

## 적외선열화상과 온도차비율법을 이용한 목조 주택의 열환경평가\*1

장윤성\*2 · 엄창득\*2 · 박준호\*2 · 이전제\*2,4 · 박주생\*3 · 박문재\*3 · 여환명\*2,4†

### Thermal Environment Evaluation of Wooden House Using Infra-red Thermal Image and Temperature Difference Ratio (TDR)\*1

Yoon-Seong Chang\*2 · Chang-Deuk Eom\*2 · Jun-Ho Park\*2 ·  
Jun-Jae Lee\*2,4 · Joo-Saeng Park\*3 · Moon-Jae Park\*3 · Hwanmyeong Yeo\*2,4†

#### 요 약

적외선 열화상 기술은 물체의 표면에서 방사되는 적외선을 검출하여 그 물체의 표면온도 분포를 나타내는 기술로서 물체의 내부 상태도 간접적으로 표현할 수 있다. 이 기술은 광범위한 분야에서 피사체의 물리적 손상이 허락되지 않을 경우 사용되고 있다. 본 실험에서는 “적외선 촬영법에 의한 건축물 단열 성능 평가 방법”(KS F 2829)에 의거하여 결함부위 온도차 비율법(TDR : Temperature Difference Ratio)라는 지표로 국립산림과학원 내 목조주택의 단열성능을 평가하였다. 실험을 위한 공간을 목조주택의 2층 방으로 정하고 적외선 카메라로 방의 실내와 실외의 표면온도를 측정하였다. 열화상 이미지를 이용하여 모서리 부분과 창을 통한 열손실을 정량적으로 파악할 수 있었으며 육안으로 확인 불가능한 열손실 결함부위를 탐지할 수 있었다. 이를 바탕으로 기존목조주택의 열환경성능 제고를 위한 개·보수시 도움이 될 것으로 기대된다.

\*1 접수 2010년 7월 20일, 채택 2010년 10월 5일

\*2 서울대학교 농업생명과학대학 산림과학부. Dept. Forest Science, College of Agriculture and Life Science, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

\*3 국립산림과학원 녹색자원이용부 탄소순환재료과. Div. Wood Engineering, Dept. Forest Resources Utilization, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

\*4 서울대학교 농업생명과학연구원. Research Institute for Agriculture and Life Science, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

† 교신저자(corresponding author) : 여환명(e-mail: hyeo@snu.ac.kr)

## ABSTRACT

Infrared (IR) thermography which is the technique for detecting invisible infrared light emitted by objects due to their surface thermal condition and for producing an image of the light has been applied in various field without damaging the objects. It also could be used indirectly to examine the inside of an object. In this study, insulation property of wooden house in Korea Forest Research Institute (KFRI) was evaluated with according to “Thermal performance of building - Quantitative detection of thermal irregularities in building envelopes - infrared method (KS F 2829)”. This method uses “Temperature Difference Ratio (TDR)” between outdoor wall surface and indoor wall surface of wooden building for evaluating its thermal performance. The thermal performance of a room on the 2nd floor of the wooden house was focused in this study and IR thermography on the indoor and outdoor surface of the house was captured by IR camera. Heat loss from the corner and the window of the wooden house as well as wall of the house was quantitatively evaluated and the invisible heat loss in the wall was detected. It is expected that the results from this study could contribute to improve the wooden building energy efficiency.

**Keywords:** insulation performance, infrared thermography, temperature difference ratio (TDR), wooden building

## 1. 서 론

현재 전 세계적으로 지구온난화에 따른 기후변화 대책 마련과 화석자원고갈에 따른 지속 가능한 자원 이용기술 개발에 대한 논의가 활발히 진행되고 있다. 국제 유가의 불안정성, 산업원자재와 식량 가격의 폭등과 같은 국제환경 변화에 따라 탄소배출량 감축에 대한 관심과 친환경적인 LOHAS 문화가 확산되어 가고 있다. 우리나라 또한 기후변화대응 종합기본계획(2008. 9)을 발표하는 등 지구온난화를 억제하기 위한 범지구적 노력에 동참하고 있다. 건축분야에서도 건축물의 냉난방성능을 증진하기 위한 설계 및 시공기술이 개발되고 동시에 냉난방 및 조명장치의 절전화가 시도되고 있을 뿐만 아니라 아예 구조재 자체를 친환경자재인 목재로 전환시킨 목조주택의 시공이 늘고 있는 실정이다(강만호 외, 2007).

