

【 論 文 】

고령 토의 열전도계수 측정을 위한
반경방향 열흐름법

Radial Heat Flow Method for Measuring the Thermal
Conductivity of Kaolin

박 희 용 * 이 흥 주 ** 강 건 ***
Hi-Yong Pak Hung-Joo Lee Kun Kang

ABSTRACT

In this study, the equipment for thermal conductivity measurement by radial heat flow method was constructed in order to measure the powder state materials like kaolin.

The Kaya and Hadong kaolins were chosen as the test powders because of their abundant reserves and the thermal conductivity values of those powders were measured at the different temperatures and densities.

As the results of this study, it was found that the thermal conductivity of kaolin was constant at rather low temperature range from 10 to 42°C and greatly affected by the density variation.

NOMENCLATURE

B : dimensionless number for radial distance
Fo : Fourier number
h : convective heat transfer coefficient
k : thermal conductivity of kaolin
 k_{cw} : thermal conductivity of cooling water
 ℓ : length of the test heater
Nu : Nusselt number
q : heat transfer rate

r : radius
 r_i : inner radius of cooling jacket
 r_o : outer radius of cooling jacket
 r^* : the ratio of inner radius to outer radius of cooling jacket
R : electric resistance
t : time
T : temperature
V : voltage
 α : thermal diffusivity

* 정회원 : 한양대학교 기계공학과
** 육군사관학교 병기공학과
*** 정회원 : 한양대학교 대학원 기계공학과

1. 서 론

제품의 제조과정이나 성능을 해석할 때에는 일반적으로 그 물질의 열적성질이 중요하고, 특히

열전도계수는 열적 해석시 대단히 중요하다. 대부분의 건축재료에 대해서는 열전도계수 값이 측정되어 문헌상에 나타나 있으나 고령토를 포함한 각종의 흙능과 같은 분체에 대해서는 열전도계수 값에 대한 연구가 흔치 않다.

일반적으로 열전도계수를 측정하는 데에는 열평형이 이루어진 정상상태에서 측정하는 방법과 열평형이 이루어지지 않는 비정상상태에서 측정하는 두가지 방법이 있다.

정상상태에서 측정하는 방법으로는 축방향 열흐름법과 반경방향 열흐름법이 있으며, 시편을 직접 전기를 통하게 하여 가열한 후 한쪽 끝에서 냉각시켜 측정하는 직접전기가열법 및 이미 열전도계수값을 알고 있는 기존의 재료와 상호 비교하여 시편의 열전도계수를 구하는 열비교법이 있다.^{1,2)}

비정상상태에서 측정하는 방법에서는 대부분의 경우 열확산계수를 측정하여 이미 알고 있는 밀도와 비열의 값을 가지고 열전도계수값을 환산하여 얻는다. 비정상상태 측정법은 주기적으로 열을 가한 후 온도를 측정하여 열확산 방정식을 풀어서 구하는 주기적 열흐름법과 시편의 온도가 상승하거나 하강하는 과도기에서 시편의 온도를 측정하여 해석하는 과도 열흐름법의 두가지로 나눈다.³⁾

이 연구에서는 위의 방법중 정상상태에서 측정하는 방법의 일종인 반경방향 일차원 열흐름법을 이용하여 분체상태의 고령토의 열전도계수를 측정할 수 있는 장치를 설계하여 제작하였고 이 장치의 타당성을 확인하기 위하여 이미 열전도계수값을 알고있는 모래에 대한 열전도계수값을 측정하여 기존값과 비교하였다. 제작한 장치의 타당성을 확인한 후 건조상태의 가야산과 하동산 고령토의 열전도계수를 측정하였다.

2. 이론해석

반경방향 열흐름법이란 열전도계수를 측정하려

는 분체를 채워 넣은 시험원통의 중심부에 봉형 히터를 설치하여 그것이 열원의 역할을 하므로써 고온부를 이루게 하고 시험원통의 둘레에 환상 공간을 만들어 냉각수를 순환하도록 하여 대류를 통해 열을 빼앗는 역할을 하게 하므로써 저온부를 형성하도록 하는 것이다. 이 장치로 부터 열전도계수를 구하는 식은 Fourier 열전도법칙에서 다음과 같이 된다.

$$k = \frac{-q}{2\pi r \ell (dT/dr)} \quad (1)$$

식 (1)을 사용하여 정상상태가 되었을 때 반경방향의 온도구배와 열전달을 측정하여 열전도계수를 구하고자 한다. 이 연구의 장치에서 정상상태라 함은 단위길이의 히터에서 발생하는 열전달 q_1 과 냉각수로 빠져나가는 열전달 q_2 가 서로 같을 때이다. q_1 은 히터의 길이 ℓ 과 저항 R 및 히터에 걸어준 전압 V 에 따라 $V^2 / (R\ell)$ 로 계산되고 power supply 를 사용하여 일정한 값으로 만들어 줄 수 있다. 그러나 단위길이의 냉각부를 통하여 나가는 열전달 q_2 는 $h(2\pi r_i) \cdot (T_i - T_{CW})$ 가 되어 대류열전달계수 h 와 냉각수를 온도 T_{CW} 가 계속 일정한 값을 유지한다 하더라도 시험원통의 외벽 온도 T_i 가 정상상태에 도달하기 전에는 계속 변하는 값이므로 q_2 는 비정상상태에서는 계속 변하는 값이 된다. 마찬가지로 정상상태에 도달되어 즉, T_i 가 일정하게 되어도 q_2 가 일정하려면 h 와 T_{CW} 가 일정해야만 한다.

이 연구에서 제작하려는 실험장치에서 h 와 T_{CW} 가 일정함에 대한 이론적 배경은 다음과 같다. 환상공간을 통한 냉각수 유동이 완전히 발달된 층류이고, r_i 에서 일정 열유속이 있으며 r_o 에서는 단열된 경우 r_i 에서의 Nusselt 수는 단지 환상공간의 반경비 $r^* = r_i / r_o$ 만의 함수임이 Lundburg 등 4) 의 연구결과에 나타나 있다. 따라서 환상공간의 크기와 시험원통의 반경의 크기가 정하여지면 고정상수값으로의 대

류열전달계수를 구할 수 있다. 또한 냉각수를 순환수로서 이용하였으므로 q_2 만큼 얻은 열에 대하여 냉각수의 온도는 증가할 것이다. 따라서 이 온도의 증가를 막기 위하여 냉장장치가 요구된다.

이상의 장치모델과 더불어 실험장치를 설계 및 제작하기 전에 다음과 같은 수치해석을 하여 결정해야 될 모델에 대하여 검토해 보았다. 즉 시험원통의 반경, 입력열유속, 분체의 초기 온도 및 열교환장치가 있을 시 냉각수의 온도를 어떤 값으로 택하여야 제작하려는 장치에서 분체의 온도가 신속히 정상상태에 도달될 수 있으며 또한 분체의 최고온도와 최저온도는 각 경우에 대하여 어떤 값을 취하는 지를 검토하였다.

2.1 수치해석

수치해석을 위하여 다음과 같은 가정을 세웠다.

