

열유속계를 이용한 잠열과 비열 측정방법

박 창 현, 손 권, 최 주 환*, 홍 희 기**

경희대학교 대학원 기계공학과, *서울대학교 대학원 기계항공공학부, **경희대학교 기계산업시스템공학부

Measure of Latent Heat and Specific Heat using Heat-Flux Meter

Chang Hyun Park, Kwon Shon, Ju Hwan Choi*, Hiki Hong**

Department of Mechanical Engineering, Graduate School, KyungHee University, Yongin 449-701, Korea

*School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

**School of Mechanical and Industrial System Engineering, KyungHee University, Yongin 449-701, Korea

ABSTRACT: In order to evaluate the performance of thermal storage material, studies on the measurement methods of latent heat and specific heat have been performed. So far, DSC, DTA, T-history methods have been used to measure the thermal properties. But thermal analysis methods such as DSC and DTA can represent a part of materials because the amount of test material is very small. Also, T-history method is very simple, but has a defect that supercooling temperature was used which is not a thermal property. As a result, the latent heat measured by T-history method is varied according to the test conditions, materials, and so on. Because of these difficulties on the measurement of latent heat, we developed a new method using the heat-flux meter, which measures the heat-flux and temperature continuously.

Key words: Thermal storage material(축열재), PCM(상변화물질), Latent heat(잠열), Specific heat(비열), T-history method, DSC(시차주사열량법), Heat-flux meter(열유속계)

기호설명

q'' : 열유속 [W/m^2]
 A : 열전달 면적
 k : 열전도율 [$W/(m \cdot k)$]
 E : 전압 [mV]
 T : 온도 [$^{\circ}C$]

t : 시간
 m_p : PCM의 질량
 C_{pl} : 액상의 비열
 C_{ps} : 고상의 비열
 h_m : 잠열 [kJ/kg]

하첨자

p : 상변화물질(PCM)
 l : liquid
 s : solid

† Corresponding author

Tel.: +82-31-202-2925; fax: +82-31-202-8106

E-mail address: hhong@khu.ac.kr

1. 서론

축열재에 대한 연구가 활발히 진행되면서 이의 성능 평가의 일환으로서 잠열과 비열을 측정하는 방법에 대해 많은 연구가 이루어져 왔다.

잠열의 측정에는 시차주사열량법(DSC), 시차주사열분석법(DTA) 등이 대표적이다. 이밖에 중국의 Zhang(1999) 등이 발표한 T-history법, 일본의 岩本는 열유속계를 사용하여 잠열을 측정한 보고도 있다. DSC나 DTA법은 가장 널리 알려진 잠열 측정법으로서 보편화된 방식이나, 여러 성분으로 혼합된 물질에서의 잠열을 측정하는 데는 주의가 요구된다. 시료를 1mg에서 10mg 정도의 매우 적은 양을 추출하기 때문에 균일하게 혼합되지 않을 경우 그 시료가 상변화물질 전체를 대표한다고 볼 수 없다. 또한 측정하는 데 많은 시간이 소요되고 비용도 비싸다.

잠열축열재의 경우에는 기본 물질에 각종 첨가제가 포함될 수 있으므로 DSC나 DTA법의 대안으로 제안된 것이 T-history법⁽²⁾이다. 이 방법은 기준물질(보통 중류수)과 상변화물질을 상전이 온도보다 높은 온도로 유지시키다가 대기중에 방열을 시키면서 시간에 따른 두 물질의 온도변화를 얻고 두 물질의 그래프로부터 집중용량법을 이용하여 잠열과 비열을 계산하는 방법이다. 고가의 장비를 사용하지 않고 비교적 쉽게 잠열 및 비열을 측정할 수 있으나, 액상에서 고상으로 열을 방출하는 과정에서 잠열의 방출이 끝나는 온도를 결정하는 데는 문제점이 있다. 즉 잠열의 방출이 끝나는 온도와 과냉각이 해소되는 온도를 동일한 것으로 보았는데, 실제로 과냉각의 정도는 용액의 부피, 순도, 냉각속도, 용기 표면의 상태, 용액의 교반 등에 따라 변하게 된다. 따라서 물질의 고유한 성질이 될 수 없으므로 T-history법으로 측정한 잠열은 실험 조건 및 시료에 따라 달라질 수 있다.

한편 일본에서 岩本⁽³⁾이 발표한 논문에서는 구간을 충분히 넓게 설정한 후 온도를 2℃씩 올리면서 발생하는 열량을 열유속계를 이용하여 측정하였다. 이 실험은 장비가 단순한 대신 측정이 번거롭다는 단점을 가지고 있다.

