43˝£ ‡»` (2 )‰^ ˝1 2007.11.13 2:17 PM ˘ ` 22 ˝fi ˛”˛¯„ ‚‡·˘· ! ‡ ¿ !!!

건축용 구성재의 열관류율 시험에 대한 측정불확도 추정

임 홍 순 / 품질인증팀 책임연구원
박 수 영 / 방내화팀 연구원
이 우 석 / 건재환경팀 연구원

1. 서론
2. 측정불확도의 개념 및 추정순서
3. 건축용 구성재의 열관류율 시험
4. 건축용 구성재의 열관류율 시험 측정불확도 추정
5. 결론

1. 서 론

우리 일상 생활의 주변에서는 셀 수 없는 측정값들이 산재하고 있다. 자신의 키나 몸무게를 측정하는 것에서부터 생활공간의 온도, 습도를 측정하는 등 모든 생활에서 측정의 행위는 이루어지고 인식하지 못하는 상황에서도 이루어지고 있다.

이러한 측정을 통하여 산출된 측정값에는 항상 논란의 여지가 생기게 되는데 이는 측정값의 신뢰도에서 기본적으로 기인한다. 측정결과의 신뢰도를 나타내기 위하여 이제까지 쓰던 방법은 오차, 오차율, 정확도, 정밀도 등으로 측정의 영역에서 일반적으로 통일되거나 정의되지 못하고 사용되어 왔다. 이러한 문제 때문에 1993년 국제표준화기구(ISO)에서는 BIPM, IEC, IFCC, IUPAC 및 OIML 등의 국제기구와 같이 모든 측정활동에서 적용할 수 있는 측정불확도 표현지침(Guide to the Express of Uncertainty in Measurement)를 발간하였다. 이 지침서에 따라 측정의 신뢰성을 나타내는 측정불확도를 산출하고 표현하는 방법이 전 세계적으로 또한 광범위한 분야에 확산되어 사용되고 있다.

국내에서도 이러한 국제적 변화에 따라, KOLAS 시험기관 인정 평가에 있어 시험항목별 측정불확도 추정보고서를 요구하고 측정시 이를 측정값과 같이 표기하도록 하고 있다. 이에 따라, 국내의 시험기관에서는 시험에 대한 측정불확도에 대한 절차를 추가하고 진행하고 있다.

본 연구에서는 건축용 부재의 열관류율 측정시험에 대한 불확도 인자를 도출하고 불확도 산출과정 및 전파법칙에 의한 불확도 산출을 목적으로 한다.

2. 측정불확도의 개념 및 추정순서

2.1. 측정불확도의 개념

측정불확도란 측정품질이 어떤가를 알려주는 수단으로 GUM(Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, 측정불확도 표현 지침서)에 의하면 측정결과에 관련하여, 측정량을 합리적으로 추정한 값들의 분산 특성을 나타내는 파라미터이다.

예를 들어 온도, 압력 등 여러 가지 물리적 상황이 확정된 상태에서 어떤 측정대상의 참값은 인간의 능력으로 완벽하게 측정할 수 없고, 이 값을 알 수도 없다. 연필의 길이가 10 ㎝로 측정되었을 때, 연필 길이의 참값이 10 ㎝인지, 10.0000001 ㎝인지 여부를 정확하게 확인하는 것이 불가능하다는 이야기이다. 즉, 실제에 있어서 참값에 대한 오차를 알 수 없기 때문에 측정결과를 얼마만큼 믿을 수 있는가에 대한 불확도를 추정하는 것이다. 불확도가 작다고 해서 오차가 작다는 말은 아니며, 많은 오차요인을 고려할수록 그 결과에 대한 신뢰도가 커진다고 할 수 있다.

표준불확도 산출을 위한 각 불확도 인자에 대한 평가는 A형 평가와 B형 평가의 두 가지가 있으며 모두 확률에 근거를 둔다.

A형 평가는 일련의 관측값을 통계적으로 분석하여 불확도를 구하는 방법으로, 여러 번의 실험결과를 통계적으로 처리하여 불확도 성분을 평가하는 것이다. 기본적으로 고려되는 방법에는 독립적으로 수행된 몇 번의 측정으로부터 실험값의 분산(s2)을 구하고 평균의 표준편차를 A형 표준불확도(u)로 추정한다.

평균 : $\bar{x} = \Sigma \frac{x_i}{n}$

표준편차 : $s = \sqrt{\frac{\Sigma(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$

평균의 표준편차 : $u = \frac{s}{\sqrt{n}}$

여기서, x_i : i 번째 데이터, n : 데이터 수

B형 평가는 일련의 측정값의 통계적인 분석이 아닌 다른 방법으로 불확도를 구하는 방법으로, 기존의 정보 또는 문헌을 통하여 측정값이 가질 수 있는 확률 밀도함수를 가정하여 구한다. 사용가능한 정보는 과거의 측정데이터, 표준물질, 교정 성적서 데이터, 측정재료와 계측기기에 대한 지식 및 경험, 측정기기의 성능 및 사양, 핸드북 등의 참고자료 등이 있다.

