

캡슐 냉각블럭의 형상설계 및 열특성에 관한 연구

A Study on the Shape Design and Thermal Characteristics of Capsule Cooling Block

강영환

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

이영신, 이종웅, 최영진

충남대학교

대전광역시 유성구 궁동 220

요약

다공원통형 구조물의 하나인 조사캡슐이 하나로에 장전되어 조사시험이 수행될 때에는 핵반응 및 ν -flux에 의해 모든 부분이 열원으로 작용한다. 그 중 냉각블럭은 핵연료봉을 지지하는 역할과 냉각수의 유로를 확보하여 핵연료봉을 냉각하는 역할을 한다. 또한, 다공원통형 구조물내의 냉각블럭의 형상에 따른 대류계수가 핵연료봉의 온도를 제어하는 주요변수중의 하나이다. 이에 따라 본 연구에서는 냉각블럭 및 유로면적, 유체의 유량에 따라 변하는 대류계수를 이용하여 최고온도 및 열응력을 감소시킬 수 있는 냉각블럭의 형상을 도출하고자 한다. 열특성해석과 구조물의 최적설계를 수행하기 위하여 상용유한요소 프로그램인 ANSYS를 이용하였다.

Abstract

During fuel irradiation tests in HANARO, all parts of cylindrical structure with multiple holes will act as heat sources due to fussion heat and ν -flux. Among these parts, cooling block has a role in supporting and cooling the mini fuel element. To optimize the shape of cooling block, the shape effect of cooling block on the thermal characteristics are examined

In this study the optimum design analysis of cooling block is performed by using the convection coefficient. The convection coefficient is one of the important parameters controlling the temperature of the fuel rod and it depends on the cooling block shape, coolant water area and coolant water flow rate. For this analysis, the Finite Element Method(FEM) code, ANSYS5.7 is used. From this study, the optimized shape of cooling block to reduce temperature and thermal stress is calaulated and presented

1. 서론

다공원통형 구조물이 하나로내에서 핵연료 조사시험캡슐로 사용될 때 주요부품들이 핵반응 및 ν -flux에 의해 열원으로 작용한다. ν -flux에 의해 발생된 열원은 다공원통형 구조물 각 부분의 기하학적 모양의 다름에 따라 서로 다른 온도분포와 온도에 의한 기계적인 특성을 나타내고 있다 [1~4]. 본 연구에서는 두 개의 피복관을 갖는 핵연료봉과 핵연료 조사시험캡슐의 외,내면으로 냉각수가 흐르는 구조물에 대하여 유한요소해석 프로그램인 ANSYS 5.7을 이용하여 열해석을 수행하였다. 핵연료조사시험캡슐 부품들의 온도 및 응력의 감소를 위하여 근사화법의 한 종류인 Subproblem Approximation Method를 사용하여 냉각블럭에 대한 최적설계를 수행하였다. 이를 위해서는 핵연료봉과 냉각블럭사이의 내,외각으로 냉각수에 대류가 발생하므로 대류계수의 효과를 평가하고 유로면적과 같은 기하학적특성을 연구할 필요가 있다. [2~4].

본 연구에서는 다공원통형 구조물이 구성하고 있는 냉각블럭의 형상을 설계변수로 하여 최고 온도 및 열응력을 감소시킬 수 있는 냉각블럭의 최적형상을 상용유한요소 프로그램인 ANSYS를 통하여 연구하였다.

