

## ANSYS 코드를 이용한 다공 캡슐의 온도분포 해석

### Temperature Distribution Analysis of the Capsule with Multi Holes Using ANSYS Code

강영환

한국원자력연구소

이영신, 최명환, 신도섭, 고재화

충남대학교

#### 요 약

재료 조사시험을 위한 캡슐설계에 다공 시편 열매체 개념이 종종 도입된다. 연구로에서 캡슐은 감마유속(gamma flux)에 의하여 가열되므로 다공 캡슐은 열원으로 고려될 수 있다. 본 연구에서는 97M-01K 캡슐 열매체 구멍에 삽입된 조사 시편의 온도를 유한요소 프로그램인 ANSYS를 활용한 코드로써 평가하였다. 그 결과는 하나로에서 수행한 조사실험 데이터와 열분석 코드인 Heating 7.2f로써 해석한 결과와 비교하여 서로 상당히 일치하였다. 따라서 ANSYS 코드를 응용한 코드로써 해석하는 방법은 향후 다양한 캡슐설계 및 안전성 평가에 유용할 것이다.

#### Abstract

Specimen holder in a capsule for material irradiation tests has often multi-holes. This type of capsule can be considered as a heat source because every part of the capsule is heated by gamma flux in a research reactor. In this study, specimen temperature in the thermal media during irradiation was first evaluated with a FEM program, ANSYS. The results for 97M-01K capsule were compared with experimental data and numerical data obtained by Heating 7.2f code, respectively. These three evaluation methods showed well coincident results so that the approach with ANSYS program will be applied to evaluate various cases of capsule design, which will be useful in the design and safety analysis of the capsule for material irradiation tests.

## 1. 서론

원자력 부품재의 노내 사용중 중성자 조사(neutron irradiation)에 의해 발생하는 재질 열화는 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. 이러한 캡슐은 여러 개의 구멍을 갖는 원통구조물로 고려될 수 있고, 원통구조물의 내부에 존재하는 구멍들에 조사 시험용 시편을 삽입하여 재료특성을 연구하는데 사용할 수 있다. 이미 선진 몇몇 나라에서는 이러한 연구를 수행해오고 있으며, 그 예로 Harayama[1-4]등은 캡슐구조와 유사한 핵연료봉의 온도와 열유속 분포에 관하여 반경방향으로 비대칭 열발생의 영향을 평가하였고, 편심 펠렛의 연료봉에서 온도와 열유속 분포의 이론해를 유도하였고, 열하중을 받는 다공 원통의 온도분포를 평가하기 위한 모델을 제시하였고, 실제적인 가정 하에서 정상상태 열전도 방정식을 풀어 온도분포를 해석적으로 표현하였다. Kaminaga 등[5]은 원자로 제어봉에 대한 정확한 열적 설계를 향상시키기 위하여 캡 열전달에 대한 계산방법을 실험적으로 연구하였다.

다공 캡슐이 연구로 노심에 설치되면 감마선 조사에 의해 열원으로 작용하여 열을 발생한다. 이때 발생한 열은 시편의 재료 특성치에 상당히 중요한 영향을 미치므로 노심에 캡슐을 장입하기 전에 캡슐 내부의 시편배치를 통하여 온도를 사전에 예측하는 것은 중요한 기술이다. 열매체는 중앙구멍과 원주방향의 구멍을 갖는 유한한 실린더이다. 시편은 시편구멍에 삽입되고, 때때로 중앙구멍에 삽입되기도 한다. 열매체는 시편구멍에 조사시편을 고정하기 위해 사용하고, 유사한 조사조건을 만들어 주기 위해서도 사용된다. 중앙구멍은 열매체의 중앙에서 온도분포를 조절하기 위한 수단으로 설계될 수 있다. 시편의 온도는 원자로가 정상 작동하는 동안에 특정한 온도값이하 유지됨을 보장할 필요가 있다. 예를 들어 캡슐의 최고온도는 재료의 녹는점보다 항상 낮아야한다. 재료시험용 캡슐에서 최고온도는 통상적으로 시편영역에서 관측된다.[4].

