

# 하나로 조사시험용 다공 원통형 구조물의 온도해석

## Temperature Analysis of the Cylindrical Structure with Multi-Holes of HANARO Irradiation Test

이영신†

Lee, Young-Shin

(논문접수일 : 2004년 6월 30일)

최영진\*

Choi, Young-Jin

(심사종료일 : 2004년 9월 10일)

강영환\*\*

Kang, Young-Hwan

### 요지

재료나 핵연료조사시험에서 다공원통형구조물의 모든 구성품에서 감마열 및 fission과 같은 열원이 발생한다. 본 연구는 조사시험중 다공원통형구조물의 열적건전성을 평가하기 위해 온도분포에 대한 일반해를 구하는데 그 목적이 있다. 다공원통형구조물의 온도해석을 위해 2차원 열전도 방정식을 이용하였다. 유한요소해석은 ANSYS 6.1을 이용하여 수행하였다. 다공원통형구조물의 온도해석에서 이론해석결과와 유한요소해석결과는 홀의 개수가 3개 이하에서는 온도가 서로 잘 일치하는 것으로 나타났다. 구조물의 홀 개수가 4개일 때, 온도분포해석에 대한 두 결과의 차이가 증가하였다.

**핵심용어 :** 온도분포, 원통형구조물, 조사시험, 다공, 2차원, 유한요소해석

### Abstract

During the irradiation tests of material and fuel rod, all components of the cylindrical structure with multiple holes act like heat sources due to high gamma heat and fission heat. The objective of this study is to formulate the general solution for the temperature distribution to estimate the thermal integrity of structure during irradiation tests. For the temperature distribution analysis, the two-dimensional heat conduction theory is used. The unnumerical analysis is performed by the commercial finite element analysis code, ANSYS 6.1. If the cylindrical structure with hole number would not exceed three holes, the analysis results and finite element results are good agreement together.

For the structure with four holes, the discrepancy between FE results and analysis results of the structural temperature distribution is increased.

**keywords :** temperature distribution, cylindrical structure, irradiation test, multi holes, two dimensional, finite element analysis

### 1. 서 론

재료조사시험 또는 핵연료조사 시험에 사용되는 원통형구조물은 하나로(Hi-Flux Advanced Neutron Application Reactor : HANARO) 내에 설치되어 조사시험에 사용된다.<sup>1)</sup> 조사시험에서 시편은 개수나 목적에 따라 원통형 구조물의 중심 또는 편심되게 장착된다. 장착된 시편은 조사시험을 수행하는 동안 중성자 조사에 의해 원통형 구

조물의 모든 구성품이 열원으로 작용한다. 시편이 편심되게 위치한 다공원통형 구조물의 각각의 구성품이 열원으로 작용하면, 시편이 장착된 다공 홀에서의 열발생으로 인해 다공원통형 구조물의 열유속 및 온도분포는 불규칙적으로 변화하며, 이러한 불규칙적인 분포는 기하학적 형상과 재질에 의해 급격하게 변화한다. 따라서 조사시험전에 다공원통형 구조물의 각 부품에서 발생되는 열로 인한 재료특성을 파악하고, 온도분포 및 열응력에 대한 열적 건전성을

† 책임저자, 정회원 · 충남대학교 기계설계공학과 교수  
전화 : 042-825-6531 ; Fax : 042-822-7366

E-mail: lecys@cnu.ac.kr

\* 정회원, 충남대학교 대학원

\*\* 한국원자력연구소 책임연구원

• 이 논문에 대한 토론을 2005년 3월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2005년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

평가하여야만 하나로내에 장착되어 조사시험이 가능하다. 조사시험 중 발생한 열원은 다공원통형 구조물의 열적 특성을 변화시키기 때문에 장착전 다공원통형 구조물의 삽입되는 소결체의 위치 및 캡의 크기, 구성품의 두께 등 기하학적인 특성을 미리 예측하는 것이 중요하다. 이러한 온도예측을 통해 열적 건정성 뿐만 아니라, 다공원통형 구조물의 허용응력이 ASME Code NB의 허용기준을 만족하는 구조적 건전성을 확립하여야 한다.<sup>2)</sup>

Harayama<sup>3)~6)</sup>등은 소결체에 편심된 홀이 있는 구조물 및 다공의 실린더에 대하여 열전달 해석을 수행하였으며, Kaminaga<sup>7)</sup>등은 소결체와 피복관 사이의 열전달 해석을 수행하였다. 그러나 실제 여러 개의 핵연료봉이 구조물에 편심되게 설치되는 경우에 대해 연구가 필요하다.

본 연구는 다공원통형 구조물의 기초설계단계에서부터 구조물의 온도분포 및 열응력을 평가할 수 있는 이론해를 유도하고 이를 검증하기 위하여 유한요소해석을 수행하였다.

## 2. 본 론

그림 1은 홀이 편심되게 위치한 원통형 구조물의 기하학적 형상을 나타내고 있다. 원통형 구조물은 연료봉, 지지관, 외통관의 구조로 이루어져 있으며, 지지관과 연료봉 사이에는 Nak로 채워진 열매체가 있다. 또한 지지관(Support tube)과 외통관(Outer tube)사이에는 He으로 채워진 캡이 존재한다. 그림 2에서는 홀 개수 증가에 따른 해석모델의 형상을 나타내고 있다. 편심되게 위치한 홀에는 피복판(Cladding), 소결체(Pellet) 그리고 두 구조물

사이에 He으로 채워져 조립된 연료봉이 채워진다.

