

<論 文>

다공성 핵연료 소결체의 유효열전도율의 수치적 해석

주 영 철* · 박 권 현**

(1986년 10월 29일)

A Numerical Analysis of Effective Thermal Conductivity
of a Porous Nuclear Fuel

Young-Cheol Joo and Kwon-Hyun Park

Key Words: Body Fitted Coordinate Systems(윤곽좌표계), Nuclear Fuel(핵연료 소결체), Pore(기공), Porosity(기공율), Effective Thermal Conductivity(유효열전도율)

Abstract

Effective thermal conductivity of the porous nuclear fuel has been investigated numerically. Difficulties associated with irregular shape of pore have been overcome by using the Body Fitted Coordinate Systems. A computer code has been developed to solve the governing equation with appropriate boundary conditions by transforming from the Cartesian coordinates to the nonorthogonal curvilinear coordinates.

The effects of the porosity and the ratio of thermal conductivities of pore and medium on the effective thermal conductivity have been investigated. For a convenient use of the result, a correlation equation was suggested under the assumption of circular pore. The computation results by the assumption of randomly oriented elliptic pore has been agreed more closely to existing experimental result than that by the assumption of circular pore.

기 호 설 명

| | | | |
|------------|------------------------------|-----------------|----------------------------|
| A | : 기공과 고체 경계면의 열전달 면적 | Q | : 계산영역을 통하여 흐르는 열량 |
| a_1, a_2 | : 상수 | q_1, q_2 | : 기공 경계면으로 들어오는 열량과 나가는 열량 |
| H | : 열유동에 수직방향의 기공의 지름 | s^+, s^- | : 기공 경계면의 기체쪽과 고체쪽 |
| k_{eff} | : 다공성 핵연료 소결체의 유효열전도율 | T_0, T_1, T_2 | : 계산영역의 왼쪽면과 중심면, 오른쪽면의 온도 |
| k_s | : 고체(UO ₂)의 열전도율 | t | : 기공 경계면의 접선방향 |
| k_p | : 기공 내부기체의 열전도율 | W | : 열유동에 수직방향의 기공의 지름 |
| n | : 기공 경계면의 법선방향 | X_0, X_1 | : 계산영역의 왼쪽면과 오른쪽면의 좌표 |
| P | : 기공율 | Y_0, Y_1 | : 계산영역의 윗면과 아랫면의 좌표 |
| | | x, y | : 실제평면의 좌표축 |

* 정회원, 한국에너지연구소 핵연료기계설계실

** 한국에너지연구소 핵연료기계설계실

그리스 문자

- α, β, γ : Metric 계수
- $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$: 기공 경계면의 Metric 계수를 고체쪽에서 환산한 값
- $\alpha_2, \beta_2, \gamma_2$: 기공 경계면의 Metric 계수를 기체쪽에서 환산한 값
- Γ_i : 실제평면에서 계산영역의 경계
- Γ'_i : 변환평면에서 계산영역의 경계
- ξ, η : 변환평면의 좌표축
- ξ_1, η_1 : Γ'_i 점의 좌표
- ϕ, χ : 좌표의 밀집도를 조절하는 함수

하첨자

- x, y, ξ, η : 편미분을 표시

1. 서 론

핵연료 소결체는 분말형태의 UO_2 를 고온에서 일정 시간동안 가압, 소결하여 만든다. 소결조건을 조절함으로써 기공율[=기공의 체적/(기공의 체적+고체의 체적)]이 0.02~0.2인 원하는 밀도의 소결체를 얻을 수 있다⁽¹⁾. 이러한 핵연료 소결체의 열전도율은 소결체 내부의 온도분포를 결정하는데 이용되며, 이 온도분포는 핵분열 생성기체 방출, 소결체 균열, 입자의 성장, 기공의 이동 등 여러가지 현상에 영향을 미치기 때문에 핵연료 소결체의 유효열전도율을 결정하는 것은 중요하다. 이 유효열전도율은 소결체 내의 기공의 분포, 크기, 그리고 기공내부의 열전달에 의해서 큰 영향을 받는다.

이러한 다공성 물질의 유효열전도율 해석은 핵연료 소결체의 열전달 뿐만 아니라 일반적인 요업재료의 열전도율과 전기전도율, 유동층연소(fluidized bed combustion)등에 응용되므로 많은 연구가 진행되어 왔다⁽²⁻¹⁰⁾. 다공성 물질의 열전달을 해석하기 위해서는 기공 주위의 온도분포를 정확하게 예측해야 하는데, 일반적으로 기공은 형상이 불규칙하고 기공과 고체의 경계면 주위에서 온도분포가 급격하게 변하는 특성이 있다. 이러한 문제에 대하여 Eucken⁽²⁾, Loeb⁽⁴⁾, Kampf⁽⁶⁾, Marino⁽⁷⁾, Stora⁽⁹⁾등이 해석적인 방법으로 연구하였으나, 해석의 간편성을 위해 기공의 존재에 관계없이 1차원 열유동을 가정하여 해석하였으며, 이들 연구에서는 기공내부기체의 열전달을 무시하였거나 기공의 형상을 단순히 사각형으로 가정하는 등 많은 가정을 하여야 했으므로 정확한 결과를 얻는데 어려움이

있었다. 주영철 등⁽¹¹⁾ 이 수치해석적인 방법을 이용하여 이러한 어려움을 일부 해결하였으나 아직까지 기공과 주위고체 경계면에서의 기하학적 불규칙성을 해결할 수 있는 일반적인 방법은 찾아보기 힘들다.