- (1) 반경방향 1차원 비정상상태 열전도이다.
- (2) 시험원통 및 히터봉은 열전도계수가 매우 큰 동으로 제작함으로써 이를 통한 열전도는 무시한다.
- (3) 열전도계수와 열확산계수는 상수로 취급하고 점토의 대표값을 취급하였다.
- (4) 환상공간을 통한 냉각수의 유동은 완전히 발달된 층류유동이다.

위의 가정에 따른 시험분체의 지배 방정식과 경계조건은 아래와 같다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial t} \dots\dots\dots (2)$$

$$r = 0.01 \text{ m에서 } q = q_1 \ell$$

$$r = r_i \text{ 에서 } q = q_2 \ell$$

수치해석을 위한 시험분체의 요소는 Fig. 1 과 같다.

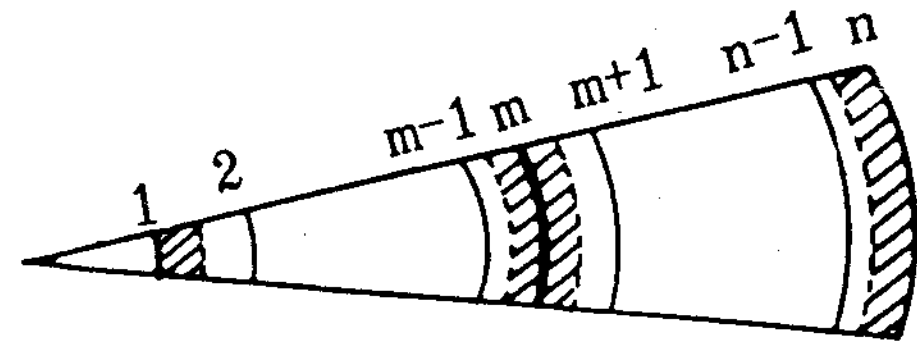


Fig. 1 Element for the numerical analysis

Fig. 1에서와 같이 node 수는 n 개로 하였고 $m = 2, 3, \dots, n-2, n-1$ 이다.

r_i 은 0.01 m로 히터관의 반경이고 $r_n = r_i$ 이다. Fig. 1의 빗금친 3개의 검사체적에 대하여 다음과 같은 무차원수와 무차원변수를 이용하면 식 (3), (4) 및 (5)를 얻을 수 있다.

$$Fo_1 = \frac{\alpha \Delta t}{((r_i + \Delta r/2)^2 - r_i^2)}$$

$$Fo_2 = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta r^2}$$

$$Fo_3 = \frac{\alpha \Delta t}{(r_n^2 - (r_n - \Delta r/2)^2)}$$

$$B_1 = \frac{r_i + \Delta r/2}{\Delta r}, \quad B_m = \frac{\Delta r}{2r_m}$$

$$B_3 = \frac{r_n - \Delta r/2}{\Delta r}, \quad k_1 = \frac{k_{cw}}{k}$$

$$Nu = \frac{2h(r_o - r_i)}{k_{cw}}, \quad r^* = \frac{r_i}{r_o}$$

$$(1 + 2Fo_1 B_1) T_i^{P+1} - 2Fo_1 B_1 T_2^{P+1} = T_i^{P+1} + \frac{q_1 Fo_1}{k\pi} \dots\dots\dots (3)$$

$$(-Fo_2 + Fo_2 B_m) T_{m+1}^{P+1} + (1 + 2Fo_2) T_m^{P+1} + (-Fo_2 - Fo_2 B_m) T_{m+1}^{P+1} = T_m^P \dots\dots\dots (4)$$

$$-2Fo_3 B_3 T_{n-1}^{P+1} + (1 + 2Fo_3 B_3 + \frac{r^*}{1-r^*} k_1 Fo_3 Nu) T_n^{P+1} = T_n^P$$

$$\frac{r^*}{1-r^*} k_1 FO_3 NuT_{CW} \dots\dots\dots(5)$$

위의 식들은 음함수차분법 (implicit difference method) 을 이용한 차분식이며 linear tridiagonal algebraic equation 이 된다. 이를 Gauss-Seidel 의 반복법으로 해를 구하였고 5,6) 시간증분 Δt 에 대하여 계속 반복시켰으며 정상상태 도달은 10개의 대표적 node 의 시간증분후에 계산된 온도가 시간증분 전에 개선된 온도와 차의 합이 0.1 보다 작을 때라고 가정하였으며 이 때의 최고온도와 최저온도를 구하였다.

수치해석에서 node 수 n 은 101 개를 취하였고 히터봉의 반경 r_1 을 0.01 m 로 잡았으므로 $r = (r_i - 0.01) / 100$ 이 된다. Lundberg 등 4) 이 계산한 식을 이용하기 위하여 $r^* = 0.6$ 과 $r^* = 0.8$ 인 두가지 경우에 대해서 반경의 영향을 조사하였는데 이때 r_i 는 각각 75 와 200 mm 로 하였다. 또한 q_1 은 30, 45 및 60 W/m 에 대하여, 분체의 초기온도는 15, 20 및 25 °C 에 대하여 냉각수의 온도는 2.5 및 10 °C 에 대하여 수치계산을 수행하여 가열을 시작한 후 정상상태에 도달하는데 걸리는 시간과 정상상태에서의 시험분체의 온도범위를 살펴보았다.

계산결과를 살펴본 결과 히터에 가열량이 크고 분체의 초기온도가 낮으며, 냉각수의 온도가 높고, 시험원통의 반경이 작을 수록 시험분체의 온도분포가 빨리 정상상태에 도달함을 알았다. 더우기 시험원통의 반경의 크기는 작을수록 상당히 큰 차이로 정상상태에 도달하는 시간을 단축시켰다. 정상상태에 도달되었을 때 시험분체의 온도범위와 온도의 절대값에 대하여 살펴본 결과 분체의 초기온도는 별로 영향을 미치지 않았으나 히터의 가열량이 크고 시험원통의 반경이 클수록 온도범위는 커지고 냉각수의 온도가 높을수록 분체온도의 절대치는 높아짐을 알 수 있었다.

2.2 실험장치의 모델링

수치계산의 결과 시험분체의 초기온도, 냉각수의 온도, 히터의 가열량, 시험장치의 반경등이 시험분체의 온도분포가 정상상태에 도달하는데 걸리는 시간과 시험분체내의 온도범위에 미치는 영향이 위와 같이 나타났다 할지라도 이 연구에서는 수행이 가능한 실험 조건에 따라 수정된 조건으로 실험장치를 설계하였다. 먼저 냉동기가 없는 상황에서 냉각수의 온도를 장기간 일정하게 유지하기는 불가능하여 이 연구에서는 냉각수의 저장탱크를 가능한 한 크게 만들어 측정을 하는 동안 냉각수는 약 1 내지 2 °C 의 일정한 온도를 유지하도록 하고자 한다.

