

적외선 열화상을 이용한 공동주택 단열성능 평가

- TDR(온도상대비)을 중심으로 -

최 보 혜[†], 최 경 석, 강 재 식, 이 승 언

한국건설기술연구원 건축도시연구본부 건축계획·환경연구실

Insulation Performance Evaluation of Apartment Housing Using Infra-red Camera

Bo-Hye Choi[†], Gyoung-Seok Choi, Jae-Sik Kang, Seung-Eon Lee

ABSTRACT: The purpose of this study is to present an in-site evaluation method for building insulation performance using Infra-red camera. The research contents of this study are to evaluate validity and suitability of building insulation defect survey using Infra-red camera for apartment housing with temperature & heat flow pattern analyze method. By establishing the in-site evaluation method building insulation performance using infra-red camera, it is expected that 1) building envelope repair market will be activated by using developed method in ESCO and remodeling companies, 2) the method developed in this research will contribute to reduce national energy consumption by promoting old building insulation remodeling.

Key words: Infra-red Camera(적외선 카메라), Temperature Difference Ratio(TDR, 상대온도비), Thermal Performance(단열성능), In-site evaluation method(현장평가)

기 호 설 명

T_i : 실내 온도 [°C]
 T_o : 외기 온도 [°C]
 T_{is} : 벽체 실내표면온도 [°C]
 T_{os} : 벽체 실외표면온도 [°C]
 Q_1 : 벽체의 관류 열류 [W/m^2]
 Q_2 : 벽체의 내표면 열류 [W/m^2]
 Q_3 : 벽체의 외표면 열류 [W/m^2]
 U : 벽체의 열관류율 [$W/m^2 \cdot K$]
 a_i : 벽체의 내표면 열전달율 [$W/m^2 \cdot K$]
 a_o : 벽체의 외표면 열전달율 [$W/m^2 \cdot K$]
 A_1 : 관류 부위의 평균면적 [m^2]
 A_2 : 내표면 부위의 면적 [m^2]

A_3 : 외표면 부위의 면적 [m^2]
 R : 벽체의 열관류율 저항 [$m^2 \cdot K/W$]
 r : 벽체의 내표면 열전달 저항 [$m^2 \cdot K/W$]

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

실제 건물의 열성능은 현장시공의 견실도, 단열재의 경년변화에 따른 열화, 지역 상태에 따른 벽체내부의 함습상태 변화, 구조적 결함에 의한 크랙의 발생 등에 의하여 설계 시에 의도된 열성능과는 다른 열적특성을 지니게 되는 수가 많다. 이러한 단열성능의 변화는 에너지손실의 증대라는 의미 외에 결로 발생으로 인한 생활환경의 비위생화를 초래하고 궁극적으로 구조체의 변형으로 전이됨으로써 구조적 하자 발생과 건물수명을

[†] Corresponding author

Tel.: +82-31-910-0145; fax: +82-31-910-0361

E-mail address: bh5304@kict.re.kr

단축시키는 것으로 밝혀지고 있다. 이러한 건물 벽체의 열성능이 저하될 경우에 대한 벽체 단열 성능의 정량적 평가가 필요하나 현재 국내외적으로 이를 위한 표준 평가기법이 개발되어 있지 못한 상태이다. 또한 적외선 열화상 측정기는 국내 대형 건설업체 및 연구소, 학교 등에서 다수 보유하고 있으나, 건축물 열성능과 관련한 진단 및 연구의 참고 기자재로 활용하는 수준이며 적외선 열화상 측정장치를 위주로 한 기술개발 및 연구는 거의 진행되지 못하고 있는 실정이다.

이에 본 연구는 건축물의 환경 및 열성능 개선과 수명 증대를 위한 방안으로서 적외선 열화상 분석기법을 이용하여 정량적인 건축물 단열성능 현장 평가기법 제안을 목적으로 진행되었다.

1.2 연구 내용 및 범위

단열성능의 정량적인 분석을 위해서는 측정부위의 온도조건을 일정하게 유지하기 위한 시스템과 열류계측이 필요하나 현장 여건상 적용이 불가능함에 따라 결함부위 상대온도차비(TDR: Temperature Difference Ratio)라는 지표를 제안하였으며 이를 이용한 건축물 단열성능 평가기법을 제시하고자 한다. 이를 위한 연구 내용은 다음과 같다.