고유가 시대를 맞이하여 에너지 사용의 효율 향상을 위한 냉난방 에너지 효율을 높여야 하기 때문에 이 대량의 열손실부위를 쉽고 빠르게 탐지하고 정확히

정량화 할 수 있는 방법이 필요하다. 건축물의 단열 벽체에 대한 설계기준은 정상상태 하에서 측정된 벽체재료들의 열저항과 표면열전달저항 등을 합한 벽체 총 열저항의 역수로 표시되는 열관류율을 이용하여 정하고 있다. 하지만 실제 건축물에 있어 이 설계기준이 전 부위에서 만족할 수 없음이 자주 발견된다. 이에 따라 실제건축물의 단열성능을 평가하는 방법의 필요성이 증대되어 적외선 열화상을 이용한 시험방법(KS F 2829/EN 13187/ASTM C1060:90/ISO 6781)이 제시되었다.

적외선 진단법은 비접촉식으로 넓은 면적의 진단이 가능하며, 표면온도 측정을 통한 관류열량의 분석으로 벽체내부의 단열 상황을 알 수 있고, 침기/누기 부위를 발견할 수 있으며, 실내벽체 각 부위의 표면온도를 통해 냉/온 복사를 정량화함으로써 실내쾌적성 평가, 노점온도 이하의 낮은 벽체부위를 검출하여 결로의 위험성을 차단할 수 있다. 건축분야에서의 적용은 1978년 미국의 Clemena에 의해 토목 철근 콘크리트 구조물에 적용한 적외선 영상장치 응용기술이

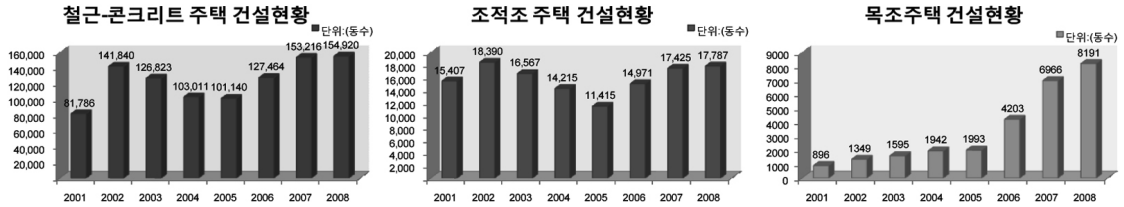


Fig. 1. Construction Industry with different building structures in Korea (Ministry of Land, Transport and Maritime, 2009).

성공한 이후 건축물의 열손실량 측정, 건물 구조체의 열 저항값 측정, 단열결합 측정, 건축물의 구조결합 측정, 시설물 관리 등에 사용되었다(한국콘크리트 학회, 2001).

최 등(2004)은 적외선 열화상 기술을 이용하여 정량적인 건축물 단열성능을 평가하고, 상대온도차비를 이용한 분석기법을 제시하였다. 이를 이용하여 신축 건축물의 완공 후 단열 하자평가 및 개수전 단열 성능의 정량적 평가에 적용될 수 있다고 보고하였다. 또한 Wigenhauser (2002)는 적외선 열화상 기술이 단순히 건물외피의 열손실만을 측정하는 것이 아니라 그 개념을 확장하여 도시공학에 적용하여 건물 및 구조물의 수분탐지에도 이용될 수 있다는 것을 보고하였다.

본 연구에서는 목조주택의 주거열환경을 평가하기 위해 건물외부의 기후조건 및 실내공기 온도 분포를 측정하고, 건물 벽체의 표면온도를 적외선 열화상으로 분석하여 목조건축물에 대한 정량적인 단열성능 현장평가를 시행하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 열환경 평가대상

한옥에 대한 일반인들의 선호도를 반영하여 설계하고, 목조주택의 생산성 향상을 꾀하기 위해 공장에서 부재를 치수가공한 후 현장에서 골조조립을 한 프리컷(pre-cut)공법으로 2006년 국립산림과학원 내에 지어진 목조 테스트 하우스를 시험대상으로 정하였다. 2' × 6"의 낙엽송 집성재를 이용하여 벽체를 제작하였고 사이에 R-19 유리섬유로 단열 시공하였다.