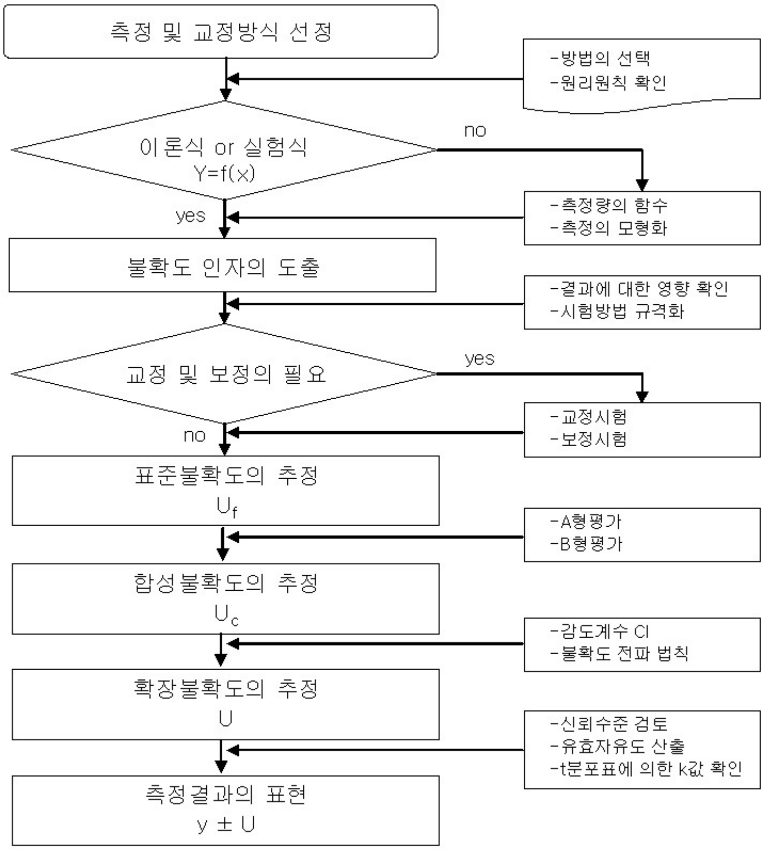
즉, A형 표준불확도는 반복측정값의 빈도분포에 근거한 확률밀도함수에서 구하는 반면, B형 표준불확도는 기존의 정보 또는 문헌을 통해 측정값이 가질 수 있는 확률밀도함수를 가정하여 구한다.

2.2 측정불확도 추정순서

측정불확도를 구하기 위해서는 먼저 측정량에 대한 모델식을 정립한 후, 불확도 요인에 대한 표준불확도를 A형 평가, B형 평가를 통해 도출한다. A형 평가, B형 평가를 통해 구해진 각 표준불확도는 불확도 전파법칙에 의해 합성표준불확도로 합산되고, 유효자유도를 확인한 후 최종적으로 t분포를 이용하여 확장불확도를 구한다.

[그림 1]에 GUM과 VIM(국제계량기본용어집)에 따른 측정불확도 추정을 위한 프로세스 내용을 도

43˘£ ‡»` (2 )‰ˆ ˝1 2007.11.13 2:17 PM ˘ ` 24 ˝fi ‚”‚¯„ ‚‡·˘· ! ‡ ¿ !!!
CMYK



[그림 1] 측정불확도 추정을 위한 프로세스

식화하여 나타내었다.

3. 건축용 구성재의 열관류율 시험

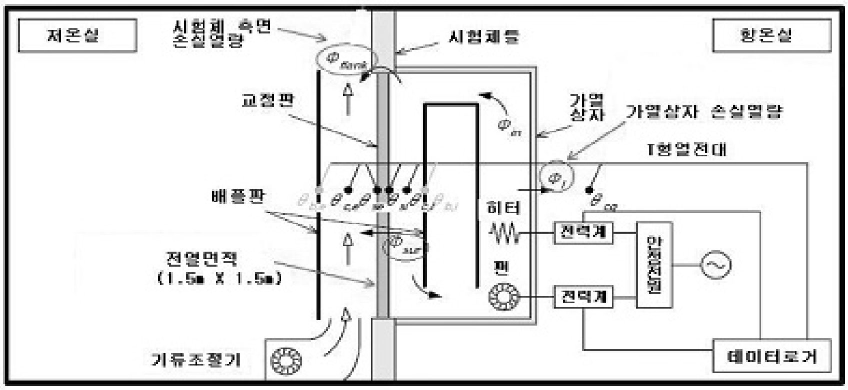
3.1 시험규격 및 조건

본 연구에서는 건축용 구성재의 열관류율 측정 불확도를 추정하기 위하여 시험을 실시하였으며, 열관류율 측정을 위해 적용한 시험 규격은 KS F 2277:2002 (건축용 구성재의 단열성 측정 방법 – 교정 열상자법 및 보호 열상자법), ISO 8990 : 1994(Thermal insulation–Determination of steady–state thermal transmission properties– Calibrated and guarded hot box)이다. 시험조건은 규격에서 제시된 사항을 준수하여 진행되었다.

3.2 시험 절차

건축용 구성재에 대한 열관류율 측정불확도 추정을 위한 시험은 세 단계로 이루어진다.

① 가열상자 내외의 온도차를 0℃로 하고, 시험체틀과 교정판 사이 손실열량을 교정한다.



[그림 2] 열관류율 시험방법 및 손실열량의 표현

실제의 열관류율 시험에서는 시험체틀과 교정판 사이, 가열상자표면 등으로 열량이 손실된다. 이를 막기 위해 단열성이 좋은 재료로 만들고, 측면의 시공도를 높인다 하여도 작으나마 손실되는 열량이 발생하게 되는 것은 변함이 없다. 따라서 가열상자 내외 온도를 0℃로 하여 가열상자를 통한 손실을 막은 후, 시험체틀과 교정판 사이 손실열량을 먼저 교정한다.

