

## 열하중을 받는 다공 캡슐의 열 및 구조해석

### Thermal and Structural Analysis of the Capsule with Multi-holes Under Thermal Loading

강영환  
한국원자력연구소  
이영신, 최명환, 신도섭  
충남대학교

#### 요 약

재료 조사시험용 캡슐은 여러 개의 구멍을 갖는 원통구조물로 고려할 수 있다. 또한 조사시험을 위하여 연구로 노심에 캡슐을 설치하면, 감마유속(gamma flux)에 의한 사용재료들의 발열량이 서로 다르므로 캡슐은 복잡한 열적, 역학적 거동을 갖는다. 그러므로 캡슐의 온도분포 및 응력에 관한 정보는 시험편의 온도제어 및 캡슐의 건전성 평가를 위하여 필수적이다. 본 연구에서는 열하중을 받는 다공 캡슐의 열 및 구조해석을 유한요소 프로그램인 ANSYS를 사용하여 수행하였다. 다공 매개변수가 온도 및 응력특성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 홀의 크기, 시험편의 개수, 홀더와 시험편 사이 갭의 크기 등을 해석에서 고려하였다. 이들 해석 결과로부터 캡슐 내부의 온도는 시험편과 홀더 사이의 갭에 크게 영향을 받고, 이때의 열응력은 온도차이와 열팽창에 의한 영향으로 판단되며, 사용재료의 허용 응력을 충분히 만족하는 것으로 밝혀졌다.

#### Abstract

The material irradiation capsule can be considered as a cylindrical structure with multi-holes. If the capsule is subject to the irradiation environment, the thermal and mechanical behaviors of this structure become more complicated due to the different heat generation of materials by gamma flux. Therefore, the informations on the temperature and stresses of the capsule are essential to control the temperature of the specimens and to evaluate the structural integrity of the capsule. The thermal and structural analysis of the capsule under thermal loading were carried out with a FEM program, ANSYS. In the analyses, the effects of the geometrical parameters such as the size of holes, the number of specimens and the gap distance between the holder and the specimen are considered. From the thermal and stress analysis, the temperature distribution are significantly affected by the gap distance between the holder and the specimen, and the thermal stresses are affected by temperature difference and thermal expansion. The resultant thermal stress are fully satisfied with the allowable stress.

## 1. 서 론

원자력, 항공우주, 전자산업이 급속도로 발전함에 따라 부품품의 온도 및 열응력에 관한 연구가 많은 연구자들의 관심 대상이 되어 왔고, 그 중요성이 증대되고 있는 경향이다. 특히, 원자로의 연료봉, 원자력 발전소의 압력용기, 가스배관, 다양한 형태의 터빈 등에서 발생하는 열충격을 정량적으로 평가하기 위한 연구도 꾸준히 수행되고 있다. 최근에는 초고온 환경에 적합한 향상된 재료로 개발된 경사기능재료(Functionally Gradient Material)와 같은 비균질 재료에 대한 해석적 방법을 개발하기 위한 연구가 많이 수행되고 있다.

원자력 핵심 부품재의 노내 사용중 중성자 조사(Neutron Irradiation)에 의해 발생하는 재질 열화는 여러 기계적·열적 물성의 저하를 야기시키고, 발전소의 수명을 단축시키는 주요 요인이라는 사실이 판명되었다. 따라서 특정한 재료로 만들어진 장치를 상용 원자로에 적용하기에 앞서 이들 재료의 노내 조사거동을 확인하기 위하여 하나로를 이용한 조사시험이 수행되고 있으며, 재료 조사시험에 이용되는 여러 시설중의 하나인 캡슐은 다양한 조사조건을 충족시킬 수 있기 때문에 유용한 장비로 사용되고 있다.