### 2.1 이론해석

본 연구에서 다공원통형 구조물의 온도해석을 위하여 원주방향과 반경방향을 고려한 정상상태 열전도 방정식을 사용하였다.

다공원통형 구조물의 열전도 방정식은 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$k \left\{ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} \right\} = -Q'''(r, \theta) \quad (1)$$

여기서  $T$ 는  $r$ 과  $\theta$ 좌표에 따른 온도를 나타내고, 열매체의 열전도도  $k$ 와 열발생률  $Q'''$ 는 일정하다. ( $k=상수$ ,  $Q'''(r, \theta)=q'''$ )

홀이 편심되게 위치한 원통형 구조물을 해석하기 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.<sup>6),8)</sup>

- (1) 원통형 구조물의 중심에서 같은 거리에 배치된 홀에서 열발생이 일어나며, 홀에서는 똑같은 선형발열비  $P$ 를 갖는 것으로 가정하였다.

$$\int_0^{2\pi} (-k) \left| \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{\rho=R_i} R_i d\phi = P \quad (2)$$

- (2)  $m$ 개의 홀을 가진 다공원통형 구조물의 방위각  $\pm\pi/m$

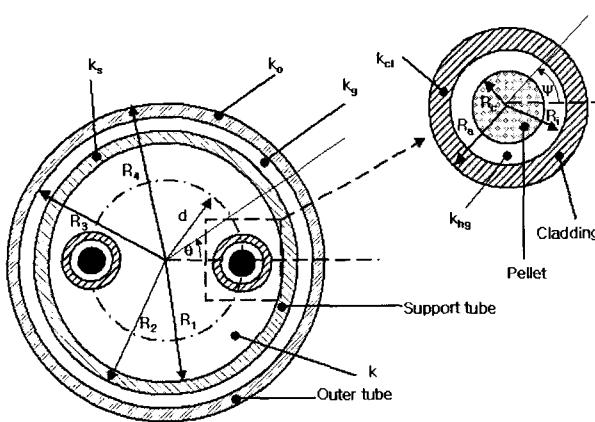


그림 1 Analysis model of cylindrical structure with multiple holes

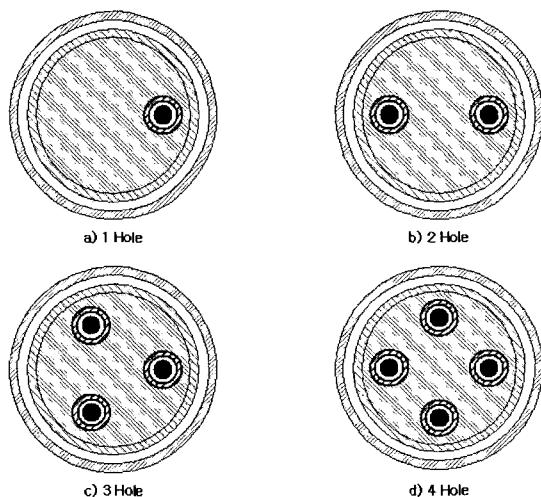


그림 2 Geometry of the analysis model for holes number

에서 대칭이고, 원주방향 열유속은 없다.

$$-k \left| \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial \theta} \right|_{\theta=\pm\pi/m} = 0 \quad (3)$$

(3) 원통형 구조물의 외통관 바깥표면에서 냉각수 온도  $T_w$ 는 35°C로 일정하다.

원통형 구조물의 열매체는 2차원 열전도방정식과 가정한 경계조건에 의해서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T(r, \theta) = \frac{q'''}{4k} (R_i^2 - r^2) + G(r, \theta) + C \ln \left\{ \frac{r^{2m} + a^{2m} - 2a^m r^m \cos(m\theta)}{R_i^{2m} + (a/R_i)^{2m} r^{2m} + a^{2m} - 2a^m r^m \cos(m\theta)} \right\} \quad (4)$$

여기서,  $C$ 는 적분상수,  $G(r, \theta)$ 는 경계함수이다.

식(3)의 경계함수를 결정하기 위하여 다음과 같이 가정한다.

- ① 열매체, 지지관, 외통관의 열전달계수는 일정하고 냉각재 온도는 외통관의 둘레를 따라서 균일하다.
- ② 지지관 및 외통관에서 원주방향 열유속은 반경방향 열유속보다 작기 때문에 무시될 수 있다.

