



기존 공동 주택의 벽체 열성능 현장 측정법에 관한 연구

The study of in-situ measurement method for wall thermal performance diagnosis of existing apartment

김서훈* · 김종훈** · 류승환*** · 정학근**** · 송규동*****

Kim, Seohoon* · Kim, Jonghun** · Yoo, Seunghwan*** · Jeong, Hakgeun**** · Song, Kyoodong*****

* Dept. of Architectural Engineering, Han-yang Univ., South Korea (takesky@kier.re.kr)

** Corresponding author, Energy Saving Laboratory, Korea Institute of Energy Research, South Korea (jonghun@kier.re.kr)

*** Coauthor, Energy Saving Laboratory, Korea Institute of Energy Research, South Korea (shyoo@kier.re.kr)

**** Coauthor, Energy ICT Laboratory, Korea Institute of Energy Research, South Korea (hgjeong@kier.re.kr)

***** Coauthor, Dept. of Architectural Engineering, Han-yang Univ., South Korea (kdsong@hanyang.ac.kr)

ABSTRACT

Purpose : The energy saving in a residential building (apartment) sector is known as one of the effective solution of energy reduction. In South Korea, the government has recently reinforced regulations associated with the energy performance of buildings. However, there is a lack of research on the methods for the energy performance diagnosis that is used to analyze the wall thermal performance of the existing apartments. Because a reliable diagnosis is necessary to save the building energy, this study analyzed wall thermal performance of an existing apartment in Seoul. **Method :** This paper applied two methods for analysis of the thermal insulation performance; HFM(Heat Flow Meter) method and ASTR(Air-Surface Temperature Ratio) method. The HFM method is suggested by ISO9869-1 code to measure the thermal performance. The ASTR method is proposed by this study for the simplified In-situ measurement and it uses three temperature data (interior wall surface, interior and exterior air) and the overall heat transfer coefficient. This study conducted the experiment of an existing apartment in Seoul using these methods and analyzed the results. Furthermore, the energy simulation tool of the building was used to suggest retrofit of the building based on the results of measurements. **Result :** The error rate of HFM method and ASTR method was analyzed in about 17 to 20%. As the results of comparison between the initial design values of the wall and the measured values, the 26% degradation of insulation thermal performance was measured. Lastly, the energy simulation tool of the building shows 10.8% energy savings in accordance with the construction of suggested retrofit.

KEYWORD

현장 열관류율 측정
벽체 열성능 진단
기존 공동주택

In-situ U-value measurement
Wall thermal performance diagnosis
Existing apartment building

ACCEPTANCE INFO

Received June 1, 2016

Final revision received August 17, 2016

Accepted August 19, 2016

© 2016 KIEAE Journal

1. 서론

국내 에너지 소비 구조에 따르면 건물 부문에서 약 25%의 에너지를 소비하고 있다고 보고되고 있다. 따라서 건물 부문의 에너지 절감을 위해 신축 건물과 더불어 전체 건물의 97%를 차지하는 기존 건물의 에너지 성능을 높여 에너지를 절감할 필요가 있다. 기존 건물 중에서 에너지 소비의 절반 이상을 차지하고 있는 주택, 특히 공동 주택에서의 에너지 절감을 위한 에너지 진단 및 성능을 평가하는 연구가 필요하다. 국내 공동주택은 약 850만호 이상 있으며 약 50% 정도 건물이 경과 년 수 25년 이상으로 재건축 연한이 도래한 에너지 효율이 저하된 건물이 대다수를 이루고 있다. 현재 국가에서도 공동 주택 부문에서 에너지 절감을 위한 노력과 에너지 효율개선을 위한 다양한 제도를 시행하고 있다. 그러나 현재 진행되고 있는 에너지 진단 관련 사업의 경우 기존 공동 주택의 열성능 수준을 분석할 수 있는 에너지 진단 방법 및 데이터가 미흡한 실정이다. 실제 기존 건물의 열성능은 현장시공의 숙련도와 단열재 경년변화에 따른 변화, 구조

적 결함에 의해 설계 시 계획한 건물 벽체 열성능과는 다른 특성을 가지게 된다. 그러므로 건물 벽체의 단열성능이 저하될 경우 이에 대한 정량적 분석 및 평가가 필요하나 현재 국내에서는 이를 위한 평가 기법 개발에 대한 연구가 미흡하다. 따라서 본 연구에서는 기존 공동 주택의 벽체 단열 성능을 분석하기 위해 현장 측정 방법에 대해 고찰하고 측정을 통해 취득한 데이터를 기반으로 정량적인 벽체 단열 성능을 분석하였다. 그리고 본 연구에서 고찰한 벽체 단열 성능 정밀 진단법(ISO 9869-1¹⁾: Heat Flow Meter Method)과 간이 진단법(ASTR²⁾[Air-Surface Temperature Ratio Method])을 통해 벽체 단열성능을 분석하였으며 정밀법과 간이법 간 측정 신뢰성을 비교하여 검증하였다. 또한 측정 오차율을 통해 그 원인을 분석하고 추후 연구 방향에 대해 고찰하였다.