온도해석에 관한 연구동향을 살펴보면, 1974년, Harayama[1]는 연료봉의 온도와 열유속 분포에 관하여 반경방향으로 비대칭 열발생의 영향을 평가하였고, 1986년, Harayama와 Kyoya[2]는 편심 펠렛을 갖는 원자로 연료봉에서 온도와 열유속 분포를 해석적으로 구하는 이론식을 유도하였고, 실제적 가정 하에서 정상상태 열전도 방정식을 풀므로 온도분포의 적정한도를 구했다. 1991년, Harayama 등[3]은 원자로 연료봉의 갭에서 갭의 크기 변화에 따른 온도분포를 이론적으로 유도하였다. 1992년, Kaminga 등[4]은 원자로 제어봉에 대한 정확한 열적 설계를 향상시키기 위하여 갭 열전달에 대한 계산방법을 실험적으로 연구하였다. 1993년, Harayama 등[5]은 열하중을 받는 다공 원통의 온도분포를 평가하기 위한 모델을 제시하였고, 실제적인 가정 하에서 정상상태 열전도 방정식을 풀므로서 원통의 온도분포를 해석적 표현하였다.

응력해석에 대해서는 1973년, Takeuti와 Noda [6]는 Laplace 변환과 Point-Matching 법에 의해 동심원 구멍을 갖는 다각형 원통의 과도 열응력의 해법을 구했다. 1984년, Sugano [7]는 Airy 응력함수의 항으로 다양한 두께의 다중 결합 영역에 대한 평면 열탄성 문제의 공식을 제안하였다. 1990년, Sugano [8]는 비축대칭 열을 받는 비균질 중공 원판의 평면 열응력 문제에 대한 해를 제안하였고, 수치계산을 수행하였다. Furukawa 등[9~10]은 무한 원통의 일반화된 열탄성 이론해를 유도하기 위한 연구와 원형 원통 구멍을 갖는 무한체에 대한 일반화된 열탄성 해석에 관한 연구를 수행하였다. 1995년에 Ootato 등[11]은 중공 원형 원통이 반경방향으로 비균질 열·기계적 물성을 갖는다고 가정하여 열전도 문제와 열탄성 거동을 적층 복합재료의 이론을 도입함으로써 3차원 과도 열응력 문제의 이론 해석방법이 개발하였고, Naghdi [12]는 Laplace와 중조화 방정식을 사용하여 길이방향으로 일정한 거리에 N개의 구멍을 갖는 실린더에 대해 정상상태 열응력 문제로 해석하였다.

재료 캡슐은 핵적, 열적, 기계적 요구조건을 만족하도록 설계되어야 한다. 재료 캡슐의 정확한 열특성 및 역학적 특성에 관한 평가는 캡슐 내부의 온도제어 및 건정성 평가에 매우 중요하고, 여러 매개변수에 따른 이들 특성에 대한 연구도 필요하다. 따라서 본 연구에서는 다공 캡슐의 온도 및 열응력을 계산하기 위하여 유한요소 프로그램인 ANSYS 5.5[13]를 사용하였고, 감마열에 의한 축방향 열발생비의 영향을 고려하기 위해 캡슐 본체의 다섯 단중 가장 낮은 상부단과 가장 높은 네 번째 단의 열발생 밀도를 사용하여 다공 캡슐의 열적·기계적 특성에 영향을 미치는 다양한 다공 변수의 영향에 대해서 고찰하였다.

## 2. 캡슐 구조물

Fig. 1에서 나타낸 것과 같이 캡슐 본체는 다공의 홀더, 시험편, 외통으로 구성되어 있다. 외통은 길이가 870 mm, 두께가 2 mm, 외반경이 60 mm인 원통체이다. 캡슐의 본체는 독립 가열기와 열전대가 설치된 5단으로 분할되어 있다. 홀더는 여러 개의 시편홀을 갖는 원통이고, 길이가 120 mm이다. 또한 이 홀더는 재료 시험편을 지지하기 위해 사용된다. 캡은 홀더와 시험편 그리고 외통 사이의 시험편 온도를 효과적으로 제어하기 위해서 설계되었다. 온도를 조절할 목적으로 외통과 홀더, 홀더와 시험편 사이에 0.1 mm의 갭이 설계되었다. 이 갭에는 극저온 초전도성 물질인 헬륨을 넣어주어 열전도를 방해하거나 촉진시키는 역할을 한다. 이렇게 제작된 재료 캡슐은 하나로 내에 설치되어 위로는 보호관과 연결되고, 아래 rod tip은 노심 하부 receptacle에 힌지로 고정된다. 또한 캡슐은 연구로 노심의 강제대류 영역에 설치되어 조사시험을 수행하게 되며, 이때의 냉각수 온도는 40°C, 외통 표면에서의 열전달 계수는  $3.03 \times 10^4 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 이다.

