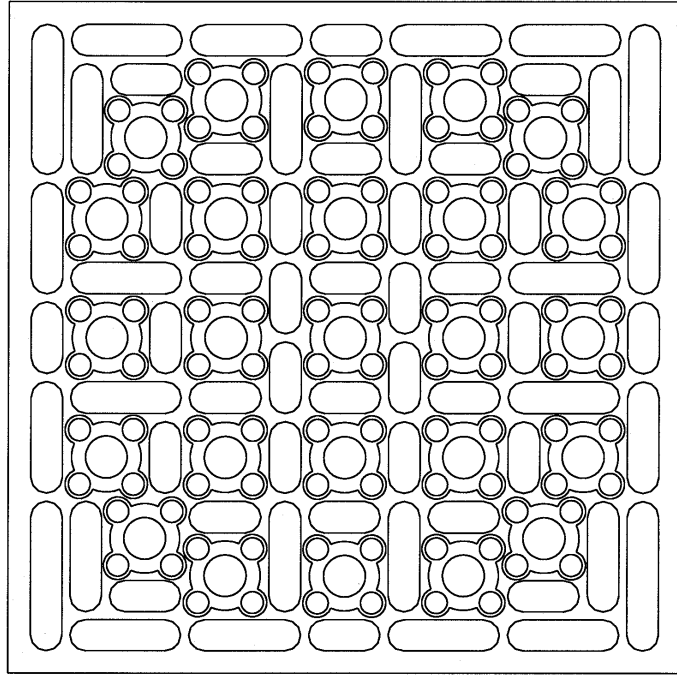


그림 2. SMART용  $UO_2$  핵연료의 상부유로판 형상

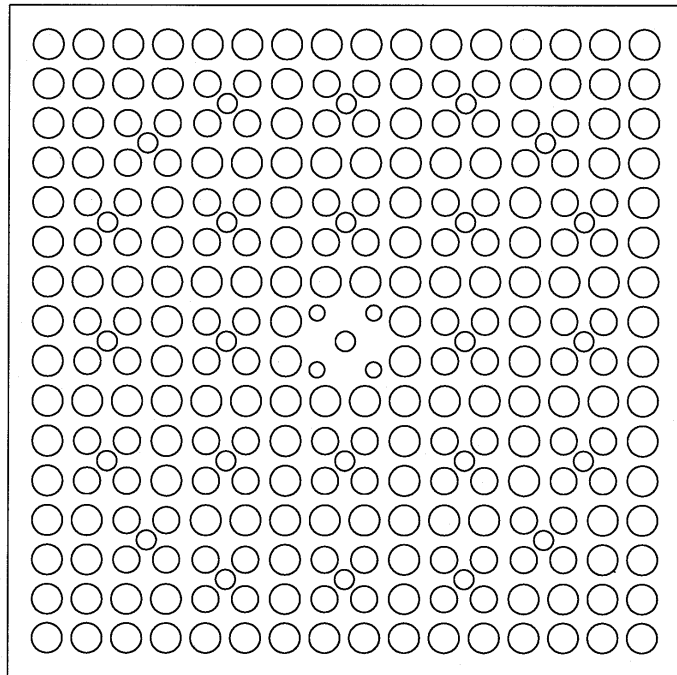


그림 3. SMART용  $UO_2$  핵연료의 하부유로판 형상