본 연구에서는 기존 공동 주택의 현장 측정 방법에 따른 건물 벽체 단열성능을 분석하기 위해 다음과 같은 선행 연구를 고찰하였다. 먼저 Giorgio Ficco et al.³⁾은 ISO 9869-1의 Heat Flow Meter

1) ISO 9869-1 - Building elements - *In-situ* measurement of thermal resistance and thermal transmittance - Part 1 : Heat flow meter method 2014(E)

2) Tanaka JUN, Takeda MASASHI, "Building Environmental Engineering", p. 191~192, 2014

3) Giorgio Ficco, Fabio Iannetta, Elvira Ianniello, Francesca Romana d'Ambrosio

method를 이용하여 기존 주택의 벽체 열성능 진단 방법과 관련된 연구를 수행하였으며 실험 조건에 따라 벽체 열성능에 미치는 영향 및 오차율에 대해 분석하였다. Pier Giorgio Cesaratto et al.⁴⁾은 기존 주택 건물 대상으로 HFM(Heat Flow Meter) 계측 성능을 평가하고 주위 조건의 영향에 따라 벽체 열성능에 미치는 영향을 평가하였으며, 설계 시 반영된 벽체 열성능과 현장 측정을 통해 산출된 성능과 비교하여 측정 불확도에 대한 분석을 수행하였다. Xuan Cheng et al.⁵⁾은 ISO 9869-1의 HFM법을 사용하여 단열재의 장기 단열 성능 평가 방법에 대해 정량적인 평가를 위한 수치 모델 검증을 수행하였으며, 단열 진단 기법에서 이용된 센서 설치 위치가 측정 정확도에 미치는 영향에 대해 분석하였다. Lee et al.⁶⁾의 연구에서는 기존 목조 주택의 단열 성능 진단에 관한 기술 검증을 통해 단열 진단 기술의 실용화 및 기존 주택의 단열 개수에 관한 연구가 수행되었다. 국내 논문의 경우 Choi et al.⁷⁾은 적외선 열화상을 이용하여 공동주택의 단열성능을 온도차비율법을 통해 벽체 최적 단열설계 방안을 도출하였다. 본 연구에서는 선행연구의 내용을 참조하여 연구를 수행하였으며 선행 연구의 차별성으로는 25년 경과된 공동 주택 건물 대상으로 건물 시공 후, 사용 단계에서 건물 외피의 장기 단열 성능을 진단할 수 있는 벽체 열성능 건물 내 열성능이 가장 취약한 부분을 수치적으로 해석하고 측정을 통해 열성능을 정량적으로 도출하였으며 실질적으로 단열 공사를 수행하였다. 그리고 공사 전·후에 따른 건물 열성능에 대해 현장 측정을 통해 측정하고 준공 당시 설계 값과 현장 측정 결과 값과의 비교를 통해 벽체의 단열성능 경년 변화율을 분석하였다.

2. 연구 방법

본 연구를 진행하기 위한 연구의 방법 및 범위는 다음과 같다.

(1) 기존 공동 주택의 건물 열성능을 분석하기 위한 다양한 연구 방법들과 선행연구들을 분석하고, 기존 공동주택의 에너지 성능을 진단할 수 있는 신뢰성 있는 현장 측정방법에 대해 검토하였다.

(2) 국내 임대 공동주택 표준 모델을 선정하여 선행 연구 및 ISO 9869-1 : HFM method와 ASTR method의 측정 프로세스 및 데이터를 적용하여 벽체 단열 성능을 분석하기 위한 현장 측정을 수행하였다.

(3) (2)에서 측정된 결과 값을 분석하여 준공 당시 설계 U-value 및 현장에서 측정된 *In-situ* measurement U-value를 비교하여 벽체 단열 성능 및 경년변화율을 분석하였다. 또한 건물 벽체 단열 성

능 현장 측정 정밀법과 간이법과의 측정 오차율을 분석하여 오차 원인을 분석하였다.

(4) 건물 에너지 시뮬레이션을 통해 CASE 별로 에너지 요구량 및 소요량을 비교 분석하고 준공 당시, 개선 전 모델, 개선 후 모델과 건물 에너지 성능 차이 및 개선 효과를 분석하였다.

(5) 위의 결과 값들을 바탕으로 건물에서 열 성능이 취약한 부분을 정량적으로 분석하여 효율적인 에너지 사용이 가능한 건물로 개선할 수 있는 방안 및 에너지 절감 잠재력을 분석하였다.

2.1. HFM(Heat Flow Meter) Method

ISO 9869-1⁸⁾ : Heat Flow Meter Method는 현장에서 측정된 데이터가 준 정상 상태를 보일 경우 신뢰성이 높은 결과를 얻을 수 있는 현장 측정 진단법이다. 그러나 벽체 단열 성능을 측정하기 위한 제약 조건(정상 상태 조건 구축, 실내 기류 발생 방지, 기상 조건[일사, 눈, 비])이 복잡한 편이며 측정 장비가 고가이며 측정 절차가 다소 복잡하다는 단점이 있다.

본 연구에서는 측정 결과 신뢰성이 높은 HFM method를 정밀 진단법으로 정의하고 측정을 수행하였다. ISO 9869-1(단열-건물요소-열저항과 열관류율의 현장 측정법)은 열 이동에 수직한 불투명 층으로 이루어진 건축물의 특정 부위에 Heat flux Meter를 사용하여 벽체의 열관류율을 측정한다. 본 연구에서는 72시간 이상의 장기 간동안 측정하여 열류 밀도(Heat flux[W/m²])를 실내·외 공기 온도 차로 나눈 값을 이용하여 열관류율을 산출하는 평균법(Average method)으로 산출하였다. 정상 상태에서 건축 요소의 열특성은 다음 정의를 따른다.

a) R은 요소의 표면 간 열저항으로 다음과 같이 나타낸다.

