



저소득층 가구의 U-value 및 IAQ 측정을 통한 에너지 효율 개선 사업 효과 분석

Analysis of energy efficiency improvement project through U-value and IAQ measurement of low-income households

김서훈* · 김종훈** · 정학근*** · 송규동****

Kim, Seo-Hoon* · Kim, Jong-Hun** · Jeong, Hakgeun*** · Song, Kyoo-dong****

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

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

*** Coauthor, Energy ICT-ESS 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 : Currently, the building sector accounts for about 24% of total domestic energy use. There is a growing need for building energy efficiency. In particular, in low-income households, the energy efficiency of the buildings is very low due to the characteristics of the aged buildings, resulting in an increase in heating costs and maintenance costs, resulting in an increase in fuel cost / current income ratio. In terms of energy saving of buildings, the energy efficiency improvement project for low-income households is to improve energy-efficient buildings by improving the insulation performance of the outer cover and improving the performance of the equipment. In order to improve the energy efficiency improvement projects and policies of low-income households, it is necessary to accurately diagnose the present condition of the support target households. **Method :** In this study, through the precise diagnosis of the building wall, numerical measurement and review of the poorest part in the actual building is conducted numerically, and then the building is insulated so that it can be carried out within the actual budget range. In addition, indoor air quality (CO₂ concentration, formaldehyde, volatile organic compounds) was measured through simple analysis of the air environment in the actual residence space, and the effect of improving the residential environment before and after construction was analyzed. **Result :** The analysis of wall insulation performance data was analyzed to quantitatively analyze areas where the wall insulation performance was weak and to improve (repair, replace, insulate) buildings.

© 2017 KIEAE Journal

KEYWORD

저소득층 가구
에너지효율개선사업
벽체 단열 성능 진단
실내 공기질 분석

Low-income household
Houses energy efficiency treatment Program
Wall thermal performance diagnosis
IAQ(Indoor air quality) analysis

ACCEPTANCE INFO

Received Sep 11, 2017
Final revision received Nov 8, 2017
Accepted Nov 13, 2017

1. 서론

현재 국내 전체 에너지 사용량 중 건물부문이 차지하는 비율은 약 24%를 차지하고 있어 건물에너지효율화의 필요성이 대두되고 있다. 특히 저소득층 가구의 경우 노후화된 건물의 특성상 건물의 에너지효율이 매우 낮아 이로 인한 난방비 증가와 유지보수 비용이 지속적으로 발생하여 연료비/경상소득 비율이 증가하고 있는 실정이다. 이에 따라 정부에서는 에너지법(법률 제11965호)을 바탕으로 에너지복지 실현을 위해 힘쓰고 있으며 한국에너지재단에서는 저소득 취약계층을 포함한 사회적 약자의 에너지 공급기반 마련과 에너지 구입비용 절감을 위해 '저소득층 주택에너지효율개선사업'을 시행해오고 있다. 건물의 에너지를 절감하는 측면에서 저소득층 가구에 대한 에너지효율개선사업은 주거성능이 열악하고 에너지효율이 떨어지는 노후건물에 대하여 외피단열성능 및 설비성능의 개선 등을 통해 효율적인 에너지 사용이 가능한 건물로 개선할 수 있는 방안이 될 수 있다.¹⁾ 하지만 현재는 신뢰성 높은 건물 에너지 진단 방법 및 프로세스 과정 없이 시공자의 주관적 판단에 따라 에너지효율개선

사업이 이루어지고 있는 실정이며 이는 건물의 에너지 효율 개선 효과(에너지 절감, 주거 환경 개선)를 저하시키는 요인으로 작용하고 있다. 이에 저소득층 주택에너지효율 개선사업 및 정책이 효율적으로 이루어지기 위해서는 지원 대상가구의 현 상태를 정확히 진단하는 방법 및 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 저소득층 가구의 주거환경 수준을 정량적으로 분석하기 위해 건물의 단열성능을 선행연구²⁾에서 수행한 현장 벽체 단열 성능 진단법을 적용하여 건물의 공사 전·후 단열 성능을 분석하였고 건물 단열 공사를 통해 건물의 기밀도가 향상됨에 따른 실내 공기질에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 본 연구에서는 저소득층 가구의 에너지 효율 개선 효과를 분석하기 위해 다음과 같은 선행 연구를 고찰하였다. Kang et al.³⁾의 연구에서는 저소득층의 주거실태 및 주거안정성을 분석하여 저소득층의 주거복지 향상을 위한 정책적 제안을 하였으며 부산광역시 수급가구와 차 상위가구의 주거실태를 살펴보고 최저주거기준과 월 소득대비 임대료비율(RIR)등으로 주거안정성에 대해 분석하였다. Kim et al.⁴⁾ 장애인 주택 주거환경 개선에 필요한 개선방안 및 기존 주택 에너지 효율 개선 그리고 쾌적한 실내 환경 조성을 위한 개선방안 도출 및 평균 공사비용을 제시하여 저소득층 주택 및 기존 노후주택 개·보수 사업 실행 가능성을 고려한 지원 예산 책정 범위와

