

열 관류 시험 기준 비교 · 조사

윤 희 상 / 건재 · 환경시험팀 선임연구원

1. 머리말

에너지의 합리적인 이용은 천연 에너지 자원이 충분치 못한 우리나라의 경우 경제에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서 관련 법규에서 건축물의 에너지 이용에 대해 여러 가지 규제를 하고 있으며 그 중 하나가 건축부재에 대한 단열 성능의 요구이다.

일반적으로 균질한 단일재료로 구성된 부재의 경우 재료의 고유값인 열전도율로 부재의 단열 성능을 예측할 수 있다. 그러나 현실적으로 현장에서 설치되는 건축물의 부재는 단일재료보다는 복합재료로 구성되는 경우가 대부분이며, 이러한 경우 부재의 단열 성능은 시험을 통해야만 객관적인 값을 얻을 수 있게 된다.

본 고에서는 금년부터 우리 시험연구소에서 수행하게 된 건축부재에 대한 열관류 성능 시험을 보다 객관적이고 합리적으로 시험하기 위해 건축부재의 단열 성능을 대표하는 값인 열관류율(열관류저항)을 측정하는 각국의 시험 기준을 비교 · 검토하였다.

2. 보호열상자법과 교정열상자법의 이해

열관류 시험의 기본 원리는 시험체 양측에 일정 온도차를 주면 시험체를 통해 고온측에서 저온측으로 열(熱)의 흐름이 발생하게 되며, 이때의 온도차, 열 통과면적, 통과 열량 값을 이용하여 시험체의 단열 성능 값인 열관류율 또는 열관류 저항 값을 산출하는 것이다.

이때 시험체 양측의 온도차 및 열통과 면적은 바로 측정이 가능하나, 통과 열량의 측정은 간단하지 않다. 시험체의 고온측에서 인위적으로 발생시키는 열량 값은 바로 측정이 가능하며, 이 값을 시험체 통과 열량 값으로 활용하는 방법에 따라 보호열상자법 (Means of a Guarded Hot Box)과 교정열상자법 (Means of a Calibrated

Hot Box)으로 구분하고 있다.

교정열상자법이란 시험체 고온측에서 발생시키는 열량 중 가열상자 벽체 등 시험체 이외부분을 통해 손실될 수 열량 값을 사전에 설정하여 시험시 이를 감안한 시험체 통과 열량 값을 산출하는 방식이다.

보호열상자법이란 열을 발생시키는 가열상자 주위를 항상 가열상자와 온도조건을 동일하게 유지시키므로써 가열상자 벽체 등을 통한 열 출입을 극소화시켜 발생 열량 전부가 시험체를 통과하도록 함으로써 가열상자에서 발생하는 열량을 시험체 통과 열량으로 바로 활용할 수 있게 하는 것이다.

3. 기본 용어에 대한 이해

· 열전도율 (Thermal conductivity ; λ k)

단위 두께(1m)를 갖고 있는 재료의 양면이 단위 온도차(1K) 일 때 단위 시간(1h) 동안 그 물체의 단위 면적(1m²)을 통과한 열량(kcal)을 말하는 것으로 재료가 열을 전하는 정도를 나타내는 계수이다. 재료에 따라 고유값으로 나타나며 이 값이 클수록 열의 전도가 쉽다.

<단위 : (W/m²)/(K/m) = W/mK = kcal/mh°C>

· 열전도비저항 (Thermal resistivity ; γ)

열전도율의 역수로 단위 두께당 열저항을 말한다. 재료의 열전도 어려움을 나타내는 값으로 이 값이 클수록 열전도가 어렵다.

<단위 : mK/W>

· 열컨덕턴스 (Thermal conductance ; C)

재료의 열이 전해지기 쉬운 정도를 나타내는 것으로 재료 양면에 단위 온도차가 있을 때 단위 면적을 통과한 열량을 말하는 것으로 균질 재료인 경우 열전도율을 재료의 두께로 나눈 값이다. <단위 : W/m²K>

· 열저항 (Thermal resistance ; R)

열컨덕턴스의 역수로 재료의 단열성능을 나타낸다. 열전도비저항이 재료의 단위 두께당 값인 반면 열저항은 두께가 감안된 값으로 열전도비저항에 두께를 곱하여 구한다. <단위 : m²K/W>

· 표면열전달율

(Surface coefficient of heat transfer ; h)

재료의 표면에서 이루어지는 외계(外界)와의 열 흐름 정도를 나타내는 값으로 양측의 단위 온도차가 있을 때 단위 면적을 통해 전달되는 열량을 말한다. 재료의 표면에서 이루어지는 열 전달은 보통 대류전열과 복사전열 두 가지로 이루어지며 기류속도 및 재료의 복사율에 따라 그 값이 정해진다. <단위 : W/m²K>