$$R = \frac{T_{si} - T_{se}}{q} = \frac{1}{A} \quad (1)$$

여기서 R은 열저항(m²·K/W), q는 열류밀도(W/m²), T_{si}는 실내 측 벽체 표면 온도(°C), T_{se}는 실외 측 벽체 표면 온도(°C), A는 열 컨덕턴스(W/m²·K)를 나타낸다.

b) U는 요소의 주변 유효 간의 열관류율로 다음과 같이 나타낸다.

$$U = \frac{q}{(T_{ia} - T_{ea})} = \frac{1}{R_T} \quad (2)$$

여기서 U는 열관류율(W/m²·K), T_{ia}는 실내 측 공기 온도(°C), T_{ea}는 실외 측 공기 온도(°C), R_T는 총 열저항(m²·K/W)으로 다음과 같이 주어진다.

$$R_T = R_{si} + R + R_{se} \quad (3)$$

여기서 R_{si}와 R_{se}는 각각 실내 및 실외 측의 표면 열저항이다. R과

Alfano, Marco Dell'Isola, "U-value in situ measurement for energy diagnosis of existing buildings", Energy and Buildings, Volume 104, 2015

4) Pier Giorgio Cesaratto, Michele De Carli, "A measuring campaign of thermal conductance in situ and possible impacts on net energy demand in buildings" Energy and Buildings, Volume 59, 2013

5) Xuan CHENG, Shinsuke KATO, Kyosuke HIYAMA, Sihwan LEE, "The Technological Investigation of Wall Thermal performance Diagnosis", Review on activities of support corps in Tokyo during the 2011 Great East Japan Earthquake, 2011

6) Sihwan LEE, Shinsuke KATO, "Feasibility Study of In-Situ Measurement Method Using The Infrared Camera To measure U-value of Walls on Residential House Installed An convection Stove", J. Environ. Eng., AIJ, Vol. 661

7) Gyeongseok CHOI, Jangyeul SOHN, "Thermal Performance Evaluation of Apartment Housing Using Infra-red Camera." The Society Of Air-Conditioning And Refrigerating Engineers Of Korea, Vol. 22(6), 404-412

8) ISO 9869-1 - Building elements - *In-situ* measurement of thermal resistance and thermal transmittance - Part 1 : Heat flow meter method 2014(E)

R_f 의 단위는 ($m^2 \cdot K/W$)로 표기한다. U 와 A 의 단위는 $W/(m^2 \cdot K)$ 로 K 는 절대온도를 나타낸다.

2.2. ASTR⁹⁾(Air-Surface Temperature Ratio) method

본 연구에서는 준 정상 상태일 때 실외에서 실내 층으로 벽체 전체에 흐르는 열류 밀도(W/m^2)량과 실내 공기에서 내측 벽면 표면으로 전달되는 열류 밀도(W/m^2)량은 동일하다는 전제하에 ASTR method를 통해 열관류율을 산출하였다. ASTR method의 경우 실내외 공기 온도 정보, 실내 측 벽체 표면온도와 2016년 건축물의 에너지 절약설계 기준 별표 5에 제시된 실내 측 표면 열 전달 저항값을 변환한 내측 표면 종합 열전달률 $9W/(m^2 \cdot K)$ 을 적용하여 벽체 열관류율을 분석하였다. 이 방법은 HFM method의 비해 측정 장비의 가격이 저렴하고 측정 방법 및 조건이 비교적 간편하다는 장점이 있다. 그러나 측정 신뢰성이 확보된 HFM method 비해 측정 신뢰도가 떨어지는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 ASTR method의 측정 신뢰도를 검증하기 위해 정밀법인 HFM method와 비교 분석하여 측정 오차율 및 오차원인을 분석하였다.

a) U-value는 요소의 주변 유효 간의 열관류율로 대류 열전달률과 실내외 공기 온도차와 실내 측 공기 온도와 실내 측 벽체 표면 온도차로 산출한다.

$$U(T_{ia} - T_{ea}) = \alpha_i(T_{ia} - T_{si}) \quad (4)$$

$$U = \alpha_i \left[\frac{(T_{ia} - T_{si})}{(T_{ia} - T_{ea})} \right] \quad (5)$$

여기서 T_{ia} 는 실내 측 공기온도($^{\circ}C$), T_{ea} 는 실외 측 공기 온도($^{\circ}C$) T_{si} 는 실내 측 표면 온도($^{\circ}C$), $\alpha_i(W/m^2 \cdot K)$ 는 벽체 표면 열전달률을 나타낸다.

3. 기존 공동 주택의 현장 측정

3.1. 연구 대상 건물

본 연구대상 건물은 서울에 위치한 M 아파트로 임대 공동 주택 건물이다. 준공 시기는 1991년으로 25년 경과된 건물로 최상층에 위치한 측벽세대이다. 현장 측정 시기는 2016년 1월 25일부터 2월 29일 약 한달 동안 현장에서 건물 단열 성능을 측정하였다.