## 3. 유한요소해석

### 3.1 해석방법 및 모델링

열하중을 받는 캡슐의 온도 및 열응력 해석을 위하여 상용 유한요소 프로그램인 ANSYS 5.5를 사용하였다. 해석방법은 열과 구조가 연성된 문제로 간주하였고, 동시에 온도와 응력을 계산하기 위해서 2차원 열 및 구조장이 연성된 영역을 풀 수 있도록 생성한 연성요소, PLANE13 요소를 사용하였다. Fig. 2는 다공 캡슐 내부의 형상을 모의한 2차원 유한요소모델을 나타내었다. 해석모델은 대칭성을 갖는 모델에 대하여 매개변수 연구가 가능하도록 형성하였다. 대칭성을 고려하여  $(360/m)^\circ$  부분만을 대상으로 하였으며, 헬륨가스가 채워진 홀더와 외통 사이의 공간은 0.1 mm로 고정하였다. 여기서 m이란 캡슐 내부에 만들 수 있는 시편홀의 개수를 나타낸다. 또한 해석결과와 수렴성을 좋게하기 위해 전체적으로 조밀하게 요소분할(절점수 1291개, 요소수 1224개)을 하였다. 특히, 시험편과 홀더 사이의 헬륨이 채워진 공간은 기체의 열전도도가 고체의 열전도보다 상당히 낮아 시험편의 온도상승에 큰 영향을 미치므로 이 공간에 대해서는 다른 영역에 비해 좀더 조밀하게 요소분할을 하였다. Table 1은 다공 캡슐의 기하학적인 변수자료를 나타내었다.

본 연구에서는 캡슐 외통의 내외반경( $R_{ci}$ ,  $R_{co}$ )와 홀더의 외반경( $R_h$ )은 이미 확정된 크기이므로 고정변수로 처리하였다. 그러나 시험편을 삽입할 수 있는 중앙홀( $R_c$ )과 시편홀의 반경( $R_w$ )은 이용자의 요구조건에 따라 시험편이 다양하므로 변수로 고려하였다. 또한 홀더는 중앙홀과 원주방향으로 동일한 거리에 시편홀을 갖는 모델에 대하여 해석하였다. Table 2는 각 재료의 온도에 따른 기계적 및 열적 물성을 나타내었다. 이러한 재료의 물성들은 온도에 따라 변하는 특성을 갖고 있으므로 비선형 해석법으로 접근하였다.

### 3.2 하중 및 경계조건

노심 내에서 시험편, 홀더, 캡슐 외통은 감마선에 의해 열원으로 작용한다. 각 재료의 열발생비는 열유속 분포 차이에 의한 축방향 위치에 따라 변한다. 다공 캡슐의 온도 및 열응력을 해석하기 위한 하중조건으로는 감마열에 의한 외통과 홀더를 포함하고 있는 시험편의 열발생 밀도와 냉각수의 온도가 있다. 해석에 적용한 홀더와 시험편의 재료에 대한 열발생 밀도는 Table 3과 같다. 해석은 캡슐 본체 다섯 개의 단중 열발생 밀도가 가장 낮은 첫 번째 단과 가장 높은 네 번째 단을 대상으로 하였다. 또한 시험편의 재료는 측정대상으로 할 수 있는 모든 재료가 가능하지만 해

석의 편의를 위해 스테인레스 강으로 국한하였다.

경계조건은 모델의 x축과  $(360/m)^\circ$  축에서의 대칭 경계조건과 캡슐 외통의 외표면에서 온도 경계조건으로 표면온도  $50^\circ\text{C}$ 를 고려하였다. 또한 헬륨 갭에서는 대류와 복사가 무시될 정도로 작으므로 전도만을 고려하였다.

## 4 해석 결과 및 고찰

열하중 하에서의 다공 캡슐 구조물의 특성을 고찰하기 위하여 시험편의 크기, 시험편의 개수, 홀더와 시험편 사이의 갭 크기와 같은 다양한 다공 매개변수가 해석에서 고려되었고, 온도분포 및 응력분포 등에 대하여 고찰하였다.