열전도계수의 측정은 한가지 종류에 대한 실험이 장기간 요할 것으로 판단되고 또한 계절에 따라 실험실내의 온도가 변하므로 초기 온도는 측정 당시의 초기온도를 그대로 사용하기로 하였다. 히터에 가하여지는 열량은 클수록 시험분체내의 온도분포가 정상상태에 빨리 도달하고 관찰하려는 온도범위가 커지므로 열량을 크게 하는 것이 바람직 하지만 제작의 어려움등을 감안하여 적절히 조정하기로 하였다. 장치의 복잡성과 제작비용 및 제작기간등의 문제로 인하여 여러개의 장치를 만들 수 없으므로 시험원통의 반경만은 매우 심각하게 검토되었다. 시험원통의 반경이 작을 수록 정상상태에는 빨리 도달하지만 온도범위가 작기 때문에 여러 온도에서의 열전도계수를 측정하기 힘들고 또한 장치안의 여러 위치에서의 열전도계수를 측정하기 위해서는 되도록 많은 열전대를 설치하여야 하며 이들 열전대를 설치하는 데에는 주로 손작업으로 해주어야 하므로 손작업이 비교적 쉽고 또한 온도범위가 적절하다고 판단되는 175 mm 로 하였다. 시험원통의 길이는 반경방향으로 온도분포가 1 차원을 이루게 한다는 관점에서 보면 가능한 한 크게하는 것이 바람직하나 시험분체를 충전시킬 때 열전대를 시험부

중심에 심는 일 역시 일련의 손작업으로 수행한다는 점을 감안하여 720mm로 하였다.

3. 실험

이 연구에서 사용하게 되는 반경방향 열흐름법을 이용한 시험장치는 Fig.2에 나타낸 것처럼 크게 시험원통, 히터와 열유속제어부, 온도 측정부 및 냉각장치로 구성된다.

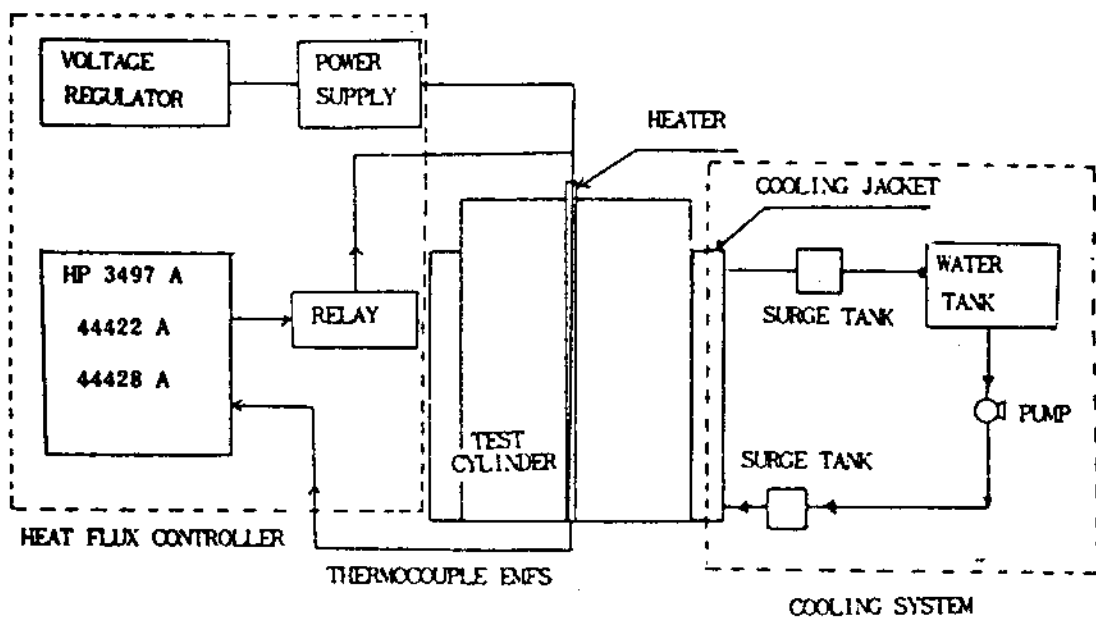


Fig.2 Schematic diagram of overall test apparatus

3.1 시험원통

시험원통은 Fig.3에 나타낸 것처럼 직경이 350 mm이고 길이가 720 mm인 원통과 그를 밑 바닥으로부터 둘러싼 직경이 450 mm이고 길이가 640 mm이며 환상공간이 50 mm인 냉각수자켓으로 구성된다.

물자켓으로 순환되는 냉각수의 입, 출구로서 물자켓의 윗끝과 아랫끝에서 각각 50 mm 떨어진 지점의 외직경이 20 mm이고 내직경이 18 mm이며 길이가 80 mm인 동파이프를 원통둘레에 90도 간격으로 용접하였다. 시험원통, 냉각수자켓을 형성하는 주위원통, 바닥판 및 물자켓의 환상공간 윗덮개는 모두 두께가 1.2 mm인 동판으로 만들었다. 동판의 용접은 argon 용접이 적합하였으며 제작시 시험원통이 진원을 이루게 하기 위하여 시험원통 윗쪽 원둘레에 두께가 6 mm이고 외직경이 405 mm이며 내직경이 350 mm인 환상형의 동으로 된 띠를 용접으로 둘러쌌다.