본 연구 대상 건물은 선행 연구에서 제시한 2009년부터 2014년까지 실시된 저소득층 에너지효율 개선사업에 선정되어 시공지원을 받은 약 18만 가구를 주거 형태에 따라 분류한 저소득층 공동주택 표준모델 연구¹⁰⁾를 참조하여 선정하였다. 선행 연구에서 제시한 표준모델은 빅 데이터 분석을 통하여 가장 높은 비율을 차지하는 방 개수, 향, 준공년도, 바닥면적을 선정하여 저소득층 공동 주택 표준

모델을 도출하였으며 본 연구 대상 건물과 유사한 공동주택을 선정하여 현장 측정법을 통해 건물 단열 성능을 분석하였다. 건물 개요는 표 1과 같으며 본 연구 대상 건물의 준공 당시 벽체 및 창호의 형별 성능 내역 및 자세한 구성 요소는 표 2와 같다. 외기에 직접 면하는 벽체의 경우 $0.531 W/(m^2 \cdot K)$ 의 열관류율을 지니고 있으며, 지붕의 경우 $0.411 W/(m^2 \cdot K)$, 창호는 일반 복층창으로 $2.8 W/(m^2 \cdot K)$ 의 형별 성능을 가지고 있다.

Table 1. Overview of the target building

Classification	Outline
Location	Seoul, M Apartment
Completion Date	1991 year
Floor Area	39.6 m ²
Indoor Space	4.5m(W) × 8.8m(L) × 2.3m(H)
Measurement position	Top floor sidewall, 1 household
Measurement time	2016.01.25. ~ 2016.02.29

Table 2. Thermophysical properties of the walls under investigation

Wall type	Material layer	Thickness (mm)	Conductivity W/(m·K)	Thermal transmittance W/(m ² ·K)
Exterior wall (W1)	Cement bricks	90	0.6	0.531
	Rockwool insulating board	50	0.037	
	Cement bricks	90	0.6	
	Cement mortar(1:3)	18	1.4	
Exterior Roof (R1)	Cement mortar(1:3)	24	1.4	0.411
	Concrete(1:2:4)	20	1.6	
	Rockwool insulating board	70	0.037	
	Plaster board	9	0.18	
Window (G1)	Double glazing (PVC frame)			2.8

3.2. 측정 장비

본 연구 대상 건물의 벽체 단열 성능을 측정하기 위해 표 3에 제시된 장비를 사용하여 현장 측정을 수행하였다. 먼저 단열 성능 진단 정밀법으로 정의한 HFM method를 적용하여 연구방법 2.1에서 제시한 식 (2)를 통해 벽체 열관류율을 분석하였다. 열류밀도(q), 실내외 공기온도(T_{ia} , T_{ea})의 데이터를 취득하였으며 각각의 HFM 센서는 측정 정확도를 확보한 스위스에서 제작한 GreenTEG사 및 일본에서 제작한 ETO 사의 센서를 사용하였다. 다음으로는 현장 측정 간섭법으로 정의한 ASTR method를 적용하여 실험을 수행하였다. 측정 장비로는 T-type 열전대와 온습도계, 데이터 로거를 사용하였으며 실내 공기 온도(T_{ia}), 실내 측 벽체 표면온도(T_{si}), 실외 공기 온도 데이터(T_{ea}) 데이터를 수집하여 연구방법 2.2에서 제시한 식 (4)를 통해 열관류율을 분석하였다.

9) Tanaka JUN, Takeda MASASHI, "Building Environmental Engineering", p. 191~192, 2014

10) Jeonggook KIM, Jonghun KIM, Hakgeon JEONG, Cheolyong JANG, Junghun LEE, Doosam SONG, "An analysis of apartment reference model for Low-income households support methods." The Korean Society for Energy, Vol. 24

Table 3. Overview of the measuring instrument

Index	Classification	
Heat flow Meter method (ETO Inc. M55A)	Quantity	2 EA
	Content	Surface temperature measurement of indoor and outdoor wall & Heat flux measurement
Heat flow Meter method (GreenTEG Inc. G-skin)	Quantity	5 EA
	Content	Surface temperature measurement of indoor and outdoor wall & Heat flux measurement
ASTR method	Quantity	4 EA
	Content	Surface temperature measurement of indoor and outdoor wall
Air Temperature & humidity	Quantity	6 EA
	Content	Measurement of indoor and outdoor temperature and humidity

3.3. 측정 위치

본 연구 대상 건물의 건물 단열 성능을 측정하기 위한 측정 위치와 설치 사진은 그림 1, 2와 같다. ①~⑥번 포인트에 각 실내의 온습도를 측정하기 위해 온습도계와 T-type 열전대를 사용하여 데이터를 취득하였으며 방 2의 실내외측 벽체 표면 온도 및 벽체 부근 공기 온도를 측정하였다. ⑦~⑩번 포인트에서는 방 1의 벽체(동, 서, 남쪽)의 표면온도, 천장·바다·창호의 표면온도, 벽체 부근 온도를 T-type 열전대 및 온습도계를 사용하여 측정하였다. HFM 센서는 ④~⑩의 포인트에 해당되는 실내 측 벽체(동, 남, 북쪽, 천장)에 설치하고 실내의 온도차를 측정하기 위해 열전대를 측정 포인트에 설치하여 데이터를 취득하였다. 실내 공간 및 각각의 벽체에 측정 목적 및 내용은 표 4와 같다.

