

열하중을 받는 다공원통구조물의 최적화

이종웅[†] · 이영신* · 최영진* · 강영환**
(2004년 2월 21일 접수, 2004년 7월 26일 심사완료)

Optimization for the Cylindrical Structure with Multi-Holes Under Thermal Loading

Jong-Woong Lee, Young-Shin Lee, Young-Jin Choi and Young-Hwan Kang

Key Words: Optimization(최적화), Capsule(캡슐), Sealed Basket Type(밀폐형), Open Basket Type(개방형), Subproblem Approximation Method(부문제근사법)

Abstract

During fuel irradiation tests, all parts of cylindrical structure with multiple holes act as heat sources due to fission heat and γ -flux. The high temperature is especially generated in the center of pellet. Because of the high temperature, many problems occur, such as melting of pellet and declining of heat transfer between cladding and coolant. In this paper, it is attempted to minimize the temperature of pellet using optimization method. For thermal and optimization analysis of structure, the finite element method code, ANSYS 5.7 is used. Through the optimum design process, the temperature of SBT diminished 10% and the temperature of OBT diminished 18%.

기호설명

- T_{max} : 목적함수(최대온도)
- a : 시편의 위치
- b : 지지관의 두께
- c, g : 캡의 두께
- d, h : 외통관의 두께
- f : 피복관의 두께
- P_m : 압력차에 의한 응력
- P_{et} : 온도차에 의한 응력
- S_m : 설계응력

및 γ -flux에 의해 열원으로 작용한다. 핵반응 및 γ -flux에 의해 발생된 열원은 다공원통형 구조물 각 부분의 기하학적 모양의 다름에 따라 서로 다른 온도분포와 온도에 의한 기계적인 특성을 나타낸다. 본 논문에서는 핵연료조사시험시 고온에 의해 많은 문제점이 발생하기 때문에 밀폐형핵연료캡슐(SBT)과 개방형핵연료캡슐(OBT)에 대해서 최적화를 통해 소결체의 중심온도를 낮추려고 한다.^(1,2)

2. 본 론

1. 서 론

다공원통형 구조물의 하나인 핵연료조사캡슐에 조사시험이 수행될 때에는 주요부품들이 핵반응

2.1 해석모델

Fig. 1, Fig. 2는 본 논문에서 고려한 다공원통형구조물인 SBT와 OBT의 개념을 보여주고 있다. SBT의 반경은 48.6 mm이며, 외통관과 지지관은 SUS304, 피복관은 Zircaloy-4 그리고 열매체의 재질은 NaK이다. 캡에는 헬륨으로 채워져있고 냉각수의 온도는 40 °C이다. OBT의 반경은 15.11 mm이며 그 외의 조건은 SBT와 동일하다.

[†] 책임저자, 회원, 한국항공우주연구원
E-mail : jwlee@kari.re.kr
TEL : (042)860-2587 FAX : (042)860-2233