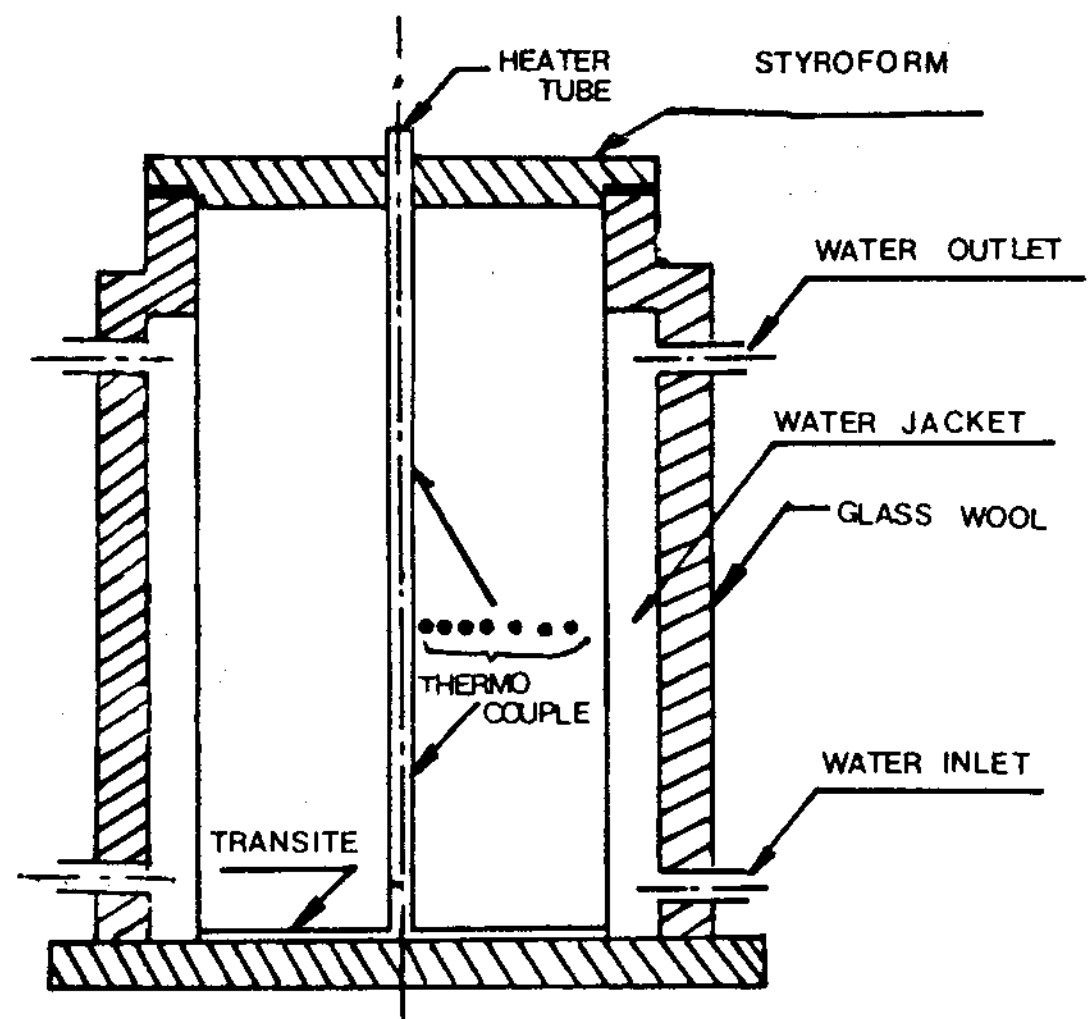


Fig.3 Test cylinder assembled for test

시험원통의 바닥을 통한 열전도를 줄이기 위하여 바닥에 단열판을 깔았다. 단열판은 두께가 4 mm이고 열전도계수가 작은 두 장의 밤나이트 (transite) 판을 접착하여 만들었는데 접합하기 전에 윗판의 중심에 히터관의 직경과 같은 직경 22 mm의 구멍을 뚫어 히터관의 고정부를 만들어 주었다. 밤나이트의 외직경은 시험원통의 직경인 350 mm보다 약간 작게 제작하여 삽입이 용이하게 하였다.

시험원통의 아랫면을 단열하기 위하여 시험원통과 받침대 사이에 두께 50 mm의 스티로폼판을 깔아주었다. 특히 시험원통의 윗부분에도 두께 50 mm의 스티로폼판을 덮었는데 판의 중앙에 구멍을 내어 히터봉의 윗부분의 지지역할을 하도록 하였고 고령토의 온도측정용 열전대들이 빠져나오도록 스티로폼판덮개와 시험원통이 접하게 될 부분에 조그마한 구멍을 만들어 주었다.

물자켓과 냉각수출입관의 단열을 위하여 두께 25 mm의 유리솜을 두겹으로 하여 시험원통 주위를 완전히 씌우고 그 위에 알루미늄 종이를 다시 씌웠다.

3.2 히터와 열유속제어부

정상상태의 반경방향 열흐름법을 이용한 열전도계수 측정장치에서는 시험원통안에 충전한 고령토의 온도구배가 반경방향으로만 생기도록 하여야 하기 때문에 시험원통안에서 측정방향으로는 열전달이 생기지 않도록 하여야 한다. 따라서 히터는 축방향 전체길이에 대하여 균일온도가 이루어져야 하고 이를 위하여 이 연구에서 사용한 히터관 안에는 중앙에 시험부히터를 만들고 시험부히터 양단에 두개의 보조히터(guard heater)를 설치하였다.

직경이 17mm이고 길이가 250mm인 3개의 세라믹보빙 가운데 2개는 양쪽 끝의 보조히터용으로 사용하고 나머지 하나는 길이를 100mm로 잘라 중앙의 시험부히터용으로 사용하였다. 사용한 세라믹보빙에서 직경이 4.8mm인 4개의 구멍이 나있는데 3개의 히터로 부터 나오는 총 6개의 니크롬선을 서로 접촉함이 없이 4개의 구멍으로 끌어 낼수 없기 때문에 2개의 구멍에는 직경이 4.8mm이고 길이가 100mm이며 그 안에 2개의 작은 구멍이 뚫려있는 보조세라믹보빙을 억지끼움으로서 6개의 니크롬선이 히터관의 윗쪽으로 나올 수 있게 하였다.

세라믹보빙의 표면에 나선형으로 홈을 파고 이 홈을 따라 직경이 0.5mm이고 11.5 ohms/m의 저항을 갖는 니크롬선을 감아서 히터를 만들었다. 이와 같이 만든 히터의 전기저항은 시험부히터가 19.8 ohms, 아래쪽 보조히터는 35.5 ohms, 윗쪽 보조히터는 30.5 ohms을 나타내었다.

세라믹보빙 둘레에 감은 니크롬선과 히터관 사이의 절연을 위하여 니크롬선 주위를 석면테이프를 감았는데 이 때 석면테이프는 각각의 히터가 히터관 안에서 움직이지 못하게 하는 역할까지도 담당할 수 있었다. 이와 같이 만든 히터를 외직경이 22mm이고 내직경이 19.2mm이

며 길이가 800mm인 동으로 된 히터관 안에 삽입하였다. 히터관의 윗쪽 니크롬선이 빠져나오는 부분은 시험원통안에 고령토를 충전할 때 고령토가 들어가지 못하도록 유리솜으로 봉하였다.

시험원통안의 고령토에서 축방향으로의 균일온도를 유지하기 위하여 시험부히터와 2개의 보조히터의 열유속을 조정하여야 하는데 이를 위하여 각 히터의 중앙부에 해당하는 히터관표면위치에 열유속제어용 열전대를 부착하였다. 이 때 사용한 3개의 열전대는 직경 3mm의 T형이다.

각 열유속제어용 열전대는 Hewlett Packard사 제품인 패널 4442A를 통하여 data acquisition/control unit의 모델 3497A에 연결하여 제어하도록 하였다.

열전대로 부터 입력된 전압은 사용자의 프로그램을 사용한 software compensation 방법에 의하여 보상되어 각 히터표면의 온도차가 0.5°C이내가 되도록 조정하였다. 실험을 하는 도중 각 히터의 표면온도의 차이가 0.5°C 이상이 되는 경우 가장 높은 온도를 나타내는 히터의 전원을 차단하여 주기 위하여 이 히터의 입력은 열전대의 전압을 읽을 때와는 반대로 제어장치인 모델 3497A에 연결된 패널 44428 actuator/digital output assembly에 보내서 각 히터에 입력을 보내는 ED engineering사 제품인 power supply 모델 200(0-20 volts)와 모델 ED-245 B(0-30 volts)에 연결된 릴레이 (한국릴레이사 제품, 모델 710-29)에 개폐신호를 보내어 제어되도록 하였다.