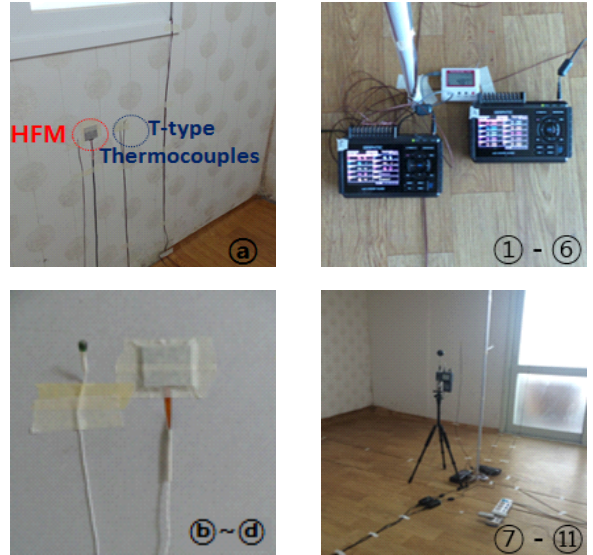


Fig 2. In-situ measurement experiment(ASTR & HFM method)

Table 4. In-situ measurement point and purpose

Measurement point	The purpose of measurement
Indoor space	① - ⑥ : Indoor and outdoor temperature and humidity, the surface temperature of the wall (north, east)
	⑦ - ⑩ : Indoor and outdoor temperature and humidity, the surface temperature of the wall and window (south, roof)
North wall	a) - c) : Heat flux, Indoor and outdoor environment temperature, the surface temperature of the wall
East wall	
South wall	
Roof	d) : Heat flux, Outdoor environment temperature, the surface temperature of the roof

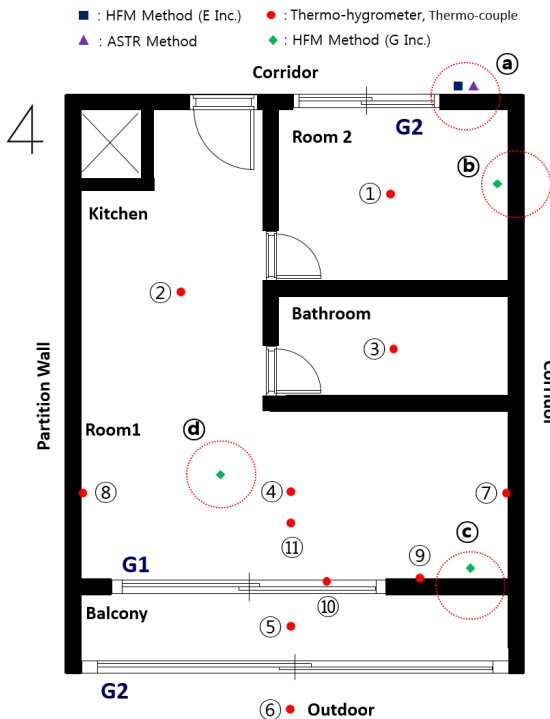


Fig 1. Measuring the position of the target building

3.4. 측정 조건

본 연구 대상 건물 벽체의 단열 성능을 측정하기 위한 실험 측정 조건은 다음과 같다. 첫째, 열화상 장비(ISO 6781 참조)를 통해 실내 측 벽체 온도 구배가 일정한 위치를 선정한 뒤 HFM와 T-type 열전대 및 온습도계를 벽체 전체의 대표가 될 만한 위치에 설치하여 측정을 수행하였다.

둘째, HFM는 벽체의 열교 부위, 균열이 발생한 곳, 오차 요인이 발생하는 부위를 피해 설치하여 측정을 수행하였으며 HFM 센서는 기류가 발생하는 온풍기나 환기 팬, 후드 등 실내에서 발생할 수 있는 조건들을 제거하여 측정을 수행하였다.

셋째, 실외 기상 조건이 양호한 날을 대상으로 측정을 수행하였다. 또한 U-value 측정에서 외부 주변 온도는 일반적으로 벽체의 외부 표면에 대해 태양 Heat flow를 고려하지 않기 때문에 열류계가 직접적인 태양 방사에 노출되어 있지 않는 곳에 설치하여 측정을 수행하였다. 그리고 벽체에 직달 일사 영향을 받지 않는 시간대의 데이터를 선정하여 분석하였다.

넷째로 ISO 9869-1에서 제시한 최소 시험 기간인 72시간 이상으로 약 1~2주의 시간에 걸쳐 측정을 수행하였다.

4. 측정 결과

4.1. 단열 공사 전·후 측정 결과

본 연구에서는 연구 대상 건물의 벽체 열성능 분석을 현장 측정법 HFM method(정밀법), ASTR method(간이법)을 적용하여 분석하였다. 그리고 준공 당시 벽체 U-value와 현장 측정에 의해 분석된 25년 경과된 벽체 U-value와의 비교 분석을 통해 벽체 장기 단열 성능 및 경년변화율을 분석하였다. 마지막으로 건물의 단열 성능 측정 요소들(실내의 온도, 실내 벽체 표면온도, 열류밀도)의 결과값과 측정된 U-value의 측정값 표준편차 분석을 통해 측정 정확도에 대해 분석하였으며, 정밀법과 간이법의 측정 오차율을 분석하였다.

