

우리나라 고령토의 열전도계수에 관한 연구

A study on the Thermal Conductivity of Kaolin in Korea

박 희 용*, 이 흥 주**, 강 건***
H. Y. Pak, H. J. Lee, Kun Kang

ABSTRACT

The steady one dimensional heat flow method was used for the measurement of thermal conductivity of kaolin.

The effects of the classification, density and moisture content on the thermal conductivity were studied experimentally for the 9 classes of kaolin in Korea.

As the results of this study, it was found that the classification did not effect the thermal conductivity, and the conductivity increased as the density and moisture content increased. The correlation equation of the thermal conductivity as a function of the density increase rate was found and the values for the thermal conductivity as a function of moisture content were recommended.

1. 서 론

고령토의 광상은 장석의 풍화 또는 층적층으로 형성되는 것으로 국내 요업 재료로서의 점토광물은 주로 이 고령토이다. 화강암이 풍부한 한국전역에는 풍화작용으로 생성된 광상이 산재하여 있고 특히 하동과 산천지역의 고령토는 품질이 우수하여 세계적으로 널리 알려져 있다. 우리나라는 요업재료에서 만든 양질의 풍부한 원광을 가지고 있는 자원의 부국에 속한다. 현재 요업재료는 고전적인 식기류

의 도자기 뿐 아니라 전자재료, 기계재료, 단열재료 및 광학재료등으로 널리 사용되고 있다.

이 연구의 목적은 요업제조 기술의 발전을 도모하는 기초단계로서 도예품을 만들때 양질의 제품을 만들기 위해서는 반드시 극복하여야만 하는 노(furnace)안의 열전달 문제를 해결함에 있어서 필수적인 고령토의 열전도계수를 측정하여 기본자료로 제공하고자 하는 것이다. 왜냐하면 제품의 질적인 평가는 대부분의 경우 제품을 굽는 온도의 분포에 따라서 또는 제품을 굽는 온도의 균질성 여부에

* 정회원, 한양대학교 기계공학과

** 정회원, 육군사관학교 병기공학과

*** 정회원, 한양대학교 대학원 기계공학과

따라서 크게 달라지기 때문이다. 현재 우리나라의 도예공업의 실상은 노내의 열전달 문제를 효과적으로 처리하지 못하므로 생산된 제품의 많은 양이 생산 또는 운반 과정에서 파손되고 있다. 물론 이것은 취급시의 부주의에도 기인할 수 있지만 근본적으로는 노내의 열전달 문제를 해결하지 못하였기 때문에 발생한 것이다. 지금까지 자기와 광물의 고유특성에 관한 다수의 연구가 진행되어 왔으나 고령토의 성형과정에서 수분의 이동을 포함한 핵심적인 열문제를 다루는 연구는 흔치 않다.¹⁻³⁾

이 연구에서는 정상상태 1차원의 반경방향 열흐름법을 사용하여 우리나라에서 생산되는 총 9 종류의 고령토의 열전도계수를 측정하여 고령토의 종류, 밀도 및 수분함량의 변화가 열전도계수에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다.

2. 실험

2.1 실험방법 및 장치

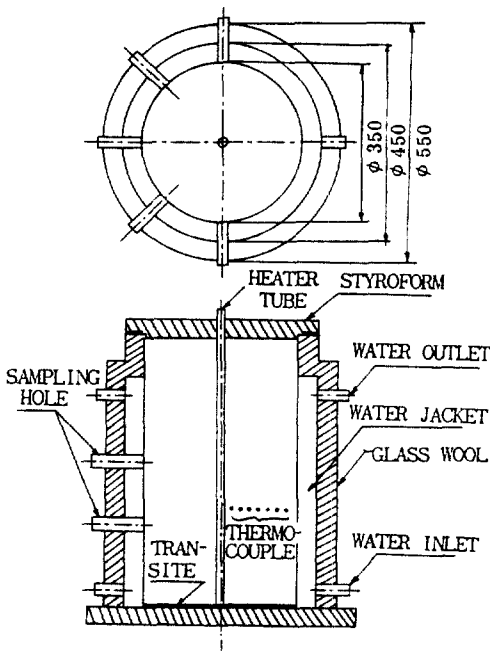


Fig. 1 Sketch of test cylinder

이 연구에서 사용한 정상상태 1차원 반경방향열흐름법이란 열전도계수를 측정하려는 분체상태의 고령토를 중심부에 봉형히터가 설치되고 주위에 환상 냉각자켓이 되어 있는 시험원통에 채워 넣고 가열 및 냉각을 시키면서 고령토안의 온도분포가 반경방향으로 1차원 정상상태가 되었을 때 Fourier 열전도 방정식으로부터 열전도계수를 구하는 것이다. 반경방향으로 나타낸 Fourier 열전도방정식을 열전도 계수에 관하여 써 주면 아래와 같다.

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

식(1)에서 k는 열전도계수, q는 열전달율, r은 반경, ℓ은 원통길이, T는 온도를 나타낸다. 고령토안의 온도분포는 엄격히 말하자면 선형이 아니지만 반경방향으로 많은 수의 열전대를 심어 열전대사이의 간격이 작을수록 선형에 가깝다고 볼 수 있으므로 식(1)의 분모에 있는 온도구배 (dT/dr)은 간격당 온도차이 (ΔT/Δr)로 대체할 수 있다.