2. 본론

2.1 해석모델

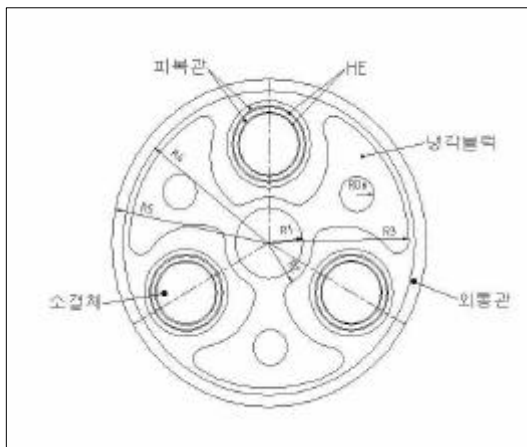


Fig. 1 Schematic of the capsule

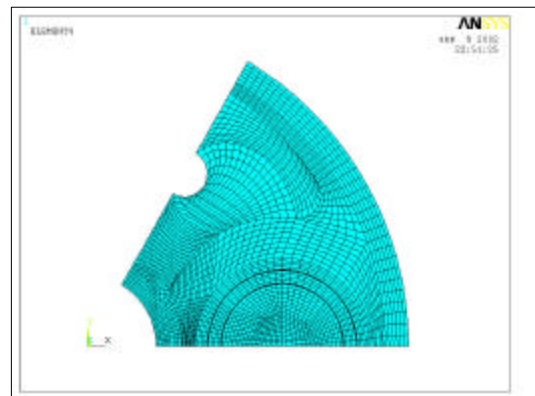


Fig. 2

Finite element model of the capsule

본 연구에서 고려한 다공원통형 구조물의 개념을 Fig. 1에서 보여주고 있다. 다공원통형 구조물의 반경은 56mm이며, 외통관, 피복관의 재질은 SUS316, 냉각블럭의 재질은 AL6061이고, 냉각수의 온도는 40℃이다. 핵연료소결체와 피복관 그리고 핵연료봉을 싸고있는 외통관에는 He으로 채워져 있다. 소결체 반경은 5.275mm이고, 핵연료봉의 안쪽 및 바깥쪽 지지관의 두께는 모두 1mm이며, 핵연료봉의 안쪽 겹은 0.125mm, 바깥쪽 겹은 0.15mm이다. 또한 캡슐 외통관의 두께는 2mm이다.

해석을 위한 유한요소모델은 Fig. 2와 같다. 유한요소법을 이용하여 열해석을 효율적으로 수행하기 위해 축대칭을 고려하여 1/6모델링을 하였다. 사용요소는 2-D Coupled-Field Solid 요소인 PLANE13을 사용하였고, 해석에 사용한 프로그램은 ANSYS 5.7을 사용하였다[11].

2.2 열표면 전달계수

피복관 표면 온도는 핵연료에 대한 열전도 방정식을 이용하여 얻어진다. 이를 구하기 위해서는 냉각수의 압력과 피복관 표면의 열이동을 이용한 Jens-Lottes empirical equation(BWR)과 냉각수의 특성과 Prandtl number를 이용한 Dittus-Boelter equation(PWR)을 이용하는데 본 연구에서 연구대상으로 삼은 하나로의 경우는 냉각수의 비등이 일어나지 않으므로 Dittus-Boelter equation(PWR)을 사용하였다 [3].

$$h_w = 0.023 \frac{k}{De} \left(\frac{DeV\rho}{\mu} \right)^{0.8} Pr^{0.4} \quad (1)$$

여기서 k : coolant water thermal conductivity (W/m.°C)

De : equivalent diameter (m)

V : coolant water velocity (m/s)

ρ : coolant water density (kg/m³)

μ : coolant water viscosity (kg/m.s)

Pr : Prandtl number

본 연구에서 해석에 주어진 초기의 대류계수는 냉각수의 유동량을 8.8Kg/s, 대류조건이 일정하다고 가정하여 h 는 $47.35kW/m^2°C$ 라 하였으며, 냉각수 온도는 40°C이다. 소결체의 열발생밀도는 $462.60 MW/m^3$, 지지관 및 외통관의 재질은 SUS316, 냉각블럭의 재질은 AL6061이며, 이때 열발생밀도는 $13.26 MW/m^3$ 이다. 캡에서는 복사에 비해 전도가 지배적이므로 전도만 고려하여 해석을 수행하였다. 외통관 및 냉각블럭과 핵연료봉사이에서는 강제대류 조건을 고려하였다.[12]

