

진공환경에서 다공성 소재의 열확산도 측정 시스템

공철원*, 남기원**, 이영무***, Akira Ohnishi****

Measurement System of the Thermal Diffusivities for Porous Materials under Vacuum Conditions

Cheol-Won Kong*, Gi-Won Nam**, Yeong-Moo Yi*** and Akira Ohnishi****

Abstract

A system of measurement for the thermal diffusivity of porous materials was developed. Although there are several measurement systems for thermal diffusivity, it is typically difficult to measure the thermal diffusivity of porous materials. This paper presents a measurement system for thermal diffusivity that utilizes a cyclic heating method along with the verification of the measured device. To verify the cyclic heating method, the available reference data of a ceramic specimen was utilized. To apply the system to an actual porous material, polystyrene foam was tested. The thermal diffusivity of the polystyrene foam under vacuum was reduced by 63%. The measured values from both tests were in good agreement with the reference values, as they were within 10% of these values.

초 록

다공성 소재의 열 확산도 측정 시스템을 개발하였다. 열확산도를 측정하는 다양한 시스템이 있지만 다공성 소재의 열확산도를 측정하는 것은 기존의 시스템으로는 어렵다. 본 논문에서는 주기가열법을 이용한 열확산도 측정시스템 및 장비의 검증에 대하여 정리하였다. 주기가열법을 검증하기 위해서 사용한 표준시편은 세라믹 소재를 사용하였다. 그 결과 표준값과 측정값이 일치함을 보였다. 다공성 소재 적용을 위하여 검증한 시편은 폴리스티렌 폼이었다. 진공에서 열확산도 값도 측정하였는데, 진공에서 열확산도는 대기조건과 비교하여 63% 감소함을 보였다. 두 결과 모두 측정값과 표준값은 10% 오차 범위 이내에 있었다.

키워드 : 다공성 소재(porous materials), 열확산도(thermal diffusivity), 진공(vacuum)

접수일(2010년 12월 21일), 수정일(1차 : 2011년 5월 4일, 2차 : 2011년 6월 15일, 게재 확정일 : 2011년 7월 1일)

*발사체구조팀/kcw@kari.re.kr **발사체구조팀/giwony@kari.re.kr ***발사체기술개발실/yym@kari.re.kr

**** Kouei Corporation

1. 서 론

다공성 소재의 열전도도는 기공이 없는 소재에 비하여 매우 낮은 열확산률로 인하여 기존의 방법으로 측정이 어렵다. 이는 소재내의 기공에서 발생하는 열방사효과 때문으로 추정된다. 기존의 정상상태 열전도도 측정법은 측정시간이 길고 시편에 상당한 온도구배가 존재해야 한다. 잘 알려진 방법으로는 Calorimeter Method, Panel Test Method 및 Guarded Hot-Plate Method 등이 있다. 전이상태 열전도도 측정법은 측정 소요시간이 짧으며 작은 시편으로도 측정이 가능한데 Axial Heat Flow Method, Radial Heat Flow Method 및 Hot Wire Method, 3- ω 기법 등이 있다. 그리고 간접적인 방법은 비열과 밀도 값이 필요한데 이는 열확산계수를 측정하는 방법으로 Dynamic Radial Heat Flow Method, Laser Flash Method 및 Transient Guarded Hot-plate Method 등이 있다.

다공성 소재의 열확산도에 대한 신뢰성 있는 값을 얻기 위해서는 측정에 미치는 다른 변수를 없앨 수 있는 단순한 구성의 장비가 필요하다 [1~6]. 다공성 소재의 열전도 현상은 대기환경에서는 기체 분자의 충돌, 고체 골격, 복사 및 대류에 의하여 생긴다. 진공환경에서는 기체분자 충돌과 대류의 열전도현상은 없고, 고온의 경우는 복사에 의한 영향이 크다. 본 논문에서는 다공성 소재의 열전도도를 측정하기 위한 간접적인 방법으로 열확산도를 측정하는 열주기법[7]을 사용하였다. 측정장치는 진공환경을 구현할 수 있으며, 장비 제어가 가능한 온도 범위는 77K에서 600K 까지이나 실제 측정 시도한 범위는 상온에서 473K까지 였다.

