

## NPE법을 이용한 절연재료의 유효열확산계수의 과도측정에 관한 연구

### A Study on the Transient Measurement of the Effective Thermal Diffusivity of Insulation Materials by NPE Method

임 동 주\*    배 신 철\*\*  
Dong Joo Lim,    Sin Chul Bae

#### ABSTRACT

The objective of this study is to present an efficient measurement method of the effective thermal diffusivity for the fibrous insulation material. The non-linear parameter estimation (NPE) method is adapted for this analysis because of its accuracy and its results are compared with those by other direct methods such as CTP, CHP and STD method. A experimental system is constructed with bell-jar vacuum chamber, diffusion pump, tube type furnace, control unit and data acquisition system included with A/D converter and IBM XT/AT personal computer.

The typical results obtained from this study are as follows;

- 1) NPE method can be recommended as an useful and accurate method to measure the effective thermal diffusivity of insulation material because it is shown that the measurement error compared with those by other direct methods is reduced for standard material, NBS-1450b.
- 2) NPE method can minimize the effects of ill-measured temperature due to external disturbance, because the final value is found by point to point estimating.
- 3) NPE method dose not depend on the kinds of heat flux, since the surfac temperature are used to estimate the thermal diffusivity.
- 4) With NPE method, compared with the steady state method, a measuring time and a sample size could be reduced.

#### 기 호 설 명

$F_0$  : 부하원 변수

$f(x)$  : 초기함수

$H$  : 열유속(W)

$H_0$  : 전면열유속(W)

$k$  : 열전도계수(W/m<sup>2</sup>°C)

$L_1$  : 좌측 시편의 두께(m)

$L_2$  : 우측 시편의 두께(m)

$l$  : 시편의 두께(m)

$q$  : 열량(W)

$S$  : 최소화 시키기 위한 함수

$T$  : 온도(°C)

\* 정회원, 단국대학교 대학원

\*\* 정회원, 단국대학교 기계공학과

- $T_i$  : 초기온도(°C)  
 $T_0$  : 전면온도(°C)  
 $T_s$  : 감도 계수(sensitivity coefficient)  
 $t$  : 시간(sec)  
 $V_h$  : 무차원온도  
 $Y_s$  : s번째 측정온도(°C)  
 $\alpha$  : 열확산 계수(m<sup>2</sup>/sec)  
 $\epsilon$  : 미소량  
 $\rho$  : 밀도(kg/m<sup>3</sup>)  
 $\phi_1(t)$  : 전면의 경계함수  
 $\phi_2(t)$  : 후면의 경계함수

## 1. 서 론

최근 산업의 발달과 더불어 신소재의 필요성을 절실하게 느끼고 있으며, 신소재의 개발에는 열물성치의 연구가 필수 불가결한 것이다. 특히 열전달분야에 이용되는 재료의 열적 성질은 열확산계수 비열 및 열전도계수 등 여러가지가 있으나, 이 가운데 온도변화에 따른 재료내의 열의 확산속도와 관련되는 성질이 열확산계수이다. 이 열확산계수는 열전달분야에 이용되는 재료에 있어서 대단히 중요한 열적 성질이므로 정확한 측정이 요구된다.

재료의 열확산계수를 측정하는 방법은 크게 나누면 과도측정법(Tarnsient measurement method)과 정상상태법(Steady-state method)으로 대별할 수 있다. 미국재료시험학회(ASTM)에서는 1976년에 정상상태법의 일종인 평판직접법(Guarded hot plate technique)을 섬유질 절연재료의 열전도계수 측정법으로 채택하였고(ASTM C-177), 우리나라에서도 보온재의 열전도계수 측정법으로서 정상상태법의 일종인 평판비교법(KS F 2264)과 평판직접법(KS F 2265)을 국가 표준 측정법으로 채택하고 있다. 그러나 정상상태법은 측정시간이 길고 시편의 크기가 커야하므로 측정이 시간적으로나 경제적으로 불리한 점이 많으나 열전도계수를 직접 측정할 수 있는 장점이 있다. 과도측정법은 정상상태법의 단점을 보완할 수 있고, 오차도 줄일 수 있어서 최근 발표되는 자료의 약 75%가 이 방법을 이용

한 것이다.<sup>1)</sup>

과도측정법으로 열물성치를 측정하는 방법은 시편에 열을 방사하는 방법에 따라 3가지로 분류하고 있다. 즉, 주기열유법(periodic heating method), 연속가열법(continuous heating method) 및 섬광법(pulse method) 등이다. 주기열유법은 액체나 고체에 공히 사용할 수 있는 방법이며, 이것은 시편표면을 교류적으로 가열하며, 가열파형은 주기함수가 된다. 연속가열법은 열편법(hot strip method)과 열선법(hot wire method)이 있다. 열편법은 측정하고자 하는 재료에 얇은 금속 조각을 박아놓고 과도열원을 가하여 금속편을 통한 과도전압을 측정함으로써 열확산계수를 측정하는 방법이다. 이 방법을 절연재료에 대한 측정에 이용할 경우는 측정온도범위가 작고, 금속편에 집중된 전력에 의한 열손실이 오차를 유발한다는 단점이 있다.<sup>2)</sup> 열선법은 시편내에 선형열원을 공급하는 열선을 삽입하여 측정하는 방법으로서, 다공성 절연재료의 이 방법을 채택할 경우에 대한 문제점은 Fine<sup>3)</sup>이 규명하였다. 그 결과에 의하면 확산근사법으로 구한 온도구배가 엄밀해와는 상당한 차이가 있으며, 이는 열선표면에서의 열손실을 고려하지 않았기 때문이다. 그러나 Hayashi<sup>4)</sup>는 균일한 재료인 경우 1,200°C까지 잘 맞다고 하였다. 섬광법은 Parker 등<sup>5-6)</sup>이 개발한 방법이다. 이 방법은 시편전면에 순간적인 펄스열원을 균일하게 방사할 경우에 뒷면의 온도 상승 이력을 측정하여 열확산계수를 찾아내는 방법이다. 이 방법은 여러가지 측면에서 유리한 조건들이 있다. 즉, 장치가 간단하고, 측정시간이 짧으며, 시편의 크기가 작고, 측정가능한 온도범위가 넓다. 그러나 절연재료와 같은 다공성 재질은 섬광법이 적당하지 않다. 왜냐하면 측정재료 전면에서 직접 복사열을 방사하는 경우 낮은 열확산성 때문에 재료의 표면이 매우 높은 온도로 상승하여 재료가 손상될 염려가 있을 뿐만 아니라 열을 받는 면의 다공성 때문에 표면의 유효온도 측정이 곤란하고, 열유속의 균일성 등의 가정이 어렵게 된다.