본 논문은 다양한 형상을 갖는 다공 캡슐 내부의 열매체와 시편에서 발생하는 온도분포를 유한요소 프로그램인 ANSYS[6]를 이용하여 구했고, ANSYS 계산 결과의 타당성을 검증하기 위해 97M-01K 캡슐의 노내 실험 데이터와 유한차분법을 이용한 2차원 열전달 프로그램인 Heating 7.2f[7]의 계산치를 상호 비교하였다.

## 2. 유한요소해석

### 2.1 해석모델 및 방법

Fig. 1에 나타낸 것과 같이 다공 캡슐은 열매체, 시편, 외통으로 구성되어 있다. 외통은 길이가 870 mm, 두께가 2 mm, 외반경이 60 mm인 원통 쉘이며, 5단으로 분할되어 독립적으로 온도 조절할 수 있는 히터와 열전대가 설치되어 있다. 열매체는 여러 개의 시편을 삽입할 수 있는 구멍을 갖는 원통이고, 길이가 120 mm이다. 캡은 열매체와 시편 그리고 외통 사이의 시편 온도를 효과적으로 조절하기 위해서 설계되었고, 외통과 열매체, 열매체와 시편 사이에 0.1 mm의 갭을 만들어 제작되었다. 이 갭에는 극저온 초전도성 물질인 헬륨을 넣어 헬륨의 압력으로 온도를 조절한다. 이렇게 제작된 다공 캡슐은 하나로 노심에 설치되어 위로는 보호관과 연결되고, 아래로는 노심 하부 receptacle에 힌지 지지로 고정된 rod tip과 연결된다. 다공 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. Fig. 2는 여러 시편 형상의 배치를 구현할 수 있도록 만들어진 다공 캡슐의 2차원 유한요소모델 중의 하나이다. 이 해석모델은 대칭성을 갖는 모델에 대하여 매개변수 연구가 가능하도록 하기 위해 모델 형상이 바뀌더라도 절점은 바뀌지 않도록 만들었다. 대칭성을 고려하여  $(360/m)^\circ$  부분만을 대상으로 하였으며, 헬륨가스가 채워진 열매체와 외통 사이의 공간(Gap1)은 열팽창에 의한 열변형을 고려하여 0.03 mm로 하였고, 열매체와 시편 사이의 공간(Gap2)은 처음 설계된 0.1 mm로 계산하였다. 여기서 m 이란 다공 캡슐의 내부에 만들 수 있는 원주방향의 시편 개수를 나타낸다. 또한 해석결과와 수렴성을 좋게 하고, 계산시간을 줄이기 위해 절점수 1291개, 요소수 1224개로 요소분할을 하였다. 특히, 시편과 열매체 사이와 열매체와 외통 사이의 헬륨이 채워진 공간은 기체의 열전도도가 고체의 열전도보다 상대적으로 낮아 시편의 온도상승에 큰 영향을 미치므로 이 공간에 대해서는 다른 영역에 비해 좀더 조밀하게 요소분할을 하였다. Table 1은 다공 캡슐의 기하학적인 변수 데이터를 보여주고 있다.

본 연구에서는 외통의 내·외반경( $R_{in}$ ,  $R_{out}$ )과 열매체의 외반경( $R_b$ )은 이미 결정된 크기이므로 고정변수로 하였다. 그러나 시편을 삽입할 수 있는 중앙구멍( $R_c$ )과 시편구멍의 반경( $R_s$ ), 중앙구멍과 시편구멍간의 거리(a), 시편구멍의 개수(m) 등은 이용자의 요구조건을 충족시킬 수 있도록 변수로 고려하였다. Table 2는 사용 재료의 온도에 따른 기계적 및 열적 물성을 나타내고 있다. 이러한 재료의 물성들은 온도에 따라 변하는 특성을 갖고 있으므로 비선형 해석으로 계산을 수행하였다.

