

## 원기동형핵연료알심에서의 온도분포결정

전성제, 림청엽

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《…우리 나라의 실정에 맞는 수력발전소, 화력발전소, 원자력발전소를 건설하는데서 나서는 과학기술적문제를 풀도록 하여야 합니다.》(《김정일선집》 증보판 제11권 135페이지)

원자로로심은 수천개의 핵연료요소로 구성되어있으며 그것의 온도분포를 연구하는것은 초기 정상상태의 로심설계에서뿐만아니라 비정상과정에서의 원자로의 안전성을 평가하는데서 중요한 문제로 제기된다. 선행연구[1]에서는 연료요소의 온도분포를 열전도방정식에 의하여 구할 때 열전도도를 평균값으로 근사화하였다.

우리는 연료요소재료들의 열전도도값들을 운영중에 있는 원자로상태에서의 온도범위에서 분석하고 연료요소의 온도분포를 연료알심의 열전도도가 온도에 따라 변하는 경우 해석적방법으로 계산하였다.

### 1. 계 산 방 법

전형적인 가압경수원자로로심은 연료집합체로 구성되어있으며 연료집합체는 원기동형 핵연료요소로 이루어져있다. 핵연료요소는 세가지 종류 즉 연료알심( $UO_2$ ), 접촉층(He), 외피(지르칼로이)로 구성되어있으며 열전도방정식을 풀 때 열전도도의 온도의존성을 고려하는것이 필요하다.

연료요소로 리용되는 재료들의 열물리적특성량평가식들은 이미 연구되였다.[2, 3]

리론밀도의 95%인 연료알심( $UO_2$ )의 열전도도( $W/(m \cdot K)$ )는 다음과 같이 표시된다.

$$\lambda_F(t) = \frac{1}{A + B \cdot t + f(B_u) + g(B_u) \cdot H} - C \cdot t^2 + D \cdot t^4 \quad (1)$$

여기서  $t$ 는  $UO_2$ 의 온도(K),  $B_u$ 는 연소도 ( $(GW \cdot d)/Mt$ ),  $A = 0.045 \cdot 2(m \cdot K)/W$ ,  $B = 2.46 \cdot 10^{-4} m/W$ ,  $C = 5.47 \cdot 10^{-9} W/(m \cdot K^3)$ ,  $D = 2.29 \cdot 10^{-14} W/(m \cdot K^5)$ ,  $f(B_u) = 0.001 \cdot 87 B_u$ ,  $g(B_u) = 0.038 B_u^{0.28}$ ,  $H = (1 + 396 \cdot \theta/t)^{-1}$ ,  $\theta = 6 \cdot 380K$  이다.

접촉층의 채움기체인 He의 열전도도는 다음과 같이 표시된다.

$$\lambda_K(t) = A + t^B \quad (2)$$

여기서  $t$ 는 He의 온도(K),  $A = 2.639 \cdot 10^{-3}$ ,  $B = 0.7085$  이다.

외피재료인 지르칼로이-2, 지르칼로이-4의 열전도도는 다음과 같이 표시된다.

$$\lambda_C(t) = 7.51 + 2.09 \cdot 10^{-2} t - 1.45 \cdot 10^{-5} t^2 + 7.67 \cdot 10^{-9} t^3 \quad (3)$$

여기서  $t$ 는 지르칼로이의 온도(K)이다.

전형적인 경수형원자로들에서 핵연료알심의 온도변화구간(°C)은  $500 \leq t \leq 2000$ 이며 접촉층에서는  $300 \leq t \leq 700$ , 외피에서는  $300 \leq t \leq 400$ 이다. 세가지 재료들의 온도에 따르는 변화값을 계산한 결과 이와 같은 온도구간에서 핵연료알심의 열전도도는 2배정도 차이이며 접촉층의 열전도도는  $0.25 \sim 0.35 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , 외피의 열전도도는  $16.0 \sim 17.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 이다.

이로부터 우리는 채움기체와 외피의 열전도도는 이 구간의 평균값으로 하고 핵연료알심의 열전도도를 고려하여 온도분포를 해석적으로 계산하였다.

원기동자리표계에서 열전도미분방정식은 다음과 같다.

$$\rho C_P(t) \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \lambda_F(t) \frac{dt}{dr} \right] + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r^2} \left[ \lambda_F(t) \frac{\partial t}{\partial \varphi} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda_F(t) \frac{\partial t}{\partial z} \right] + q_v \quad (4)$$

정상상태, 무한원기동 및 축대칭문제의 경우 식 (4)는 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left[ \lambda_F(t) \frac{dt}{dr} \right] = -q_v \quad (5)$$

열전도도에 대하여

$$\Lambda = \int_0^t \lambda_F(t) dt \quad (6)$$

와 같이 변환하면 문제를 다음과 같이 선형화할수 있다.

$$\frac{d\Lambda}{dr} = \frac{d\Lambda}{dt} \cdot \frac{dt}{dr} = \lambda_F(t) \frac{dt}{dr} \quad (7)$$

식 (5)를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left( r \frac{d\Lambda}{dr} \right) = q_v \quad (8)$$

이때 경계조건은 다음과 같다.

$$\Lambda = \int_0^{t_F} \lambda_F(t) dt = \Lambda_F \quad r = r_F \text{ 일 때} \quad (9)$$

$$\frac{dt}{dr} = \frac{d\Lambda}{dr} = 0 \quad r = 0 \text{ 일 때} \quad (10)$$

경계조건 (9), (10)을 리용하여 식 (6)을 적분하면 다음과 같다.

$$\Lambda = \Lambda_F + \frac{q_v r_F^2}{4} \left( 1 - \frac{r^2}{r_F^2} \right) \quad (11)$$

핵연료알심의 표면온도  $t_F$ 에 대응하는  $\Lambda_F$ 를 식 (6)에 의하여 계산하고 각이한  $r$ 에 대하여 식 (11)로부터  $\Lambda$ 를 결정하면 연료알심의 온도분포를 구할수 있다.