그에 따른 기대효과를 제안 연구를 수행하였다. Will Anderson et.al⁵⁾ 연구에서는 영국의 저소득층 가구의 주거 환경 실태 조사와 실제 생활 패턴 및 지출(난방비, 식료품비) 절약 노력을 통해 제한된 지원금 범위를 만족시킬 수 있는 전략에 대해 연구하였다. 분석 결과 재실자의 삶의 질과 열적 쾌적감에 대한 만족도가 매우 저조한 결과를 보였다. 이러한 선행 연구들의 연구들을 통해 저소득층 주거복지 향상 정책 및 예산 책정 범위 및 주거 환경 개선 노력이 필요한 내용을 참조하였다. 본 연구에서는 실질적으로 벽체 단열 성능 진단 방법 및 공기 환경 간이 측정 방법을 적용하여 저소득층 가구의 건물 에너지 성능 및 주거 환경 개선 효과를 정량적으로 분석하였다. 또한 건물 벽체 진단 방법을 통해 실제 건물에서 열적으로 가장 저조한 부분을 수치적으로 분석하고 검토하여 실질적으로 책정된 예산 범위 내 수행할 수 있는 건물 단열 공사를 수행하여 공사 전·후 건물 에너지 성능을 분석하였다. 그리고 실제 거주 공간의 공기 환경을 간이 분석 방법을 통해 실내 공기질(CO₂ 농도, 포름알데히드, 휘발성 유기화합물)을 측정하여 공사 전·후 주거 환경 개선 효과를 분석하였다.

2. 연구 방법

본 연구를 수행하기 위해 다음과 같은 연구 방법을 적용하였다.

(1) 저소득층 주택의 벽체 단열성능을 측정하기 위해 선행 연구에서 수행한 진단방법을 적용하여 분석하였다. 현재 국가에서 추진하고 있는 저소득층 에너지 효율 개선사업 지원을 받은 저소득층 노후 주택 가구 대상으로 지역 별 모델을 선정하였으며 선행 연구에서 수행하였던 ISO 9869-1⁶⁾과 ASTR method²⁾의 현장 벽체 단열 성능 진단 방법을 적용하여 측정을 수행하였다.

(2) 주거 실내 공기 환경은 실내 공기 질을 결정하는 CO₂ 농도를 측정할 수 있는 장비를 통해 정량적인 수치를 검토하였으며 피부질환이나 신경장애 등을 일으키는 발암물질인 휘발성 유기화합물(TVOC)과 포름알데히드(HCHO)의 농도를 간이 측정 장비를 사용하여 측정하였으며 거주공간의 유해물질 노출 정도를 확인하였다.

(3) (1)에서 수행한 벽체 단열 성능 측정 결과 값의 데이터를 분석하여 벽체 단열성능이 취약한 부분을 정량적으로 분석하여 개선(건물 개보수, 교체, 수선, 단열공사)작업을 진행하였다.

(4) 공사 전·후에 따른 벽체 단열성능을 비교 분석하고, 실내 주거 공기 환경 결과를 도출하여 에너지 효율개선 효과를 분석하였다.

3. 저소득층 가구의 현장 측정

3.1. 연구 대상 건물

본 연구의 대상 건물은 2009년부터 2014년까지 수행된 저소득층의 건물 에너지 효율 개선사업에 선정되어 지원을 받은 약 18만 가구 중 가장 높은 비율을 차지한 주택, 준공년도, 방 개수, 바닥면적을 통계 처리하여 분석된 저소득층 노후 주택 표준 모델과 가장 유사한 8가구를 선정하였다.⁷⁾ 각 가구의 위치는 서울, 강릉, 포항, 보은, 경주에 위치하고 있으며 준공 시기는 1960년에서 1997년에 건축된 건물로 8가구 모두 20년 이상 경과된 건물이다. 현장 측정 시기

는 공사 전 2015년 12월 7일부터 12월 15일, 공사 후 2016년 1월 22일부터 2월 1일까지 약 2주 동안 벽체 단열 성능 및 실내 공기 환경 수준을 측정하였다. 본 연구 대상 건물들의 경우 벽체 성능에 관련된 자료는 존재하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 준공 당시 창호 및 벽체의 법적 기준 자료를 활용하여 기본 초기 설계 값으로 설정하고 준공 당시 법적 기준값과 현장 측정 결과 값과 비교하여 경년 변화율을 분석하였다.

준공년도가 1989년과 1991년인 서울(Case A, B) 건물의 경우 외기에 직접 면하는 벽체 중부 법적기준은 0.58 W/(m²·K), 지붕은 0.41 W/(m²·K)의 값을 가진다. 준공년도가 1960년, 1978년, 1979년, 1980년 건물인 강릉(Case C, D)과 포항(Case E), 보은(CASE G) 건물의 경우 외기에 직접 면하는 벽체는 남부 법적기준 1.05 W/(m²·K)의 열관류율을 지니고 있으며, 지붕도 1.05 W/(m²·K)의 값을 가진다. 마지막으로 준공년도가 1991년, 1997년인 포항(CASE F) 건물과 경주(CASE H) 건물의 경우 외기에 직접 면하는 벽체 남부 법적기준으로 0.76 W/(m²·K)의 열관류율을 지니고 있으며, 지붕은 0.52 W/(m²·K)의 값을 가진다. 창호는 서울에 위치한 두 가구는 목재 프레임 일반 복층창이 적용되어 있었으며 법적 기준인 3.1 W/(m²·K), 강릉과 포항, 보은, 경주에 위치한 가구들은 목재, 알루미늄 프레임 단창 열관류율 6.6 W/(m²·K)을 지닌 창호가 적용되어 있었다. 건물 개요 및 건물 형별 성능 내역 정보 및 건물 전경은 다음 표 1, 그림 1과 같다.