## 2.2 하중 및 경계조건

노심 내에서 시편, 열매체, 외통은 감마유속에 의해 열원으로 작용한다. 각 재료의 열발생 밀도는 감마유속 분포 차이에 의해 캡슐의 축방향 위치와 시간에 따라 다르기 때문에 정확한 계산값을 산출하기가 어렵다. 그래서 각 재료에서 발생하는 열발생 밀도를 가정하였다. 가정한 열발생 밀도 데이터는 Table 3과 같다. 다공 캡슐의 온도를 해석하기 위한 하중조건으로는 열매체(A1050), 시편(SUS304) 그리고 외통(SUS304)의 열발생 밀도와 캡슐 외통의 표면온도이다.

경계조건으로는 해석모델의 x축과  $(360/m)^\circ$  축에서 대칭 경계조건과 다공 캡슐 외통의 외표면에서 온도 경계조건으로 표면온도  $50^\circ\text{C}$ 를 고려하였다. 또한 헬륨 캡에서는 대류와 복사가 무시될 정도로 작으므로 전도만을 고려하였다.

## 3. 결과 및 고찰

온도분포에 큰 영향을 미치는 인자는 열매체와 외통 사이의 갭과 열매체와 시편 사이의 갭 속에 들어 있는 헬륨의 열전달과 외부 가진 열원인 감마유속에 의한 재료의 열발생 밀도이다[8]. 갭의 열전달 능력은 갭 속에 삽입된 헬륨의 열전도도와 갭의 크기에 관계한다. 따라서 열하중을 받고 난 후의 변형된 캡슐의 기하학적인 크기가 시편의 온도분포를 평가하는데 중요한 변수가 됨을 알고 있다. 계산에 사용한 갭의 크기는 열팽창에 의한 열변형량을 계산할 수 있는 1차원 열전달 프로그램인 GENGTC를 사용하여 계산하였다. 열변형전 다공 캡슐의 Gap1, Gap2의 크기는 0.1 mm이었으나 열팽창후의 Gap1, Gap2의 크기는 각 단별로 약간의 차이를 보인다. Gap2의 크기는 변하지 않고 그대로 유지하나, Gap1은 열매체의 팽창으로 0.03 mm로 줄어들게 된다.

Fig. 3은 캡슐 본체의 1, 3단에서 97M-01K 캡슐에 열변형후 Gap1과 Gap2의 크기를 적용하여 하나로 노내실험, 2차원 열전달 프로그램인 Heating 7.2f, GENGTC와 ANSYS 코드를 비교한 반경  $\theta=0^\circ$  방향의 온도분포를 보여주고 있다. Fig. 3에 나타난 점들은 노내실험에서 사용한 열전대

의 위치를 나타내고 있다. 1, 3단에서 시편영역(단별 1점)과 열매체 영역(단별 2점)의 계산결과는 1단에서는 5 %이내, 3단에서는 7 %이내로 잘 일치하고 있으며, 대체로 GENGTC 프로그램이 다른 계산치보다 높게 평가되었다. 실험결과와 ANSYS 코드의 결과는 1단에서는 1 %이내로 상당히 잘 일치하고 있으며, 3단에서는 5 % 이내의 오차를 가지고 있다. 이 정도의 오차는 해석 및 측정 방법에 약간의 불확실성이 포함되어 있기 때문에 시편 배치에 따른 온도를 평가하는데는 큰 문제가 없으리라 본다. 앞으로 열평창 후 갭의 크기를 적용하여 다양한 형상을 갖는 다공 캡슐의 시편 배치에 따른 시편영역과 열매체 영역의 온도를 평가하고자 한다.