본 연구에서는 이러한 기하형태의 불규칙성을 쉽게 고려할 수 있는 윤곽좌표계(body fitted coordinate systems)를 이용하여 다공성 물질의 유효열전도율을 결정하는 방법을 제시하였다. 기공의 형상을 원형으로 가정하고 기공율과 기공 내부기체와 고체의 열전도율 비 등의 변수가 유효열전도율에 미치는 영향을 계산하여 유효열전도율과 이들 변수의 상관관계식을 제안하였으며, 또한 핵연료 소결체와 같은 실제적인 다공성 물질의 유효열전도율을 해석하는데 좀 더 타당한 타원형 형상의 기공 가정방법을 제시하였다.

2. 해석모델과 지배방정식

다공성 물질의 기공은 일반적으로 크기와 모양, 그리고 분포상태가 매우 불규칙하다. 이 다공성 물질의 유효열전도율 예측방법을 구하기 위하여 Fig. 1과 같이 2차원 다공성 물질에 크기와 모양이 같은 여러개의 기공이 규칙적으로 배열되어 있다고 가정한다. 여기서 하나의 기공을 포함하는 점선으로 둘러싸여진 기본요소를 대표적인 관심영역으로 생각할 수 있다. Fig. 2에 이 관심영역의 경계조건을 나타냈다. 즉 영역의 왼쪽면은 T_0 로 유지되고 오른쪽면은 T_2 로 유지되며, 윗면과 아랫면은 단열되어 있다. 이때 점선으로 표시된 중심선에서의 온도는 $T_1 = (T_0 + T_2)/2$ 로 환산된다.

기공내부의 대류열전달과 복사열전달은 무시할 수 있을 정도로 작다고 가정한다. 실제로 핵연료 소결체 내부에 있는 기공은 지름이 약 $10\mu m$ 정도로 크기가 아주 작기 때문에 내부기체의 대류현상이 무시될 수 있으며, 기공 경계면의 온도는 거의 균일하기 때문에 복사열전달이 무시될 수 있다.

기하학적인 대칭성을 이용하여 Fig. 2의 기본요소중 제 2상한만을 고려하면, 계산영역을 Fig. 3과 같이 좌우 양단의 온도가 T_0, T_1 으로 고정되어 있고 나머지 면이 단열되어 있는 경우로 간단히 생각할 수 있으며, 다공성 물질의 유효열전도율을 구하는 문제를 이러한 단순화된 계산영역에서 왼쪽면과 오른쪽면 사이의 열전달계수를 구하는 문제로 생각할 수 있다.

다공성 물질의 유효열전도율(k_{eff})은 계산영역의 왼쪽면과 오른쪽면의 온도구배($(T_1 - T_0)/(X_1 - X_0)$)와 이 영역을 통하여 흐르는 열량(Q)을 이용하여 다음과

같이 정의될 수 있다.

$$k_{eff} = \frac{Q}{-(Y_1 - Y_0) \frac{T_1 - T_0}{X_1 - X_0}} \quad (1)$$

여기서 X_0, X_1 은 각각 계산영역의 왼쪽면과 오른쪽면의 좌표이고, Y_0, Y_1 은 윗면과 아랫면의 좌표이다.

본 연구에서는 정상상태의 열전도만을 고려하므로 Fig. 3과 같은 계산영역에서의 지배방정식은 아래와 같다.

$$T_{xx} + T_{yy} = 0 \quad (2)$$

위의 지배방정식에서 필요로 되어지는 경계조건들은 다음과 같다.

$$\Gamma_1 : T = T_0 \quad (3a)$$

$$\Gamma_2 : \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (3b)$$

$$\Gamma_3 : T = T_1 \quad (3c)$$

$$\Gamma_4 : \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (3d)$$

$$\Gamma_5 : q_s = q_p \quad (3e)$$

여기서 $q_s = -k_s A \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{s^-}$ (3e, a)

$$q_p = -k_p A \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{s^+} \quad (3e, b)$$

q_s 는 고체의 영역에서 기공과 고체의 경계면으로 들어오는 열량이고 q_p 는 이 경계면에서 기공의 영역으로 나가는 열량이다. k_s 와 k_p 는 각각 고체와 기공내부기체의 열전도율이며, A 는 열전달 면적이다. $\frac{\partial T}{\partial n}$ 은

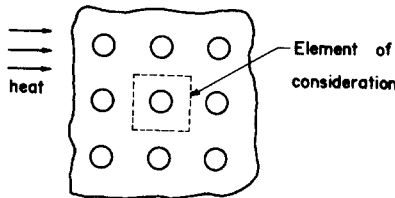


Fig. 1 2-dimensional porous material of present investigation

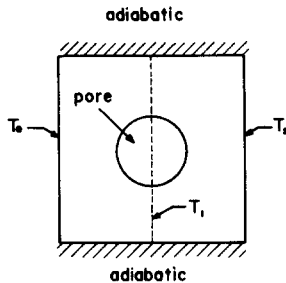


Fig. 2 Detail of the element of consideration

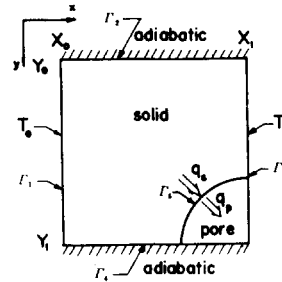


Fig. 3 Physical plane of calculation domain

경계면에 수직한 방향의 온도구배이며, s^- 와 s^+ 는 이 값을 각각 고체와 기공쪽에서 환산한 것을 의미한다.

