

# 열하중하에서 핵연료조사캡슐에 대한 최적화

최영진<sup>†</sup> · 이영신<sup>\*</sup> · 강영환<sup>\*\*</sup> · 이종웅<sup>\*</sup>

## Optimization for the Nuclear Fuel Irradiation Capsule under Thermal Loading

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

**Key Words:** Optimization(최적화) Temperature(온도) Capsule(캡슐) Subproblem approximation method(부문제근사법) Sealed basket type(밀폐형) Open basket type(개방형)

### Abstract

During fuel irradiation tests, all parts of cylindrical structure with multiple holes act as heat sources due to fission heat and  $\gamma$ -flux. The high temperature is especially generated over 2500°C in the center of pellet. Due to the high temperature, many problems occur, such as melting of pellet and declining of heat transfer between cladding and coolant. In this study, it is attempted to minimize the temperature of pellet using optimization method about geometric variables. For thermal and optimization analysis of structure, the finite element method code, ANSYS 5.7 is used. In this procedure, subproblem approximation method is used to the optimization methods. Through the optimum design process, the temperature of sealed basket type is reduced from 2537°C to 2181°C and the temperature of open basket type is reduced from 2560°C to 2106°C.

### 기호설명

$T_{max}$  : objective function  
 a : location of specimen (mm)  
 b : thickness of support tube (mm)  
 c, g : thickness of Gap (mm)  
 d, h : thickness of outer tube (mm)  
 f : thickness of cladding (mm)  
 e, i : convection coefficient (W/m<sup>2</sup>)

### 1. 서론

다공원통형 구조물의 하나인 핵연료조사캡슐에 조사시험이 수행될 때에는 주요부품들이 핵반응 및  $\gamma$ -flux에 의해 열원으로 작용한다. 핵반응 및  $\gamma$ -flux에 의해 발생된 열원은 다공원통형 구조물 각 부분의 기하학적 모양의 다름에 따라 서로 다른 온도분포와 온도에 의한 기계적인 특성을 나

타내고 있다. 본 논문에서는 핵연료조사시험캡슐이 고온에 의해 많은 문제점이 발생하기 때문에 Sealed basket type과 Open basket type 이라는 두 가지 종류의 조사시험캡슐에 대한 최적화를 통해 소결체의 중심온도를 낮추려고 한다. 목적함수로는 소결체의 중심온도를 최소화하는 것이다. [1,2]

### 2. 본론

#### 2.1 해석모델

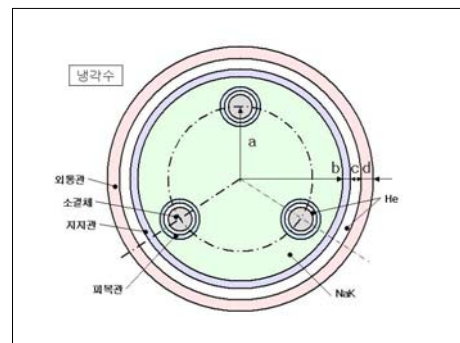


Fig. 1 Sealed Basket type

<sup>†</sup> 충남대학교

E-mail : wjsch@intizen.com

TEL : (042)823-6531 FAX : (042)123-1234

<sup>\*</sup> 충남대학교

<sup>\*\*</sup> 한국원자력연구소

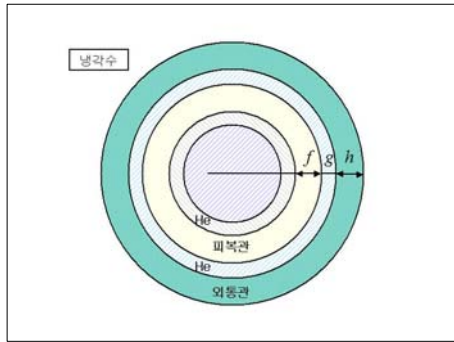


Fig. 2 Open Basket type

Fig. 1, Fig. 2는 본 논문에서 고려한 다공원통형구조물인 Sealed basket type(이하 SBT)과 Open basket type(이하 OBT)의 개념을 보여주고 있다. SBT의 반경은 48.6mm이며, 외통관, 지지관은 SUS304, 피복관은 Zicaloy-4, 열매체의 재질은 NaK이다. Gap에는 He으로 채워져있고 냉각수의 온도는 40℃이다. OBT의 반경은 15.11mm이며 그 외의 조건은 SBT와 동일하다.