2.3 해석결과 및 고찰

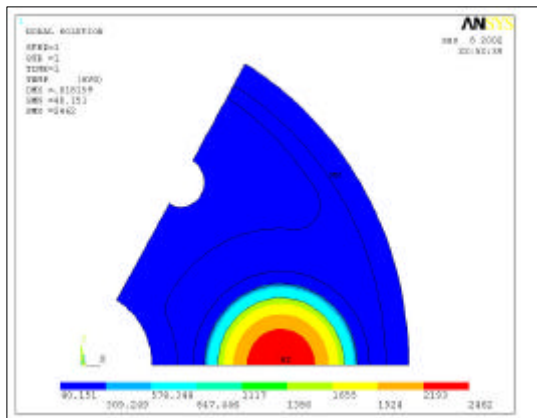


Fig. 3 Temperature distribution of the capsule

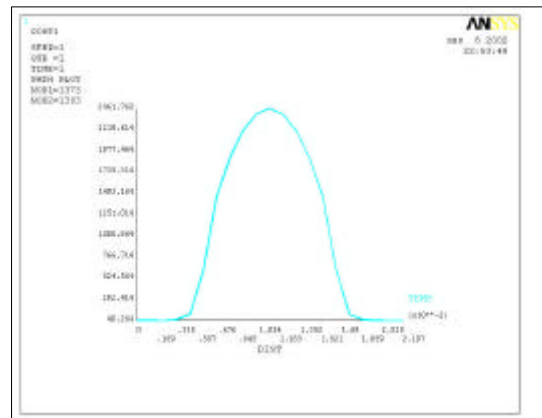


Fig. 4 Radial temperature profile of capsule

앞 절에서 설명한 경계조건을 고려하여 온도분포해석을 수행하였고 그 결과를 Fig. 3에 제시하였다. 캡슐의 외통 및 냉각블럭과 핵연료봉 사이에 냉각수가 흐르기 때문에 최고온도는 소결체의 중심에서 발생하였으며 최저온도는 외통관에서 발생하였다. 핵연료봉의 안쪽 피복관 최고온도는 61

9°C이고 바깥쪽 피복관 최저온도는 49°C이다. 냉각블럭에서의 최고온도는 내부홀의 외통관방향에서 발생하였으며 최저온도는 필렛부분에서 발생하였다. 최고온도는 52°C이고, 최저온도는 냉각수온도와 비슷한 수준을 보이고 있다. 다공원통형 구조물의 반경방향에 대한 온도분포결과를 Fig. 4에 제시하였다. 냉각블럭 중심 및 외통관에서는 온도변화가 크지 않지만 핵연료 붕에서는 중심부에서의 온도가 2462°C로 가장 높았고 냉각수에 가까워질수록 온도는 급격히 감소됨을 알 수 있다. .