단열 공사 전 벽체 열성능을 2016년 1월 25일부터 2월 14일까지 약 2주간 측정하였으며 벽체의 축열 요소 및 일사 영향을 받지 않는 시간대(02:00~06:00)의 데이터를 취득하여 분석하였다. 반복 측정 샘플 1205개의 데이터를 분석하였으며 분석 결과는 표 5와 같다. 세대 벽체인 서쪽 벽체를 제외한 나머지 동, 남, 북, 천장면의 벽체 열관류율을 측정된 결과 HFM method를 통해 도출된 열관류율은 북쪽 벽체 0.671 W/(m²·K), 동쪽 벽체는 0.657 W/(m²·K), 남쪽 벽체 0.690 W/(m²·K), 천장은 0.501 W/(m²·K)로 분석되었다. 준공 당시 열관류율에 비해 약 21~29%정도의 단열성능이 저하된 것으로 분석되었으며, 그 중 북쪽, 남쪽 벽체 단열 성능이 가장 저조한 것으로 분석되었다. ASTR method를 통해 분석한 결과는 북쪽 벽체의 경우 0.801 W/(m²·K), 동쪽 벽체는 0.789 W/(m²·K), 남쪽 벽체는 0.821 W/(m²·K), 천장은 0.604 W/(m²·K)로 분석되었으며 정밀법과 간이법의 측정법에 따른 오차율은 약 20%의 오차가 발생했다. 그리고 U_{HFM}를 통해 측정된 U-value의 측정값을 표준 편차를 통해 분석한 결과 측정 오차 표준 편차는 약 2.53~7.91 %의 측정 오차율 범위를 보였으며, U_{ASTR}의 측정 오차 표준 편차는 약 3.31~8.49%의 측정 오차율 범위를 보였다. 공사 전 측정 결과, HFM method를 통

해 측정된 U-value의 값의 ASTR method에 비해 측정 정확도가 높은 것으로 분석되었다. 본 연구에서는 단열 공사 전 측정 결과를 바탕으로 벽체 단열성능이 낮은 남·북쪽 벽체에 단열 공사를 수행하였으며 공사 후 단열 성능을 분석하였다. 단열 공사 후 벽체 열성능은 2016년 2월 15일부터 2월 29일까지 약 2주간 측정하였으며 그 결과는 표 6과 같다. 현장 측정 정밀법으로 정의한 HFM method를 통해 측정된 결과 북쪽 벽체 열관류율은 0.372 W/(m²·K), 남쪽 벽체 0.407 W/(m²·K)로 분석되었다. 이는 북쪽 벽체의 경우 공사 전 대비 약 44%의 단열 성능이 향상되었으며 남쪽 벽체의 경우 약 41%의 단열 성능이 향상된 결과를 보였다. 다음으로 간이법으로 정의한 ASTR method를 통해 분석한 결과는 북쪽 벽체는 0.438 W/(m²·K), 남쪽 벽체는 0.477 W/(m²·K)로 분석되었으며 정밀법과 간이법의 측정법에 따른 오차율은 약 17%의 오차가 발생했다. 그리고 U_{HFM}를 통해 측정된 U-value의 측정값을 표준 편차를 통해 분석한 결과 측정 오차 표준 편차는 약 3.19~7.53 %의 측정 오차율을 보였으며, U_{ASTR}의 측정 오차 표준 편차는 약 6.50~9.59%의 측정 오차율을 보였다. 공사 후 측정 결과도 공사 전과 마찬가지로 HFM method를 통해 측정된 U-value의 값의 ASTR method에 비해 측정 정확도가 높았다. 현장 측정 정밀법과 간이법 간의 측정을 통해 발생한 오차 원인은 2016년 건축물의 에너지 절약설계 기준에서 실내 측 표면 종합 열전달률 9W/(m²·K)을 사용하여 측정 오차가 발생된 것으로 사료된다.

4.2. 건물 에너지 시뮬레이션 분석

본 연구 대상 건물의 현장측정을 통해 도출된 결과값을 사용하여 동적 해석 프로그램인 EnergyPlus 8.1을 통해 건물 에너지 요구량 및 소요량을 산출하였다. 연구대상 건물의 input 데이터는 서울 기상 데이터, 건물 외피, 조명, 전열기기의 설계조건, 시스템 계통의 요소(열원 시스템, 시스템 효율, 시스템 운영 스케줄)와 채실자 정보를 입력하였다. 침기율 값은 Case 1의 경우 선행 연구에서 제시한 저소득층 임대 아파트 표준 모델에서 정의한 침기율 값을 반영하였으며,

Table 5. Measurement results of the previous insulation construction (2016.01.25.~2016.02.14., a.m. 02:00~06:00, Measurement interval : 1min)

(n = 1205)	T _{ea} (°C) ($\bar{x} \pm \sigma$)	T _{ia} (°C) ($\bar{x} \pm \sigma$)	T _{ia} - T _{ea} (°C)	T _{si} (°C) ($\bar{x} \pm \sigma$)	T _{ia} - T _{si} (°C)	q [W/m ²] ($\bar{x} \pm \sigma$)	U _{Design,before} [W/(m ² ·K)]	U _{HFM} [W/(m ² ·K)] ($\bar{x} \pm \sigma$)	U _{ASTR} [W/(m ² ·K)] ($\bar{x} \pm \sigma$)
W1 (North)	2.93 ± 2.81	20.72 ± 0.47	17.76	19.77 ± 0.73	1.58	11.94 ± 1.16	0.531	0.671 ± 0.042	0.801 ± 0.068
W1 (East)	3.78 ± 2.73	21.11 ± 0.68	17.34	20.48 ± 0.81	1.52	11.40 ± 1.48	0.531	0.657 ± 0.041	0.789 ± 0.025
W1 (South)	3.28 ± 2.64	21.98 ± 0.58	18.19	20.84 ± 0.76	1.66	12.92 ± 1.23	0.531	0.690 ± 0.017	0.821 ± 0.037
R1 (Roof)	-4.27 ± 3.80	21.95 ± 0.56	22.07	20.84 ± 0.88	1.48	14.80 ± 1.35	0.411	0.501 ± 0.013	0.604 ± 0.020

(\bar{x} : Average, σ = Standard deviation)

Table 6. Measurement results of the after insulation construction (2016.02.15.~2016.02.29., a.m. 02:00~06:00, Measurement interval : 1min)