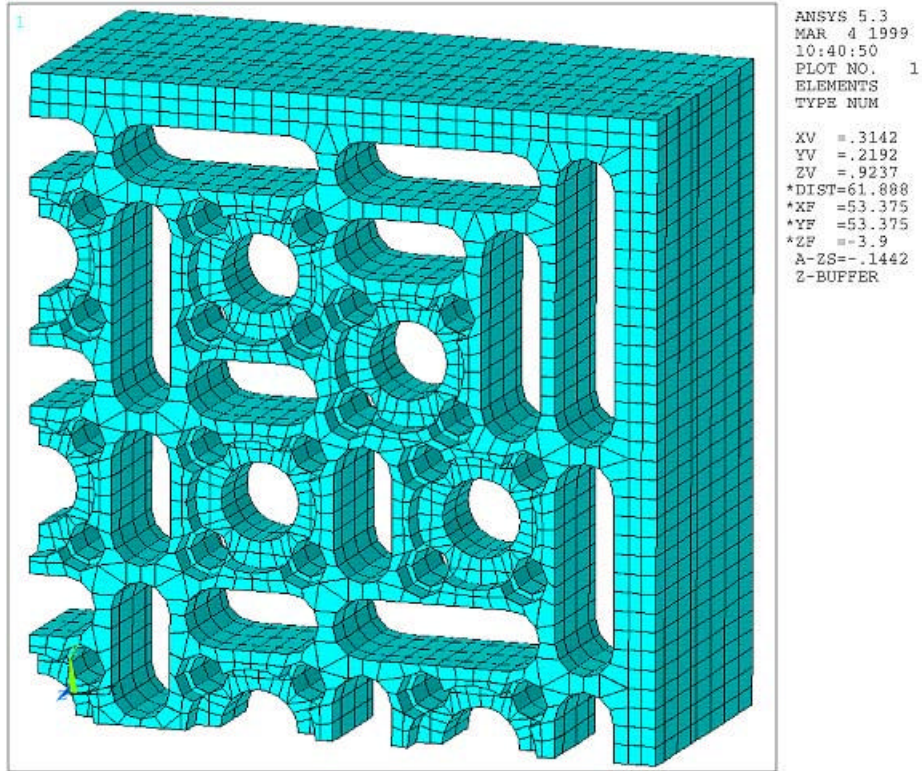


그림 4. 상단고정체 유한요소모델

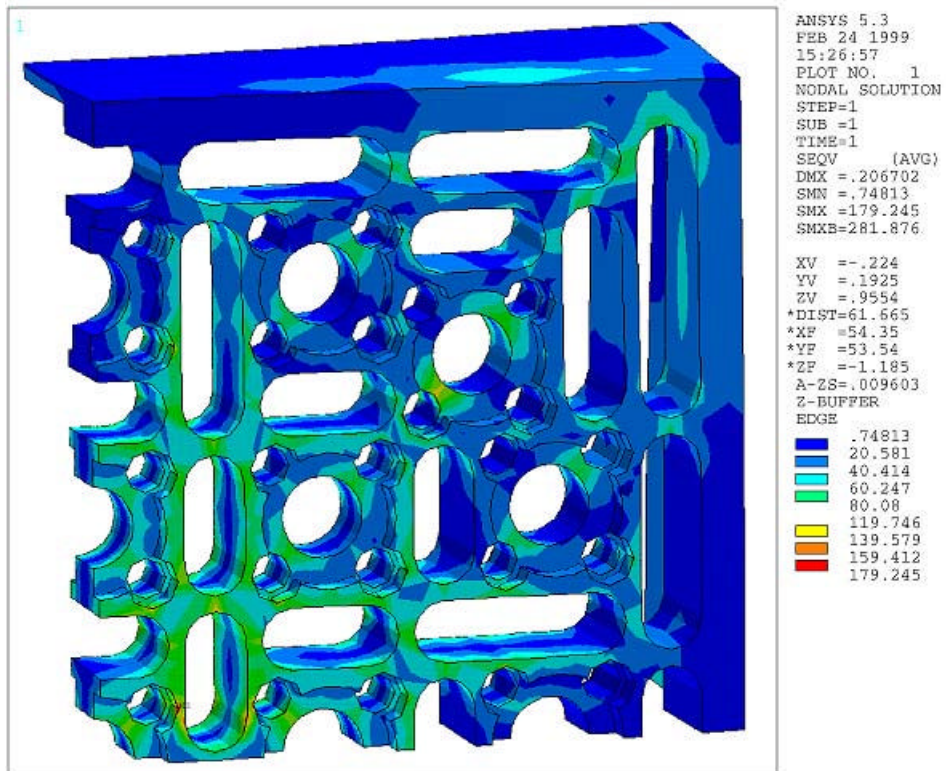


그림 5. 상단고정체의 응력강도 분포