이 연구에서 사용하게 되는 1차원 정상상태 반경방향열흐름법을 이용한 실험장치는 시험원통, 히터와 열유속제어부, 온도측정부 및 냉각부로 구성되는데 저자들이 이미 제작하여 장치의 신뢰성을 확인하였고 이 장치의 구조 및 건조상태에서의 열전도계수 측정방법 등에 대한 상세한 설명은 참고문헌(4)에 수록하였다. 그러나 이 장치는 수분함량의 영향이 열전도계수에 미치는 영향을 검토할 수 없게 되어있기 때문에 시험원통을 개조하여 이 연구에 사용하였다.

2.2 시험원통

시험원통은 Fig.1에 나타난 것처럼 직경이 350mm이고 길이가 720mm인 원통과 그를 밑바닥으로부터 둘러싼 직경이 450mm이고 길이가 640mm이며 공간 간격이 50mm인 환상형냉각수자켓으로 되어 있다.

열전도계수 측정시 시험원통의 반경방향 각 위치에서 고령토의 수분함량을 측정할 때 표본 흡인이 튜브 (moisture sampling tube)가

시험원통의 중앙에 설치한 히터쪽으로 정확히 삽입될 수 있도록 하기 위하여 흙받이 튜브안내관 (sampling hole)을 만들어 주었다. 튜브안내관은 외경이 18mm이고 길이가 130mm인 10개의 동관으로 만들었는데 시험원통 중심높이에서 상, 하로 각각 25mm 떨어진 두 높이에서 시험원통의 반 둘레에 서로 45도 간격으로 시험원통의 축중심을 향하여 냉각수 자켓을 관통할 수 있도록 용접하였다. 이와 같이 흙받이 튜브안내관을 시험원통의 반 둘레에 위치시킨 이유는 시험원통의 다른쪽 반 둘레의 중앙에 열전대를 심어서 고령토의 온도를 측정할 때 수분함량측정용 고령토의 제거로 인한 영향을 받지 않도록 하기 위함이다. 또한 흙받이 튜브안내관을 상, 하 두높이에 5개씩 서로 간격을 멀리하여 설치한 것은 한개의 안내관을 통하여 제거된 고령토로 인한 공간이 다른 안내관을 통하여 제거될 고령토의 수분함량에 미치는 영향을 최소화 하기 위함이었다. 수분함량을 측정하기 위하여 표본고령토를 제거하는 작업을 수행하는 시간외 다른 때에는 시험원통 밖으로 돌출한 안내관 끝을 코르크 마개로 단단히 막아주어 시험원통내의 수분이 누출되는 것을 방지한다.

표본흙받이 튜브는 흙받이 튜브안내관의 직경보다 약간 작은 스테인레스관을 길이방향으로 반으로 절단하여 사용하였는데 시험원통으로 들어가는 앞부분은 삽입시 마찰저항을 줄이기

위하여 가늘고 뽀족하게 연삭기로 갈아서 사용하였다.

2.3 실험용 고령토

우리나라 고령토의 주요 매장지는 경남의 하동, 산청 및 성주일대지만⁵⁾ 광산별로 보면 국내에 약 150개의 고령토광산이 있다.⁶⁾ 또한 동일한 광산에서 생산되는 고령토 일지라도 등급별로 그 조성이 다르다. 따라서 이 연구를 위하여 약 150개의 광산별 고령토에 대한 실험을 모두 수행할 수 없기 때문에 고령토의 등급별 분류를 살펴보았다.

우리나라 고령토는 천연상태의 색깔에 따라서 백색과 도색 (pink)으로 분류되고 다시 백색고령토는 4종류, 도색고령토는 5종류로 총 9종류로 분류된다. 등급분류의 기준은 주로 백색도 (whiteness)와 Fe_2O_3 의 함량이고 내화도의 범위는 32내지 36SK로 일정하며 강열감량은 14로 일정하다. 이들 9종류의 고령토에 대한 백색도 및 성분을 표로 나타내면 Table 1과 같다.”

Table 1과 같은 9종류의 고령토를 각 종류별로 150kg씩 획득하였다. 제작한 시험원통안에 들어가는 고령토의 무게는 종류별로 무게가 다르긴 하지만 약 60kg 정도가 충전되는데 수차의 걸친 실험을 하는 동안 손실되는 것을 대비하여 충분한 양을 획득하였다.

Table 1. Classification of kaolin

Colour	Class	Symbol	Whiteness	Al_2O_3 (%)	SiO_2 (%)	Fe_2O_3 (%)	MgO+CaO (%)
White	Special	WS	Above 87	39	45	0.5	1.5
	First	WA	83	38	45	0.6	1.5
	Second	WB	82	37	46	0.8	1.5
	Third	WC	80	36	47	0.9	1.5
Pink	Special	PS	83	38	45	0.7	1.0
	First	PA	76	38	45	0.9	1.0
	Second	PB	68	38	45	1.6	1.0
	Third	PC	67	38	45	2.0	1.0
	Fourth	PD	63	38	45	2.5	1.0

2.4 수분함량

고령토의 수분함량은 건조상태의 고령토의 무게에 대한 수분의 무게의 백분율로 정의한다. 수분함량이 25% 이상이 되면 고령토는 부분적으로 응고되어 시험원통안의 수분함량을 실험초기에 균질로 유지하기가 대단히 힘들다. 따라서 이 실험에서 고령토의 초기수분함량은 최대 25%로 제한하였다.

