

<論 文>

# 금속스크랩이 혼합된 상변화물질의 유효열전도율

김 시 범\* · 노 승 탁\*\*

(1986년 8월 11일 접수)

## Effective Thermal Conductivity of the Phase Change Material with Metal Scrap

Si Pom Kim and Sung Tack Ro

**Key Words:** Thermal Energy Storage(축열), Phase Change Material(상변화 물질), Latent Heat Storage(잠열축열), Effective Thermal Conductivity(유효열전도율), Heat Flux Meter(열유속계)

### Abstract

A set of measurements has been made for the thermal conductivity of the pure paraffin in liquid and solid phases and for the effective thermal conductivity of the paraffin with metal scrap with the aid of the heat flux meter. The thermopile-type heat flux meter has been designed by steady state method and the functional relation between the temperature difference of both sides and heat flux has been obtained. The measured values of thermal conductivity are compared with the existing data for the pure paraffin and with the predicated values from the suggested model in which only one empirical constant is contained. The comparison within ten percent of the volume fraction of the metal scrap in the paraffin is satisfactory.

### 기 호 설 명

- $a$  : 혼합물에서 스크랩의 분포형태가 정입방체로 되어 있다고 가정할때 한변의 길이
- $k$  : 열전도율[W/(mK)]
- $m$  : 스크랩의 열전도 방향으로의 연신비
- $N$  : 열전대의 접점쌍의 수
- $Q$  : 시편을 통과하는 열전도량(W)
- $q$  : 시편에서 전도되는 열유속(W/m<sup>2</sup>)

- $T$  : 온도(°C)
- $\Delta T$  : 온도차(°C)
- $\Delta V$  : 전위차(mV)
- $Z$  : 시편의 두께(m)

### 희랍문자

- $\alpha_{AB}$  : 열전대에서 두 금속의 Seebeck 계수의 차(mV/K)
- $\phi$  : 스크랩의 체적 혼합율

\* 정회원, 동아대학교 공과대학 기계공학과

\*\* 정회원, 서울대학교 공과대학 기계공학과

### 1. 서 론

오늘날 화석연료의 대체에너지원으로서 관심의 대상이 되고 있는 태양열을 효율적으로 이용하기 위해서 축열기술이 필요함은 주지의 사실이다. 축열부를 포함하는 에너지 시스템을 고려할 때 전체시스템 중에서 축열부분에 대한 연구가 상대적으로 가장 뒤떨어진 현재로서는 효율이나 경제성의 관점에서 볼 때 축열에 대한 다각적인 연구가 바람직하다. 일반적으로 축열매질이 갖추어야 할 조건으로는 경제성이 있어야 한다는 점, 축열밀도가 커야 한다는 점, 그리고 열의 흡입이 용이해야 한다는 점등을 들 수 있다. 실제 건축상으로는 가급적 공간을 작게 차지하는 것이 바람직하므로 경제성과 축열밀도의 측면에서 유리한 잠열축열이 최근에 들어서 관심의 대상이 되고 있다.

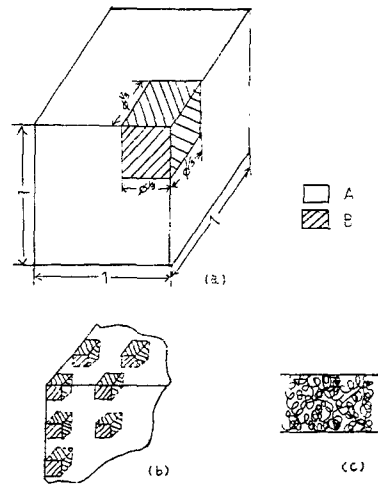
일반적으로 잠열축열에 사용되는 물질들은 잠열이 커야하고 화학적으로 안정해서 반복 사용이 가능해야 하며, 열전도율이 커야하고, 상변화 전후에 밀도의 변화가 작아야 한다. 현재 많이 쓰이고 있는 파라핀계통의 물질은 반복 사용시에도 재질의 변화가 거의 없고 잠열도 비교적 크지만 열전도율이 작다고 하는 심각한 결점을 가지고 있다. 이 결점을 개선하기 위해 유효열전도율을 증대시키는 방법으로는 금속의 하니콧이나 원등으로 열의 통로를 만들어 주는 법과 금속의 분말이나 선반 가공시 발생하는 금속의 스크랩등 열전도율이 큰 물질과의 혼합물을 만드는 법이 고려될 수 있다. 그러나 이러한 방법들은 아직도 연구 중에 있으며 금속분말의 혼합은 액상에서의 침전 때문에, 하니콧이나 원등은 축열규모가 커질때 비용상의 문제로 실용화에 어려운 점이 있으므로 상변화 물질에 금속의 스크랩을 혼합하는 방법이 바람직하다. 따라서 본 논문에서는 열전도율이 큰 금속의 스크랩과 파라핀을 혼합한 축열매질에 있어서 스크랩의 체적 혼합율에 따르는 열전도율의 변화를 모델링과 실험으로 구해서 축열 계산에 필요한 열전도율 자료를 제시하고자 한다.

