

# 콘크리트의 열전도도 평가

## The Evaluation of Thermal Conductivity of Concrete

전현규 Jeon Hyun-Kyu  
GS건설 기술연구소 책임연구원

### 1. 머리말

구조물의 에너지소비를 줄이기 위하여 패시브하우스(Passive house)나 에너지 제로하우스(Energy zero house)의 개념이 도입되어 현재까지 많은 건축물이 시공되었다. 이러한 건축물에서는 대부분 단열재의 두께를 증가시켜 열손실을 막는 방법을 사용하고 있으며, 이 방법이 매우 효과적임을 보여주었지만 단열재 증가로 인해 벽체의 두께 역시 증가하였다. 벽체증가를 막고 단열재와의 접촉면에서 온도구배를 줄이기 위하여 다양한 복합재료를 사용해 콘크리트의 열전도도를 낮추는 연구가 진행 중에 있다. 그러나 콘크리트의 단열성능을 향상시키는 것만큼 중요한 사항이 신뢰성 있는 콘크리트의 열전도도 평가라고 판단된다.

재료가 열을 전달하는 성능을 나타내는 지표인 열전도도(thermal conductivity)는 단위시간당 온도구배를 따라서 열이 전달되는 비율로 정의된다. 세 가지 주요조건(함수율, 밀도 그리고 온도)은 콘크리트의 열전도도에 상당한 영향을 주는 것으로 알려졌으며, 사용한 골재와 습도에 따라서도 상당히 큰 편차를 보이고 있다. 콘크리트 열전도도 영향을 주는 구성 재료 및 환경조건 요인들로 인해서 콘크리트의 열전도도 측정값이 변할 뿐만 아니라 측정방법에 따라서도 달라진다. 일반적으로 상온 20℃에서 측정된 일반 골재를 사용한 보통 콘크리트의 열전도도는 대략 1.40 ~ 3.86 W/m℃ 범위의 값을 가지는 것으로 알려져 있다. 동일한 시편에 대해서 측정조건과 방법에 따라 측정값의 편차가 크기 때문에 측정방법에 대한 신뢰도를 높일 수 있는 방안을 다양하게 모색 중에 있다. 본 고에서는 현재 사용되고 있는 콘크리트의 열전도도 측정방법과 그 장·단점, 그리고 추가적으로 개발 중인 방법에 대하여 소개하고자 한다.

### 2. 열전도도 측정방법

열전도도를 측정하는 방법으로는 열확산율(diffusivity)과 비열(specific)로부터 계산되는 방법인 The Corps of Engineers Method for Calculation of Thermal Conductivity of Concrete(CRD-C 44)부터 평판 슬래브 시편으로 정상상태 열흐름 상태(steady-state heat flux)에서 측정하는 Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus(ASTM C 177)이 있다. 또 다른 방법으로는 Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus(ASTM C 518)이 있는데, 이 방법은 상온조건에서 반드시 열전달특성을 알

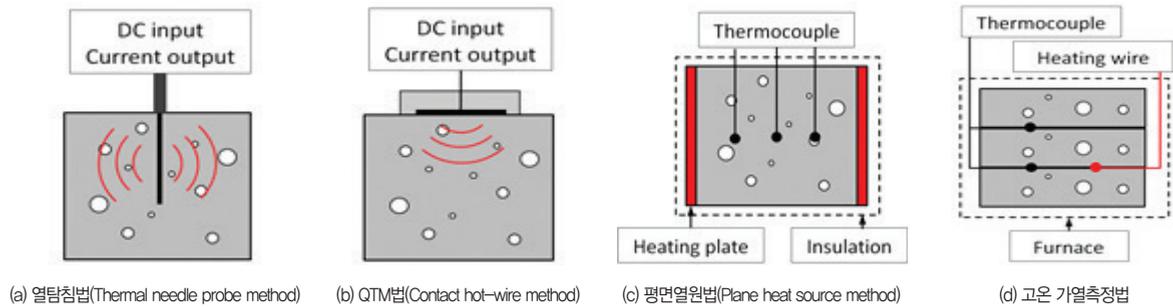


그림 1. 열전도도 측정방법

고 있는 재료를 사용해서 장비를 보정해야 한다. 국내의 경우에는 보온재의 열전도도 측정방법(KS L 9016)이나 Thermal Conductivity of Refractories by Hot Wire(ASTM C 1113) 등으로 열전도도를 측정하고 있으나 QTM(Quick Thermal Conductivity Meter) 장비를 사용하는 것이 가장 쉽고 편리한 방법이다. 그 외로 열탐침(thermal needle probe)나 평면열판법(plane heat source)을 활용한 방법도 제안되고 있다. 열탐침법, 평면열판법, QTM법 그리고 고온에서 측정하는 열전법의 특징을 <그림 1>에 비교하였다.