* 회원, 충남대학교
** 한국원자력연구소

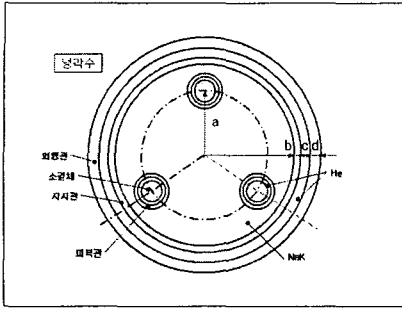


Fig. 1 Figure of SBT

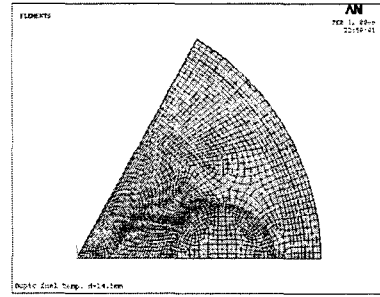


Fig. 3 Analysis model of SBT

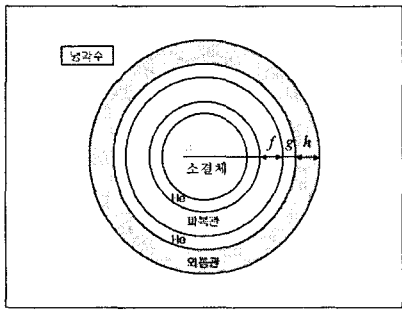


Fig. 2 Figure of OBT

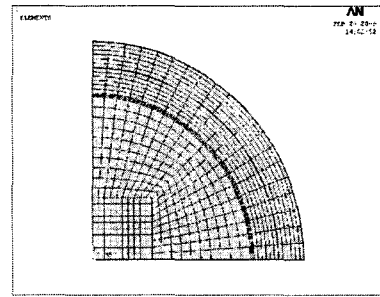


Fig. 4 Analysis model of OBT

2.2 유한요소해석

본 연구에서 사용한 최적설계 알고리즘은 근사화법중 하나인 부문제 근사법을 택하였다. 부문제 근사법은 종속변수(목적함수와 상태변수)의 도함수가 아닌 오직 그 값만 필요한 영계법(zero-order method)을 개선한 것이다. 먼저 종속변수는 최소자승적합(least squares fit)에 의해 근사화되고, 제약 최소화 문제는 벌칙함수(penalty function)를 이용하여 비제약문제로 전환된다. 그리고 최소화는 근사화되고 벌칙화된 함수가 수렴할 때까지 반복 수행한다.⁽³⁾

온도해석에 대해서 각 부품에서의 열발생은 균일하고, 각 층의 열전달문제는 중심선에 대해서 대칭이며, 축 방향으로 변화가 없고, 냉각수 온도는 일정하다고 가정하였다. OBT에 대해서는 소결체에서 발생하는 열량은 소결체와 피복관 사이의 헬륨영역에서 전도되는 열량과 같고, 이는 피복관에서 발생 및 전도되는 열량과 같다고 놓고 각 경계에서의 온도를 구하였다. SBT에 대해서는 크게 열매체부분, 외통관과 지지관 부분, 피복관과 소결체부분으로 나누어 열매체부분의 경계부

Table 1 Material and heat generation of each part

	Material	Heat Generation (MW/m ³)
Pellet	UO ₂	462.60
Thermal media	NaK	13.26
Cladding	Zircaloy-4 ⁽⁵⁾	10.70
Support tube	SUS304	1.22
Outer tube	SUS304	1.22

분인 열매체 바깥표면부분을 경계함수로 놓고 해석을 하였다.⁽⁴⁾

Fig. 3, Fig. 4는 유한요소 해석모델을 나타낸다. 축대칭을 고려하여 1/6, 1/4모델링을 하였으며 외통관 외면은 강제대류 조건을 주었다. 해석에 사용한 프로그램은 ANSYS 5.7을 사용하였고 2차원 열-구조 연성 요소인 PLANE13을 사용하였다. 해석에 주어진 열전달계수는 17 kW/m²이며, 냉각수 온도는 40 °C이다. Table 1은 사용재료 및 열 발생밀도를 나타낸다.