· 표면열전달저항

(Surface thermal resistance ; Rs)

표면열전달율의 역수로 재료 표면과 외계와의 사이에서의 전열이 일어나기 어려운 정도를 말

한다. <단위 : m² · K/W>

· 열관류율(Thermal transmittance ; U)

재료(또는 복합 부재) 한쪽의 고온 측 공기로 부터 반대쪽인 저온 측의 공기로 열이 흐르기 쉬운 정도를 나타내는 것으로, 전도, 대류, 복사에 의해 발생하는 전열을 모두 포함한다.

<단위 : W/m²K>

· 열관류저항(Overall thermal resistance ; Ru)

열관류율의 역수로 재료(또는 복합부재)의 단열성능을 나타낸다. <단위 : m² · K/W>

4. 시험기준의 선정

조사대상 시험기준은 한국(KS), 일본(JIS), 미국(ASM), ISO 기준을 선정하였으며 시험방법 및 시험품목에 따른 시험기준 현황은 옆 표1과 같다. 국가별 시험기준의 특징은 KS, JIS의 경우 시험대상 품목의 종류 및 시험방법에 따라 세분하고 있으며, ASTM은 시험대상 품목과는 관계없이 시험방법에 따라 2종류로 구분되고, ISO는 시험대상 및 시험방법에 관계없이 하나의 기준으로 모든 건축부재의 열관류시험에 적용하고 있다.

5. 시험장비의 성능 요구

열관류시험장비의 주요 구성부분은 가열상자(측정상자, Metering Box), 보호상자(항온상자, Guard Box), 저온상자(Cold box, Climatic Chamber), 온도 측정 및 제어장치, 전력측정장치 등이며 각 구성부분 성능에 대한 기준별 요구사항은 다음과 같다.

가. 가열상자 및 보호상자
가열상자 및 보호상자는 기본적으로 우수한 단

표1 단열성능시험기준현황

시 험 기 준	시험방법	시 험 대 상	측 정 값
· KS F 2277(JIS A 1420) 주택용 단열재의 단열성능 시험방법	교정열상자법	주택용 단열재 (판, 시이트 등)	Ru, R
· KS F 2278(JIS A 4710) 창 및 문의 단열성능 시험방법	교정열상자법	창, 문	Ru
· KS F 2273(JIS A 1414) 조립용 판 및 그 구조부분의 성능시험방법	보호열상자법	조립용 패널	U, C
· KS F 2299 건축물 부재의 정상상태에서의 단열성능시험방법	보호열상자법	건축물 부재	U, C, Ru, R
· ASTM C 236 Standard Test Method for Steady-state Thermal Performance of Building Assemblies by Means of a Guarded Hot Box	보호열상자법	건축물 부재	U, C, Ru, R
· ASTM C 976 Standard Test Method for Thermal Performance of Building Assemblies by Means of a Calibrated Hot Box	교정열상자법	건축물 부재	U, C, Ru, R
· ISO 8990 Thermal insulation - Determination of steady-state thermal transmission properties- Calibrated and guarded hot box	보호열상자법 교정열상자법	건축물 부재	U, C, Ru, R

열성능이 요구되며, 가열상자 내부에는 일정 열량 발생하기 위해 가열장치가 설치되고 상자 내부온도가 균일하게 될 수 있도록 기류 교반장치가 설치된다. (표2 참조)

표2 가열상자 및 보호상자 성능기준

구분 \ 기준	KS, JIS	ASTM	ISO
크기	<ul style="list-style-type: none"> 개구부 91×91cm, 깊이 30~50cm (KS F 2277) 개구부 200×200cm, 깊이 70cm (KS F2278) 	<ul style="list-style-type: none"> 성능을 대표할 수 있는 시험체의 시험이 가능한 크기(단, 높이는 폭 이상) 	<ul style="list-style-type: none"> 규정 없음
단열성능	<ul style="list-style-type: none"> 열저항: <ul style="list-style-type: none"> -4.3m²K/W 이상(KS F 2277) -2.6~4.3m²K/W(KS F2278) 열컨덕턴스: <ul style="list-style-type: none"> -0.5W/m²K 이하(KS F 2273) -1.2W/m²K 이하(KS F 2299) 	<ul style="list-style-type: none"> 열저항: 4.3m²K/W이상 	<ul style="list-style-type: none"> 가열상자 벽체를 통과하는 열량이 시험체를 통과하는 열량의 5%이내
온도조정	<ul style="list-style-type: none"> 10~20°C 범위내에서 ±1°C 정밀도 (KS F 2277) 20±1°C로 제어 가능(KS F 2278) 0.25K 이내로 제어(KS F 2299) 	<ul style="list-style-type: none"> 0.25K 이내로 제어 	

*KS F 2277은 JIS A 1420과, KS F 2278은 JIS A 4710과, KS F 2273은 JIS A 1414와 요구성능이 동일함.