### 2. 혼합물의 유효열전도율에 대한 모델

유효열전도율은 열전달 특성에 큰 영향을 주는 값으로서 혼합물에 있어서는 각각 물질의 열전도율과 더불어 혼합형태에 따라서 크게 달라진다. 혼합물의 유효열전도율에 대해서는 일반적으로 parallel 모델, series

모델등 여러 모델을 제시할 수 있으나<sup>(1,2)</sup> 입자의 크기가 충분히 작고 균일하게 섞여있으며 1차원적으로 열이 전달될 때에는 다음에 설명하는 것과 같은 모델을 사용할 수 있다.

물질 A와 B의 혼합물에서 B의 체적혼합율이  $\phi$ 일 때 혼합물의 단위체적을 Fig. 1(a)와 같이 취하고 그 한번의 길이를 1로 하면 물질 B의 배열은 Fig. 1(b)와 같다. 물질 B의 각각의 형태는 기본적으로는 정육면체를 생각할 수 있으며 그 한 변의 길이를  $a$ 로 한다. 그러나 혼합물을 축열물질로 사용할 때 상변화물질이 응해된 상태에서 고체성분이 침전되면 반복 사용



(a) Collection of material B in the unit volume of the mixture  
 (b) Distribution of material B in material A  
 (c) Distribution of Scrap in paraffin

Fig. 1 Configuration of the mixture

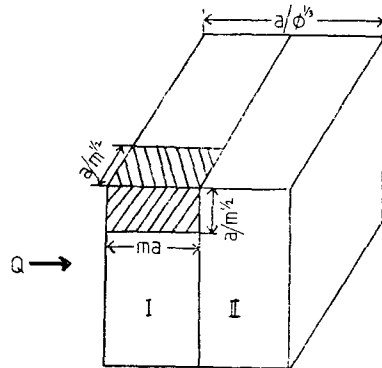


Fig. 2 Unit cell of the mixture

이 불가능하므로 반복성을 가지기 위해서는 Fig. 1(c) 처럼 고체성분도 서로 접촉지해 주어야 한다. 따라서 이러한 점을 고려하면 물질 B의 분포형태는 열이 전달되는 방향으로 늘어난 직육면체로 가정할 수 있다. Fig. 1(b)의 규칙적인 배열에서 한 부분을 빼어내면 Fig. 2와 같으며 여기에서 한 번의 길이는  $a/\phi^{1/3}$ 이다. 물질 B의 체적은 위에서 언급한 것과 같이  $a^3$ 으로 유지되며 열이 전달되는 방향으로의 길이를  $ma$  라면  $m$ 은 연신된 길이와 원래의 정육면체의 한 번의 길이인  $a$ 와 연신비이며 실험적으로 구해지는 값이다.