가정된 조건을 적용하여 경계함수를 표현하면 다음과 같다.<sup>8)</sup>

$$G(R_1, \theta) - T_w = \alpha q''(R_1, \theta) - \Delta T_w \quad (5)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{R_1}{k_s} \ln(R_2/R_1) + \frac{R_1}{k_s} \ln(R_3/R_2) + \frac{R_1}{k_o} \ln(R_4/R_3) + \frac{R_1}{R_4 h_f} \\ q''(R_1, \theta) &= -k \left| \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R_1} \\ \Delta T_w &= \frac{R_2}{2k_s} \left\{ \left( 1 + \frac{2k_s \alpha_f}{R_2} \right) (q''_{so} - q''_{si}) - q''_{si} \ln \left( \frac{R_2}{R_1} \right)^2 \right\} \\ &\quad + \frac{R_4}{2k_o} \left( 1 + \frac{2k_o \alpha_f}{R_4} \right) (q''_{oo} - q''_{oi}) \\ q''_{si} &= \frac{\pi R_1^2 q'''_s}{2\pi R_2}, \quad q''_{so} = \frac{\pi R_2^2 q'''_s}{2\pi R_2}, \quad q''_{oi} = \frac{\pi R_4^2 q'''_o}{2\pi R_4} \\ q''_{oo} &= \frac{\pi R_4^2 q'''_o}{2\pi R_4}, \quad \alpha_f = \frac{1}{h_f} \end{aligned}$$

식(4)을 미분하고 식(5)에 대입하여 안쪽 열매체경계조

건을 적용하면 열매체의 온도분포를 다음과 같이 표현할 수 있다.<sup>8)</sup>

$$\begin{aligned} T(r, \theta) &= \frac{q'''}{4k} (R_i^2 - r^2) + \alpha q''_{av} \\ &\quad + \frac{R_1 q''_a}{2k} \ln \left\{ \frac{r^{2m} + a^{2m} - 2a^m r^m \cos(m\theta)}{R_i^{2m} + (a/R_i)^{2m} r^{2m} + a^{2m} - 2a^m r^m \cos(m\theta)} \right\} \\ &\quad - 2m \alpha q''_a \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(aR_i)^{nm}}{1 + nm \alpha k / R_i} (r/R_i)^{nm} \cos(nm\theta) \\ &\quad + T_w + \Delta T_w \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,

$$\begin{aligned} q''_{av} &= q''_1 - mq''_a, \quad q''_a = \frac{\pi R_a^2 q'''_s - P}{2\pi R_1} \\ P &= \pi q'''_{cl} (R_a^2 - R_i^2) + \pi R_c^2 q'''_{pl} \end{aligned}$$

## 2.2 유한요소해석

편심된 훌을 갖는 원통형 구조물의 유한요소해석에서 온도해석을 위하여 연료봉의 개수에 따라 각각 1/2, 1/4, 1/6, 1/4 해석모델을 생성하여 대칭경계조건을 적용하였다. 실제 원통형 구조물을 냉각수에 잠겨져 시험운전되기 때문에 원통형 구조물의 외통관 바깥표면에 대류경계조건을 적용하였다. 원통형 구조물이 조사시험운전될 때는 고온환경에 노출되며 원통형 구조물의 각 재질의 물성치는 온도에 따라 변화한다. 그러나 이론해석과 유한요소해석을 비교, 검증하기 위하여 상온의 물성치를 적용하였으며, 온도해석에서는 온도변화에 따른 열팽창을 무시하여 해석을 수행하였다. 그리고 이론해석과 유한요소해석의 비교, 검증을 위하여 각 재질의 경계면에 대해서 요소망을 일정하게 생성하였다.

유한요소해석에서는 구조물사이의 열전달은 전도에 의해서만 이루어 진다고 가정하였으며, He이 채워진 캡부분에서의 대류조건은 고려하지 않았다.

대류경계조건에서 적용된 냉각수의 온도는 35°C, 대류열전달계수는 420W/m<sup>2</sup>·°C이다.

편심된 훌을 갖는 원통형 구조물의 유한요소해석을 위하여, ANSYS 6.1을 사용하였으며, 사용된 요소는 PLANE 55이다.

그림 3은 2공 원통형 구조물의 유한요소해석에서 적용된 온도경계조건 및 대칭조건을 나타내고 있다. 표 1에서는 이론해석 및 유한요소해석에서 적용된 원통형 구조물의 기하학적 치수를 나타내고 있으며, 표 2에서는 해석에서 사용된

의 물성치를 나타내고 있다. 유한요소해석에서 Cladding, Support tube, Outer tube에서 캡과 열매체에서는 열을 발생하지 않는다.

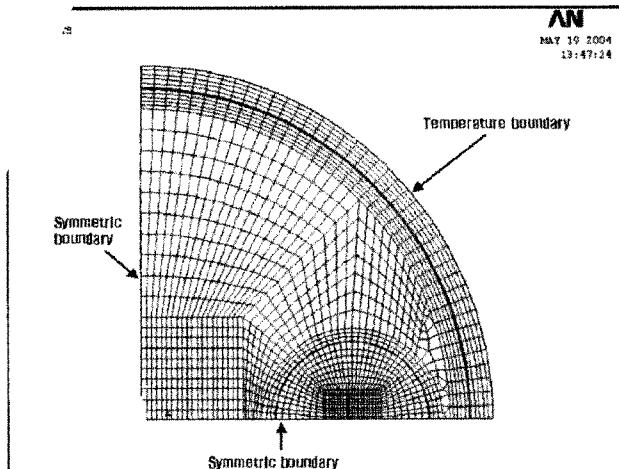


그림 3 Symmetric and temperature boundary conditions of the cylindrical structure with multiple holes

표 1 Dimensions of the cylindrical structure with multiple holes

Descriptions	Symbol	Dimension(mm)
Radius of pellet	R <sub>c</sub>	5.275
Inner radius of cladding	R <sub>i</sub>	5.320
Outer radius of cladding	R <sub>a</sub>	6.210
Distance between capsule and pellet	d	14.500
Inner radius of support tube	R <sub>i</sub>	21.220
Outer radius of support tube	R <sub>2</sub>	22.520
Inner radius of support tube	R <sub>3</sub>	22.650
Outer radius of support tube	R <sub>4</sub>	24.150