- (1) 적외선 카메라 운용 관련 기본 조건 설정
- (2) 현장 단열성 평가지표인 TDR 제안
- (3) IR법에 의한 건축물 현장 단열성능 평가

2. 건축물의 단열성 평가를 위한 분석기법

2.1 적외선 열화상 평가

2.1.1 적외선 카메라를 이용한 건축물 단열성능 측정 기본 원리

적외선 열화상 카메라는 일반 비디오카메라의 작동 원리와 원칙적으로 유사하지만 영상이 빛(light)이 아닌 열적외선(infrared energy)을 검출한다. 열적외선 에너지는 적외선 카메라의 검지부(detector)의 광학렌즈를 통과하며 센서에 모아진다. 센서에 감지된 열적외선 에너지는 전기 신호로 변환되어 제어부로 보내진다. 제어부에서는 감지된 전기 신호를 열화상 정보로 바꾸며 물체 표면의 온도를 수 천 개의 점으로 표시되는 열화

상으로 나타낸다.

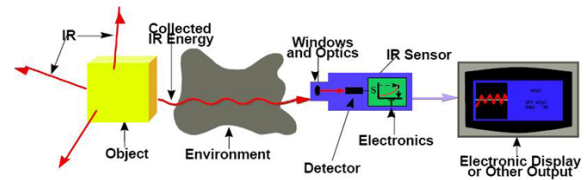


Fig. 1 System of infra-red camera

2.1.2 적외선 열화상 카메라 건물분야 응용

모든 물체의 표면으로부터 표면온도에 따른 복사에너지(적외선)가 방출되는 것과 마찬가지로 건물 벽체에서도 같은 양상이 나타난다. 직달 일사가 사입하는 경우를 제외하면 일반적으로 단열성이 높은 부위의 표면온도는 실내측에서는 실온과, 실외측에서는 외부온도와 비슷하게 나타난다. 이러한 사실로부터 표면온도 분포를 측정하여 부분적으로 표면온도가 다른 부위가 발생하게 되면 이 부분의 내부구조가 주위와 다른 것으로, 즉 단열재가 단락되었거나, 열교가 발생하거나 건설시공이 이루어지지 않았음을 알 수 있다.

적외선 진단법의 가장 큰 특징은 비접촉식으로 넓은 면적의 진단이 가능하며, 진단결과를 화상으로서 기록보존이 가능하므로 데이터의 설득성이 높다는 점에 있으며 다음과 같이 건물 단열진단에 이용될 수 있다.

- 표면온도 측정을 통한 관류열량의 분석으로 벽체내부의 단열 상황 추정
- 실내온도 분포 및 침기/누기 부위의 발견
- 실내 각 부위의 표면온도를 통해 냉/온 복사를 측정하여 실내쾌적성 평가
- 표면온도가 노점온도 이하의 낮은 실내부위를 검출하여 결로의 위험성 진단

2.1.3 건축물 열화상 측정 시 영향 요인

현장에서 촬영된 적외선 열화상은 여러 가지 요인에 의하여 다양하고 복잡한 형태로 나타나기 때문에 적외선 열화상의 분석은 이러한 영향 요인에 대한 전문적 지식을 갖추어 수행되어야 한다. 적외선 열화상에 영향을 미치는 요인을 크게 분류하면 측정대상물 요인, 주변환경 요인, 측정기기 및 촬영 요인으로 나눌 수 있다. Table 1은 적외선 열화상 카메라로 건물의 단열현상 측정 시 영향을 미치는 요인을 나타낸다.