Fig. 2에서 보는 것처럼 열이 전달되는 방향에서 볼 때 I에서는 parallel 모델이다. 전체 열전달량  $Q$  중에서 물질 A와 B를 통과하는 양을 각각  $Q_A, Q_B$ 라 하고 I의 유효열전도율을  $k'$ 라 하면  $Q$ 는 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} Q &= k' \left( \frac{a}{\phi^{1/3}} \right)^2 \frac{\Delta T_I}{ma} \\ &= Q_A + Q_B \\ &= k_A \left\{ \left( \frac{a}{\phi^{1/3}} \right)^2 - \frac{a^2}{m} \right\} \frac{\Delta T_I}{ma} + k_B \left( \frac{a}{\sqrt{m}} \right)^2 \frac{\Delta T_I}{ma} \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서  $k_A$ 와  $k_B$ 는 각각 물질 A와 B의 열전도율이며  $\Delta T_I$ 은 조각 I의 양단에서의 온도차이다. 식 (1)로부터 조각 I에서의 유효열전도율  $k'$ 은 다음식과 같다.

$$k' = \frac{\left( \frac{a}{\phi^{1/3}} \right)^2 - \frac{a^2}{m}}{\left( \frac{a}{\phi^{1/3}} \right)^2} k_A + \frac{\frac{a^2}{m}}{\left( \frac{a}{\phi^{1/3}} \right)^2} k_B \quad (2)$$

다음에 조각 I과 II는 series 배열이므로 각각 온도차를  $\Delta T_I, \Delta T_{II}$ 라 하면 다음식이 성립한다.

$$\begin{aligned} Q &= k_e \left( \frac{a}{\phi^{1/3}} \right)^2 \frac{\Delta T}{\left( \frac{a}{\phi^{1/3}} \right)} \\ &= k' \left( \frac{a}{\phi^{1/3}} \right)^2 \frac{\Delta T_I}{ma} \\ &= k_A \left( \frac{a}{\phi^{1/3}} \right)^2 \frac{\Delta T_I}{\left( \frac{a}{\phi^{1/3}} - ma \right)} \end{aligned} \quad (3)$$

여기에서  $k_e$ 는 전체의 유효열전도율이다.  $\Delta T$ 는  $\Delta T_I$ 과  $\Delta T_{II}$ 의 합이므로 위에서  $k_e$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_e = \frac{k_A \{ (1 - \phi^{1/3}/m) k_A + (\phi^{2/3}/m) k_B \}}{\{ k_A + (k_B - k_A) (\phi^{2/3}/m - \phi) \}} \quad (4)$$

여기에서  $m$ 은 물질 B의 기하학적 배열 형상에 따르는 값으로서 본 논문에서는 파라핀과 SM 45 C 강의 혼합물에 대해서 다음과 같이 실험으로 구하였다.

### 3. 열전도율의 측정

열전도율을 측정하기 위해서 정상상태 측정법을 이용했으며 이를 위해 열유속계를 제작하고 검정하였다. 정상상태법은 시간이 오래걸리는 단점이 있으나 장치 구성이 간단하고 비교적 오차가 적으므로 본 논문에서의 혼합물의 열전도율 측정에 적합하다.

#### 3.1 열유속계의 구성

열유속계의 구성을 Fig. 3에 나타내었다. 전위차계에서 측정되는 전위차  $\Delta V$ 는 식 (5)와 같다<sup>(3)</sup>.

$$\Delta V = N \int_{T_1}^{T_2} \alpha_{AB} dT \quad (5)$$

여기에서  $N$ 은 thermopile에서의 접점쌍의 수이며  $\alpha_{AB}$ 는 열전대에서 두 금속의 Seebeck 계수의 차이이다. 온도차  $(T_1 - T_2)$ 가 작을 때에는  $\alpha_{AB}$ 는 상수로 볼 수 있으므로 식 (5)는 식 (6)으로 쓸 수 있다.

$$\Delta V = N \alpha_{AB} (T_1 - T_2) \quad (6)$$

식 (6)에 따르면 Fig. 3의 열유속계는 온도차  $(T_1 - T_2)$ 에 비례하는 전압신호를 낸다.  $\alpha_{AB}$ 는 열전대의 종류에 따라 정해지는 값이므로 접점쌍의 수  $N$ 을 증가시킬수록 큰 전압신호를 얻을 수 있다. 열유속계를 통과하는 전도열량은  $(T_1 - T_2)$ 에 비례하므로 이 열유속계에서 열유속과 전위차의 관계가 실험적으로 구해지면 역으로 임의의 통과열량에 대해서 전위차를 측정함으로써 열유속을 구할 수 있다.