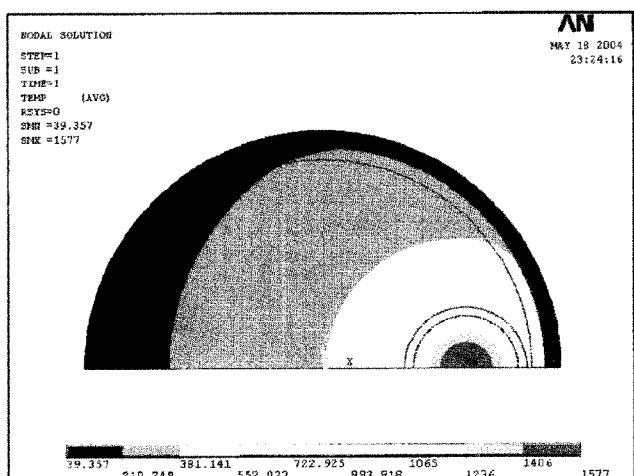


그림 4 Temperature distribution of the cylindrical structure with one hole

표 2 Mechanical and thermal properties of the cylindrical structure with multiple holes

Material	SUS316	Pellet	NaK
Young's modulus (GPa)	197	69	0
Mass density (kg/m <sup>3</sup> )	8000	2700	800
Poisson's ratio	0.30	0.33	0
Thermal conductivity(W/m · °C)	14.00	2.15	27.00
Thermal expansion coeff.(W/°C)	$16 \cdot 10^{-6}$	0	0
Heat generation ratio (MW/m <sup>3</sup> )	13.26	462.60	1.22

### 3. 결과 및 고찰

그림 4는 1개의 홀을 갖는 원통형 구조물의 온도분포를 나타낸 것이다. 1개의 홀을 갖는 원통형 구조물은 편심된 방향으로 급속한 온도변화를 보인다. 구조물의 최고온도는 소결체의 중심에서 발생하였으며, 온도는 1577°C이다. 편심된 홀의 영향으로 연료봉의 구성품들은 전체가 냉각수와 가까운 방향에서 최고온도를 나타내었으며, 열전도도가 낮은 캡의 영향으로 인해 캡을 통과하면서 급격하게 온도가 감소하였다. 또한 상대적으로 열전도도가 낮은 소결체내에서도 급격한 온도 변화를 나타내었다.

그림 5는 2개의 홀을 갖는 원통형 구조물의 온도분포를 나타낸 것이다. 2개의 홀이 있을 경우, 열원이 구조물 중심으로 상대편 홀에 영향을 주어 전체적으로 열매체의 온도가 상승하였다. 이는 해석모델의 y축을 기준으로 하여 상대측 열손실이 없기 때문이며, 특히 열매체의 열전도도가 상대적으로 제일 높기 때문에 구조물의 중심부의 온도가 일정하게 분포하고 있다. 연료봉 구성품의 온도는 상대 쪽 홀에 위치한 열원에 의해 냉각수 방향보다 구조물의 중

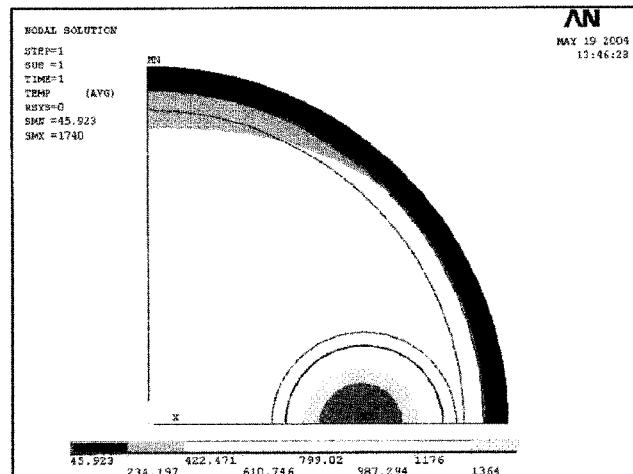


그림 5 Temperature distribution of the cylindrical structure with two holes

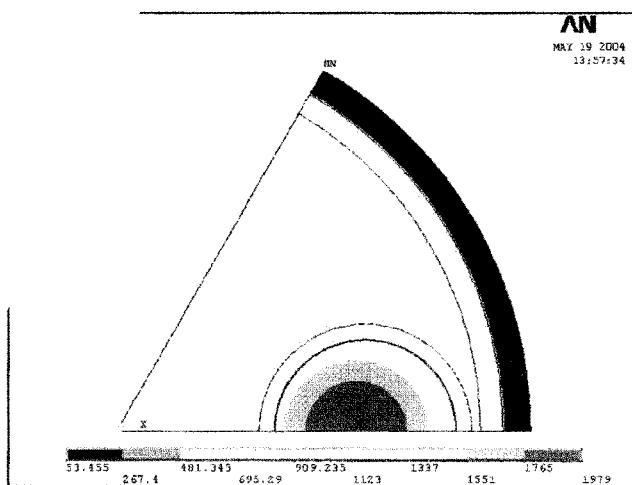


그림 6 Temperature distribution of the cylindrical structure with three holes

심방향의 온도가 높게 나타났다. 이는 홀이 1개 있는 경우와 비교하면 반대현상을 나타낸 것이다.