3. 좌표변환

윤곽좌표계는 계산영역의 모든 경계선이 특정 좌표선과 일치하는 곡선좌표계로서 불규칙한 형상의 실제 평면 (physical plane)을 규칙적인 형상의 변환평면 (transformed plane)으로 사상(mapping)하는 것으로 정의된다. 실제영역에서 유도된 방정식들은 윤곽좌표계로 변환되어 계산이 용이한 변환평면에서 해석되므로 경계조건을 정확하게 적용할 수 있게 된다. 윤곽좌표계를 이용함으로써 얻을 수 있는 또다른 장점은 격자점들이 자동 발생될 뿐만 아니라 계산영역 내부에서 격자점들의 밀집도를 조절하기 쉽다는 점이다.

실제물체가 있는 Fig. 3의 x - y 평면에서 변환된 평면인 Fig. 4의 ξ - η 평면으로의 사상은 다음 두 방정식의 해를 구함으로써 이루어진다.

$$\xi_{xx} + \xi_{yy} = \phi(\xi, \eta) \quad (4)$$

$$\eta_{xx} + \eta_{yy} = \chi(\xi, \eta) \quad (5)$$

실제평면에서는 경계조건을 정의하기가 곤란하기 때문에 식 (4), (5)의 해를 구하기 어렵다. 이러한 어려움은 식 (4), (5)를 ξ - η 평면으로 변환함으로써 해결할 수 있다. 이런 변환된 식은 원래의 식보다 약간 복잡한 형태를 띄지만, 경계조건이 쉽게 정의될 수 있고 일반적인 방법으로 해를 구할 수 있다. 변환된 방정식은 아래와 같다.

$$\alpha x_{\xi\xi} - 2\beta x_{\xi\eta} + \gamma x_{\eta\eta} = -J^2(\phi x_{\xi} + \chi x_{\eta}) \quad (6)$$

$$\alpha y_{\xi\xi} - 2\beta y_{\xi\eta} + \gamma y_{\eta\eta} = -J^2(\phi y_{\xi} + \chi y_{\eta}) \quad (7)$$

여기서

$$\alpha = x_{\eta}^2 + y_{\eta}^2 \quad (8a)$$

$$\beta = x_{\xi}x_{\eta} + y_{\xi}y_{\eta} \quad (8b)$$

$$\gamma = x_{\xi}^2 + y_{\xi}^2 \quad (8c)$$

$$J = x_{\xi}y_{\eta} - x_{\eta}y_{\xi} \quad (8d)$$

이다. ϕ, χ 는 계산영역 내부의 좌표의 밀집도를 조절하는 함수로서 이 함수를 이용함으로써 정확한 계산을 하고 싶은 영역에 좌표를 밀집시킬 수 있다.

이와같은 방법으로 $x-y$ 평면에 대응하는 변환평면 $\xi-\eta$ 평면을 만든 후, $x-y$ 좌표계로 기술된 지배방정식을 $\xi-\eta$ 좌표계로 옮겨 표시하면 그 결과는 다음과 같다.

$$\alpha T_{\xi\xi} - 2\beta T_{\xi\eta} + \gamma T_{\eta\eta} = -J^2(\phi T_{\xi} + \chi T_{\eta}) \quad (9)$$

$\xi-\eta$ 좌표계에서 사용되는 경계조건은 Fig. 4에 있는 각 구역에 따라 아래와 같다.

$$\Gamma_1': T = T_0 \quad (10a)$$

$$\Gamma_2': \frac{\gamma T_{\eta} - \beta T_{\xi}}{J\sqrt{\gamma}} = 0 \quad (10b)$$

$$\Gamma_3': T = T_1 \quad (10c)$$

$$\Gamma_4': \frac{\gamma T_{\eta} - \beta T_{\xi}}{J\sqrt{\gamma}} = 0 \quad (10d)$$

기공과 고체의 실제 경계면인 Fig. 3의 Γ_5 는 변환평면에서 η 축과 일치하는 면과 ξ 축과 일치하는 면으로 나누어지므로, 이 Γ_5 를 Fig. 4의 Γ_5', Γ_6' 의 두면과 이 두면이 만나는 점 Γ_7' 으로 나누어 경계조건을 표시하여야 한다.