Table 1 Effect factors of evaluation using infra-red camera for building insulation

| 측정 요인 | 내용 |
|-------------|---|
| 측정 건물 요인 | • 표면방사율, 파장영역별 특성, 온도, 열전도율 등 |
| 주위 환경 요인 | • 풍속, 일사흡수율, 복사 냉각, 강수, 외기온도, 표면수분 증발에 의한 표면 냉각, 상대습도 등 |
| 촬영시기 및 측정기기 | • 외표면 온도와 실내온도차가 가장 큰 시간 선정(열류의 흐름이 가장 큰 시점) • 분해능, 데이터 기록의 속도, 촬영 가능 범위, 측정 해상도 등 |

2.2 건축물 단열성능의 평가지표 TDR의 개요

건축물 외피의 열성능은 기본적으로 정상상태(steady state)에서 측정되는 것이다. 정상상태라 하면 열성능 분석의 경계조건(실내의 온도 및 표면열전달율 등)이 시간의 변화에 따라 변하지 않고 고정된다는 것을 의미한다. 따라서 실험실 실험에서는 이러한 경계조건을 고정시킬 수 있는 정밀한 온도조절 및 열류 측정이 가능한 챔버를 갖추고 벽체의 열성능 분석을 하고 있으나, 실제 건축물은 넓은 면적에 걸쳐 다양한 외피 부위를 갖고 있음에 따라 건물 전체 외피의 열류를 직접 접촉적 방법으로 측정하는 것은 비용 측면에서나 시간적으로 많은 제약을 갖고 있다. 이에 건축물 외피의 온도 분포를 일시에 포착할 수 있는 적외선 카메라를 이용한 현장 단열성 평가가 대안으로 제시되고 있으나 측정된 외피 온도 해석에 대한 평가 방안이 구축되지 못하고 있어 신뢰성 있는 평가기법으로는 자리를 잡지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 적외선 카메라에 의한 건축물 단열성 평가 방안을 구축하기 위한 연구를 진행하며, 이의 평가 수단으로서 TDR(Temperature Difference Ratio)을 이용한 평가 방안을 제안하고자 한다.

2.2.1 실내표면 TDR_i

TDR_i의 개념을 열평형 방정식에 근거하여 설명하기 위하여 1차원 정상상태(steady state)의 벽체를 가정하고 그에 따른 열평형 방정식을 세우면 다음과 같다.

$$Q_1 = U \times A_1 \times (T_i - T_o) \quad (1)$$

$$Q_2 = \alpha i \times A_2 \times (T_i - T_{is}) \quad (2)$$

따라서 정상상태의 벽체에서 단위 시간당 열류는 벽체의 어느 부위에서나 동일하므로 $Q_1 = Q_2$ 라 하면, 다음 식이 도출된다.

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

TDR_i는 건축물 실내 내표면 부위에 대한 결로 판정을 위한 방안으로 사용되던 것으로, 실내외 온도차에 대한 실내온도와 실내표면온도의 차를 비율로 표시한 것이다. TDR_i가 의미하는 바는 단열상태가 우수할수록 실내표면온도는 실내온도와 가까워지므로 0에 수렴하게 되며, 단열상태가 나쁠수록 외기온도에 접근하게 되어 1에 수렴한다는 가정에 근거하고 있다.

2.2.2 실외표면 TDR_o

TDR_o는 건축물 외표면 부위에 대한 단열성 평가를 위한 것으로 TDR_i 개념을 외표면에 적용하여 도출되는 지표이다. TDR_o는 실내외 온도차에 대한 외기온도와 실외표면온도의 차를 비율로 표시한 것이다.

$$Q_1 = U \times A_1 \times (T_i - T_o) \quad (4)$$

$$Q_3 = \alpha o \times A_3 \times (T_i - T_{os}) \quad (5)$$

$$\frac{U \times A_1}{\alpha o \times A_3} = \frac{r \times A_1}{R \times A_3} = \frac{T_o - T_{os}}{T_i - T_o} = TDR_o \quad (6)$$

TDR_o는 단열상태가 우수할수록 실외표면온도는 외기온도와 가까워지므로 0에 수렴하게 되며, 단열상태가 나쁠수록 실내온도에 접근하게 되어 -1에 수렴한다.

2.2.3 IR법에 의한 건축물 단열성 평가시 TDR 산출조건

TDR은 건축물 외피의 단열상태를 실내측 벽체 내표면온도의 산출을 통하여 평가할 수 있는 방법이다. 단열결함이 의심이 되는 부위에 대하여 포인트별로 측정하여 단열성을 평가할 수 있지만, 건축물 전체적인 단열성능을 빠른 시간에 파악하기 위해서는 적외선 카메라의 활용이 필요하며 촬영된 적외선 화상의 온도 정보를 이용하여 TDR을 산출하면 건축물 단열성능의 평가가

가능하다. TDR은 기본적으로 정상 상태를 근거로 출발되었기 때문에 현장 평가전에 건축물 실내를 일정시간 변동이 없는 정상상태의 조건을 유지하는 것이 필요하다. 건축물 단열성 평가를 위한 TDR 산출 기본조건은 Table 2와 같다.