3개의 홀을 갖는 원통형 구조물인 경우 그림 6과 같이 홀간의 영향을 크게 받기 시작한다. 홀에는 높은 열원이 존재하기 때문에 홀간의 영향은 상대적으로 구조물의 최고 온도가 소결체의 중심에서 냉각수와 반대방향인 원통형 구조물의 중심방향으로 이동하여 나타나게 한다.

홀이 증가함에 따라 본 해석모델에서 최대의 4개일 경우 구조물의 최고온도는 소결체의 중심에서 구조물의 중심 방향으로 치우치게 된다. 홀에 위치한 열원은  $\pm\pi/4$ 의 대칭면을 기준으로 한 열매체에 집중적으로 영향을 주고, 상대적으로 냉각수의 영향은 1/4배의 영향을 받게 되기 때문에 외통관을 제외한 모든 구조물에서 높은 온도를 나타

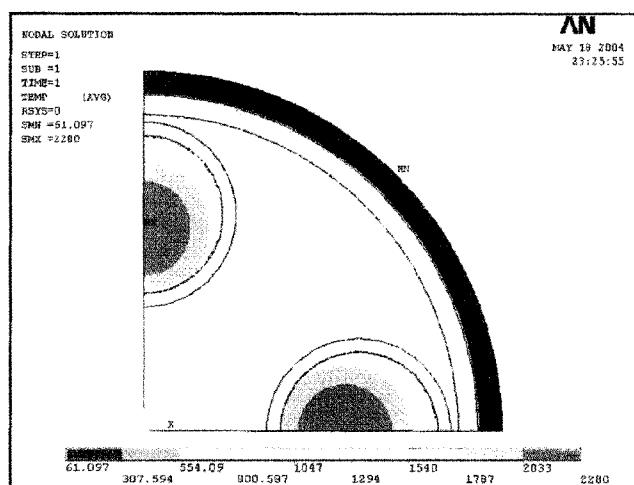


그림 7 Temperature distribution of the cylindrical structure with four holes

낸다. 피복관, 열매체, 지지관은 열전도도가 상대적으로 크기 때문에 열원이 있는 대칭면을 제외한 면에서 온도변화는 크지 않다. 외통관은 지지관과 He으로 분리되어 있기 때문에 낮은 열전도도와 냉각수의 영향으로 인해 낮은 온도분포를 나타내고 있다.

그림 8은 1개의 홀이 있는 원통형 구조물 중 피복관 바깥면에 대한 온도분포를 나타내고 있다. 유한요소해석결과, 소결체 중심부를 기준으로 냉각수 방향의 피복관 표면이 낮고 구조물 중심방향의 표면이 높다. 또한  $\psi = \pm 90^\circ$ 에서 온도의 변화가 불규칙적으로 일어났다. 이는  $\psi = \pm 90^\circ$  이후에는 냉각수의 영향을 상대적으로 작아지고 열매체의 열전도도 영향을 크게 받기 때문이다.

이론해석은 유한요소해석과 비교적 일치하고 있다. 이론

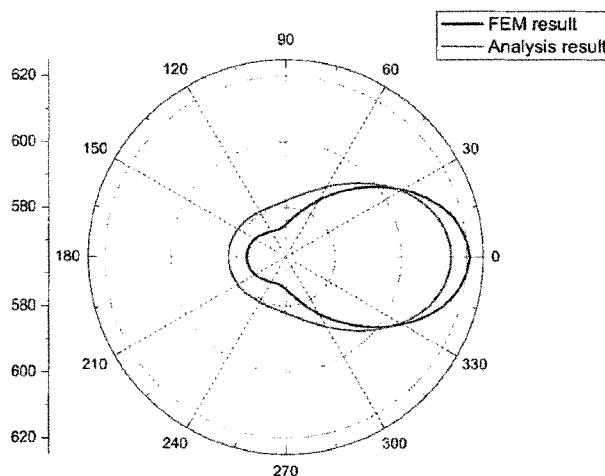


그림 8 Comparison of cladding outer surface temperature on the cylindrical structure with one hole from analysis results and finite element results

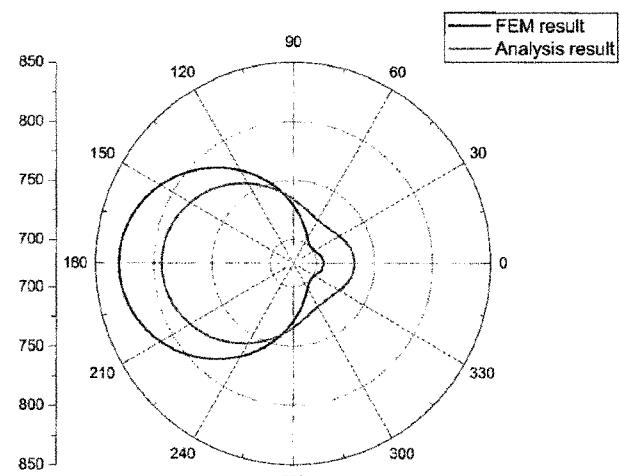


그림 9 Comparison of cladding outer surface temperature on the cylindrical structure with two holes from analysis results and finite element results

해석에서는  $\psi = \pm 90^\circ$  이후에도 냉각수가 지속적으로 영향을 주기 때문에 온도변화의 불규칙적으로 일어나지 않고 있다.