Fig. 4는 중앙구멍에 반경이 5.58 mm인 시편이 삽입되어 있고, 시편구멍에 반경이 5.58 mm인 시편이 4, 6, 8개일 경우에 대한 반경  $\theta=0^\circ$  방향의 온도분포를 나타내고 있다. 중앙구멍에 삽입된 시편이 시편구멍에 삽입된 시편보다 작을 경우는 시편구멍의 시편영역에서 최대온도가 발생하나, 같거나 클 경우는 중앙구멍의 시편영역에서 최대온도가 발생한다. 다공 캡슐의 시편영역에서 최대온도가 발생한다는 사실은 동일하다. 시편구멍의 시편영역에서 발생한 열이 중앙구멍의 시편영역에서 발생한 열의 흐름을 방해하고 있기 때문에 시편구멍의 시편개수가 증가할수록 중앙구멍의 시편영역 온도가 더 증가한다. 또한 시편구멍의 시편영역 온도는 시편의 개수가 증가할수록 증가하고, 캡슐 표면의 온도가 항상 일정하기 때문에 시편의 개수가 증가하더라도 캡슐 외통 쪽으로 갈수록 시편온도가 다른 경우( $m=4, 6$ )에 비해 빠르게 감소하고 있다. 중앙구멍의 시편을 포함하여 총 9개의 시편을 삽입할 경우, 시편영역의 최대온도는 297 °C이고, Gap1과 경계를 이루고 있는 열매체의 끝에서는 162 °C를 나타낸다.

Fig. 5는 Fig. 4와 동일한 모델에 대해 반경  $\theta=\pi/m^\circ$  방향의 온도분포를 보여주고 있다. 원주 방향 시편 사이의 열매체 영역 온도는 시편개수가 증가할수록 증가하나, 캡슐 외표면으로 갈수록 시편 개수에 관계없이 거의 일정해진다. 이것은 캡슐 외표면의 냉각수 온도가 항상 일정하게 유지되기 때문이다.

Fig. 6은 Fig. 4와 동일한 모델에 대해 시편영역의 원주방향 온도분포를 보여주고 있다. 시편의 개수가 증가할수록 시편의 원주방향 온도구배는 증가하고, 시편개수가 8개일 경우, 대략 23 °C 정도의 온도구배를 나타낸다. 또한  $\theta=0^\circ$  방향으로 갈수록 온도가 감소하는 이유는 캡슐 외통 쪽으로 갈수록 열유속이 증가하기 때문에 열전달이 잘 되기 때문이다.

Fig. 7은 Fig. 4와 동일한 모델에 대해 시편영역의 원주방향 열유속 분포를 나타내고 있다. 시편의 개수에 관계없이  $\theta=0^\circ$  방향으로 갈수록 열유속은 증가한다. 열은 고온부에서 저온부로 이동하려는 속성을 갖고 있어, 고온영역인 캡슐 중앙에서 발생한 열이 저온영역인 캡슐 표면으로 이동하려고 하는데 시편과 열매체 사이의 갭이 중앙에서 발생한 열의 흐름을 바꿔 원주방향의 시편들 사이에서 열을 집중시키기 때문에 원주좌표 110° 근처에서 시편의 개수에 무관하게 동일한 열유속을 가지며 급격한 열유속의 변화가 생긴다.

Fig. 8는 Fig. 4와 동일한 모델에 대해 각 단의 열발생 밀도를 적용하여 계산한 반경  $\theta=0^\circ$  방향의 온도분포를 나타내고 있다. 열발생 밀도가 높은 단으로 갈수록 온도는 증가하고 있고, 열매체 영역에서보다 시편영역에서 더 높은 온도를 보인다. 1단에서 시편영역의 최대온도는 150 °C, 5단에서 최대온도는 253 °C로 온도차이는 103 °C이다. 이처럼 캡슐 설계시의 온도 계산에 있어 열발생 밀도는 시편배치의 방법을 결정하는 중요한 인자가 된다.