고령토의 수분을 균등하게 섞어주는 방법으로 실험실 바닥에 커다란 비닐종이를 깔고 그 위에 고령토를 쌓아 놓은뒤 물을 분무기로 분사시키면서 1시간 동안 손으로 섞었다. 이 상태에서 수분이 증발하지 않게 해주기 위하여 두꺼운 비닐종이로 밀봉하였다. 이 상태로 약 6시간이 지난뒤 밀봉한 비닐종이를 걷어내고 다시 손으로 1시간 동안 섞었다. 이와 같은 손작업을 하루에 3번씩 하면서 3내지 4일간 반복하였다. 이와 같은 고령토를 섞는 작업을 여러번 할수록 수분함량의 균질성은 더 좋아짐을 알았다. 여러번 반복하여 섞어준 고령토의 약 20여부분에 대한 수분함량을 측정할 결과 차이가 $\pm 1\%$ 이내가 되었을 때 고령토를 2.38mm의 표준망채로 다시 쳤다. 다시 채로 친 이유는 불균일한 수분함량으로 인하여 서로 엉켜있는 부분을 없애기 위함이다.

수분함량을 균일하게 만들어 준 고령토를 시험원통에 충전하고 히터를 가열하기 직전으로부터 가열을 시작한뒤 고령토안의 온도분포가 정상상태가 이루어질 때 까지의 기간은 대개 4 내지 5일이 걸리게 되는데 그동안에 Hewlett Packard사 제품의 data acquisition / control system을 이용하여 반경방향의 온도분포를 계속 측정하였고 반경방향 수분함량분포는 하루에 1내지 3회에 걸쳐 측정하였다.

수분함량의 측정은 시험원통의 반 둘레에 설치한 열개의 튜브안내관 가운데 1개의 튜브안내관의 코르크마개를 뺀고 표본흡반이 튜브를 삽입하여 표본을 추출한 뒤에 표본고령토를 미리 흡반이 튜브에 표시를 하여놓은 위치인 히터봉의 표면으로부터 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 13 및 16cm 되는 곳을 잘라서 9개의 표본을

만들었다. 이들 표본을 직경 6cm의 스테인레스 접시에 담고 Sauter사 제품의 모델 RE 1614 digital balance (정밀도=0.0001g, 최대측정무게=110g)로 무게를 측정하였다. 이 무게에서 접시의 무게를 빼면 수분이 포함된 고령토의 무게가 된다. 다음에는 이들 9개의 표본이 담긴 접시를 열판위에 놓고 약 30분 동안 건조시킨 다음 무게를 측정하고 이 무게에서 접시무게를 빼면 완전히 건조된 고령토의 무게가 된다. 결국 수분이 포함되어 있는 표본고령토의 무게와 완전히 건조시킨 표본 고령토의 무게를 알면 수분함량을 계산할 수 있다.

흡반이 튜브로 추출한 고령토를 앞서 나타낸 9개의 위치에서 자른 이유는 정상상태에서 실험원통안의 반경방향 온도분포를 측정할 열전대의 위치와 일치시키기 위함이었다. 예를 들면 히터봉의 표면으로부터 반경방향으로 1cm 2cm사이의 고령토의 표본으로 측정할 수분함량은 히터봉의 표면으로부터 1.5cm 되는 거리에서의 평균수분함량을 나타내고 이 순간의 열전도계수는 역시 히터봉의 표면으로부터 반경방향으로 1cm와 2cm 떨어진 점에 위치한 열전대를 사용하여 측정할 두 온도로부터 구한 값이 된다.

3. 결과 및 토의

참고문헌(4)에서 가야산과 하동산 고령토에 대하여 평균수분함량이 약 4%의 건조상태에서의 열전도계수를 측정하여 본 결과에 따르면 고령토의 열전도계수는 10에서 50°C의 범위에서는 온도에 따른 변화를 관찰할 수 없다고 하였다. 고령토의 온도가 100°C에 가까와지면 구성화합물 사이의 화학반응이 일어나기 때문에 이 연구에서는 화학반응이 일어나지 않는 상태에서의 고령토의 열전도계수값을 측정하는 것으로 연구범위를 잡았다. 또한 참고문헌(4)에서 시험원통안에 고령토를 충전하는 방법에 따른 밀도변화에 대해서는 열전도계수가 현저하게 변함을 관찰할 수 있었다. 따라서 이 연구에서는 9종의 고령토 모두에 대하여

밀도변화에 따른 열전도계수의 변화를 관찰하여 보았다. 이 때 고령토안의 수분함량이 약 4% 정도 유지하도록 건조시켜 가면서 실험을 하자면 약식건조기를 사용한다 하더라도 장시간이 소요되고 또한 건조한 고령토를 실험실에 2내지 3일 정도 방치하게 되면 수분의 함량은 약 10% 정도까지 증가함을 관찰하였다. 또한 기후조건에 따라 실험안의 습도가 높아서 고령토의 수분함량이 10% 이상이 되더라도 햇볕에 말리거나 또는 몇개의 선풍기를 사용하여 송풍을 하여주면 쉽게 10% 정도로 유지할 수 있음을 알았다. 따라서 밀도 변화에 따른 열전도계수의 측정실험에서는 9종의 고령토 모두의 수분 함량을 취급하기가 용이한 약 10%로 균일한 상태에서 시행하였다.