그림 9은 홀이 2개 일때의 피복관 바깥면 온도분포를 나타내는 것이다. 유한요소해석결과, 이때의 온도분포는 홀이 1개일때의 온도분포 경향과 완전히 반대의 경향을 보여주고 있다. 소결체 중심으로부터 구조물의 중심방향으로 갈수록 온도가 증가하는 이유는 반대편의 홀에 있는 열원에 의해서 열매체의 온도가 상대적으로 냉각수의 영향보다 크게 작용할 수 있을만큼 상승했기 때문이다. 냉각수의 영향은  $\psi = \pm 30^\circ$ 까지 영향을 미치며,  $\psi = \pm 30^\circ$  이후에는 열매체의 영향을 더 크게 받고 있다.

이론해석에서도 유한요소해석과 같이 홀이 1개 있는 경우와 반대경향을 보여주고 있다. 그러나 피복관내에서의 급격한 온도변화는 일어나지 않고 완만하게 상승하는 것을 알 수 있다. 이것은 유한해석과 달리 변곡점에 해당하는  $\psi = \pm 60^\circ$  이후부터 냉각수의 영향이 감소하기 시작하여  $\psi = \pm 90^\circ$  이후에는 열매체의 영향을 지배적으로 받기 때문이다.

홀이 3개인 원통형 구조물의 유한요소결과는 그림 9에서 나타낸 것과 같이  $\psi = \pm 10^\circ$  이후에는 전체적으로 열매체의 영향이 크며, 이러한 열매체의 영향으로 인하여 피복관의 온도를 전체적으로 상승시키고 있다.

이론해석에서는 유한요소해석과 비교하여 비교적 일치하고 있다. 그러나 열매체의 온도상승이 비교적 적게 나타났다.

그림 10은 홀이 4개인 경우의 피복관 바깥면 온도분포이다. 유한요소해석에서는 전체적으로 열매체의 온도가  $1000^\circ$  이상으로 매우 높다. 이러한 고온의 열매체는 열전도도가 높은 피복관의 온도를 상승시키고 홀이 3개 있을 경우와 같이 냉각수의  $\psi = \pm 10^\circ$ 부근에 영향을 미치고 있다. 이론해석에서도 유한요소해석과 같은 경향을 나타내고 있다.

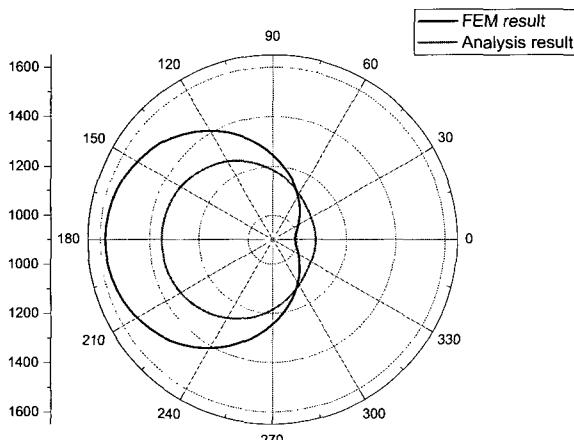


그림 11 Comparison of cladding outer surface temperature on the cylindrical structure with four holes from analysis results and finite element results

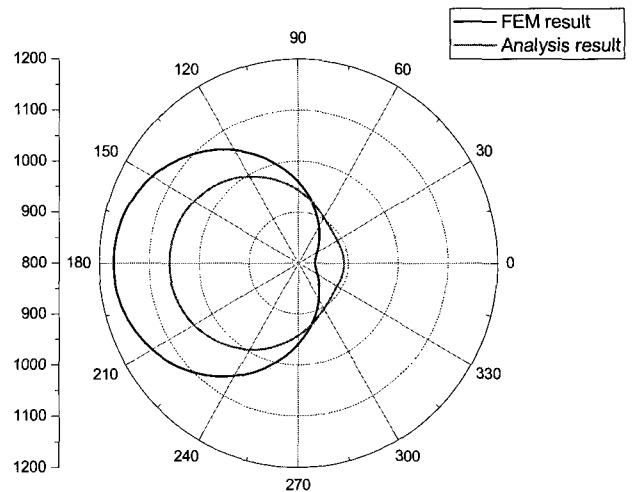


그림 10 Comparison of cladding outer surface temperature on the cylindrical structure with three holes from analysis results and finite element results

그림 12는 홀 개수 증가에 따른 지지관의 안쪽 표면온도 변화를 나타내고 있다. 유한요소해석결과 상대적으로 열원과 가까운 부분에서는 온도가 높고, 시편가 거리가 먼  $\theta = \pm 180^\circ, \pm 90^\circ, \pm 60^\circ, \pm 45^\circ$ 에서 대칭면에서 온도가 가장 낮게 나타났다. 홀이 1개 또는 2개인 경우 유한요소해석과 일치하였으며, 3개인 경우 두결과 사이에 약간의 온도차이를 보였으며, 4개인 경우 두 결과의 차이는 상당히 증가하였다. 홀의 개수가 3개 또는 4개인 경우 두결과는 시편이 장착된 축에 해당되는 각각  $\theta = 0^\circ, \theta = \pm 120^\circ$ 와  $\theta = 0^\circ, \theta = \pm 95^\circ, \theta = 180^\circ$ 에서 이론해석결과보다 유한요소해석결과 값이 낮게 나왔으며, 각각  $\theta = \pm 60^\circ, \theta = 180^\circ$ 와  $\psi = 0^\circ, \theta = \pm 45^\circ, \theta = \pm 135^\circ$ 에서는 유한요소해석결과값이 높게 나왔다.