Table 2 Measurement condition for TDRi & TDRo calculation

| 측정 요소 | TDRi | TDRo |
|----------|---|---|
| 실내 온도 | 측정되는 벽체 내표면 2M 이내의 실내온도 | |
| 실외 온도 | 과거 3일간 외기 평균 온도를 적용 | 측정 당시 외기온도 적용 |
| 실내 표면 온도 | 측정 부위의 내표면온도 분포 | - |
| 외표면 온도 | - | 측정대상 부위의 실외표면 온도 분포 |
| 풍속 | - | <ul style="list-style-type: none"> 외기풍속: 2m/sec 경우 TDRo를 산출 측정을 위한 최대 풍속: 3m/sec 이하, 3m/sec 초과시 측정 중지 측정시점의 건물주변 풍속 측정 필요(풍속에 따른 TDRo 보정 필요) |
| 측정 가능 시간 | 일중 가능 | 측정가능 시각은 주간 일사 영향이 최소로 되는 일출 직전으로 하되, 최소한 일몰 후 8시간 이후 촬영 |
| 측정 외기 조건 | 실내온도와 과거 3일간 외기일평균 온도와의 차이가 10℃ 이상일 경우에 한하여 TDR산출 | |

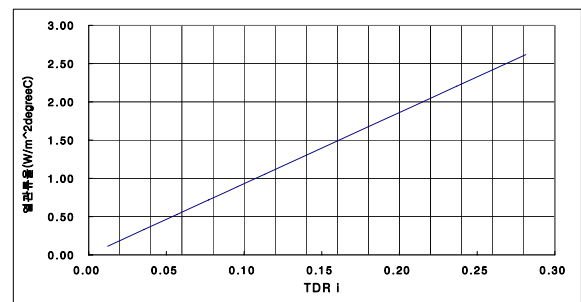
2.2.4 TDR에 의한 건축물의 단열성능 평가

TDRi 또는 TDRo와 벽체의 실제 열관류율과의 일치성은 현장 측정조건이 정상상태와 얼마나 근접하는가와 측정된 실내외의 표면온도의 정밀성에 달렸다. 동적으로 변하는 실제 현장의 외기 조건과 적외선 카메라의 정밀도의 한계 때문에 실험실 열성능과는 차이를 보일 수 있다. 그러나 현장의 실제 부위에 대한 정확한 설계 및 시공 상태를 알 수 있다면 그 부위에 대한 이론 또는 실험실 측정값을 토대로 적외선 카메라에 의해 측정된 값을 보정하여 정밀성을 높일 수 있다.

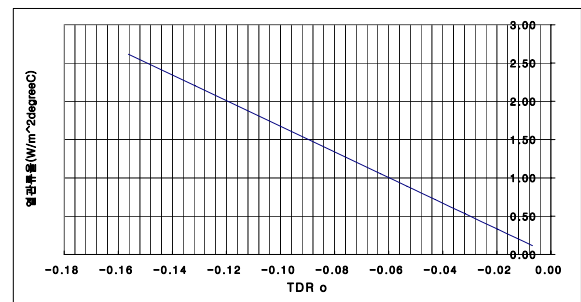
Fig. 2는 실내외 온도 및 각 표면온도가 정확하게 산출되고 외기온도의 변동이 없다고 가정된 경우의 TDRi 및 TDRo와 벽체의 열관류율과의 관계를 나타낸 것이며 외기 풍속 2m/sec를 기준으로 작성된 것이다.

한편, 외기풍속이 빨라지면 벽체의 열전달이 촉진되어 외표면 온도는 외기온도에 근접하게 되

면 단열재 성능에 따른 적외선 카메라의 최소감지온도차(분해능)의 범위를 벗어나게 되므로 오차가 크게 발생하게 될 수가 있다. 따라서 풍속이 일정속도를 벗어나는 경우에는 측정을 하지 않는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 IR 카메라에 의한 진단이 가능한 풍속의 최대치를 3m/sec로 설정하였으며 3m/sec 이하의 경우에 대해서는 풍속에 따른 TDRo의 보정값을 Fig. 3에 나타내었다. TDRo의 산출을 위한 기준 풍속은 2m/sec로 설정하였으며, 적외선 카메라에 의한 진단시에는 반드시 측정 건물의 표면 주변 풍속을 측정하여 산출된 TDRo를 보정하여야 한다.