$$\Gamma_5': \left. \frac{\alpha_1 T_{\xi} - \beta_1 T_{\eta}}{J_1 \sqrt{\alpha_1}} \right|_{s^-} = \frac{k_p}{k_s} \left. \frac{\alpha_2 T_{\xi} - \beta_2 T_{\eta}}{J_2 \sqrt{\alpha_2}} \right|_{s^+} \quad (10e)$$

$$\Gamma_6': \left. \frac{\gamma_1 T_{\eta} - \beta_1 T_{\xi}}{J_1 \sqrt{\gamma_1}} \right|_{s^-} = \frac{k_p}{k_s} \left. \frac{\gamma_2 T_{\eta} - \beta_2 T_{\xi}}{J_2 \sqrt{\gamma_2}} \right|_{s^+} \quad (10f)$$

$\alpha_1, \beta_1, \gamma_1, J_1$ 은 (8a~d)의 미분항을 고체쪽에서 계산한 것이며, $\alpha_2, \beta_2, \gamma_2, J_2$ 는 기공쪽에서 계산한 것이다. 좌변과 우변의 미분항도 각각 고체쪽(s^-)과 기체쪽(s^+)에서 환산하여 구한다.

$$\Gamma_7': -\left. \frac{T_{\eta}}{\sqrt{\alpha}} \right|_{r_5'} = \left. \frac{T_{\xi}}{\sqrt{\gamma}} \right|_{r_6'} \quad (10g)$$

윗 식의 좌변은 경계면상에서 Γ_7' 점 위치의 온도의 기울기를 Γ_5' 면쪽에서 환산한 것이며, 우변은 Γ_6' 면쪽에서 환산한 것이다.

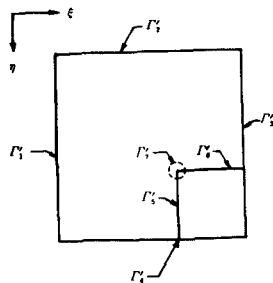


Fig. 4 Transformed plane of calculational domain

4. 수치해석 방법

우선 윤곽좌표계의 구성을 위하여 격자점 생성을 할 때 변환평면의 각 격자점에 대응하는 실제평면의 격자점의 위치를 변환방정식 (6), (7)을 이용하여 구한다. 기공과 고체의 경계면에서 온도가 급격하게 변할 것이 예상되므로, 이 부분의 온도를 더욱 정확하게 계산하기 위해서는 기공과 고체의 경계면 부근에 격자점을 밀집시켜야 한다. 이를 위해서 식 (6)과 (7)의 ϕ, χ 는 다음과 같이 정한다.

$$\phi(\xi, \eta) = a_1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4} \frac{\xi}{\xi_1}\right) \sin\left(\frac{\pi}{4} \frac{\eta}{\eta_1}\right) \quad (11a)$$

$$\chi(\xi, \eta) = a_2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4} \frac{\xi}{\xi_1}\right) \sin\left(\frac{\pi}{4} \frac{\eta}{\eta_1}\right) \quad (11b)$$

여기서 a_1 과 a_2 는 상수이며, 이들 값이 커질수록 경계면 부근에 조밀하게 밀집된다. (ξ_1, η_1) 은 Fig. 4의 Γ_7' 점의 좌표이다. 식 (6), (7)을 중심차분(central difference)을 이용하여 유한차분화 한 후 이완법(successive overrelaxation method)에 의하여 x, y 를 ξ, η 의 함수로 구한다. Fig. 5(a)는 기공의 모양을 원형으로 가정하고 a_1, a_2 를 각각 2로 하고 격자배열이 33×33 일 때 계산에 사용된 실제평면에서의 격자모양이며, Fig. 5(b)는 변환평면의 격자모양이다. Fig. 6(a)는 기공의 모양을 타원형으로 가정하고 $a_1=2, a_2=0.3$ 으로 하였을 때 계산에 사용된 실제평면에서의 격자모양이며, Fig. 6(b)는 변환평면의 격자모양이다.

윤곽좌표계 구성을 한 다음 지배방정식 (9)를 중심차분을 이용하여 유한차분화한 후 이완법으로 온도분포를 구한다.

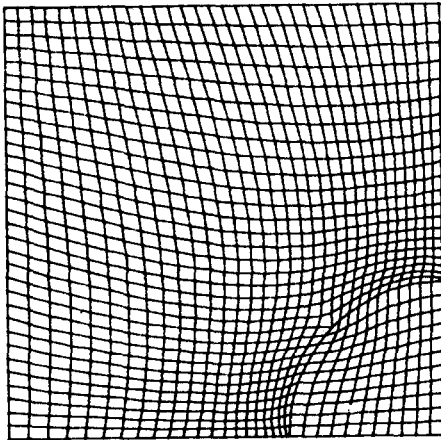
이와같이 계산영역 내에서의 온도분포를 구한 후, 열유동에 수직인 임의의 단면을 통하여 흐르는 열량(Q)을 각 격자점간의 온도구배를 이용하여 구한다.

$$Q = \sum k \Delta y \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (12)$$

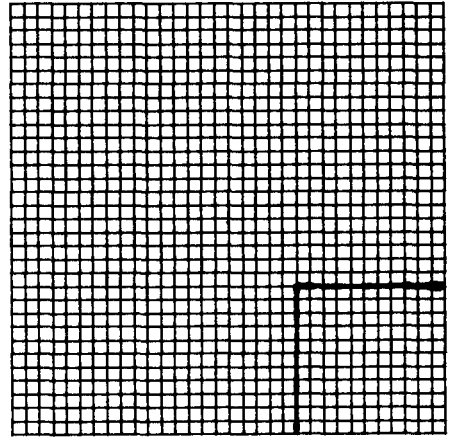
여기서 Δy 는 격자점간의 y 방향거리이며, $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ 는 x 방향의 온도구배이다. 마지막으로 식 (12)를 식 (1)에 대입하여 유효열전도율을 구한다. 자세한 수치해석 방법은 참고문헌⁽¹³⁾에 나타나 있다.