Fig. 2. Test house.

### 2.2. 측정방법

#### 2.2.1. 실내 및 실외 외기 상태 측정

실험을 위한 공간으로 건물 2층 동측방을 정하고 방의 중심부에 J-type 열전대를 설치하고 5분 단위로 실내공기온도를 측정하였다. 온·습도계(Model.601, testo)를 이용하여 현장의 실외 대기온도와 습도를 측정하였고 풍속계(Model.8360, Veloci-Calc)를 이용하여 측정 당시의 외기 풍속을 측정하였다.

#### 2.2.2. 실내 및 실외 벽체표면 온도 측정

벽체 단열성능에 의한 열손실을 해석하고자 적외선 카메라를 이용하여 벽체 내부와 외부의 표면온도를 측정하였다. 단열성이 높을수록 실외표면온도는 실외 외기온도와 유사하고, 실내표면온도는 실내대기온도와 유사하게 측정된다. 이러한 원리를 통하여 구성된 KS F 2829 (적외선 촬영법에 의한 건축물 단열 성능 평가 방법)에 제시된 상대온도차비(TDR : Temper-

ture Difference Ratio)라는 지표로 테스트 하우스의 단열성능을 평가하였다. 실험에 사용한 적외선 카메라(MobIR M4, GUIDIR)의 측정범위는  $-20\sim 250^{\circ}\text{C}$ , 열감도는  $0.01^{\circ}\text{C}$ , 파장은  $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 이다.

### 2.2.3. TDR의 개념

적외선 열화상카메라로 측정된 건축물 실내의 표면온도와 온도센서를 통해 측정된 실내외대기온도를 바탕으로 TDR를 평가하였다. 아래에 제시된 식에 따라 TDR을 구하고 이를 바탕으로 실외표면 온도차비율인,  $TDR_o$  (Temperature Difference Ratio Outside)에 의한 열관류율환산과 실내표면온도차비율인,  $TDR_i$ 에 의한 내표면 결로 판정을 하였다.

실제 적외선을 이용한 TDR 측정에 영향을 미치는 인자는 풍속, 일사, 강수에 의한 '주위환경요인'과 표면방사율, 열전도율 등의 '측정건물요인', 그리고 측정시간과 측정해상도 등의 '촬영시기 및 측정기기'로 나눌 수 있다.

#### 2.2.3.1. 실내표면 온도차 비율( $TDR_i$ : Temperature Difference Ratio inside)

$TDR_i$ 는 건축물 실내 내표면 부위에 대한 결로판정을 위한 방안으로 사용되던 것으로, 실내의 공기온도차에 대한 실내공기온도와 실내표면온도의 차를 비율로 표시한 것이다.  $TDR_i$ 가 의미하는 바는 단열상태가 우수할수록 실내표면온도는 실내온도와 가까워지므로 0에 수렴하게 되며, 단열상태가 나쁠수록 실내표면 온도가 외기온도에 접근하게 되어 1에 수렴한다는 가정에 근거한다(한국건설기술연구원, 2003).

$TDR_i$ 의 개념을 열전달 방정식에 근거하여 설명하기 위하여 1차원 정상상태(steady state)의 벽체를 가정하고 그에 따른 벽체 실내표면에서의 열전달 방정식을 세우면 다음과 같다.

$$\dot{q}_1 = U \times A_1 \times (T_i - T_o) \quad (1)$$

$$\dot{q}_2 = h_i \times A_2 \times (T_i - T_{is}) \quad (2)$$

$\dot{q}_1$  : 벽체의 열류(W)

$\dot{q}_2$  : 벽체의 실내표면으로부터 실내공기로의 열류(W)

$T_i$  : 실내공기온도( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_o$  : 외기공기온도( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{is}$  : 벽체 실내표면온도( $^{\circ}\text{C}$ )