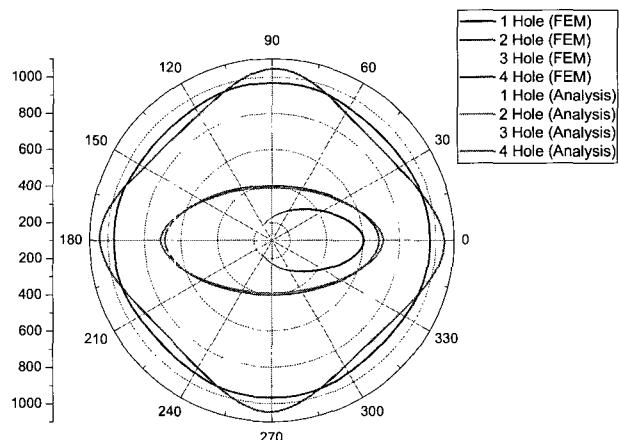


그림 12 Comparison of support tube inner surface temperature on the cylindrical structure with multiple holes from analysis results and finite element results

다. 이것은 피복관 해석의 결과와 같이  $\psi$ 가 증가할수록 이론해석보다 유한요소해석의 온도상승이 커지는 경향과 일치한다.

그림 13 및 그림 14는 원통형 구조물의 홀 개수 증가에 따른 피복관 바깥면 및 지지관 안쪽면의 온도 변화를 나타내고 있다. 유한요소 및 구조해석 결과, 구조물의 홀 증가는 피복관의 바깥면은 개수가 증가할수록 피복관에서의 최고 및 최저 온도차이는 증가하고 지지관에서의 두 온도차이는 감소한다. 이러한 이유는 홀이 증가할수록 홀에 위치한 열원이 많은 열을 발생하므로써 지지관과 외통관 사이의 갭에 의해 충분히 열매체를 증가 시키기 때문에 상대적으로 피복관의 온도상승을 일으키고 있기 때문이다 그러나  $\psi=0^\circ$ 에서는 냉각수의 영향으로 열매체의 온도상승을 어느정도 막아주고 있다. 지지관의 안쪽면은 구조물의 동심원상에 위치하

기 때문에 상대적으로 같은 냉각수 영향을 받기 때문에 온도 차이는 점점 감소한다.

#### 4. 결 론

- 1개의 홀을 갖는 원통형 구조물과 2개 이상의 홀을 갖는 원통형 구조물은 홀에 장착된 연료봉의 온도분포는 반대 경향을 나타낸다.
- 홀의 개수가 증가할수록 피복관의 바깥면과 지지관의 안쪽면의 온도는 이론해석결과값이 유한요소해석결과값보다 높으며,  $\theta$ 와  $\psi$ 가 증가할수록 유한요소의 온도증가가 이론해석의 온도증가보다 커다.
- 편심된 홀을 갖는 원통형구조물의 이론해석과 유한요소 해석결과 홀의 개수가 2개 이하인 경우 온도결과값은 일

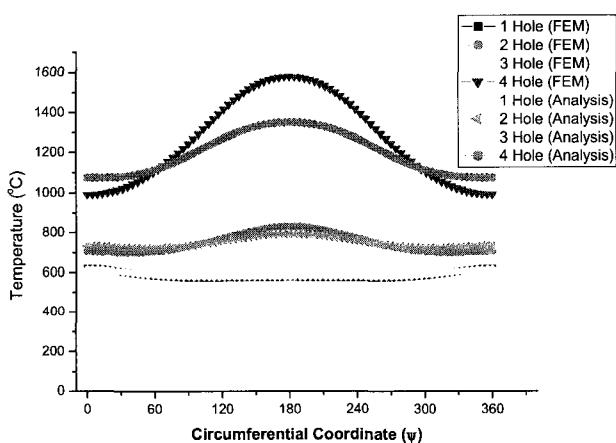


그림 13 Comparison of cladding outer surface tube temperature on the cylindrical structure with multiple holes from analysis results and finite element results

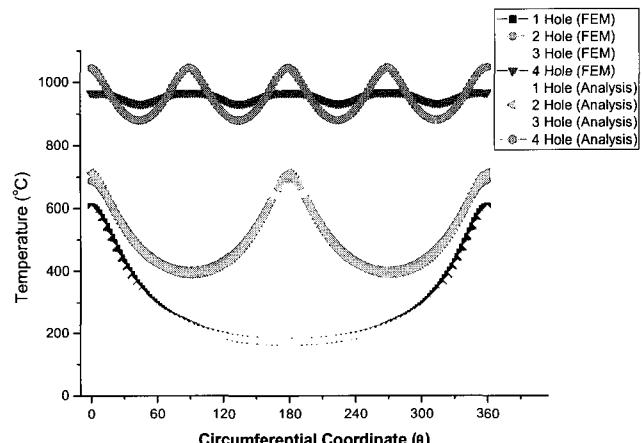


그림 14 Comparison of support tube inner surface temperature difference on the cylindrical structure with multiple holes from analysis results and finite element results