이들 실험결과 가운데 PS 등급 고령토에 대한 실험결과를 Fig. 2에 나타내었다. 이 그림은 고령토의 충전방법에 따른 두 종류의 서로 다른 밀도에 대하여 시행한 2회의 실험결과를 나타낸 것이다. 실험을 수행하기 전에 고령토의 수분함량을 약 10%로 유지하여 주는데에는 평균하여 약 4일이 걸리고 고령토를 시험원통안에 충전하여 가열한 뒤 정상상태가 이루어지는 데에는 대개 4내지 5일이 걸리게 되며 따라서 일정한 초기 수분함량과 밀도에 대한 열전도계수 측정실험을 수행하는 데에는 약 10일이 걸리게 된다. 따라서 Fig. 2와 같은 결과를 얻기 위해서는 두가지 밀도에 대하여 실험을 한 것이므로 약 20일이 걸리게 되며 9종류의 고령토 모두에 대하여 실험을 완수하는 데에는 약 6개월이 소요된다. 또한 수분함량의 변화에 따른 열전도계수 변화의 실험 역시 9종류의 고령토에 대하여 수행하여야 하고 이 연구를 완성하기 위한 기간의 제한으로 인하여 Fig. 2와 같은 결과를 얻을 때 반복 실험은 하지 못하였다. 측정점의 위치에 따라서 고령토는 서로 다른 온도를 나타내고 있고 수분의 함량은 실험초기에 약 10%를 유지하였으나 가열을 하는 동안 높은 온도구역에서 낮은 온도구역으로의 수분의 이동이 예상되므로 모든 측정점에서의 수분함량은 균일하다고 볼 수는 없다. 그림에서 보는 바와 같

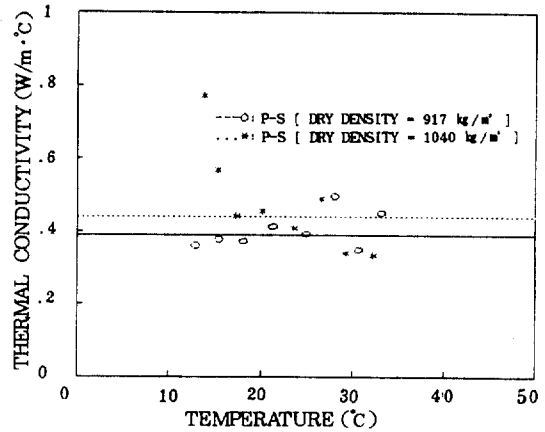


Fig. 2 Thermal conductivity of class PS kaolin at two different densities and constant moisture content of 10%

이 모든 측정치를 통한 열전도계수 변화의 일관성은 작지만 높은 밀도에서의 값이 낮은 밀도에서의 값보다 크게 나타나는 현상은 뚜렷하다. 밀도증가에 따른 열전도계수의 증가를 수치적으로 살펴보기 위하여 각각 서로 다른 밀도에서 얻은 열전도계수값들의 평균치를 계산하여 그림상에 실선과 점선으로 나타내었다. PS 등급 고령토인 경우 밀도가 917 kg/m³일때의 평균열전도계수는 0.394 W/m·°C이고 밀도가 1,040 kg/m³ 일때의 평균열전도계수는 0.467 W/m·°C로 나타났다. 즉 밀도의 증가율이 13.4% 일때 열전도계수 증가율은 18.5%이었다.

PS 등급을 제외한 다른 8종류의 고령토에 대해서도 Fig. 2를 얻을때와 같은 방법으로 낮은 밀도와 높은 밀도에서 열전도계수를 측정하여 Fig. 2와 같은 그림을 그렸고 또한 이들 측정치들을 사용하여 각 등급 고령토의 낮은 밀도와 높은 밀도에서의 평균 열전도계수를 계산하여 본 결과 PS 등급 고령토에서와 같이 높은 밀도에서의 열전도계수값은 낮은 밀도에서의 열전도계수 값보다 현저히 높게 나타났다. 분말상태의 고령토에서 밀도가 증가할 때 열전도계수가 증가함은 당연한 일이라 하겠으나 정량적으로 말하여 밀도가 증가하면 열전도계수는 과연 얼마나 증가하느냐 하는 것이 정확히 규명된다면 열설계에 크게 도움

이 되리라 생각한다. 고령토의 열전도계수값에 대하여 전혀 알려져 있지 않은 상태에서 수행한 이 연구의 단계에서 밀도증가에 따른 열전도계수 증가에 대한 정확한 자료를 얻는다는 것은 다소 무리가 있다고 판단하지만 위에서 구한 고령토 각 등급의 낮은 밀도와 높은 밀도에서 측정된 열전도계수값들의 평균치의 증가율을 그림으로 나타내 보는 것은 대단히 뜻있는 일이라 사료된다. 9 종류의 고령토의 각각에서 밀도증가율에 대한 열전도계수증가율을 그림으로 나타내면 Fig.3 과 같다. 이 그림에서 각 점은 측정치가 아니고 측정치를 바탕으로 하여 계산한 평균치의 증가율을 나타낸다. 예를 들어 PS로 표시한 점(밀도증가율=13.4%, 열전도계수 증가율=18.5%)은 Fig.2에 나타난 16개의 측정치를 사용하여 구한 값이 된다. 그림에서 보는바와 같이 이들 값은 넓은 범위로 확산되어 있고 그 범위는 점선으로 나타내었다. 그러나 WB, WC 및 PD 등급을 제외한 나머지 6 종류의 고령토에 대해서는 비교적 직선상에 놓여 있음을 알 수 있다. 실험을 하는 동안의 수분함량의 변화라든가 시험원통안에 고령토를 충전하는 방법에 따른 밀도의 불균일성 등 복합적인 영향을 고려할 때 이들 데이터가 넓은 범위에 확산되는 정확한 원인을 규명할 수 없으나 위에 언급한 3종의 고령토를 제외한 나머지 6종의 고령토에 대한 데이터는 원점으로부터 거의 일직선상에 놓여 있음을 볼 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 밀도증가율에 대한 고령토의 열전도계수 증가율에 관한 대략적인 지식이나마 정성적으로 알 수 있다면 고령토의 열설계에 큰 도움이 되리라는 의도에서 Fig.3의 결과를 하나의 공식으로 나타내 보고자 한다. 이때 밀도증가율의 영향이 가장 크게 나타난 PD 급 고령토라든가 또한 밀도증가율의 영향이 가장 작게 나타난 WC 급 고령토에 대한 결과에는 실험당시의 수분함량의 효과나 밀도의 불균일성의 효과등이 포함되어 있을 가능성이 크다. 그렇다고 해서 이들 극단적인 값을 명확한 이유없이 제외하는 일도 바람직하지 못하다. 밀도가 증가하면 열전도계수가 반드시

