



KR0000246

KAERI/TR-1481/2000

# 모의 DUPIC 핵연료의 열확산도

Thermal Diffusivity of the Simulated DUPIC Fuel

2000. 6.

DUPIC 핵연료 개발팀  
한국원자력연구소

**Please be aware that all of the Missing Pages in this document were  
originally blank pages**

## 제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 DUPIC 핵연료 조사시험 및 성능평가 분야에서 수행한 DUPIC 핵연료의 열물성연구와 관련하여 “모의 DUPIC 핵연료의 열확산도”의 기술보고서로 제출합니다.

제 목: 모의 DUPIC 핵연료의 열확산도

(Thermal Diffusivity of the Simulated DUPIC Fuel)

2000년 6월

주저자 : 강권호 (DUPIC핵연료기술개발팀)

공동저자 : 양명승, 배기광, 문제선, 정인하, 송기찬,  
박희성, 이철용, 김형수, 김동주  
(DUPIC핵연료기술개발팀)

## 요 약 문

열확산도는 섬광법(Laser Flash Method)을 이용하여 1350 °C까지 50 °C 간격으로 측정하였다. 열확산도 측정에 사용된 모의 DUPIC 핵연료의 밀도는 상온에서 10.16 g/cm<sup>3</sup>(이론밀도의 94.2 %)이었으며 두께 1 mm, 직경 10 mm로 시편을 가공하여 이용하였다. 상온에서 0.01857 cm<sup>2</sup>/s에서부터 온도가 증가함에 따라 감소하여 1350 °C에서는 0.00523 cm<sup>2</sup>/s를 나타냈다. 모의 DUPIC 핵연료의 열확산도가 UO<sub>2</sub>나 SIMFUEL에 비해 적게 나타났으며 상온에서는 그 차이가 크게 나타났으나 온도가 상승함에 따라 그 차이가 줄어드는 것으로 나타났다.

## Abstract

Thermal diffusivity of simulated DUPIC fuel was measured using Laser Flash Method in the temperature range from room temperature to 1350°C. Density of simulated DUPIC fuel used in the measurement of thermal diffusivity was 10.16 g/cm<sup>3</sup>(94.2% of theoretical density) at room temperature and diameter and thickness were 10 mm and 1 mm, respectively. Thermal diffusivity decreased from 0.01857 cm<sup>2</sup>/s at room temperature to 0.00523 cm<sup>2</sup>/s at 1350°C. Thermal diffusivity of simulated DUPIC fuel was lower than those of UO<sub>2</sub> and simulated spent fuel. The difference of thermal diffusivity between simulated DUPIC fuel and UO<sub>2</sub> and simulated spent fuel was high and it decreased due to temperature increase.

## 목 차

요 약 문 .....	i
Abstract .....	ii
목 차 .....	iii
그림목차 .....	iv
표목차 .....	iv
1. 서 론 .....	1
2. 열전달이론 .....	2
3. 열전도도 측정원리 .....	4
4. 모의 DUPIC 핵연료 열확산도 측정 .....	19
5. 결 론 .....	26

## 그림 목차

Fig. 1 Schematic illustrations of radial heat flow methods used to measure the thermal conductivity of solid, in which $x$ denotes position of thermocouples and $\leftrightarrow$ denotes direction of heat flow; (a) unguarded cylindrical, (b) guarded cylindrical method, (c) spherical or ellipsoidal method, (d) comparative method, and (e) directing heating method. ...	10
Fig. 2 Schematic diagram of unguarded cylindrical radial heat flow apparatus .....	11
Fig. 3 Top view of comparative radial heat flow apparatus showing the thermocouple location in the central specimen and in the external material of known thermal conductivity. ....	12
Fig. 4 Schematic diagram of test section set up for measuring thermal conductivity by the calorimeter method. ....	13
Fig. 5 Schematic diagram of guarded hot plate apparatus for measurements at room temperature and below (a) and at higher temperatures (b). ..	14
Fig. 6. Variation of Specific heat of simulated DUPIC fuel according to temperature .....	23
Fig. 7. Variation of thermal diffusivity of simulated DUPIC fuel according to temperature .....	24
Fig. 8. Variation of thermal conductivity of simulated DUPIC fuel according to temperature .....	25

## 표 목 차

Table 1. Thermal diffusivity of simulated DUPIC fuel .....	22
--	----

## 1. 서론

여러 가지 열물성중에서 열정수라 불리는 세가지 열물성인 열전도도, 비열, 열확산도는 원자로의 정상운전중 핵연료의 온도상승, 결정립성장, 기공 및 외부로의 열방출량을 지배하는 주요인자이다. 특히 핵연료는 원자로내에서 핵분열이 일어날 때 높은 열을 발생시키며, 특히 세라믹 계통의 핵연료는 열전도도가 낮기 때문에 중심온도가 융점까지 도달하게 된다. 이는 핵연료 자체의 입자성장, 고밀화 및 핵분열 생성물질의 확산 등에 따른 물성변화를 초래하게 된다. 또한 낮은 열전도도로 인해 핵연료 자체에 급격한 온도구배가 형성되며 산소, 핵분열물질의 이동뿐만 아니라 기공의 이동현상이 일어나서, 초기 화학적 조성분포의 변화가 초래되며, 열응력에 의한 소성변형이나 균열이 발생한다. 따라서 DUPIC 핵연료의 설계 및 열적 성능평가를 위해서는 열물성 자료가 필수적으로 확립되어야 한다. 특히 핵연료의 온도구배와 열 방출에 가장 큰영향을 주는 열전도도의 측정은 필수적이라 할 수 있다.

본 보고서에서는 고온에서 모의 DUPIC핵연료의 열전도도를 구하기 위하여 여기서는 열확산도를 측정하였다. 주로 하나로에서 조사시험될 모의 핵연료를 대상으로 상온에서 1350℃까지 측정하였다.



## 2. 열전달 이론

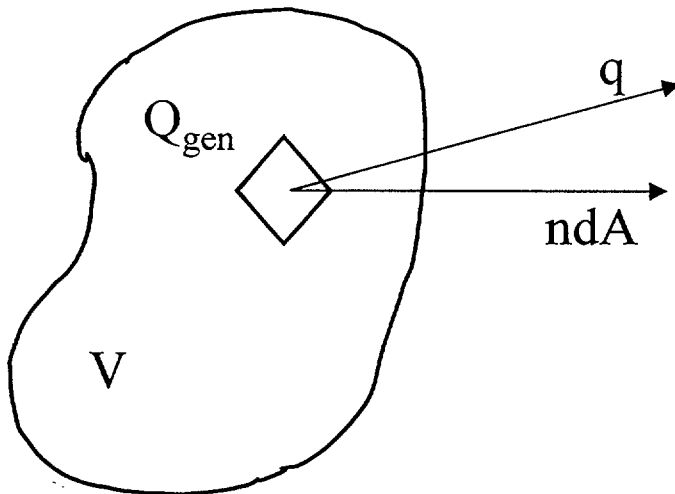
열전달이란 온도차에 의해 물체사이에서 발생하는 에너지의 이동이다. 에너지 이동의 매체에 따라 고체를 통하는 에너지 이동을 전도열전달(heat conduction), 유체를 통한 에너지 이동을 대류열전달(heat convection), 진공을 통한 에너지 이동을 복사열전달(heat radiation)이라고 한다. 한 물체의 온도구배가 존재할 때 고온영역으로부터 저온영역으로 에너지가 달된다는 것은 경험적 사실이다. 이렇게 한 물체내에서 온도차에 의한 에너지 전달을 전도열전달이라하며, 단위면적당, 단위시간당 이동하는 에너지는 온도구배에 비례한다.

$$\frac{q}{A} \sim \frac{\partial T}{\partial x} \quad 1$$

비례상수를 대입하면, 전도열전달의 기본 식이 유도된다.

$$q(r, t) = -k \nabla T(r, t) \quad W/m^2 \quad 2$$

여기서  $q(W/m^2)$  는 단위시간당 열의 이동비율이고  $\nabla T$  는 열흐름방향의 온도구배를 나타낸다.  $k(W/m \cdot C)$ 는 재료의 열전도도(thermal conductivity)를 나타내며 (-) 부호는 열이 고온에서 저온으로 흐르는 열역학 제2법칙을 만족하기 위하여 삽입된 것이다.