Table 1. Overview of Building

	Case A	Case B	Case C	Case D
Location	Seoul	Seoul	Gangreung	Gangreung
Completion Date	1989	1991	1979	1960
Floor Area	34.97 m ²	45.73 m ²	33.52 m ²	26.01 m ²
Ceiling Height	2.3 m	2.25 m	2.4 m	2.3 m
Orientation	South	West	South	South
Exterior wall U-value	0.58 W/(m ² ·K)	0.58 W/(m ² ·K)	1.05 W/(m ² ·K)	1.05 W/(m ² ·K)
Exterior Roof U-value	0.41 W/(m ² ·K)	0.41 W/(m ² ·K)	1.05 W/(m ² ·K)	1.05 W/(m ² ·K)
Window U-value	3.1 W/(m ² ·K) (Wood double window)	3.1 W/(m ² ·K) (Wood double window)	6.6 W/(m ² ·K) (Aluminum clear window)	6.6 W/(m ² ·K) (Aluminum clear window)
	Case E	Case F	Case G	Case H
Location	Pohang	Pohang	Boeun	Gyeongju
Completion Date	1978	1997	1980	1991
Floor Area	41.34 m ²	68.53 m ²	51.21 m ²	60.99 m ²
Ceiling Height	2.3 m	2.3 m	2.25 m	2.3 m
Orientation	South	South	South	South
Exterior wall U-value	1.05 W/(m ² ·K)	0.76 W/(m ² ·K)	1.05 W/(m ² ·K)	0.76 W/(m ² ·K)
Exterior Roof U-value	1.05 W/(m ² ·K)	0.52 W/(m ² ·K)	1.05 W/(m ² ·K)	0.52 W/(m ² ·K)
Window U-value	6.6 W/(m ² ·K) (Aluminum clear window)	6.6 W/(m ² ·K) (Aluminum clear window)	6.6 W/(m ² ·K) (Wood clear window)	6.6 W/(m ² ·K) (Wood clear window)



Fig. 1. Building overview

3.2. 측정 항목 및 측정 장비 개요

본 연구 대상 건물들의 실내외 온습도를 측정하기 위해 데이터 로깅이 되는 온습도계(TR-72Ui, TR-72wf)를 재실자가 거주하는 공간에 설치하여 72시간 이상 온습도를 1분 간격으로 연속하여 측정하였다. 다음으로 벽체 단열 성능을 측정하기 위해 선행연구에서 수행한 벽체 단열 성능 현장 측정 간이법인 ASTR method를 적용하여 측정을 수행하였다. 측정 장비는 T-type 열전대와 4채널 데이터로거를 사용하여 실내 측 벽체 표면온도, 실외 온도, 실내 벽체 부근 공기 온도를 취득하여 측정하였다. 본 연구에서는 현장 벽체 단열성능 측정 간이법인 ASTR method²⁾ 방법을 통해 단열성능을 분석하였으며 측정 결과값의 신뢰도를 확보하기 위해 ISO 9869-1(Heat Flow Meter method)기준이 적용된 현장 단열 성능 측정방법으로 도출된 결과값과 비교하여 측정을 수행하였다. 측정 결과 측정 오차 허용범위에 포함된 값을 확인하여 측정 신뢰도를 확보한 데이터를 이용하여 분석하였다.

장비 설치 전 열화상 카메라를 이용하여 벽체의 실내 측 벽체 온도 구배가 일정한 위치를 파악한 뒤 Heat flux meter 센서와 T-type 열전대를 벽체의 대표가 되는 위치(벽체 중심부)에 열전도성 접착 테이프를 이용하여 부착하여 측정을 수행하였다. 그리고 HFM 센서는 크랙이 발생한 벽체, 열교 부위가 발생하는 우각부, 벽체 온도 구배가 일정하지 않는 위치를 피하며 측정을 수행하였으며 전체 실내에 기류를 발생시킬 수 있는 온풍기나 환기 팬, 후드 등의 장치를 가동하지 않는 조건을 설정하여 측정을 수행하였다. 그리고 열류 센서가 직달 일사에 직접적으로 노출되어 있지 않는 부위를 선정하여 측정을 수행하였으며 일사를 받지 않는 새벽 1시부터 6시까지 시간대의 데이터를 추출하여 분석하였다. 다음으로 연구 대상 건물들의 공기환경을 측정하기 위해 CO₂ 농도 측정과 TVOC(휘발성 유기화합물), HCHO(포름알데히드)를 측정하였다. 먼저 재실자가 주로 거주하는 공간에 TR-76Ui 기기를 이용하여 공사 전·후의 CO₂ 농도를 측정하였다. 두 번째로 TVOC를 측정하기 위해 실내거주공간에 ppbRAE-3000S-KO장비를 실내 거주공간에 설치하여 약 30분간 측정하여 건축물의 내장재로 인해 배출되는 TVOC(휘발성 유기화합물)을 정량적으로 확인하였다. 마지막으로 HCHO 측정하기 위해 측정할 거주공간을 창이나 문을 통하여 사전 1시간에 환기시