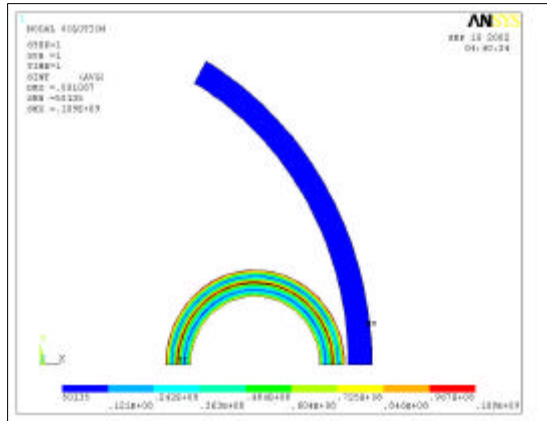


Fig. 5 Thermal stress of tubes

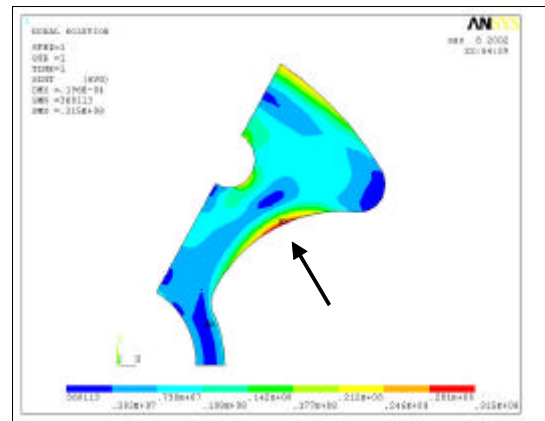


Fig. 6 Thermal stress of cooling block

피복관, 외통관의 열응력결과를 Fig. 5에서 나타내고 있다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 온도차가 가장 큰 피복관 부분에서 가장 큰 열응력 108MPa이 발생하였고, 외통관에서는 외, 내면의 압력차 및 온도차가 작아 1MPa의 작은 열응력이 발생하였다. 그리고 냉각블럭의 열응력결과를 Fig. 6에서 나타내고 있으며, 화살표 부분에서 32MPa의 열응력이 발생하였다. 응력분포는 온도차의 영향으로 인해 외통관에서는 일정한 분포를 보이는데 반해 피복관은 캡슐중앙에서 외통관쪽으로 편심되어있고 냉각수의 영향을 받아 다공원통형 구조물 중심에 가까운 곳에서 최대열응력이 발생하였다. 열응력에 대한 이론해를 구해보면 피복관에서의 열응력은 109MPa, 외통관에서는 1MPa, 그리고 냉각블럭에서는 28MPa이 계산되었으며, 이는 ANSYS로 해석한 결과와 거의 유사한 수치를 보이고 있으며, 전체적으로 열응력은 우려할 만한 수준은 아니었다.

2.4 냉각블럭의 설계최적화

설계최적화의 기본목표는 다공원통형 구조물이 하나로에서 조사시험 수행시 가능한 핵연료봉의 최고온도를 감소시킬 수 있는 냉각블럭의 형상을 설계하는 것이다. 핵연료봉의 온도에 영향을 미치는 변수로는 유로면적, 유체속도, 유체유동량에 따른 대류계수가 있다. 여기서 유로면적은 냉각블럭면적의 감소 및 증가에 영향을 받으며 변할 수 있는 변수이다. 그러므로 냉각블럭의 설계최적화의 목적은 구조의 건전성이 확보된 상태에서 핵연료봉에서의 최대온도를 감소시키기 위한 냉각블럭의 형상을 변화시키는 것이다. 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 벌

칙화된 함수가 수렴할 때까지 반복 수행한다. 비제약문제를 최소화하는 첫 번째 단계는 $\hat{\cdot}$ 표시로 나타낸 근사화에 의해 각 종속변수를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

Minimize ;

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

Subject to ;

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

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

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

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 ;

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

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 부문제 (subproblem)항에 따라서 벌칙함수에 의해 이루어진다.

Minimize ;

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

X : 설계변수 제약조건의 벌칙함수

G, H, W : 상태변수 제약조건의 벌칙함수

본 연구에서는 목적함수로 핵연료봉의 최대온도가 될 수 있으며, 설계변수로는 냉각블럭의 형상에 관련된 치수 및 유체의 유동량이 될 수 있다. 제한 조건으로는 냉각블럭의 열응력 및 구조물의 건전성을 확보할 수 있는 변수가 될 수 있다. 본 연구에서는 위에서 수행한 열 해석을 바탕으로 두 번의 최적설계 과정을 통하여 냉각블럭의 면적감소를 시도하였다. 첫 번째 설계 과정으로 목적

함수를 유로면적 그리고 제한조건인 허용응력의 범위 안에서 냉각블럭의 각 치수를 설계변수로 하여 수행하였다. 다음의 Table. 1은 첫 번째 설계 과정의 설계변수 및 제한조건들이다. 여기서 설계변수 RC1은 냉각블럭의 핵연료봉으로부터의 원형 반경, ROU1, ROU2는 냉각블럭의 필렛반지름이며, R2, R3은 각각 냉각블럭의 캡슐중양으로부터의 반경들이다. 제한조건 σ_{cool} 는 냉각블럭의 열응력이고, $\sigma_{cladding}$ 는 피복관에서의 열응력이다. 각 설계변수들의 상한 및 하한 값은 각 설계변수들이 해석모델을 이룰 수 있는 최소 및 최대의 값을 사용하였다. 그러나 설계변수 R3는 설계과정 간에 mesh의 여부에 따라 상한 및 하한값을 사용하였다. 제한조건의 상한 값은 허용응력을 사용하였으며 최소응력은 고려하지 않았다.

Table. 1 Range of design variable and state variable

Range Design Variable	Lower	Initial	Upper
RC1(mm)	9	11	14
ROU1(mm)	1	2	5
ROU2(mm)	1	2	5
R2(mm)	7	8.2	9
R3(mm)	22	24.9	26
Range Static Variable	Lower	Initial	Upper
σ_{cool} (MPa)	-	32	99
$\sigma_{cladding}$ (MPa)	-	108	486

첫 번째 형상설계를 수행한 후, 그 결과를 초기모델로 하여 냉각블럭 내부에 존재하는 원형 홀인 R1 과 RD6을 설계변수로 하여 냉각블럭의 단면적의 감소를 시도하였다. 설계변수와 제한조건을 Table. 2에 정리하였다.