### 2.1 열탐침법

열전도도 측정에 사용되는 <그림 2>의 열탐침은 길이 60 mm, 직경 1.3 mm 스테인리스강으로 만들어져 내부에 발열을 위한 저항과 온도 측정을 할 수 있는 측정 장치(thermistor)가 장치되어 있으며, 레진으로 충전되어 있다. 열탐침에 DC전류가 흐르면 선형열원(line heat source)에서 방사방향으로 열을 주변재료로 전도시키는 동시에 온도를 3분 동안 매 1초 간격으로 나타난 결과를 바탕으로 열전도도를 측정하는 방법이다. 열전도도( $k$ )는 식(1)을 사용하여 시간에 따른 온도발생의 선형증가부분에서 계산된다. 열전도도를 측정하는 방법은 공급된 일정한 열원이 재료 내부에 전도되는 에너지를 측정하는 것으로 재료 내부에 센서



그림 2. 열탐침과 내부구조도

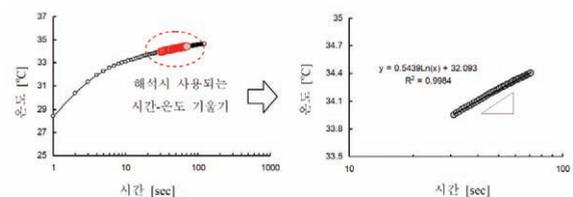


그림 3. 시간에 따른 온도증가양상 및 해석을 위한 시간-온도 기울기 곡선

를 삽입하여 측정하는 탐침법과 표면에 센서를 부착하여 측정하는 표면법이 있다. 표면법의 경우 재료 표면과 센서의 접촉이 양호하여야 하며, 외부 온도, 재료의 평탄도 등이 측정값에 영향을 미친다. 탐침법은 재료 내부에 센서를 삽입하며, 열원과 온도 측정 지점이 동일한 위치에 존재하므로 외부 영향 요인을 최소화시킬 수 있는 장점이 있다.

열탐침에 의한 측정법은 일반적으로 ASTM D5344-00 Standard test method for determination of thermal conductivity of soil and soft rock by thermal needle probe procedure(열탐침을 이용한 흙과 연암의 열전도도 측정법)를 따른다. 일정한 전류를 공급하여 저항을 발열시키고 그에 따라 변하는 온도값을 시간에 따라 측정하여 시간에 따른 온도 상승 곡선을 <그림 3>과 같이 획득한다.

위에서 획득한 시간-온도 기울기는 식(1)에 의해 열전도도로 환산된다.

$$k = \frac{Q}{4\pi} \frac{\ln(t_2/t_1)}{(T_2 - T_1)} = \frac{I^2 R_m}{4} \frac{\ln(t_2/t_1)}{(T_2 - T_1)} \left[ \frac{W}{mK} \right] \dots\dots\dots (1)$$

여기서,  $Q$ 는 저항에 가해진 에너지로 측정된 전류  $I$ 와 탐침내부의 표준저항  $R_m$ 값(약 1,050 ohm)에 의해 결정된다.  $t$ 는 시간,  $T$ 는 해당시간  $t$ 에서의 온도이다.



사진 1. QTM 본체(좌)와 프로브(우)

시간에 따른 온도 곡선에서 초기값은 탐침을 가열하는데 소요되며, 온도가 수렴하는 지점은 경계조건에 영향을 받으므로 그 중간에 해당하는 선형부분을 기울기로 취한다. 전체 측정시간은 약 2~3분이며, 15초부터 55초간 변한 온도를 이용하여 기울기를 일괄적으로 산출하였다.