또한 가열상자에 설치된 히터의 복사열이 시험체에 직접 영향을 주는 것을 최소화하기 위해 표면온도가 낮게 유지될 수 있는 시이스(sheath) 선 등을 사용하고, 히터와 시험체 사이에 복사 차단판의 설치를 권장하고 있다.

나. 저온상자

저온상자의 크기는 일반적으로 별도 제한 없이 가열상자(항온상자)의 크기에 따라 정해지며, 재질은 에너지 손실방지를 위해 가능한 우수한 단열성능 및 투습저항이 확보된 재료로 설치하도록 권장하고 있다. 상자 내부에는 균일한 온도 분포와 시험체의 표면열전달저항을 일정 범위내 유지하기 위해 기류의 속도를 조절할 수 있게 요구한다. ASTM에서는 저온상자내 기류속도를 하절기를 가정한 경우 3.35 m/s, 동절기는 6.7 m/s를 권장하고 있으며, ISO에서는 표면열전달저항값에 따라 기류속도를 조정하되 자연대기 조건을 가정한 경우 0.1 m/s ~ 10 m/s 범위를 권장한다.

KS에서는 기류속도에 대한 특별한 규정이 없으나 KS F 2278에서는 시험체의 가열 및 저온측의 기류조건을 일정하게 유지하기 위해 표준판의 표면열전달저항 값을 이용하여 사전에 기류속도를 설정하게 되어있다.

다. 온도 측정

온도측정은 열전대를 이용한 전기적 측정방법에 의하되 KS 및 JIS에서는 시험체 표면온도 측정시 0.1°C 이내까지 교정한 지름 0.2mm이하의 CC열전대 사용(단, 공기온도 측정시 지름 0.2mm 이상 사용 가능)을 권장한다.

ASTM에서는 시험체 표면온도 측정시에는 지름 0.25mm이하, 공기온도는 지름 0.51mm이하의 열전대를 사용하도록 하며, ISO 기준에서는 시험체 표면온도 측정에 지름 0.25mm이하의 열전대 사용을 권장하나, 공기온도 측정에는 제한을 두지 않고 있다.

온도 측정 위치는 모든 기준에서 저온측과 가열측의 상호 마주보는 위치에서 측정하도록 규

정하고 있으며, KS 및 JIS에서는 시험체 표면온도 및 공기온도 측정 개수(표3 참조) 및 위치까지 제한하고 있다.

표3 기준별 온도 측정 개수

측정부분	기 준	KS F 2277	KS F 2273	KS F 2278	KS F 2299
		JIS A 1420	JIS A 1414	JIS A 4710	
항온상자 공기온도		5개소	9개소	5개소	규정없음
가열상자 공기온도		5개소	5개소	9개소	
가열측 시험체 표면온도		5개소	5개소	9개소	
저온측 시험체 표면온도		5개소	5개소	9개소	
저온상자 공기온도		5개소	5개소	9개소	

ASTM C 236(보호열 상자법)에서의 온도 측정 개수는 시험체의 면적과 균질상태에 따라 크게 차이가 난다. 균질하지 않은 시험체의 경우 측정개수는 경험적으로 다음 식에 의한 값(N)을 권장하고 있으며, 균질한 시험체는 이 값의 10% 정도만 설치해도 충분한 것으로 되어있다.

$$N = \frac{A}{(0.07+0.08 \times \sqrt{A})} \quad A: \text{시험체 면적(m}^2\text{)}$$

ASTM C 976(교정열 상자법) 및 ISO에서의 온도 측정 개수는 비교적 균질한 시험체의 경우 측정면적 1㎡당 2개소(단 최소 개수는 9개소) 이상의 설치를 요구하고 있다. 또한 매우 균질하지 못한 시험체의 경우 재료에 따른 표면온도차가 크게 발생하여 시험체를 대표할 수 있는 평균값의 산정이 어려우므로 표면온도 측정을 생략하도록 한다.