본 연구에서는 실험 데이터의 효과적 사용과 물리적 현상을 모델화하는데 유용한 매개변수추정(NPE: Nonlinear Parameter Estimation)법을 사용하고자 한다. 매개변수 추정은 역산문제(Inverse problem)로서 취급될 수가 있다. 역산문제는 시간에 따라 변화하는 온도를 표면과 내부에서 이산적인 측정(Discrete measurement)을 하여 물리적 중요성을 가지는 매개변수를 측정하는 방법이라고 할 수 있다.

Marquardt<sup>7)</sup>는 비선형 매개변수를 측정하기 위한 algorithm을 구배법(gradient method)과 Taylor 급수법의 장점을 이용해서 소위 Marquardt법 제안하였고, Hartely<sup>8)</sup>은 Gauss-newton법의 장점을 이용하여 비선형 매개변수 추정에 사용할 수 있도록 수정 Gauss-newton법을 발표하였다.

Stolz<sup>9)</sup>는 구에 대한 온도변화를 내부에서 과도측정하여 알고 있는 온도식에 적용하므로써 표면 열유속을 역으로 구하였고, Sparrow 등<sup>10)</sup>은 Stolz의 방법을 일반화하여 슬래브형과 실린더형의 시편에도 응용할 수 있도록 하였다. Beck<sup>11)</sup>은 접촉저항을 결정하기 위한 해석 방법과 최적실험장치의 설계를 위하여 이 추정법을 사용하였다.

본 연구의 목적은 정밀하고 신속하게 열확산계수를 측정할 수 있는 실험장치를 개발하며, 보다 정확한 열확산계수를 추정하기 위하여 비선형 매개변수 추정법을 사용한다. 또한 열확산계수의 추정이론을 정리하여 이 추정법에 적합한 알고리즘을 만들고, IBM 16비트급의 개인용 컴퓨터에 사용할 수 있도록 프로그램한다. 또한 온도조절 시간을 최소화 할 수 있는 열질량이 작은 튜브형 전기로를 제작하며, 이산측정되는 시간에 따른 온도 자료를 수집하고, 이를 주 프로그램의 입력자료로 활용되도록 하는 자료취득장치를 구성한다. 이 방법의 정확성을 증명하기 위하여 미국 NBS의 표준시편을 이용하여 측정된 값과 추천값을 비교한다. 또한 국내에서 생산되는 열확산계수를 측정하여 일정온도평판(CTP: Constant Temperature Plate)법, 일정열유(CHF: Con-

stant Heat Flux)법, 표면온도분포(STD: Surface Temperature Distribution)법에 의해 계산한 열확산계수값과 비교한다.

## 2. 이론해석

### 2.1 일정온도평판(CTP)법

Fig. 1과 같이 일정온도평판법에서는 반무한 슬래브를 수학적 모델로 택한다. 시편의 양표면온도는 일정온도를 지속하고 전면의 온도는 후면의 온도보다 높다고 가정하며, 일차원 열전도방정식과 경계조건, 초기조건을 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (0 < x < l, t > 0) \dots\dots (1)$$

$$T = T_0 \quad (x = 0, t > 0)$$

$$T = H_1 \quad (x = l, t > 0)$$

$$T = T_i \quad (0 \leq x \leq l, t = 0)$$

여기서  $\alpha$ 는 유효열확산계수이며 다음과 같이 정의 된다.

$$\alpha = \frac{K}{\rho C_p} \dots\dots\dots (2)$$

절연재료들은 다공성 재질이기 때문에 재료를 이루는 공극 사이에 공기가 포함되어 있다. 즉, 재료내부에 기공이 존재하거나 섬유소의 중첩으로 구성된 재료에서는 재료내부에서 일어나는 복사나 대류 등에 의한 열전달을 고려해야 하므로 이론해석이 매우 복잡하고 실제로 측정도 곤란하다. 그러므로 시편의 재질

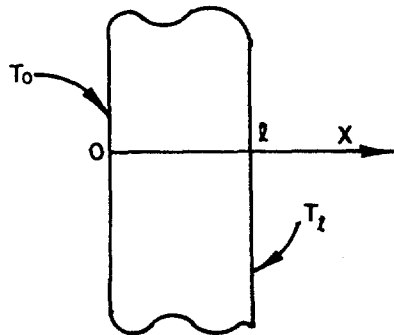


Fig. 1 Mathematical model of CTP and STD method

이 균일하다고 가정하는 유효열확산계수의 개념이 보다 더 효과적이다.

식 (1)은 변수분리법을 풀면 다음과 같은 온도분포식을 얻을 수 있다.

$$V = 1 - X - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(n\pi X) \exp(-n^2\pi^2 F_0) \dots\dots\dots (3)$$

여기서,  $V = \frac{T - T_i}{T_0 - T_i}$ ,  $X = \frac{x}{l}$ ,  $F_0 = \frac{\alpha t}{l^2}$  이다.

무차원온도  $V$ 는  $T$ ,  $T_i$ ,  $T_0$ 를 측정하므로써 알 수 있으며, 따라서 열확산계수값을 구할 수 있다.

**2.2 일정열유(CHT)법**

일정열유속법에서는 반무한 고체를 수학적 인 모델로 택하여 Fig.2와 같이 시편 전면에 일정한 강도를 가진 열을 방사시킨다.

이 경우 일차원 열전도 방정식과 경계조건 및 초기조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} &= \frac{1}{\alpha} \frac{\partial H}{\partial t} \quad (x > 0, t > 0) \dots\dots\dots (4) \\ H &= 0 \quad (x \geq 0, t = 0) \\ H &= H_0 \quad (x = 0, t > 0) \\ T &= T_i \quad (x \geq 0, t = 0) \end{aligned}$$

여기서,  $H$ 는 열유속이다.

이 방정식을 Laplace transform으로 풀면 다음과 같은 온도 분포식을 얻을 수 있다.

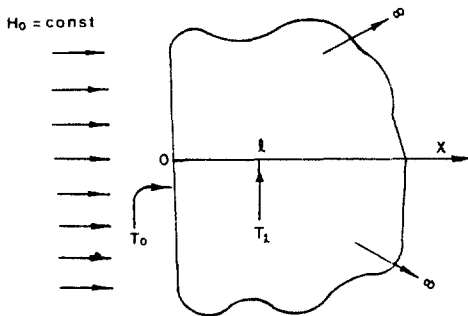


Fig.2 Mathematical model of CHF and NPE method

$$V_b = \frac{T(0, t) - T_i}{T(l, t) - T_i} = \frac{0.5642}{\text{ierfc}\left(\frac{l}{2\sqrt{\alpha t}}\right)} \dots\dots\dots (5)$$

여기에서 온도이력은 측정할 수 있으며 유효 열확산계수  $\alpha$ 값은 측정값과 두께를 대입하면 구할 수 있다.