증가한다는 전제아래 최소자승법을 사용하여 이들 9개의 점을 원점을 통과하는 직선으로 나타내면 식(2)와 같다.

$$k = k_{1d} (1 + 1.6 DI) \quad (2)$$

식(2)에서 k_{1d} 는 낮은 밀도에서의 열전도계수이고 DI는 낮은 밀도에 대한 높은 밀도의 증가량의 비를 나타낸 것이다. 식(2)를 사용하면 측정치가 가장 높게 나타난 PD 등급의 경우 측정된 열전도계수의 값은 계산한 값에 비하여 19.1% 높고 가장 낮게 나타난 WC 등급의 경우 보다는 13.2% 낮게 나타나게 되지만 WB, WC 및 PD 등급을 제외한 나머지 6종의 고령토에 대해서는 모두 4% 범위에 든다. 예를 들면 Fig.2에 나타난 PS 등급 고령토에서 밀도가 1.040 kg/m^3 일때 측정된 평균 열전도계수의 값이 $0.467 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ 였는데 밀도가 917 kg/m^3 일때의 값과 식(2)를 사용하여 계산한 열전도계수값은 $0.478 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ 로 그 차이는 약 2.3%가 된다.

수분함량의 변화에 따른 열전도계수의 변화를 살펴보기 위한 실험은 9종의 모든 등급의 고령토에 대하여 행하지 않고 WA, WC, PA 및 PD 등급의 4종의 고령토에 대하여만 실시하였다. 이와 같은 4종의 고령토에 대해서만 실험을 한 이유는 앞서 행한 고령토의 밀

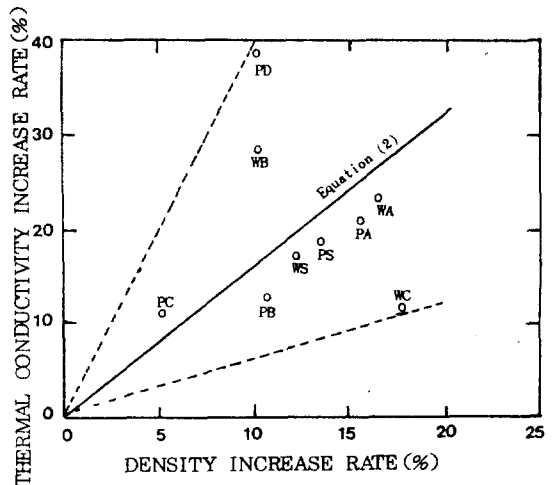


Fig. 3 Thermal conductivity increase rate versus density increase rate for 9 classes of kaolin at the constant moisture content

도변화에 따른 열전도계수 변화 실험에서 고령토의 종류변화에 따른 열전도계수의 변화가 크게 나타나지 않았기 때문이다. 그렇지만 이미 9종의 고령토에 충분한 양을 확보하여 놓았기 때문에 모든 고령토에 대하여 실험을 하는 것도 좋지만 고령토내의 초기 수분함량을 약 25% 이하에서 균일하게 만드는 기간과 시험원통의 고령토를 충전하여 정상상태의 온도분포가 될 때까지 걸리는 시간등을 합하면 1종의 고령토에 대한 수분함량 실험을 하는데도 약 10일 정도가 소요되고 9종의 고령토 모두에 대하여 실험하자면 3개월 이상의 시일이 소요되기 때문에 위에서 말한 대표적인 고령토 등급 4종을 선별하여 실험을 하였다.

고령토의 초기 수분함량을 균일하게 만든 후 시험원통에 충전할 때에는 밀도 변화에 따른 영향을 최소화하기 위하여 다지지 않은 낮은 밀도 상태로 하였다. 히터로 가열시 고령토내의 수분이 시험원통 밖으로 누출되는 것을 방지하기 위하여 10개의 흡반이 튜브안내관 입구는 코르크마개를 사용하여 완전히 막아 주었고 또한 충전된 고령토와 시험원통 뚜껑사이의 공간이 생기는 경우 이 공간안에 수분이 누적되는 것을 방지하기 위하여 충전된 고령토와 시험원통 덮개사이에서 공간이 생기지 않도록 하였으며 시험원통 덮개와 시험원통이 접촉되는 부분은 테이프로 밀봉하였다.

가열을 하는 동안 시험원통안의 고령토의 반경방향 수분이동은 히터를 가열하기 직전인 초기로부터 하루에 1내지 3회씩 온도분포가 정상상태에 도달할 때까지 하였는데 정상상태는 대개 가열을 시작한지 4내지 5일후에 이루어졌다. 하루 동안에 수분함량측정을 좀더 자주하지 못한 이유는 표본을 추출하기 위하여 시험원통에 설치하여 놓은 흡반이 튜브 안내관이 10개로 제한되어 있기 때문이었고 그 전날에 마지막으로 측정 한 수분함량분포에 비하여 큰 변화가 있는 날은 3회, 변화가 크게 나타나지 않는 날은 1회만 측정하였다.