## 2. 연료알심의 온도분포

연료알심의 온도분포를 구하기 위하여 각이한 온도  $t$ 에서의 적분값  $\Lambda = \int_0^t \lambda_F(t) dt$ 를 다음과 같은 제형법의 일반공식을 리용하여 계산하였다.

$$\int_0^t \lambda_F(t) dt = \Delta t (\lambda_{F_0} + \lambda_{F_N}) / 2 + \sum_{i=1}^{n-1} \lambda_{F_i} \quad (12)$$

식 (12)로부터  $t$ 에 따르는  $\lambda$ 를 계산하여 그래프를 작성하였다.

$t$ 에 따르는  $\lambda_F$ 와  $\lambda$ 의 변화는 그림 1, 2와 같다.

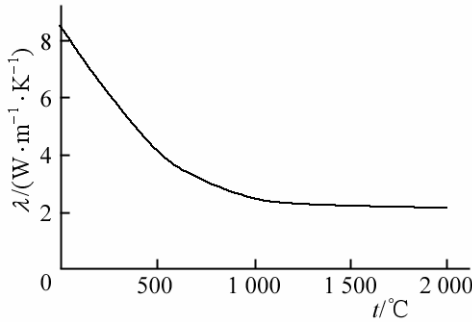


그림 1.  $t$ 에 따르는  $\lambda_F$ 의 변화

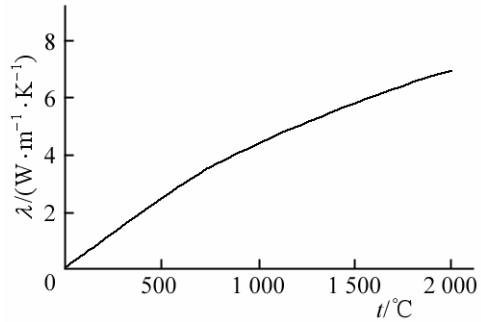


그림 2.  $t$ 에 따르는  $\lambda$ 의 변화

다음으로 외피, 접촉층, 연료알심표면의 온도를 순차적으로 계산하였다.

$$t_{CO} = t_L + q_L / (2\pi r_{FB} \alpha) \quad (13)$$

$$t_{CI} = t_{CO} + q_L / [2\pi (1/\lambda_C \cdot \ln(r_{FB}/(r_{FB} - \delta_C)))] \quad (14)$$

$$t_F = t_{CI} + q_L / 2\pi (1/\lambda_K \cdot \ln((r_F + \delta_K)/r_F)) \quad (15)$$

여기서  $t_{CO}$ 는 외피의 외부온도(K),  $t_{CI}$ 는 외피의 내부온도(K),  $t_F$ 는 연료알심의 표면온도(K),  $t_L$ 는 냉매의 온도(K),  $r_F$ 는 연료알심의 반경(mm),  $r_{FB}$ 는 연료요소반경(mm),  $q_L$ 은 선출력밀도(W/m),  $\alpha$ 는 열전달계수(W/(m<sup>2</sup>·K)),  $\delta_K$ 는 접촉층의 두께,  $\delta_C$ 는 외피의 두께이다.

계산에서 리용한 초기자료는 표 1과 같다.

표 1. 초기자료

표면열출력/(W·m <sup>-2</sup> )	$t_L$ /K	$r_F$ /mm	$\delta_K$ /mm	$\delta_C$ /mm	$\alpha$ /(W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> )
$1 \cdot 10^6$	553.3	3.8	0.1	0.65	$4 \cdot 10^4$

식 (15)로부터 구한 연료알심의 표면온도  $t_F$ 에 대한  $A_F$ 를 식 (6)으로 계산하였다. 다음 식 (11)을 리용하여 각이한  $r$ 에 관하여  $A(r)$ 를 계산하고 이미 작성한  $A(t)$ 에 대한 그래프로부터 대응하는  $t(r)$ 를 찾아 연료알심의 온도분포를 결정하였다.

연료알심의 온도분포는 표 2와 같다.

표 2. 연료알심의 온도분포

$r$ /mm	±3.8	±3.4	±3.0	±2.6	±2.2	±1.8	±1.4	±1.0	±0.6	±0.2	0.0
$t$ /°C	665	770	875	970	1 000	1 140	1 210	1 250	1 280	1 300	1 310

## 맺 는 말

연료요소재료들의 열전도도와 온도사이관계식으로부터 연료알심에서의 온도분포를 해석적으로 결정하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] 김일성종합대학학보(자연과학), 58, 8, 88, 주체101(2012).
- [2] C. Ronchi et al.; J. Applied Phys., 85, 776, 1999.
- [3] D. G. Cacuci; Handbook of Nuclear Engineering 3, Springer, 1529~1530, 2010.

주체105(2016)년 3월 5일 원고접수

## **Determination of Temperature Distribution in the Cylindrical Nuclear Fuel Pellets**

*Jon Song Je, Rim Chong Yop*

The reactor core consists of the thousands of fuel elements and the study on its temperature distribution is the important problem in the static core design and the transient analysis.

We determined the temperature distribution in the fuel pellets analytically from the relative equation between the heat conductivity of the fuel element and the temperature, if the heat conductivities of the fuel elements changed according to the temperature.

Key words: fuel element, heat conductivity