Table 2. Overview of the in-situ measuring equipment

Index	Classification		Accuracy	
	Model	Quantity		
Heat flow Meter method (U-value)	Model	GreenTEG_Heat flux Kit	Heat Flux (W/m ²) < 0.22	Temperature (°C) ±0.5
	Quantity	4 EA		
ASTR method (U-value)	Model	HOBO 4-ch Data Logger + T-type Thermocouples	Time ±1 minute per month	Temperature (°C) ±0.5
	Quantity	4 EA		
Air Temperature & humidity	Model	Thermo Recorder TR-72wf	Humidity (%) ±5 RH	Temperature (°C) ±0.5
	Quantity	4 EA		
CO ₂ concentration	Model	Thermo Recorder TR-76Ui	CO ₂ (%) ±50 ppm	
	Quantity	1 EA		
Handheld TVOC concentration	Model	PpbRAE-3000	10 to 2000ppm : ± 3% at calibration point	
	Quantity	1 EA		
Handheld HCHO concentration	Model	4000S	± 2.0% of reading	
	Quantity	1 EA		



Fig. 2. In-situ measurement experiment

킨 후 모든 창 및 문을 닫은 후 4000S 측정 장비를 이용하여 약 30분 간 실내에서 발생하는 HCHO(포름알데히드)의 농도를 측정하여 공사 전·후의 결과값을 비교하여 실내 공기 환경 개선 효과에 대해 분석하였다. 본 연구에서 측정한 장비의 내역은 표 2와 같으며 측정 장비 개요 및 측정 사진은 그림 2와 같다.

4. 현장 측정 결과

본 연구에서는 저소득층 가구 에너지효율개선 사업에 선정되어 지원을 받은 서울 2가구, 강원 2가구, 경상 3가구, 충청 1가구를 선정하여 온열환경 및 공기환경을 공사 전·후로 측정하였다. 한 세대 당 약 7일에 걸쳐 건물의 단열 성능 및 공기 환경 측정을 실시하였다. 대상 건물 벽체 단열성을 분석하기 위해 정밀도가 높은 단열 성능 현장 측정법을 적용하여 벽체 단열성을 정량적으로 분석하였다. 단열 공사 전 벽체 단열성은 2015년 12월 8일부터 12월 15일까지 약 1주간 측정하였으며 벽체에 일사 영향을 받지 않는 시간대(a.m 01:00~06:00)의 데이터를 취득하여 분석하였다. 그 결과는 표 3과 같다. 먼저 벽체 단열 성능 측정 법인 ASTR법을 통해 도출된 서울 A 가구의 벽체 열관류율은 준공 당시 법적 열관류율에 비해 약 32~34% 정도의 단열 성능이 저하된 것으로 분석되었으며 서울 B 가구도 약 34~46% 정도의 단열 성능이 저하되었다. 다음으로 강릉 가구 C의 벽체 열관류율은 약 36~50% 정도의 단열 성능이 저하된 것으로 분석되었고 강릉 D 가구는 약 18~34% 정도의 단열 성능이 저하된 것으로 분석되었다. 포항 가구 E의 벽체 열관류율은 약 29~43% 정도의 단열 성능이 포항 가구 F는 약 14~24% 정도 저하된 것으로 분석되었다. 보은 G 가구의 경우 약 54~57% 정도 단열 성능이 저하되었으며 경주 H 가구는 약 19~30% 정도 단열 성능이 저하된 것으로 분석되었다. 전체적으로 모든 가구의 벽체 단열 성능이 저하된 것으로 분석되어 벽체 경년변화를 보였으며 그 중 보은 가구의 단열 성능이 가장 많이 저하된 것으로 분석되었다.

본 연구에서는 벽체 단열 공사 전 측정 결과를 바탕으로 벽체 단열 성능이 취약한 부위에 실제로 공사를 수행하여 벽체 단열 성능을 분석하였다. 서울 A 가구에서 측정된 벽체 단열 성능이 가장 취약한 부위는 동, 북쪽 벽체로 분석되었으며 B 가구는 남, 북 벽체, 강릉 C와 D 가구는 동, 남쪽 벽체가 가장 단열 성능이 취약한 결과를 보였다. 포항 E와 F 가구는 남, 북쪽 벽체, 보은 G 가구는 서, 북쪽 벽체, 경주 가구는 서, 남쪽 벽체 단열이 가장 취약한 부위로 분석되었으며 이 부위에 단열 공사를 수행하였다. 단열 공사에 적용된 단열재는 압출법 보온판 1호 20~30mm를 사용하여 내단열 벽체 보수 공사를 수행하였으며 시공 방법으로는 단열재를 벽에 밀착 시공 한 후에 기밀하게 판재사이를 우레탄폼으로 충전하고 각재틀을 형성한 후에 석고보드 1장으로 마감 시공하였다.

공사 후 벽체 단열 성능은 2016년 1월 22일부터 2월 1일까지 약 1주간 측정하였다. 공사 후 측정 결과 서울 A 가구의 결과는 동쪽 벽체 열관류율은 0.502 W/(m²·K), 북쪽 벽체 0.538로 측정되었다. 이는 공사 전 대비 동쪽 벽체의 경우 약 43.1%, 북쪽 벽체의 경우 약 39%의 단열 성능이 향상된 결과를 보였다. 서울 B 가구의 결과는 남쪽 벽체 0.508, 북쪽 벽체 0.546으로 측정되었으며 이는 공사 전 대

비 남쪽 49.0%, 북쪽 벽체의 경우 49.9% 단열 성능이 향상되었다.