(n = 1205)	T _{ea} (°C) ($\bar{x} \pm \sigma$)	T _{ia} (°C) ($\bar{x} \pm \sigma$)	T _{ia} - T _{ea} (°C)	T _{si} (°C) ($\bar{x} \pm \sigma$)	T _{ia} - T _{si} (°C)	q [W/m ²] ($\bar{x} \pm \sigma$)	U _{Design,after} [W/(m ² ·K)]	U _{HFM} [W/(m ² ·K)] ($\bar{x} \pm \sigma$)	U _{ASTR} [W/(m ² ·K)] ($\bar{x} \pm \sigma$)
W1 (North)	4.70 ± 2.10	22.98 ± 0.38	18.28	22.31 ± 1.08	0.89	6.79 ± 1.12	0.345	0.372 ± 0.028	0.438 ± 0.042
W1 (East)	4.58 ± 2.06	22.34 ± 0.52	18.03	21.56 ± 0.99	1.57	11.70 ± 1.88	0.531	0.659 ± 0.041	0.783 ± 0.028
W1 (South)	4.46 ± 2.28	22.44 ± 0.49	18.29	21.78 ± 0.81	0.97	7.32 ± 1.22	0.369	0.407 ± 0.013	0.477 ± 0.031
R1 (Roof)	-3.86 ± 3.67	22.91 ± 0.66	22.39	21.28 ± 1.18	1.51	11.28 ± 1.98	0.531	0.508 ± 0.012	0.607 ± 0.020

Table 7. Overview of the simulation model

Classification	CASE 1	CASE 2	CASE 3
Wall [W/(m ² ·K)]	0.531	N : 0.671 E : 0.657 S : 0.690	N : 0.469 E : 0.659 S : 0.417
Roof [W/(m ² ·K)]	0.411	0.563	0.563
Window [W/(m ² ·K)]	2.8	2.8	2.8
Infiltration (ACH)	0.9 ¹¹⁾	1.34	1.09
Occupants (Person/m ²)	0.0155		
Lighting (W/m ²)	5.0		
Equipment (W/m ²)	1.57		
Heating System	Gas Boiler, 80%		
Setpoint	Heating : 21 °C, Cooling : 28 °C		

Case 2, 3의 경우는 공사 전후 시점으로 각각 Blowdoor Test를 통해 측정된 값을 반영하였다. 또한 설정 요구량 및 열원, 냉난방 설정온도 값은 주거 건물에서 사용되고 있는 건축물 에너지 효율등급 인증제도 운영 규정에서 제시된 값을 사용하여 모델링을 수행하였다. 본 연구에서의 건물 외피 조건인 벽체, 지붕, 창문 정보를 준공 당시 건설 초기 형별성능내역 값을 적용하였으며 이 모델을 CASE 1로 선정하였다. CASE 2의 경우 단열 공사 전 측정된 벽체 단열 성능의 물성치를 적용하여 모델링을 수행하였으며 CASE 3의 경우 단열 공사 후 측정된 값을 적용하여 모델링을 수행하였다. CASE 별 조건은 표 7과 같다. CASE 별 에너지 요구량 및 연료 사용량을 분석한 결과 건물 에너지 요구량의 경우 CASE 1 101.63 kWh/(m²·a)의 요구량을 보였으며 CASE 2는 135.69 kWh/(m²·a), CASE 3의 경우 117.08 kWh/(m²·a)으로 분석되었다. 이는 준공 당시 모델인 CASE 1에 비

Table 8. Analysis of the energy demand and consumption of the building

Index		CASE 1 (kWh/m ² ·a)	CASE 2 (kWh/m ² ·a)	CASE 3 (kWh/m ² ·a)
Building Energy Need	Heating	101.63	135.69	117.08
	Cooling	6.3	7.53	7.23
	Hot-water	30.7	30.7	30.7
	Lighting	9.1	9.1	9.1
Energy Source	Gas (MJ/m ² ·a)	552.6	706.82	622.12
	Electricity	909	943	929
Building Energy Consumption	Heating	127.03	169.62	146.35
	Cooling	3.5	4.18	4.02
	Hot-water	26.47	26.72	26.46
	Lighting	14.66	14.80	14.66
	Room Electricity	127.03	169.62	146.35
	Total	176.45	220.15	196.27

11) Jeonggook KIM, Jonghun KIM, Hakgeon JEONG, Cheolyong JANG, Junghun LEE, Doosam SONG, "An analysis of apartment reference model for Low-income households support methods." The Korean Society for Energy, Vol. 24

해 25년 경과된 건물 CASE 2가 약 33%의 난방 요구량이 증대된 결과를 얻었으며 단열 공사 전 모델인 CASE 2 대비 단열 공사 후 모델 CASE 3의 경우에는 약 13%의 난방 요구량이 감소된 결과를 얻었다. 에너지 소요량의 경우도 난방 에너지의 차이를 보였으며 전체적으로 CASE 1 대비 CASE 2는 24.8%의 에너지 소요량이 증대되었으며, CASE 2 대비 CASE 3의 경우는 10.8%의 난방 에너지 소요량이 감소된 결과를 얻었다. 분석 결과는 표 8과 같다.

