

핵연료집합체 상단고정체의 응력해석을 위한 하중집중계수

Load Concentration Factor for Stress Analysis of Fuel Assembly Top Nozzle

전상윤, 이성기, 전경락, 김형구, 김재원

한전원자력연료주식회사
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

경수로용 핵연료집합체는 상단고정체와 하단고정체를 안내관과 계측관으로 연결하고 그 중간에 일정한 간격으로 지지격자가 안내관과 계측관에 고정되어 있으며 지지격자의 각 셀에 연료봉이 삽입되어 있는 형태로 구성되어 있다. 핵연료집합체의 최상부인 상단 고정체에 압축 또는 인장하중이 작용할 경우, 하중은 상단고정체의 유로판을 통해 안내관으로 전달되게 되는데, 유로판과 지지격자의 굽힘강성(Flexural Rigidity)으로 인해 유로판에서 안내관의 위치에 따라 전달되는 하중이 유로판의 중앙부위와 외곽부위에서 서로 다르게 된다. 본 논문에서는 이와 같이 유로판의 위치에 따라 서로 다르게 나타나는 하중의 크기를 나타내는 하중집중계수(Load Concentration Factor)를 17X17형 핵연료집합체에 대하여 계산하였으며 계산결과를 시험결과와 비교하였다.

Abstract

The top and bottom nozzles of PWR fuel assembly are connected by guide thimble and instrumentation tube that are connected with spacer grids. The fuel rods are inserted into the each cell of spacer grids. The loads acting on the fuel assembly are transmitted to the guide thimbles through the flow plate of top nozzle. The axial loads applied to the fuel assembly are not equally distributed among the guide thimble due to the geometry of the top nozzle flow plate and spacer grid. In this study, the load concentration factor for the 17X17 fuel assembly was calculated. The analytical model for the calculation of the load concentration factor of top nozzle flow plate was developed using ANSYS 5.6. The finite element analyses were performed using the model composed of top nozzle, guide thimble, and spacer grid. And, the analysis results were compared with the test results.

1. 서 론

경수로용 핵연료집합체는 상부와 하부 끝단에 상단고정체와 하단고정체가 각각 1개씩 있으며 이들을 안내관과 계측관으로 연결하고 안내관과 계측관의 중간에 일정한 간격으로 지지격자가 고정되어 있으며 지지격자의 각 셀에 연료봉이 삽입되어 있는 형태로 구성되어 있다[1]. 상단고정체와 하단고정체 그리고 안내관 설계시 핵연료집합체의 최상부인 상단고정체에 압축 또는 인장하중이 작용하는 경우를 고려하게 되는데, 이렇게 작용된 하중은 상단고정체의 유로판을 통해 안내관으로 전달되게 된다. 상단고정체 유로판의 기하학적 특성으로 인해 유로판에서 안내관의 위치에 따라 안내관으로 전달되는 하중이 유로판의 중앙부위와 외곽부위에서 서로 다르게 분포된다. 따라서, 이러한 구조물의 설계시 기하학적인 형상에 기인하는 하중과 응력의 차이를 고려하여야 하며 하중과 응력의 차이를 하중집중계수의 형태로 고려할 수 있다. 임정식등은 탄성지지를 받는 사각다공판의 하중분포계수에 관한 연구를 통해 하중에 의한 판의 처짐 및 탄성체의 탄성효과를 고려하여 하중작용점에 나타나는 하중분포계수를 구하였다[2].

본 논문에서는 이와 같이 유로판의 위치에 따라 서로 다르게 나타나는 하중의 크기를 나타내는 하중집중계수를 17X17형 핵연료집합체에 대하여 계산하였다. 상단고정체 유로판에 대한 하중집중계수를 계산하기 위해 유한요소해석코드인 ANSYS 5.6[3]을 이용하여 상단고정체의 유로판(Flow Plate), 두름판(Enclosure), 그리고 상부판(Top Plate), 유로판에 수직으로 부착된 안내관(Guide Thimble), 그리고 안내관을 횡방향으로 구속시키는 지지격자(Spacer Grid)로 구성된 모델을 개발하여 해석을 수행하였으며, 해석결과를 핵연료집합체에 대한 시험결과와 비교하였다. 또한, 지지격자의 굽힘강성이 하중집중계수에 미치는 영향을 알아보기 위하여 상단고정체-안내관 모델과 상단고정체-안내관-지지격자 모델을 이용하여 해석을 수행하였으며 집합체에 가해지는 하중의 크기가 하중집중계수에 미치는 영향을 알아보기 위하여 하중의 크기를 변화시키면서 해석을 수행하였다.