이에 본 논문에서는 이러한 단점을 보완하고 잠열을 측정하는 데 편리하면서도 정확한 방법에 대해서 연구하였다. 즉 T-history법이나 岩本가 사용하였던 방법과 같이 튜브내의 시료 전체를 대상으

로(시료를 채취하지 않고), 다소 균일하지 않은 잠열 축열재에 적용이 쉽도록 하였다. 또한 연속적으로 가열 혹은 냉각시킴으로써 측정이 용이하게 한 것이 가장 큰 장점이다. 특히 이 방법은 0℃ 이하의 저온의 상변화물질에 적용이 유력하며 기존의 타 방법으로는 측정상 해결해야 할 어려움이 많다.

2. 실험장치

본 실험에서는 히터나 냉동기를 일정용량으로 작동시켜 온도를 연속적으로 변화시키면서 잠열량과 비열을 측정하는 방법을 개발하였다. 이 경우에는 항온조와 온도측정장치 및 열유속계가 필요하다. 열유속계는 비열과 잠열을 측정하기 위해 사용되며 직접 제작하였다. 열유속계의 원리, 제작 및 보정법은 다음과 같다.

2. 1 열유속계의 원리 및 제작방법

사용된 열유속계(heat-flux meter)는 벽면을 통한 열유속 q'' 을 측정하기 위해 열전대열(thermopile)의 원리를 응용한 것이다. 이러한 열전대열은 열전대를 직렬로 연결하여 기전력을 크게 한 것이다. Fig. 1과 같이 열유속계의 길이는 잠열 축열재를 봉입한 폴리에틸렌 파이프의 둘레길리와 같게 제작하였다. 열유속을 측정하기 위해서는 열전달 방향으로의 온도차($T_A - T_B$)를 구해야 하는데, 본 실험에서는 표면 A와 B의 온도를 측정하기 위해 T형 열전대를 이용하였다. 미세한 온도차를 정확

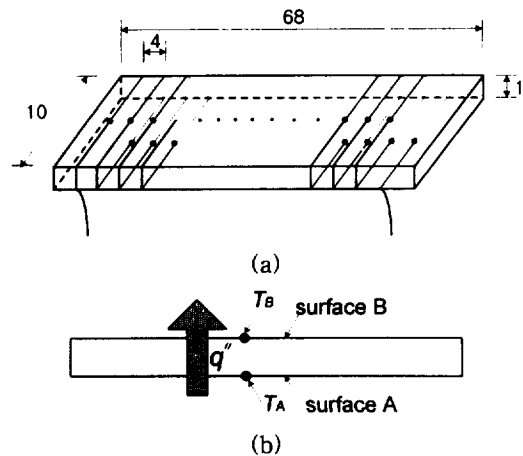


Fig. 1 Heat-flux meter

히 측정하기 위해 Fig. 1(a)와 같이 열전대를 두께 1mm의 실리콘 고무시트에 직렬로 16번 납땜으로 연결하였다.

2. 2 열유속계의 보정

제작된 열유속계에 대해 온도차에 의한 기전력과 열유속 사이의 관계를 구해야 한다.

이를 위해서 Fig. 2와 같은 검정장치를 제작하였다. 우선 니크롬 박막히터에서 발생한 줄열(E^2/R)을 구하기 위해서는 니크롬 박막히터의 저항을 정밀하게 측정해야 한다. 저항은 길이에 비례하므로 정밀한 측정을 위해 길이가 긴 니크롬 박막히터(1350mm)의 저항을 측정하여 실험에 사용한 길이(68mm)의 저항으로 환산한 결과 0.0317Ω 이다. 니크롬 박막히터를 통해 공급된 열이 열유속계를 통해 외부로 배출될 수 있는 구조를 취하였다. 충분한 두께의 단열재(isopink)를 사용하여 Fig. 2의 측면과 하부로의 배출을 억제하였으며, 아랫쪽에 동일한 구조의 히터를 대칭으로 설치하였다. 또한 니크롬 박막히터와 열유속계의 접촉을 피하기 위해 실리콘고무시트를 삽입하였다. 이때, 접촉저항을 줄이기 위해 실리콘고무의 위, 아래에 열전도율이 큰 그리스(thermal grease)를 발라주었다.

Fig. 2와 같이 구성을 하고 난 후 랩(wrap)을 이용하여 전체를 밀착시켰으며 마지막으로 유리 테이프를 사용하여 모듈을 고정시켰다.

열유속계의 보정은 히터에 가해지는 전압을 랜덤하게 변화시키면서 측정하였다. 열유속계에서 나온 전압이 안정화가 될 때까지 기다린 후, 즉 정상상태가 된 후의 값을 기록하였다.