**2.3 표면온도분포(STD)법**

표면온도 분포법도 Fig.1과 같은 반무한 슬래브를 수학적 모델로 택하였으며, 시편의 재질은 균일하고, 열유속은 일정하며, 열의 흐름은 1차원이라는 가정하에 열전도방정식과 초기조건, 경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \dots\dots\dots (6)$$

$$\begin{aligned} T &= \phi_1(t) \quad (x=0, t > 0) \\ T &= \phi_2(t) \quad (x=l, t > 0) \\ T &= f(x) \quad (l \geq x \geq 0, t=0) \end{aligned}$$

식 (6)를 경계조건이 제차일 때와 비제차일 때로 나누어 각각 해를 구한 후 중첩시켜 완전해를 구할 수 있으며, Duhamel 정리를 이용하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T(x, t) &= \left(1 - \frac{x}{l}\right) \phi_1(t) + \frac{x}{l} \phi_2(t) \\ &+ \frac{2}{l} \sum_1^n e^{-\alpha n^2 x^2 / l^2} \sin \frac{n\pi x}{l} \int_0^1 f(x') \sin \frac{n\pi x'}{l} dx' \\ &- \frac{2}{l} \sum_1^n \frac{1}{n\pi} \sin \frac{n\pi x}{l} \int_0^1 e^{-\alpha n^2 x'^2 / l^2} d\phi_1(\lambda) \\ &+ \frac{2}{l} \sum_1^n (-1)^n \frac{1}{n\pi} \sin \frac{n\pi x}{l} \int_0^1 e^{-\alpha n^2 x'^2 (t/\lambda) / l^2} d\phi_2(\lambda) \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

경계함수  $\phi_1(\lambda)$ ,  $\phi_2(\lambda)$  및 초기함수  $f(x')$ 를 다음과 같이 가정한다.

$$f(x') = A_1 + B_1 x \dots\dots\dots (8)$$

$$\phi_1(\lambda) = A_2 e^{B_2 \lambda} \dots\dots\dots (9)$$

$$\phi_2(\lambda) = A_3 e^{B_3 \lambda} \dots\dots\dots (10)$$

식 (8), (9), (10)를 식 (7)에 대입하고 적분하면

다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 T(x, t) = & \left( 1 - \frac{x}{l} \right) A_2 e^{B_2 t} + \frac{x}{l} A_3 e^{B_3 t} \\
 & + \frac{2}{l} \sum_1^n e^{-\alpha n^2 x^2 t / l^2} \frac{1}{n\pi} \sin \frac{n\pi x}{l} \\
 & \left\{ [A_1 - (-1)^n A_1 - (-1)^n B_1 l] \right. \\
 & + e^{-\alpha n^2 x^2 t / l^2} \left[ (-1)^n \frac{A_3 B_3}{\alpha n^2 \pi^2 t / l^2 + B_3} \right. \\
 & \left. \left. (e^{B_3 t} - e^{\alpha n^2 x^2 t / l^2}) \right) \right\} \\
 & - \frac{A_2 B_3}{\alpha n^2 \pi^2 t / l^2 + B_2} (e^{B_2 t} - e^{\alpha n^2 x^2 t / l^2}) \left. \right\} \quad (11)
 \end{aligned}$$

식 (11)에서  $A_1, B_1$ 은  $t=0$ 에서 시편의 온도 구배를 측정하여 얻은 값이고,  $A_2, B_2$ 와  $A_3, B_3$ 는 시편의 전면과 후면에서 온도를 측정하여 짐작한 함수의 상수값이며,  $t$ 는 측정시간,  $l$ 은 시편의 두께,  $x$ 는 시편내의 온도측정점의 위치이므로 열확산계수값을 구할 수 있다.

### 2.4 비선형 매개변수 추정(NPE)법

NPE법은 Fig.2와 같은 반무한 고체를 수학적 모델로 선택했다. 입력열원은 시간의 함수이며, 경계조건은  $X=0$ 에서 온도와 임의의  $X$ 방향의 우면의 위치  $X=l$ 에서의 온도이다. 초기조건은  $T(X, 0) = F_1$ 이다. 이 경우 열전도 방정식과 경계조건, 초기조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial T}{\partial X^2} &= \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (X > 0, t > 0) \quad \dots\dots (12) \\
 T &= F_0(t) \quad (X = 0, t > 0) \\
 T &= F_1(t) \quad (X = l, t > 0) \\
 T &= F_1(X) \quad (X \geq 0, t = 0)
 \end{aligned}$$

식 (12)에서 열확산계수인  $\alpha$  값을 찾기 위하여 최소화시키는 최소사승함수(Least square function)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 S(\alpha, X, t) = & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [Y_i^j(\alpha, X, t) \\
 & - T_i^j(\alpha, X, t)]^2 \quad \dots\dots (13)
 \end{aligned}$$

여기서  $n$ 은 열전대의 수이고,  $m$ 은 이산적

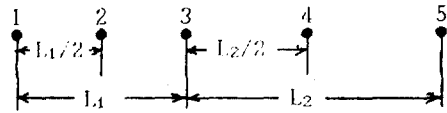


Fig.3 Location of nodes

인 측정횟수이고,  $Y_i^j(\alpha, X, t)$ 은  $i$ 번째 열전대에서  $j$ 번째 이산적인 측정온도의 값이며,  $T_i^j(\alpha, X, t)$ 은 식 (12)에 대해서 유한차분법을 사용해서 계산한 온도이다. 유한차분법에 의한 온도를 계산하기 위해 각 노드에 대한 위치를 Fig.3과 같이 표시한다.

중간 노드(노드 2와 노드 4)는 유한차분 근사해를 개선시키기 위한 것이다. 각 노드에 대해서 후진차분법에 의한 유한차분 근사해는 다음과 같이 된다.

노드 2 :

$$\begin{aligned}
 -T_1^j + \left( 2 + \frac{(L_1)^2/4}{\alpha \Delta t} \right) T_2^j - T_3^j = \\
 \frac{(L_1)^2/4}{\alpha \Delta t} T_2^{j-1} \quad \dots\dots (14)
 \end{aligned}$$

노드 3 :

$$\begin{aligned}
 -T_2^j + \left( 1 + L_1/L_2 + \frac{L_1(L_1+L_2)/8}{\alpha \Delta t} \right) T_3^j \\
 - T_4^j = \frac{L_1(L_1+L_2)/8}{\alpha \Delta t} T_3^{j-1} \quad \dots\dots (15)
 \end{aligned}$$

노드 4 :

$$\begin{aligned}
 -T_3^j + \left( 2 + \frac{(L_2)^2/4}{\alpha \Delta t} \right) T_4^j - T_5^j = \\
 \frac{(L_2)^2/4}{\alpha \Delta t} T_4^{j-1} \quad \dots\dots (16)
 \end{aligned}$$

식 (13)를 열확산계수( $\alpha$ )에 대해서 최소화 시킬 수 있는 방법중에서 가장 간단하고 많이 이용되는 방법은 Taylor 급수를 이용하는 방법이며 다음과 같다.

$$T_i^j(\alpha) = T_i^j(\alpha_1) + T_{\alpha i}^j(\Delta \alpha)_1 \quad \dots\dots (17)$$

만,

$$(\Delta \alpha)_1 = \alpha_{i+1} - \alpha_i \quad \dots\dots (18)$$

$$T_{\alpha,i}^j = \frac{\partial T_i^j}{\partial \alpha} \frac{T_i^j \alpha_i (1 + \epsilon) - T_i^j(\alpha_i)}{\epsilon \alpha_i} \quad (19)$$

여기서,  $T_{\alpha} = \partial T / \partial \alpha$ 는 감도계수이다.