Fig. 3은 축방향으로 다른 열발생 밀도를 갖는 다공 캡슐에서 홀더와 시험편 사이의 헬륨 갭 크기의 영향을 나타내었다. 이 경우의 모델은 중앙에  $R_i/R_o=0.2$ 인 시험편,  $27.9\text{ mm}$ 의 반경을 갖는 중공홀더, 홀더와 캡슐 외통 사이의  $0.1\text{ mm}$  헬륨 갭을 가지고 있다. 갭이  $0.01\text{ mm}$ 보다 작을 때, 첫 번째 단에서 시험편의 최대온도는 대략  $164^\circ\text{C}$ 이고, 네 번째 단에서 시험편의 최대온도는 대략  $289^\circ\text{C}$ 이다. 최대온도는 갭의 크기가 일정하게 증가할수록 선형적으로 증가하는데 갭의 크기가  $0.05\text{mm}$ 씩 증가함에 따라 온도는 첫 번째 단에서 약  $10^\circ\text{C}$ 씩, 네 번째 단에서 약  $20^\circ\text{C}$ 씩 증가한다. 이것은 증가된 갭의 크기가 홀더와 시험편 사이의 열전달을 방해하는 작용을 하기 때문이다.

Fig. 4는 각 영역별 반경방향 온도분포를  $\theta=0^\circ$ 인 위치에서 나타내었다. 고려된 모델은  $R_i/R_o=0.2$ 인 시험편이 중앙홀에 삽입되고,  $R_w/R_o=0.2$ 인 시험편 4개를 시편홀에 삽입되었으며, 중앙홀과 시편홀 사이의 거리는  $a/R_o=0.6$ 이고, 홀더와 시험편 사이의 헬륨 갭은  $0.1\text{ mm}$ 인 경우이다. 그림에서 SR은 시험편 영역, HR은 홀더 영역, G는 갭 영역을 나타내고 있다. 상대적으로 높은 온도는 시험편 영역에서 발생하고 갭 영역을 경계로 온도분포의 급격한 변화가 있다.

Fig. 5는 시험편 개수에 따른 영향을 나타내었다. 고려된 시험편 반경은  $R_i/R_o=0.2$ ,  $R_w/R_o=0.2$ 이고, 중앙홀과 시편홀 사이의 거리는  $a/R_o=0.6$ 이며, 홀더와 시험편 사이의 헬륨 갭의 크기가  $0.1\text{ mm}$ 인 경우이다. A는 중앙홀이 있고, 중앙홀에 시험편이 없는 경우이고, B는 중앙홀이 없고, 홀더의 일부분일 경우이며, C는 중앙홀이 있고, 중앙홀에 시험편이 있는 경우이다. Fig. 5(a)는 다공 캡슐의 최대온도를 서로 다른 열발생 밀도와 시험편 개수에 대하여 나타내었다. 열발생 밀도가 가장 높은 네 번째 단은 첫 번째 단에 비해  $70\sim 80\%$ 정도 높게 나타난다. 또한 시편홀에 삽입된 시험편의 수량이 일정하게 증가함에 따라 최대온도는 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 그리고 최대온도는 시험편 내부에서 발생한다. Fig. 5(a)에서 중앙홀의 유무에 따른 A, B의 경우를 비교하면, 중앙홀이 없는 경우(B)와 있는 경우(A)는  $3\sim 4^\circ\text{C}$ 정도의 온도차이로 크지 않다. 중앙홀에 시험편 삽입 유무에 따른 A, C의 경우를 살펴보면, 중앙홀에 시험편이 삽입(C)되면 온도는  $10\sim 25^\circ\text{C}$ 정도 높아진다. 이로써 중앙홀을 만들고 시험편을 삽입하지 않는다면 주변의 시편홀을 더 많이 설계할 수 있고, 이런 시편홀에 더 많은 시험편을 삽입할 수 있음을 알 수 있다. Fig. 5(b)는 다공 캡슐 내부의 최대 열응력을 나타내고 있다. 열발생 밀도가 클수록 응력은 높아지고, 시편홀에 삽입되는 시험편이 많을수록 응력은 증가하지만 그 증가폭이 크지 않고, 충분히 허용응력 이내에 있어 안정하다. 최대 열응력은 응력강도를 기준으로 하였고, 캡슐 외통의 내외표면 사이의 온도 차이가 다른 부분보다 크기 때문에 외통의 외표면에서 발생한다.