#### 3.2 열유속계의 제작과 검정

본 실험에 사용한 열유속계의 구조를 Fig. 4에 나타내었다. 열전대 접점쌍의 수는 30으로 하였으며 위치에 따른 불균일성을 줄이기 위해 전체면에 대해서 균일하게 분포하였다. 제작된 열유속계의 검정을 위한

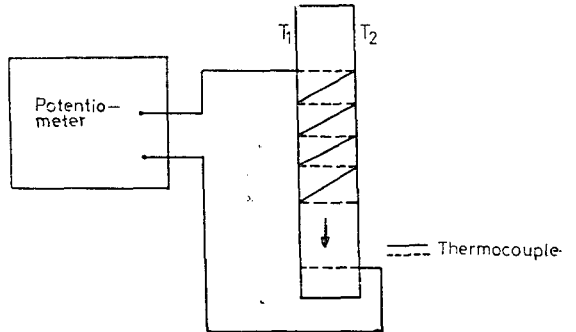


Fig. 3 Basic circuit of heat flux meter

실험장치의 개략도를 Fig. 5에 나타내었다. 열원에서 발생한 열이 양면으로 반씩 흘러나가도록 동일한 재질과 규격의 열유속계를 2개 만들어서 열원의 양쪽에 부착시켰다. 열유속계의 평균온도를 측정하기 위해서 열유속계의 외측 표면의 4개 지점에 열전대를 부착하였다. 항온조내의 온도가 미리 정해진 값에 도달하면 열원에 전원을 공급하고 열유속계에서의 전위차를 연속적으로 확인하여 그 값이 정상상태에 도달했을 때 열원에 공급된 전류·전압·열유속계에서의 전위차 및 표면온도를 각각 측정하였다.

측정된 값들을 정리하여 Fig. 6에 나타내었다. 열전대에서 두 금속의 Seebeck 계수의 차가 일정하다면 열유속계에서 열유속과 발생하는 전위차의 비는 일정해야 한다. 그러나 Seebeck 계수의 차는 온도상승에 따라 증가하므로 열유속과 전위차의 비는 열유속계의 평균온도가 높아질수록 감소하였다. 열유속과 전위차의 비를 평균온도의 함수로 나타낼 때 대체로 직선으

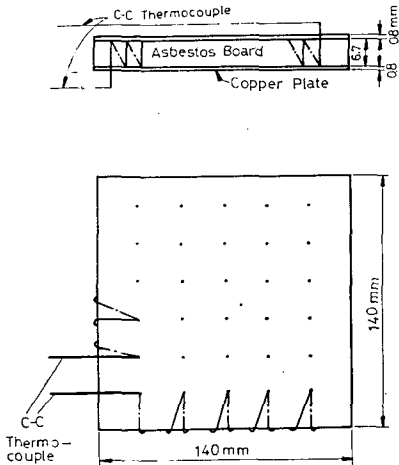


Fig. 4 Schematic diagram of heat flux meter

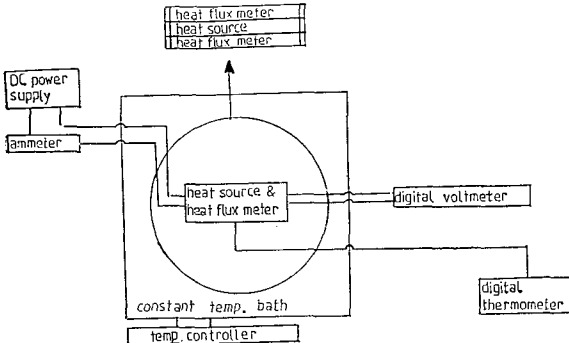


Fig. 5 Schematic diagram of experimental apparatus for calibration of heat flux meter

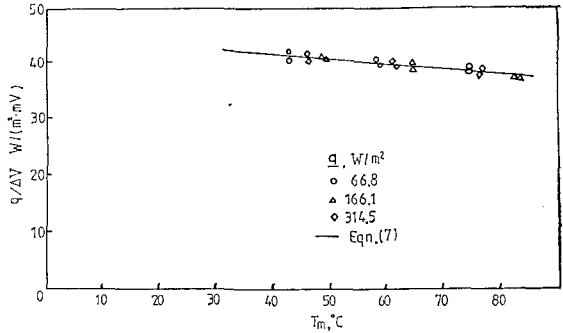


Fig. 6 Fitting of experimental data  $q/\Delta V$  vs. mean temperature  $T_m$

로 표시되므로 측정치들을 정리하여 다음의 관계식을 얻을 수 있었다.