2.2 이론

본 연구에서 사용한 최적설계 알고리즘은 근사화법중 하나인 Subproblem Approximation Method를 택하였다. Subproblem Approximation Method는 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, 제약최소화문제는 벌칙함수(Penalty function)를 이용하여 비제약문제로 전환된다. 그리고 최소화는 근사화되고 벌칙화된 함수가 수렴할 때까지 반복 수행한다. 비제약문제를 최소화하는 첫 번째 단계는 ^ 표시로 나타낸 근사화에 의해 각 종속변수를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

Minimize ;

$$\hat{f}(x) = f(x) + error \quad (2)$$

Subject to ;

$$\hat{g}_i(x) = g_i(x) + error \quad (3)$$

$$\hat{h}_i(x) = h_i(x) + error \quad (4)$$

$$\hat{w}_i(x) = w_i(x) + error \quad (5)$$

여기서,  $f(x)$  : 목적함수(objective function)

$x$  : 설계변수(design variable)

$g(x), h(x), w(x)$  : 제약조건

근사함수를 이용하여 제약 최소화문제를 다음과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

Minimize ;

$$\hat{f} = \hat{f}(x) \quad (6)$$

Subject to ;

$$x_i \leq x_i \leq \bar{x}_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (7)$$

$$\hat{g}_i(x) \leq \bar{g}_i + \alpha_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m_1) \quad (8)$$

$$h_i - \beta_i \leq \hat{h}_i(x) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m_2) \quad (9)$$

$$\underline{w}_i - \gamma_i \leq \hat{w}_i(x) \leq \bar{w}_i + \gamma_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m_2) \quad (10)$$

여기서,  $n$  : 설계변수의 수

$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$  : tolerances

다음 단계는 식(6)에서 식(10)를 제약문제에서 비제약문제로 전환하는 것이다. 이것은 다음 부분제 (subproblem)항에 따라서 벌칙함수에 의해 이루어진다.

Minimize ;

$$F(x, p_k) = \hat{f} + f_0 p_k \left[ \sum_{i=1}^{m_1} X(x_i) + \sum_{i=1}^{m_2} G + \sum_{i=1}^{m_2} H(\hat{h}_i) + \sum_{i=1}^{m_2} W(\hat{w}_i) \right] \quad (11)$$

$X$  : 설계변수 제약조건인 벌칙함수

$G, H, W$  : 상태변수 제약조건인 벌칙함수

2.2 유한요소해석

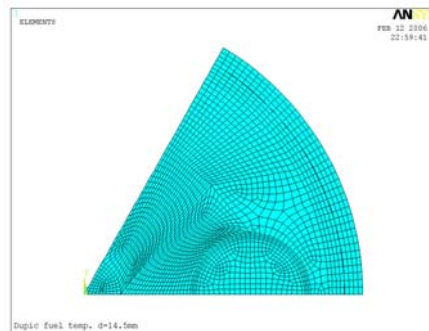


Fig. 3 Analysis model of SBT

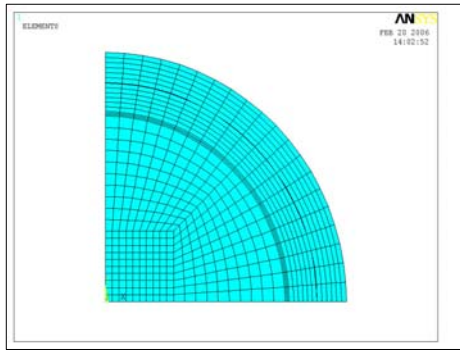


Fig. 4 Analysis model of OBT

Fig. 3, Fig. 4는 유한요소해석모델을 나타내고 있다. 축대칭을 고려하여 1/6, 1/4모델링을 하였으며 외통관 외면은 강제대류 조건을 주었다. 해석에 사용한 프로그램은 ANSYS 5.7을 사용하였고 2-D Coupled-Field Solid 요소인 PLANE13을 사용하였다. 해석에 주어진 대류계수는 17kW/m<sup>2</sup>이며, 냉각수 온도는 40℃이다. Table. 1에는 사용재료 및 열발생밀도를 나타내고 있다.