2. 본 론

2.1 측정장비의 구성

그림 1은 열확산도 측정장비 구성도이다. 시편(sample)은 동일두께의 3층으로 적층되며 계면에 직경 0.05mm의 열전대(Thermocouple, TC)가

설치되어 있다. DC 파워스플라이(DC power supply)는 필름형태의 발열판(Film heater)에 전류를 공급하여 주는데 이 전류의 공급은 주기형태로 공급하여 시편에 온도가 주기적으로 변하게 하였다. 이때 DC 파워스플라이와 PC 사이의 통신은 USB/GPIB로 한다. 그리고 TC1과 TC2의 열전대에서 받은 온도 데이터 중 식 (1) 및 그림 2의 조건에 맞는 데이터만 PC에서 처리되어 열확산도를 계산하는데 사용되어 진다. 진공 펌프는 1.33×10^{-3} Pa의 고진공이 가능하도록 설치하였다. 식 (1)에서 $T(t_1)$ 은 t_1 시간에서의 온도이며, $T(t_2)$ 는 시간 t_2 에서의 온도이다. 그림 3은 실제 시험 장치이다.

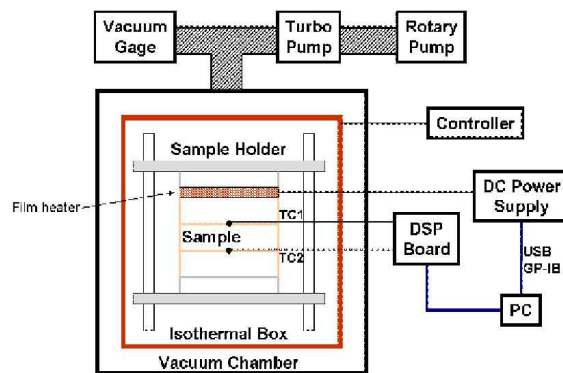


그림 1. 다공성 소재의 열확산도 측정장비 구성도

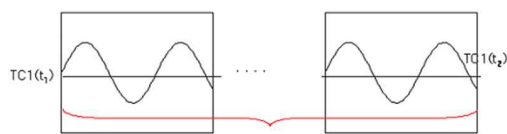


그림 2. 시편온도 측정 기준

$$| T(t_1) - T(t_2) | < 0.01K \quad (1)$$

데이터 처리 시스템은 NI사의 Labview 8.0과 DSP 보드를 통하여 데이터를 획득하였다. 이때 동시간에 TC1과 TC2의 신호를 획득하여 데이터 측정시스템에서 발생할 수 있는 신호의 위상차는

배제하였다. 고온에서 식 (1)을 만족하는 온도의 안정화를 위해서는 실험챔버 내부등온조건은 필수조건이다. 따라서 그림 4와 같이 등온박스(isothermal heater lines)를 실험챔버 내부에 장착하였다. 이를 이용하여 등온박스는 1K의 정밀도로 상온에서 600K까지 온도를 유지할 수 있도록 하였다. 이때 실험 챔버 (Test chamber)는 외부환경과 실험 장치를 차단해 주는 역할을 하며, 진공 실험 시 진공 펌프와 연결된다. 등온박스는 전체 분위기 온도를 일정한 수준으로 올려주는 역할을 하며 필름 히터는 0.01K의 정밀도로 제어한다.

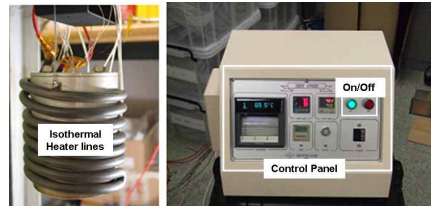
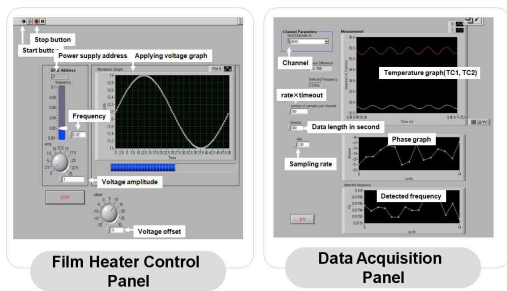