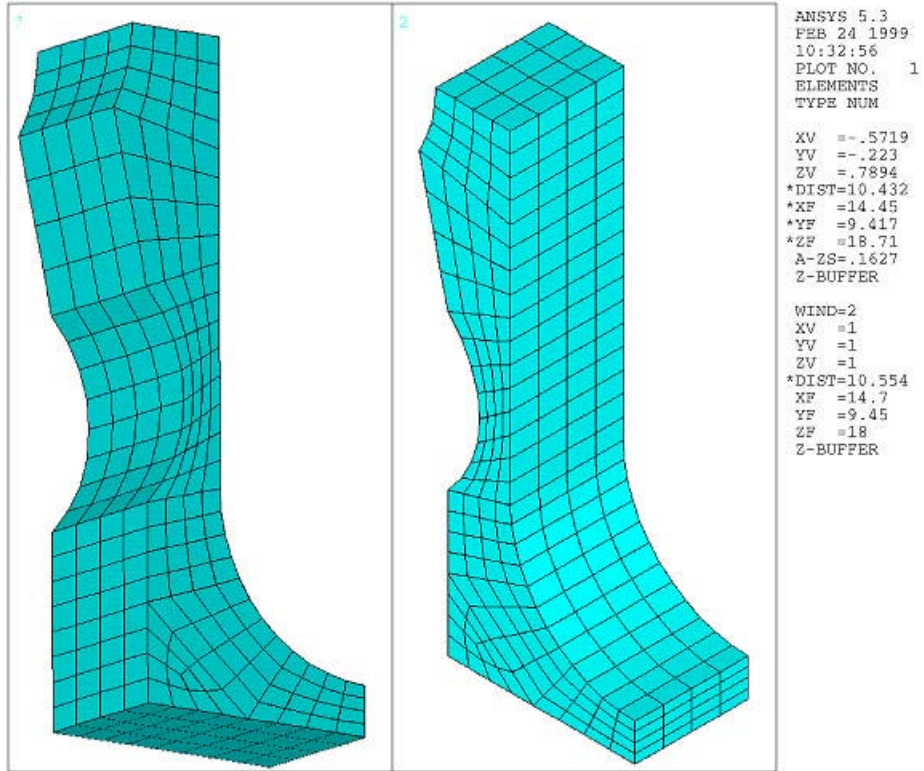


그림 6. 상부유로판 아래면의 상세응력해석을 위한 유한요소모델(I)

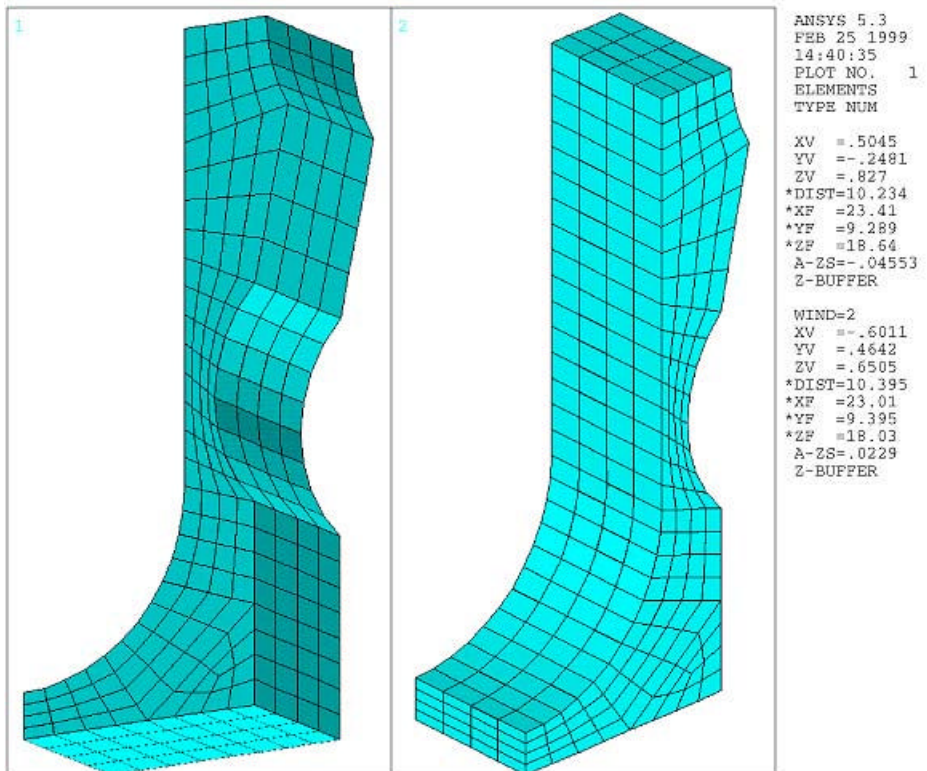


그림 7. 상부유로판 아래면의 상세응력해석을 위한 유한요소모델(II)