위 그림에서 에너지평형 방정식을 세우면 다음과 같다.

$$-\int_A \mathbf{q} \cdot \mathbf{n} \, dA + \int_V Q_{\text{gen}} \, dV = \int_V \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \, dV \quad 3$$

여기서  $Q_{\text{gen}}$  는 단위부피당 열발생량,  $\rho$  는 밀도 그리고  $C_p$  는 정압비열을 나타낸다. 위식은 Green의 법칙에 따라 다음과 같이 변형되어 열전도의 기본식을 유도할 수 있다.

$$\int_V (-\nabla \cdot \mathbf{q} + Q_{\text{gen}} - \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}) \, dV = 0 \quad 4$$

$$-\nabla \cdot \mathbf{q} + Q_{\text{gen}} - \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad 5$$

$$-\nabla \cdot (-k \nabla T) + Q_{\text{gen}} - \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad 6$$

$$\nabla \cdot (k \nabla T) + Q_{\text{gen}} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad 7$$

$$\nabla^2 T + \frac{1}{k} Q_g = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad 8$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad 9$$

여기서  $\alpha$  는 열확산도를 나타내며 단위는  $\text{m}^2/\text{sec}$  이다. 이식으로부터 열확산도와 비열 및 밀도를 알면 열전도도를 구할 수 있다.

### 3. 열전도도 측정 원리

#### 가. steady state method의 측정 원리

##### 1) steady state 방법의 기본식

일반적으로 온도분포에 열전도도  $k$ 를 관계시키는 기본식은 위에서 유도한 식 9이며 이식은 재료가 균질하고 등방성이라면 모든 steady state 조건에서 만족한다. Steady state에서는  $(\partial T/\partial t)$ 가 영이며 대부분의 경우에  $Q$  값도 영이므로 다음과 같이 축소된다.

$$\nabla^2 T = 0 \quad 10$$

##### 2) Radial Heat Flow Method

Radial heat flow method는 열전도도를 측정하는데 있어서 가장 좋은 측정방법을 아니지만 radial system이라는 이론적 장점을 이용하여 간단한 수학적형태의 열전도도식을 만들 수 있다. 주의 깊은 실험만 행한다면 넓은 온도영역과 넓은 열전도도 범위에 걸쳐서 비교적 정확한 결과를 낼 수 있다는 실제적 장점을 가지고 있으므로 steady state 방법으로 열전도도를 측정하는 방법 중 가장 많이 사용되어 왔다. radial heat flow 방법은 여러 재료들의 열전도도 측정이 가능하며 넓은 열전도도 영역 ( $0.0001 < K < 1.6 \text{ W/cm}^\circ\text{C}$ )과 넓은 온도구간 ( $93 < T < 3900 \text{ K}$ )에 걸쳐서 측정될 수 있다. Steady state의 radial heat flow 방법을 이용한 열전도도 측정방법은 system design 및 시편의 형태에 따라서 그림 1에 나타낸 바와 같이 크게 5가지로 분류되며 그 구체적인 내용은 다음과 같다.

##### (1) Unguraded Cylinder Method

이 방법은 end effect를 제거하기 위하여 그림 2의 system 구성도에서와 같이 시편이 무한대의 길이를 갖는다고 가정하고 중앙에 heat source (혹은 sink)가 있는 동심의 원주형태의 시편을 이용하여 열전도도를 측정하는 방법이다. 이 방법에 사용되는 방정식은 steady state 조건을 원주형 좌표계의 형태로 변환하여 구할 수 있다.

$$\frac{1}{r} \left( \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad 11$$

여기서  $r$ ,  $\theta$ ,  $z$ 는 각각 원주의 반경, 각도, 세로좌표이다. 원주형 시편에서  $z$ 축 방향으로 열전달이 발생하지 않고 등온면이 원주의 중심이나 축정부에서 원형의 형태라고 가정하면, 즉 온도  $T$ 가 반경  $r$ 에만 관계할 때 아래와 같다.

$$\frac{d}{dr}\left(r\frac{dT}{dr}\right) = 0 \quad 12$$

이 식의 해로부터  $T(r)$ 을 구할 수 있다.

$$T = A \ln r + B \quad 13$$

B.C.

$$T = T_1 \text{ at } r = r_1$$

$$T = T_2 \text{ at } r = r_2$$

$$T(r) = \frac{(T_2 - T_1) \ln(r/r_2)}{\ln(r_1/r_2)} + T_2 \quad 14$$

Fourier 법칙에 의하면 단위면적당 heat flow  $q$ 는 아래와 같다.

$$q(r,t) = -k \nabla T = -k \frac{d}{dr}(T) = p/2\pi r L \quad 15$$

$$-k \frac{d}{dr} \left[ \frac{(T_2 - T_1) \ln(r/r_2)}{\ln(r_1/r_2)} + T_2 \right] = p/2\pi r L \quad 16$$

$$k = \frac{p \ln(r_1/r_2)}{2\pi L (T_1 - T_2)} \quad 17$$

## (2) Guarded Cylindrical Method

이 방법은 unguarded cylindrical 방법과 측정원리는 같으나 실제적인 면을 고려하여 원주형 시편의 길이 방향으로 발생하는 heat flow를 최소화하기 위하여 end guard를 설치하고 시편을 disc 형태로 여러 개 쌓아서 열전도도를 측정하는 방법이다. 길이

방향으로의 열손실을 포함한 여러 가지의 측정오차를 줄일 수 있다는 장점이 있으며 대부분의 경우에 radial heat flow 방법을 이용한 열전도도를 측정할 경우 이 방법을 이용한다.

### (3) Spherical and Ellipsoidal Method

이 방법은 power source가 시편에 의해서 완전히 둘러싸여지게 만들어서 구형대칭이나 타원체대칭을 이용하여 열전도도를 측정하는 방법이다.

구형대칭인 경우 열전달의 steady state equation을 구형축으로 변환하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} = 0 \quad 18$$

가정 : 구대칭

$$T = A/r + B \quad 19$$

B.C.

$$T = T_1 \text{ at } r = r_1$$

$$T = T_2 \text{ at } r = r_2$$

$$k = \frac{\rho \ln(1/r_1 - 1/r_2)}{4\pi(T_1 - T_2)} \quad 20$$

### (4) Comparative Method

열전도도를 알고있는 재료와 모르는 재료를 그림 3에 나타낸 바와 같이 동심의 서로 다른 크기의 원주형태로 만들어 기준재료를 시편 holder로 사용되게 하고 중앙의 축부분에 power source를 설치하여 측정하는 방법이다. 앞서 기술한 cylindrical method와 비슷하게 end guard를 설치하거나 시편의 길이를 충분히 길게 하여 system을 구성한다. 시편 내에 두 개의 서로 다른 반경 r1, r2에서의 온도 T1, T2와 기준재료의 반경 r3, r4에서의 온도 T3, T4가 측정되면 시편의 열전도도를 구하는 식

은 다음과 같이 유도될 수 있다.

열전달 지배방정식

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0 \quad 21$$

열평형 방정식

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial r} = -k2\pi r l \frac{\partial T}{\partial r} \quad 22$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = -\frac{q}{2\pi r l k} \quad 23$$

위 식을 풀면 다음과 같다.

$$T = -\frac{q}{2\pi l k} \ln r + C \quad 24$$

B.C.

$$T = T_1 \quad \text{at } r = r_1$$

$$T = T_2 \quad \text{at } r = r_2$$

$$T_1 = -\frac{q}{2\pi l k} \ln r_1 + C \quad 25$$

$$T_2 = -\frac{q}{2\pi l k} \ln r_2 + C \quad 26$$

$$T_1 - T_2 = -\frac{q}{2\pi l k_1} \ln \left( \frac{r_1}{r_2} \right) \quad 27$$

$$q = -2\pi l k_1 \frac{(T_1 - T_2)}{\ln \left( \frac{r_1}{r_2} \right)} \quad 28$$

$$T_3 - T_4 = -\frac{q}{2\pi l k_2} \ln\left(\frac{r_3}{r_4}\right) \quad 29$$

$$q = -2\pi l k_2 \frac{(T_3 - T_4)}{\ln\left(\frac{r_3}{r_4}\right)} \quad 30$$

$$k_1 = k_2 \frac{(T_3 - T_4) \ln(r_2/r_1)}{(T_1 - T_2) \ln(r_4/r_3)} \quad 31$$

여기서  $k_1$ 은 측정대상 시편의 열전도도,  $k_2$ 는 기준재료의 열전도도이다.