2. 해석모델

경수로용 17X17형 핵연료집합체는 상하부에 1개씩의 상,하단고정체, 24개의 안내관과 1개의 계측관, 11개의 지지격자, 그리고 지지격자의 각 셀에 삽입되어 있는 264개의 연료봉 등으로 구성되어 있다. 이러한 핵연료집합체 형상은 그림 1에 나타내었으며 집합체에 대한 주요 제원은 표 1에 나타내었다. 상단고정체 유로판에 대한 하중집중계수 계산을 위해 상단고정체와 안내관, 그리고 지지격자로 구성된 3차원 모델을 생산하였으며 계산에 사용된 모델의 형상은 그림 2와 같다. 해석모델은 대칭성을 고려하여 상단고정체와 안내관 그리고 지지격자의 1/4만 모델링하였으며, 상단고정체를 구성하고 있는 유로판과 두름판, 상부판 그리고 상단고정체의 유로판에 연결되는 안내관과 안내관을 구속하고 있는 지지격자 등에 대하여 4개의 절점을 갖는 탄성 쉘요소(SHELL63)를 이용하여 생산하였다. 그림 2의 (a)에 나타낸 상단고정체-안내관 모델은 6,413개의 절점과 8,177

개의 쉘요소로 구성하였으며 그림 2의 (b)에 나타난 상단고정체-안내관-지지격자 모델은 15,639개의 절점과 18,327개의 쉘요소로 구성하였다. 그림 2의 (c)에서는 각 모델에서 사용된 상단고정체 유로판의 형상과 유로판에서의 안내관 위치를 보여주고 있다.

3. 하중집중계수 계산을 위한 해석

상단고정체 유로판의 각 안내관 위치에서의 하중과 응력의 차이를 계산하기 위해 앞에서 생산된 상단고정체-안내관 모델과 상단고정체-안내관-지지격자 모델을 이용한 유한요소해석을 범용코드인 ANSYS 5.6을 이용하여 수행하였다. 유한요소해석은 모델에서 안내관의 최하부를 고정하고 상단고정체의 상부에서 축방향의 압축하중을 가하였으며 대칭이 되는 두 면에 대해서는 대칭 경계조건을 적용하였다. 그림 3에서 상단고정체-안내관 모델과 상단고정체-안내관-지지격자 모델에 대한 해석결과인 상단고정체 유로판, 안내관, 그리고 지지격자의 변형모양을 보여주고 있다. 해석결과로서 상단고정체 유로판에 연결된 각 안내관에 작용하는 변형율을 구하였다. 이 때 안내관의 변형율은 상단고정체 유로판으로부터 세번째 절점에서의 안내관 변형율 값을 이용하였다. 하중집중계수를 계산하기 위한 안내관의 변형율은 안내관을 구성하는 쉘요소(SHELL63)의 윗면과 아래면의 변형율의 평균값을 먼저 구하고 이들 평균값을 이용하여 안내관 원주방향 절점에서의 변형율에 대한 평균값을 구하였다. 계산된 각 안내관 위치에서의 변형율을 이용하여 상단고정체 유로판에서 안쪽에 위치한 안내관과 바깥쪽에 위치한 안내관의 하중의 차이를 나타내는 하중집중계수를 계산하였다. 각각의 안내관에 대한 하중집중계수는 집합체의 각 안내관에서 발생하는 평균변형율에 대한 해당 안내관의 변형율의 비로서 계산 되었으며 다음과 같이 구하였다.

$$\text{Load Concentration Factor} = \frac{\text{Guide Thimble Strain (\%)}}{\text{Average Guide Thimble Strain (\%)}}$$

$$\text{여기서, Average Guide Thimble Strain (\%)} = \frac{100}{24}$$

$$\text{Guide Thimble Strain (\%)} = \frac{\varepsilon_{GT}}{\varepsilon_{TOTAL}} \times 100$$

$$\varepsilon_{TOTAL} = 2(\varepsilon_{GT12} + \varepsilon_{GT13} + \varepsilon_{GT14} + \varepsilon_{GT17}) + 4(\varepsilon_{GT15} + \varepsilon_{GT16} + \varepsilon_{GT18} + \varepsilon_{GT19})$$