$$q = (b_1 T_m + b_2) \Delta V \tag{7}$$

여기에서  $q$ 는 열유속,  $T_m$ 은 열유속계의 평균온도이며  $\Delta V$ 는 열유속계에서의 전위차이다. 계수  $b_1$ 과  $b_2$ 는 아래와 같다.

$$b_1 = -0.09466 W/(m^2 \cdot ^{\circ}C \cdot mV)$$

$$b_2 = 45.94 W/(m^2 \cdot mV)$$

열유속계에서의 실험오차는 열유속·전위차 및 온도의 측정에서 발생하는 것으로 생각할 수 있다. 측면을 두께 0.02m의 styrofoam으로 단열했을 때의 열손실은 0.8% 정도이고 전류와 전압의 측정에는 0.5급의 계측기를 사용하였으므로 열유속계의 검정에서 발생하는 실험오차는 1.8% 정도이다. 식 (7)을 사용하여 열유속  $q$ 를 계산할 때 발생하는 최대오차는 2.5%, 표준편차는 1.6%이다.

### 3.3 열전도율의 측정

열전도율의 측정을 위한 실험장치의 구성을 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. 시편을 통과하는 열유속은 앞서 제작 검증한 열유속계로 측정하고 시편양단에서의 온도차는 thermopile로 측정해서 열전도율을 Fourier의 법칙에 의해 구한다.

#### (1) 고체파라핀과 혼합물

혼합물은 6403 파라핀과 SM 45C 강의 스크랩으로 구성하였다. 시편은 순수파라핀, 스크랩의 체적혼합물  $\phi = 0.016$ ,  $\phi = 0.031$  및  $\phi = 0.086$ 의 3종류로 모두 4종을 만들었으며 시편의 두께는 각각 11.7 mm, 20mm, 16 mm 및 16 mm 이고 면적은 140 mm x 140 mm 이다.

혼합물은 스크랩을 용해된 파라핀에 불규칙하게 배열하였으므로 혼합물의 유효열전도율은 직렬배치와 병

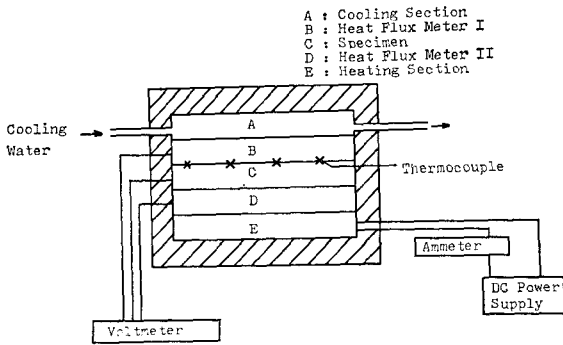


Fig. 7 Schematic diagram of experimental apparatus for solid paraffin and solid paraffin-scrap mixture

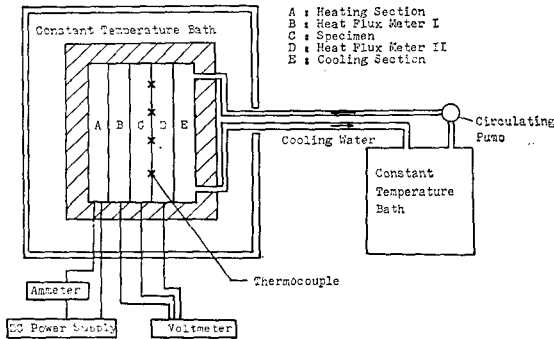


Fig. 8 Schematic diagram of experimental apparatus for liquid paraffin

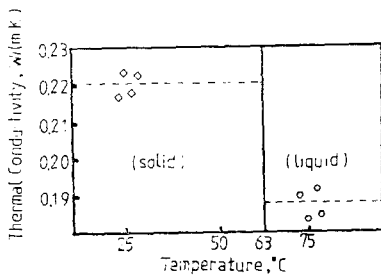


Fig. 9 Measured thermal conductivity of pure paraffin

열배치의 중간 값이 예상된다. 시편의 양단에 열유속계를 부착해서 열유속을 측정했으며 시편 양단의 온도차를 재기 위해서 5개의 접점쌍으로 구성된 C-C thermopile을 시편 양단에 설치하였다. 열원으로는 두께가 0.8mm인 절연된 두동판 사이에 니크롬선을 넣어서 만든 가열판을 사용하였으며 직류전원공급기로 전원을 공급하였다. 시편과 열유속계의 접촉면에는 지름이 0.1mm인 C-C 열전대를 4개소 묻어서 시편의 평

균온도를 구하였다.