Fig. 9는 시편의 면적비를 일정하게 유지할 경우, 시편구멍에 삽입된 시편의 형상에 따른 반경  $\theta=0^\circ$  방향의 온도분포를 보여주고 있다. 반경이 5.58 mm인 원형 시편, 한 변의 길이가 9.9 mm인 정사각 시편 그리고 반경이 5.23 mm인 원형 시편과 한 변의 길이가 10.46 mm인 정사각 시편의 혼합 시편을 사용할 경우에 시편영역의 면적은 동일하다. 그 결과, 형상에 관계없이 면적비가 일정하다면 거의 동일한 최대온도를 갖는다.

Fig. 10은 중앙구멍에 반경이 5.58 mm인 시편이 삽입되고, 시편구멍에 한 변의 길이가 11.16 mm인 정사각 시편과 반경이 5.58 mm인 원형 시편을 삽입할 경우의 온도분포를 보여주고 있다. 중앙구멍의 시편에서 257 °C의 최대온도를 나타내고 있고, 캡슐 외표면에서 50 °C의 최소온도를 보여주고 있다.

#### 4 결론

조사시편의 온도해석을 위하여 사용하고있는 ANSYS 코드의 타당성을 검증하기 위해 하나로에서 수행된 97M-01K 캡슐의 조사 실험 데이터, Heating 7.2f 및 GENGTC 코드의 계산 결과와 비교하였다. 하나로에서 측정된 실험값을 기준으로 1 단에서는 5 %이내, 3 단에서는 7 %이내의 온도오차를 보였다. 이러한 온도차이는 조사시험중 온도측정을 위하여 사용한 측정기기의 정확도 등을 고려할 때 잘 일치한다고 볼 수 있다. 따라서 향후에 이용자들이 요구하는 다양한 형상의 많은 재료시편들을 수용할 수 있는 캡슐설계의 최적화와 하나로에서의 사용 캡슐의 안전성 및 건전성 평가를 위하여 ANSYS 코드를 이용한 해석이 유용할 것이다.

#### 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] Yasuo Harayama, Taiji Hoshiya, Hiroyuki Someya, Motoji Niimi and Toshiki 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.
- [5] 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.
- [6] Desalvo, G.J. and Gorman, R.W., ANSYS Engineering Analysis System User's Manual, Swanson analysis System, Inc., Houston, Pennsylvania, 1992.
- [7] Childs, K.W., "HEATING 7.2f User's Manual", ORNL, 1993
- [8] 강영환 외, 1999, "열하중을 받는 다공 캡슐의 열 및 구조해석", 한국원자력학회 '99춘계학술발표회 요약집, pp. 28 ~29

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	0,1

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 ( $\kappa$ ) $\text{W}/\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}$	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 ( $\rho$ ) $\text{kg}/\text{m}^3$	A1050	2710			
	SUS304	7850			
Poisson's Ratio ( $\nu$ )	A1050	0,33			
	SUS304	0,30			

Table 3 Heat generation density along axial direction

Axial Coordinate(cm)	SUS304( $\text{W}/\text{cm}^3$ )	A1050( $\text{W}/\text{cm}^3$ )
11,25	39,40	20,60
24,75	37,00	21,70
38,25	33,30	20,00
51,75	27,00	15,40
65,25	19,00	9,10