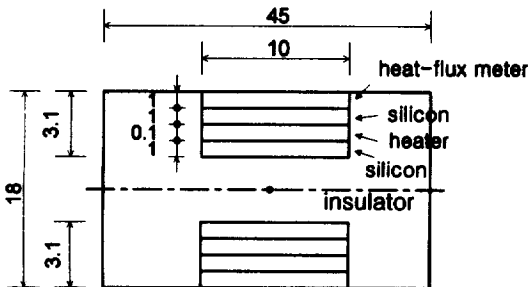


Fig. 2 Calibration for heat-flux meter

2. 3 검정결과

Fig. 1의 열유속계에 대한 열전도 방정식은

$$q = kA \frac{dT}{dx} \approx kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

이때 온도차 ΔT 는 열전대열에서 발생한 기전력과 근사적으로 선형관계에 있으므로

$$\Delta T \approx C_1 \Delta E \quad (2)$$

따라서

$$q'' = \frac{q}{A} \approx \frac{kC_1}{\Delta x} \Delta E = C \Delta E \quad (3)$$

와 같이 열유속과 기전력 사이의 관계식이 성립한다. 열유속계 검정실험에서 상수 C 를 결정하였다. 결과를 Fig. 3에 나타내었고, 최소자승법에 의한 식은 다음과 같다.

$$q'' = 1287.5 \Delta E \quad (4)$$

3. 잠열과 비열의 측정 및 결과

3. 1 실험 방법

측열재를 폴리에틸렌 파이프에 충전하고 내부온도를 측정할 수 있는 열전대와 앞서 제작한 열유

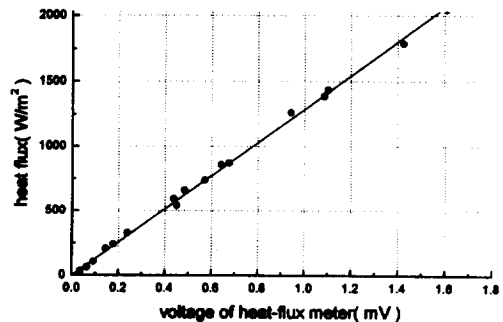


Fig. 3 A result of tests

속계를 설치하였다. Fig. 4는 이에 대한 세부 단면도를 보인 것이다. 열유속계를 감은 부분과 나머지 부분의 열저항이 같도록 고려하였으며 폴리에틸렌 파이프와 잘 밀착시키기 위하여 그리스(thermal grease)를 사용하였다. 측정은 열유속계에서 나오는 전압, 항온조 수온, 대기온도, 튜브내부의 시료온도, 실리콘 고무시트의 내·외부의 온도를 측정하였다.

실험은 항온조에 시료튜브를 넣고 축열재의 상전이온도 이상(40℃)에서 2시간 정도 유지시킨다. 그 다음에 항온조 내부의 온도를 10℃까지 0.27℃/min의 비율로 냉각시킨다. 이때 데이터로거로 10초마다 각 지점의 온도와 열유속을 측정한다.

3. 2 실험결과

시간 경과에 따른 온도와 열유속 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 그림으로부터 열유속이 거의 일정한 액상구간을 거쳐 갑자기 증가하는 잠열 방출구간 및 다시 거의 일정한 값을 갖는 고상구간으로 구성된 것을 알 수 있다. 이를 단순화한 그림이 Fig. 5(b)로서 빗금친 부분 A_2 이 잠열에 해당된다.

A_1 은 액상의 비열, A_3 은 잠열구간의 비열, A_4 는 고상의 비열에 상당하며, 이들 면적을 수치적으로 구함으로써 잠열과 비열을 구할 수 있다.

액상의 경우 온도가 T_1 에서 T_2 로 떨어지는 동안 방출한 열량 Q_l 는

$$Q_l = A \int_{T_1}^{T_2} q' dt = AA_1 \quad (5)$$

$$= m_p C_p (T_1 - T_2)$$

로서 A 는 시료튜브의 면적, A_1 은 Fig. 5(b)의 면적이다.

따라서,

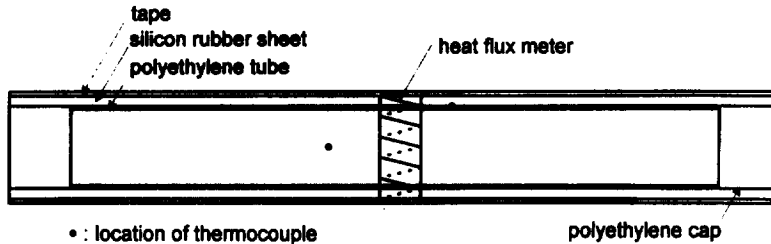
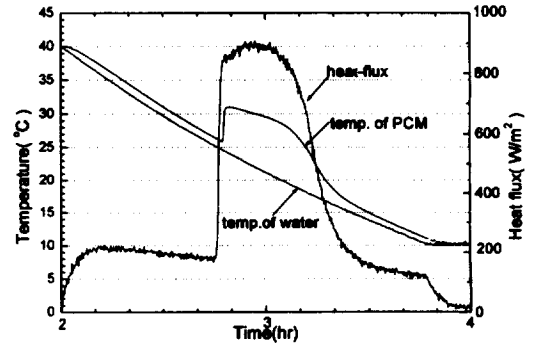
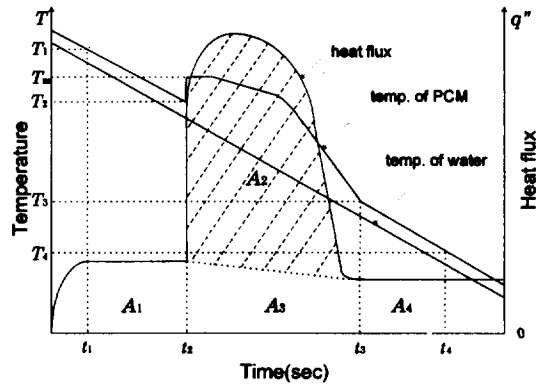