Fig. 6은 여러 개의 시편홀에 삽입되는 시험편 크기에 따른 온도와 열응력을 나타내었다. 고려된 시편홀의 개수( $m$ )는 2, 4, 6이고, 시험편이 없는 중앙홀 반경비는  $R_i/R_o=0.2$ , 중앙홀과 시편홀과의 거리비는  $a/R_o=0.6$ 이고, 헬륨 갭(gap2)은  $0.1\text{ mm}$ 에 대한 결과이다. Fig. 6(a)에서 알 수 있듯이

시험편의 크기와 시편홀의 개수가 증가할수록 최대온도는 증가한다. 최대온도는 첫 번째 단에서 시편홀의 개수가 6개이고, 시편홀 반경비( $R_w/R_o$ )가 0.25인 경우에서 227 °C를 보였고, 네 번째 단에서 위와 동일한 조건에서 386 °C를 보였다. 가장 낮은 범위의 최대온도는 시편홀의 개수가 2개이고, 시편홀 반경비가 0.1인 경우에서 첫 번째 단은 158 °C, 네 번째 단은 277 °C를 나타내었다. 최대 열응력은 네 번째 단의 캡슐 외통에서  $m=6$ ,  $R_w/R_o=0.25$ 에서 82 MPa이 발생하였고, 열발생 밀도가 작을수록 열응력은 감소하며, 시험편의 크기에 따라 거의 선형적으로 증가한다.

Fig. 7은 다공 캡슐의 온도분포 및 열응력 선도를 나타내었다. 고려된 모델은 중앙홀과 4개의 시편홀에 시험편이 삽입되어 있고, 중앙홀 반경비는  $R_c/R_o=0.2$ 이고, 시편홀 반경비는  $R_w/R_o=0.2$ 이고, 중앙홀과 시편홀 반경비는  $a/R_o=0.6$ 이다. Fig. 7(a)는 온도분포를 나타내었다. 최대온도는 시험편의 중심에서 발생한다. 캡슐 경계로 온도의 급격한 변화가 있다. Fig. 7(b)는 응력강도 분포를 나타내었다. 최대응력은 캡슐 외통에서 발생한다.

## 5. 결론

다공 캡슐의 최대온도는 중앙홀 또는 시편홀에 삽입된 시험편에서 발생하였고, 홀더와 시험편 사이의 헬륨 갭을 경계로 온도의 급격한 차이가 발생하였다. 시험편의 크기와 개수가 증가할수록 최대온도는 증가하며, 열발생 밀도가 가장 낮은 단에서는 150~200 °C이고, 가장 높은 단에서는 250~400 °C의 범위에서 변한다. 열하중에 의한 최대응력은 캡슐 외통의 외표면에서 대략 82 MPa 정도이고, 열발생 밀도와 시편홀에 삽입된 시험편의 개수가 작을수록 응력은 감소하고, 전체적인 응력값은 사용된 재료의 허용응력을 충분히 만족하였다.

설계의 관점에서 경제적인 조사시험을 위하여 보다 많은 시험편을 계장하기 위해서는 시험편이 없는 중앙홀의 크기를 조절하고, 원주방향으로 일정한 거리에 있는 시편홀의 크기를 최소로 하여 시편홀의 개수를 늘리도록 설계하는 것이다.

## Acknowledgement

본 연구는 1999년도 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] Yasuo Harayama, 1974, "Calculated Effect of Radially Asymmetric Heat Generation on Temperature and Heat Flux Distribution in a Fuel Rod," Nuclear Engineering and Design, Vol. 31, pp. 66~71.
- [2] Yasuo Harayama and Masahiko Kyoya, 1986, "Analysis of Effect of Eccentric Holes in Pellets on Temperature and Heat Distribution in Fuel Rod," Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 23, No. 2, pp. 151~159.
- [3] Yasuo Harayama, Hiroyuki Someya and Taiji Hoshiya, 1991, "Effect of Eccentric Pellet on Gap Conductance in Fuel Rod," Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 28, No. 10, pp. 961~964.
- [4] Fumito Kaminaga, Sennosuke Sato and Yoshizo Okamoto, 1992, "Evaluation of Gap Heat Transfer between Boron Carbide Pellet and Cladding in control Rod of FBR," Journal of

Nuclear Science and Technology, Vol, 29, No, 2, pp. 121 ~130.