### 3) Calorimeter Method

Calorimeter 방법은 주로 내화재료의 열전도도를 측정하는 steady state 방법이다. 그림 4에 대략적인 장치의 구조를 나타내었다. 일반적으로 열이 guard brick으로 둘러싸여진 벽돌모양의 시편을 통하여 아래의 calorimeter로 흘러들어 간다. Steady state 조건하에서 열전도도는 시편에서의 온도구배와 열전달속도를 구함으로써 계산될 수 있다.

Hot face temperature가 일정하고 calorimeter와 내부의 guard 사이에 온도차가  $\pm 0.03K$  이내로 유지될 수 있을 때, 열전도도는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$q = -kA \frac{T_2 - T_1}{L} \quad 32$$

여기서  $q$ 는 시편을 통한 열전달속도(watts),  $L$ 은 시편에서 온도가 측정되는 열전대 사이의 거리(meter),  $A$ 는 calorimeter area( $m^2$ ), 그리고  $T_2$ ,  $T_1$ 은 시편대에서 측정된 고온과 저온의 온도(K)이다.

열전달속도는 calorimeter로 흘러들어가고 빠져나오는 물의 온도변화로부터 측정될 수 있으며 다음과 같이 정의된다.

$$q = \frac{M C_p \Delta T}{t} \quad 33$$

여기서  $C_p$ 는 물의 열용량,  $\Delta T$ 는 calorimeter 출구와 입구 사이에서 측정된 온도증가, 그리고  $M$ 은 일정시간( $t$ ) 동안 calorimeter로 흘러들어 가는 물의 질량(kg)이다. 위 식들을 이용하여 calorimeter method로 구하는 열전도도 관계식은 아래와 같다.

$$k = \frac{C_p \Delta T M L}{A (T_1 - T_2)} \quad 34$$

- $C_p$  : Calorimeter를 흐르는 물의 정압비열
- $\Delta T$  : Calorimeter를 흐르는 물의 온도변화
- $M$  : 시간  $t$ 동안 Calorimeter를 흐르는 물의 질량
- $L$  : 시편내의 온도  $T_1$ 과  $T_2$ 의 거리
- $A$  : 시편의 단면적
- $T_1, T_2$  : 시편내부의 온도

#### 4) Guarded Hot Plate Method

Calorimeter 방법과 유사하게 guarded hot plate 방법은 steady state 조건에서 열전도도의 측정을 할 수 있다. 그러나 calorimeter와는 달리 두 개의 거의 같은 시편을 guarded hot plate로 사용하고 열전달속도  $Q$ 를 hot wire 방법에서 기술한 전기저항기술로 구한다. 측정부의 한 예를 그림 5에 나타내었다. Main heater에서 방출되는 전기에너지를 정확하게 측정하고 그 다음 이 전기 에너지는 위와 아래의 시편으로 열전달을 발생시킨다. Main heater 주위의 guard heater는 반경 방향의 열전달을 최소화 시킨다. 요구되는 온도 구간에 따라서 물이나 액체질소가 heat sink를 통하여 순환하게 된다. Steady state 조건에서, 열전도도는 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$k \left( \frac{\Delta T}{\Delta x} \right)_t + k \left( \frac{\Delta T}{\Delta x} \right)_b = \left( \frac{Q}{A} \right)_{mh} \quad 35$$

여기서  $\Delta T$ 는 시편을 통한 온도구배(위나 아래의 시편),  $\Delta x$ 는 시편의 두께 그리고  $A$ 는 main heater의 면적이다. 여러 개의 열전대가 각기 다른 시편에서의  $\Delta T$ 를 구하는데 평균 온도를 구하기 위하여 각각의 시편 위와 아래에서 사용된다.

보조 heater를 사용하면 각 시편 내의 온도 기울기가 거의 같게 될 수 있고 위 식에 있는 두 개의  $K(\Delta T/\Delta x)$ 항이 같아져서 열전도도를 보다 쉽게 구할 수 있다.



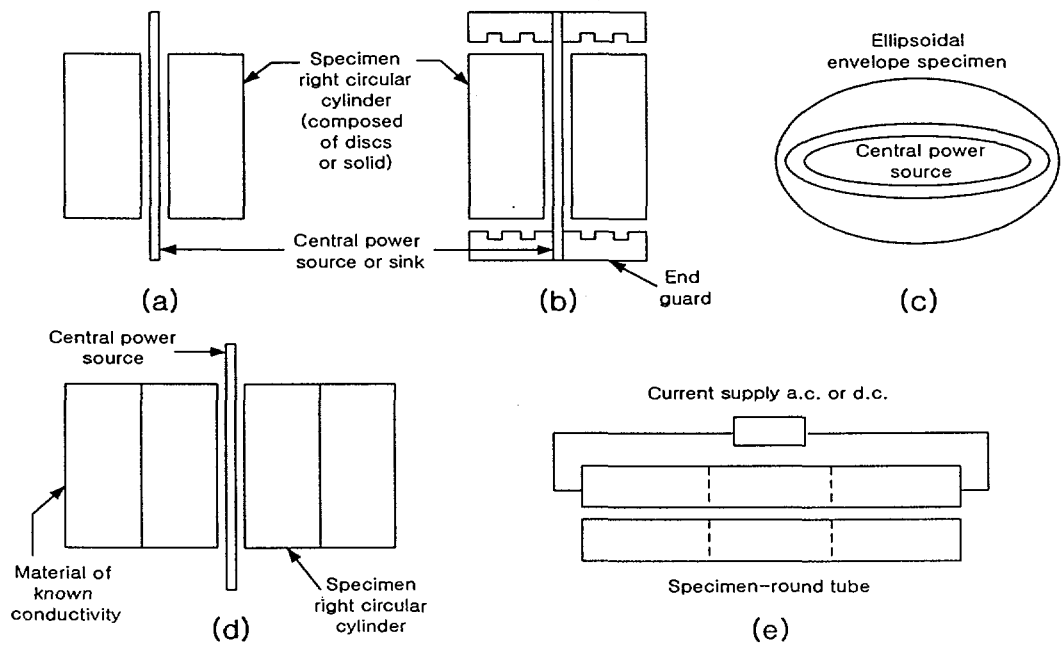


Fig. 1 Schematic illustrations of radial heat flow methods used to measure the thermal conductivity of solid, in which  $x$  denotes position of thermocouples and  $\leftrightarrow$  denotes direction of heat flow; (a) unguarded cylindrical, (b) guarded cylindrical method, (c) spherical or ellipsoidal method, (d) comparative method, and (e) directing heating method.