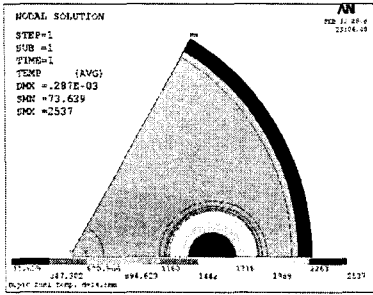


Fig. 5 Initial analysis of SBT

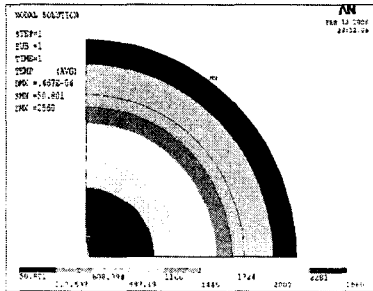


Fig. 6 Initial analysis of OBT

Fig. 5, Fig. 6은 초기모델의 온도분포를 나타낸다. SBT에서 소결체 중심의 최대온도는 2537 °C 이고 냉각수와 만나는 외통관 표면에서 100 MPa의 열응력이 발생하였다. OBT에서 소결체 중심의 최대온도는 2560 °C이고 냉각수와 만나는 외통관에서 109 MPa의 열응력이 발생하였다.

2.3 유한요소해석과 이론해석 비교

최적설계과정의 선행단계로 유한요소해석에 대한 검증은 위해 ANSYS 5.7을 이용하여 해석을 수행하고 이론해석 결과와 비교하였다. OBT에 대해서는 축대칭, 긴 원통셀로 정의된 1차원 열전달 문제로 해석하였으며, 해석에서의 열전달은 시간에 무관한 정상상태이다.

OBT 및 SBT의 유한요소해석은 재료의 온도에 따른 비선형성을 고려한 해석으로 인하여 이론해석과 비교하여 OBT는 5 %, SBT는 10 % 정도의 차이를 보이고 있으나 전체적인 온도수준은 잘 일치한다고 판단된다.

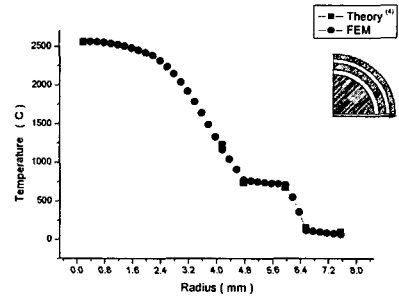


Fig. 7 Comparison of radial temperature profiles for OBT

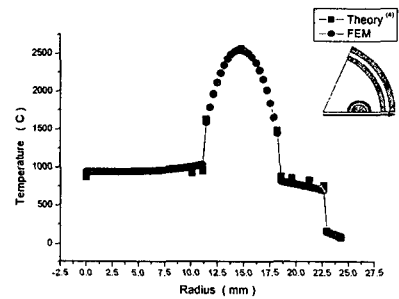


Fig. 8 Comparison of radial temperature profiles for SBT

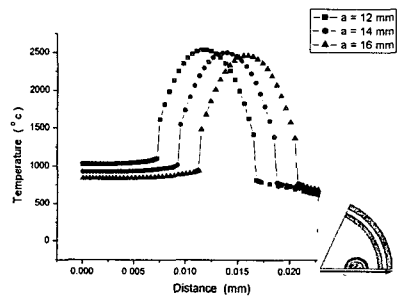


Fig. 9 Comparison of radial temperature profiles at various pellet location for SBT

2.4 설계변수평가

Fig. 9는 SBT에 대한 소결체의 위치에 따른 온도분포를 나타낸다. 소결체의 위치가 캡슐의 중심에서 외통관쪽으로 2 mm씩 이동할수록 캡슐의 중심온도는 100 °C, 소결체의 중심온도는 50 °C씩 감소한다. 그리고, 소결체의 위치가 외통관

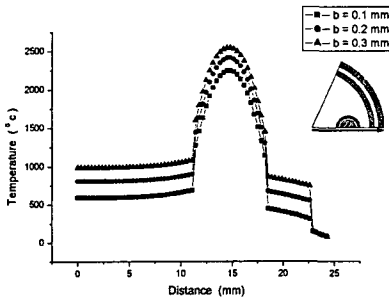


Fig. 10 Comparison of radial temperature profiles at various gap thickness for SBT