그림 4. 등온박스와 제어 장치



Film Heater Control Panel

Data Acquisition Panel

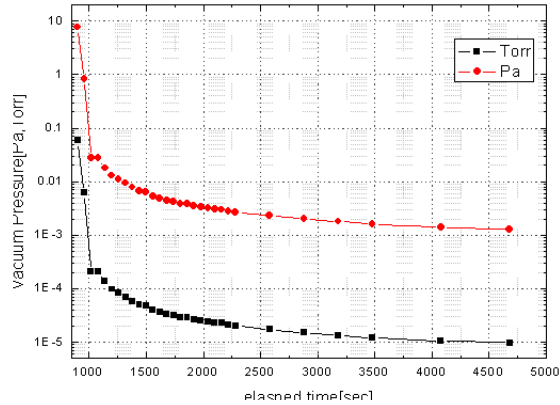
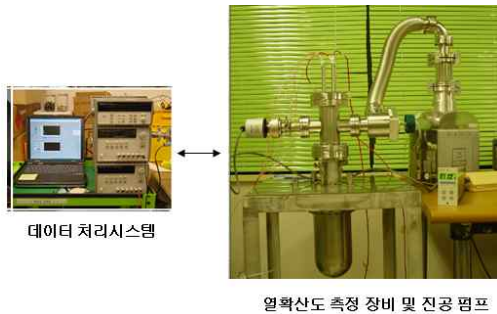


그림 5. 측정시스템의 진공 기밀 시험



데이터 처리시스템

열확산도 측정 장비 및 진공 펌프

그림 3. 열확산도 측정 장비

그림 5는 장비의 진공기밀 검증 시험결과로 시간에 따른 내부 진공도의 그래프를 보여준다. 우주환경에서 사용할 다공성 소재의 경우 진공환경에서 열확산도는 대기조건과 다를 수 있으므로 진공환경에서 열확산도 데이터가 중요하다. 센서 라인, 발열라인들의 입구에서부터 등온박스도 외부의 이중 박스로 진공이 잡히도록 하였다.

2.2 주기가열법

주기 가열법은 측정하고자 하는 재료의 한 면에 주기를 가진 열을 가하고 다른 면에서 온도를 측정하여 그 위상차를 구하는 방법이다. 식 (2)는 주기 가열법을 적용하여 열확산도를 구하는 식을 나타냈다. 식(3)은 식(2)로 구한 열확산도에 재료의 밀도와 비열을 측정하여 열전도도를 계산하는 식이다.

$$\alpha = \frac{\pi d^2 f}{\phi^2} \quad (2)$$

$$\lambda = \rho C_p \alpha \quad (3)$$

α : 열확산도(m^2/s), d : 시편두께(m), f : 주파수(Hz) ϕ : 위상차(Rad), C_p : 비열($kJ/kg \cdot K$) ρ : 밀도(kg/m^3), λ : 열전도도($W/(m \cdot K)$)

식 (2)에서 측정 시편의 두께인 d 는 두 열전대 (thermocouple)의 최단거리를 의미하기도 한다. 그림 6과 같이 동일한 크기와 재료의 시편 3개를 적층하여 가운데 시편의 윗면과 아랫면에 열전대 (thermocouple)를 부착하였다. 필름 히터로 싸인 (sine) 파형의 열을 가하고 시편의 윗면과 아랫면에 부착된 두 열전대 신호의 위상차($\phi_{1,2}$)를 측정하고 열전대의 주파수 및 위상차는 FFT와 교차스펙트럼(cross spectrum)을 이용하여 측정하였다.

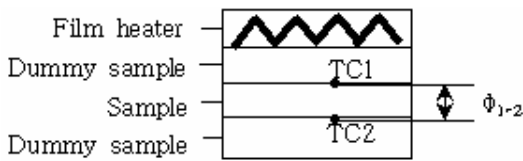


그림 6. 열확산도 측정을 위한 시편 적층

때 측정 시편의 두께는 5.7mm였다. 각 주파수별로 시험하여 위상차의 제공근과 주파수의 선형구간을 찾아내는 것이 본 측정시스템을 적용하기 위한 기본적인 작업이다. ϕ^2 과 f 의 선형구간은 0.02 ~ 0.1 Hz였다.