5. 결과 및 고찰

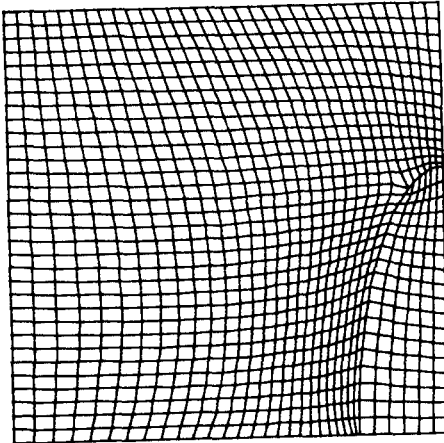
실제 기공의 형상을 원형과 타원형으로 가정한 후 이 두 가지 경우에 대한 유효열전도율을 계산하였다.



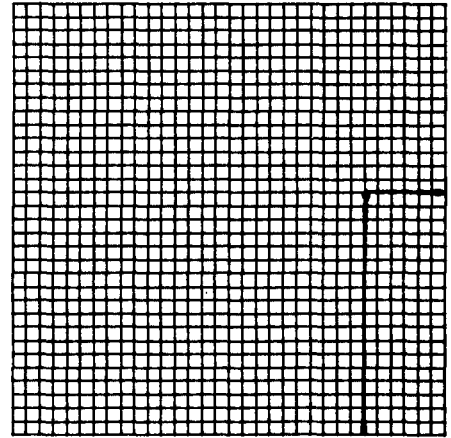
(a) Physical plane



(b) Transformed plane

Fig. 5 Coordinate transformation (circular pore : $H/W=1$)

(a) Physical plane



(b) Transformed plane

Fig. 6 Coordinate transformation (elliptic pore : $H/W=3$)

5.1 원형 기공

일반적으로 핵연료 소결체는 기공율(P)이 0.02~0.2 이고 기공 내부기체와 고체의 열전도율비(k_p/k_s)는 0.01~0.2 까지의 범위내에 있다. 기공의 형상을 원형으로 가정하고 기공율이 0.02~0.3, k_p/k_s 가 0.0001~0.3 까지 변화할 때의 온도분포를 구하였으며, 이들중 대표적인 예로 기공율이 0.1 이고 k_p/k_s 가 0.01 일때의 온도분포를 Fig. 7에 나타내었다.

이 온도분포들을 이용하여 유효열전도율을 구하였으며, Fig. 8에 여러가지 k_p/k_s 의 경우에 기공율의 변화에 따른 유효열전도율과 고체의 열전도율비(k_{eff}/k_s)

의 변화를 나타내었다. 여기서 기공율이 증가하거나 k_p/k_s 가 작을수록 다공성 물질의 유효열전도율이 감소함을 알 수 있다. 이는 일정한 체적내에서 기공의 크기가 커질수록, 그리고 기공 내부기체의 열전도율이 작을수록 열저항이 증가하기 때문에 나타난 것이다.

위의 자료를 최소자승법(least square method)을 이용한 커브피팅(curve fitting)을 하여 아래와 같이 다공성 물질의 유효열전도율을 기공율과 k_p/k_s 의 함수로 나타내었다.

$$\frac{k_{eff}}{k_s} = 1 - P \frac{1.9457 - 3.1382 \cdot \frac{k_p}{k_s} + 1.5659 \cdot \left(\frac{k_p}{k_s}\right)^2}{1 + 0.8455P} \quad (13)$$

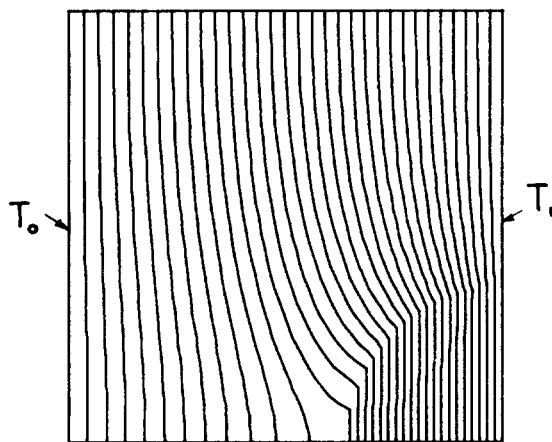


Fig. 7 Temperature distribution (isothermal lines): circular pore ($P=0.1$, $k_p/k_s=0.01$)

이러한 형태의 상관관계식은 Eucken⁽²⁾, Kampf⁽⁶⁾ 등에 의해 제안되었다. 이 식은 본 연구의 계산결과 자료와 0.5%이내의 상대오차를 갖는다. 따라서 식 (13)을 이용함으로써 유효열전도율을 이용하여 다공성 물질의 유효열전도율을 계산하는 노력을 줄일 수 있다.