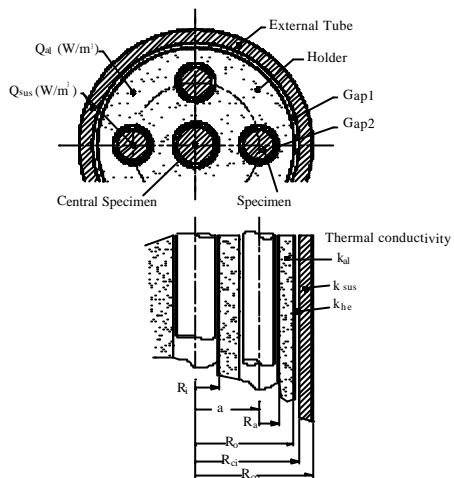


Fig. 1 Geometrical shape of the capsule with multi holes

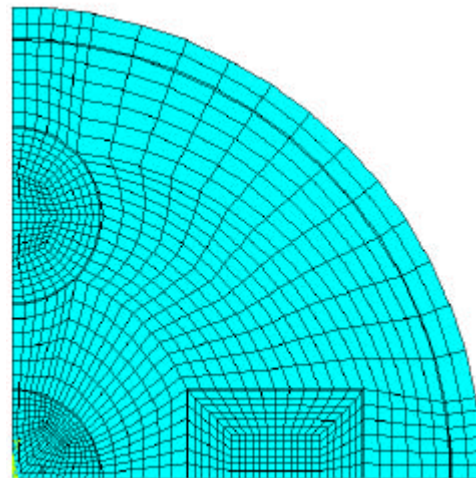


Fig. 2 Model of finite element on the capsule with multi holes

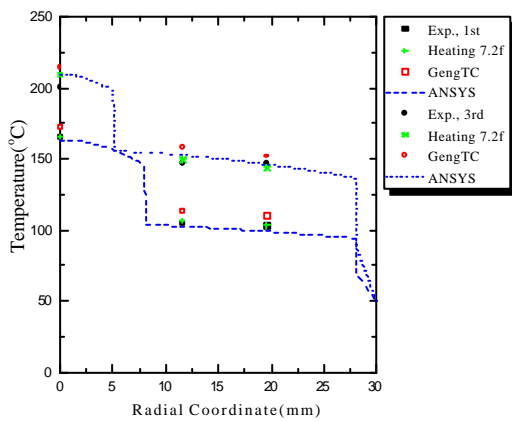


Fig. 3 Radial temperature profile of Exp., Heating 7.2f, GENGTC, and ANSYS

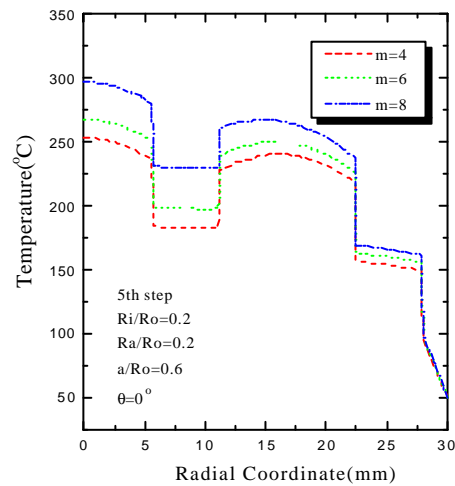


Fig. 4 Radial temperature profile with various specimen numbers ( $\theta = 0^\circ$ )

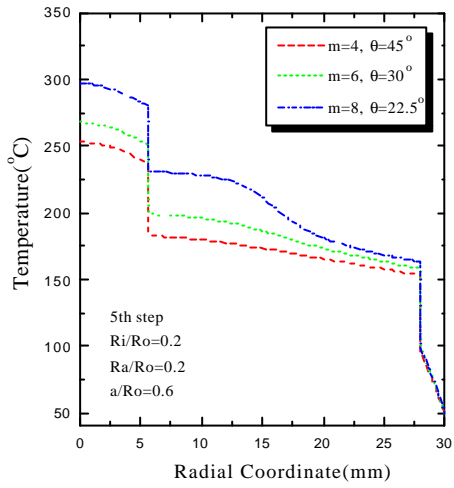


Fig. 5 Radial temperature profile with various specimen numbers ( $\theta = \pi/m^\circ$ )