② 가열상자내외에 일정온도차(예: 1℃)를 주고, 가열상자의 손실열량을 교정한다.

선행작업을 통하여 시험체틀과 교정판 사이 손실열량을 확인한 후, 가열상자를 통한 손실열량을 확인하는 절차이다. 이 단계에서의 손실열량은 온도에 따른 열량 손실율로 표현된다.

③ 시험체의 열관류율을 측정한다.

선행의 작업을 통하여 손실열량을 확인하였으므로, 실제 건축용 구성재를 사용하여 열관류율 측정시험을 실시한다. 측정된 열량에는 교정작업에서 확인된 손실열량을 보정하여 측정값을 산출한다.

3.3 장치온도 설정조건 및 온도측정

건축용 구성재의 열관류율 측정시험에서 항온실, 가열상자 및 저온실의 온도설정은 〈표 1〉과 같다.

온도측정은 가열상자 공기, 항온실 공기, 저온실 공기 및 시험체 각 부분에 대하여 측정하되 항온실 공기온도는 5개소, 가열상자, 저온실 공기 및 시험체 표면온도는 각 9개소를 측정하였다.

〈표 1〉 열관류율 시험 온도 설정

구분	설정온도
항온실, 가열상자	20±1℃
저 온 실	0±1℃

3.4 열관류율의 산출

열관류율은 정상상태가 된 후, 1시간 간격으로 측정한 3회의 측정결과를 이용하여 다음 식에 따라 각각 구하여 평균한다.

$$U=\frac{1}{R}=\frac{\Phi_{in}}{(\Theta_{n,hot}-\Theta_{n,cool})\cdot A_{sp}}$$

U : 열관류율[W/(m² · K)]

R : 열관류저항[(m² · K)/W]

ϕ_{in} : 공급열량(W)

$\Theta_{n,hot}$: 가열상자 환경온도(℃)

43˘£ ‡»` (2 )&^ ˘1 2007.11.13 2:17 PM ˘ ` 26 ˘fi ."."„ ,‡·ˇ· ! ‡ ¿ !!! CMYK

$\Theta_{n,cool}$: 저온실 환경온도(℃)

A_{sp} : 시험체 전열면적(m²)

4. 건축용 구성재의 열관류율 시험 측정불확도 추정

3에서 서술한 바와 같이 건축용 구성재의 열관류율 시험에 대한 측정불확도 산출과정은 세 단계로 이루어진다. 각 단계별로 측정불확도를 구해 나가고, 최종적으로 열관류율 측정값에 대한 불확도를 추정한다.

ϕ_{flank} : 교정판과 시험체틀 사이 손실열량

ϕ_{in} : 가열상자 공급열량

ϕ_{cal} : 교정판 통과열량

ϕ_{H} : 히터 발열량

ϕ_{F} : 팬 발열량

H_{I} : 가열상자 손실열량

λ_{cal} : 교정판 열전도율

d_{cal} : 교정판 두께

A_{cal} : 교정판 면적

W_{cal} : 교정판 폭

H_{cal} : 교정판 높이

A_{sp} : 시험체 전열면적

θ_a : 공기온도

θ_b : 배플판 표면온도

θ_s : 시험체 표면온도

θ_m : 평균방사 절대온도, $\theta_m = \frac{\theta_s + \theta_b}{2} + 273.15$

θ_n : 환경온도

$\Delta\theta_c$: 가열상자와 항온실 공기온도차

$\Delta\theta_s$: 가열상자와 저온실 시험체 표면온도차

$\Delta\theta_n$: 가열상자와 저온실 환경온도차

h_r : 방사열 전달율

σ : 스테판-볼츠만 상수 [5.67×10^{-8} W/(m² · K⁴)]

E : 방사계수, 대부분의 건자재에서 0.9

4.1 교정판과 시험체틀 사이 손실열량(ϕ_{flank})의 불확도 산출

항온실과 가열상자의 온도를 20℃로 유지하여, 가열상자에서 항온실로의 열량손실이 없도록 시험을 진행한다. 이 경우 열량손실은 시험체틀과 교정판 사이에서만 발생하는 것으로 가정한다. 〈표 2〉에 시험에서 측정한 각 값들을 나타내었다. 이를 바탕으로 교정판과 시험체틀 사이의 손실열량(ϕ_{flank})에 대한 불확도를 산출한다.

〈표 2〉 교정판과 시험체틀 사이 손실열량 교정시험 결과

항목	값	항목	값
ϕ_{flank}	6.68 W	λ_{cal}	0.0266 W/m · K
ϕ_{in}	17.84 W	d_{cal}	0.10 m
ϕ_{cal}	11.16 W	A_{cal}	2.25 m²
ϕ_{H}	13.37 W	W_{cal}	1.5 m
ϕ_{F}	4.47 W	H_{cal}	1.5 m
$\Delta\theta_{s,cal}$	18.64 K		

① 수식모델

$$\phi_{flank} = \phi_{in} - \phi_{cal}$$

$$\phi_{in} = \phi_F + \phi_H$$

$$\phi_{cal} = \frac{\Delta\theta_{s,cal} \times A_{cal} \times \lambda_{cal}}{d_{cal}}$$

$$A_{cal} = W_{cal} \times H_{cal}$$

② 불확도 요인

– 가열상자에 공급하는 열량(팬, 히터의 발열량)
– 교정판을 통과하는 열량(교정판 표면온도차, 면적, 열전도율, 두께)
– 교정판 면적(교정판의 폭, 높이)

③ 팬 · 히터의 발열량 불확도

팬 · 히터의 출력은 전압계와 데이터로거로 측정한다. 각 요인에 대한 표준불확도는 아래와 같다.