식 (18)을  $\alpha$ 에 대해서 미분하고, 0으로 놓으면 다음과 같다.

$$\frac{\partial S(\alpha)}{\partial \alpha} = \sum \sum 2[T_i^j - Y_i^j](T_{\alpha,i}^j) = 0 \dots (20)$$

식 (17)를 식 (20)에 대입하여 정리하면  $(\Delta \alpha)_i$  값은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$(\Delta \alpha)_i = \frac{\sum \sum [Y_i^j + T_i^j(\alpha_i)] T_{\alpha,i}^j}{\sum \sum (T_{\alpha,i}^j)^2} \dots (21)$$

$\epsilon$ 은 미소량이고 보통 0.001 정도로 선택할 수 있다. 이 반복과정은  $(\Delta \alpha)_i / \alpha_i < C$ 이 될때 까지 계속하고  $C$ 는 0.001 이하로 선택한다. 처음 시간에 대하여 값을 구한 후 계속적으로 시간변화에 대해서 값을 추정하면 된다.

열확산계수를 추정하는 프로그램에 대한 흐름도는 Fig. 4와 같으며, 입력자료로는 경계조건과 초기조건을 시간의 함수로 이산적인 측

정을 한 온도와 시편의 두께, 열전대의 위치와 측정시간, 열전대의 수, 시간측정 시작점의 온도, 유한차분자료, 시간간격 등이 필요하다.

### 3. 실험장치 및 실험방법

#### 3.1 실험장치

일정은도평판법에서 사용한 실험장치는 Fig. 5와 같으며 알루미늄으로 성형된 이형내화물에 니크롬선을 깔아 그 위에 열판을 조립하였다. 열판은 A. C. 100V용 0.8kW 용량이며 최대 300℃까지 올릴 수 있도록 제작하였다. 열판의 온도조절은 온도조절장치로 조절할 수 있으며, 일정한 온도를 계속 유지시키기 위하여 비교적 두꺼운 알미늄 블럭을 올려놓았다. 알미늄판의 표면온도를 필요한 온도까지 짧은 시간내에 올릴 수 있도록 알미늄 블럭위에 단열재를 놓았으며, 이 경우 300℃까지 올리는 데 대략 20분 정도 소요된다.

일정열유법에서 사용한 실험장치는 Fig. 6과 같다. 로는 유리를 셀모양으로 성형시킨 이형내화물에 니크롬선을 삽입하고, 온도조절은 전압조절기로 할 수 있도록 하였다. 로는 A. C 15V 또는 D. C 70V, 30A 이내에서 사용할 수 있으며 용량은 4kW이고, 최대 500℃ 범위까지 사용할 수 있다. 로의 주위는 세라크올로 단열시켰으며, 한쪽 끝은 로속으로 열유속을 방사시키기 위하여 직경 100cm 두께 1.5cm인 석영유리를 부착시켰다.

표면온도분포법에 사용한 실험장치는 일정열유법에 사용한 실험장치와 동일하다.

NPE법에 사용한 실험장치는 진공벨자시스템으로 벨자내에 열질량이 작은 튜브형 전기로를 장착할 수 있도록 하였다. 벨자는 열원이 입사하는 쪽과 반대쪽에 quartz window ( $\phi=100\text{mm}$ )를 달아서 벨자속의 온도가 원하는 온도로 일정하게 유지되면 창을 통하여 열원을 공급할 수 있도록 하였다. 실험장치에 대한 개략도는 Fig. 7과 같다.