3.3 온도 측정부

시험분체내의 온도분포를 측정하기 위하여 시험원통의 밑판으로부터 30mm 되는 시험부의 중심높이에 9개의 열전대를 히터관으로부터 반경방향으로 각각 0.2, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10 및 13

0mm의 위치에 심을 수 있도록 하였다. 열전대의 열점의 위치가 흔들리지 않도록 스티로폼을 얇게 잘라 만든 작은 막대에 그 간격에 맞도록 열전대를 끼워서 설치하였다. 이 때 사용한 열전대를 지름이 0.9mm인 K형으로 하였다. 고령토내에 심은 9개의 열전대의 열점으로 부터 발생하는 기전력을 측정하기 위해 Hewlett Packard사의 제품인 data acquisition/control unit의 모델 3497A에 연결된 44422A 온도측정용 패널에서 끌어낸 리드선을 만능기판에 열전대선들과 납땜으로 연결하였다. 또한 외부잡음을 제거하기 위하여 열전대의 피복을 접지시켰다. 이렇게 입력된 기전력은 controller (HP 9845B)에 입력되어 software compensation을 거쳐 온도로 환산되도록 프로그램하였다.

3.4 냉각 장치

용량이 400 리터인 폴리에스텔 원통형 탱크에 두께 50mm의 유리섬유를 두겹으로 씌운 후 알루미늄종이로 싸서 냉각수 저장탱크로 이용하였다. 냉각수 저장탱크에 입, 출구가 각각 한개씩이므로 물자켓에 설치한 각각 4개씩의 입, 출구로 냉각수를 순환시키기 위해서는 두개의 surge tank가 필요하다. 각 surge tank에는 총 5개의 출입구를 만들어 1개는 냉각수 저장탱크와 연결하고 나머지 4개는 물자켓의 입, 출구와 연결시켰다.

냉각수를 순환시키기 위한 펌프로는 Baldor Electric Co.의 0.5마력 축류펌프를 이용하였고 본 펌프로 생성되는 유량에 따른 물자켓에서의 냉각수의 유속은 약 0.05 m/s로 유지하였다. 이 속도에 따른 Reynolds 수는 층류범위에 속한다. 물자켓의 냉각수 입구를 윗쪽으로 하게 되면 냉각수가 물자켓에 완전히 채워지지 못하는 경우가 생기게 되므로 입구를 아래쪽으로 택하였다.

4. 결과 및 토의

실험장치를 제작한 뒤 이 장치가 고령토와 같은 분체의 열전도계수를 정확히 측정할 수 있는지의 여부를 확인하기 위하여 이미 열전도계수의 값이 알려져 있는 모래에 대하여 예비실험을 수행하였다. 모래에 대한 실험을 수행한 결과 이 연구에서 제작한 실험장치가 분체의 열전도계수 측정에 이용될 수 있다는 사실을 확인한 후에는 쉽게 획득이 가능했던 하동산과 가야산의 고령토에 대하여 실험을 다시 수행하였다.

4.1 모래에 대한 실험

건조상태의 모래에 대한 열전도계수값은 비교적 널리 알려져 있다. 그러나 참고문헌에 주어진 값들은 서로 일치하지 않는다. 모든 참고문헌을 조사할 수는 없으나 참고문헌 7, 8, 9 및 10의 값을 종합하여 본 결과 0.25 내지 0.45 W/m·K라 할 수 있다. 물론 세계 각국의 모래가 모두 동일한 성분은 아니겠지만 이와 같이 넓은 범위의 값으로 열전도계수값이 알려져 있기 때문에 비교치로는 충분하다고 판단된다. 모래를 건조시키기 위하여 5 KW의 열판옆에 벽돌을 쌓고 그 위에 동판을 얹어서 약식 건조기를 구성한 뒤 측정할려는 모래를 충분히 건조시켰다. 건조된 모래는 2.38 mm의 표준망채를 이용하여 직경이 2.38mm 이상의 알맹이는 제거시켜 어느 정도 균질성을 유지시켰다. 그러나 시험원통에 충전할 모래를 소형의 약식 건조기로 한꺼번에 전부 건조시킬 수가 없어서 여러회에 나누어 건조시킨 모래를 쌓아 두는 동안 실험실 대기내의 수분의 영향을 받아 수분함량은 증가하게 된다. 건조시킨 모래의 수분함량을 측정하기 위하여 10 내지 15 g의 5개의 표본을 추출하여 Sauter 사제품의 모델 RE 1614 digital balance (정밀도 = 0.0001g, 최대측정치 = 110g)로 측정하고 열판위에서 다

시 완전히 건조시킨 뒤의 무게를 측정한 결과 수분의 함량은 약 4%로 거의 건조된 상태로 볼 수 있었다. 이 때 수분의 함량 %는 완전 건조 상태의 모래무게에 대한 수분무게의 백분율이다.

건조한 모래를 시험원통의 중심높이인 300 mm 지점까지 채운 뒤 9개의 열전대가 고정된 스티로폼막대를 심고 다시 모래를 시험원통의 윗끝까지 채운 후 스티로폼덮개를 씌웠다.

시험원통안의 모래의 온도분포가 반경방향으로 1차원이 되도록 하기 위하여 히터봉에 가운데를 주히터로 하고 주히터의 양쪽끝에 보조히터를 두어 이들 히터 중앙에 설치한 열전대가 측정한 온도차이가 0.5°C 이내가 되도록 각 히터에 들어가는 열유속을 제어하였으나 반경방향으로 멀리 떨어진 위치에서의 모래의 온도도 역시 반경방향으로 1차원이 되는 것을 확인하기 위하여 주히터의 중심높이를 중심으로 상,하 70 mm 떨어지고 시험원통의 내벽으로부터 10mm 이내로 가까운 지점에 3개의 K형 열전대를 심었다.

냉각수의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 약 800×400×200mm의 얼음조각 4개를 냉각수 저장탱크에 넣었다.

좀더 빠른 시간안에 모래안의 온도의 정상상태를 얻기 위하여 시험원통안에 충전된 모래에 열이 충분히 확산된 후에 냉각수를 순환시켰다. 히터에 가해주는 열유속의 경우 시험 열유속이 일정하게 유지되도록 power supply를 작동시켰으며 이 때 주히터로부터의 열유속은 히터의 축방향 단위길이당 26.2 W/m를 유지시켜 주었다.

온도측정은 앞서 설명한 바와 같이 Hewlett Packard사의 data acquisition system으로 3초 간격으로 수행하였고 측정값을 2내지 5분 간격으로 프린터 시켰다.

모래안에 9개의 위치에서의 온도가 2분 동

안 변한 값의 절대치의 합이 0.5°C이하가 될 때를 정상상태로 잡았다. 히터에 가열을 하고 냉각수를 순환시키기 시작한 3시간 10분 뒤에 정상상태에 도달되었다. 9개의 위치에서의 온도차의 합이 0.5°C란 말은 한 위치에서의 온도차이는 약 0.05°C에 해당하므로 충분히 정상상태로 볼 수 있으나 정상상태를 나타낸 시간 이후 30분간 더 측정하여 이 기간동안의 각 점의 온도의 평균치를 그 지점에서의 온도로 취하였다.

모래안의 반경방향의 온도분포가 정상상태에 도달하였을 때 축방향으로 균일하게 이루어졌는가를 검토하기 위하여 앞서 설명한 바와 같이 주히터의 중심높이를 중심으로 상, 하로 70 mm 서로 떨어지고 시험원통의 내벽 가까이 설치한 열전대가 지시하는 온도를 측정하여 본 결과 위로 부터 각각 4.2, 4.1 및 4.0°C였다. 즉 반경방향의 온도분포를 측정한 시험원통의 중심높이 위치에서 시험원통의 축방향으로 140 mm되는 거리에서 0.2°C의 차이를 나타내고 있으므로 시험원통안의 모래의 온도분포는 충분히 1차원 정상상태라 볼 수 있다.