- [5] Yasuo Harayama,, Taiji Hoshiya, Hiroyuki Someya, Motoji Niimi and Toshiaki Kobayash, 1993, "Estimation for Temperature Distribution in a Heat-Generating Cylinder with Multiple Holes," Journal of Nuclear Science and Technology, Vol, 30, No, 4, pp. 291 ~301.
- [6] Y. Takeuti and N. Noda, 1973, "Transient Thermoelastic Problem in a Polygonal Cylinder with a Circular Hole",
- [7] Y. Sugano, 1984, "On a Stress Function Method of Plane-Stress Thermoelastic Problem in a Multiply Connected Region of Variable Thickness," Journal of Engineering for Industry,
- [8] Y. Sugano, 1990, " An Analytical Solution for a Plane Thermal Stress Problem in Non-homogeneous Multiply Connected Regions", JSME International Journal, Series I , Vol. 33, No. 2, pp. 136 ~144.
- [9] T. Furukawa, N. Noda and F. Ashida, 1990, "Generalized Thermoelasticity for an Infinite Body with a Circular Cylindrical Hole," JSME International Journal, Series I , Vol. 33, No. 1, pp. 26 ~32.
- [10] T. Furukawa, N. Noda and F. Ashida, 1991, "Generalized Thermoelasticity for an Infinite Solid Cylinder," JSME International Journal, Series I , Vol. 34, No. 3, pp. 281 ~286.
- [11] Y. Ootao, T. Akai and Y. Tanigawa, 1995, "Three-Dimensional Transient Thermal Stress Analysis of a Non-homogeneous Hollow Circular Cylinder due to a Moving Heat Source in the Axial Direction," Journal of Thermal Stresses, Vol. 18, pp. 497 ~512.
- [12] A. K. Naghdi, 1996, "Thermal Stresses in a Cylinder with Longitudinal circular Cylindrical Cutouts," Journal of Thermal Stresses, Vol. 19, pp. 341 ~357.
- [13] Desalvo, G.J. and Gorman, R.W., ANSYS Engineering Analysis System User's Manual, Swanson analysis System, Inc., Houston, Pennsylvania, 1992.

Table 1 Geometrical dimensions of the capsule with multi-holes

Descriptions	Symbol	Dimension(mm)
Outer Radius of Capsule	$R_{co}$	30.0
Inner Radius of Capsule	$R_{ci}$	28.0
Outer Radius of Specimen Holder	$R_o$	27.9
Inner Radius of Specimen Holder	$R_i$	Variable
Specimen Radius	$R_s$	Variable
Number of Specimen Hole	$m$	Variable
Distance between Central Hole and Specimen Hole	$a$	Variable
Distance between Holder and External Tube	gap1	0.1
Distance between Holder and Specimen	gap2	Variable

Table 2 Mechanical and thermal properties of the materials with temperature

Material Property		Temp.(° C)			
		50	100	200	300
Young's Modulus (E) GPa	A1050	68,96	65,51	55,16	34,48
	SUS304	200	194	186	179
Thermal Expansion Coeff. ( $\alpha$ ) $1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	A1050	23,4	23,8	24,5	25,5
	SUS304	15,0	16,0	17,0	19,0
Thermal Conductivity ( $\kappa$ ) W/m · °C	A1050	203	206,33	215,26	230,39
	SUS304	16,0	16,0	17,0	17,0
	He	0,143	0,1747	0,2049	0,2336
Mass Density ( $\rho$ ) kg/m <sup>3</sup>	A1050	2710			
	SUS304	7850			
Poisson's Ratio ( $\nu$ )	A1050	0,33			
	SUS304	0,30			

Table 3 Heat generation density of two positions for finite element analysis

Step	Materials	Distance from Rod Tip(cm)	A1050 (W/cm <sup>3</sup> )	SUS304 (W/cm <sup>3</sup> )
First		65,25	9,10	19,00
Fourth		24,75	21,70	37,00