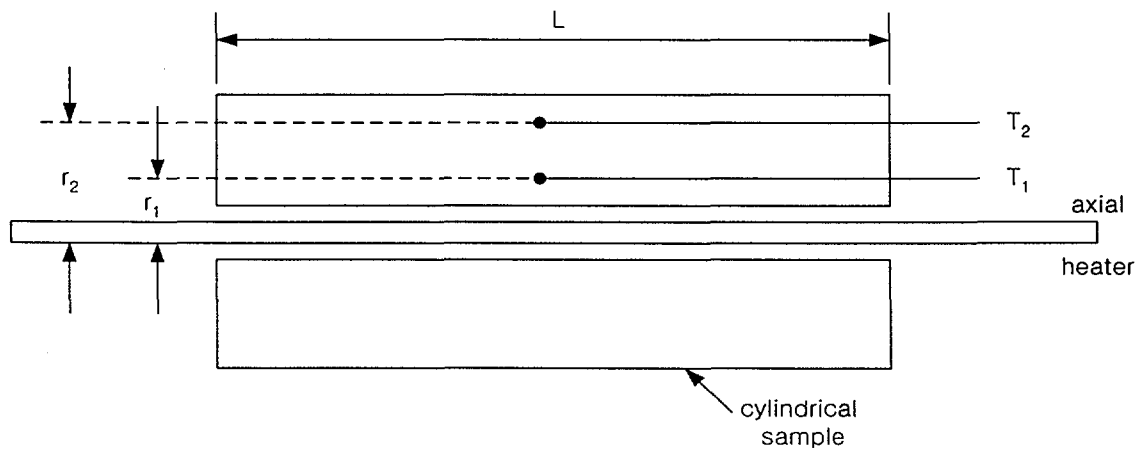


Fig. 2 Schematic diagram of unguarded cylindrical radial heat flow apparatus

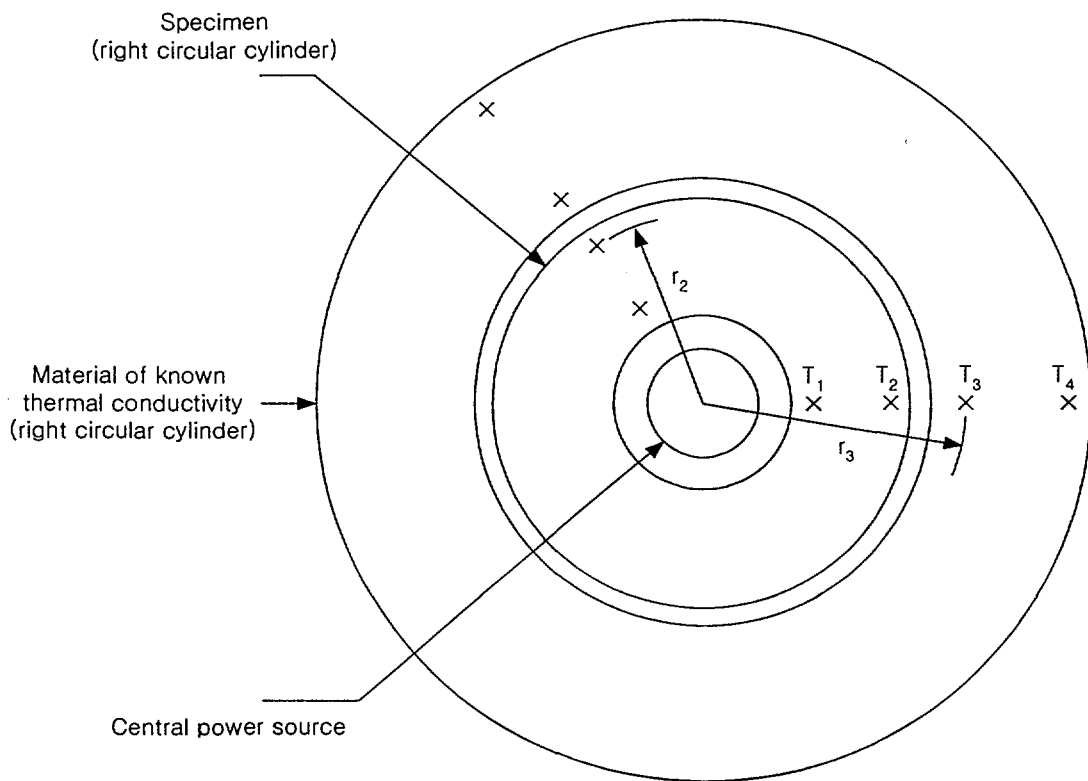


Fig. 3 Top view of comparative radial heat flow apparatus showing the thermocouple location in the central specimen and in the external material of known thermal conductivity.

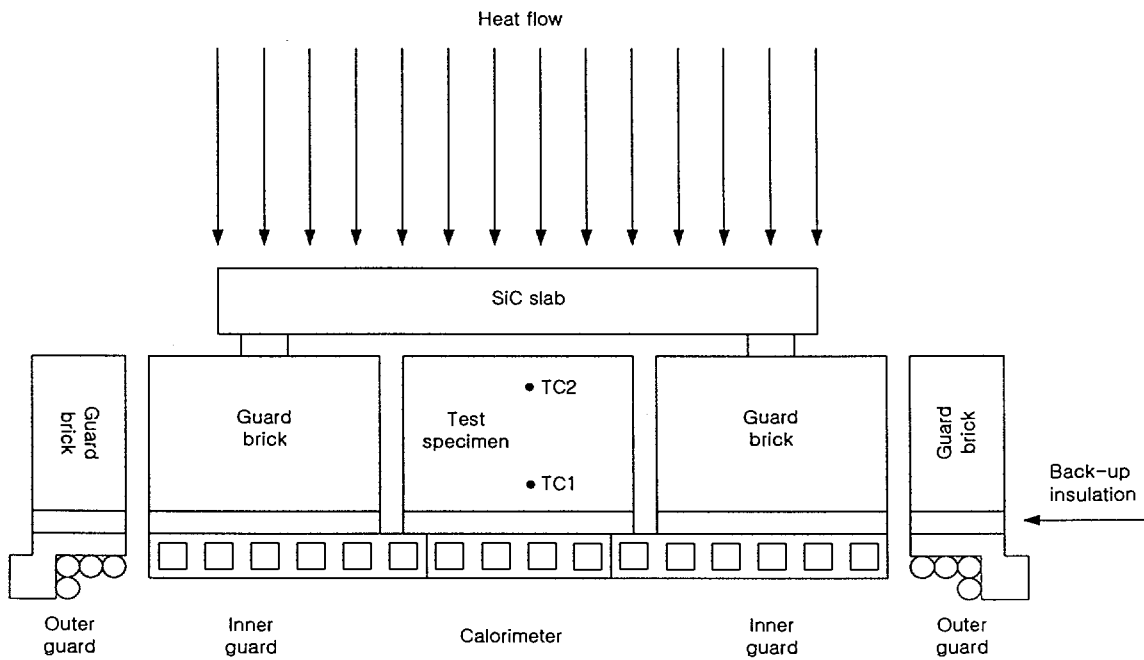
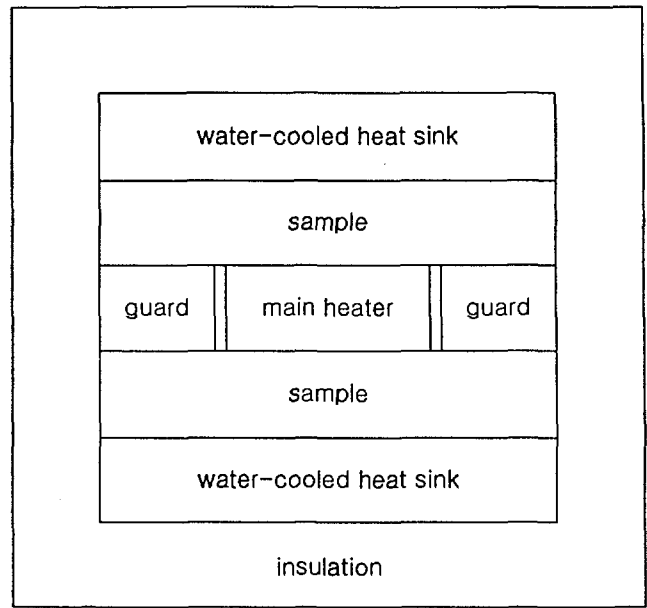
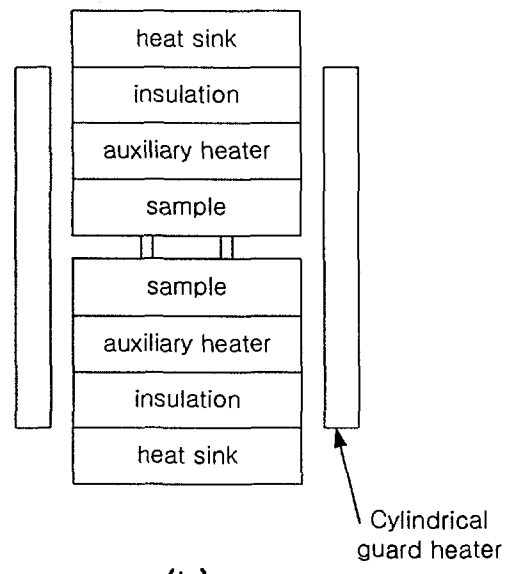


Fig. 4 Schematic diagram of test section set up for measuring thermal conductivity by the calorimeter method.



(a)



(b)

Fig. 5 Schematic diagram of guarded hot plate apparatus for measurements at room temperature and below (a) and at higher temperatures (b).