표 2와 그림 4에 해석결과인 각 안내관에 대한 변형율을 이용하여 계산된 하중집중계수를 나타내었다. 표에서 각 안내관에 대한 번호는 그림 2의 (c)에서 나타난 상단고정체 유로판에서의 안내관 위치를 나타낸다. 표와 그림에서 상단고정체-안내관-지지격자 모델에 대한 해석은 지지격자의 두께가 하중집중계수에 미치는 영향을 알아보기 위하여 수행하였다. 또한, 집합체에 가해지는 하중의 크기가 하중집중계수에 미치는 영향을 알아보기 위하여 하중의 크기를 변화시키면서 해석을 수행하였으며 그 결과를 그림 5에서 시험결과와 비교하여 나타내었다. 그림 5에서의 시험결과는 집합체의 안내관에 스트레인 게이지를 부착하고 상단고정체에 축방향 압축하중을 가하면서 안내관에서의 하중집중계수를 측정된 결과이다.

4. 지지격자 굽힘강성시험 및 해석

상단고정체-안내관 모델을 이용한 해석 결과 하중집중계수는 1.48로 집합체의 안내관에 스트레인게이지를 부착하여 측정된 하중집중계수인 1.33과 비교하여 약 11% 큰 것으로 나타났다. 이는 그림 2의 (a)에 나타난 상단고정체-안내관 모델에서 안내관 하부 끝단을 고정하므로써 실제 집합체에서의 상부지지격자에 의한 영향이 고려되지 않은 것에 기인하는 것으로 평가되었다. 상부지지격자가 하중집중계수에 미치는 영향을 고려하기 위하여 그림 2의 (b)에서와 같이 상부지지격자를 고려한 모델을 이용하여 해석을 수행하였으며 상단고정체-안내관-지지격자 모델의 경우 표 2의 해석결과에서 나타난 바와 같이 지지격자 모델에 대한 쉘요소의 두께에 따라 하중집중계수가 변하는 것으로 나타나 상단고정체-안내관-지지격자 모델에서 쉘요소의 두께를 결정하기 위하여 상부지지격자를 이용한 굽힘강성시험을 수행하였다.

지지격자에 대한 굽힘강성시험은 지지격자 가장자리 4군데를 지지하고 중앙에 집중하중을 가하면서 하중-변위 곡선을 구하였다. 그림 6에 지지격자 굽힘강성시험을 위해 지지격자를 시험기에 장착한 형상을 보여주고 있으며 표 3에 시험결과를 보여 주고 있다.

표 3의 시험결과로부터 지지격자와 등가한 굽힘강성을 갖는 단순화 된 지지격자 판모델을 결정하기 위하여 지지격자 굽힘강성시험과 동일한 경계조건을 이용하여 해석을 수행하였다. 지지격자에 대한 모델은 그림 2의 상단고정체-안내관-지지격자 모델에서 사용된 지지격자 모델과 동일한 형상과 요소분할을 이용하여 생산하였으며 그림 7에서 해석에 사용된 지지격자 모델과 변형모양을 보여 주고 있다. 단순화 한 지지격자 모델에 대한 해석결과 실제 지지격자와 등가한 굽힘강성을 갖는 지지격자 모델에 대한 두께는 0.2 in.로 나타났으며 이 값을 상단고정체-안내관-지지격자 모델에서 지지격자 모델에 대한 두께로 사용하였다.

4. 해석결과 및 평가

상단고정체 유로판과 안내관에서의 하중집중계수를 구하기 위하여 그림 2의 (a)에서 나타난 상단고정체-안내관 모델을 이용하여 해석을 수행한 결과 하중집중계수는 1.48로 집합체의 안내관에 스트레인게이지를 부착하여 측정된 하중집중계수인 1.33과 비교하여 약 11% 큰 것으로 나타났다. 이는 실제 집합체에서의 상부지지격자에 의한 영향이 고려되지 않은 것에 기인하는 것으로 평가되어 상부지지격자를 고려한 모델인 상단고정체-안내관-지지격자 모델을 이용한 해석을 수행하였다.