(2) 순수 액체 파라핀

양편이 두께 0.65mm의 동판이고 열면은 재질이 치밀한 Styrofoam으로 막혀 있는 140mm(L)×140mm(W)×8mm(t)의 틀에 파라핀을 녹여 부어서 용기를 포함한 전체를 시편으로 사용했다. 구리의 열전도율이 파라핀에 비해서 약 2,000배 이상 크기 때문에 두께 0.65mm인 동판에서의 온도강하는 파라핀에 비해서 무시할 수 있다. 실험장치의 기본구성은 3.3(1)결과 같으며 실험이 진행되는 동안 파라핀이 응고하지 않도록 장치 전체를 70°C로 유지되는 항온 공기조에 넣었으며 냉각부에도 파라핀의 융해점보다 약간 높은 65°C의 온수를 저장한 항온수조로부터 순환펌프를 통하여 온수가 순환되도록 하였다.

3.4 실험결과

약 25°C의 고체 파라핀, 약 75°C의 액체 파라핀 그리고 약 25°C에서의 스크랩과 고체파라핀의 혼합물에 대한 열전도율의 측정결과를 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다.

순수한 파라핀의 열전도율은 기존 문헌에 극히 일부가 알려져 있으며 본 실험의 결과는 대체로 실험오차의 범위 내에서 잘 일치하고 있다<sup>(4,5)</sup>. Fig. 9에서 보는 것처럼 액체 파라핀의 열전도율은 0.188W/mK를, 고체의 열전도율은 0.221W/mK를 얻을 수 있었다. Fig. 10에서 보는 것처럼 스크랩의 체적혼합율이

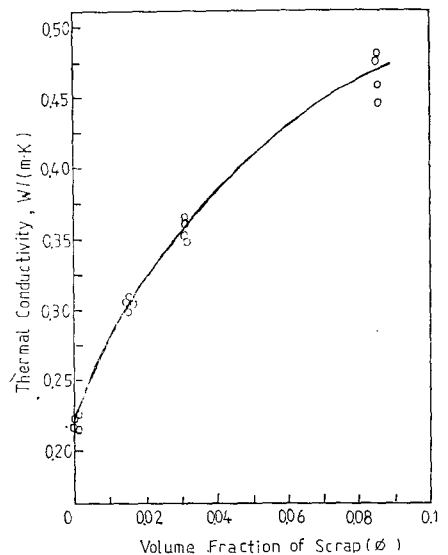


Fig. 10 Experimental results of thermal conductivity for the mixture

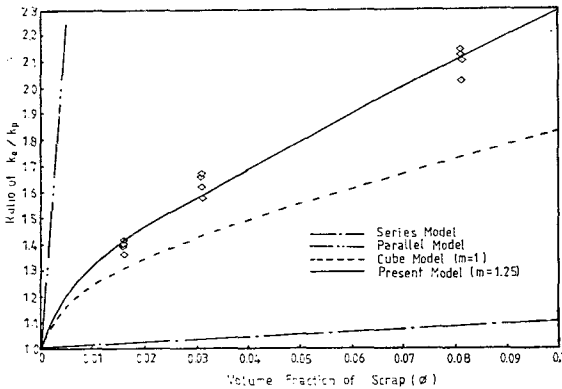


Fig. 11 Comparison of experimental data with modeling ( $k_e$ =Effective thermal conductivity;  $k_p$ =Thermal conductivity of paraffin)

0.086 일 때 혼합물의 열전도율은 순수한 파라핀의 값에 비해 21.0% 정도 증가되므로 체적혼합율 0.01 증가에 대해 약 25% 정도 증가된다고 할 수 있다. 실험치들의 참 값으로부터의 오차는 다음과 같이 구하였다 시편의 두께를  $Z$ , 양단의 온도차를  $\Delta T$ , 열유속을  $q$  라 하면 시편의 유효열전도율  $k_e$ 는 다음과 같다.