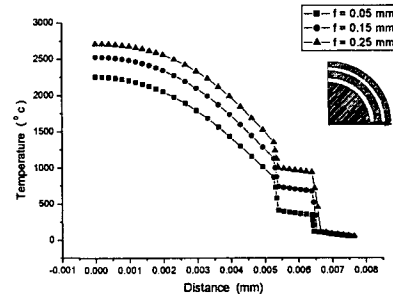


Fig. 13 Comparison of radial temperature profiles at various gap thickness for OBT

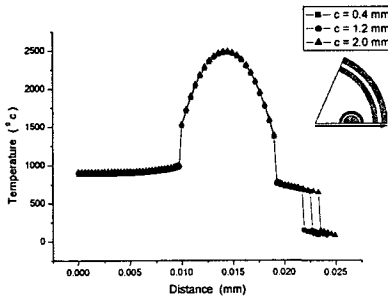


Fig. 11 Comparison of radial temperature profiles at various support tube thickness for SBT

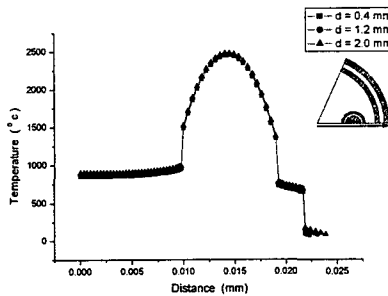


Fig. 12 Comparison of radial temperature profiles at various outer tube thickness for SBT

쪽으로 이동할수록 지지관의 내면온도는 상승하는 반면에 외면온도는 감소하는 경향을 나타낸다. 지지관 및 외통관은 소결체와의 거리가 가까워지기 때문에 상대적으로 온도가 높아지지만, 외통관의 경우 4 °C정도의 증가를 보여 소결체

의 이동에 따른 온도의 영향은 적다. Fig. 10은 지지관과 외통관사이의 갭의 두께에 따른 온도분포를 나타낸다. 갭의 두께가 0.1 mm씩 감소할수록 캡슐의 중심에서는 190 °C, 소결체의 중심에서는 130 °C ~ 170 °C 그리고 지지관 부분에서는 190 °C ~ 230 °C씩 감소하였다. 특히, 지지관의 온도상승이 큰데 이는 갭에 채워진 헬륨의 열전도도가 낮기 때문에 갭의 두께가 증가하면 상대적으로 열전달이 잘 되지 않기 때문이다. 그리고 외통관의 내면온도와 외면온도는 증가하는 경향을 나타내지만 온도변화는 적다. Fig. 11은 지지관의 두께에 따른 온도분포를 나타낸다. 지지관의 두께를 증가시키면 캡슐의 온도는 전체적으로 증가한다. 이는 열매체와 비교하여 지지관의 열전도도가 작기 때문에 지지관 내부의 온도를 증가시킨다. 하지만, 지지관의 두께가 0.8 mm씩 증가할수록 온도변화는 전체적으로 10 °C ~ 15 °C의 온도변화를 보이므로 지지관 두께증가에 따른 온도변화는 크지 않다. Fig. 12는 외통관의 두께 증가에 따른 온도분포를 나타낸다. 외통관의 두께가 증가할수록 캡슐의 전체적인 온도는 증가하지만 온도변화량은 15 °C ~ 20 °C로 크지 않다.

Fig. 13은 OBT에 대한 갭의 두께에 따른 온도분포를 나타낸다. 갭의 두께가 감소할수록 캡슐 기준으로 안쪽부분인 소결체와 지지관의 온도는 감소하고 바깥부분인 외통관의 온도는 증가한다. 갭의 두께가 0.1 mm씩 변할수록 소결체중심에서는 190 °C ~ 270 °C, 지지관에서는 260 °C ~ 330 °C의 온도변화를 보이고 있으며, 외통관