열전도계수가 측정되는 모래의 밀도(엄격히 말하자면 비중이라 하여야겠지만 편의상 밀도라 부르겠음)를 구하기 위하여 시험원통안에 충전할 모래보다 약간 더 많은 양의 모래의 무게를 앓은뱅이 저울로 측정하고 충전이 끝뒤에 남은 모래의 무게를 측정하였다. 시험원통안에 충전된 모래의 정미중량을 알게 되면 시험원통안에 모래가 충전된 체적을 측정하여 모래의 밀도를 구할 수 있다. 이와 같이 하여 구한 모래의 밀도는 1371 kg/m³이었다.

식 (1)에서 $q/\ell = q_1$ 이라 하고 짧은 거리에서의 온도구배 dT/dr 을 $\Delta T/\Delta r$ 로 나타내면 식 (1)은 다음과 같이 된다.

$$k = \frac{q_1}{2\pi r(\Delta T/\Delta r)} \dots\dots\dots (6)$$

식 (6)에서 q_1 은 실험을 하는 동안 측정된 주히터의 단위길이당 가해진 열량이고 $\Delta T/\Delta r$ 은 반경방향으로 측정한 각 열전대 열점사이의 선형화한 온도구배이며 r 은 히터봉으로 부터 $\Delta T/\Delta r$ 를 구한 두 열점의 중앙점까지의 반경방향의 거리이다. 식 (6)을 사용하여 구한 모래의 열전도계수값을 온도의 함수로 Fig.4에 나타내었다. 이 때의 온도는 $\Delta T/\Delta r$ 을 구한 두 열점온도의 평균치로 잡았다. 그림에서 보는 바와 같이 측정한 모래의 열전도계수값은 10 내지 35°C의 온도범위에서 약간 불규칙적으로 나타났고, 열전도계수값에 영향을 미치는 요소가 많기 때문에 이들 불규칙성을 온도변화에 의한 것이라고 보기는 힘들며 오히려 시험원통안에 충전된 모래의 밀도 및 수분함량의 불균일성으로 인한 것이라 판단된다. 따라서 10 내지 35°C의 온도범위에서 모래의 열전도계수는 측정된 값들의 평균치인 약 0.3W/m·K로 대략 일정하다고

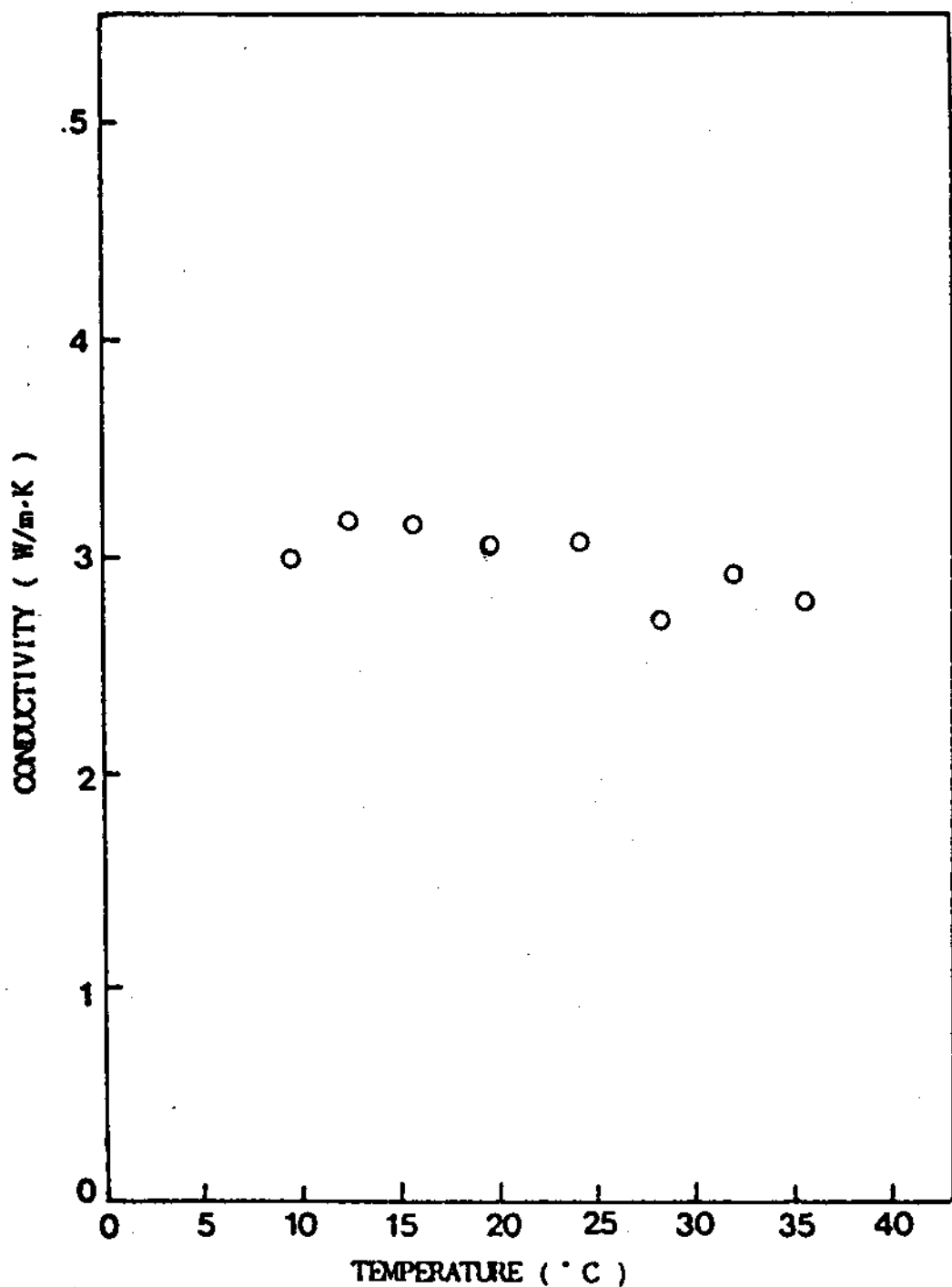


Fig.4 Measured thermal conductivity of dry sand

볼 수 있고 참고문헌 7~10)에 나와 있는 모래의 열전도계수인 0.25 내지 0.45 W/m·K의 범위에 들기 때문에 이 연구에서 제작한 주 실험 장치는 분체의 열전도계수 측정용으로 적합하다고 할 수 있다.

4.2 고령토에 대한 실험

모래를 이용하여 제작한 주 실험장치의 타당성을 확인한 후 고령토에 대한 실험을 다시 하였다. 고령토는 우리나라에서 매장량이 경남 가야와 하동에서 생산된 두 종류였으며 양질의 고령토라고만 알려지고 그들의 등급은 확인할 수 없었다.