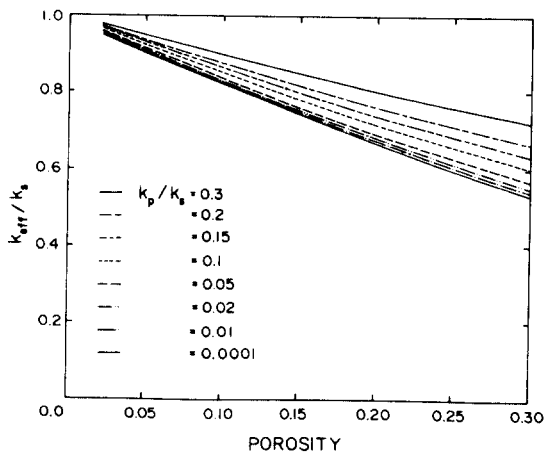


Fig. 8 Effect of porosity on effective thermal conductivity of porous material (circular pore : $H/W=1$)

5.2 타원형 기공

기공의 형상이 Fig. 9(a)와 같이 타원의 장축이 열유동 방향에 수평인 경우를 외상타원(blunt ellipsoid), 그리고 Fig. 9(b)와 같이 타원의 장축이 열유동 방향에 수직인 경우를 입상타원(slender ellipsoid)이라고 정

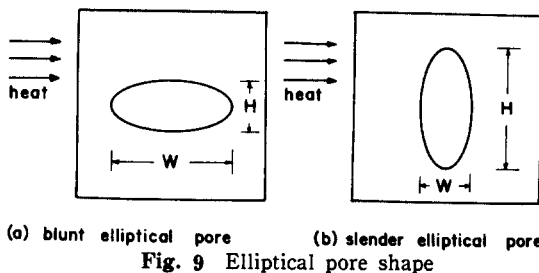


Fig. 9 Elliptical pore shape

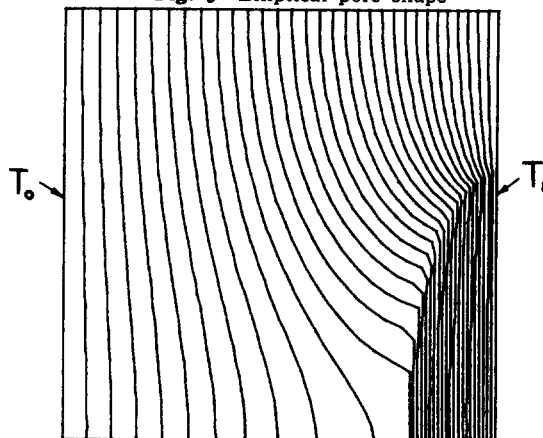


Fig. 10 Temperature distribution (isothermal lines): elliptic pore ($P=0.1$, $k_p/k_s=0.01$, $H/W=3$)

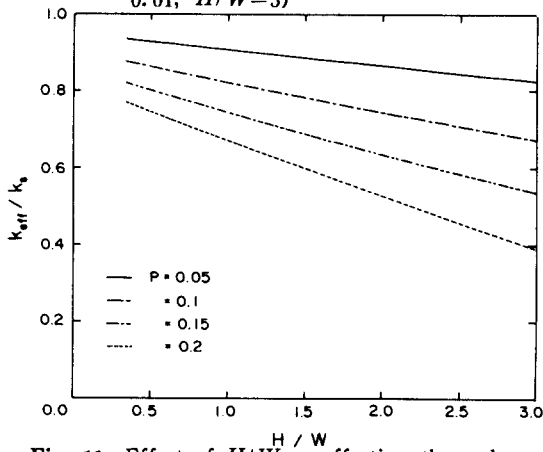


Fig. 11 Effect of H/W on effective thermal conductivity: elliptic pore ($k_p/k_s=0.01$)

의하기로 한다. H/W 는 열유동에 수직방향과 수평방향의 지름비이다. 기공의 형상을 타원형으로 가정하고 기공율이 0.02~0.3, k_p/k_s 가 0.0001~0.3, 기공의 모양이 $H/W=1/3$ 인 외상타원에서 $H/W=3$ 인 입상타원까지 변화할 때의 온도분포를 구하였으며, 이들 중 대표적인 예로 기공율이 0.1, k_p/k_s 가 0.01, H/W 가 3일 때의 온도분포를 Fig. 10에 나타내었다.

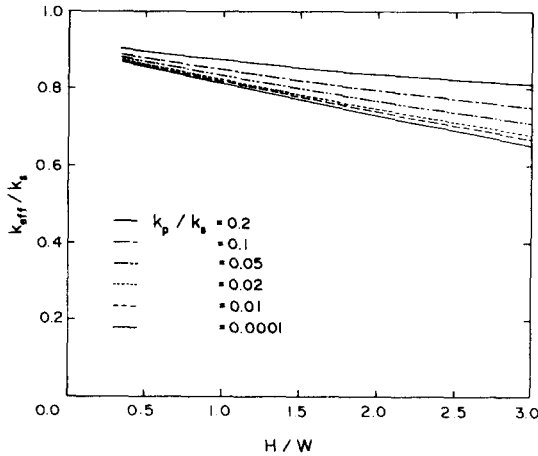


Fig. 12 Effect of H/W on effective thermal conductivity: elliptic pore ($P=0.1$)