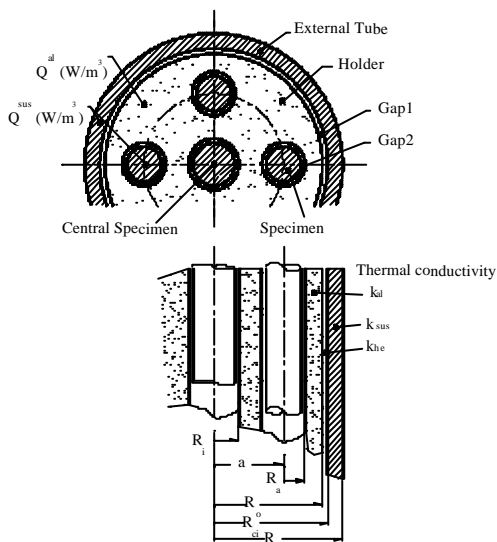


Fig. 1 Geometrical shape of the capsule with multi-holes

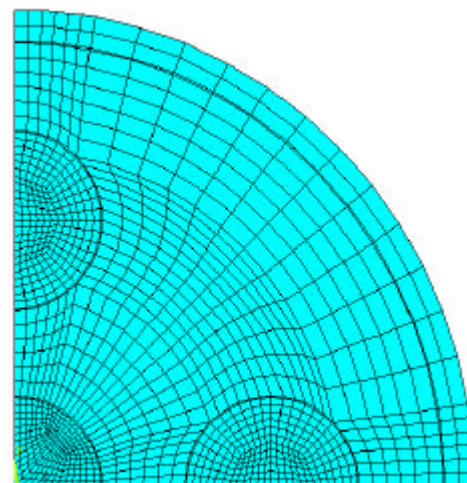


Fig. 2 Model of 2-D finite element of the capsule with multi-holes

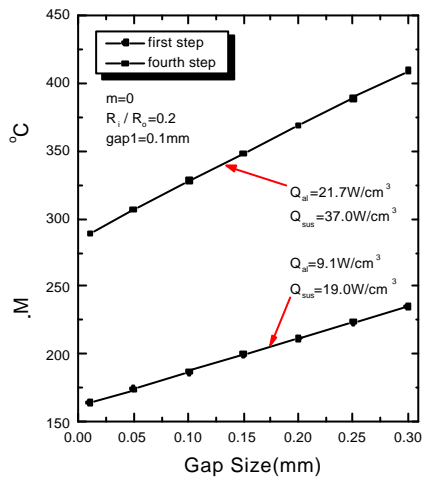


Fig. 3 Effect of the gap distance between holder and specimen

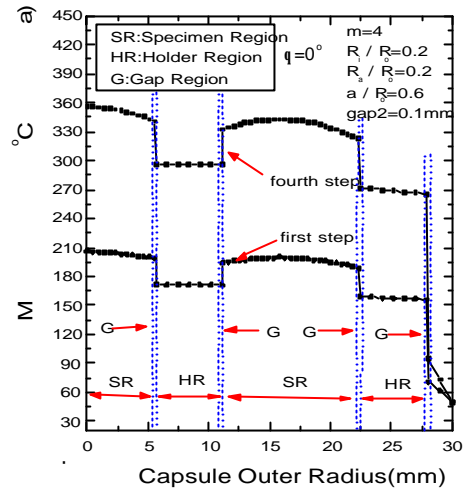
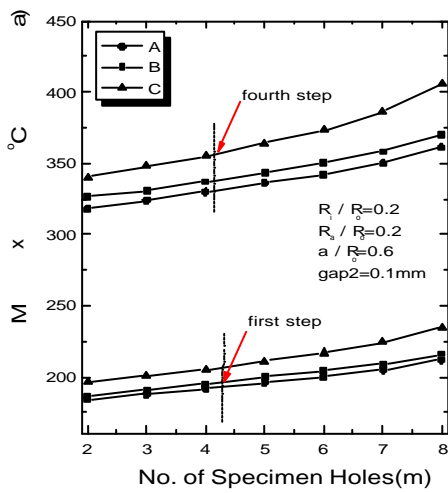
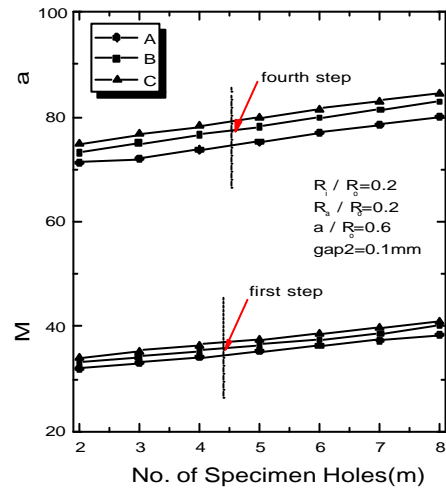