강릉 가구 C는 동쪽 0.799, 남쪽 1.057의 측정 결과를 보였으며 동쪽 53.9%, 남쪽 49.93%의 단열 성능이 향상되었으며 강릉 D 가구는 동쪽 0.811, 남쪽 0.884로 분석되었으며 공사 전 대비 동쪽 벽체는 40.8%, 남쪽 벽체는 44.7%의 단열 성능이 향상된 결과를 보였다. 포항 E 가구는 남쪽 0.948, 북쪽 1.103 측정 결과를 보였으며 이는 남쪽 46.6%, 북쪽 벽체 40.1%의 단열 성능이 향상되었고 포항 F 가구는 남쪽 0.421, 북쪽 0.492의 측정 결과를 보였으며 이는 남쪽 44.7%, 북쪽 40.4%의 단열 성능이 향상되었다. 보은 G 가구는 공사가 이루어진 서쪽 벽체 1.188, 북쪽 1.084로 측정되었으며 이는 서쪽 51.9%, 북쪽 55.9%의 단열 성능이 향상된 결과를 보였다. 마지막으로 경주 가구는 공사가 이루어진 서쪽 벽체 0.508, 남쪽 0.628로 공사 전 대비 서쪽 53.4%, 남쪽 39.1%의 단열 성능이 향상되었다.

공기환경을 측정한 항목 중 CO₂ 농도 분석 결과는 표 4와 같다. 먼저 서울 A 가구의 경우 TR-76Ui로 실내 CO₂ 농도를 48시간 측정하였을 때 실내 CO₂ 농도의 공사 전 평균값은 2003.1ppm, 공사 후의 평균값 2,697.6 ppm으로 분석되었다. 서울 B 가구의 경우 CO₂ 농도의 공사 전 평균값은 1,394.9ppm, 공사 후의 평균값 1,432.7 ppm으로 분석되었다. 기준치 1,000ppm을 초과하는 것으로 나타났다. 강릉 C 가구 측정 결과 CO₂ 농도의 공사 전 평균값은 751.5ppm, 공사 후의 평균값 1,980 ppm으로 분석되었으며 강릉 D 가구는 공사 전 3,073.5ppm, 공사 후 1,105.9 ppm으로 분석되었다. 포항 E 가구는 실내 CO₂ 농도의 공사 전 평균값은 905.5ppm, 공사 후의 평균값 741.9 ppm으로 분석되었으며 포항 F 가구의 경우 공사 전 평균값은 1,375.4ppm, 공사 후의 평균값 1743.9 ppm으로 분석되었다. 보은 G 가구의 경우 실내 CO₂ 농도의 공사 전 평균값은 1,082ppm, 공사 후의 평균값 1076.9 ppm으로 분석되었다. 마지막으로 경주 H 가구의 경우는 실내 CO₂ 농도의 공사 전 평균값은 1,375.4ppm, 공사 후의 평균값 1743.9 ppm으로 분석되었다. 공사 전후의 실내 CO₂ 농도에 따른 공기 환경 개선 효과는 공사 전·후의 효과보다는 실제 거주하고 있는 재실자의 생활 행동 패턴 실내 환기 유무에 따라 수치가 다양하게 분석되었다. 측정을 수행한 지역 별 저소득층 가구의 공사 전 CO₂ 평균 농도는 약 1,391ppm 수준으로 분석되었으며 국내 기준 1,000ppm을 넘는 결과를 보였다. 그 중 서울 A, B, 강릉 C, 경주 H 가구의 CO₂ 농도가 높게 분석되었으며 재실자의 지속적인 환기 노력이 매우 필요한 결과를 보였다. 공사 후 CO₂ 농도의 지역별 평균은 약 1,453ppm으로 공사 전보다 상승된 결과를 보였다. 공사 전과 마찬가지로 1,000ppm을 넘는 결과를 보였다. 이는 실제 겨울철에 측정된 결과로 실내 환기 노력이 부족하여 위와 같은 결과가 도출된 것으로 분석되었다. 다음으로는 실내 휘발성 유기 화합물(TVOC) 및 포름알데히드(HCHO)의 공사 전·후를 비교한 결과 서울 A 가구에서는 공사 이후에 벽체 단열 공사 및 마감재의 시공으로 인해 공사 전에 비해 TVOC가 약 532ppb, HCHO가 0.07ppm이 더 방출되는 것으로 분석되었고 서울 B 가구 역시 TVOC가 약 379ppb, HCHO가 0.03ppm이 더 방출되는 것으로 분석되었다. 강릉 C 가구에서는 공사 전에 비해 TVOC가 약 148ppb, HCHO가 0.02ppm이 강릉 C 가구에서는 공사 전 대비 TVOC는

Table 3. Measurement results of wall insulation (2015.12.08.~2016.02.01., a.m 01:00~06:00, Measurement interval : 1min)