Table 1 Effect of slenderness ratio on effective thermal conductivity of porous materials which has randomly oriented elliptic pore ($k_p/k_s=0.01$)

| Porosity | Slenderness ratio | | | |
|----------|-------------------|---------|--------|--------|
| | 1 : 1 | 1 : 1.5 | 1 : 2 | 1 : 3 |
| 0.05 | 0.9069 | 0.9033 | 0.8962 | 0.8791 |
| 0.1 | 0.8216 | 0.8156 | 0.8034 | 0.7744 |
| 0.15 | 0.7435 | 0.7353 | 0.7186 | 0.6780 |
| 0.2 | 0.6716 | 0.6615 | 0.6403 | — |

이 온도분포들을 이용하여 유효열전도율을 구하였으며, 그 결과를 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 11은 k_p/k_s 가 0.01로 일정하고 기공율이 0.05, 0.1, 0.15 및 0.2인 경우 H/W 가 k_{eff}/k_s 에 미치는 영향을 나타낸 것이고, Fig. 12는 기공율이 0.1로 일정하고 k_p/k_s 가 0.0001, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1 및 0.2인 경우 H/W 가 k_{eff}/k_s 에 미치는 영향을 나타낸 것이다. Fig. 11과 Fig. 12에서 기공율이 커지거나 k_p/k_s 가 작아지거나 또는 H/W 가 커질수록 k_{eff}/k_s 는 작아짐을 알 수 있다. 또한 기공율과 k_p/k_s 가 일정할 경우 k_{eff}/k_s 는 H/W 의 변화에 대해 거의 선형적으로 변화하였다. 즉 세장비 (slenderness ratio, H/W : 입상타원, W/H : 와상타원)가 같은 입상타원형 기공과 와상타원형 기공에서, 입상타원으로 가정된 경우는 원형으로 가정된 경우에 비해 유효열전도율이 크게 떨어지지만, 와상타원으로 가정된 경우는 원형으로 가정된 경우에 비해 유효열전도율이 별로 증가하지 않는다. 이것은 와상타원의 경우보다는 입상타원의 경우에서 기공으로 인한 열저항의 변화가 급격하게 늘어나기 때문이다.

소결체 내부의 기공의 형상을 세장비가 같은 타원들이 임의의 방향으로 배치되어 있다고 가정하고 유효열전도율을 구하고자 하였다. 그러나 대칭성을 이용한 해석모델 (Fig. 2)의 가정때문에 와상타원과 입상타원이 아닌 경우에 대해서는 유효열전도율을 구하는데 어려움이 있다. 그래서 기공 갯수의 반이 와상타원이고 나머지 반이 입상타원이라고 가정된 후 각각의 유효열전도율을 산술평균하여 유효열전도율을 구하였으며, 그 결과를 Table 1에 나타냈다. 여기서 알 수 있는 바와 같이 기공이 원형일 때 유효열전도율이 가장 크고, 세장비가 큰 타원일수록 유효열전도율이 낮아졌다. 기공의 형상을 원형으로 가정하는 경우는 열저항이 가장 작은 이상적인 경우이므로, 이 이외의 경우에는 열저항이 커져서 유효열전도율이 낮아지게 된다.

5.3 다른 연구결과와 비교

Fig. 13에는 본 연구결과로 얻은 식 (13)을 Eucken⁽²⁾, Russell⁽³⁾, Kampf⁽⁶⁾의 이론식과 Asamoto⁽¹⁴⁾의 실험식과 비교하였다. Asamoto의 실험식은 기공율 (범위 : 0.05~0.2)과 온도 (범위 : 800~2000°C)의 함수이고 식 (13)과 이론식들은 기공율과 k_p/k_s 의 함수이므로, 온도 1000°C일 때의 Asamoto의 실험조건을 환산하여 $k_p/k_s=0.17$ 로 하여 비교했다. Eucken, Russell, Kampf의 이론식들은 기공의 모양을 구형이나 정육면체로 가정한 것들이고 식 (13)은 원형으로 가정한 것이지만 이들의 계산치는 서로 비슷한 결과를 보였다. 그러나 이 이론식들과 식 (13)의 계산치는 Asamoto 실험식의 계산치보다 훨씬 큰 값으로 나타났다. 식 (13)은 기공의 모양을 원형으로 가정한 것이므로 기공을

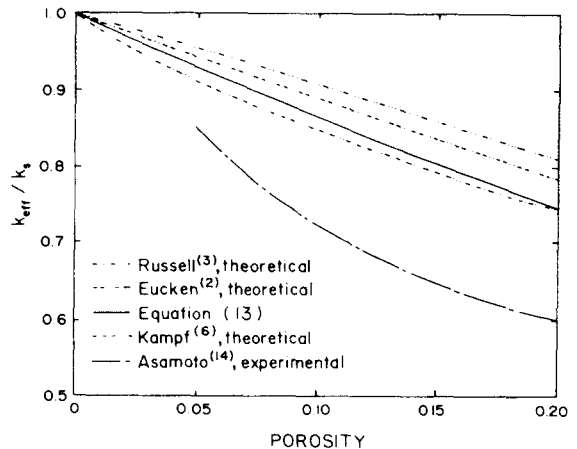


Fig. 13 Comparison of result of present study with others ($T=1000^{\circ}C$; $k_p/k_s=0.17$)