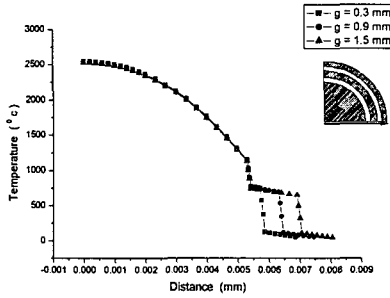


Fig. 14 Comparison of radial temperature profiles at various cladding thickness for OBT

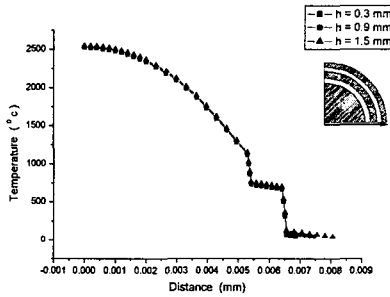


Fig. 15 Comparison of radial temperature profiles at various outer tube thickness for OBT

에서는 1 °C ~ 3 °C의 온도변화를 나타낸다. 겹의 두께는 OBT에서도 SBT과 마찬가지로 캡슐의 전체온도를 크게 낮출 수 있는 설계변수라 판단된다. Fig. 14와 Fig. 15는 피복관의 두께 및 외통관의 두께에 따른 온도분포를 나타낸다. 피복관의 두께가 증가할수록 온도는 감소하고 외통관의 두께가 증가할수록 온도는 감소하였다. 이에 따라 피복관의 두께를 1 mm부터 8 mm까지 증가시키며 해석한 결과 6 mm까지는 온도가 감소하다가 7 mm부터는 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 6 mm까지는 피복관의 열전도도의 영향 때문이지만, 7 mm부터는 열전도도보다는 소결체가 냉각수와 거리가 멀어지기 때문이다. 피복관의 두께가 0.6 mm씩 변할수록 전체적으로 8 °C ~ 19 °C의 온도변화를 보이고 외통관의 두께에 대해서는 0.6 mm씩 변할수록 전체적으로 13 °C ~ 20 °C의 온도변화를 보이고 있다. 따라서 피복관 및 외통관의 두께는 온도분포에 대한영향이 크지

Table 2 SBT variables

Design variables	Lower	Initial	Upper
a (mm)	13.00	14.50	16.00
b (mm)	0.73	1.40	5.00
c (mm)	0.01	0.20	0.50
d (mm)	1.21	1.40	5.00

Table 3 OBT variables

Design variables	Lower	Initial	Upper
f (mm)	0.500	1.000	3.000
g (mm)	0.010	0.155	0.500
h (mm)	0.500	1.000	2.000

않다.

2.5 최적설계조건

소결체의 중심온도를 낮추기 위한 최적설계를 수행하기 위하여 최적화에 관한 목적함수와 제한조건을 다음과 같이 수식화 하였다. 이 식에서 사용된 설계변수의 정의는 Fig. 1과 Fig. 2에 나타나 있다.

$$\begin{aligned}
 & \text{목적함수} && T_{\max} \\
 & \text{제한조건} && P_m + P_{et} < 3S_m^{(6)} \quad (1) \\
 & && c, g > 0 \\
 & && b, d, f, h > PD/2\sigma \\
 & \text{설계변수} && a, b, c, d, f, g, h
 \end{aligned}$$

목적함수 T_{\max} 는 소결체 중심에서의 최고 온도를 나타낸다. 조사시험간에 소결체 중심에서 고온이 발생되어 소결체의 용융, 냉각수와와의 열전달, 열응력에 의한 열하중 등 많은 문제를 야기한다. 따라서 캡슐의 기하학적 형상을 변화시켜 소결체 중심에서의 최고온도를 낮추는 것이 이 최적설계의 목적이다.