#### 3.1.1 전기로

열질량이 작은 튜브형 전기로는 0.03 mm인 스테인레스포일을 이용하여 내경 64mm,

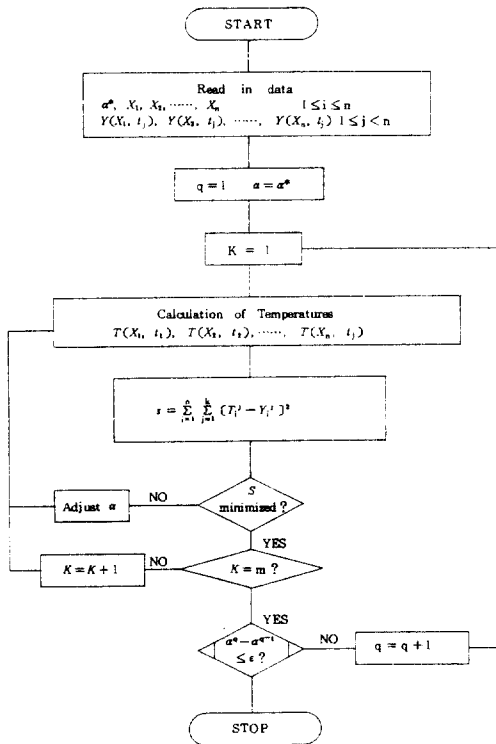


Fig. 4 Flow chart of NPE method

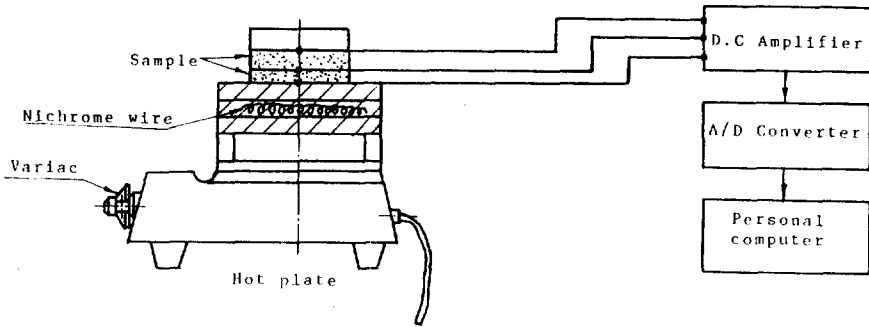


Fig.5 Schematic diagram of experimental apparatus for CTP method

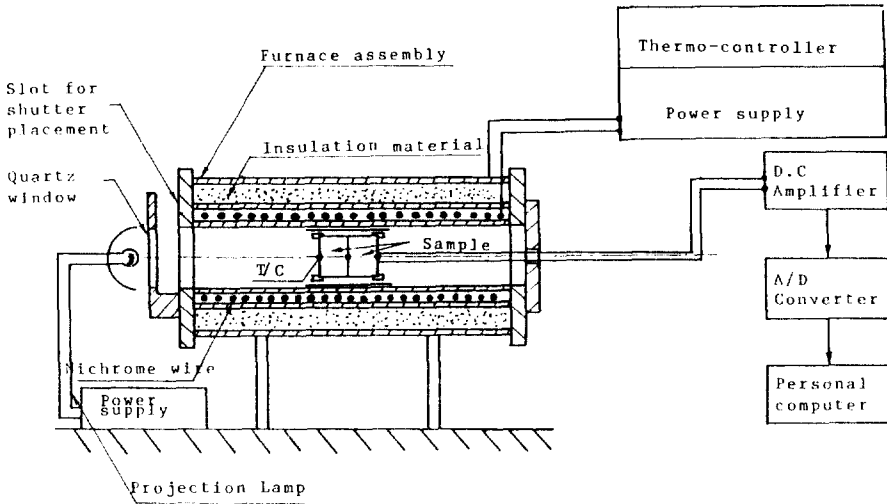


Fig.6 Schematic diagram of experimental apparatus for CHF method

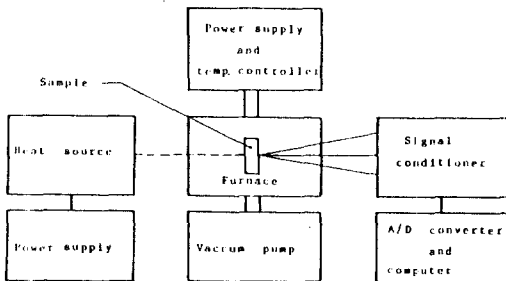


Fig.7 Schematic diagram of experimental apparatus for NPE method

길이 150mm가 되도록 제작하였으며, 전원을 연결시킬 수 있도록 로의 양쪽에 두께 2mm의 스테인레스판을 이용하여 내경 64mm 외경 84mm의 링을 만들어 양쪽에 부착하였다. 또한 로벽에서 일어나는 복사열 손실을 줄이기 위하여 두겹의 원통형 차폐막을 설치하였다. 로에 인접한 차폐막은 두께 0.05mm, 길이 138mm, 직경 74mm로 스테인레스 포일을 이용하여 제작하고, 바깥쪽 것은 동일한 두께와 길이로, 안쪽 것과 겹치지 않도록 0.8mm의 스테인레스 철사를 감고 점용접하였다.



로에 공급되는 전원은 전원조절팬들로 조정하며, 전원을 공급하면 로의 온도는 자동온도조절기에 의하여 일정온도로 조절된다. 로의 재질이 스테인레스이므로 1,000 °C까지 실험이 가능하며, 그 이상의 범위에서 측정을 원한다면 로의 재질을 탄타늄으로 만들면 가능하다. 로의 온도를 300~400 °C까지 올리는데는 30초 정도이면 가능하나 로내의 시편까지 온도가 일정하게 유지되는데 걸리는 시간은 시편의 종류에 따라 약간의 차이는 있으나 약 10분 정도가 소요되었다.

### 3.1.2 시편지지대와 열원

열확산계수를 구하는데 시편의 두께가 중요한 요소로 작용하므로 측정시 두께에 대한 오차를 줄이기 위하여 시편지지대는 Fig. 8과 같이 시편지지대는 두개의 링과 3개의 가느다란 막대로 구성되어 있다. 시편은 양쪽의 링 사이에 놓이게 되며 링은 두께 2mm의 스테인레스판을 이용하여 내경 48mm, 외경 63mm로 제작하였다. 실험하는동안 시편이 완전히 고정되어 되고 균일한 복사열을 받도록 링의 양쪽에 0.05mm의 스테인레스판을 직경 50mm의 원형으로 만들어 붙였다. 막대는 직경 24mm, 길이 150mm이며 링과 막대가 접촉하지 않도록 막대에 세라믹판을 끼워서 사용하였으며, 양쪽 링이 움직이지 않도록 막대와 링은 너트를 이용하여 고정하였고, 시편지지대는 로의 내부에 자유롭게 장착할 수 있도록 제작하였다.

열원은 600W의 텅스텐-할로젠 적외선 램프를 사용하였다. 열을 집중시키기 위하여 전구뒤에 은막을 입힌 반사갓을 부착하였다.

### 3.1.2 자료수집장치와 열전대

자료수집장치는 analog and digital I/O board와 Screw terminal panel과 IBM-AT 컴퓨터 그리고 자료수집 프로그램으로 구성되어 있다. A/D보드는 Data Translation사의 제품으로 모델명은 DT 2801 A로서 해상도는 12 bit 이고, 입력범위는  $\pm 1.25$  V에서  $\pm 10$  V이다. 변환속도는  $10 \mu\text{sec}$ 이며, A/D는 16채널을 받아들일 수 있다. Screw terminal은 열저항 장치로서 열전대 전용모듈이나 용력 전용

모듈을 16개까지 꽂을 수 있으며 열전대 전용모듈에서 들어오는 전압을 메인 보드에 보내주도록 되어 있다. 이 또한 Data Translation사의 제품으로 모델명은 DT 760이다. 열전대 전용입력 모듈은 Data Translation사의 DT 537-K-02로서, K형(chromel-alumel) 열전대 전용 모듈이며  $-100$  °C에서  $+1,350$  °C까지 측정할 수 있으며, 증폭기능과 과전압 차단 기능, 또한 5V로서 출력을 일정하게 유지시켜주는 기능을 가지고 있으며, 필터기능과 온도보상기능도 겸하고 있다.

데이터 수집 장치를 제어하는 프로그램은 LEBTECH ACQUIRE 라는 프로그램으로서 DT 2801 data acquisition board를 지원해주며, analog input을 4채널과 digital input 1채널을 각 채널당 50Hz 즉, 자료수집 시간간격을 1/50초까지 임의로 선택하여 사용할 수 있다.

온도측정에 사용한 열전대는 0.24mm K형을 사용하였으며 주위의 노이즈의 영향을 받지 않도록 피복 절연시켰다. 접점은  $2 \times 2 \times 0.03$  mm의 스테인레스판에 1mm의 사이를 두고 크로멜선과 알루미넨선을 점용접기를 사용하여 점용접하였다.

## 3.2 실험방법

본 실험장치의 정확도를 입증하기 위하여 미국 국립표준국의 표준재료인 NBS-1450 b의 열확산계수를 측정하여, 추천한 값과 CTP법, CHF법, STD법 및 NPE법에 의해 계산한 값과 비교하였고, 미국에서 생산된 Zircar(AL-45)의 열확산계수를 NPE법으로 측정하여 Bae<sup>12)</sup>의 실험값과 비교하였다. NBS-1450 b의 상세한 자료는 Table 1과 같다.