## 2.2 QTM법(contact type at transient)

QTM은 앞 절에서 설명한 열탐침과 다르게 시편의 평평하게 연마된 한 면에 프로브 <사진 1-(우)>를 접촉시켜 해당 시료의 열전도도를 측정하는 장비이다. 시편 표면에 올려진 센서에서 선형열원이 단일방향으로 전파되어 측정시간과 특정시간 사이에 변화된 온도와 열량을 이용해 열전도도를 계산하게 된다. 반드시 시편표면에 측정하기 전에 프로브를 보정해야 한다. QTM 장비를 이용해 열전도도를 구하는 식은 식(2)와 같다.

$$\lambda = \frac{q \cdot \ln(t_2/t_1)}{4\pi(T_2 - T_1)} \dots\dots\dots (2)$$

여기서, q는 주어진 열량(W/m), λ는 시편의 열전도도(W/mK), t는 측정시간(sec), 그리고 T는 측정온도(K)이다.

## 2.3 평면열원법

앞에서 설명한 열탐침에 의한 방법은 선형 열원(line source)에서 나오는 열을 주변 재료로 전도시키며, 측정된 온도값을 바탕으로 열전도도를 측정하는 방법이다. 콘크리트 재료의 경우 거시적으로는 연속체라 가정할 수 있으나 사용된 골재의 크기가 cm 단위이므로 열탐침에 의한 방법에 의해 획득된 전도도 값은 국지적인 재료의 특성을 나타낸다. 따라서 평면 열원법을 사

용하여 연속체 스케일에서의 열전도도값을 산출하기 위해 콘크리트 재료가 들어갈 수 있는 탈부착형 스테인리스 스틸 몰드를 200 mm × 200 mm × 300 mm로 제작하였고, 양 끝단에 열판을 부착하였다. 몰드 내에는 2개의 열탐침을 삽입하였고, 2열로 총 7개소에 열전대(thermocouple)를 배열하여 위치에 따른 온도를 측정토록 하였다. <그림 4>는 평면 열원법에 사용된 몰드 및 센서 배열을 보여준다.

<그림 4>와 같이 열판 실험을 할 경우 열원에서 가까운 지점부터 온도 상승이 일어나며, 시간에 따라 각 열전대 위치에서의 시간-온도 곡선은 측정에 사용되는 재료에 따라 특정한 양상을 보이게 된다. 열에너지의 전파에 따라 온도가 순차적으로 증가하여 열 손실이 없을 경우 모든 열전대 위치에서의 온도는 열판의 온도와 같은 지점으로 수렴하게 된다. 또한 각 측정 위치마다 다르게 전파되는 시간-온도 양상은 재료의 열확산 특성에 의해 좌우되므로 열에너지 발생 및 시간-온도 양상에 의한 열 특성 평가는 앞서 설명한 열탐침 방법과 크게 다르지 않다. 하지만 본 기법은 실제 시공에 쓰이는 벽체 두께와 동일한 300 mm의 시편에 열에너지를 가하여 벽체 깊이별 온도 증가 양상을 관찰할 수 있으며, 골재의 크기가 몰드 크기에 비해 상당히 작아 골재의 크기, 공간적 위치 배열에 영향이 없이 거시적인 관점에서의 열전도도를 획득하는데 유용하다. 온도 조절이 가능한 유체 순환기를 일정 온도로 사전 가열한 후 열판 내부로 순환시켜 일정한 온도를 유지토록 했으며, 콘크리트가 들어간 전체 몰드는 우레탄폼(Fisher 제품)을 이용하여 외부 온도에 의한 영향을 최소화 시켰다. 시편당 약 3일간 열판을 가열하여 일정