(n = 1440)		Insulation improvement	W1 (East)	W1 (West)	W1 (South)	W1 (North)
CASE A (Seoul)		Design U-value [W/(m ² ·K)]	0.493	-	-	0.543
		Before	0.882 ± 0.0340	0.861 ± 0.0345	-	0.888 ± 0.0343
		After	0.502 ± 0.0291	-	-	0.538 ± 0.0237
		Improvement rate (%)	43.084	-	-	39.414
CASE B (Seoul)		Design U-value [W/(m ² ·K)]	-	-	0.528	0.553
		Before	0.884 ± 0.0259	0.908 ± 0.0382	0.997 ± 0.0188	1.091 ± 0.0432
		After	-	-	0.508 ± 0.0201	0.546 ± 0.0388
		Improvement rate (%)	-	-	49.047	49.954
CASE C (Gangreung)		Design U-value [W/(m ² ·K)]	0.781	-	0.991	-
		Before	1.733 ± 0.0564	1.666 ± 0.0519	2.111 ± 0.0792	-
		After	0.799 ± 0.0864	-	1.057 ± 0.0489	-
		Improvement rate (%)	53.895	-	49.929	-
CASE D (Gangreung)		Design U-value [W/(m ² ·K)]	0.791	-	0.861	-
		Before	1.371 ± 0.0379	-	1.599 ± 0.0722	1.283 ± 0.0482
		After	0.811 ± 0.0338	-	0.884 ± 0.0784	-
		Improvement rate (%)	40.846	-	44.715	-
CASE E (Pohang)	U _{ASIR} [W/(m ² ·K)] ($\bar{x} \pm \sigma$)	Design U-value [W/(m ² ·K)]	-	-	0.909	0.926
		Before	1.715 ± 0.0777	1.485 ± 0.0679	1.777 ± 0.0807	1.843 ± 0.0872
		After	-	-	0.948 ± 0.0907	1.103 ± 0.0872
		Improvement rate (%)	-	-	46.652	40.152
CASE F (Pohang)		Design U-value [W/(m ² ·K)]	-	-	0.566	0.581
		Before	0.899 ± 0.0503	0.889 ± 0.0918	0.942 ± 0.0519	0.994 ± 0.0841
		After	-	-	0.521 ± 0.0803	0.592 ± 0.0803
		Improvement rate (%)	-	-	44.692	40.443
CASE G (Boeun)		Design U-value [W/(m ² ·K)]	-	1.066	-	1.189
		Before	2.344 ± 0.0618	2.472 ± 0.0588	2.288 ± 0.0482	2.414 ± 0.0988
		After	-	1.188 ± 0.0218	-	1.084 ± 0.0521
		Improvement rate (%)	-	51.942	-	55.095
CASE H (Gyeongju)		Design U-value [W/(m ² ·K)]	-	0.501	0.573	-
		Before	0.945 ± 0.0406	1.091 ± 0.0410	1.031 ± 0.0403	0.954 ± 0.0410
		After	-	0.508 ± 0.0389	0.628 ± 0.0442	-
		Improvement rate (%)	-	53.437	39.088	-

Table 4. Measurement results of Indoor air quality. (2015.12.08.~2016.02.01.)

	Insulation improvement	CO ₂ concentration (ppm)	TVOC (ppb)	HCHO (ppm)
		Standard : 1,000ppm	Standard : 400ppm	Standard : 0.1ppm
CASE A (Seoul)	Before	2,003.10	679	0.01
	After	2,697.60	1211	0.08
CASE B (Seoul)	Before	1,394.90	126	0.02
	After	1,432.70	505	0.05
CASE C (Gangreung)	Before	781.5	311	0.04
	After	1,980	459	0.06
CASE D (Gangreung)	Before	2,073.50	442	0.03
	After	2,105.90	684	0.04
CASE E (Pohang)	Before	513.8	381	0.03
	After	851.8	426	0.08
CASE F (Pohang)	Before	1,375.40	255	0.01
	After	1,743.50	424	0.05
CASE G (Boeun)	Before	1,082	457	0.04
	After	1,076.90	591	0.10
CASE H (Gyeongju)	Before	905.5	174	0.04
	After	741.9	299	0.07

약 148ppb, HCHO가 0.02ppm이 더 방출되었으며 강릉 D 가구는 공사 전 대비 TVOC 약 242ppb, HCHO 0.01ppm이 더 방출되는 것으로 분석되었다. 세 번째로 포항 E 가구의 경우는 공사 전에 비해 TVOC가 약 40ppb, HCHO가 0.05ppm이 더 방출되는 것으로 분석되었으며 포항 F 가구는 공사전·후 대비 약 TVOC가 170ppb, HCHO가 0.04ppm이 더 방출되는 것으로 분석되었다. 네 번째로 보은 G 가구의 경우는 공사 전에 비해 약 TVOC가 134ppb, HCHO가 0.06ppm이 더 방출되는 것으로 분석되었으며 경주 H 가구의 경우 TVOC가 약 125ppb, HCHO가 약 0.03ppm이 더 방출되는 것으로 분석되었다. 이는 위 모든 가구 공사 후 벽체 단열 공사 및 도배, 건축 마감재의 시공으로 인해 값이 증가된 것으로 분석되었다.

5. 결론

본 연구는 저소득층 가구에 대한 에너지효율개선사업을 통해 주거 성능이 열악하고 에너지효율이 떨어지는 노후건물에 대해 외피 단열 성능을 개선하여 효율적인 에너지 사용이 가능한 건물로 개선하였다. 이에 본 연구에서는 건물의 단열 성능을 측정하기 위해 신뢰성 높은 진단 방법 및 프로세스를 적용하여 지역별 8가구의 현 상태를 정확히 진단하는 방법 및 연구를 수행하였다. 벽체 단열 성능을 선행 연구에서 검증된 측정 간이법인 ASTR법을 적용하여 건물의 벽체 부위별 단열의 현 성능을 분석하였으며, 이를 통해 25년 이상 경과된 벽체의 단열 성능 및 경년변화율에 대해 정량적으로 분석할 수 있었다. 또한 건물 벽체 단열 성능이 취약한 벽체를 진단을 통해 선정하여 실제로 단열 공사를 수행하였고 벽체 단열 성능이 정량적으로 얼마만큼 개선되었는지 측정을 통해 분석하였다. 또한 에너지 효율 개선 사업을 통해 건물의 공기 환경 개선 여부를 판단하기 위해 간이 공기 환경 진단 방법을 적용하여 기존 저소득층 가구의 공사 전·후 건물 에너지 성능 및 공기 환경 개선 효과를 분석하였다. 결론은 다음과 같다.