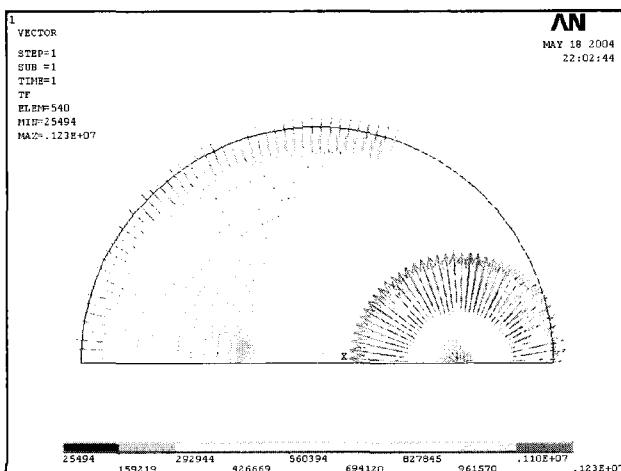


그림 15 Heat flux of the cylindrical structure with one hole

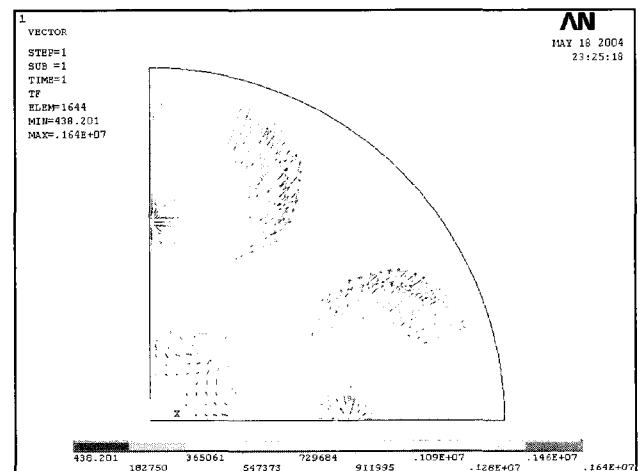


그림 16 Heat flux of the cylindrical structure with four holes

치하였으며, 홀의 개수가 3개인 경우 두 해석결과의 온도차이는 작았다. 그러나 4개인 경우 두해석결과의 온도차이는 상당히 증가하였다.

본 연구의 결과 다공원통형 구조물의 설계단계에서부터 홀의 개수 및 위치를 설정하는데 있어 유한요소해석과 더불어 이론해석을 통하여 다공원통구조물의 조사시험시 구조물의 온도분포를 이용할 수 있으며 이를 통하여 개방캡슐구조물인 경우 조사조건에 알맞은 위치 및 재질의 선택을 할 수 있어 조사시험용 구조물의 구조적, 열적 견전성 평가도구로 활용할 수 있다.

### 참 고 문 헌

1. Lee, Y.S., Choi, M.H., Kang, Y.H., Shin, D.S., "A Structural Analysis of the Circular Cylinder with Multi Holes under Thermal Loading," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.212, 2002 pp.273~279
2. ASME Boiler. Pressure Vessel Code Section III, Div. 1, Subsection NB, 1995
3. Harayama, Y., "Calculated Effect of Radially Asymmetric Heat Generation on Temperature and Heat Flux Distribution in a Fuel Rod", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 31, 1974, pp. 66~71
4. Harayama, Y., Kyoya, M., "Analysis of Effect Eccentric Holes in Pellets on Temperature and Heat Flux Distribution in Fuel Rod", *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 23, No. 2, 1986, pp.151~159
5. Harayama, Y., Someya, H., Hoshiya, T., "Effect of Eccentric Pellet on Gap conductance in Fuel Rod", *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 28, No. 10, 1991, pp.961~964
6. Harayama, Y., Hoshiya, T., Someya, H., Niimi, M., Kobayashi, T., "Estimation for Temperature Distribution in a Heat Generating Cylinder with Multiple Hole", *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 30, No.4, 1993, pp. 291~301.
7. Kaminaga, F., Sato, S., Okamoto, Y., "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, 1991, pp.121~130
8. 최영진, "다공원통구조물의 온도 및 열응력해석", 석사학위논문, 충남대학교, 2002, pp.1~51.
9. Furukwa, T., Noda, N., Ashida, F., "Generalized Thermoelasticity for an Infinite Body with a Circular Cylindrical Hole", *JSME International Journal, Series I*, Vol. 33, No. 1, 1990, pp. 26~32.
10. Furukwa, T., Noda, N., Ashida, F., "Generalized Thermoelasticity for an Infinite Solid Cylinder", *JSME International Journal, Series I*, Vol. 34, No. 3, 1991, pp. 281~286
11. Hsu, T. R., "Transient Thermal Stresses on a Finite Disk due to a Continuous Point Heat Source", *Journal of Engineering for Industry, Trans of ASMF*, Vol.92, 1970, pp. 357~367