고령토를 분말로 만들어주기 위하여 실험실 바닥에 5mm 정도의 두께로 깔아 놓고 roller를 굴러가면서 분쇄하였다. 일단 분쇄된 고령토는 2.38mm의 표준망체로 쳐서 직경이 2.38mm 이상의 입자는 제거시켜 어느 정도 균일한 알맹이 크기를 유지시켰다. 크기가 어느 정도 균일하게 된 고령토는 모래에 대한 실험에서와 같은 방법으로 건조시켰다. 건조한 고령토의 수분함량을 측정하여 본 결과 정확히 균질은 아니지만 평균치로 말하는 약 4% 정도였다. 수분의 함량을 균질하게 만든다는 것은 대단히 어려운 일이다. 수분의 함량은 고령토의 온도, 방 안공기의 온도 및 습도에 따라 시시각각으로 변하고 있음을 관찰하였다. 더우기 많은 량의 고령토를 쌓아 놓았을 때 표면 가까이 있는 것과 깊숙히 있는 것의 수분함량의 차이는 더욱 현저히 나타났다.

분체를 커다란 원통에 충전할 때 낮은 밀도를 유지하기 위해서는 바닥으로 약 10cm 높이에서 조심스럽게 부어 지구중력만으로 충전시키고 높은 밀도를 유지하기 위해서는 분체를 원통바닥에 두께가 약 5cm 정도 충전한 뒤 직경 약 8cm 정도의 나무봉의 끝을 이용하여 다져서 넣은 작업을 반복하면서 충전시킨다. 이와 같은 방법으로 낮은 밀도의 고령토와 높은 밀도

의 고령토를 만들어 줄 때 두 밀도의 차이는 약 13%까지 변화시켜줄 수 있었다.

가야산과 하동산 고령토 각각에 대하여 낮은 밀도와 높은 밀도에서 실시한 총 4회의 실험에 대한 조건을 표로 나타내면 Table 1와 같다.

Table 1 Experimental conditions for Kaya and Hadong Kaolin

Production Place	Average Density (kg/m ³)	Heat Flux (W/m)	Initial Temp. (°C)	Elapsed time to steady
Kaya	1100	24.75	21.62	3hr 30min
Kaya	1000	26.2	24.82	4hr
Hadong	1360	24.75	25.14	4hr
Hadong	1200	26.2	33.3	2hr 50min.

각 실험에서 측정된 열전도계수값을 가야산 고령토에 대해서는 Fig.5에 그리고 하동산 고령토에 대해서는 Fig.6에 나타내었다. Fig.5를 살펴보면 가야산 고령토에서 낮은 밀도는 1000 kg/m³이고 높은 밀도는 1100 kg/m³로 밀도의 증가는 약 10%에 해당한다. 그림에서 점선은 낮은 밀도에서 측정 열전도계수의 산술평균값 0.243 W/m·K를 나타내고 실선은 높은 밀도에서의 평균값인 0.289 W/m·K를 나타내며 이와같이 밀도가 약 10% 증가함에 따라 열전도계수의 값은 약 19% 증가하였다. 두 밀도에서의 열전도계수는 높은 밀도의 경우가 낮은 밀도의 경우보다 더 크다는 것은 확실하지만 온도변화에 따른 변화는 크게 나타나지 않았다.

Fig.6에 나타낸 하동산 고령토에 대한 측정도 밀도변화에 따른 열전도계수 변화의 경향은 가야산 고령토의 것과 비슷하나 온도변화에 따른 열전도계수값의 불규칙성이 좀더 심하게 나