표 2와 그림 4에서 상단고정체-안내관-지지격자 모델을 이용한 해석결과로서 지지격자의 두께변화에 따른 상단고정체 유로판과 안내관의 하중집중계수 변화를 나타내고 있다. 상단고정체 유로판에서 바깥쪽에 위치하는 안내관(GT13, GT16, GT17, GT18, GT19)에 대한 하중집중계수는 지지격자의 굽힘강성이 증가함에 따라 증가하고 안쪽에 위치하는 안내관(GT12, GT14, GT15)에 대한 하중집중계수는 지지격자의 굽힘강성이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 이는 지지격자의 두께가 증가함에 따라 바깥쪽에

위치하는 안내관에 대한 반력은 증가하고 안쪽에 위치하는 안내관에 대한 반력은 상대적으로 감소하기 때문인 것으로 평가되었다.

본 연구에서 선정된 17X17 집합체에 대한 하중집중계수는 앞에서 계산된 지지격자의 두께에 대한 값이 될 것이다. 17X17 집합체에 대한 하중집중계수는 지지격자의 두께가 0.2 in.인 경우이므로 표2와 그림 4로부터 1.2임을 알 수 있다. 해석결과인 이 하중집중계수는 해석에 사용된 집합체에 대한 시험결과인 1.33과 비교하여 약 9% 정도 작은 값이다. 이는 해석시 고려된 집합체모델에서 상단고정체에서 첫번째 지지격자와 두번째 지지격자 사이에 대한 연료봉의 축방향 지지효과와 횡방향 강성효과를 고려하지 않은 것에 기인하는 것으로 판단되며 상단고정체 유로판과 안내관에 대한 정확한 하중집중계수를 구하기 위해서는 연료봉의 축방향 지지효과와 횡방향 강성효과를 고려하여야 할 것으로 판단되었다.

그림 5에 집합체에 가해지는 하중의 크기에 따른 하중집중계수 변화를 해석결과와 시험결과를 비교하여 나타내었다. 시험결과는 집합체의 안내관에 스트레인게이지를 부착하고 상단고정체에 축방향 압축하중을 가하면서 하중집중계수를 측정한 결과이며 해석결과와 동일하게 하중집중계수는 두께가 동일한 지지격자 모델에 대하여 하중의 크기와 무관하게 일정한 값으로 나타났다.

5. 결 론

경수로형 17X17 핵연료집합체 상단고정체의 유로판과 안내관, 그리고 지지격자 모델을 이용하여 상단고정체 유로판 및 안내관 응력해석을 위한 안내관 하중집중계수를 계산한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 17X17 핵연료집합체모델을 이용하여 상단고정체 유로판과 안내관에 대한 하중집중계수를 구하였으며, 안내관에 대한 하중집중계수는 1.2로서 이는 시험결과와 비교하여 약 9% 작게 나타났다.
- 상부지지격자의 굽힘강성시험 결과로부터 단순화된 등가 판모델을 구하여 하중집중계수 계산을 위한 해석에 적용하였다.
- 좀 더 정확한 하중집중계수를 계산하기 위해서는 지지격자 등가모델 개선 및 연료봉의 지지효과등에 대한 추가 연구가 필요한 것으로 판단되었다.

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 중장기계획사업인 경수로용 신형핵연료개발과제의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Fuel Design Report for 17x17 Fuel Assembly, 1994, KNFC
- [2] 임정식, 이영신, 탄성지지를 받는 사각다공판의 하중집중계수에 관한 연구, 대한기계학회지논문집 제 13 권 제 4 호, 1989
- [3] ANSYS Rev. 5.6, Swanson Analysis System Inc.

표 1. 해석에 사용된 집합체 구성품의 주요치수

| 구 분 | | 치 수 | 재 질 |
|--------|--------------|-------|-----------------|
| 상단고정체 | 폭 (in.) | 8.404 | Stainless Steel |
| | 높이 (in.) | 3.475 | |
| | 유로판 두께 (in.) | 0.755 | |
| 안내관 | 외경 (in.) | 0.482 | Zr-4 |
| | 내경 (in.) | 0.450 | |
| | 두께 (in.) | 0.016 | |
| 상부지지격자 | 폭 (in.) | 8.426 | Inconel-718 |
| | 높이 (in.) | 1.522 | |