WA, WC, PA 및 PD 등급 고령토의 시험에서 수분의 이동을 각각 Fig. 4에서 Fig. 7까

지에 나타내었다. 이들 그림에서 Day 는 24시간을 의미한다. 즉 1Day라 표시한 곡선은 가열을 시작하지 만 24시간이 지난 뒤의 수분함량 분포를 나타낸 것이다. 가열을 시작하여 시간이 흐를수록 히터봉 근방에 있는 고령토의 수분함량은 급격히 떨어진다. 질량보존의 법칙을 따르면 시험원통안의 수분의 질량은 일정하고 히터봉 근방에 있는 고령토의 수분함량이 감소하므로 히터봉으로부터 멀리 떨어진 곳의 수분함량은 증가되어야 함이 마땅하고 대개의 경우는 이와 같은 경우를 나타내지만 Fig. 5의 WC 등급 고령토에 대한 실험 결과는 그렇지가 못하였다. 그 원인은 표본 흡반이 튜브의 안내관 끝에 밀폐시킨 코르크마개나 시험원통과 시험원통덮개 사이를 통하여

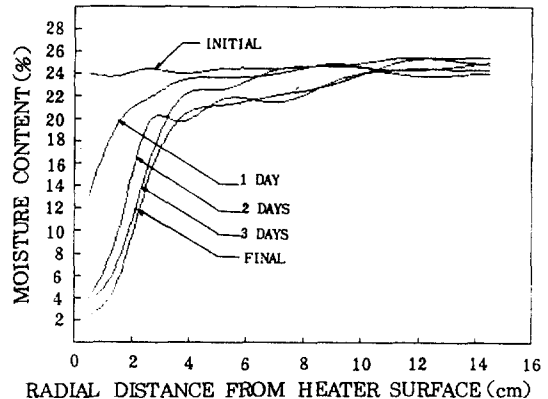


Fig. 4 Moisture migration during test for WA kaolin

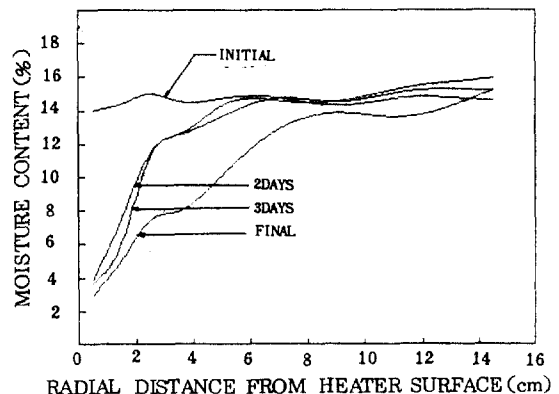


Fig. 5 Moisture migration during test for WC kaolin

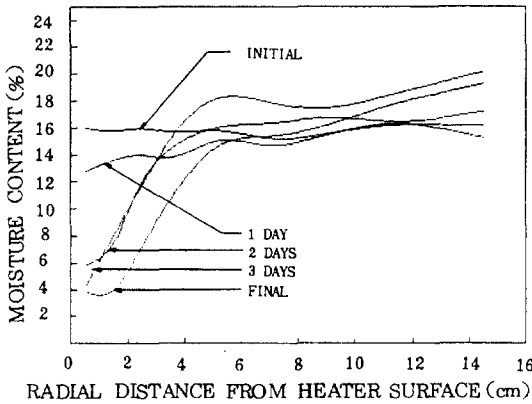


Fig. 6 Moisture migration during test for PA kaolin

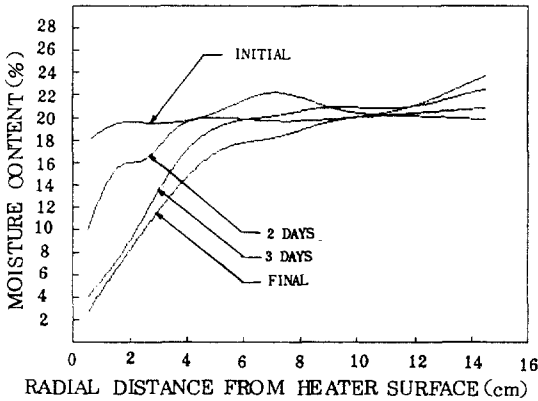


Fig. 7 Moisture migration during test for PD kaolin

증발하였거나 또는 이전에 고령토를 추출하므로 인하여 생긴 작은 공간안에 수분이 많이 포함되어 있을 가능성이 있다. 그러나 고령토 표본을 추출하여 각 표본안의 수분함량을 측정하는 순간에 각 표본위치에서의 열전도계수값을 측정하였기 때문에 측정치에 미치는 영향은 없다고 판단된다.

온도구배가 정상상태가 되어 마지막으로 수분함량을 측정하였을 때를 포함하여 끝으로부터 3 내지 4 회에 걸쳐서 측정한 고령토의 열전도계수들을 4 종류의 고령토에 대하여 수분함량과 더불어 그림으로 나타내면 Fig. 8에서 Fig. 11 까지와 같다. 이들 그림을 살펴보면 열전도계수값은 주어진 수분함량에 대하여 일

정한 값을 나타내지 못하고 넓은 범위내에서 변하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 변화의 요인은 고령토를 시험원통안에 충전할 때 손작업으로 인한 밀도의 불균질성, 수분함량 측정시에 야기될 수 있는 오차등 여러가지를 생각할 수 있으나 분말상태의 고령토 내의 입자간의 배치라든가 수분의 함유상태등의 미시적인 구조적 입장에서 볼 때 전혀 예상할 수 없었던 것은 아니다. 그러나 이들 네 그림에서 대체적인 경향만은 뚜렷이 나타났다고 볼 수 있다. 대체로 말하여 수분함량이 10%가 될 때까지는 열전도계수가 완만히 증가하다가 수분함량이 10%를 초과하게 되면 급격히 증가한다고 볼 수 있다.