타났는데 그 이유는 온도변화의 영향이라기 보다는 수분함량에 따른 변화라고 생각된다. 앞서

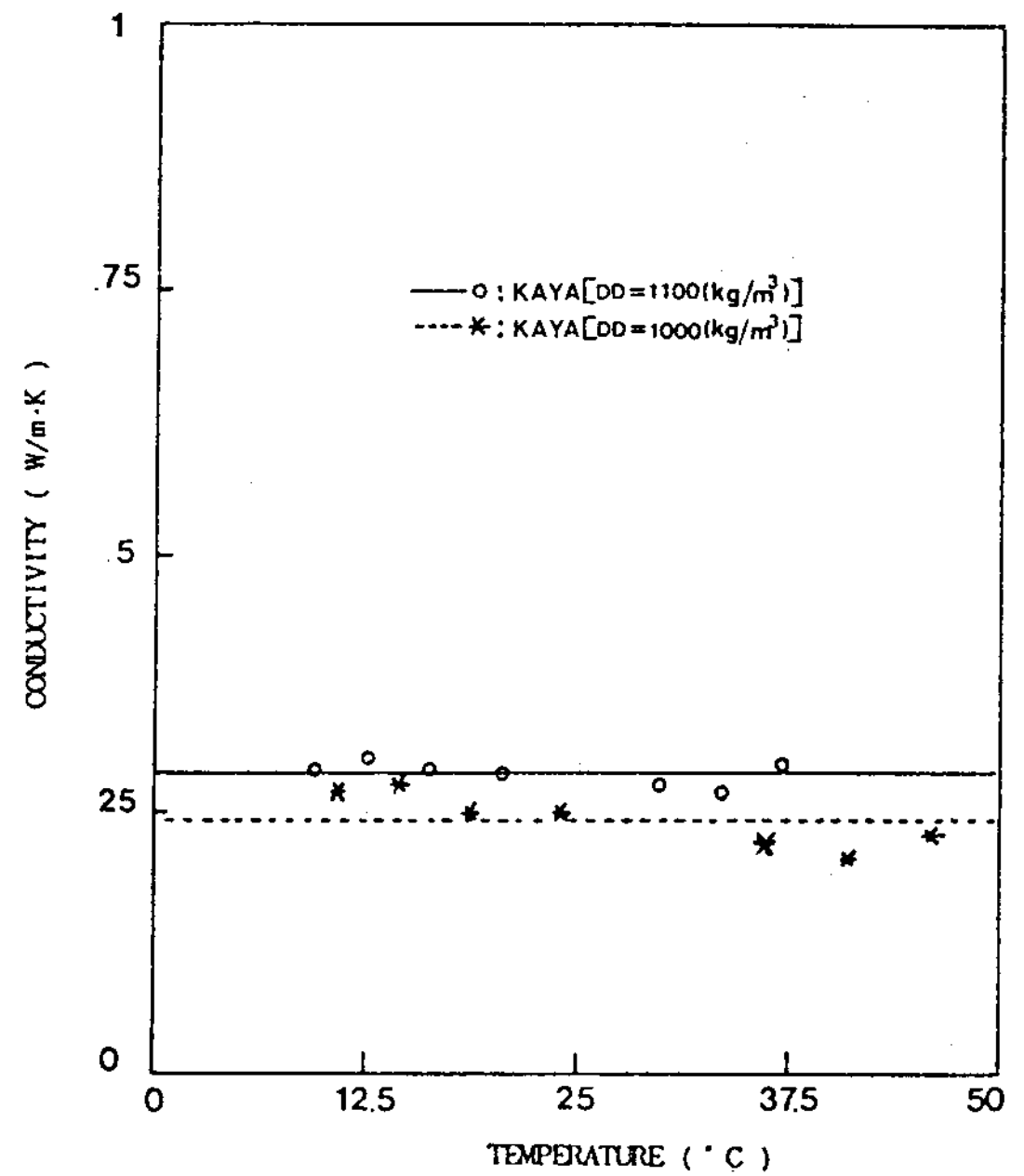


Fig.5 Measured thermal conductivity of Kaya kaolin

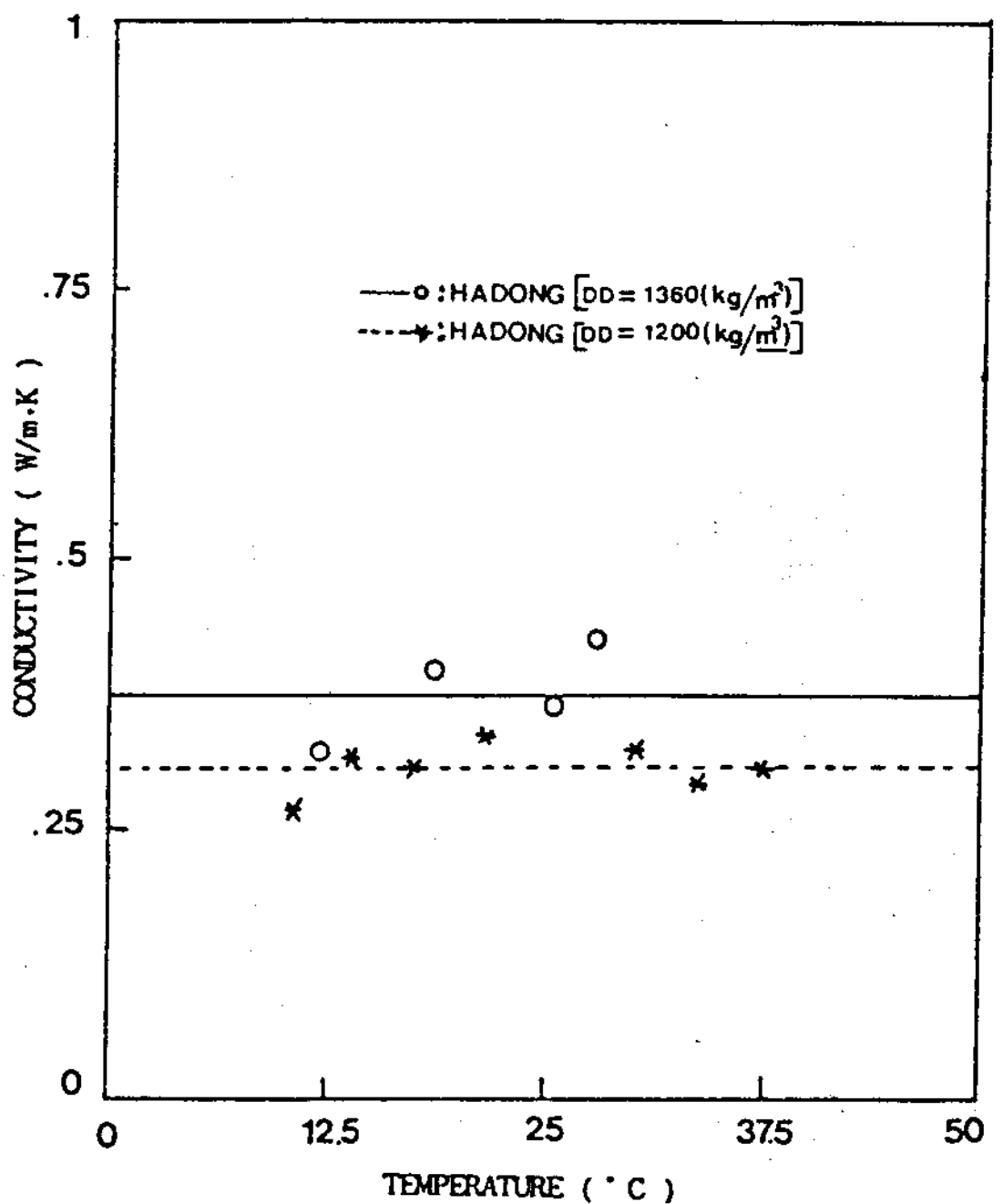


Fig.6 Measured thermal conductivity of Hadong kaolin

언급한 바와 같이 수분의 함량을 일정하게 유지하는 것은 대단히 어려운 일이고 이 실험에서는 시험원통에 고령토를 충전하기 전에 쌓아놓은 고령토의 여러 지점에서 수분함량의 평균치가 약 4%였지만 측정된 각 지점에서의 수분함량이 모두 같다고 할 수는 없다. 하동산 고령토에 대해서는 밀도가 1200 kg/m^3 에서 1360 kg/m^3 으로 약 13% 증가함에 따라 열전도계수는 $0.307 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 에서 $0.375 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 로 약 22% 증가함을 알 수 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 고령토의 열전도계수를 효과적으로 측정할 수 있도록 반경방향 열흐름법 실험장치를 제작한 장치를 이용하여 가야산과 하동산 고령토의 열전도계수를 측정된 결과는 다음과 같다.

1. 온도가 비교적 낮은 10 내지 42°C 사이에서 고령토의 열전도계수는 온도와 거의 무관하게 일정하다.
2. 고령토의 열전도계수는 밀도의 증가에 따라 밀도증가율 보다 크게 증가한다.
3. 10 내지 42°C 사이의 온도범위에서 하동산 고령토의 열전도계수는 밀도 1360 kg/m^3 과 1200 kg/m^3 에 대해서 각각 $0.375 \text{ kg/m}\cdot\text{K}$ 와 $0.307 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 로 나타났고, 가야산에 대해서도 밀도 1100 kg/m^3 과 1000 kg/m^3 에 대해서 각각 $0.289 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 와 $0.243 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 로 나타났다.

후 기

이 연구는 한국과학재단의 1986년도 후반기

연구지원에 의하여 이루어 졌으며 동 재단의 관계제위께 감사의 뜻을 표한다.

REFERENCE

1. D.R. Fynn, "Thermal Conductivity of Ceramics", NBS Spec. Publ., pp. 63-123, 1969
2. A.D. Feith, "A Radial Heat Flow Apparatus for High Temperature Thermal Conductivity Measurement", USAEC Rept. GEMP-296, pp. 1-29, 1964.
3. H.J. Lee, "Thermal Diffusivity in Layered and Dispersed Composites", Ph.D. Thesis, Purdue University, 1975
4. R.E. Lundberg, W.C. Reynolds, and W.M. Kays, NASA TN D-1972, Washington, 1963
5. S.V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corporation, 1980
6. C.F. Gerald, P.O. Wheatly, Applied Numerical Analysis, 3rd ed., Addison-Wesley Publishing Company, 1984
7. F.R. Incropera, D.P. Dweitt, Fundamentals of Heat Transfer, John Wiley and Sons Inc., 1981
8. F. Kreith, Principles of Heat Transfer, 3rd ed., Intext Educational Publisher, 1973
9. F.M. White, Heat Transfer, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1984
10. J.D. Bottorf, "An Investigation of Thermal Conductivity and Rate of Moisture Migration", Ph.D. Thesis, Purdue University, 1951