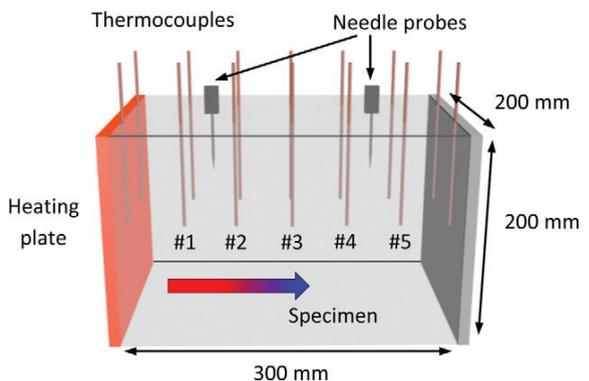


그림 4. 평면열원법에 의한 열전도도측정용 Thermal testing mold

한 에너지를 공급하였으며, 순차적으로 배열된 2열의 열전대에서 온도값을 10초마다 기록하였다. 각 열판에는 총 3개의 열전대를 부착하여 가열된 유체가 정상적으로 열판을 가열하는지 모니터링하였다. <그림 4>는 열전대 위치별로 시간에 따른 온도 증가 양상을 보여준다. 시간을 선형으로 보았을 경우 열전대의 위치에 따라 초기 온도 증가 시간이 명확하지 않은 반면 오랜 시간이 지난 후 열전대 위치에 따라 수렴되는 온도값이 있음을 알 수 있다. 이는 열판으로부터의 거리가 멀수록 열 손실이 누적되어 발생하여 열판과 같은 온도도 수렴하지 않는 현상이며, 시간을 로그로 변환 할 경우 열전대 위치에 따라 다르게 증가하는 최초 온도 상승 시간을 알 수 있다. 즉, 재료의 열 특성에 따라 최소 온도 증가 시간이 달라진다. 수정된 푸리에법을 사용하여 에너지 보존을 만족시키면서 상온조건에서 열손실을 고려하여 열적특성을 산출하기 위한 해석기법은 다음의 식(3)과 같다.

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \frac{d^2T}{dx^2} - \lambda T^* = \frac{k}{\rho c_p} \frac{d^2T}{dx^2} - \lambda T^* \dots\dots\dots (3)$$

여기서,  $\alpha$ 는 열확산계수( $m^2/s$ ),  $k$ 는 열전달계수( $W/mK$ ),  $c_p$ 는 비열( $J/gk$ ),  $\rho$ 는 단위중량( $kg/m^3$ ), 그리고  $\lambda$ 는 열손실계수이다.

<그림 5>에서 보인 시간-온도 증가양상 가운데 최초 온도 상승 시간은 열 확산계수에 의해 지배를 받으며, 최종 수렴하는 온도는  $\lambda$ 에 의해 결정된다. 따라서 평면 열

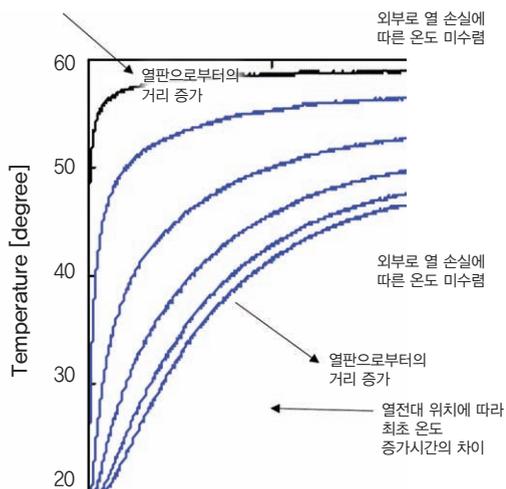


그림 5. 평면 열원법에 의한 시간에 따른 온도 증가 양상

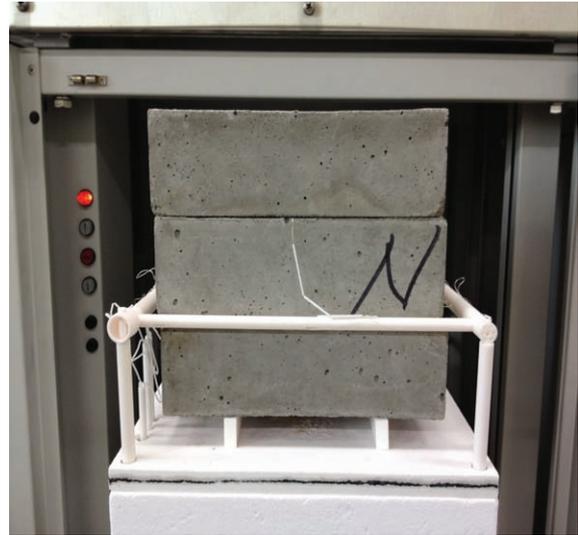


사진 2. 고온 가열측정법

원법에 의해 실험을 수행하고 측정된 단위 중량 및 비열 (측정 혹은 문헌에 나온 값)을 입력하며, 임의의 열전도도에 따른 온도 증가 양상을 구했을 경우 실험값과 가장 일치한 온도 증가값을 갖는 열전도도를 해당 실험재료의 열전도도라고 결정할 수 있다.