ⓐ 전압계 측정불확도

전압계를 교정한 결과, 교정성적서에서 21 V에 대한 확장불확도가 0.2 V(k=2)이므로,

$$u(V_{cal}) = 0.2/2 = 0.1\,V$$

ⓑ 데이터 로거의 전압 측정 정밀도에 의한 표준불확도

데이터 로거의 제조사 사양서에 의한 측정 정밀도는 ±0.01%rdg.±10㎶

이므로, 데이터 로거의 정밀도는 (0.01/100×21+10/10^{-6})=0.0021V (rdg.=21 V일 때)이다. 따라서,

$$u(V_{acc}) = 0.0021/\sqrt{3} = 0.0012\,V$$

ⓒ 데이터 로거의 읽는 값 분해능에 의한 표준불확도

데이터 로거의 최소 표시 값은 0.01 V이므로, 직사각형 분포로 가정하여 산출하면,

$$u(V_{read}) = 0.01/\sqrt{3} = 0.0058\,V$$

ⓓ 팬 · 히터 출력의 합성표준불확도

팬 · 히터의 출력에 대한 불확도 인자들을 불확도 전파법칙에 따라 합성하여 합성표준불확도를 구한다.

합성표준불확도

$$u(V) = \sqrt{u^2(V_{mea}) + u^2(V_{acc}) + u^2(\theta_{read})}$$

$$= \sqrt{0.1^2 + 0.0012^2 + 0.0058^2} = 0.1002\,V$$

ⓔ 팬 · 히터의 발열량 표준불확도

교정시험시 측정한 열량의 불확도는 21V의 전압에서 측정된 전류량을 곱하여 산정한다.

$$u(\phi_H) = 0.637 \times u(V_H) = 0.637 \times 0.1002$$
$$= 0.0638\,W$$

$$u(\phi_F) = 0.213 \times u(V_F) = 0.213 \times 0.1002$$
$$= 0.0213\,W$$

④ 가열상자 공급열량 합성표준불확도

팬 · 히터의 표준불확도로부터 가열상자 공급 열량의 합성표준불확도를 불확도 전파법칙에 의거하여 구한다.

$$u(\phi_{in}) = \sqrt{u^2(\phi_F) + u^2(\phi_H)}$$
$$= \sqrt{0.0638^2 + 0.0213^2} = 0.0673\,W$$

⑤ 교정판 표면온도 측정 불확도

ⓐ 교정기관의 교정성적서상의 표면온도측정 확장불확도는 0.4℃/(k=2)이므로,

$$u(\theta_1) = 0.4/2 = 0.2\,℃$$

ⓑ 데이터 로거의 온도를 읽는 분해능에 의한 표준불확도

데이터 로거의 최소 표시값은 0.01℃이므로, 직사각형 분포로 가정하여 산출하면,

$$u(\theta_{read}) = 0.01/\sqrt{3} = 0.0058\,℃$$

ⓒ 온도측정의 대한 불확도 인자들을 불확도 전파법칙에 따라 합성하여 합성표준불확도를 구한다.

$$u(\theta) = \sqrt{u^2(\theta_1) + u^2(\theta_{read})}$$
$$= \sqrt{0.2^2 + 0.0058^2} = 0.200℃$$

ⓓ 온도측정차의 표준불확도는 가열측 및 저온측에 대한 측정불확도를 합성하여 산출한다.

$$u(\Delta\theta) = \sqrt{u^2(\theta_{s,cal,i}) + u^2(\theta_{s,cal,e})}$$
$$= \sqrt{2} \times u(\theta) = \sqrt{2} \times 0.200 = 0.283℃$$

⑥ 교정판 두께 측정 불확도

ⓐ 버니어캘리퍼스의 표준불확도

교정기관의 교정성적서상의 버니어캘리퍼스의 확장불확도는 0.06 ㎜(k=1.84) 이므로,

$$u(d_{cal}) = 0.06/1.84 = 0.033mm$$

ⓑ 니어캘리퍼스의 분해능에 의한 표준불확도

버니어캘리퍼스의 최소눈금이 0.05㎜이므로, 직사각형 분포로 가정하여 산출하면,

$$u(d_{read}) = 0.05/\sqrt{3} = 0.029mm$$

ⓒ 두께측정의 표준불확도에 대한 불확도 인자들을 불확도 전파법칙에 따라 합성하여 합성표준불확도를 구한다.

$$u(d) = \sqrt{u^2(d_{cal}) + u^2(d_{read})}$$
$$= \sqrt{0.033^2 + 0.029^2} = 0.044mm$$
$$= 0.000044m$$

⑦ 교정판 열전도율 측정 표준불확도

교정판의 열전도율을 KS L 9016 에 따라 측정한다. 이에 따라 산출한 확장불확도는 0.001 W/m · K(k=2)이므로,

$$u(\lambda_{cal}) = 0.001/2 = 0.0005\, W/m \cdot K$$

⑧ 교정판의 면적 측정 표준불확도

교정판 면적은 폭과 높이의 곱으로 구할 수 있으며, 폭과 높이는 줄자로 측정하였다.

ⓐ 길이측정에 대한 반복 측정 표준불확도

반복측정에 대한 불확도는 A형 표준불확도로 산출한다. 길이를 10회 반복 측정한 결과는 다음과 같다.