$A_1$  : 관류 부위의 평균면적( $\text{m}^2$ )

$A_2$  : 내표면 부위의 면적( $\text{m}^2$ )

$U$  : 벽체의 열관류율( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )

$h_i$  : 벽체의 내표면 열전달율( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )

따라서, 정상상태의 벽체에서 실내공기와 벽체 실내표면의 접촉면 온도는 일정하게 유지되고 단위시간당 벽체를 통과하는 열량은 벽체의 어느 부위에서나 동일하므로  $\dot{q}_1 = \dot{q}_2$ 라 하면, 다음 식이 도출된다.

$$\frac{U \times A_1}{h_i \times A_2} = \frac{T_i - T_{is}}{T_i - T_o} = TDR_i \quad (3)$$

$TDR_i$  : 실내표면 온도차비율

결과적으로 아래와 같은 식이 도출된다.

$$TDR_i = \frac{T_i - T_{is}}{T_i - T_o} \quad (4)$$

$T_i$  : 실내온도(측정 벽체표면에서 2 m 떨어진 방의 중심부)

$T_o$  : 외기온도(측정 시점 이전 72시간 동안의 평균값을 적용하였음)

$T_{is}$  : 벽체의 실내표면 온도

#### 2.2.3.2. 실외표면 온도차 비율( $TDR_o$ : Temperature Difference Ratio outside)

$TDR_o$ 는 건축물 외표면 부위에 대한 단열성평가를 위한 것으로  $TDR_i$  개념을 외표면에 적용하여 도출되는 지표이다.  $TDR_o$ 는 실내외 온도차에 대한 외기온도와 실외표면온도의 차를 비율로 표시한 것이다.  $TDR_o$ 는 단열상태가 우수할수록 실외표면온도는 외기온도와 가까워지므로 0에 수렴하게 되며, 단열상태가 나쁠수록 실내온도에 접근하게 되어 -1에 수렴한다는 가정에 근거한다. 내표면 온도차 비율과 동일한 과정을 통해 다음의 식이 도출된다.

Table 1. The index of condensation possibility by TDRi (참조: KS F 2829 해설서, 2005)

열적 성능	열교 발생범위	TDR	결로 발생 확률	해당 사례
우수	무시	< 0.15	실내 온도 20°C, 실외 온도 -10°C 기준으로 할 때 최소한 상대 습도 85% 이하에서는 결로가 발생하지 않는 성능	- 표면벽의 U값이 12 W/m <sup>2</sup> ·K 이하 - 외벽 모서리 U값이 0.6W/m <sup>2</sup> ·K 이하 - 단열 시공된 인방
양호 (적당)	적당	0.15~0.2	실내 온도 20°C, 실외 온도 -10°C 기준으로 할 때 상대 습도 80% 이하에서는 결로가 발생하지 않으나 80% 이상에서는 결로 발생	- 표면벽의 U값이 12 W/m <sup>2</sup> ·K 이상 - 외벽 모서리 U값이 0.6 W/m <sup>2</sup> ·K 이상
불량	심함	0.2~0.3	실내 온도 20°C, 실외 온도 -10°C 기준으로 할 때 상대 습도 70% 이하에서는 결로가 발생하지 않으나 80% 이상에서는 결로 발생	- 외벽 모서리 U값이 0.9~1.5 W/m <sup>2</sup> ·K - 단열 시공 안 된 콘크리트 벽 및 바닥
매우 불량	매우 심함	> 0.3	실내 온도 20°C, 실외 온도 -10°C 기준으로 할 때 상대 습도 70% 미만에서도 결로가 발생할 수 있는 경우	- 2D 모서리 U값이 1.5W/m <sup>2</sup> ·K 이상 - 3D 모서리 U값이 1.0 W/m <sup>2</sup> ·K 이상인 바닥 및 단열벽

$$\dot{q}_1 = U \times A_1 \times (T_i - T_o) \quad (5)$$

$$\dot{q}_2 = h_o \times A_2 \times (T_i - T_{os}) \quad (6)$$

$$\frac{U \times A_1}{h_o \times A_2} = \frac{T_o - T_{os}}{T_i - T_o} = TDR_o \quad (7)$$

$$TDR_o = \frac{T_o - T_{os}}{T_i - T_o} \quad (8)$$

$T_i$  : 실내온도(측정 벽체표면에서 2m 떨어진 방의 중심부)