Fig. 4 Radial temperature distribution in each region



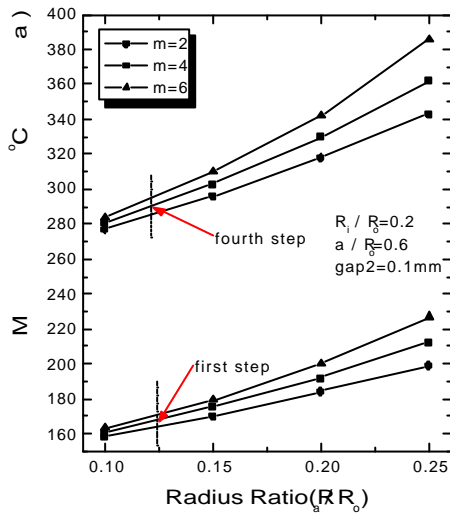
(a) Max. temperature



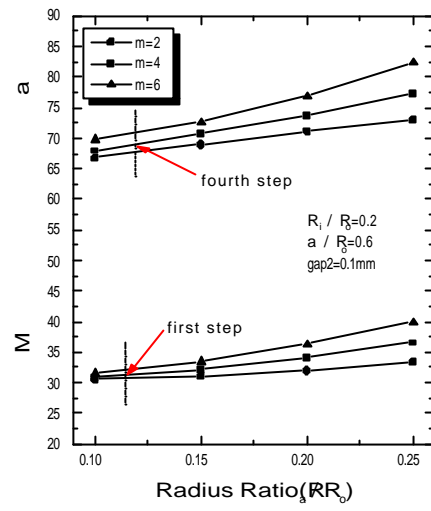
(b) Max. stress intensity

Fig. 5 Effect of specimen numbers inserted in a specimen hole



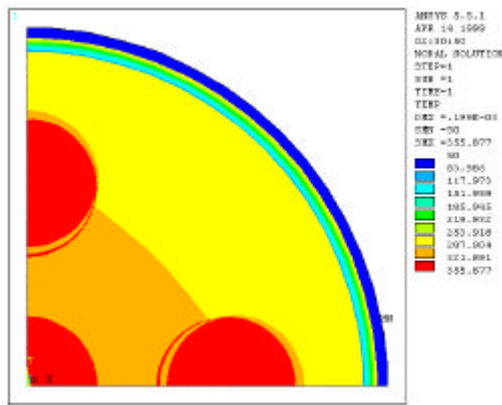


(a) Max. temperature

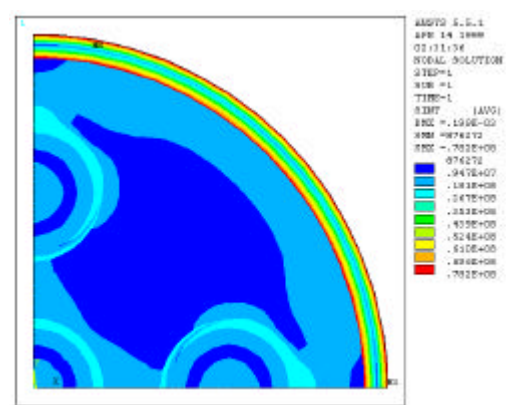


(b) Max. stress intensity

Fig. 6 Effect of specimen size inserted in a specimen hole



(a) Temperature distribution (m=4)



(b) Stress intensity distribution (m=4)

Fig. 7 Temperature and thermal stress contours of the capsule with multi-holes ( $R_1/R_2=0.2$ ,  $R_3/R_4=0.2$ ,  $a/R_5=0.6$ ,  $gap2=0.1mm$ )