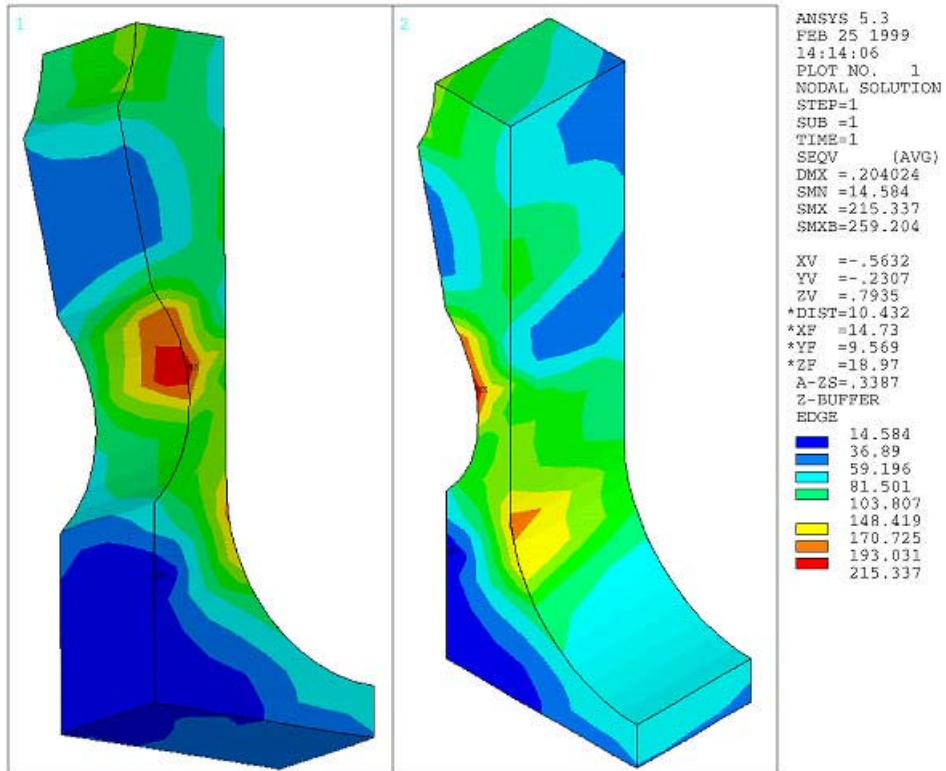


그림 8. 상부유로판 아래면의 상세응력해석모델의  
 응력강도 분포(I)

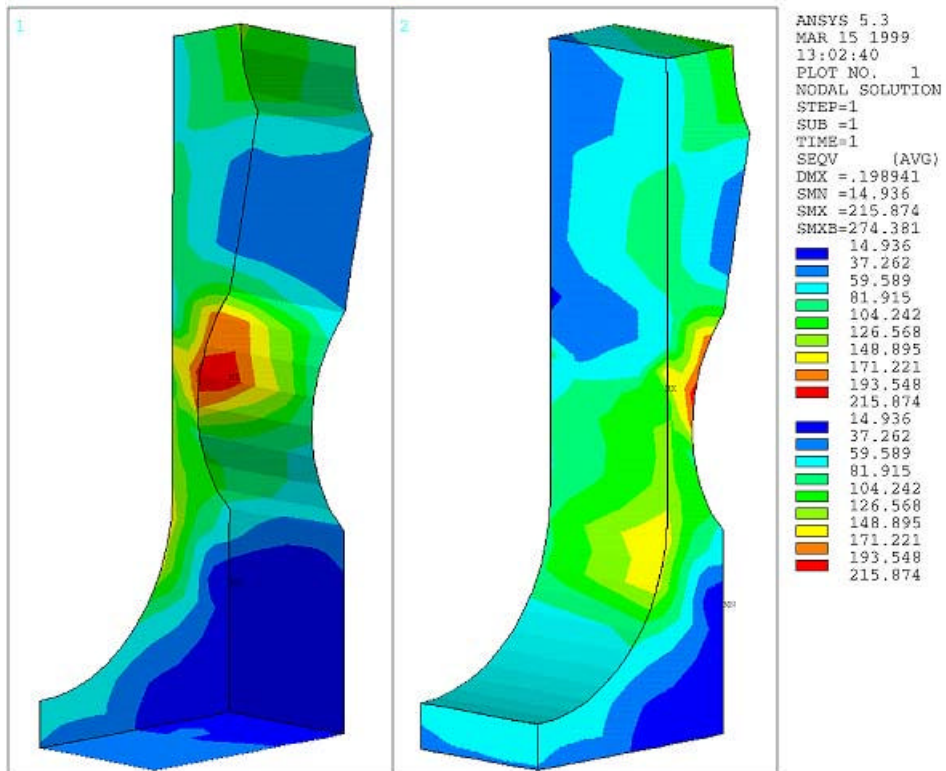


그림 9. 상부유로판 아래면의 상세응력해석모델의  
 응력강도 분포(II)