(1) 준공 당시 법적 설계 기준 U-value와 현장 측정을 통해 도출된 U-value의 비교를 통해 25년 경과된 벽체의 장기 단열 성능을 분석하였다. 분석 결과 평균 서울 A가구의 경우 평균 약 34%의 단열 성능이 저하된 것으로 분석되었으며 B가구는 약 39.8%의 단열 성능이 저하된 것으로 분석되었다. 강릉 C가구는 평균 약 42.2%, D가구는 약 25.3%의 단열이 저하되었으며, 포항 E 가구의 경우 약 38%, F 가구의 경우 평균 약 18.2%의 단열 성능이 저하된 것으로 분석되었다. 보은 가구의 경우는 평균 약 55%의 단열 성능이 저하된 것으로 분석되었다. 마지막으로 경주 가구의 경우 약 24%의 벽체 단열 성능이 저하된 것으로 분석되었다.

(2) 본 연구에서는 건물의 현장 측정 방법을 적용하여 경년 변화가 진행된 건물의 벽체 단열 성능을 정량적인 수치 데이터를 확보하여 분석할 수 있었으며 현장 측정 방법을 통해 벽체 단열 성능이 취약한 부분을 효율적인 에너지 사용이 가능한 건물로 개선할 수 있는 방안을 제시하여 실제 기존 노후 주택의 벽체 단열 성능의 수준을 분석

할 수 있었다. 연구 대상 건물 현장을 방문하여 벽체 U-value 측정을 통해 벽체 단열 성능을 정량적으로 분석하고 단열 성능이 취약한 벽체를 진단하여 벽체 단열 공사를 수행하였다. 분석 결과 서울 A 가구의 경우 공사가 이루어진 동, 북쪽 벽체는 약 41.2%의 단열 성능이 향상된 결과를 보였으며 B가구는 남, 북 벽체 약 49.5%의 단열 성능이 향상된 결과를 보였다. 강릉 가구 C가구의 경우는 동, 남쪽 벽체 약 51%의 단열 성능이 향상되었으며 강릉 D가구의 경우는 동, 남쪽 벽체의 약 42.8% 단열 성능이 향상되었다. 포항 E가구는 남, 북쪽 벽체 약 43%의 단열 성능이 향상되었으며 포항 F가구는 남, 북쪽 벽체의 단열 성능이 약 42.6%가 향상된 결과를 보였다. 보은 G가구는 서, 북쪽 벽체의 단열 성능이 약 53.6%가 향상되었으며 경주 H가구의 경우는 서, 남쪽 벽체의 단열 성능이 약 46.3%가 향상된 결과를 보였다.

(3) 공사 전 CO₂ 농도의 지역별 평균은 약 1,266.21ppm으로 분석되었으며 공사 후 CO₂ 농도의 지역별 평균은 약 1,449.18ppm으로 분석되어 이 수치의 경우 공사 전·후 큰 차이를 보이지 않았다. 이 수치는 저소득층 개선 사업에 의해 수행된 외벽 단열 공사를 통해 재실자의 주거 공간의 CO₂ 농도는 영향을 크게 미치지 않은 결과를 보였다. 그러나 국내 CO₂ 농도 기준 1,000ppm을 넘는 결과들을 보여 장기적으로 재실자의 두통, 현기증 등의 증상이 나타나고 장시간으로 노출되었을 경우 건강을 해치는 범위에 대부분 존재하는 것으로 분석되었다. 이에 건물 재실자가 거주하는 공간의 공기 환경을 개선하기 위한 방안으로 환기에 대한 인식 제고 노력 및 교육을 통해 실내 공기 환경을 개선할 수 있는 방안이 병행되어 개선할 필요성이 있는 것으로 분석되었다. 또한 에너지 효율 개선 사업의 예산 범위가 확대되었을 경우에 실내 전열 교환기 설치를 통해 실내 CO₂ 농도 제어를 통해 공기 환경을 개선시킬 수 있는 방안으로 분석되었다.

(4) 공사 전 TVOC를 측정하여 분석한 결과 지역별 평균 약 353ppb로 분석되었다, 환경부 기준인 400ppb를 미만으로 기준에 충족한 결과로 분석되었으나 공사 후 TVOC를 분석한 결과 지역별 평균 약 552ppb로 환경부 기준 400ppb를 초과한 결과를 보였다. 분석 결과 단열 공사를 통해 실내 재실자가 거주하는 공간의 휘발성 유기화합물 수치가 증가함에 따라 실내 공기 환경이 저하된 결과를 보였다. 특히 서울 A 가구의 경우 1,000ppb 이상으로 측정되어 TVOC를 줄일 수 있는 방안이 필요한 결과를 보였으며 대체적으로 거의 모든 가구가 공사 후 TVOC의 농도가 공사 전 대비 상승한 결과를 보였다. 이에 기준치를 만족하기 위한 노력으로 친환경 페인트 사용(공사 시), 수성 제품 선택(접착제, 세척용품), 친환경 마감재 사용 등을 사용하여 단열 공사 시 공기 환경이 저하되는 요소들을 저감하는 노력이 필요한 것으로 분석되었다.