## 나. Transient Method의 측정원리

### 1) Flash Method

Flash 방법은 transient한 방법으로 시편의 온도를 단시간에 측정하여 열확산도 (thermal diffusivity)를 측정하는 방법이다. 이 방법은 원래 금속과 같이 불투명하고 균질한(homogeneous) 재료의 열확산도를 측정하기 위하여 개발되었으나 내화재료나 복합재료와 같은 다른 재료의 열확산도 측정 시에도 널리 응용되고 있다. 처음에 일정한 온도하에 있고 작고 얇은 원판형의 시편에 thermal pulse를 단시간 동안, 높은 intensity로 가하여 흡수시킨다. 흡수된 열은 시편을 통하여 확산하게 되어 시편 뒷면의 온도를 signal conditioner, 그리고 data aquisition system을 이용하여 측정한다. 열확산도를 구하는 식은 다음과 같이 유도할 수 있다. 즉 열전달을 표시하는 기본식 2로부터 비정상상태인 경우 그리고 1차원 및 내부의 열발생이 없을 경우 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad 0 < x < L, t > 0 \quad 36$$

$t=0$ 의 초기조건과  $x=0, x=L$ 의 경계조건은 다음과 같다.

초기조건

$$T = T(x,0) \quad t = 0, 0 < x < L$$

경계조건 (단열조건)

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad x = 0, t > 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad x = L, t > 0$$

위의 초기조건과 경계조건을 대입하여  $x=L$ 에서의 온도는 다음과 같이 구할 수 있다.

시료뒷면(x=L)에서의 온도분포

$$T(L, t) = \frac{Q}{\rho C_p L} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n e^{\left( \frac{-n^2 \pi^2 \alpha t}{L^2} \right)} \right] \quad 37$$

$$T_{L, \max} = \frac{Q}{\rho C_p L} \quad 38$$

$$T' = \frac{T(L, t)}{T_{L, \max}} = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n e^{\left( \frac{-n^2 \pi^2 \alpha t}{L^2} \right)} \quad 39$$

여기서  $t_{1/2}$  : 시편뒷면의 온도가 최대치의 반( $T'=0.5$ )이 되는데 걸리는 시간이다.

시편 이면의 온도가 최대온도의 1/2, 즉  $T' = 0.5$ 를 식 39에 대입하면 다음과 같이 된다.

$$\pi^2 \alpha t_{1/2} / L^2 = 1.38 \quad 40$$

$$\alpha = 1.38 L^2 / \pi^2 t_{1/2} \quad 41$$

여기서  $L$  : 시편의 두께(m),

$t_{1/2}$  : 시편 뒷면의 온도가 최대치( $T_m - T_0$ )의 1/2에 도달하는 시간(sec)

따라서  $t_{1/2}$ 를 측정하면 식 41에서 열확산도를 구할 수 있다. 식 41에서 구한 열확산도와 밀도 및 비열을 이용하여 열전도도를 다음식에서 구할 수 있다.

$$k = \rho C_p \alpha \quad 42$$

여기서  $k$ 는 열전도도(W/mK),  $\rho$ 는 밀도(kg/m<sup>3</sup>),  $C_p$ 는 시편의 열용량(kJ/kgK)을 나타낸다.

보통 thermal pulse는 laser를 사용하지만 flash source로서 flash ramp나 electron

beam도 가능하다. 대부분 7~70J/pulse의 flash energy가 사용되며 flash duration는  $t_{1/2}$ 보다 작거나 finite pulse time에 대한 보정을 해주어야 한다. 일반적으로 시편두께는  $t_{1/2}$  값이 0.04~0.2초 범위에서 측정될 수 있도록 조절되어야 하며 furnace/control system은 시편의 온도를 10초 동안  $\pm 0.1K$  이내로 일정하게 유지해야 한다.  $(T_m - T_0)$  값은 3~5K 정도면 충분하며 온도측정장비는 0.05K 이내의 온도차이를 분석할 수 있어야 한다. Flash 방법은 측정시간이 매우 짧기 때문에 detector와 amplifier의 반응시간이  $t_{1/2}$ 보다 충분히 작아야 한다.

## 2) Dynamic Radial Heat Flow Method

이 방법은 주로 cylinder 형태의 시편을 외부의 열원을 통하여 일정한 속도로 가열, 냉각하면서 열확산도를 측정하는 transient method이다. system의 구성은 steady state의 radial heat flow 장치와 비슷하게 원주형시편을 사용하지만 시편중앙의 열원이 없이 외부의 열원으로부터 시편 안쪽으로 열전달이 생기도록 고안되었으며 일정한 속도로 가열, 냉각하면서 시편 내의 온도구배를 data aquisition system에 연결된 두 개의 열전대로 측정한다.

길이가 1, 직경이 d이며  $1/d > 2$ 의 조건을 만족하는 원주형 시편에서 열확산도에 관한 방정식은 아래와 같다.

$$\alpha = R^2(dT/dt)/\Gamma\Delta T \quad 43$$

여기서  $\alpha$ 는 열확산도( $m^2/s$ )이며,  $\Delta T$ 는 시편 내의 온도구배(K), R은  $\Delta T$ 가 측정되는 거리(meter),  $dT/dt$ 는 가열(또는 냉각) 속도(K/s)이며,  $\Gamma$ 는 무한길이의 원주형시편인 경우에 4, 구의 경우에 6, 무한길이의 판재인 경우 3의 값을 갖는다.

## 3) Hot Wire Method

Hot wire 방법은 두 개의 홈이 파인 벽돌 모양의 시편에 얇은 선을 끼워넣고 여기에 일정한 전류의 전기에너지를 가하는 방법이다. 발생되는 열이 시편의 열전도도에 따라 열전도속도가 다름에 기초하여 시간에 따른 hot wire의 온도변화로부터 열전도도를 측정하는 transient, intermittent isothermal method이다. 부도체인 경우에는 전도체보다 열전도속도가 느리게되며 따라서 일정한 power input의 경우, 전도성 재료가 부도체 보다 hot wire 자체를 더 빨리 가열시키게 된다. wire를 가열시킬 때 시간에 따른 가열특성은 그림1.9에서와 같이 이론적 특성과 달게 나타난다.

이 방법을 이용하여 열전도도를 계산할 수 있는 이론식은 일정한 온도의 infinite



solid내에 일정한 electric power가 흐르는 line source로 표현되는 model에 기초를 한다. 이러한 조건에서의 열전도도 관계식은

$$K = \frac{W_s \ln(t_2/t_1)}{4\pi L R_s (T_2 - T_1)} \quad 44$$

여기서  $V$ 는 hot wire에서의 전압강하,  $V_s$ 는 기준저항( $R_s$ )에서의 전압강하,  $L$ 은 시편의 길이이다.

## 4. 모의 DUPIC 핵연료의 열확산도 측정

### 가. 실험재료

열전도도는 열확산도, 비열 그리고 밀도를 이용하여 구할 수 있다. 열확산도 측정에 사용된 모의 DUPIC 핵연료는 모의 사용후 핵연료를 산화환원시켜 제조한다. 즉 모의 사용후 핵연료를 산화온도 400℃, 환원온도 600℃에서 3회의 OREOX를 수행하였다. OREOX 공정을 거친 분말은 attrition 밀링을 수행하였다. attrition 밀링은 150 rpm의 arm 회전속도로 약 15분간 분쇄하였으며, 5회 반복하였다. 밀링된 분말은 입자의 크기가 너무 작기 때문에 분말의 유동성 및 충전율을 높이기 위하여 조립화를 시켰다. 다이벽면과 성형체 간의 마찰을 막기 위해 Zn stearate를 벤젠에 녹여 벽면에 도포한 상태로 성형하였다. 1.3~1.65 ton/cm<sup>2</sup>의 압력으로 성형하였으며, 1800℃, H<sub>2</sub>(100%) 분위기에서 약 12시간 소결하여 제조하였다. 모의 DUPIC 핵연료의 밀도는 상온에서 10.16 g/cm<sup>3</sup>(이론밀도의 94.2 %)이었으며 두께 1 mm, 직경 10 mm의 disk 형태로 시편을 가공하여 이용하였다.