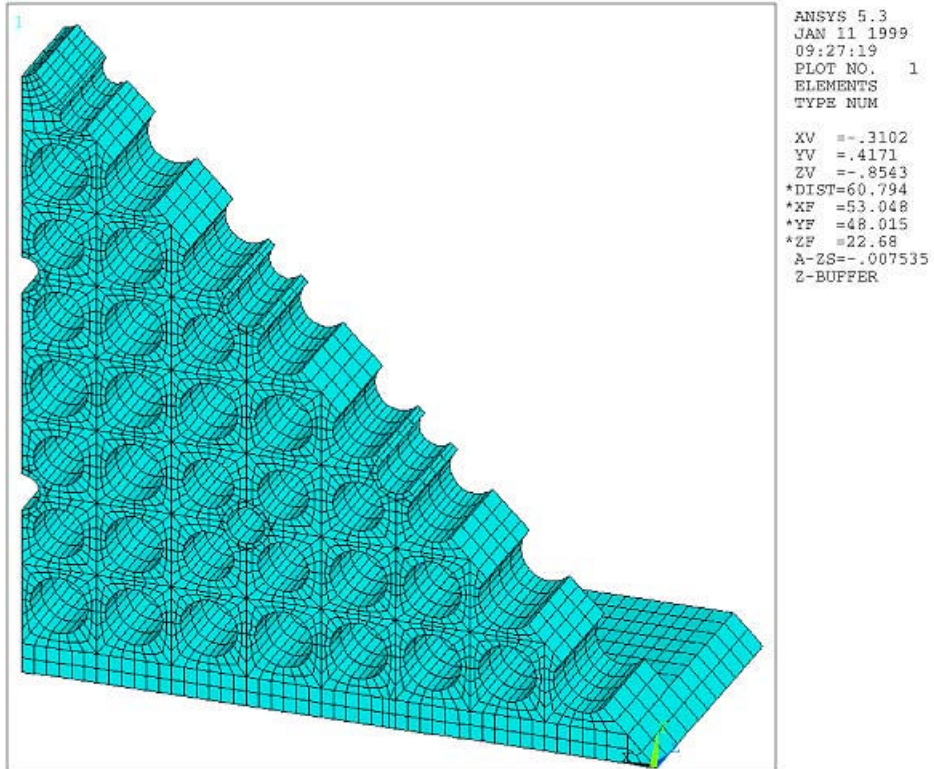


그림 10. 하단고정체 유한요소모델

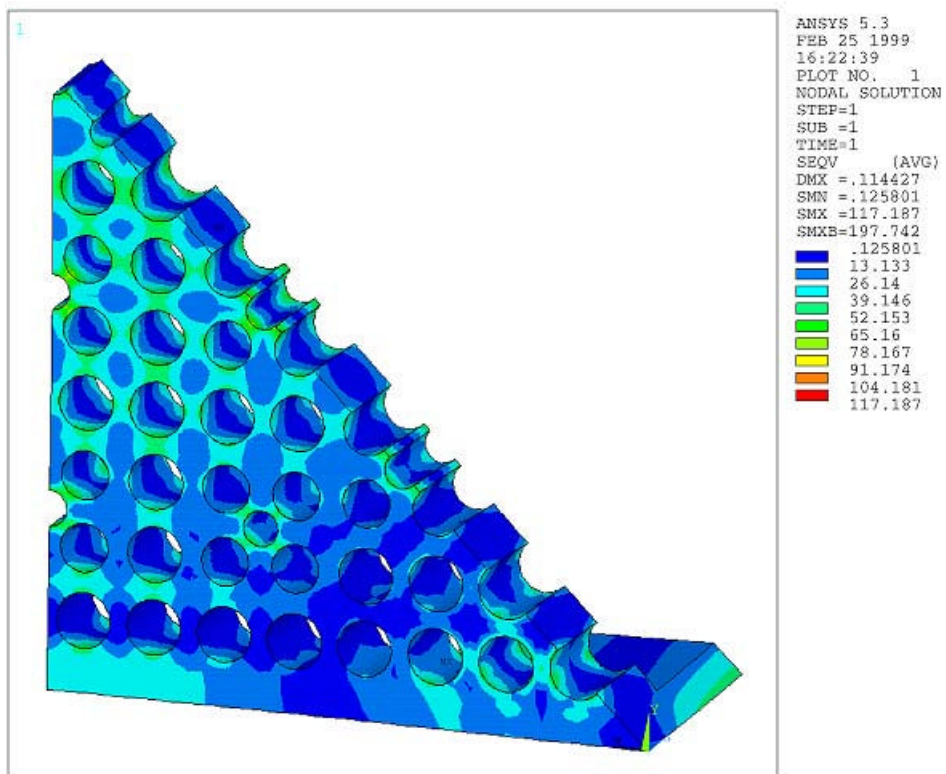


그림 11. 하단고정체의 응력강도 분포