Table. 2 Range of design variable and state variable

Range Design Variable	Lower	Initial	Upper
R1(mm)	-	6.025	8.3
RD6(mm)	-	2.0	7.0
Range Static Variable	Lower	Initial	Upper
σ_{cool} (MPa)	-	55.6	99.0

여기서 σ_{cool} 는 냉각블럭의 열응력이다. 설계변수의 상한 값은 각 설계변수들이 해석모델을 이룰 수 있는 최대의 값을 사용하였다. 하한 값은 고려하지 않았다. 제한조건의 상한 값은 허용응력을 사용하였으며, 하한 값은 고려하지 않았다. 제한조건으로는 AL6061 및 SUS316의 허용응력에 대해 ASME Code Sec III Division 1 Subsection NB 3220의 응력평가 기준인 $P_m < S_m$ 과

$P_m + P_e < 3S_m$ 에 의해서 $3S_m$ 인 99MPa, 468MPa로 하였다 [6~8].

2.5 형상설계 해석결과 및 고찰

열해석을 기초로 최적화 과정이 수행되었다. 해석한 결과는 11회의 반복횟수를 거쳐 수렴하였고 제한 조건을 만족하였다. 유로면적과 냉각블럭면적 변화결과를 Fig. 7 및 Fig. 8에 제시하였다. Fig. 7 및 Fig. 8에서보는 바와 같이 유로면적은 최초횟수에는 증가하는 경향을 보이지만 반복횟수가 늘어날수록 최저값으로 수렴하는 것을 알 수 있다. 반면에 냉각블럭면적은 최초횟수에서는 감소하지만 반복횟수가 늘어날수록 증가함을 알 수 있다.

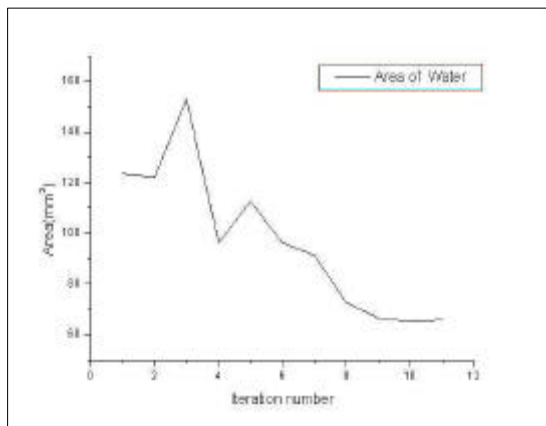


Figure. 7 Area history of a water during optimum process

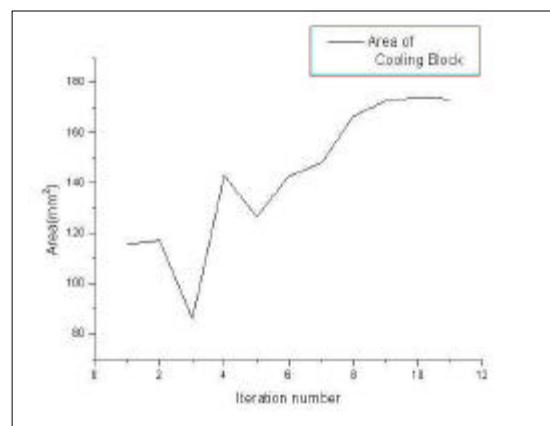


Figure. 8 Area history of a cooling block during optimum process

피복관에서의 열응력 및 냉각블럭에서의 열응력결과를 Fig. 9 및 Fig. 10에 제시하였다. 피복관에서의 열응력은 최초 감소후 증가하여 수렴하는 것을 알 수 있고 냉각블럭의 열응력 또한 감소후 증가하여 수렴하는 것을 알 수 있다.