### 나. 실험장치 및 방법

열확산도 측정장치는 크게 시편에 열을 가하는 광원부, 시편을 장착하고 시편의 온도를 높이는 진공챔버 그리고 시편 뒷면의 온도를 측정하고 데이터를 기록하는 부분으로 나눌 수 있다. 시편의 가열원으로 사용되는 펄스레이저는 Nd:Yag 레이저이며 이는 레이저 헤드, 레이저펄스폭 조절장치, 레이저출력 조절장치 그리고 전원공급기로 구성되어 있다. 레이저 헤드는 광로의 정렬을 위해 사용되는 He-Ne 레이저와 시편의 가열원으로 사용되는 Nd:Yag 레이저가 내장되어 있다. 레이저의 사양은 다음과 같다.

- Flash Lamp : Xenon
- Lasing Media : Nd:Yag
- Wavelength : 1.06μm
- Energy Range : 8~19Joules
- Collant : Deionized Water
- Pulse Width Range : 0.1~0.6 ms
- Cooling Method : Internal Mainframe Water - to - Air Exchange

대류에 의한 열손실 및 대기중의 산소에 의한 산화를 방지하기 위하여 10<sup>-3</sup> Torr의

진공분위기에서 측정하였으며, 진공조는 두께 16mm인 스테인리스 스틸로 외경이 1300mm, 높이가 530mm이고, 외부에 냉각수를 순환시켜 과열을 방지하도록 되어 있다. 시편지지부는 원형의 Graphite의 중심부에  $\phi 9$  mm의 구멍을 내고  $\phi 11$  mm의 홈을 파서 턱을 만들어  $\phi 10$  mm의 크기로 가공된 시료가 설치되도록 만들었다. 시편이면의 온도를 측정하기 위하여 Electro- Optical System사의 InSb photodiode type의 비접촉 적외선 방사온도계를 이용하였다. 측정온도범위는 상온에서 1350 °C까지 50 °C 간격으로 측정하였다. 모의 DUPIC 핵연료의 온도변화에 따른 밀도의 변화는  $UO_2$ 의 열팽창계수( $10 \times 10^{-6} K^{-1}$ )를 이용하여 계산하였다. 즉

$$\frac{\Delta L}{L} = \alpha_T \Delta T \quad 45$$

$$\frac{L_2 - L_1}{L_1} = \alpha_T \Delta T \quad 46$$

$$\frac{L_2}{L_1} = (1 + \alpha_T \Delta T) \quad 47$$

$$L_2 = L_1(1 + \alpha_T \Delta T) \quad 48$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{\frac{m}{L_2^3}}{\frac{m}{L_1^3}} = \frac{L_1^3}{L_2^3} \quad 49$$

$$\rho_2 = \rho_1 \frac{L_1^3}{L_1^3(1 + \alpha_T \Delta T)^3} = \frac{\rho_1}{(1 + \alpha_T \Delta T)^3} \quad 50$$

온도에 따른 밀도변화와 비열 및 열확산도를 이용하여 계산한 열전도도는 이론밀도의 95%에 해당하는 밀도의 열전도도로 다음식을 이용하여 환산하였다.

$$k = k_{TD}(1 - \beta P) \quad 52$$

여기서  $k$ 는 열전도도,  $k_{TD}$ 는 이론밀도 100%의 열전도도,  $P$ 는 기공도,  $\beta = 2.58 - 0.58 \times 10^{-3}T$  를 나타낸다.

#### 다. 실험결과

표 1은 Laser Flash Method를 이용하여 측정된 모의 DUPIC 핵연료의 열확산도와 Lucuta에 의해 측정된  $UO_2$  및 모의 사용후 핵연료의 열확산도를 나타낸 것이다. 그림 6은  $UO_2$ 의 열팽창을  $10 \times 10^{-6} K^{-1}$ 을 이용하여 계산한 모의 DUPIC 핵연료의 온도에 따른 밀도 변화를 나타낸 것이다. 상온에서 밀도는  $10.16 g/cm^3$  였으며 온도가 상승함에 따라 선형적으로 감소하여  $1350^\circ C$  에서는  $9.764 g/cm^3$ 으로 나타났다.

그림 7은 온도에 따른 열확산도를 나타낸 것이다.  $UO_2$ , 모의 사용후 핵연료, 모의 DUPIC 핵연료 순으로 낮게 나타났다. 모의 사용후 핵연료의 열확산도는 상온에서  $1.857 m^2/s$  로 나타났으며 온도가 상승함에 따라 감소하여  $1350^\circ C$ 에서는  $0.5257 m^2/s$ 로 나타났다. 저온의 온도범위에서는 차이가 많이 나타났으나 온도가 올라갈수록 차이가 줄어드는 것으로 나타났다.

그림 8은  $UO_2$ 의 밀도 모의 사용후 핵연료의 비열 및 모의 DUPIC 핵연료의 열확산도를 이용하여 계산한 열전도도와  $UO_2$  및 Frapcon III를 이용하여 계산한 열전도도를 나타냈다. 모의 DUPIC 핵연료의 열전도도는 상온에서  $5.6 W/mK$ 에서  $1350^\circ C$ 에서  $1.868 W/mK$ 로 줄어드는 것으로 나타났다. 또한 모의 DUPIC 핵연료의 열전도도가 모의 사용후 핵연료의 열전도도 보다 낮게 나타났으며 상온에서는 그 차이가 크게 나타났으나 온도가 올라갈수록 차이가 줄어드는 것으로 나타났다. Frapcon III를 이용하여 계산한 값과 비교하면 저온의 영역에서는 모의 DUPIC 핵연료의 열전도도가 계산값보다 높게 나타났으나 고온의 영역에서는 낮게 나타났다.

Table 1. Thermal diffusivity of simulated DUPIC fuel

Temp. (K)	Thermal Diffusivity(cm <sup>2</sup> /s)			
	Simulated DUPIC fuel	UO <sub>2</sub>	3 at% BU SIMFUEL	8 at% BU SIMFUEL
300		0.0324	0.0226	0.0172
373	0.01857			
423	0.01715			
473	0.01594	0.0232	0.0175	0.0138
523	0.01488			
573	0.01392			
623	0.01201			
673	0.01280	0.0172	0.0138	0.0117
723	0.01187			
773	0.01127			
823	0.01083			
873	0.01011	0.0141	0.0118	0.0100
923	0.01002			
973	0.009356			
1023	0.008618			
1073	0.008414	0.0112	0.0098	0.0088
1123	0.00834			
1173	0.008012			
1223	0.007752			
1273	0.007299	0.0094	0.0086	0.0078
1323	0.007158			
1373	0.006756			
1423	0.006459			
1473	0.006131	0.0084	0.0075	0.0069
1523	0.005836			
1573	0.005451			
1623	0.005257			
1673		0.0072	0.0067	0.0062
1773		0.0067	0.0064	0.0059