2.3 최적설계

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

$$\begin{aligned} &\text{Minimize} && T_{\max} \\ &\text{Subject to} && P_m + P_{et} < 3S_m \quad (12) \\ &&& \text{Gap}_{\text{thickness}} > 0 \\ &&& \text{Thickness of variables} > PD/2\sigma \end{aligned}$$

Design variable a, b, c, d, e, f, g, h, i

목적함수 T<sub>max</sub>는 소결체중심에서의 최고 온도를 나타낸다. 조사시험간에 소결체 중심에서 고온이 발생되어 소결체의 용융, 냉각수와의 열전

Table. 1 Material Property

	Material	Heat Generation (MW/m <sup>3</sup> )
Pellet	UO2	462.60
Thermal media	NaK	13.26
Cladding	Zircaloy-4	10.70
Support tube	SUS304	1.22
Outer tube	SUS304	1.22

달, 열응력에 의한 열하중등 많은 문제를 야기한다. 따라서 캡슐의 기하학적 형상을 변화시켜 소결체중심에서의 최고온도를 낮추는 것이 이 최적설계의 목적이다.

Table. 2, Table. 3, Table. 4에 SBT와 OBT에 대한 설계변수를 나타내고 있다.

제한 조건에는 재료의 허용응력 조건, 열하중에 의한 변형시 Gap의 간섭 조건 그리고 구조적으로 원통셸의 최소두께 조건을 부여하였다. 식 (12)의 첫 번째 제한 조건은 캡슐의 내·외 압력차에 의한 응력(P<sub>m</sub>)과 반경방향으로의 온도차에 의한 열응력(P<sub>et</sub>)의 합이 설계응력강도(S<sub>m</sub>)의 3배보다 작도록 정하였다. 두 번째 제한조건으로, 열하중에 의해 재료들이 변형을 하게되는데 이때 Gap에서 변형에 의한 간섭을 방지하기 위해 변형에 의한 Gap의 두께를 0보다 크도록 정하였다. 세 번째 제한조건은 내·외압차가 있는 원통셸의 최소두께를 만족하도록 피복관, 지지관, 외통관의 두께를 정하였다.

Table. 2 Sealed basket type variable

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

Table. 3 Open basket type variable

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

Table. 4 Convection coefficient variable

Design variables	Lower (W/m <sup>2</sup> )	Initial (W/m <sup>2</sup> )	Upper (W/m <sup>2</sup> )
e, i	5000	17000	50000

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 초기모델의 유한요소해석

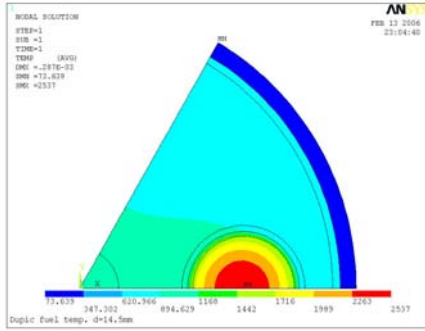


Fig. 5 Initial analysis of SBT

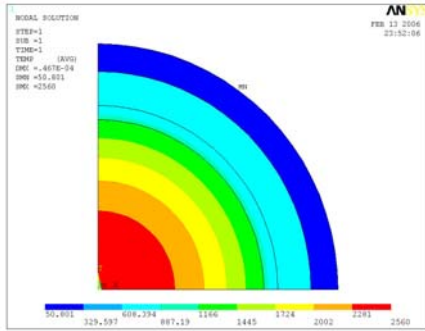


Fig. 6 Initial analysis of OBT

Fig. 5, Fig. 6에 초기모델의 온도분포를 나타내고 있다. SBT에서 소결체중심의 최대온도는 2537°C이고 냉각수와 만나는 외통관표면에서 100MPa의 열응력이 발생하였다. OBT에서 소결체중심의 최대온도는 2560°C이고 냉각수와 만나는 외통관에서 109MPa의 열응력이 발생하였다.

#### 3.2 최적설계

SBT에서 각각의 설계변수에 대한 최적설계를 수행한 결과 설계변수 a는 14.5mm에서 15.98mm로, b는 1.40mm에서 0.74mm로, c는 0.2mm에서 0.01mm로, d는 1.40mm에서 1.22mm 그리고 e는 17.00kW/m<sup>2</sup>에서 49.76kW/m<sup>2</sup>로 변화하였다. 소결체중심의 최대온도는 a에 의해 2513°C, b에 의해 2529°C, c에 의해 2220°C, d에 의해 2533°C 그리고 e에 의해 2533°C로 변화하였다. 이 중 변수c인 Gap의 두께 감소에 의해 현저하게 온도가 감소한 것을 알 수 있다.