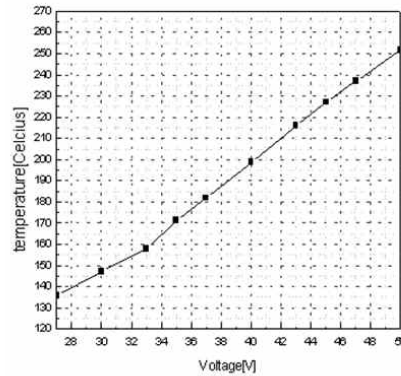


그림 8. 입력전압과 히터온도

2.3 필름히터 용량

필름히터에 부가되는 전압과 온도의 데이터를 대기조건에서 측정하였다. 그림 7은 주기가열을 위한 필름히터이며 그림 8은 입력전압과 히터온도를 나타낸다.

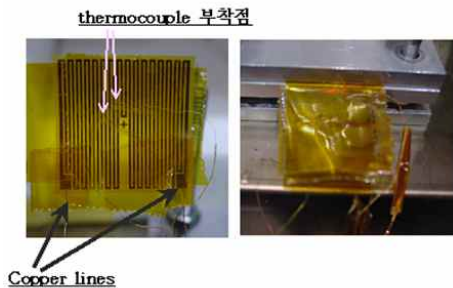


그림 7. 주기가열을 위한 필름 히터

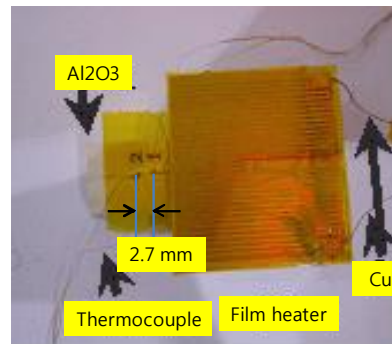


그림 9. 세라믹 시편과 히터, 열전대의 위치

온도에 따른 세라믹의 열확산도 참고 데이터는 식 (4)와 같다.[8]

$$\alpha = \frac{3.86 \times 10^{-3}}{T - 87.6} - 1.49 \times 10^{-5} + 3.08 \times 10^{-8} \cdot T - 2.65 \times 10^{-11} \cdot T^2 + 8.27 \times 10^{-15} \cdot T^3 \quad (4)$$

2.4 표준시편의 열확산도 측정

측정장비를 검증하기 위해 열확산도 값이 알려진 세라믹 (Al₂O₃) 시편을 사용하였다. 그림 9에서 열전대 #1과 #2의 거리는 2.7mm이고 열전대 #1과 히터 끝단까지의 거리는 3.5mm이다. 이

식 (4)로 구한 열확산도 값을 표준 값 (reference)이라 정의하고 측정값과 표준 값을 그림 10에 나타내었다. 측정값과 표준값은 320K와

- 료의 열전도도”, 한국복합재료학회지, 제15권, 제5호, 2002, pp.27-34
3. H. Nagano, H. Kato, A. Ohishi, Y. Nagasaka, “Measurement of the Thermal Diffusivity of an Anisotropic Graphite Sheet Using Lasher - Heating AC Calorimetric Method”, International Journal of Thermophysics, Vol. 22, No. 1, 2001, pp. 301-312
 4. 조장호, 김영채, 이성철, “다공성 고온 절연체의 열전도도 특성”, Journal of Korean Association of Crystal Growth, Vol. 7, No. 3, 1997, pp. 504-513
 5. 이상준, “다공성 물질에서의 열전도도 특성 연구”, 포항공과대학, MSC 9726M17, 1998
 6. 열물성 측정 및 분석 세미나, 한국과학기술원, 2006.
 7. 大村高弘, 坪井幹憲 “周期加熱法による耐火材の熱傳導率測定,” ニチアス技術時報, 4號, No. 326, 2001
 8. Standard Material Series, Japan Fine Ceramics Center (JFCC)

후 기

본 연구의 일부는 한국연구재단 지원 국제협력연구사업에 의해 수행되었습니다.