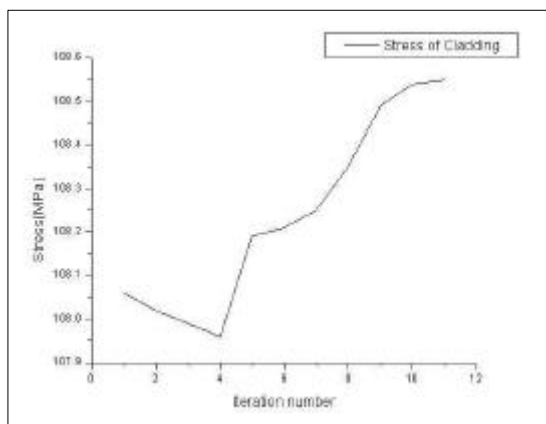


Figure. 9 Stress history of a cladding during optimum process

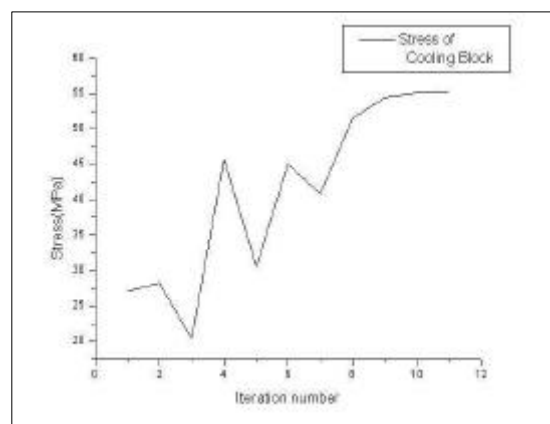


Figure. 10 Stress history of a cooling block during optimum process

최적설계 과정이 수행한 뒤의 냉각블럭의 형상 및 응력분포가 Fig. 11 및 Fig. 12에 제시하였다. 냉각블럭에서의 최대열응력은 화살표부분에서 발생하였고 단면적은 증가한 것을 알 수 있다. 설계 변수인 RC1는 11mm에서 9.02mm로, ROU1는 2mm에서 3.47mm로, ROU2는 2mm에서 3.41mm로, R2는 8.20mm에서 8.77mm로, R3는 24.90mm에서 25.88mm로 바뀌었다. 목적함수인 유로의 단면적은 123.47mm^2 에서 65.06mm^2 로 47.30%감소하였다.

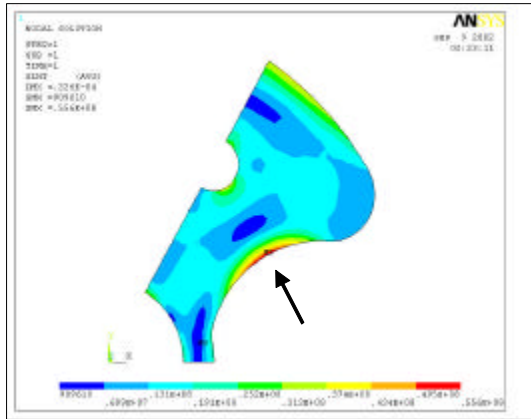


Figure. 11 Stress distribution of a cooling block

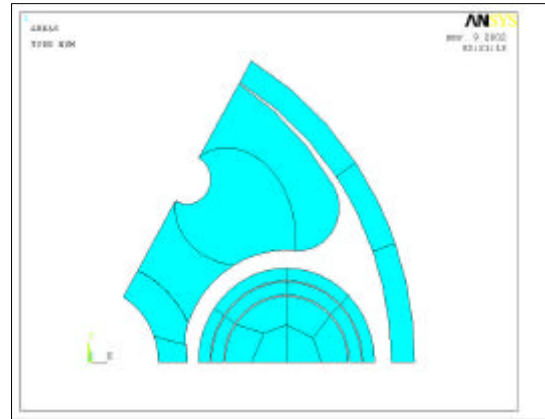


Figure. 12 Optimal shape model of cooling block

최대온도 및 피복관의 열응력은 감소하는 경향을 보이거나 수치상으로는 적은 값을 나타내고 있다. 첫 번째 최적화 과정에서 얻은 형상설계 결과를 Table. 3에 정리하였다.