$T_o$  : 외기온도(일출 직전에 측정된 온도 적용)

$T_{os}$  : 벽체의 외표면 온도

$h_o$  : 벽체외표면 열전달률(W/m<sup>2</sup>·K)

$TDR_o$  : 실외표면 온도차비율

### 2.2.3.3. 벽체 열관류율 환산 및 외기 기류에 의한 보정

표면온도차 비율과 열관류율과의 관계로부터 실제 테스트하우스 벽체의 열관류율을 환산·평가하였다. 외기의 풍속 등에 따른 열전달률(h)에 의해 보정된 TDR<sub>o</sub>를 통해 열적성능을 평가하였다.

또한 Table 1에 제시된 TDR<sub>i</sub>에 따른 결로 판정 지표에 따라, 주어진 범위의 TDR<sub>i</sub>에서의 건물 벽과 모서리의 열적성능과 열교범위를 파악하고 실내표면의 결로발생확률을 평가하였다.

Table 2. Weather condition

	온도	상대습도	풍속
실외공기	-10.9°C	44.4%	0.7 m/s
실내공기	20.5°C	51.8%	-

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 건물 내/외표면 적외선 촬영

일사에 의한 영향을 배제하기 위하여 2009년 11월 2일 6시 40분(일출시간 : 6시 58분) 일출 직전 적외선 열화상 측정을 진행하였다. 측정 당시의 실내외 조건을 Table 3에 나타내었다. 외기 평균온도의 경우 센서를 통해 측정된 과거 3일간 누적된 외기온도의 평균값을 이용하였다.

실내온도가 실외온도보다 높은 경우 전체적으로 천장과 벽이 만나는 모서리부위의 틈새에서 열손실이 발생하는 것으로 보인다. Fig. 3(a)와 (b) 창문주위로 낮은 온도분포를 보여 유리에 의한 열손실이 발생하는 것을 알 수 있으며 블라인드가 쳐진 부분에서는 유리창보다 높은 온도를 보였다. 따라서 열손실을 줄이기 위해서는 단열성능이 보강된 창호를 사용하거나 커튼이나 블라인드를 이용하여 단열보강 효과를 볼 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 3(c) 천장 모서리와 문틈사이로 열손실이 발

Table 3. Estimation of condensation possibility by  $TDR_i$

측정부위	실내온도(°C)	실내벽체표면(°C)	외기온도(°C)	$TDR_i$	결로	열관류율( $W/m^2 \cdot K$ )	
						By $TDR_i$	건축기준*
Fig. 3(a)	1	20.5	16.6	24	0.22	불량	196
	2	20.5	17.4	24	0.17	적당	156
	3	20.5	17.6	24	0.16	적당	146
Fig. 3(b)	1	20.5	16.9	24	0.19	적당	181
	2	20.5	17.3	24	0.18	적당	161
	3	20.5	17.8	24	0.15	우수	136
Fig. 3(c)	1	20.5	16.8	24	0.20	불량	186
	2	20.5	17.6	24	0.16	적당	146
	3	20.5	17.5	24	0.17	적당	151
Fig. 3(d)	1	20.5	13.8	24	0.37	매우불량	337
	2	20.5	16.7	24	0.21	불량	191
	3	20.5	16.8	24	0.20	불량	186

\* 건축물의 에너지절약설계기준(국토해양부 고시 제2008-652호)