표 2. 하중집중계수 계산 결과

| R (in.) ^{주1)} | GT12 ^{주2)} | GT13 | GT14 | GT15 | GT16 | GT17 | GT18 | GT19 |
|------------------------|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 상단고정체-안내관 모델의 경우 | | | | | | | | |
| - | 0.23 | 1.22 | 0.19 | 0.15 | 1.44 | 1.33 | 1.48 | 1.46 |
| 상단고정체-안내관-지지격자 모델의 경우 | | | | | | | | |
| 0.1 | 0.81 | 1.08 | 0.80 | 0.84 | 1.10 | 1.08 | 1.10 | 1.09 |
| 0.2 | 0.65 | 1.17 | 0.64 | 0.67 | 1.19 | 1.18 | 1.19 | 1.13 |
| 0.3 | 0.49 | 1.25 | 0.49 | 0.58 | 1.26 | 1.27 | 1.25 | 1.16 |
| 0.4 | 0.33 | 1.30 | 0.34 | 0.49 | 1.32 | 1.33 | 1.32 | 1.22 |
| 0.5 | 0.19 | 1.32 | 0.20 | 0.40 | 1.38 | 1.36 | 1.38 | 1.30 |

주1) 상단고정체-안내관-지지격자 모델에서 지지격자에 대한 셀요소의 두께

주2) 그림 2의 (c)에서 표시된 상단고정체 유로판에서의 안내관 위치

표 3. 지지격자 굽힘강성시험 결과

| 구 분 | | 변위 [mm (in.)] | 하중 [N (lbf)] |
|---------|------------|-----------------|----------------|
| Grid 1 | Inner Cell | 0.05 (0.00199) | 1000 (224.81) |
| | Outer Cell | 0.16 (0.00632) | |
| Grid 2 | Inner Cell | 0.06 (0.00239) | 1000 (224.81) |
| | Outer Cell | 0.17 (0.00672) | |
| Average | Inner Cell | 0.055 (0.00219) | 1000 (224.81) |
| | Outer Cell | 0.165 (0.00652) | |