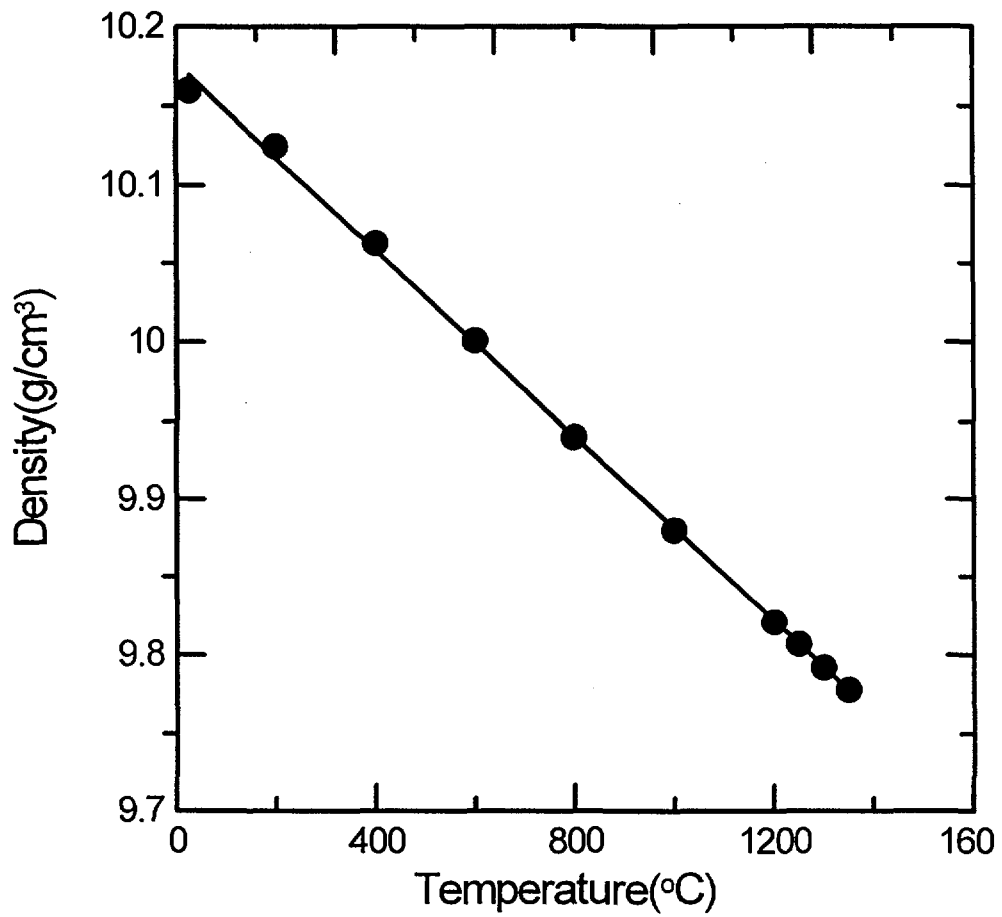


Fig. 6. Variation of Specific heat of simulated DUPIC fuel according to temperature

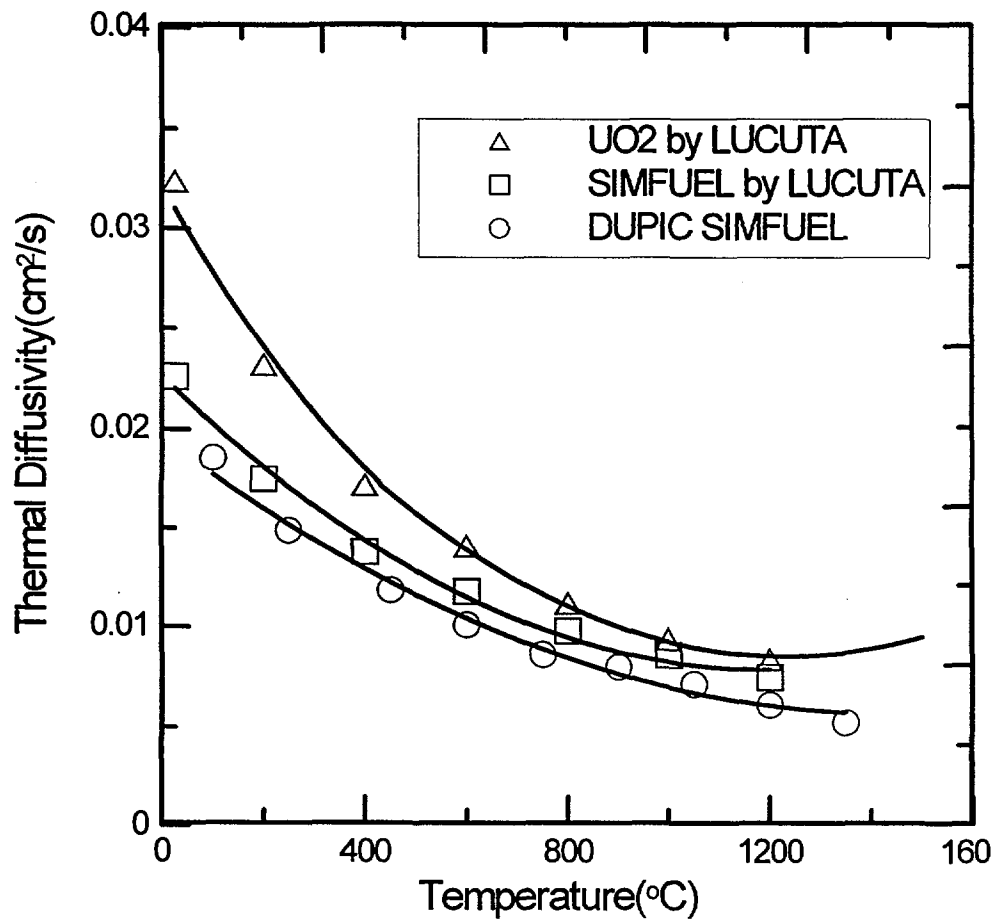


Fig. 7. Variation of thermal diffusivity of simulated DUPIC fuel according to temperature

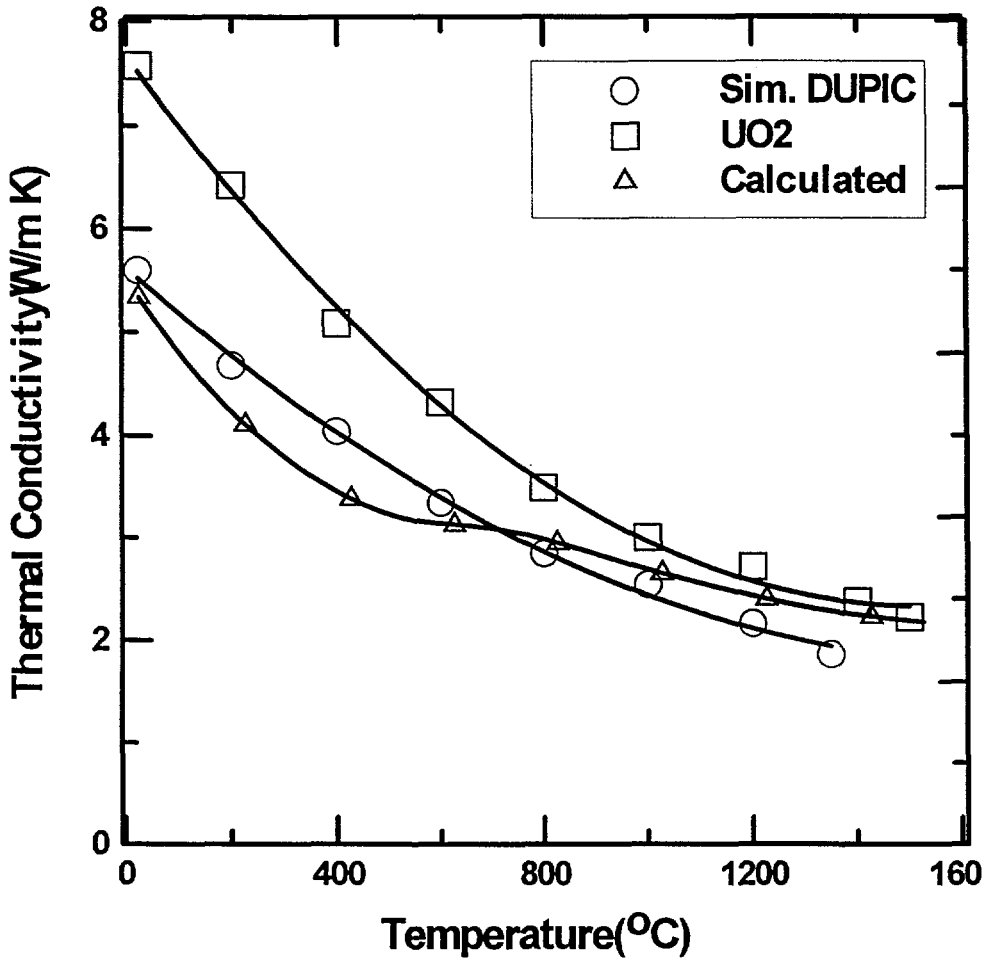


Fig. 8. Variation of thermal conductivity of simulated DUPIC fuel according to temperature



## 5. 결 론

열확산도는 섬광법(Laser Flash Method)을 이용하여 1350 °C까지 50 °C 간격으로 측정하였다. 열확산도 측정에 사용된 모의 DUPIC 핵연료의 밀도는 상온에서 10.16 g/cm<sup>3</sup>(이론밀도의 94.2 %)이었으며 두께 1 mm, 직경 10 mm로 시편을 가공하여 이용하였다. 상온에서 0.01857 cm<sup>2</sup>/s에서부터 온도가 증가함에 따라 감소하여 1350 °C에서는 0.00523 cm<sup>2</sup>/s를 나타냈다. 모의 DUPIC 핵연료의 열확산도가 UO<sub>2</sub>나 SIMFUEL에 비해 적게 나타났으며 상온에서는 그 차이가 크게 나타났으나 온도가 상승함에 따라 그 차이가 줄어드는 것으로 나타났다.