이들 4 종류의 고령토를 사용한 실험에서

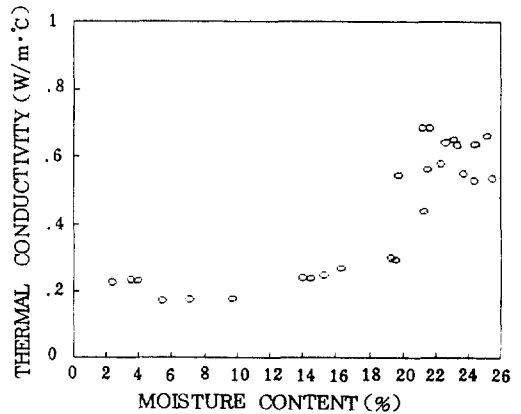


Fig. 8 Thermal conductivity versus moisture content percent for WA kaolin

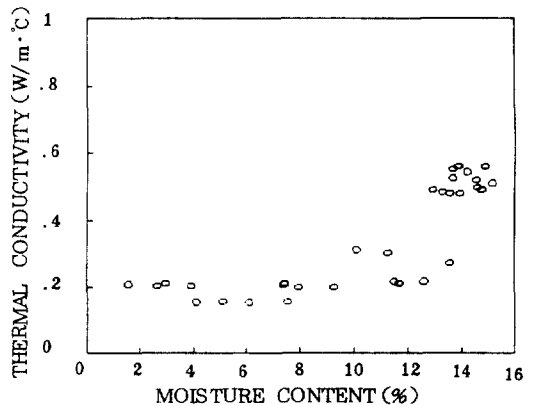


Fig. 9 Thermal conductivity versus moisture content percent for WC kaolin

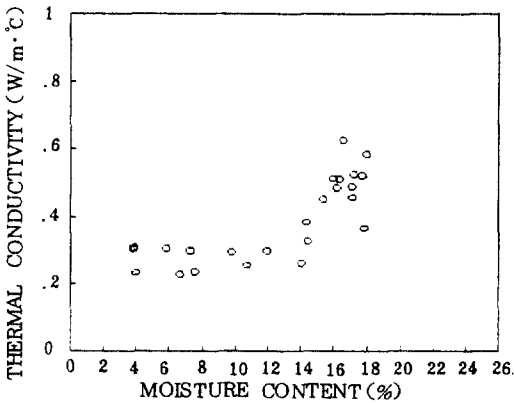


Fig.10 Thermal conductivity versus moisture content percent for PA kaolin

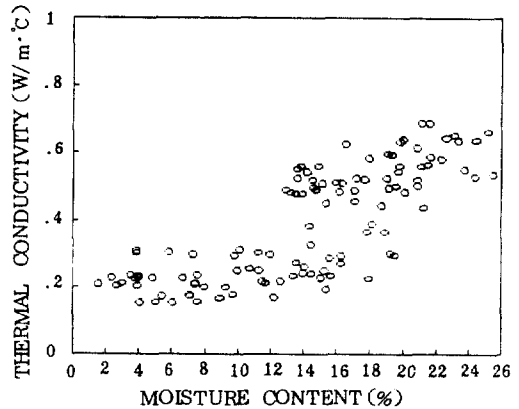


Fig.12 Thermal conductivity versus moisture content percent for WA, WC, PA and PD kaolin

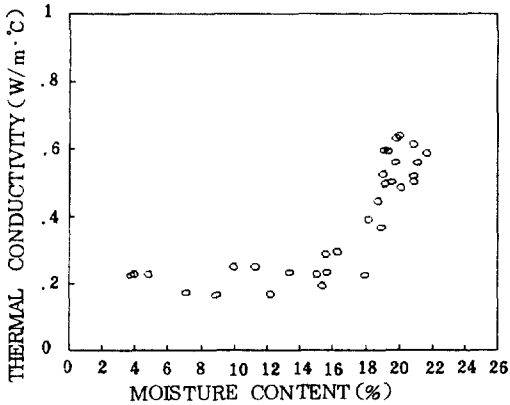


Fig.11 Thermal conductivity versus moisture content percent for PD kaolin

얻은 약 100개의 데이터를 하나의 그림에 나타내면 Fig.12와 같다. 이 그림을 살펴보면 수분함량이 10%가 되는 경우를 경계로 하여 열전도계수의 변화율의 차이는 더욱 뚜렷해진다.