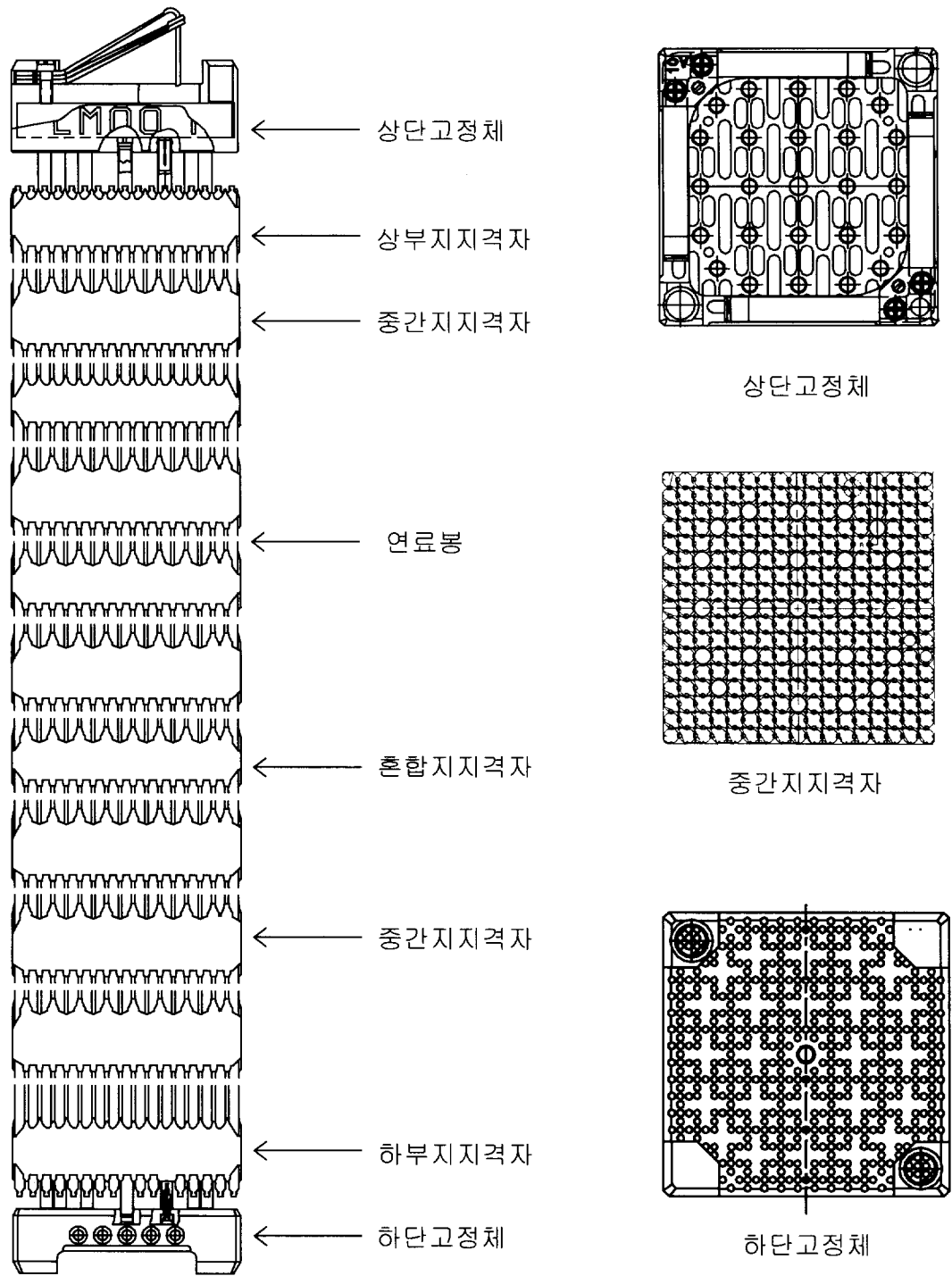
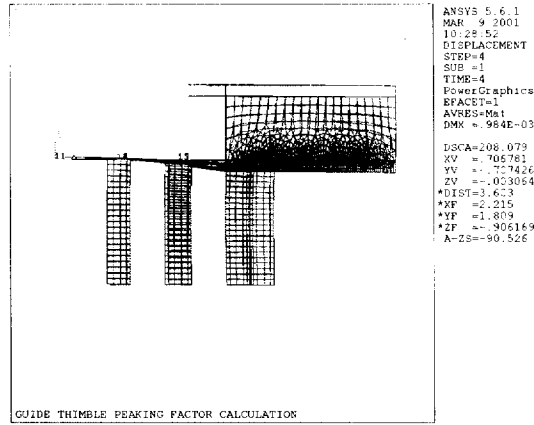
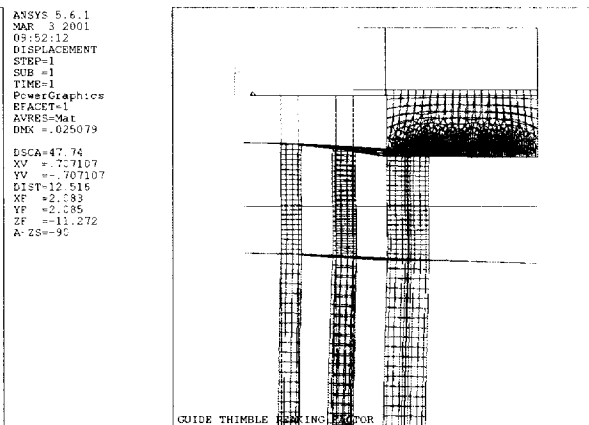
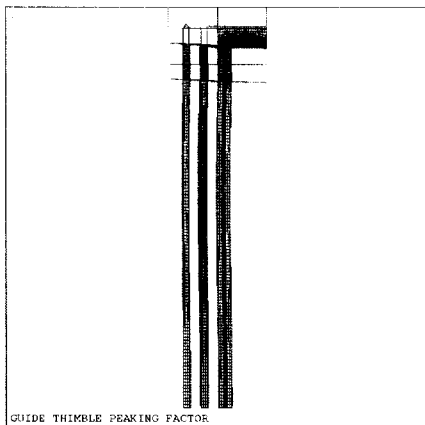