### 2.4 고온 가열측정법

지금까지 설명한 방법들이 주로 상온에서 콘크리트의 열전도도를 측정하기 위한 실험법인 반면 온도를 높이면서 각 온도별 열전도도의 변화를 측정하는 방법이 ASTM C 1113으로 대표되는 고온 가열측정법이다. 이 방법은 본래 내화재료를 성능평가를 위해 도입된 방법으로, 3개의 벽돌모양의 시편을 쌓은 후 열전대와 가열선을 시편 사이에 넣은 후 전기로에서 설정된 온도까지 높인다. 일단 열적 평형에 도달하면 각 열전대 사이의 온도 편차를 측정하여 열전도도를 계산하게 된다. <사진 2>는 시편준비가 완료된 상태로써 고온 가열측정법으로 실험하기 직전의 모습이다.

앞에서 소개한 열탐침과 평면열원법은 열원이 실험체내부에 설치되어 센서와 실험재료간의 열적 저항을 최소화하기 때문에 열전도도의 측정치가 접촉식 측정법보다 편차가 작다고 판단된다. 접촉식 방법(QTM법)과 상온범위에서 측정한 ASTM C1113법은 실험체 표면과의 접촉이 불완전할 수 있음을 내포하기 때문에 측정값이 일반적으로 과소평가되는 경향이 있으나 두

방법의 측정결과는 매우 잘 일치한다. 이러한 접촉식 방법들은 현실적으로 열원이나 센서를 내부에 설치하는 방법보다 적용성이 뛰어나기 때문에 약간의 과소평가에도 불구하고 널리 사용되고 있다.

### 3. 맺음말

본 고에서는 주거용 건축물의 에너지 소모량을 줄이기 위해 복합재료를 사용해 단열성능을 향상된 콘크리트의 열적 특성을 측정하기 위하여 일반적으로 사용되는 실험법 중에서 특히 열탐침법, 평면열판법, QTM법 그리고 고온에서 측정하는 열전법을 비교해 보았다. 콘크리트의 열전도도 측정이 콘크리트 자체 및 주변 환경조건에 많은 영향을 받음에도 불구하고 실험실뿐만 아니라 현장에서도 편리하게 사용할 수 있는 신뢰도 있는 실험방법 또는 절차 등의 확립이 필요하다. 

### 참고문헌

1. T. S. Yun, Y.J. Jeong, T. S. Han, K. S. Youm, "Evaluation of Thermal Conductivity for Thermally Insulated Concretes", Energy and Buildings, Vol. 61, 2013, pp. 125 ~ 132.
2. K. S. Youm, H. K. Jeon, T. S. Yun, T. S. Han, Y. S. Park and S. H. Lee, "The Evaluation of Concrete's Thermal Conductivity Using Various Insulation Materials", ACF 2012.
3. '단열콘크리트의 단열특성 평가 및 micro CT를 활용한 분석 연구', GS건설 기술연구소, 2012.



**전현규 책임연구원**은 건국대학교 건축공학과에서 박사학위를 취득하였으며, 2004년부터 GS건설 기술연구소에서 근무하고 있다. 주요 연구분야는 콘크리트 관련 분야이다.  
hgjeon@gsconst.co.kr

담당 편집위원 : 류동우(대진대학교) dwryu@daejin.ac.kr

## 학회지광고 게재 안내

콘크리트학회지는 격월간으로 발행되어 8,000여 회원을 비롯한 콘크리트 관련 업계, 학계, 유관 기관 및 단체 등에 배포되고 있습니다.

귀사의 미래를 위한 광고가 저렴한 가격과 가장 효과적인 방법으로 활용될 수 있도록 광고를 모집합니다.

### 1. 광고게재면

게재면	광고 협찬금	게재면	광고 협찬금
표 2	80만원	간지	70만원
표 3	70만원	내지(전면)	50만원
표 4	100만원	박스 광고	30만원

2. 할인혜택 : 본 학회의 특별회원이거나 게재하는 광고 또는 연간 6회 이상 게재 시 상기 협찬금을 아래와 같이 할인하여 드립니다.

단, 일시불로 납부하여야 적용 가능합니다.

- 1년 계약 : 10% 할인    2년 계약 : 20% 할인    회원사 : 추가 5% 할인