측정값 : 1.50, 1.50, 1.51, 1.50, 1.50, 1.51, 1.50, 1.50, 1.50, 1.50

$$\bar{x} = \Sigma\frac{x_i}{n} = 1.502\,m\,,\; s = \sqrt{\frac{\Sigma(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

= 0.004m 이므로,

$$u(W_{re}) = \frac{S}{\sqrt{n}} = 0.001m$$

ⓑ 줄자의 분해능에 의한 표준불확도

줄자의 최소 눈금은 1 ㎜ 이므로, 직사각형 분포로 가정하여 산출하면,

$$u(W_{read}) = 0.001/\sqrt{3} = 0.00058\,m$$

ⓒ 길이측정 표준불확도에 대한 불확도 인자들을 불확도 전파법칙에 따라 합성하여 합성표준불확도를 구한다.

$$u(W) = \sqrt{u^2(W_{re}) + u^2(W_{read})}$$
$$= \sqrt{0.001^2 + 0.00058^2} = 0.0015\,m$$

ⓓ 교정판 면적 측정 표준불확도는 각 불확도 인자들에 대한 감도계수를 산출하고, 그 결과를 합성하여 구한다.

$$u(A_{cal}) = \sqrt{c_{H_{cal}}^2 \times u^2(H_{cal}) + c_{W_{cal}}^2 \times u^2(W_{cal})}$$
$$= \sqrt{c_{H_{cal}}^2 + c_{W_{cal}}^2} \times u(W)$$
$$= \sqrt{1.5^2 + 1.5^2} \times 0.0015 = 0.0031\,m^2$$

감도계수는 다음과 같다.

$$c_{H_{cal}} = W_{cal},\quad c_{W_{cal}} = H_{cal}$$

⑨ 교정판을 통과하는 열량의 표준불확도는 각 불확도 인자들에 대한 감도계수를 산출하고, 그 결과를 합성하여 구한다.

$$u(\phi_{cal}) = \sqrt{c_{\Delta\theta_{s,cal}}^{2} \times u^2(\Delta\theta_{s,cal}) + c_{A_{cal}}^{2} \times u^2(A_{cal}) + c_{\lambda_{cal}}^{2} \times u^2(\lambda_{cal}) + c_{d_{cal}}^{2} \times u^2(d_{cal})}$$

$$= \sqrt{0.599^2 \times 0.283^2 + 4.958^2 \times 0.0031^2 + 419.4^2 \times 0.0005^2 + 11.16^2 \times 0.000044^2}$$

$$= 0.270\ W$$

감도계수는 다음과 같다.

$$c_{\Delta\theta_{s,cal}} = \frac{A_{cal} \times \lambda_{cal}}{d_{cal}},\quad c_{A_{cal}} = \frac{\Delta\theta_{s,cal} \times \lambda_{cal}}{d_{cal}},$$

$$c_{\lambda_{cal}} = \frac{\Delta\theta_{s,cal} \times A_{cal}}{d_{cal}},$$

$$c_{d_{cal}} = \frac{\Delta\theta_{s,cal} \times A_{cal} \times \lambda_{cal}}{d_{cal}^{2}}$$

⑩ 교정판과 시험체틀 사이 손실열량의 표준불확도는 가열상자 공급열량 및 교정판 통과열량에 대한 표준불확도를 합성하여 산출한다.

$$u(\phi_{flank}) = \sqrt{u^2(\phi_{in}) + u^2(\phi_{cal})}$$

$$= \sqrt{0.0673^2 + 0.270^2} = 0.278\ W$$

4.2 가열상자 손실열량(HI) 불확도 산출

교정판과 시험체틀 사이의 손실열량 교정시험이 끝난 후, 가열상자로의 손실열량을 확인하기 위하여, 가열상자와 항온실 사이에 일정온도차(1℃)를 주고, 정상상태가 되도록 시험을 진행하여 가열상자의 손실열량(H_I)을 교정한다. 〈표 3〉에 시험에서 측정한 각 값들을 나타내었다.

① 수식모델

$$H_I = \frac{\phi_{in} - \phi_{cal} - \phi_{flank}}{\Delta\theta_c}$$

$$\phi_{in} = \phi_{cal} + \phi_I + \phi_{flank}$$

$$= \phi_F +,\quad \phi_I = H_I \times \Delta\theta_c$$

〈표 3〉 가열상자 손실열량 교정시험 결과

항목	값	항목	값
H_I	5.43 W/K	ϕ_F	4.51 W
ϕ_{in}	12.26 W	$\Delta\theta_{s,cal}$	17.87K
ϕ_{cal}	10.70 W	λ_{cal}	0.0266W/m · k
ϕ_{flank}	6.68 W	A_{cal}	2.25 m²
$\Delta\theta_c$	0.94 W	W_{cal}	1.5 m
ϕ_H	7.75 K	H_{cal}	1.5 m

② 가열상자 손실열량의 불확도 요인

- 가열상자 공급열량(팬 · 히터 발열량)
- 교정판 통과열량(교정판 표면온도차, 열전도율, 두께, 면적)
- 교정판과 시험체틀 사이 손실열량
- 가열상자 내의 공기온도차(공기온도)

③ 가열상자 공급 열량 표준불확도

교정시험결과 팬 및 히터의 발열량이 7.75 W, 4.51 W이므로, 4.1절에서 산출한 팬 및 히터의 표준불확도를 적용하여 아래와 같이 산출한다.