Fig. 4 Section view of test tube



(a) Timewise variation of heat flux and temperatures



(b) Simplified figure

Fig. 5 Measurement of latent heat

$$C_p = \frac{AA_1}{m_p(T_1 - T_2)} \quad (6)$$

마찬가지로

$$C_p = \frac{AA_4}{m_p(T_3 - T_4)} \quad (7)$$

한편 잠열구간에 해당되는 Fig. 5(b)의 시간 $t_2 \sim t_3$ 에서 시료가 방출한 열량 Q_m 은

$$Q_m = m_p h_m + m_p C_{pm} (T_m - T_3) \quad (8)$$

$$= A \int_{t_1}^{t_2} q' dt = A(A_2 + A_3)$$

여기서

$$C_{pm} = \frac{C_M + C_E}{2}, \quad A_3 = \frac{m_p C_{pm}}{A} (T_m - T_3)$$

이다.

따라서, 용융잠열 h_m 은

$$h_m = \frac{AA_2}{m_p} \quad (9)$$

실험에 사용된 축열재의 질량 m_p 은 75g이다. 본 연구에 축열재로 개발한 망초, Borax, K-SAM, SLS를 93 : 3 : 3 : 1(wt%)로 혼합된 시료를 대상으로 잠열 및 비열을 측정하였다. 비열 및 잠열의 계산시 $T_1 = 35^\circ\text{C}$, $T_2 = 33^\circ\text{C}$, $T_3 = 15^\circ\text{C}$, $T_4 = 13^\circ\text{C}$ 를 사용하였다. 총 4회의 실험결과로 잠열 $h_m = 244.16 \pm 6.04(95\%)(\text{kJ/kg})$ 로서 순수한 망초의 242(kJ/kg)보다 다소 큰 값이 나왔다. 반면에 비열의 경우에는 액상 $C_M = 7.95 \pm 0.16(95\%)(\text{kJ/kg}^\circ\text{C})$, 고상 $C_E = 7.82 \pm 0.35(95\%)(\text{kJ/kg}^\circ\text{C})$ 로서 순수한 망초의 1.919(kJ/kg $^\circ\text{C}$), 3.262(kJ/kg $^\circ\text{C}$)보다 각각 크게 나타났다.

동일한 조건의 망초와 비교한 것이 아니므로 큰 의미는 없으나, 잠열의 경우 상변화물질에 일종의 불순물인 첨가제가 포함된 만큼 값이 작아질 것이 예상되나 크게 나온 것은 기대하기 어려우며 이에 대한 충분한 실험과 해석의 보완이 필요하다.

4. 결 론

시료를 채취하지 않고 직접 비열과 잠열을 측정할 수 있는 방법을 개발하였다. 또한 본 측정방법과 특징이 유사한 T-history법의 최대 단점인 잠열방출 해소온도의 임의성도 해결함으로써 추가로 열유속계를 부착하기는 하나 정도 및 신뢰성을 향상시킬 가능성이 확인되었다. 그러나 물성치가 확인된 시료를 통한 검증작업이 필요하며, 현재 진행 중이다.

후 기

본 연구는 1999년 학술진흥재단의 연구비에 의하여 지원되었음(KRF-99-003-EC0094).

참고문헌

1. 熱量測定·熱分析 handbook, 日本熱測定學會
2. Zhang, Y. and Jiang, Y., 1999, A simple method, the T-history method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials, Measurement and Science Technology, Vol. 10, pp.201-205.
3. Kim, B. H., 1990, Fundamental Study on the Storage Medium for Thermal Storage System Report of Korea Institute of Geology, Mining. and Materials, pp.3-29.
4. 岩本 龍一郎, 1992, 無機水和物を用いた潛熱蓄熱に関する研究, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan.
5. Park, W. H., 1986, A System Development of Thermal Energy Storage at High Temperatures. Report of KIST
6. Holman. J. P., Experimental Methods for Engineers, pp.421-425.