Table 1. Properties of the NBS-1450 b

Density (kg/m <sup>3</sup> )	137.5			
T(°C)	23	43	63	83
C <sub>p</sub> (J/kg °C)	860.0	929.9	975.9	1008.7
k(W/m °C)	0.0348	0.0372	0.0397	0.0423
$\alpha \times 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	0.2939	0.2907	0.2960	0.3051



국내에서 생산되는 단열재로는 K회사의 암면과 시리카를 CTP법, CHF법, STD 법으로 측정 한 값과 NPE법으로 계산한 값, 그리고 회사에서 제시한 밀도와 비열, 열전도계수를 식(2)에 대입하여 구한 열확산계수값을 비교한다.

시편을 가공하는데 있어서 두께의 변화가 열확산계수의 측정에 미치는 영향은 상당히 크기 때문에 두께를 가공하는데 세심한 주의가 필요하며 정밀한 가공이 되도록 노력하였다. 가공후 두께의 측정은 0.05mm까지 측정이 가능한 버니어 캘리퍼스를 이용하여 5지점에서 측정 한 값의 평균값을 사용했다. 시편의 직경은 모든 재료에 공히 직산법의 경우는 직경 42mm, 두께 5mm 정도로 하였고, NPE법은 직경을 50mm로 하였으며 두께는 대략 7mm의 값으로 시편을 가공하였다.

실험을 시작하기 전에 시편을 시편지지대에 Fig.8과 같이 시편과 열전대를 삽입한다. 열전대는 스테인레스 판뒤, 시편과 시편 사이, 시편의 뒷면 등 3지점과 자동온도조절기의 열전대를 중앙에 부착시켰다. 열확산계수는 밀도와 비열의 함수이므로 밀도가 변화하지 않도록 시편을 시편지지대에 삽입할 때는 균일한 힘을 주어 일정한 두께로 유지하도록 한다. 그리고 열전대가 정중앙에 위치하도록 삽입한다. 여기서 시편층은 연속개체로 가정하고 시편층 사이에 삽입된 열전대 두께는 얇아 열전대가 열전도에 미치는 영향은 무시한다. 로내의 온도조절은 시편중앙에 위치한 열전대의 온도감지에 따라 자동온도조절기에 의하여 조절된다.

시편이 장착된 시편지지대는 전기로의 중앙에 밀어넣고 조절부에 있는 전원공급장치의 스위치를 켜다. 자동온도조절기로 실험하고자 하는 온도를 맞추고 로의 온도가 일정하게 유지되면 적외선 램프를 켜고 전압조절기가 달린 소형 전원공급기로 열원의 강도를 조절한다. 다음 적외선 램프앞에 있는 섯터를 제거함과 동시에 자료수집장치 프로그램을 작동시킨다. 온도는 세 지점에서 시간의 함수로 측정되며, 전후면의 온도는 경계조건으로 하고, 내면의 온도는 열확산계수를 구하는데 사용된다. NBS-

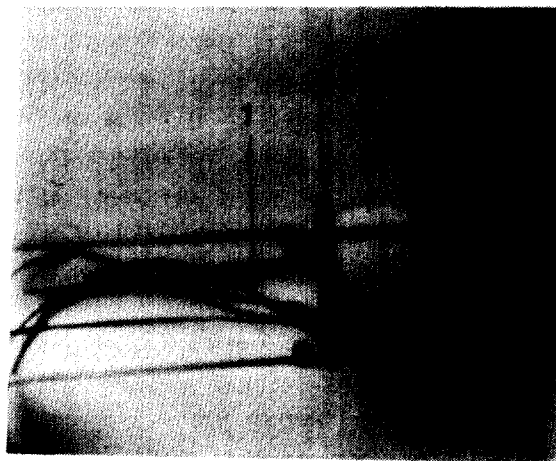


Fig.8 Photograph of sample holder

1450b를 실은 30℃에서 측정 한 온도를 그래프로 그리면 Fig.9와 같다. 여기에서  $T_0$ 는 전면의 온도이며,  $T$ 는 내면의 온도,  $T_L$ 은 후면의 온도이다. 시간의 흐름에 따라 전면의 온도는 급격히 상승하고 중앙의 온도는 비교적 완만히 상승하며 후면의 온도는 아주 완만하게 상승함을 알 수 있다. 각 채널에서 온도 측정은 1초간격으로 150~300초 동안 측정한다. CTD법, CHF법, STD법의 경우는 측정 한 온도데이터와 두께 및 기타자료를 온도분포식을 프로그램한 해석용 프로그램에 입력하면 열확산계수를 구할 수 있고, NPE법은 NPE법에 의해 작성된 프로그램에 측정 온도, 측정 시간, 시간간격, 열전대의 수, 시편의 두께, 측정 시작점의 온도, 유한차분자료 등을 입력하면 열확산계수가 계산된다.

#### 4. 결과 및 고찰

실험결과에서 발생하는 오차는 측정오차와 비측정오차로 나눌 수 있다. 측정오차는 시편의 유효두께에 의한 오차, 열전대의 민감도, 온도보정의 정도와 양면온도 상승곡선의 결정에 의한 오차 즉, 열원을 작동시키는 시간과 컴퓨터가 읽어들이는 시간차에 의한 오차, 이차원 열흐름 등을 들 수 있는데 이상의 측정 오차는 측정장치의 개량, 조정 및 적절한 조

작에 의해서 감소시킬 수 있다. 비측정오차로는 가열조건과 실험조건의 불일치, 측정장치의 정밀도, 재질이 소프트한 것, 취성이 있는 것 등으로 오차를 유발할 수 있다. 본 연구에서 채택한 재료인 암면은 두께의 신축성이 상당히 커서 저밀도의 샘플에 대한 측정은 밀도의 변함에 따라 열확산계수가 달라지므로 온도와 밀도의 함수로 열물성치를 제시하여야 한다.

실험장치의 정확성을 시험하기 위하여 단열재 표준시편인 NBS-1450b를 이용하여 열확산계수를 측정하여 추천된 값과 비교 검토하였다. 그 결과 NBS-1450b의 추천된 열확산계수값과 본 실험에서 측정한 값은 오차가 Fig.10에서 보는 바와 같이 CTP법에서는 17°C에서 80°C까지 범위에서 4.9%에서 26%까지 발생하였으며, CHF 법에서는 3.1%에서 8.7%까지 발생하였고, STD법에서는 4.5%에서 7.6%까지 나타났으며, NPE법은 3% 정도였다. 측정값은 추천값보다 다소의 오차는 있으나 비교적 잘 일치함을 보였다. 같은 재료로 Rooke<sup>13)</sup>의 실험은 22°C에서 70°C 범위까지 측정한 결과 5%에서 25%까지 오차가 발생하였고 Rook와 Taylor<sup>14)</sup>가 25°C에서 90°C 범위까지 측정한 결과는 10%에서 15%까지 오차가 발생하였다. 또한 Taylor, Rooke와 Shoemaker<sup>15)</sup>가 35°C에서 90°C 범위까지 측정한 결과는 5%에서 10%까지 오차가 발생한 것으로 보아 실험장치의 정밀도가 신뢰성이 있음이 입증되었다.