그림 1. 핵연료집합체와 구성품



(a) 상단고정체-안내관 모델



(b) 상단고정체-안내관-상부지지격자 모델

그림 3. 해석모델에 대한 변형모양

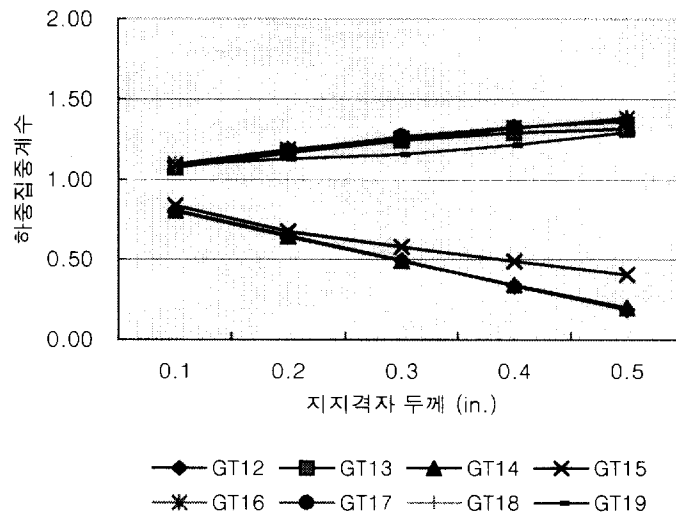
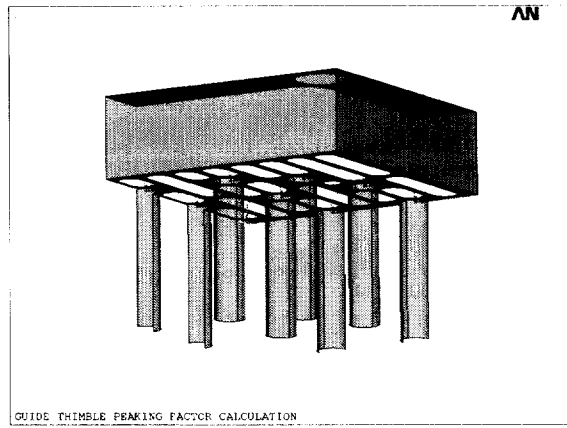
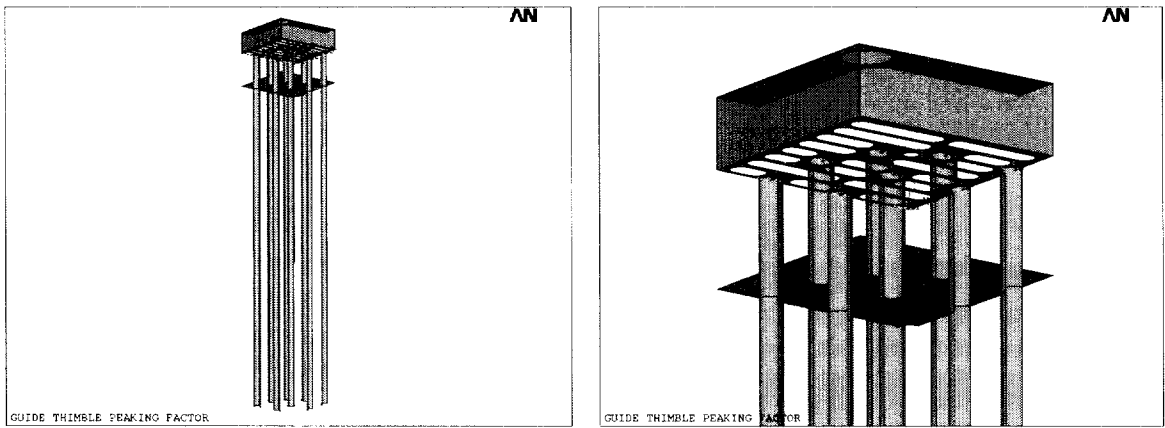