온도측정 위치는 KS, JIS의 경우 위치를 지정하고 있으나 ASTM에서는 별도의 위치를 지정하지 않고 균형있게 배치하도록 권장하고 있으며, 다만 시험체 표면이 다양한 재료로 구성되어 균질하지 않는 경우 각 재료를 대표할 수 있는 지점을 선정하되, 재료별 가중치를 감안하여 측정 개수를 조정하도록 권장한다. 그러나 매우 균질하지 못한 시험체의 경우 재료에 따른 표면온도차가 크게 발생하여 시험체를 대표할 수 있는 평균값의 산정이 어려우므로 측정을 생략

하도록 한다.

보통 시험체 표면에서의 지점간 온도차이가 세운 및 고온 측 평균온도 차이의 20%를 초과하느냐가 시험체의 균질성 여부 즉 표면온도 측정 여부를 판단하는 기준으로 권장된다.

가열측 및 저온측의 공기공도 측정위치는 KS, JIS에서는 시험체 표면으로부터 10cm이상, ASTM에서는 7.5cm이상 이격하되 시험체 표면 측정위치와 동일한 위치

에서 측정하도록 하고 있다.

라. 전력측정

가열상자에 설치된 히터 및 팬에 공급되는 전력 값은 열관류시험의 최종 결과인 열관류율이나 열관류저항 값에 직접적인 영향을 미치므로 정확한 측정이 요구된다. 따라서 모든 기준에서는 허용오차가 ±0.5%이내인 전력계 또는 전압·전류계 사용을 의무화하고 있으며, 안정적인 전원 공급을 위해 전원안정장치(Voltage stabilized power supplies)를 부설하도록 하고있다.

마. 시험체 및 시험체틀

KS 및 JIS에서 시험체 선정은 성능을 대표할 수 크기 및 구조로 하며, 수분이 함유된 경우 온도 20±3℃, 상대습도 50±5%의 항온항습실에서 24시간 이상 양생을 권장하는 것 이외의 특별한 규정은 없다.

ASTM, ISO에서 시험체 선정은 성능을 대표할 수 크기 및 구조로 하되, 시험 목적에 따라 수정이 허용되고 있다. 예를 들면 보호열 상자법의 경우 시험체 내부에 단열성능에 영향을 미치는 공기층을 포함한 수직 시험체의 경우 시험체의 높이와 측정상자 높이를 동일하게 설치하여야 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다. 이것이 불가능할 경우에는 시험체 공기층의 측정지역(Metering Area)과 보호지역(Guard Area) 사이에서 대류에 의한 공기의 흐름을 방지하기 위해

차단판을 설치하도록 요구하고 있다. 또한 시험체 표면이 금속과 같은 열전도율이 높은 물질로 구성된 경우 측정지역(Metering Area)과 보호지역(Guard Area)의 열 흐름을 방지하기 위해 경계부분에 약간의 틈을 내는 것을 권장한다. 또한 시험체가 콘크리트 벽체인 경우 실온에서 6~8주 동안 양생 후 시험을 하도록 권장한다.

시험체 설치시 가열상자, 항온상자, 저온상자와의 접촉부분은 가능한 공기가 통하지 않게 긴밀하게 밀착시켜야 하며 시험체 표면이 요철이 있을 경우 콜크 석고 등을 이용하여 접촉부분을 평탄하게 하여야 한다.

시험체들은 KS, JIS에서는 내부 시험체 설치 부분 크기 약 2m×2m, 두께 150~200mm, 열저항 4.3 m²K/W 이상 되도록 규정하고 있으나, ASTM에서는 내부 크기는 가열상자 측정치수와 동일하게 하고, 두께 및 단열성능도 가열상자 벽체 이상의 성능을 요구하고 있다.

6. 시험의 실시

가. 정상상태(Steady-state)

시험체의 단열성능(열관류율, 열관류저항)은 시험체 내부의 열 흐름이 안정상태, 즉 시간에 따른 열 흐름의 변화가 없을 때의 값을 취하여야하므로 관련 시험 데이터는 정상상태(Steady-state)가 도달된 이후에 수집되어야 한다.

KS, JIS에서의 정상상태(Steady-state)란 '가열상자내 히터 및 팬의 설정 전력을 변경함이 없

이 시험체 양측의 공기온도, 표면온도가 거의 일정해지고, 그 시간적 변동이 계속 감소 또는 증가함이 없이 가열상자와 저온상자 간의 공기온도차의 변동이 1시간당 온도차의 2% 또는 3% 이내인 상태'를 말한다.

ASTM에서 요구하는 정상상태(Steady-state)의 조건은 1시간 이내마다 데이터를 측정하되 적어도 4시간 동안 평균표면온도가 ±0.06°C 이상 변화하지 않고, 가열상자내 투입전력 값은 ±1%이상 변화되지 않아야 하며, 그 값이 계속 증가 또는 감소하지 말아야 한다.