Table 2, Table 3에 SBT와 OBT에 대한 설계변수의 범위를 나타내고 있다. 제한 조건에는 재료의 허용응력 조건, 열하중에 의한 변형시 겹의 간섭 조건 그리고 구조적으로 원통셀의 최소두께

조건을 부여하였다. 식 (1)의 첫 번째 제한 조건은 캡슐의 내외 압력차에 의한 응력(P_m)과 반경방향으로의 온도차에 의한 열응력(P_r)의 합이 설계응력강도(S_m)를 만족하도록 정하였다. 두 번째 제한조건으로, 열하중에 의해 각 부품들이 변형을 하게 되는데 이때 헬륨으로 채워져 있는 갭에서 변형에 의해서 각 부품간의 간섭을 방지하기 위해 열변형에 의한 갭의 두께를 0보다 크도록 정하였다. 세 번째 제한조건은 내외압차가 있는 원통셀의 최소두께를 만족하도록 피복관, 지지관, 외통관의 두께를 정하였다.

3. 결과 및 고찰

최적설계는 각각의 설계변수에 의한 해석과 모든 설계변수를 고려한 해석을 수행하였다. SBT에서 각각의 설계변수에 대한 최적설계를 수행한 결과 설계변수 a 는 14.5 mm에서 15.98 mm로, b 는 1.40 mm에서 0.74 mm로, c 는 0.2 mm에서 0.01 mm로, d 는 1.40 mm에서 1.22 mm로 변화하였다. 소결체 중심의 최대온도는 a 에 의해 2513 °C, b 에 의해 2529 °C, c 에 의해 2220 °C 그리고 d 에 의해 2533 °C로 변화하였다. 이 중 변수 c 인 갭의 두께 감소에 의해 현저하게 온도가 감소한 것을 알 수 있다.

모든 변수의 영향을 알아보기 위하여 모든 설계변수를 고려한 최적설계를 수행한 결과 a 는 15.99 mm, b 는 0.74 mm, c 는 0.02 mm, d 는 1.22 mm로 변화하였고, 소결체 중심에서의 최대온도는 356 °C가 감소한 2181 °C가 나왔다. 이는 각각의 설계변수를 고려한 해석의 값과 거의 유사한 결과를 확인할 수 있다. 최적화 과정에서 307 MPa, 277 MPa의 높은 응력이 나타났는데 이는 지지관 두께의 증가에 의한 것이고 최적화후의 응력은 101 MPa에서 92 MPa로 제약조건을 만족하는 값으로 수렴하였다. 열하중에 의한 갭 변위의 변화를 보면, 초기 열변형에 의한 갭두께 0.299 mm에서 제약조건을 만족하는 값인 0.0354 mm로 수렴하였다. 따라서 지지관과 외통관사이의 갭에서 간섭이 없음을 알 수 있다.

OBT에서 각각의 설계변수에 대해 최적설계를 수행한 결과 설계변수 f 는 1.00 mm에서 2.98 mm로, g 는 0.155 mm에서 0.010 mm로, h 는 1.00 mm에서 0.50 mm로 변화하였다. 소결체중심

의 최대온도는 f 에 의해 2540 °C, g 에 의해 2116 °C, h 에 의해 2550 °C로 변화하였다. OBT에서도 갭의 두께 감소에 의해 현저한 온도감소를 확인할 수 있다.

모든 변수의 영향을 알아보기 위하여 모든 설계변수를 고려한 최적설계를 수행한 결과 f 는 0.81 mm, g 는 0.01 mm, h 는 0.86 mm로 변화였고, 소결체 중심에서의 최대온도는 454 °C가 감소한 2106 °C가 나왔다. 모든 설계변수를 고려한 해석에서는 각각의 설계변수를 고려한 해석과는 달리 설계변수 f 의 감소 및 설계변수 h 의 증가를 알 수 있다. 이는 각각의 변수를 고려한 해석시에는 각 설계변수에 대한 영향만을 고려하지만 모든 변수를 고려한 해석에서는 각각의 변수에 대한 영향뿐만 아니라 변수간의 영향이 작용했기 때문이다. 최대응력은 외통관에서 발생되며, 109 MPa에서 102 MPa로 감소하였다. 주로 외통관의 두께 변화에 크게 영향을 받으며 전체적인 응력수준은 제약조건을 만족함을 알 수 있다. 피복관과 외통관 사이의 갭에서 열하중에 의한 갭 변위의 변화를 살펴보면 갭의 두께변화에 큰 영향을 받으며