Table. 3 Optimum result of area of water

Design Variable	Optimum	Static Variable	Optimum
RC1(mm)	9.02	$\sigma_{\text{cool}}(\text{MPa})$	55.09
ROU1(mm)	3.47	$\sigma_{\text{cladding}}(\text{MPa})$	108.54
ROU2(mm)	3.41		
R2(mm)	8.77		
R3(mm)	25.88		
유로면적(mm^2)	65.06	최고온도($^{\circ}\text{C}$)	2459.70

첫 번째 유로면적의 최적화 과정후 나온 해석결과를 초기치수로 하여 냉각블럭의 형상설계를 수행되었다. 첫 번째와 같이 제한조건을 만족하며 해석한 결과는 8회의 반복횟수를 거쳐 수렴하였다. 반복횟수에 대한 목적함수의 변화와 냉각블럭 응력의 변화결과를 Fig. 13 및 Fig. 14에 제시하였다. 냉각블럭의 단면적은 각 반복횟수마다 감소하여 최저값에 수렴하는 것을 알 수 있고 응력또한 감소하여 수렴함을 볼 수 있다. 냉각블럭의 단면적의 감소는 설계변수인 내부홀의 반지름의 증가에 따른 것이다.

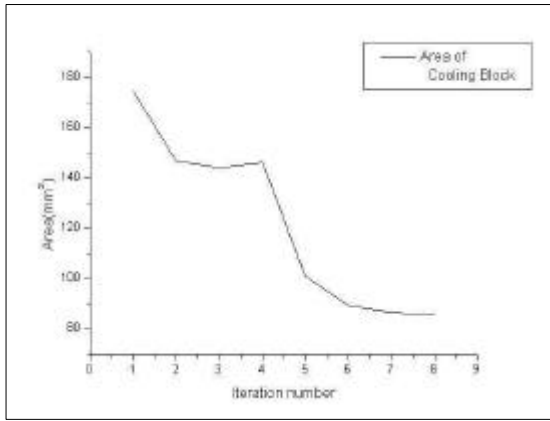


Figure. 13 Area history of a cooling block during optimum process

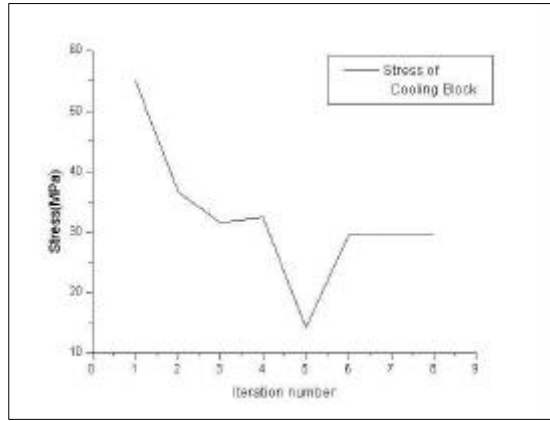


Figure. 14 Stress history of a cooling block during optimum process

최대응력은 Fig. 15에 볼 수 있듯이 30MPa이고 냉각블럭의 형상은 Fig. 16에 제시하였다. 설계변수 R1은 6.025mm에서 8.47mm로, RD6은 2mm에서 6.98mm로 변화였다. 목적함수인 냉각블럭의 단면적은 174.20mm²에서 85.83mm²로 50.72%가 감소하였다.

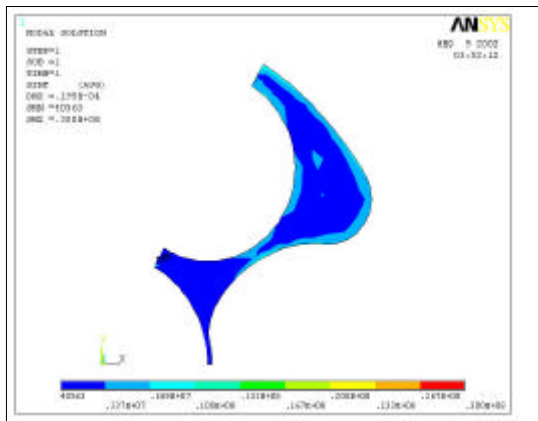


Figure. 15 Stress distribution of a cooling block

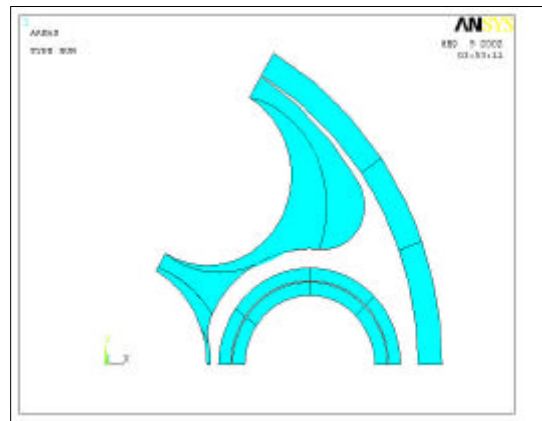


Figure. 16 Optimal shape model of cooling block

최종적으로 최초모델의 단면적이 126.65mm²에서 두 번의 최적화과정을 거쳐 85.83mm²로 단면적이 감소되었으며, 그 감소율은 40.82%이다. Table. 4는 최적형상설계의 결과를 요약한 것이다.