지금까지 밀도와 수분함량이 고령토의 열전도계수에 미치는 영향을 실험적으로 살펴보았다. 그러나 완전히 건조하고 다짐이 없는 낮은 밀도에서의 고령토의 열전도계수값은 아직 구하지 못하였다. 이 값을 구하기 위하여 Fig. 8에서 Fig.11까지의 자료에서 수분함량이 제일 낮은 데이터들의 평균치를 계산하여 Fig. 13에 나타내었다. 이 그림에서 횡축의 고령토의 종류 아래 괄호안에 나타낸 값은 수분함량

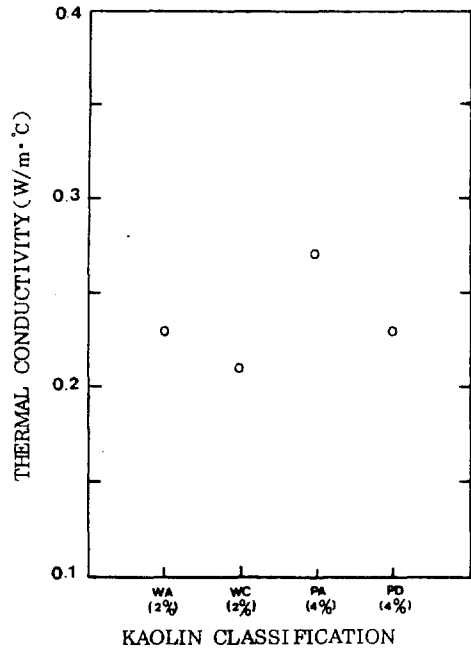


Fig. 13 Thermal conductivity of kaolin at low density and dry state

을 나타낸다. 수분함량이 2%인 WA와 WC 등급 고령토의 열전도계수의 평균치는 0.22 W/m·°C 이고 수분함량이 4%인 PA와 PD 등급 고령토의 열전도계수의 평균치는 0.25 W/m·°C로 더 크게 나타났다. 이와 같은 사실로 미루어 보아 완전히 건조하고 낮은 밀도 상태에서의 열전도계수값은 0.22 W/m·°C 보

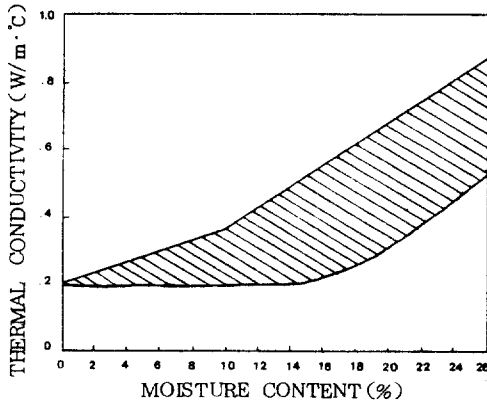


Fig. 14 Recommended values for thermal conductivity of kaolin as a function of moisture content percent

다 더 작아야 한다. 따라서 완전히 건조하고 낮은 밀도상태에서의 고령토의 열전도계수는 등급에 관계없이 약 0.2W/m·°C라 할 수 있다.

또한 수분함량에 따른 고령토의 열전도계수 값은 Fig. 12로부터 어떤 수식으로 나타내기는 매우 힘들지만 고령토와 관련된 열설계시 참고가 될 수 있도록 Fig. 12를 이용하여 수분함량의 변화에 대한 고령토의 열전도계수의 변화범위를 추천하는 것은 매우 바람직한 일이다. Fig. 12에 나타낸 약 110개의 데이터 가운데 변화량이 대체적인 경향을 벗어난 데이터를 제외한 약 90개의 데이터를 사용하면 Fig. 14와 같은 자료를 제공할 수 있다. 현재와 같이 우리나라 고령토의 열전도계수 값이 전혀 알려져 있지 않은 상황에서는 Fig. 14의 자료는 고령토와 관련된 열설계시에 많은 도움이 될 수 있을 것이다.

4. 결 론

정상상태 1차원의 반경방향 열흐름법을 사용하여 제작한 장치로 우리나라에서 생산되는 9종류의 고령토에 대한 열전도계수를 측정하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 우리나라에서 생산되는 9종류의 고령토는 백색도 및 성분은 다르지만 열전도계수의 값은 별로 차이가 나지 않는다.

2) 건조하고 다짐을 하지 않은 낮은 밀도상태에서 고령토의 열전도계수값은 약 0.2W/m·°C이다.

3) 밀도가 증가할수록 고령토의 열전도계수의 값은 증가하는데 수분함량이 10% 부근에서 최대 20% 오차 범위안에서 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$k = k_{td}(1 + 1.6 DI)$$

4) 수분함량이 증가할수록 열전도계수의 값은 증가하는데 수분함량이 10% 이하에서의 증가는 완만하고 10%에서 25% 범위에서는 좀 더 급격하며 낮은 밀도상태에서 수분함량에 따른 고령토의 열전도계수값의 범위는 Fig. 14와 같다.

후 기

이 연구는 한국과학재단의 1986년도 후반기 연구지원에 의하여 이루어졌으며 동 재단의 관계제위께 감사의 뜻을 표한다.

참 고 문 헌

1. M.S. Kersten, Thermal Properties of Soils, University of Minnesota, Engineering Experiment Station, Bulletin, No. 28, 1949.
2. W. O. Smith and H. G. Byers, "The Thermal Conductivity of Dry Soils of Certain of the Great Soil Groups", Proceedings, Soil Science of America, Vol. 3, pp. 13-19, 1938.
3. J. D. Bottorf, "An Investigation of Thermal Conductivity and Rate of Moisture Migration", Ph.D. Thesis, Purdue University, 1951.
4. 박희용, 이흥주, 강건, "고령토의 열전도계수 측정을 위한 반경방향 열흐름법", 한국태양에너지학회지 제9권 제1호, pp. 3-13, 1989.

5. 이종근, 무기재료원료공학, 반도출판사, 1985.
6. 대한광업진흥공사 보고서, “비금속 광물 특성조사 보고서”, 1987.
7. 이종근 외 6인, “국내 비금속 광물 관련제품 현황분석 및 수급전망에 관한 연구”, 1986.