(5) 공사 전 HCHO(포름알데히드)를 분석한 결과 지역별 평균 약 0.03ppm으로 분석되었다. 이는 환경부 기준인 0.1ppm 미만으로 기준에 충족한 결과를 보였다. 공사 후 HCHO를 분석한 결과 지역별 평균 약 0.07ppm으로 공사 전 대비 약간 상승한 결과를 보였으나, 환경부 기준에는 만족한 범위에 속했다. 그러나 보은 G 가구의

경우 기준 수준인 0.1ppm인 기준 초과치를 보여 재실자의 적극적인 환기를 통해 HCHO를 줄이는 노력(베이크 아웃)이 필요한 것으로 분석되었다.

본 연구에서는 실내공기질 측정 시 환경부에서 제시한 실내공기질 공정시험법을 적용하지 못하고 고농도의 TVOC 및 HCHO를 측정할 수 있는 간이측정장비(TVOC : ppbRAE, HCHO : 4000s)를 이용하여 실내공기질을 확인했다는 한계점을 가지고 있지만 상기의 간이측정장비를 이용함으로써 공사 전·후 실내 공기질 악화가능성을 확인할 수 있었다. 향후 공정시험법에 따른 실내 공기질 추가 측정을 통해 보다 정확도 높은 데이터를 취득할 예정이며 시공에 적용된 건축자재에 대해 소형 챔버법을 이용한 방출량 테스트를 통해 검토할 예정이다.

본 연구에서는 건물의 벽체 단열성능 현장 측정법을 적용하여 7년 변화가 진행된 건물의 벽체 단열성능을 정량적으로 분석할 수 있었다. 이를 통해 건물에서 단열 성능이 취약한 부분을 분석하고 외피 단열성능을 개선하여 효율적인 에너지 사용이 가능한 건물로 개선할 수 있는 방안이 될 것으로 사료된다. 또한 2017년 LH(한국토지주택공사)에서 준공한지 25년이 넘은 공공임대주택의 리모델링 재건축을 추진한다고 한다. 재건축, 리모델링 대상 물량을 전체 임대주택 중 10~20%가량 공사를 수행할 예정이며 25년 이상 경과된 노후 임대 주택 대상으로 향후 10년간 약 6조 5000억원이 투입되어 공사가 진행될 예정이다. 이에 본 연구 방법을 통해 25년 이상 경과된 건물의 벽체 단열성능 및 주거환경 실태조사 연구를 통한 건물 에너지 효율 개선 사업에 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

추후 연구로는 2017년에 수행된 저소득층 가구의 에너지효율 개선사업을 수행한 건물군을 대상으로 본 연구에서 수행한 진단 방법 및 프로세스가 적용된 건물 군과 적용되지 않는 건물 군과의 비교 분석을 통해 건물 에너지 진단 컨설팅을 통한 시공 효과(난방 에너지 소요량) 및 재실자 거주 환경 개선 효과를 분석할 예정이며 건물 에너지 시뮬레이션과 실측 데이터 비교를 통해 정량적인 에너지 개선 효과를 분석할 예정이다.

Acknowledgements

This work was supported by the R&D Program for Improving Social Acceptance and Commercialization of Energy Technology of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP), granted financial resource from the Ministry of Trade, Industry & Energy, Republic of Korea (No.20179210100840).

References

[1] Improvement plan for activation of low-energy housing supply, Korea Housing Institute, 2015
 [2] 김서훈, 김중훈, 류승환, 정학근, 송규동, “기존 공동주택의 벽체 열성능 현장 측정법에 관한 연구”, 한국생태환경건축학회 논문집, 2016. // Seohoon K, Jonghun K, Seunghwan Y, Hakgeon J, Kyoodong S, “The study of in-situ measurement method for wall thermal performance diagnosis of existing apartment”, KIEAE Journal, 2016
 [3] 김원석, 이명주, “저소득층 장애인 주택 주거환경 및 에너지 효율개선을 위한 개보수 사례 연구”, 대한건축학회 논문집, 2015. // Wonseok K, Myoungju L, “The Research on Energy Performance Improvement Renovation Case Studies for the Physically Disabled Low-Income

Home Owners”, The Architectural Institute of Korea, 2015
 [4] 강정희, “저소득층의 주거실태와 주거안정성에 관한 연구 : 부산시 수급가구와 차상위가구를 중심으로”, 사회과학연구, 2010. // Junghee K, “A Study on Housing Status and Stability of the low income group”, SOCIAL SCIENCE RESEARCH, 2010
 [5] Will Anderson, Vicki White, Andrea Finney, “Coping with low incomes and cold homes”, Energy Policy, Vol. 49, 2012
 [6] ISO 9869-1 - Building elements - *In-situ* measurement of thermal resistance and thermal transmittance - Part 1 : Heat flow meter method, 2014(E)
 [7] 김정국, 이정훈, 장철용, 송두삼, 류승환, 김중훈, “저소득층 에너지 효율개선사업에 따른 난방에너지 절감 효과 및 경제성 분석”, 한국생태환경건축학회 논문집, 2016. // Jeonggook K, Jonghun K, Hakgeon J, Cheolyong J, Junghun L, Doosam S, “An analysis of apartment reference model for Low-income households support methods.” The Korean Society for Energy, Vol. 24, 2016