$$u(\phi_H) = 0.369 \times u(V_H)$$

$$= 0.369 \times 0.1002 = 0.0370\ W$$

$$u(\phi_F) = 0.215 \times u(V_F)$$

$$= 0.215 \times 0.1002 = 0.0215\ W$$

$$u(\phi_{in}) = \sqrt{u^2(\phi_F) + u^2(\phi_H)}$$

$$= \sqrt{0.0370^2 + 0.0215^2} = 0.0428\ W$$

④ 가열상자 손실열량의 합성표준불확도는 가열

상자 공급열량, 교정판 통과열량, 교정판과 시험체틀 손실열량 및 가열상자 공기온도차에 대한 표준불확도를 합성하여 산출한다.

$$u(H_I) = \sqrt{\begin{aligned} & c_{\phi_{in}}^2 \times u^2(\phi_{in}) + c_{\phi_{sur}}^2 \times u^2(\phi_{cal}) \\ & + c_{\phi_{flank}}^2 \times u^2(\phi_{flank}) + c_{\Delta\theta_c}^2 \times u^2(\Delta\theta_c) \end{aligned}}$$

$$= \sqrt{\begin{aligned} & (-1.064)^2 \times 0.0428^2 + 1.064^2 \times 0.270^2 \\ & + 1.064^2 \times 0.278^2 + 5.995^2 \times 0.283^2 \end{aligned}}$$

$$= 1.746\ W/K$$

감도계수는 다음과 같다.

$$c_{\phi_{in}} = \frac{1}{\Delta\theta_c},\ c_{\phi_{cal}} = c_{\phi_{flank}} = -\frac{1}{\Delta\theta_c},$$

$$c_{\Delta\theta_c} = -\frac{\phi_{in} - \phi_{cal} - \phi_{flank}}{\Delta\theta_c^2}$$

4.3 시험체의 열관류율 측정

손실열량에 대한 교정시험이 실시된 후, 시험체의 열관류율을 측정하고 열량보정값을 적용한 열관류율을 산출한다. 열관류율 산출을 위한 시험체는 건축용 벽체이며, 〈표 4〉에 열관류율 시험에서 측정된 값을 나타내었다.

〈표 4〉 시험체 열관류율 측정시험 결과

항목	값	항목	값
U_m	1.00 W/m²K	ϕ_{flank}	6.68 W
ϕ_{in}	50.81 W	$\Delta\theta_n$	19.57 K
H_I	5.44 W/K	A_{sp}	2.25 m²
$\Delta\theta_c$	0.06 K		
시험체 구성 : 콘크리트 120㎜ + 단열재12㎜ + 공기층 50㎜ + 화강암 30㎜(1.5m×1.5m)			

① 시험체의 열관류율 수식모델

$$U_m = \frac{\phi_{in} - H_I \times \Delta\theta_c - \phi_{flank}}{\Delta\theta_n \times A_{sp}}$$

단, $A_{sp} = W_{sp} \times H_{sp}$

② 시험체의 열관류율 불확도 요인

- 가열상자 공급열량(팬 · 히터 출력)
- 가열상자 손실열량
- 가열상자 내외 공기온도차, 가열상자와 저온실의 공기온도차(온도측정)
- 시험체와 시험체틀 사이 손실열량
- 환경온도차
- 시험체 전열면적

③ 가열상자 공급 열량 표준불확도

팬 및 히터의 발열량이 45.82 W, 4.99 W이므로, 4.1절에서 산출한 팬 및 히터의 표준불확도를 적용하여 아래와 같이 산출한다.

$$u(\phi_H) = 2.182 \times u(V_H) = 2.182 \times 0.1002 = 0.2186\ W$$

$$u(\phi_F) = 0.238 \times u(V_F) = 0.238 \times 0.1002 = 0.0238\ W$$

$$u(\phi_{in}) = \sqrt{u^2(\phi_F) + u^2(\phi_H)} = \sqrt{0.2186^2 + 0.0238^2} = 0.220\ W$$

④ 환경온도 측정 표준불확도

환경온도는 아래 수식에 따라 가열측과 저온측에 대하여 각각 산출한다. 〈표 5〉에는 환경온도 산출을 위한 측정값을 나타내었다.

$$\theta_n = \frac{\theta_a \dfrac{\phi_{in}}{A_{sp}} + h_r(\theta_a - \theta_b)\theta_s}{\dfrac{\phi_{in}}{A_{sp}} + h_r(\theta_a - \theta_b)}$$

43˜£ ‡»` (2 )‰ˆ ˜1 2007.11.13 2:17 PM ˘ ` 31 ˜fi .˝.¯„ ,‡·˘· ! ‡ ¿ !!! CMYK

〈표 5〉 환경온도 산출을 위한 시험데이터

항목	값		항목	값	
h_r	가열측	5.06	θ_m	가열측	291.5K
	저온측	4.20		저온측	273.9K
θ_a	가열측	20.05 ℃	θ_b	가열측	19.38 ℃
	저온측	0.05 ℃		저온측	0.21 ℃
θ_n	가열측	19.65 ℃	θ_s	가열측	17.32 ℃
	저온측	0.08 ℃		저온측	15.1 ℃

단, $h_r = 4\sigma E T_m^3$

ⓐ 방사열 전달율 측정불확도

환경온도의 표준불확도를 산출하기 위해 방사열 전달율 측정불확도를 먼저 산출한다. 배플판과 표면온도의 표준불확도는 4.1절에서 구한 값과 동일하다.