미국에서 생산한 Zircar(AL-45)는 밀도가 686.7 kg/m<sup>3</sup>이며 Fig.11과 같이 15°C에서 300°C 범위에서 최대오차가 5% 발생하였다.

국내에서 생산한 단열재의 열확산계수에 대한 자료는 KS F 2083에서 제시한 열전도계수, 밀도, 비열을 이용하여 열확산계수를 환산한 값과 실험결과 값을 비교하였다.

본 실험에서 선정하여 측정한 K회사 암면은 석회, 규산을 주성분으로 하는 내열성이 높은 광물질을 1,500°C 내지 1,700°C의 고열로 용융한 후 원심력, 압축공기 또는 고압증기로 섬유화시켜 만든 순수 무기질 광석면으로서 일

반건물의 단열재로 주로 사용하며 사용최대온도는 600°C이다. Fig.12와 같이 25°C에서 300°C 범위에서 KS자료로부터 환산한 값과 측정값과는 CTP법에서는 3%에서 50%까지 오차가 생겼고, CHF 법에서는 14%에서 35%의 오차가 발생하였고, STD법에서는 8%에서 23%까지 오차가 생겼으며, NPE법은 8%에서 30%였다.

K회사의 Silica는 상업명이며 밀도는 250 kg/m<sup>3</sup>이다. 이 제품은 주로 석유화학 발전소의 탱크, 보일러 등에 사용되며 Fig.13과 같이 25°C에서 300°C까지 측정한 결과 CTP법에서는 환산값과 비교하여 16%에서 33%까지 오차가 생겼으며, CHF 법에서는 3.4%에서 22.2%의 오차가 발생하였고, STD 법에서는 4.1%에서 18%였고, NPE법에서는 5%에서 20%였다. Fig.12, 13에서 보는 바와 같이 NPE법으로 측정한 값은 추천한 값보다 큰 값을 가지며, 나머지 방법으로 측정한 값은 모두 더 적은 값을 갖는다. 국산재료의 추천된 값은 실온의 밀도와 비열값을 택하여 열전도계수 값으로부터 열확산계수 값을 환산한 것이므로 정확한 값으로 보기는 어려우나 각 측정방법에 대한 정밀도의 정성적 비교는 가능하다. 그러나 CTP법은 시편을 유한 슬래브로 택하여 양 표면의 온도를 일정하다고 가정하였기 때문에 시편 후면의 온도가 초기온도 이상으로 상승하기 직전까지의 온도자료만 이용한다. 따라서 비교적 좁은 시간영역 내에서 한정된 자료만 이용하는 제한성이 있다. CHF법은 수학적 모델을 반무한 고체로 택하여 엄밀해를 직산법으로 구하는 방법이므로 이 해에는 오차함수가 포함된다. 오차함수는 특성상 편각이 작을 경우 이 편각의 미소변화는 마지막 해에 큰 영향을 미치게 되므로, 측정이 시작된 후 초기에 수집되는 온도자료를 버려야 하는 단점이 있다. STD법은 이러한 단점들을 보완하기는 하나 실제온도 상승곡선과 구한 경계함수 및 초기함수 사이에 곡선 점철오차가 존재하게 된다. 상기의 여러 방법에 비해 NPE법은 몇 가지 장점들이 있다. 식 (12)의 경계조건은 표면온도를 시간에 따라 측정하여 각

측정점의 온도로부터 열확산계수를 추정하여 나가기 때문에 열원함수의 종류에는 무관하다. 또 다른 장점은 측정시간 동안에 얻어진 모든 온도자료를 전부 이용하므로 몇몇 부정확한 온도가 측정되었다 하더라도 결과치에는 거의 영향을 미치지 않는다는 점이다. 즉, 한점 한점 계산하여 추정해 나가기 때문에 측정과정에서 외란에 의한 온도 요동이 발생한다 하더라도 열확산계수의 마지막 추정값에는 크게 영향을 미치지 않으며, 얻은 자료를 전부 이용하므로 평균 유효 열확산계수 값은 더욱 신빙성이 있다. NPE법의 가장 큰 특징은 식 (13)과 같은 오차를 최소화할 수 있는 최소자승함수를 택한 점이다. 위에서 논의한 직접법들은 엄밀해를 이용하기는 하지만 측정오차에 대한 보정 방법은 전혀 고려치 못하고 있으므로 NPE법에 비해 측정값의 신빙성이 다소 떨어진다고 할 수 있다. 또한 정상상태법은 각각의 측정 온도에서 정상온도 분포를 만들려면 매우 오랜 시간이 소요되고, 시편의 크기도 커야 한다. KS F 2264에 의하면 보온재의 시편의 치수는 세로 200mm±3% 이내, 가로 200mm±3% 이내, 두께 10~25mm로 한다고 되어 있다. 그러나 NPE법을 이용하면 직경 50mm, 두께 7mm로 할 수가 있다. 또한 NPE법은 열질량이 작은 튜브형 전기로의 사용으로 300℃의 단열재료의 열확산계수를 측정할 때 시간은 자료수집 시간을 포함하여 10분이내로 할 수가 있다. CHF 법과 STD법에

사용한 전기로의 경우는 전기로의 열질량 때문에 300℃의 온도로 평형시키는데 약 30분 정도 소요되었다. 그러나 정상상태법으로 측정할 때는 1,200℃에서 섬유질 단열재료의 하나의 열전도계수값을 얻기 위해 20시간 정도가 소요되는 것<sup>13)</sup>에 비하여 많은 시간을 단축할 수 있었다.