5. 결론

본 연구는 기존 공동주택의 에너지 성능 진단을 위한 현장에서 외기에 직면하는 벽체 부위 단열 성능을 정량적으로 평가하는 연구를 수행하였다. 기존 공동 주택 건물 대상으로 벽체 단열 성능을 정밀 진단법인 HFM method와 간이법인 ASTR method를 적용하여, 실제 기존 공동주택의 벽체 부위별 단열 특성 및 성능을 분석하였으며 이를 통해 25년 이상 경과된 벽체의 장기 단열 성능을 정량적으로 분석할 수 있었다. 또한 측정 방법에 따른 벽체 단열 성능의 오차를 분석하여 정밀법과 간이법의 오차 원인 요소를 분석하였다. 그리고 본 연구를 통해 분석된 건물 내 단열 성능이 취약한 부분(남, 북쪽 벽체)을 효율적인 에너지 사용이 가능한 건물로 개선할 수 있는 방안을 제시하여 실제로 벽체 단열 공사를 수행하였다. 본 연구에서 제시한 방법에 따라 준공 당시 건물 열성능(에너지 요구량, 소요량)과 단열 공사 전·후 열성능을 동적 열 해석 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 이상의 연구 결과는 다음과 같다.

(1) 준공 당시 설계 U-value와 현장 측정을 통해 도출된 U-value의 비교를 통해 25년 경과된 벽체의 단열 성능을 분석하였다. 분석 결과 평균 약 26%의 단열 성능이 저하된 것으로 분석되었다.

(2) 현장 측정을 통해 정량적인 벽체 단열 성능을 분석하여 실질적으로 단열 성능이 취약한 벽체를 진단(남쪽, 북쪽 벽체)하여 벽체 단열공사를 실질적으로 진행하여 향상된 단열 성능을 분석하였다. 분석 결과 북쪽 벽체의 경우 44%의 단열 성능이 향상된 결과를 보였으며 남쪽 벽체의 경우 약 41%의 단열 성능이 향상되었다.

(3) 벽체 단열 성능을 진단하는 방법 HFM method(정밀법)과 ASTR method(간이법)과의 측정 오차를 분석하였다. 분석 결과 17~20%의 오차가 발생하였다. 오차 원인은 2016년 건축물의 에너지 절약설계에 제시된 실내 측 표면 종합 열전달률 9W/(m²·K)의 고정된 값을 적용하여 계산하여 실제로 정밀법과의 측정 오차가 발생되었다. 실제로 정확한 실내 측 표면 열전달률을 위한 연구가 필요하다. 이를 통해 벽체 단열 성능 현장 측정 ASTR method의 신뢰성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

(4) 본 연구에서는 준공 당시 건물 모델(CASE 1), 단열 공사 전 모델(CASE 2), 단열공사 후 모델(CASE 3)을 설정하여 EnergyPlus 8.1을 통해 건물 에너지 요구량 및 소요량을 분석하였다. 에너지 요구량 분석 결과 CASE 1 대비 CASE 2는 약 33%, 에너지 소요량 분석 결과 약 24.8%가 증가되는 것으로 분석되었으며 CASE 3의 경우 공사 전 모델 CASE 2의 에너지 요구량은 약 13%, 에너지 소요량은

비교 분석한 결과 약 10.8%가 감소하였다.

본 연구에서는 건물 벽체 단열성능 현장 측정 방법을 적용하여 경년 변화가 진행된 노후 공동 주택의 열성능을 정량적으로 분석하였다. 향후 연구로 추가 실측을 통해 실내 측 종합 표면 열전달률 보정법 연구와 U-value 현장 측정 시 발생하는 다양한 변수(실내 기류 속도, 실내 복사온도, 실내외 온도차, 실내 벽체 표면온도와 공기 온도차) 따른 벽체 단열 성능에 미치는 영향 및 민감도 분석을 수행할 계획이다.

Acknowledgements

“This work was conducted under framework of the research and development program of the Korea Institute of Energy Research (B6-2462)”

Reference

- [1] ISO 9869-1 - Building elements - *In-situ* measurement of thermal resistance and thermal transmittance - Part 1 : Heat flow meter method 2014(E)
- [2] Tanaka JUN, Takeda MASASHI, “Building Environmental Engineering”, p. 191~192, 2014
- [3] Giorgio Ficco, Fabio Iannetta, Elvira Ianniello, Francesca Romana d'Ambrosio Alfano, Marco Dell'Isola, “U-value in situ measurement for energy diagnosis of existing buildings”, Energy and Buildings, Volume 104, 2015
- [4] Pier Giorgio Cesaratto, Michele De Carli, “A measuring campaign of thermal conductance in situ and possible impacts on net energy demand in buildings” Energy and Buildings, Volume 59, 2013
- [5] Xuan CHENG, Shinsuke KATO, Kyosuke HIYAMA, Sihwan LEE, “The Technological Investigation of Wall Thermal performance Diagnosis”, Review on activities of support corps in Tokyo during the 2011 Great East Japan Earthquake, 2011
- [6] Sihwan LEE, Shinsuke KATO, “Feasibility Study of In-Situ Measurement Method Using The Infrared Camera To measure U-value of Walls on Residential House Installed An convection Stove”, J. Environ. Eng., AII, Vol. 661
- [7] Gyeongseok CHOI, Jangyeul SOHN, “Thermal Performance Evaluation of Apartment Housing Using Infra-red Camera.” The Society Of Air-Conditioning And Refrigerating Engineers Of Korea, Vol. 22(6), 404-412
- [8] Jeonggook KIM, Jonghun KIM, Hakgeon JEONG, Cheolyong JANG, Junghun LEE, Doosam SONG, “An analysis of apartment reference model for Low-income households support methods.” The Korean Society for Energy, Vol. 24