$$u(\theta_m) = \frac{1}{2}\sqrt{u^2(\theta_s) + u^2(\theta_b)}$$
$$= \frac{1}{2}\sqrt{0.2^2 + 0.2^2} = 0.141℃$$ 이므로,

$$u(h_{r,hot}) = 3 \times 4\sigma E\theta_m^2 \times u(\theta_m)$$
$$= 3 \times 4 \times 5.67 \times 10^{-8} \times 0.9 \times$$
$$(\frac{17.32 + 19.38}{2} + 273.15)^2 \times 0.141$$
$$= 0.00736$$

$$u(h_{r,cool}) = 3 \times 4\sigma E\theta_m^2 \times u(\theta_m)$$
$$= 3 \times 4 \times 5.67 \times 10^{-8} \times 0.9 \times$$
$$(\frac{0.21 + 1.51}{2} + 273.15)^2 \times 0.141$$
$$= 0.00650$$

ⓑ 환경온도의 합성표준불확도는 온도측정, 공급열량, 시험체 전열면적에 대한 감도계수를 구하고, 각 요인들의 표준불확도를 합성하여 산출한다.

$$u(\theta_{n,hot})$$
$$= \sqrt{c_{\theta_a}^2 \times u^2(\theta_a) + c_{\phi_{in}}^2 \times u^2(\phi_{in}) + c_{h_r}^2 \times u^2(h_r) + c_{\theta_b}^2 \times u^2(\theta_b) + c_{\theta_s}^2 \times u^2(\theta_s)}$$
$$= \sqrt{0.337^2 \times 0.200^2 + 0.00787^2 \times 0.220^2 + (-0.0682)^2 \times 0.00736^2 + 0.0514^2 \times 0.200^2 + 0.148^2 \times 0.200^2}$$
$$= 0.127℃$$

$$u(\theta_{n,cool})$$
$$= \sqrt{c_{\theta_a}^2 \times u^2(\theta_a) + c_{\phi_{in}}^2 \times u^2(\phi_{in}) + c_{h_r}^2 \times u^2(h_r) + c_{\theta_b}^2 \times u^2(\theta_b) + c_{\theta_s}^2 \times u^2(\theta_s)}$$
$$= \sqrt{1.390^2 \times 0.200^2 + 0.00152^2 \times 0.220^2 + (-0.0158)^2 \times 0.00650^2 + (-0.349)^2 \times 0.200^2 + 0.00427^2 \times 0.200^2}$$
$$= 0.287℃$$

감도계수는 아래와 같다.

$$c_{\theta_a} = \frac{(\frac{\phi_{in}}{A_{sp}} + h_r\theta_s)(\frac{\phi_{in}}{A_{sp}} + h_r(\theta_a - \theta_b)) - (\theta_a\frac{\phi_{in}}{A_{sp}} + h_r(\theta_a - \theta_b)\theta_s)(h_r)}{(\frac{\phi_{in}}{A_{sp}} + h_r(\theta_a - \theta_b))^2}$$

$$c_{\phi_{in}} = \frac{(\frac{\theta_a}{A_{sp}})(\frac{\phi_{in}}{A_{sp}} + h_r(\theta_a - \theta_b)) - (\theta_a\frac{\phi_{in}}{A_{sp}} + h_r(\theta_a - \theta_b)\theta_s)(\frac{1}{A_{sp}})}{(\frac{\phi_{in}}{A_{sp}} + h_r(\theta_a - \theta_b))^2}$$

$$c_{h_r} = \frac{((\theta_a - \theta_b)\theta_s)(\frac{\phi_{in}}{A_{sp}} + h_r(\theta_a - \theta_b)) - (\theta_a\frac{\phi_{in}}{A_{sp}} + h_r(\theta_a - \theta_b)\theta_s)(\theta_a - \theta_b)}{(\frac{\phi_{in}}{A_{sp}} + h_r(\theta_a - \theta_b))^2}$$

$$c_{\theta_b} = \frac{(-h_r\theta_s)(\frac{\phi_{in}}{A_{sp}} + h_r(\theta_a - \theta_b)) - (\theta_a\frac{\phi_{in}}{A_{sp}} + h_r(\theta_a - \theta_b)\theta_s)(-h_r)}{(\frac{\phi_{in}}{A_{sp}} + h_r(\theta_a - \theta_b))^2}$$

$$c_{\theta_s} = \frac{h_r(\theta_a - \theta_b)}{\frac{\phi_{in}}{A_{sp}} + h_r(\theta_a - \theta_b)}$$

ⓒ 환경온도차 표준불확도는 가열측 및 저온측의 환경온도 표준불확도를 합성하여 산출한다.

$$u(\Delta\theta_n) = \sqrt{u(\theta_{n,hot})^2 + u(\theta_{n,cool})^2}$$
$$= \sqrt{0.127^2 + 0.287^2} = 0.314\,℃$$

⑤ 시험체의 열관류율 측정 표준불확도

최종적으로, 시험체 열관류율 측정에 대한 표준불확도는 공급열량, 가열상자 손실열량, 공기온도차, 시험체외 시험체틀 손실열량, 시험체 전열면적 및 환경온도차에 대한 감도계수를 구하고, 각 요인들의 표준불확도를 합성하여 산출한다.