Table. 4 Optimum result of area of cooling block

Design Variable	Optimum	Static Variable	Optimum
R1(mm)	8.47	σ_{cool} (MPa)	30
RD6(mm)	6.98		
냉각블럭면적(mm ²)	85.83		

위의 해석결과를 살펴보면, 최초에 의도한 냉각수 냉각에 의한 핵연료봉의 최고온도 감소가 작다는 것을 알 수 있다. 이는 실제 조사시험 조건하에서의 대류조건같은 실제경계조건이 아닌 단편적인 변수들의 영향만을 고려하여 해석을 하였기 때문이다.

또한 위 모델에서 사용한 냉각블럭의 형태가 아닌 정사각형, 직사각형, 마름모, 사다리꼴, 구형, 실린더형 등의 형상들도 중요한 설계변수가 될 수 있다. 현재의 복잡한 형태의 냉각블럭보다는 우선 위에서 열거한 단순한 형상의 변수에 대한 해석이 이루어지고, 그 후의 냉각블럭에 대한 최적화가 이루어져야 할 것이다.

3. 결론

다공원통형 구조물 안의 냉각블럭에 대한 내부 홀 및 외각 형상설계를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

형상설계 수행 후 기존의 냉각블럭보다 40.82%의 단면적을 줄인 형상을 얻었다. 냉각블럭의 형상을 보면 냉각수가 핵연료봉주위로 원형의 유로를 형성하는 것을 알 수 있다. 그러나 설계과정을 통하여 냉각블럭의 형상을 도출하였지만 유로면적의 감소는 피복관 및 소결체에서의 최대온도에는 적은 영향을 미치고 있다. 따라서 소결체에서의 최대온도 및 피복관에서의 열응력을 감소시키기 위해서는 다음과 같은 사항들이 고려되어야 한다.

- (1) 열전달 계수는 단면적보다는 단면형상에 따르는 영향이 많을 것이다. 따라서 위 모델의 국부적인 각각의 부분에서 대류계수에 관한 연구가 향후에 수행되어야 한다.
- (2) 다양한 단면형상의 형상계수에 대한 전열면의 방향에 의한 영향 연구도 함께 되어야 한다.
- (3) 위에서 가정한 일정한 냉각수의 유량이 아닌 유량의 변화에 따른 영향 및 각 재료의 특성 그리고 기타 변수들에 의한 영향도 향후 연구에서 함께 연구되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 강영환 외, "재료 조사시험용 캡슐 및 관련 설비의 안전성 분석보고서", KAERI/TR-985/98
2. 이영신 외, "다공원통형 구조물의 기계적, 열적 성능해석"
3. 배기광 외, "DUPIC 핵연료 조사시험 설계 및 안전성 분석보고서", KAERI/TR-1157/98
4. 박희성 외, "DUPIC 핵연료봉 열적 거동 해석", KAERI/TR-1213/99
5. 강영환 외, "새로운 핵연료 조사시험용 캡슐에 대한 열특성연구", 한국원자력학회 춘계학술발표회 논문집, 2001
6. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Div. 1, Appendix A, 1995
7. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Div. 1, Subsection NB, 1995
8. Bruno A. Boley and Jerome H. Weiner, "theory of thermal stress", John Wiley & Sons, Inc, 1960
9. 김현수 외, "대차프레임의 중량감소를 위한 형상최적설계에 관한 연구"
10. 박동성 외, "초저온용 butterfly valve의 seat형상 최적화를 위한 유한요소해석"
11. "ANSYS Design Optimization Seminar", for Revision 5.0
12. 최영진 "다공원통형구조물의 온도 및 열응력해석" 충남대학교 2002