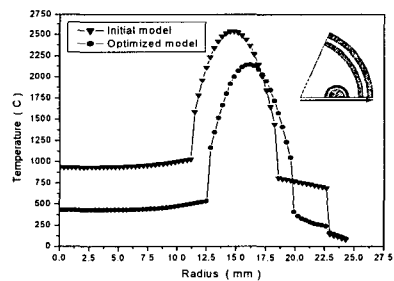


Fig. 16 Temperature profile of SBT

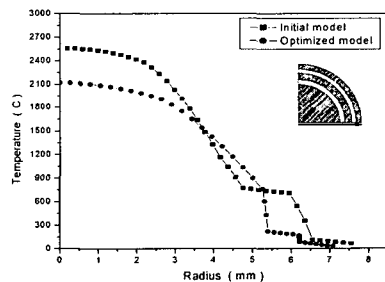


Fig. 17 Temperature profile of OBT

Table 4 Optimum value for SBT

	Optimum value
a (mm)	15.99
b (mm)	0.74
c (mm)	0.02
d (mm)	1.22
Temperature (°C)	2181

Table 5 Optimum value for OBT

	Optimum value
f (mm)	0.810
g (mm)	0.010
h (mm)	0.860
Temperature (°C)	2106

0.098 mm로 수렴하였다. 열하중에 의해 변형된 겹의 두께가 모두 0 이상이므로 제약조건을 만족함을 알 수 있다.

Fig. 16은 SBT에 대한 최적화 되기전의 온도분포와 최적설계를 한 후 캡슐의 중심에서 반경방향으로의 온도를 그래프로 나타낸다. 캡슐에서 최고온도는 핵연료봉의 소결체 중심에서 캡슐중심 쪽으로 약간 편심 된 곳에서 발생되며, 냉각수와 만나는 외통관 쪽으로 갈수록 온도가 감소한다. 소결체의 최고온도 및 SBT 중심에서의 온도가 상당히 감소하였다. 그리고 지지관, 겹, 외통관을 살펴보면 최적화 하기전에는 각 부분의 경계에서 뚜렷한 온도차이를 알 수 있지만, 최적화된 후에는 경계가 없는 한 부분에서의 온도 경향을 나타내고 있는 것처럼 완만한 곡선을 이루고 있다. 지지관과 외통관은 동일재료로 같은 열전도도를 갖고 있으며, 열전도도가 낮은 헬륨으로 채워진 겹의 영역이 줄어들었기 때문에 완만한 온도 경향을 나타내고 있다.

Fig. 17은 OBT에 대한 최적화 전의 온도분포와 최적설계를 한 후 핵연료봉의 중심에서 반경방향으로의 온도를 그래프로 나타낸다. 최고온도는 핵연료봉의 중심에서 발생되며, 냉각수와 만나는 외통관쪽으로 갈수록 온도가 감소한다. 최적설계 전·후의 온도분포를 살펴보면 온도가 전체적으로 감소하였으며, 특히 피복관에서 의 온도 감소가 크다. 피복관, 겹, 외통관을 살펴보면 최적화 하