입의의 방향으로 배치된 타원형이라고 가정하면 Table 1에서 알 수 있는 바와 같이 유효열전도율이 작아지기 때문에 실험치에 좀 더 접근하게 된다. 더욱이 핵연료 내부에 있는 기공은 대부분이 UO_2 의 입자(grain) 사이의 간격에 존재하므로 입의의 방향으로 배치된 타원형으로 가정하는 것이 원형으로 가정하는 것보다는 실제상황에 가깝다. 따라서 본 연구에 사용한 기공의 모양을 입의의 방향으로 배치된 타원형으로 가정하는 해석방법이 기존의 연구결과보다 핵연료 소결체와 같은 다공성 물질의 유효열전도율을 예측하는데 좋은 방법이 될 수 있을 것이다.

6. 결 론

다공성 물질의 유효열전도율을 유효면적계를 이용한 수치적인 해석으로 결정하는 방법을 제시하였다. 핵연료 소결체와 같은 실제적인 다공성 물질에 대해서 이 방법을 적용하여 계산한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 기공의 모양을 원형으로 가정한 경우 유효열전도율(k_{eff})과 기공율(P), 기공과 고체의 열전도율비(k_p/k_s)의 상관관계식은 다음과 같이 제안되었다.

$$\frac{k_{eff}}{k_s} = 1 - P \left(\frac{1.9457 - 3.1382(k_p/k_s) + 1.5659(k_p/k_s)^2}{1 + 0.8455P} \right)$$

(2) 소결체내의 기공 갯수의 반이 외상타원이고 나머지 반이 입상타원이라고 가정할 때 계산된 유효열전도율은 원형기공의 가정에 의한 유효열전도율보다 작아진다. 이 결과는 Asamoto의 실험치에 더욱 근접하게 된다. 따라서 핵연료 소결체에서는 타원형 기공의 가정방법이 기존의 원형기공 가정방법보다 좀 더 타당하다고 할 수 있다.

(3) 좀 더 정확한 해석을 위해서는 타원형 기공의 장축이 열유동 방향에 수직과 수평으로 배치되어 있는 경우 뿐만 아니라 그 사이의 입의의 각도로 배치된 경우에 대한 해석이 요구되어진다.

참 고 문 헌

(1) D.R. Olander, 1976, "Fundamental Aspects of Nuclear Reactor Fuel Elements", Chap. 10, pp. 124, Technical Information Center Energy Research and Development Administration, Virginia.
 (2) A. Eucken, 1932, "Thermal Conductivity of Ceramic Refractory Materials; Calculation from The-

rmal Conductivity of Constituents", Forsch. Gebiete Ingenieurw, B3, Forschungsheft No. 353, p. 16.
 (3) H.W. Russell, 1935, "Principles of Heat Flow Porous Insulators", J. of the Amer. Ceramic Society, Vol. 18, pp. 1~5.
 (4) A.L. Loeb, 1954, "Thermal Conductivity; 8, A Theory of Thermal Conductivity of Porous Materials", J. of the Amer. Ceramic Society, Vol. 37, pp. 96~99.
 (5) A. Biancheria, 1966, Trans. Amer. Nuclear Society, Vol. 9, p. 15.
 (6) H. Kampf and G. Karsten, 1970, "Effects of Different types of Void Volume on the Radial Temperature Distribution of Fuel Pins", Nuclear Appl. and Technology, Vol. 9, pp. 288~300.
 (7) G.P. Marino, 1971, "The Porosity Correction Factor for the Thermal Conductivity of the Ceramic Fuels", J. of Nuclear Materials, Vol. 38, pp. 178~190.
 (8) G. Ondracek and B. Schulz, 1973, "The Porosity Dependence of the Thermal Conductivity for Nuclear Fuels" J. of Nuclear Materials, Vol. 46, pp. 253~258.
 (9) J.P. Stora, 1973, "Thermal Conductivity of Two-Phase Solid Bodies", Nuclear Technology, Vol. 17, pp. 225~233.
 (10) P. Nikolopoulos, G. Ondracek, 1983, "Conductivity Bounds for Porous Nuclear Fuels", J. of Nuclear Materials, Vol. 114, pp. 231~233.
 (11) 주영철, 황대현, 심운섭, 1985, "2차원 다공성 물질에서의 등가열전도 계수 특성", 대한기계학회 추계 학술대회 초록집, pp. 189~193.
 (12) J.F. Thomson, F.C. Thames, C.W. Mastin, 1974, "Automatic Numerical Generation of Body-Fitted Curvilinear Coordinate System for Field Containing Any Number of Arbitrary Two-Dimensional Bodies", J. Comp. Phys., Vol. 15, pp. 299~319.
 (13) 주영철, 1986, "핵연료의 기공 및 소결체-피복관 접촉면의 열적 성능 해석, 한국과학기술원 기계공학과 석사학위논문.
 (14) R.R. Asamoto, F.L. Anselin and A.E. Conti, 1969, "The Effect of Density on the Thermal Conductivity of Uranium Dioxide", J. of Nuclear Materials, Vol. 29, pp. 67~81.