$$u(U_m) = \sqrt{\begin{array}{c} c_{\phi_{in}}^2 \times u^2(\phi_{in}) + c_{H_I}^2 \times u^2(H_I) + c_{\Delta\theta_c}^2 \times u^2(\Delta\theta_c) \\ + c_{\phi_{flank}}^2 \times u^2(\phi_{flank}) + c_{A_{sp}}^2 \times u^2(A_{sp}) + c_{\Delta\theta_n}^2 \times u^2(\Delta\theta_n) \end{array}}$$

$$= \sqrt{\begin{array}{c} 0.0227^2 \times 0.220^2 + (-0.00136)^2 \times 1.746^2 + (-0.124)^2 \times 0.283^2 \\ + (-0.0227)^2 \times 0.278^2 + (-0.442)^2 \times 0.0031^2 + (-0.0508)^2 \times 0.314^2 \end{array}}$$

$$= 0.0394\ W/m^2 \cdot K$$

감도계수는 아래와 같다.

$$c_{\phi_{in}} = \frac{1}{\Delta\theta_n \times A_{sp}},\ c_{H_I} = \frac{-\Delta\theta_c}{\Delta\theta_n \times A_{sp}},$$

$$c_{\Delta\theta_c} = \frac{-H_I}{\Delta\theta_n \times A_{sp}},\ c_{\phi_{flank}} = \frac{-1}{\Delta\theta_n \times A_{sp}},$$

$$c_{\Delta\theta_n} = -\frac{\phi_{in} - H_I \times \Delta\theta_c - \phi_{flan}}{\Delta\theta_n^2 \times A_{sp}},$$

$$c_{A_{sp}} = -\frac{\phi_{in} - H_I \times \Delta\theta_c - \phi_{flan}}{\Delta\theta_n \times A_{sp}^2}$$

4.4 확장불확도의 추정

산출된 합성표준불확도가 얼마나 신뢰성을 가지는지 확인하고 k 값을 결정하기 위하여 유효자유도를 산출한 결과는 아래와 같다. B형 평가의 자유도는 모집단에 대한 것이므로 무한대로 본다.

$$\nu_{eff} = \frac{u_m^4}{\sum_{i=1}^{n} \frac{(c_i \cdot u_i)^4}{\nu_i}} \geq 100$$

따라서, 유효자유도(ν_{eff}) 계산의 결과가 100 보다 크고 ∞에 가까우므로, 정규분포로 가정될 수 있다. 신뢰구간은 약 95 %, t분포표에 의한 포함인자 k=2이다.

따라서, 확장불확도는 다음과 같다.

$$U_m = k \times u_m = 2 \times 0.0394 = 0.0788\ W/m^2 \cdot K$$

4.5 불확도의 표현

건축용 벽체에 대한 열관류율 측정시험결과는 다음과 같다.

U = (1.00±0.08) W/m^2 · K, (신뢰수준 약 95 %, k=2)

5. 결 론

서두에서 언급한 바와 같이 측정결과의 신뢰성은 시험 및 측정분야에서 중요성이 점점 커지고 있다. 과학적으로 정밀하게 측정된 결과라 하더라도 실제 결과의 참값을 확인할 수 없으므로, 측정결과를 어느 정도의 신뢰성 범위 내에서 믿을 수 있는가를 통계적 방법으로 논리적으로 표현하고자 하는 것이며, 그것이 불확도라는 형태로 자리잡아 가고 있다. 여기서는 열관류율 측정분야에서 신뢰도 확인을 위한 불확도 추정절차를 소개하고자 하였다.

43˘£ ‡»` (2 )&ˆ ˘1 2007.11.13 2:17 PM ˘ ` 33 ˘fi ."."„ ,‡·˘· ! ‡ ¿ !!!

본 연구에서는 건축용 구성재에 대한 열관류율 측정시험의 불확도 인자로 크게 공급열량, 가열상자 손실열량, 공기온도차, 시험체외 시험체틀 손실열량, 시험체 전열면적 및 환경온도차를 설정하였다. 각 요인에 대한 표준불확도 산출을 통하여 각 불확도 인자를 정량화하고 감도계수의 산출과 함께 불확도 인자들을 합성한 합성표준불확도를 추정하였다. 그리고, 유효자유도 산정을 통하여 신뢰수준을 설정하고, 포함인자 k를 이용한 확장불확도를 산출함으로써 열관류율 측정시험에 대한 측정불확도를 표현하였다.

그 결과, 본 연구에서 시험한 건축용 벽체의 열관류율 및 불확도는 $U=(1.00\pm0.08)\ W/m^2\cdot K$, (신뢰수준 약 95 %, k=2)로 나타났다. FILK

<참고문헌>

1. 한국표준협회(2005), KS A 3000(측정결과의 불확도 산정 및 표현을 위한 지침).
2. 한국표준협회(2002), KS F 2277(건축용 구성재의 단열성능 측정방법 – 교정 열상자법 및 보호 열상자법)
3. 한국건자재시험연구원(2004), KS A 17025 운영실무 교육 교재.
4. 정영선, 최경석, 이승언(2004). "건축 단열재 열전도율 시험에 대한 측정불확도 추정". 대한건축학회논문집 계획계, 20권 8호, pp189-196
5. 고종철, 이종인(2006). "공동주택 중량바닥충격음의 측정불확도 추정에 관한 연구". 대한건축학회 학술발표대회논문집, 제26권 제1호, pp729-732
6. ISO(1993), Guide to the expression of uncertainty in measurement (issued by ISO, IEC, BIPM, IFCC, IUPAC, IUPAP and OIML)
7. ISO(1994), ISO 8990(Thermal insulation– Determination of steady-state thermal transmission properties– Calibrated and guarded hot box)