(a) TDRi



(b) TDRo

Fig. 2 Relationship with thermal transmittance and TDRi & TDRo in 2m/sec.

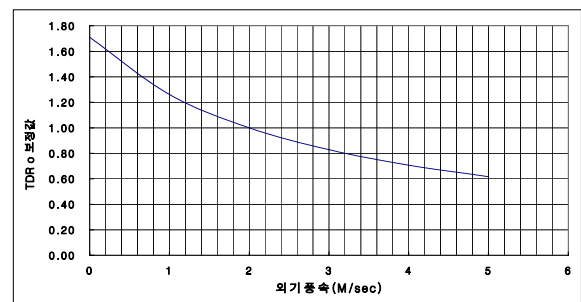


Fig. 3 Calibration factor of TDRo according to variation of outdoor wind velocity.

TDRi는 건축물의 결로에 대한 안전성 평가에도 활용될 수 있다. 결로 안전성 판정을 위한 자료의 예를 Table 3에 나타내었다. 벽체의 단열성능에 따라 TDRi를 4등급으로 구분하여 나타낸 평가 예이다.

Table 3 Index of condensation decision in inside surface wall by TDRi

| 열적 성능 | 열교 발생 위험 | TDR | 결로 발생 확률 | 해당 사례 |
|---------|----------|------------|---|--|
| 우수 | 무시 | <0.15 | 실내온도 20℃, 실외온도 -10℃ 기준으로 할 때 최소한 상대습도 85%이하에서는 결로가 발생하지 않는 성능 | -표면벽의 U값이 1.2 W/m ² K 이하 -외벽모서리 U값이 0.6 W/m ² K 이하 -단열시공된 인방 |
| 양호 (보통) | 적당 | 0.15 ~ 0.2 | 실내온도 20℃, 실외온도 -10℃ 기준으로 할 때 상대습도 80% 이하에서는 결로가 발생하지 않으나, 85% 이상에서는 결로 발생 | -표면벽의 U값이 1.2 W/m ² K 이상 -외벽 모서리 U값이 0.6 W/m ² K 이상 |
| 불량 | 심함 | 0.2 ~ 0.3 | 실내온도 20℃, 실외온도 -10℃ 기준으로 할 때 상대습도 70%이하에서는 결로가 발생하지 않으나 80% 이상에서는 결로 발생 | -외벽모서리 U값이 0.9 ~ 1.5 W/m ² K -단열시공 안된 콘크리트 벽 및 바닥 |
| 매우 불량 | 매우 심함 | >0.3 | 실내온도 20℃, 실외온도 -10℃ 기준으로 할 때 상대습도 70%미만에서도 결로가 발생할 수 있는 경우 | -2D 모서리 U값이 1.5 W/m ² K 이상 -3D 모서리 U값이 1.0 W/m ² K 이상인 바닥 및 단열벽 |

Table 3에서 등급이 1급일 경우에는 모서리 부위의 열교현상이 극히 적으며, 2급 이상은 열적으로 양호한 상태에서 접합부위의 내표면에서 결로가 발생할 가능성이 적은 것으로 판단할 수 있다. 그러나 3등급 이하인 경우에는 접합부 내표면에서 결로 등의 열적 결함이 발생할 수 있다.

3. 공동주택 현장 적용 단열성능 평가

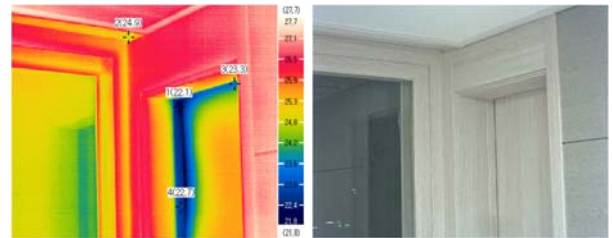
3.1 공동주택 현장 적용 단열성능 평가 개요

열화상 분석기법을 바탕으로 현장에서 적외선 카메라를 이용하여 석관동에 소재한 S사의 공동주택의 한 세대를 대상으로 국부적으로 실내에서 현장 단열성능을 평가하였다.