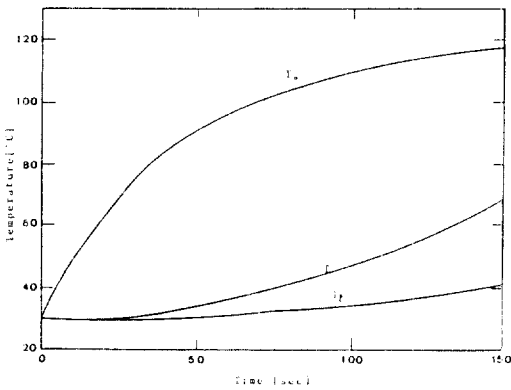


Fig.9 Temperature history for NBS-1450 b at ambient temperature, 30°C

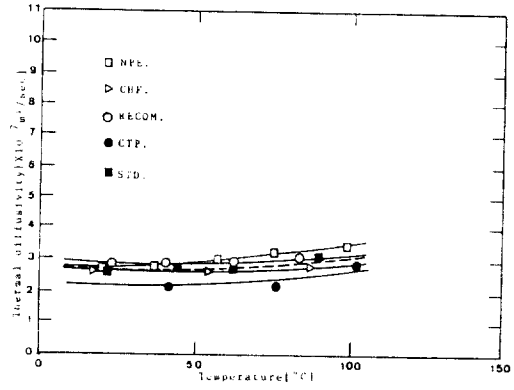


Fig.10 Thermal diffusivities measured by various method for NBS-1450 b

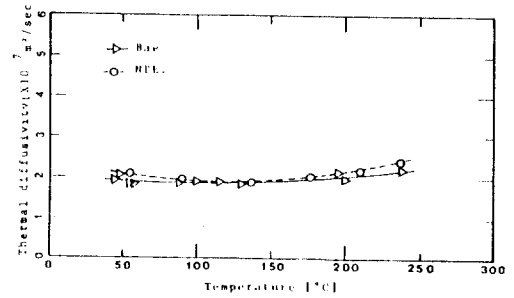


Fig.11 Thermal diffusivities measured by NPE method for zircar (AL-45)

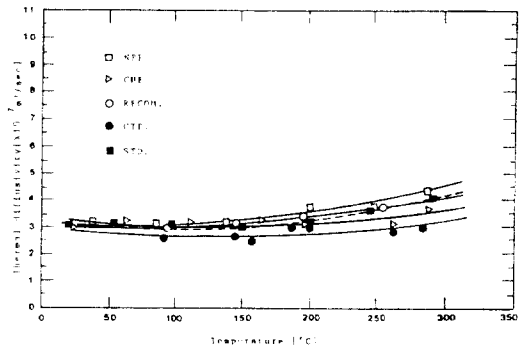


Fig.12 Thermal diffusivities measured by various method for rock wool

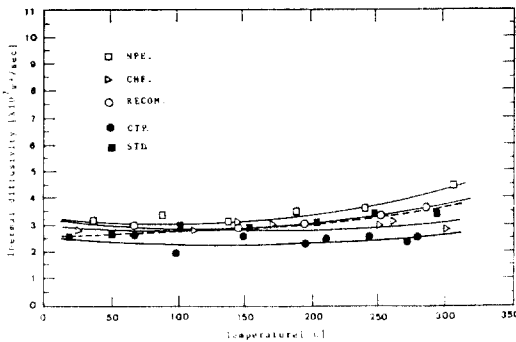


Fig.13 Thermal diffusivities measured by various method for silica

## 5. 결 론

NPE법을 열확산계수 측정에 이용하여 다른 직산법들에 비하여 우수성이 있음을 입증하였고, 열질량이 작은 튜브형 전기로의 사용으로 측정시간을 단축시킬 수 있었다.

본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) NBS-1450b 표준시편의 유효열확산계수를 CTF법, CHF법, STD법과 NPE법으로 측정한 결과 NPE법이 미국 국립 표준국에서 추천한 값과 비교하여 오차가 가장 작으므로 정밀도가 높다.

(2) NPE법은 외란에 의하여 어느 한 점의 온도가 잘못 측정되었다 하더라도 한점 한점 추정해 나가기 때문에 최종 열확산계수의 값에 미치는 영향을 최소화 할 수 있다.

(3) NPE법은 표면의 온도를 측정하여 열확산계수 값을 추정하기 때문에 열원의 종류에는 무관하게 정밀한 값을 얻을 수 있다.

(4) NPE법은 정상상태법에 비해 측정시간을 단축할 수 있고 시편의 크기도 작게할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 1989년도 문교부 지원 한국 학술진흥재단의 자유공모과제 학술연구조성비에 의하여 연구되었으며 이에 진심으로 감사드리는 바이다.

## 참 고 문 헌

1. Taylor, R.E., 1979, "Heat Pulse Thermal Diffusivity Measurements", High Temperature-High Pressures, Vol. 11, pp. 43-58.
2. Gustafsson, S.E. and Karawacki, E., 1983, "Transient Hot Strip Probe for Measuring Thermal Properties of Insulating Solids and Liquids", Rev. Sci. Instrum., Vol. 54, No. 6, pp. 744-747.
3. Fine, H.A., 1978, "Thermal Transmission Measurements of Insulation", STD660, pp. 147-153.
4. Hayashi, K., 1983, "Thermal Conductivity of Ceramic Fibrous Insulators at High Temperature", Proc. of Fourth Japan Symposium on Thermophysical properties, pp. 125-128.
5. Parker, W.J., Jenkins, R.J. Butter, C.P. and Abbott, G.L., 1961, "Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity, and Thermal Conductivity", J. of Appl. Phys., Vol. 32, No. 9, pp. 1679-1684.
6. Parker, W.J., 1962, "Flash Method of Measuring Thermal Conductivity", Proc. of the Second Conference on Thermal Conductivity, pp. 33-45.
7. Marquardt, D.W., 1963, "An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters", J. Soc. Indust. Appl. Math., Vol. 11, No. 2, June, pp. 431-441.
8. Hartley, H.O., 1961, "The Modified Gauss-Newton for the Fitting of Non-Linear Regression Functions by Least Squares", Technometrics, Vol. 3, No. 2, May, pp. 269-280.
9. Stolz, G., 1960, "Numerical Solution to an Inverse Problem Heat Conduction for Simple Shapes", J. of Heat Transfer, Vol. 82, pp. 20-26.

10. Sparrow, E.M., Haji-Sheikh, A. and Lundgren, T.S., 1964, "The Inverse Problem in Transient Heat Conduction", *J. of Appl. Mech.*, pp. 369-375.
11. Beck, J.V., 1969, "Determination of Optimum, Transient Experiments for Thermal Contact Conductance", *Int. J. of Heat Mass Transfer*, Vol. 12, pp. 621-633.
12. Bae, S.C., 1988, "Transient Measurements of Insulation Material", *Thermal Conductivity* 20, Plenum Press, pp. 389-401.
13. Rooke, S.P., 1986, "Transient Technique for the Determination of the Thermal Diffusivity of Fibrous Insulators", M.S. Thesis, Purdue university.
14. Rooke, S.P. and Taylor, R.E., 1986, "Transient Experimental Technique for the Determination of the Thermal Diffusivity of Fibrous Insulation", Contributed by the Heat Transfer Division for Publication in *Journal of Heat Transfer*.
15. Taylor, R.E., Rooke, S.P. and Shoemaker, R.L., 1986, "Heat Pulse Technique for Measuring Diffusivity of Ceramic Fiber Material", AISI project No. 45-475.