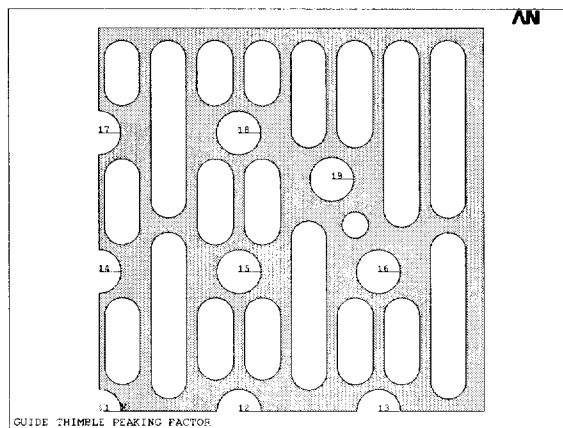
그림 4. 지지격자 두께변화에 따른 하중집중계수



(a) 상단고정체-안내관 모델

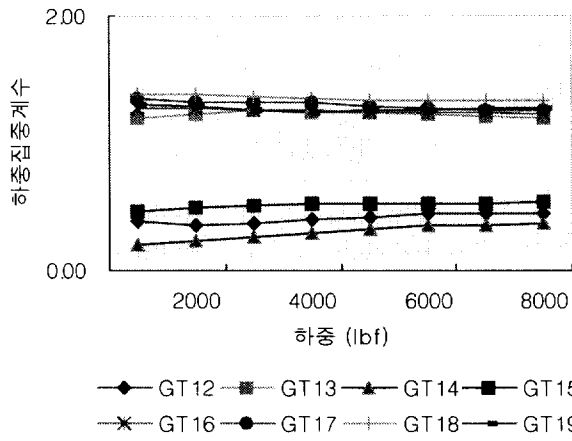


(b) 상단고정체-안내관-상부지지격자 모델

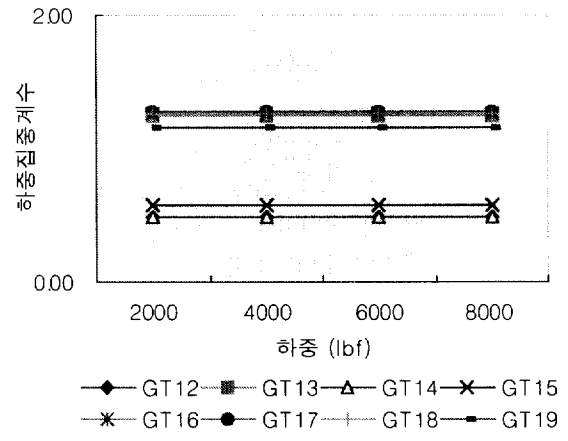


(c) 상단고정체 유로관 및 안내관 위치

그림 2. 하중집중계수 계산을 위한 해석모델



(a) 시험결과



(b) 해석결과

그림 5. 하중증가에 따른 하중집중계수 변화

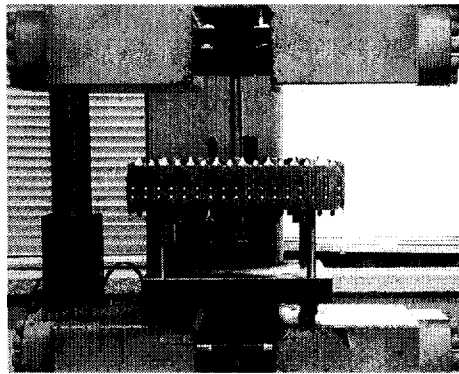


그림 6. 지지격자 굽힘강성시험장비 및 시편형상

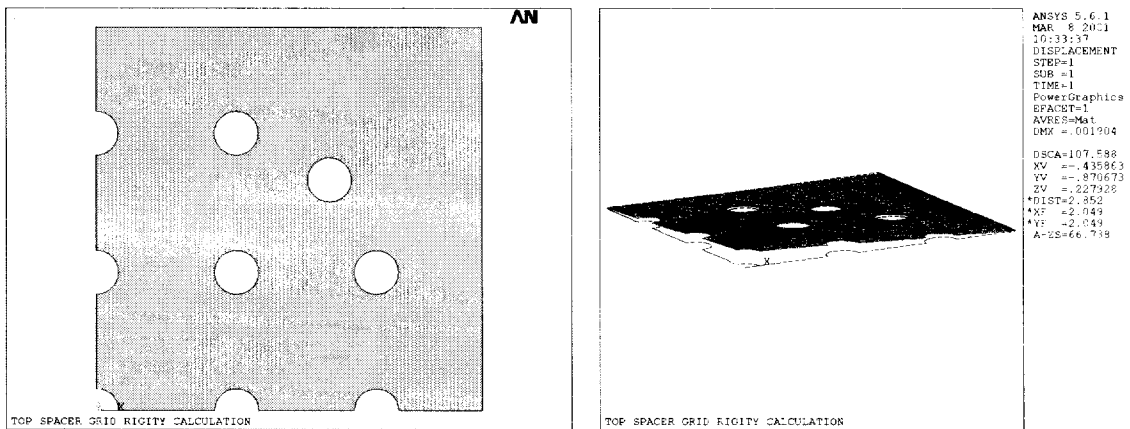


그림 7. 지지격자 해석모델 및 변형모양