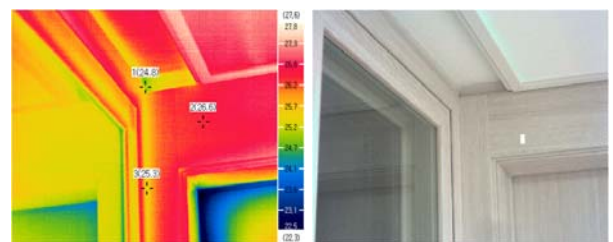
중간기기간인 2009년 4월 16일 21:00~2009년 4월 17일 03:00에 측정을 실시하였으며, 측정기간 중 외기온도는 8.8~11.8℃의 온도변화를 보이며, 실내온도는 24.8~28.8℃의 변화를 보인다.

3.2 측정 대상건물 실내 현장측정

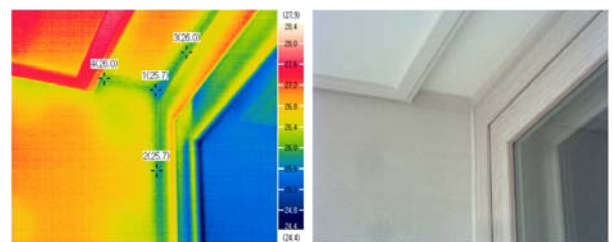
Fig. 4, 5, 6은 측정 대상 세대의 거실에서 실시한 적외선 열화상 촬영결과로, Fig. 4는 거실과 발코니 사이의 문, Fig. 5는 거실 우측벽면, Fig. 6은 거실의 좌측벽면에 대한 촬영결과이다. 거실 좌측벽면과 우측벽면의 TDRi 값이 낮은 값을 나타내 단열상태는 양호하다고 판단이 되나, 거실에서 발코니로 통하는 문틈부위는 거실의 다른 거실의 다른 부위에 비하여 높은 값을 보이고 있어 발코니로 통하는 문틈으로 열손실이 많이 일어난다는 것을 알 수 있다.



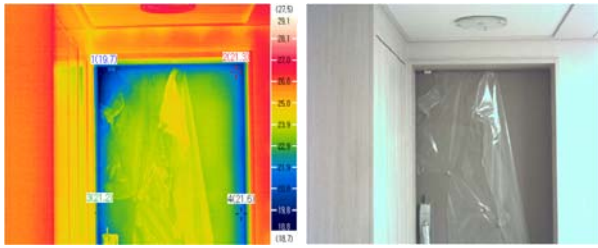
(a) Infra-red image (b) Photo
Fig. 4 Photographing result in living room



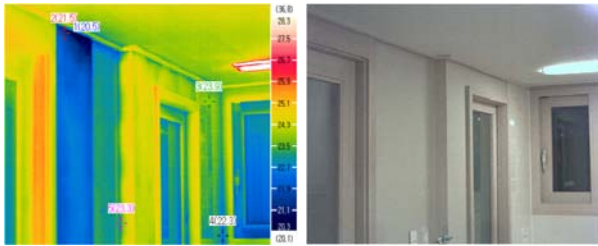
(a) Infra-red image (b) Photo
Fig. 5 Photographing result in living room (right side view)



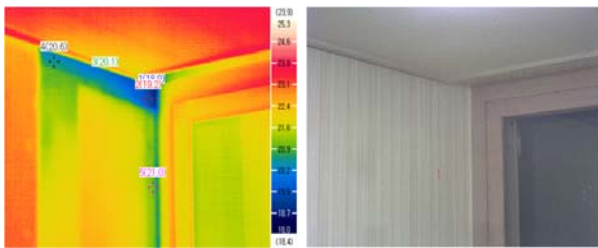
(a) Infra-red image (b) Photo
Fig. 6 Photographing result in living room (left side view)



(a) Infra-red image (b) Photo
Fig. 7 Photographing result in door



(a) Infra-red image (b) Photo
Fig. 8 Photographing result in kitchen



(a) Infra-red image (b) Photo
Fig. 9 Photographing result in bed room

Fig. 7은 세대 현관문에 대한 적외선 열화상 측정결과로, 현관문 부위에 결로가 우려되어 단열보강이 필요할 것으로 사료된다.