## 참 고 문 헌

1. Yang M.S., B.G.Kim, K.W.Song, K.K.Bae, S.S.Kim, W.K.Kim, I.H.Jung and H.S.Park, "Characteristics of DUPIC Fuel Fabrication Technology, International symposium on nuclear fuel cycle and reactor strategies: Adjusting to new realities, June 2 - 6, 1997, Vienna, Austria
2. Park H.S., "The DUPIC Fuel Cycle Alternative: Status & Perspective" Proceedings of the 10th PBNC, 1996, Kobe, Japan.
3. Lee J.S., H.S.Park, R.D.Gadsby, J.Sullivan, "Burn spent PWR fuel again in CANDU reactors by DUPIC", Global '95 Conference, Sept 11-14, 1995, Versailles.
4. Lee J.S, M.S.Yang, H.S.Park, P.Boczar, J.Sullivan, R.D.Gadsby, "The DUPIC alternative for backend fuel cycle", International symposium on nuclear fuel cycle and reactor strategies: Adjusting to new realities, June 2 - 6, 1997, Vienna, Austria
5. T. Muromura, T. Adachi, H. Takeishi, Z. Yoshida, T. Yamamoto and K. Ueno, J. Nucl. Mater., 151(1988) 318-326.
6. T. Adachi, T. Muromura, H. Takeishi and T. Yamamoto, J. Nucl. Mater., 160(1988) 81-87.
7. P.G. Lucuta, B.J.Palmer, H.J. Matzke and D.S. Hartwig, "Preparation and characterization of SIMFUEL; Simulated CANDU high-burnup nuclear fuel", Proc. Second Int. Conf. CANDU Fuel, Ed. I.J. Hasting, CNS, Toronto (1989), also AECL-10117(1989).
8. K. Une and M. Oguma, J. Nucl. Sci. Technol., 20(1983) 844.
9. H. Kleykamp, J. Nucl. Mater. 167 (1985) 49.
10. J.O. Paschoal, H. Kleykamp and F. Thummler, Z. Metallk. 74(1983) 652.
11. K. Naito, T. Tsuji, T. Matsui and A. Date, J. Nucl. Mater. 154 (1988) 3.
12. M. Ugajin, T. Shiratori and K. Shiba, J. Nucl. Mater. 84 (1979) 26.
13. M. Ugajin and K. Shiba, J. Nucl. Mater. 91 (1980) 227.
14. M. Ugajin and K. Shiba, J. Nucl. Mater. 105 (1982) 211.
15. R.A. Verrall, I.J. Hastings, P.G. Lucuta, H.J. Matzke and B.J. Palmer, "Preparation and applications of simulated high-burnup fuel", Proc.

- 11th Annual Conf. of the CNA, Toronto, June 3-8 1990, also AECL-10217(1990).
16. P.G. Lucuta, B.J. Palmer, Hi Marzke and D.S. Hartwig, "Preparation and characterization of SIMFUEL; Simulated CANDU higg-burnup nuclear fuel", Proc. Second Int. Conf. CANDU Fuel, Ed. I.J. Hastings, CNS, Toronto (1989), also AECL-10117(1989).
  17. P.G. Lucuta, R.A. Verrall, Hj. Matzke and B.J. Palmer, J. Nucl. Mater., 178(1991) 48.
  18. T. Ogawa, R.A. Verrall, M.D. Schreiter and M.O. Westcott, "Dose effect on release of ion-implanted noble gases from oxide fuel", Proc. of Int. Conference on CANDU Fuel, Chalk River, 1986 Oct. 6-8, CNS, Ed. I.J. Hastings, 543-557.
  19. R.A. Verrall, Hj. Matzke, T. Ogawa and B.J. Palmer, "Iodine release and bubble formation in oxide fuels", Proc. of Int. Conference on CANDU Fuel, Chalk River, 1986 Oct. 6-8, CNS, Ed. I.J. Hastings, 558-572.
  20. Hj. Matzke, I.L.F. Ray and R.A. Verrall, "Diffusion and begaviour of iodine and rubidium in  $UO_2$  and  $ThO_2$ ", IAEA, IWGFOT/27(1987) 183-196.
  21. P.G. Lucuta, R.A. Verrall, Hj. Matzke and I.J. Hastings, "Theraml conductivity and gas realease from SIMFUEL", Fission gas release and fuel rod chemistry related to extended burnup, Proc. of a Committee Mtg., Pembroke, Ontario, Canada, 28 May-1 May 1992, also IAEA-TECDOC-697 (Apr. 1993).
  22. P.G. Lucuta, Hj. Matzke and R.A. Verrall, J. Nucl. Mater., 223(1995) 51.
  23. J. Cobos, D. Papaioannou, J. Spino, M. Coquerlle, J. Alloys and Compounds 271(1998) 610

서 지 정 보 양 식					
수행기관 보고서번호	위탁기관 보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드		
KAERI/TR-1480/2000					
제목 / 부제					
모의 DUPIC 핵연료의 열확산도					
연구책임자 및 부서명		강권호 (DUPIC핵연료기술개발팀)			
연구자 및 부서명		양명승, 배기광, 문제선, 정인하, 송기찬, 박희성, 이철용, 김동주, 김형수(DUPIC핵연료기술개발팀)			
발행지	대전	발행기관	한국원자력연구소	발행일	2000.6.
페이지	p. 50	도표	유(O), 무( )	크기	
참고사항					
비밀여부	공개(O), 대외비( ), ___급비밀		보고서 종류	기술 보고서	
연구위탁기관			계약번호		
초록					
<p>열확산도는 섬광법(Laser Flash Method)을 이용하여 1350 ℃까지 50 ℃ 간격으로 측정하였다. 열확산도 측정에 사용된 모의 DUPIC 핵연료의 밀도는 상온에서 10.16 g/cm<sup>3</sup>(이론밀도의 94.2 %)이었으며 두께 1 mm, 직경 10 mm로 시편을 가공하여 이용하였다. 상온에서 0.01857 cm<sup>2</sup>/s에서부터 온도가 증가함에 따라 감소하여 1350 ℃에서는 0.00523 cm<sup>2</sup>/s를 나타냈다. 모의 DUPIC 핵연료의 열확산도가 UO<sub>2</sub>나 SIMFUEL에 비해 적게 나타났으며 상온에서는 그 차이가 크게 나타났으나 온도가 상승함에 따라 그 차이가 줄어드는 것으로 나타났다.</p>					
주제명					
모의 DUPIC핵연료, 열확산도, 열전도도					

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.	Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	INIS Subject No.	
KAERI/TR-1480/2000					
Title/Subtitle	Thermal Diffusivity of Simualated DUPIC Fuel				
Project Manager and Dept.	KweonHo Kang(DUPIC Fuel irradiation Test and Performance Evaluation)				
Researcher and Dept.	M.S. Yang, K.K. Bae, J.S. Moon, I.H. Jung, K.C. Song, H.S. Park, C.Y. Lee, D.J. Kim, H.S. Kim(DUPIC)				
Pub. Place	Taejeon	Pub. Org.	KAERI	Pub. Date	Jan. 2000
Page	p. 30	Fig. and Tab.	Yes(O), No( )	Size	
Note					
Classified	Open(O), Outside( ), __Class		Report Type	Technical Report	
Sponsoring Org.			Contract No.		
Abstract	<p>Thermal diffusivity of simulated DUPIC fuel was measured using Laser Flash Method in the temperature range from room temperature to 1350°C. Density of simulated DUPIC fuel used in the measurement of thermal diffusivity was 10.16 g/cm<sup>3</sup>(94.2% of theoretical density) at room temperature and diameter and thickness were 10 mm and 1 mm, respectively. Thermal diffusivity decreased from 0.01857 cm<sup>2</sup>/s at room temperature to 0.00523 cm<sup>2</sup>/s at 1350°C. Thermal diffusivity of simulated DUPIC fuel was lower than those of UO<sub>2</sub> and simulated spent fuel. The difference of thermal diffusivity between simulated DUPIC fuel and UO<sub>2</sub> and simulated spent fuel was high and it decreased due to temperature increase.</p>				
Subject Key Words	simulated DUPIC Fuel, thermal diffusivity, thermal condutivity				