모든 변수의 영향을 알아보기 위하여 모든 설계변수를 고려한 최적설계를 수행한 결과 a는

15.99mm, b는 0.74mm, c는 0.02mm, d는 1.22mm 그리고 e는 49.88kW/m<sup>2</sup>로 변화였고, 소결체중심에서의 최대온도는 356°C가 감소한 2181°C가 나왔다. 이는 각각의 설계변수를 고려한 해석의 값과 거의 유사한 결과를 확인할 수 있다.

OBT에서 각각의 설계변수에 대해 최적설계를 수행한 결과 설계변수 f는 1.00mm에서 2.98mm로, g는 0.155mm에서 0.010mm로, h는 1.00mm에서 0.50mm 그리고 i는 17.00kW/m<sup>2</sup>에서 49.76kW/m<sup>2</sup>로 변화하였다. 소결체중심의 최대온도는 f에 의해 2540°C, g에 의해 2116°C, h에 의해 2550°C 그리고 i에 의해 2548°C로 변화하였다. OBT에서도 Gap의 두께 감소에 의해 현저한 온도감소를 확인할 수 있다.

모든 변수의 영향을 알아보기 위하여 모든 설계변수를 고려한 최적설계를 수행한 결과 f는 0.81mm, g는 0.01mm, h는 0.86mm 그리고 i는 39.28kW/m<sup>2</sup>로 변화였고, 소결체중심에서의 최대온도는 454°C가 감소한 2106°C가 나왔다. 모든 설계변수를 고려한 해석에서는 각각의 변수를 고려한 해석과는 달리 변수 f의 감소를 알 수 있고, 변수 h의 증가를 알 수 있다. 이는 각각의 변수를 고려한 해석시에는 각 변수에 대한 영향만을 고려하지만 모든 변수를 고려한 해석에서는 각각의 변수에 대한 영향뿐만 아니라 변수간의 영향이 작용했기 때문이다.

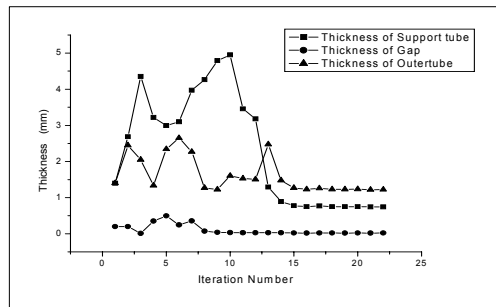


Fig. 7 Variable history of SBT

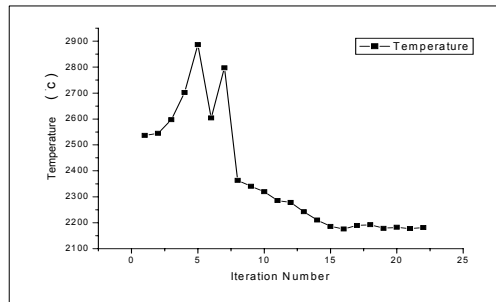


Fig. 8 Temperature history of SBT



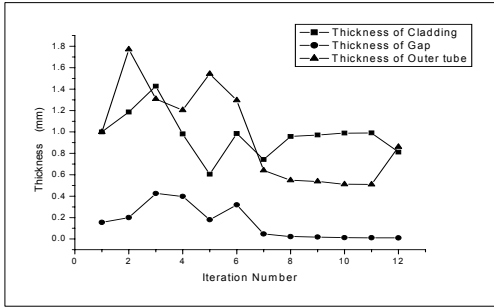


Fig. 9 Variable history of OBT

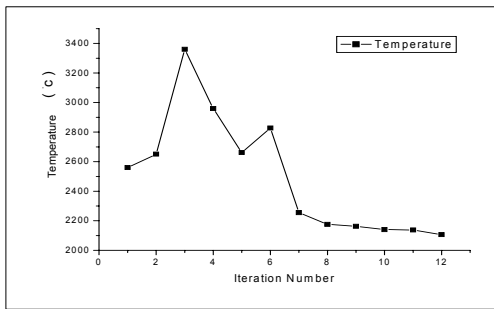


Fig. 10 Temperature history of OBT

Fig. 7, Fig. 8은 SBT의 설계변수인 지지관, Gap, 외통관의 변화 및 그에 따른 소결체중심의 최고온도변화를 나타내고 있다.