$$k_e = \frac{qZ}{\Delta T} \tag{8}$$

따라서 오차  $\left| \frac{\delta k_e}{k_e} \right|$ 는 다음 식과 같이 표시할 수 있다.

$$\left| \frac{\delta k_e}{k_e} \right| = \left| \frac{\delta q}{q} \right| + \left| \frac{\delta Z}{Z} \right| + \left| \frac{\delta(\Delta T)}{\Delta T} \right| \tag{9}$$

식 (7)을 사용해서  $q$ 를 구할 때  $\left| \frac{\delta q}{q} \right|$ 는 1.6% 정도이다. 또 두께 측정에 사용된 마이크로 메타의 허용 오차가 0.1% 이내이고 측정값의 표준편차가 0.6% 이므로  $\left| \frac{\delta Z}{Z} \right|$ 는 0.7% 정도이다. 한편 온도차를 구하는 기초자료인 series 열전대로부터의 전위차 측정에는 0.5 급의 전압계를 사용하였으므로  $\left| \frac{\delta k_e}{k_e} \right|$ 의 범위는 대략 2.8% 이내이다.

### 3.5 혼합물에 대한 열전도율의 모델링과의 비교

스크랩의 혼합형태는 파라핀과의 series 배열이나 parallel 배열이 아니며 그 중간에 해당될 것은 미리 예측할 수가 있다. 파라핀과 스크랩이 적절하게 혼합되어 있고 열이 1차원적으로 전달될 경우 앞에서 언

급한  $m$ 으로 현재의 혼합물의 열전도율을 표시할 수 있다고 가정해서 식 (4)를 적용시킬 때 체적혼합율  $\phi$  값이 0.016, 0.031 및 0.086에 대해서 각각 1.21, 1.28 및 1.24의 신장율  $m$  값을 얻을 수 있었다. 따라서  $\phi$ 의 변화에 따른  $m$  값의 변화가 크지 않으므로  $m=1.25$ 로 취하는데 무리가 없다. Fig. 11은  $m=1.25$ 일 때 계산된 유효열전도율과 실험치를 비교한 것으로 최대오차 4.4%, 표준편차 1.9%의 범위내에서 실험치를 표시할 수 있다. 그림에서 점선으로 표시한 cube model은 식 (4)에서  $m=1$ 인 경우이다. 또 실선은 식 (4)에서  $m=1.25$ 로 택하였을 때의 계산된 유효열전도율을 나타낸다.

## 4. 결 론

상변화물질의 잠열을 측열에 이용할 때 발생하는 문제점의 하나인 낮은 열전도율에 대한 향상책으로서 열전도율이 큰 금속의 스크랩을 파라핀에 혼합할 때 얻어지는 효과를 유효열전도율의 증대라는 측면에서 모델링과 실험을 하였다.

정상상태 측정법으로 고체 및 액체파라핀의 열전도율을 측정할 수 있었다. 스크랩을 파라핀에 혼합한 경우 1차원 열전달에서 열이 전도되는 방향으로 스크랩의 혼합 형태가 늘어났다고 가정할 때 유효열전도율을 각각의 순수물질의 열전도율, 혼합 비율과 기하학적인 형태상수인 단일한 실험상수로 표시할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- (1) I.E. Parrott and A.D. Stuckes, "Thermal Conductivity of Solids", Pion Limited, pp.129~139, 1975
- (2) W.D. Kingery, "Introduction to Ceramics", John Wiley & Sons, pp.499~504, 1963
- (3) R.P. Benedict, "Fundamentals of Temperature, Pressure and Flow Measurements", John Wiley & Sons, pp.73~135, 1977
- (4) A. Arhat, "Low Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage; Heat Storage Materials", Solar Energy, Vol.38, No.4, pp.313~332, 1982
- (5) 이택식, 노승탁, "상변화를 동반하는 열전달과 측열에 관한 연구(비정상 열전법에 의한 열전도율의 측정)", 대한기계학회지, 제 16권 제 2호, pp.218~223, 1976