ISO에서는 정상상태(Steady-state)의 조건에 대한 구체적인 명시는 하지 않고 있으며 다만, 열관류저항, 열관류율, 가열상자의 전력, 온도 등의 데이터의 변화정도로 정상상태(Steady-state)를 인정하고 있다.

정상상태(Steady-state)에 도달되는 시간은 시험체의 열적 성능, 표면 상태 및 시험장비의 온도 제어 성능 등에 따라 많은 변화가 발생하여 그 시간을 예측하기는 어려우므로 시험자 경험과 컴퓨터에 의존할 수밖에 없다.

나. 온도조건

가열상자 및 저온상자에 대한 온도조건 설정은 기본적으로 시험체가 설치되는 현장 조건과 유사한 상태를 유지하는 것을 원칙으로 하고 있으나 이 조건을 설정하기가 현실적으로 어려운 경우가 발생할 수 있으므로 일부 기준에서는 아래 표4와 같은 온도조건을 권장하고 있다.

표4 기준별 온도 조건

기 준	온 도 조 건
KS F 2278, JIS A 4710	항온실 및 가열상자: 20±1°C, 저온상자: 0±1°C
KS F 2299, ASTM 236	가열상자와 저온상자의 온도차 25K 이상
ISO 8990	평균온도 10~20°C, 온도차 20°C 이상

다. 데이터 측정

시험결과 산출을 위해 정상상태(Steady-state)에 도달한 후 공기온도, 시험체 표면온도, 가열

상자내 투입전력 등을 측정하되 시험기준별 측정방법은 다음의 표5와 같다.

표5

기준별 측정방법

기 준	측 정 방 법
KS F 2277 JIS A 1420	30분 간격 3회측정 결과가 2%이내 차로 일치시 종료
KS F 2273 JIS A 1414	1시간 간격으로 3회 측정
KS F 2278 JIS A 4710	30분 간격으로 3회 측정
KS F 2299 ASTM 236 ASTM 976	1시간이내 간격으로 8시간 이상 측정하되 4시간씩의 연속 2회이상 시행하여 그 결과 차이가 1% 이내일 때 종료.
ISO 8990	최소 3시간동안의 결과 차이가 1%이내 일 때 종료

라. 결과의 산출

측정된 온도, 열량, 전열면적 등을 이용하여 열관류율, 열관류저항, 열컨덕턴스 등을 산출하게

되며 기준에 따라 요구하는 결과의 종류는 다음 표6과 같다.

표6

기준별 시험결과

기 준	시 험 결 과
KS F 2277	· 열관류저항 또는 열저항
KS F 2273	· 열관류율 · 열컨덕턴스(시험체가 균질하여 열적 약점 등이 없을 때) · 온도저하율(시험체 국소부분에 금속류 등이 설치 되어 열적 약점이 있는 부분)
KS F 2278	· 열관류저항
KS F 2299 ASTM 236 ASTM 976	· 열관류율 · 열컨덕턴스 · 열저항 · 열관류저항 · 표면열전달율 · 표면열전달저항 (단, 극히 불균질한 시험체의 경우 열관류율 및 열관류저항만 산출)
ISO 8990	· 열저항 · 열관류율 · 표면열전달율 (단, 불균질한 시험체인 경우 열관류율만 산출)

7. 맺음말

단열성능시험과 관련된 국내기준의 특징은 일본 기준을 그대로 인용함으로 인해 시험대상 품목에 따라 시험기준이 세분화되어 있다는 것이다. 또한 KS F 2299의 경우 ASTM 236의 내용을 일부 발췌·인용하였다. 기준의 세분화가 시험의 정확도 측면에서 유리할 수 있겠으나 국내 기준의 현실은 기준에 따라 시험장비의 성능, 시험조건, 데이터 측정방법 등에서 서로 차이가 있거나, 시험결과에 영향을 줄 수 있는 일부 조건이 누락되어 있는 등 결과에 대한 객관성 확보

보 측면에서 시험자가 과연 확신할 수 있는가라는 의문이 발생한다.

국제적으로 사용되고 있는 ISO나 ASTM 기준을 보면 알 수 있겠지만 건축부재의 단열성능값 측정은 기본적으로 하나의 기본원리를 이용하는 것이므로 시험대상품목의 종류에 따라 시험기준이 크게 달라질 필요가 없을 것으로 판단된다.

따라서 단열성능 시험과 관련된 우리의 시험기준도 국제적으로 통용될 수 있도록 보다 개관적이고 과학적인 검토를 통하여 통합·정비하는 것이 바람직한 것으로 사료된다. **FLK**