Fig. 9, Fig. 10은 OBT의 설계변수인 피복관, Gap, 외통관의 변화 및 그에 따른 소결체중심의 최고온도변화를 나타내고 있다.

Table. 5 Optimum value of SBT

	Optimum value
Location of specimen (mm)	15.99
Support tube (mm)	0.74
Outer-gap (mm)	0.02
Outer tube (mm)	1.22
Convection Coefficient( $W/m^2$ )	49884
Final Temp. (°C)	2181

Table. 6 Optimum value of OBT

	Optimum value
Cladding (mm)	0.810
Outer-gap (mm)	0.010
Outer tube (mm)	0.860
Convection Coefficient( $W/m^2$ )	39285
Final Temp. (°C)	2106

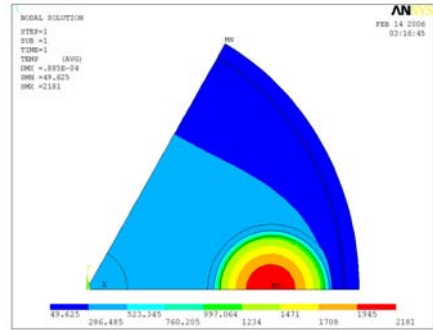


Fig. 11 Optimal analysis of SBT

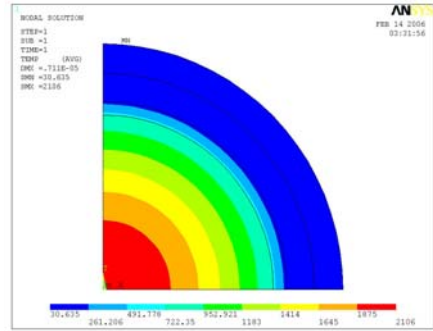


Fig. 12 Optimal analysis of OBT

Table. 5, Table. 6에는 SBT과 OBT에 대한 모든 설계변수를 고려한 최적설계의 Optimum value를 나타내고 있다.

Fig. 11, Fig. 12에는 최적설계후의 온도분포를 나타내고 있다. SBT에서는 2181°C, OBT에서는 2106°C를 나타내고 있다. 최대 응력은 모두 냉각수와 접촉하는 외통관에서 각각 91.70MPa, 102.36MPa이 발생하였다.

#### 4. 결 론

소결체의 중심온도를 낮추기 위한 핵연료조사 캡슐에 대한 최적화를 시도한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 허용응력, Gap에서의 간섭 그리고 허용두께 범위내에서 소결체의 중심온도를 최소화할 때, 각각의 설계변수에 대한 최적화보다는 모든 설계변수를 고려한 최적화에서 좋은 결과를 얻을 수 있다.

(2) 최적화 수행후 초기모델의 온도인 2537°C, 2560°C에서 각각 256°C, 454°C 감소한 최적형상을 얻었다.

(3) 소결체의 중심온도는 설계변수인 피복관, 지지관 그리고 외통관의 두께 변화보다는 Gap의 두께변화에 크게 영향을 받음을 알 수 있다.

### 후기

본 연구는 원자력중장기연구사업으로 지원되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고문헌

- (1) Y.H. Kang, Y.S. Lee and M.H. Choi, 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) Y.H. Kang, B.G Kim, D.H. Yan and B.C Lee, 2001, Thermal Characteristics of HANARO Instrumented Capsule for an Advanced Fuel Development, Proceeding of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, Vol. I
- (3) Y.J. Choi, 2002, A Study on the Temperature and Thermal Stress of Cylindrical Structure with Multi-Holes, Chungnam National university, Master thesis, pp.17~22
- (4) H.S. Kim, W.S. Cho, K.H. Choi and J. H. Park, 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
- (5) J.S. Lim, ASME B & PV CODE, 1996, Section III, Div. 1, Subsection NB.
- (6) S. Arora, 1989, "Introduction to Optimum Design", McGraw-hill Book Company.
- (7) G. N. Vanderplaats, "Structural Design Optimization Status and Direction", J of Aircraft, Volume 36, Number 1, pp. 11~20
- (8) "ANSYS Design Optimization", SAS IP, Inc., Canonsburg