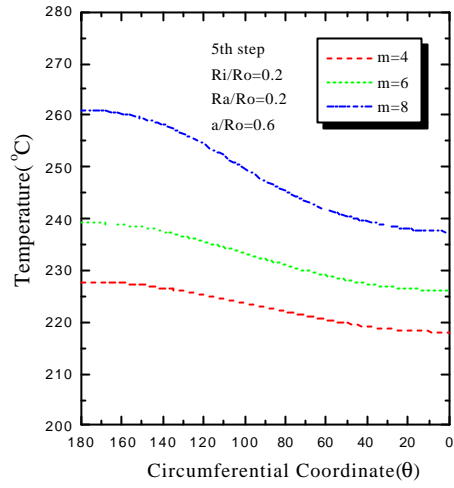


Fig. 6 Circumferential temperature profile around a specimen

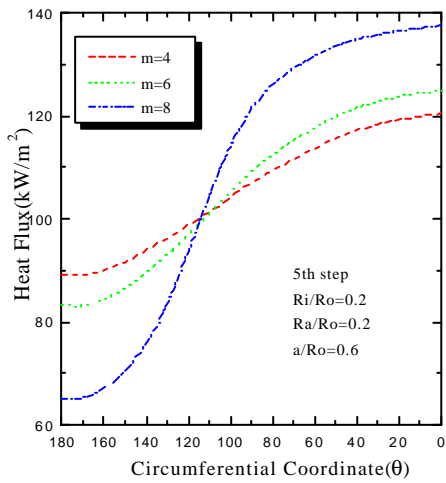


Fig. 7 Circumferential heat flux profile around a specimen

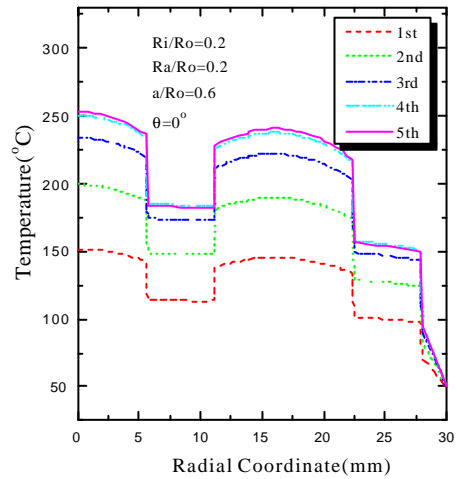


Fig. 8 Radial temperature profile with various heat generation density



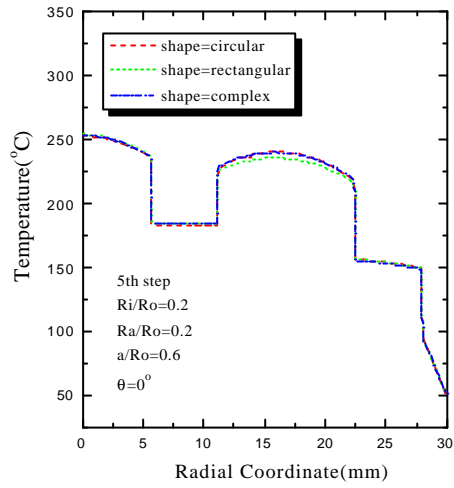


Fig. 9 Radial temperature profile with various specimen shapes

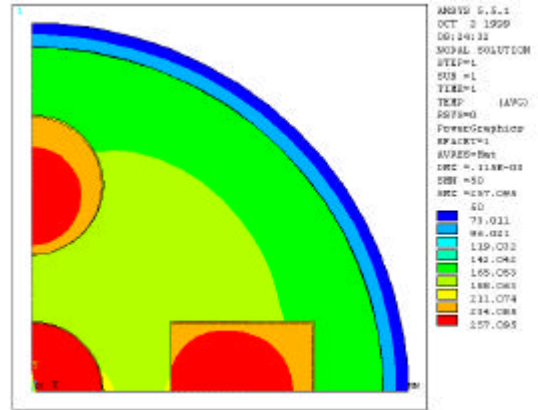


Fig. 10 Temperature contour of the capsule with multi holes