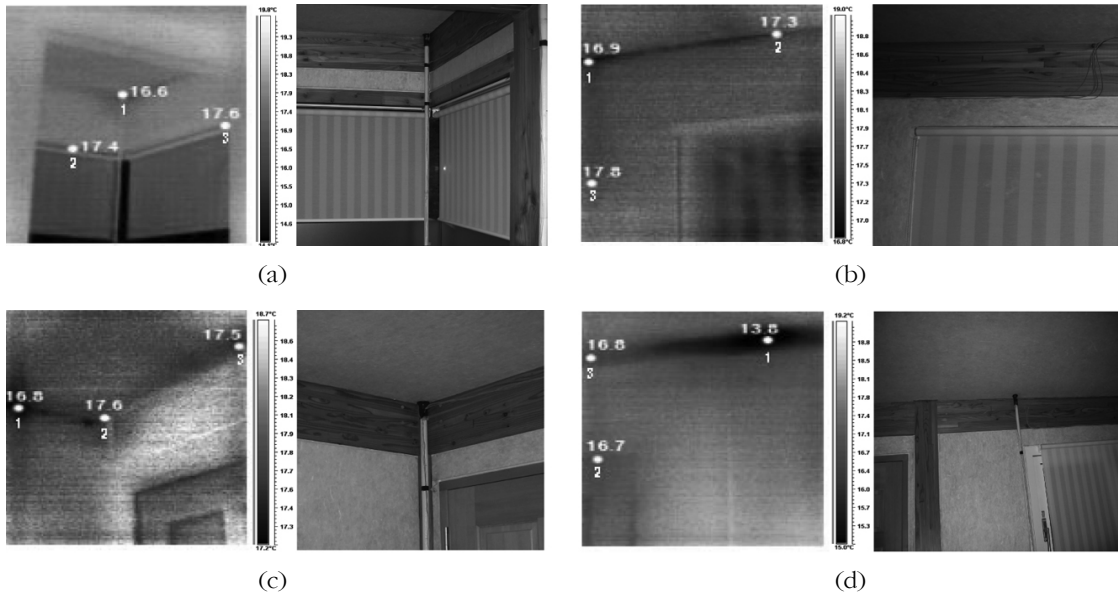


Fig. 3. IR images of Inside walls (a) edge on the SE, (b) wall on the South, (c) edge on the SW, and (d) wall on the West.

생하는 것을 알 수 있다. 벌어진 틈 사이로 새는 열을 막기위한 추가적인 단열시공이 필요하다. Fig. 3(d) 서쪽벽 천장에 심각한 열손실 부위가 발견되었다. 천정부위의 부분적 단열결함에 의한 열손실로 판단된

다. 차후에 시급한 보완이 필요하다.

Fig. 4(a) 남쪽벽에서는 별다른 문제점이 보이지 않았다. 창문으로 빠져나가는 열을 단열시공을 통해 보강해야 할 것이다. Fig. 4(b) 서쪽 외벽에 목재 스

Table 4. Compared Thermal transmission by  $TDR_o$  and construction standard

측정부위	외기온도(°C)	실외벽체표면(°C)	실내온도(°C)	$TDR_o$	열관류율 ( $W/m^2 \cdot K$ )	
					By $TDR_o$	건축기준*
Fig. 4 (a)	1	-10.9	-5.4	20.5	-0.25	-
	2	-10.9	-7.2	20.5	-0.16	26
	3	-10.9	-9.8	20.5	-0.05	0.8
Fig. 4 (b)	1	-10.9	-8.7	20.5	-0.10	16
	2	-10.9	-8.6	20.5	-0.10	16
	3	-10.9	-6.9	20.5	-0.18	-
	4	-10.9	-7.2	20.5	-0.16	26
	5	-10.9	-9.1	20.5	-0.08	14

\* 건축물의 에너지절약설계기준(국토해양부 고시 제2008-652호)

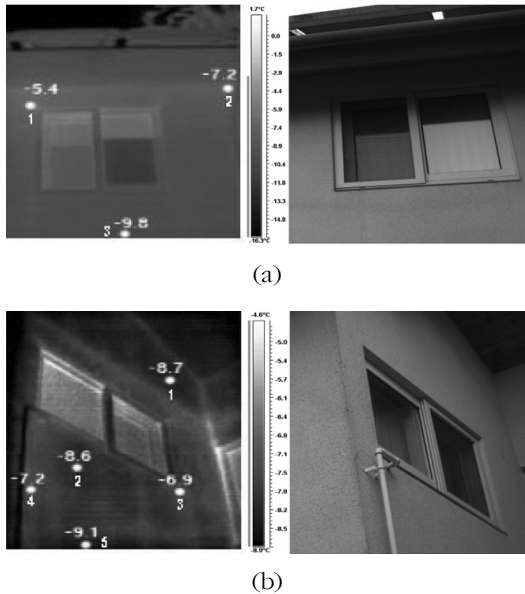


Fig. 4. IR images of outside walls (a) wall in the South and (b) wall in the West.