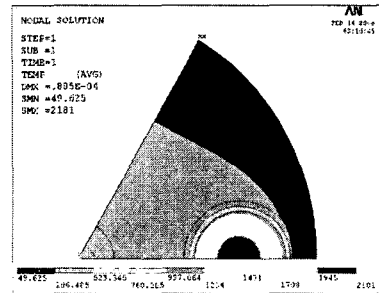


Fig. 18 Temperature distribution of SBT with optimized design variables

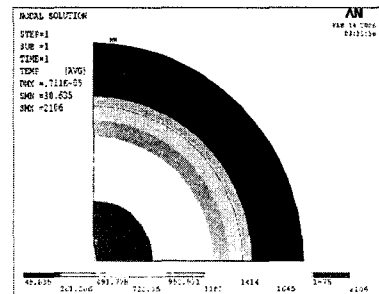


Fig. 19 Temperature distribution of OBT with optimized design variables

기 전에는 각각 다른 열전도도에 의해 계단형태의 온도곡선이 이루고 있지만, 최적화된 후에는 완만한 온도곡선을 이루고 있다. 열전도도가 낮은 헬륨의 영역이 감소하고 또한 피복관과 외통관의 열전도도가 유사하기 때문에 이러한 온도곡선을 나타낸다.

Table 4, Table 5에는 SBT과 OBT에 대한 모든 설계변수를 고려한 최적설계치를 나타내고 있다.

Fig. 18, Fig. 19는 최적설계후의 온도분포를 나타낸다. 최고온도는 SBT에서는 2181 °C, OBT에서는 2106 °C이고, 최대 응력은 모두 냉각수와 접촉하는 외통관에서 각각 91.70 MPa, 102.36 MPa이 발생하였다.

4. 결론

소결체의 중심온도를 낮추기 위한 핵연료조사

캡슐에 대한 최적화를 시도한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 허용응력, 갭에서의 간섭 그리고 허용두께 범위내에서 소결체의 중심온도를 최소화할 때, SBT의 경우 각 설계변수들은 독립적으로 최적치로 수렴해가는 반면에 OBT의 경우 피복관 및 외통관의 두께는 서로 종속적인 경향을 나타낸다.

(2) 소결체의 중심온도는 설계변수인 피복관, 지지관 그리고 외통관의 두께 변화보다는 갭의 두께변화에 크게 영향을 받고, 응력은 냉각수와 만나는 외통관의 두께변화에 크게 영향을 받는다.

(3) 지지관 및 외통관의 두께가 작아질수록 온도는 감소하지만, 피복관의 두께는 일정두께까지는 두께가 증가할수록 온도가 감소한다.

(4) 최적화 수행 후 SBT는 약 10%, OBT는 약 18%의 온도가 감소하였으며, 설계안으로서 시편의 위치, 피복관의 두께, 지지관의 두께, 갭의 두께 그리고 외통관의 두께를 제시할 수 있다.

참고문헌

- (1) Kang, Y. H., Lee, Y. S. and Choi, M. H., 1996. "Thermal and Mechanical Characteristics of Instrumented Capsule for Material Irradiation Test," *Proceeding of the 5th Asian Symposium On Research Reactors*, Vol. 1, pp. 328~332.
- (2) Lee, Y. S., Choi, M. H., Kang, Y. H. and Shin, D. S., 2002, "A Structure Analysis of the Circular Cylinder with Multi-holes under Thermal Loading," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 212, No. 27, pp. 273~297.
- (3) Kim, H. S., Cho, W. S., Choi, K. H. and Park, J. H., 2002, "A Study on the Shape Optimal Design of Bogie Frame for the Reduction of its Weight," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 19, No. 9, pp186~192
- (4) Choi, Y. J., 2002, "A Study on the Temperature and Thermal Stress of Cylindrical Structure with Multi-Holes," Chungnam National university, Master thesis, pp.17~22.
- (5) Bae, B. K., Song, C. H. and Seok, C. S., 2003, "A Study on the Mechanical Properties of Nuclear Fuel Cladding Materials," *The Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 27, No. 2, pp. 231~238.
- (6) Lim, J. S., ASME B & PV CODE, 1996, Section III, Div. 1, Subsection NB.

(1) Kang, Y. H., Lee, Y. S. and Choi, M. H., 1996. "Thermal and Mechanical Characteristics of