Fig. 8은 부엌 좌측벽면 쪽의 천정면 결로 부위에 대한 촬영결과이며, 천정부위에 부분적 단열결함이나 단열 누락부위가 있을 것으로 판단된다.

Fig. 9는 침실 좌측벽면 결로 부위에 대한 촬영결과이며, 천정부위에 단열보강이 필요할 것으로 사료된다.

각 측정 부위별 TDRi에 의한 벽체의 내표면 결로 판정 지표는 Table 4와 같다.

4. 결론

본 연구에서는 제안하는 적외선 열화상 측정장치를 이용한 건축물 단열성능 평가기법에 대하여 적외선 카메라 운용 관련 기본 조건을 설정하였

Table 4 An index of condensation judgement in inside surface wall by TDRi

| 측정부위 | 실내 표면 | 실내 온도 | 실외 온도 | TDRi | 열적 성능 | |
|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|
| Fig.4 | 1 | 22.1 | 27.4 | 11.4 | 0.33 | 매우불량 |
| | 2 | 24.9 | 27.4 | 11.4 | 0.16 | 양호 |
| | 3 | 23.3 | 27.4 | 11.4 | 0.26 | 불량 |
| | 4 | 22.7 | 27.4 | 11.4 | 0.29 | 불량 |
| Fig.5 | 1 | 24.8 | 27.4 | 11.4 | 0.16 | 양호 |
| | 2 | 25.3 | 27.4 | 11.4 | 0.13 | 우수 |
| | 3 | 26.6 | 27.4 | 11.4 | 0.05 | 우수 |
| Fig.6 | 1 | 25.7 | 27.4 | 11.4 | 0.11 | 우수 |
| | 3 | 26.0 | 27.4 | 11.4 | 0.09 | 우수 |
| Fig.7 | 1 | 19.7 | 27.4 | 11.4 | 0.48 | 매우불량 |
| | 2 | 21.3 | 27.4 | 11.4 | 0.38 | 매우불량 |
| | 3 | 21.2 | 27.4 | 11.4 | 0.39 | 매우불량 |
| | 4 | 21.6 | 27.4 | 11.4 | 0.36 | 매우불량 |
| Fig.8 | 1 | 20.5 | 27.1 | 11.4 | 0.42 | 매우불량 |
| | 2 | 21.5 | 27.1 | 11.4 | 0.36 | 매우불량 |
| | 3 | 23.9 | 27.1 | 11.4 | 0.20 | 양호 |
| | 4 | 22.3 | 27.1 | 11.4 | 0.31 | 매우불량 |
| | 5 | 23.3 | 27.1 | 11.4 | 0.24 | 불량 |
| Fig.9 | 1 | 18.9 | 25.0 | 11.4 | 0.45 | 매우불량 |
| | 2 | 19.2 | 25.0 | 11.4 | 0.43 | 매우불량 |
| | 3 | 20.1 | 25.0 | 11.4 | 0.36 | 매우불량 |
| | 4 | 20.6 | 25.0 | 11.4 | 0.32 | 매우불량 |
| | 5 | 21.0 | 25.0 | 11.4 | 0.29 | 불량 |

으며, 현장 단열성능 평가지표인 상대온도차비(TDR)를 제안하여 이에 따른 실제 건축물에 대하여 현장에서 실내측 단열성능을 평가하였다.

또한 이러한 건축물 단열성능 평가기법에 의하여 신축 건축물의 완공 후 단열 하자 평가 및 개수 전 단열성능의 정량적 평가 등에 활용됨으로써 건축물의 환경 및 열성능 개선과 수명 증대에 기여할 수 있다.

참고문헌

1. 한국건설기술연구원, 2003, IR법에 의한 건축물 단열성 평가법 표준화 기술개발에 관한 연구, 산업자원부
2. KS F 2829:2005 적외선 촬영법에 의한 건축물 단열성능 평가기법
3. 이승언, 2006, 건축물 현장 결로 평가를 위한 열화상 분석기법의 응용, 한국그린빌딩협의회