터드로 인한 열교현상이 보인다. 세로뿐만 아니라 가로로도 연결되어 있는 것을 알 수 있다. 실내의 더운 공기가 스티드를 통해 외부로 빠져나가는 것을 알 수 있다. 외부로 빠져나가는 열을 잡기 위해 열교현상제거와 단열재의 보강이 필요할 것으로 사료된다.

### 3.2. TDR 분석

위의 열화상을 바탕으로 한 각 측정부위별  $TDR_i$ 에 의한 벽체의 내표면 결로 판정 지표(Table 3)와  $TDR_o$ 에 의한 열관류율 추정값(Table 4)을 다음에 나타내었다.

결로는 주요한 건축 하자요인으로서, 공기 중의 수증기가 온도의 변화에 의해 노점 온도 이하로 떨어지면서 액체로 변하여 이슬이 맺히는 현상이다. 또한 응축된 수분은 곰팡이의 서식환경을 제공하게 되고, 이로 인해 실내공기질이 오염되는 2차적인 문제가 발생한다. 서쪽벽 천장에서 발견된 심각한 열손실 부위의 열적성능이 실내표면 결로 판정 지표에 따라 매우불량하다고 판명되었다. 이는 Table 1에서 제시된 기준에 따라 상대습도 70% 이하에서도 결로 발생가능성이 높으므로 추가적인 단열재의 보강으로 실내표면의 결로를 방지해야 한다.

$TDR_i$ 와  $TDR_o$ 에 의해 결정되는 부위별 열관류율 중 다수 부위가 설정된 건축기준(0.47)를 만족하지 못하는 것으로 나타나므로 부위별 열성능 보강이 필요하다.

## 4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 산림과학원의 테스트하우스를 대상으로 현장 단열성능 평가를 실시하였다. 적외선 열화상카메라로 건축물 실내의 표면온도를 측정하고 센

서를 통해 실내외대기온도를 측정하였다. 이를 바탕으로 TDR<sub>0</sub>에 의한 열관류율환산과 TDR<sub>1</sub>에 의한 실내표면 결로 판정을 하였다. 열화상 이미지를 통해 모서리 부분과 창을 통한 열손실을 정량적으로 파악할 수 있었으며 육안으로 확인 불가능한 결함부위를 탐지할 수 있었다. 이 방법을 통하여 신축목조주택의 열손실 방지 등 에너지 부하를 최소화하고 기존목조주택의 열손실이 큰 부분의 개보수에 도움이 될 것으로 기대된다.

## 사 사

이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2007-314-F00021).

## 참 고 문 헌

1. Clemena, G. G and W. T. McKeel. 1978. Detection of Delamination in Bridge Decks with Infrared Thermography. Transportation Research Record No.664.
2. KS F 2829. 2005. 적외선 촬영법에 의한 건축물 단열 성능 평가 방법.
3. Oreszczyn, T. and J. Littler. 1989. Cold Bridge and Mould Growth, SERC Final Report.
4. 강만호, 주석중. 2007. 목조주택의 수요에 미치는 영향 요소에 관한 연구. 대한건축학회논문집 23(1): 21~28.
5. 엄창득, 박준호, 이진제, 여환명. 2009. 적외선 열화상 분석에 의한 목재 결함탐지", 산림바이오에너지 28(1): 38~42.
6. 최경석, 정영선, 강제식, 이승언. 2004. 적외선 열화상 분석기법에 의한 건축물 단열성 평가법 개발연구. 대한건축학회 학술발표논문집 24(1): 765~768.
7. 한국건설기술연구원. 2003. IR법에 의한 건축물 단열성 평가법 표준화 기술개발에 관한 연구. 산업자원부.
8. 한국콘크리트학회. 2001. 비파괴검사 및 안전진단. 한국콘크리트학회.