

그린리모델링 성과 평가 관점에서 본 준공 시점 단열 성능 검증의 중요성*

Importance of Preliminary Validation of Exterior Wall Thermal Resistance in the Evaluation Context of Building Energy Retrofit Projects

임승민** · 김소연*** · 강창오**** · 김가인***** · 임종연*****

Seungmin Lim** · Soyeon Kim*** · Changoh Kang**** · Gain Kim***** · Jongyeon Lim*****

Abstract

This study investigates the thermal conductivity and density of expanded polystyrene insulation materials collected from buildings under going energy retrofit projects. Due to the absence of initial thermal conductivity data, determining precise long-term patterns was challenging. Analysis based on design documents revealed that expanded polystyrene insulation maintained consistent performance over ten years. Notably, the thermal conductivity measurements of insulation samples of the same grade and age varied significantly. Additionally, the insulation density was found to be substantially below the standard specified in the design documents. The results of the experiment indicate that performance management during both construction and operation phases is lacking. It is crucial to apply building commissioning, which involves performance verification throughout the building's life cycle, to properly evaluate building energy performance improvements, such as building energy retrofit projects.

Keywords: EPS Insulation, Thermal Resistance, Energy Retrofit, Building Commissioning

1. 서론

2015년 파리협정 이후, 지속적으로 국가 차원의 탄소중립 실현을 위한 건축 부문의 역할이 강조되고 있다. 그리고 구체적인 수단으로서 신축 건물의 제로 에너지건축물 의무화와 기존 건물의 그린리모델링 확산을 위한 큰 노력이 기울여지고 있다. 규제 및 유인책의 시행이 비교적 용이한 신축 건물에 대해서는

제로에너지건축물 의무화 확대에 관한 상세한 로드맵에 따라 점진적인 범위 확대 및 조건 상향이 이루어지고 있다. 하지만 기존 건물을 대상으로 하는 그린리모델링은 그 확산을 위한 규제 및 유인책 마련이 쉽지 않아, 2025년부터 공공건축물 그린리모델링을 의무화하겠다는 내용 이상의 구체적인 로드맵이 구성되지 않은 것이 현실이다(김수민·조현미, 2020). 하지만, 국내 건축물의 총 연면적 증가율이 3%가 채

*본 연구는 국토교통부의 재원으로 국토안전관리원의 지원(그린리모델링 지역거점 플랫폼)을 받아 수행되었음.

**강원대학교 건축학과 조교수(주저자: smlim@kangwon.ac.kr)

***강원대학교 일반대학원 에너지인프라융합학과 석사과정

****강원대학교 건축토목환경공학부 학사과정

*****강원대학교 건축토목환경공학부 학사과정

*****강원대학교 건축토목환경공학부 부교수(교신저자: jongyeon.lim@kangwon.ac.kr)

안 되는 것을 고려하면(국토교통부, 2023) 건축 부문에 할당된 온실가스배출량 절감 목표 달성을 위해서는 기축 건물에 대한 적극적인 대책이 중요함은 명백하다. 이러한 견해는 UN 보고서에서도 동일하게 언급되고 있다(UN Environment Programme, 2022).

“Actions for new buildings will avoid unnecessary future emissions but will have limited impact on emissions being generated from the buildings sector today.”

건축물 총 연면적의 증가세는 시기, 용도 등 다양한 요인의 영향을 받아 변화하지만, 최근 5년간 평균적으로 3% 내외의 증가율로 안정되어 있다. 이는 신축건물의 제로에너지건축물화에 의해 달성할 수 있는 온실가스배출량 절감분은 로드맵에 기반하여 높은 정확도로 예측 가능하다는 것을 의미한다. 그리고 건물 부문 전체의 절감 목표 달성을 위한 잔여 배출량은 기축 건물에 대한 대책을 통해 절감해야 하므로 그린리모델링을 통해 줄여야 하는 전체 배출량(이후, GR(Green Remodeling) 스톱 절감량) 또한 예측이 가능하다고 볼 수 있다(임종연, 2021).

GR 스톱 절감량을 알고 있다면, 그 다음은 하나하나의 그린리모델링 프로젝트가 리모델링 이전 대비 어느 정도의 배출량 절감 포텐셜을 가지는지를 평가하고, 이를 통해 GR 스톱 절감량 목표 달성을 위해서는 어느 정도의 리모델링 물량이 필요한지 산출하여 그린리모델링 로드맵을 구체화해야 한다. 국토교통부와 국토안전관리원에 의해 2020년 이후 본격적으로 수행되고 있는 공공건축물 그린리모델링 사업은 그린리모델링의 비용과 편익에 관한 빅데이터를 확보하여, 향후 민간 건축물 그린리모델링 확산을 포함한 로드맵을 만들기 위한 중요한 밑거름이 될 것으로 생각한다.

그린리모델링 프로젝트의 편익, 그중에서도 온실가스배출 절감량을 정량화하는 과정은 리모델링 전후로 건축물 에너지소비가 얼마나 줄었는지를 분석

하는 것으로 귀결된다. 현재는 준공 당시의 성능과 그린리모델링 이후의 성능을, 설계도서를 기준으로 비교한 연간 1차 에너지소비량의 대소 관계를 통해 사업 성과를 평가하고 있다.

그린리모델링 비용과 편익에 대한 빅데이터가 향후 의미 있게 활용되기 위해서는 그 도출 과정이 합리적이어야 한다(이종성 외, 2010). 전술의 그린리모델링 성과 평가 방식은 그린리모델링 확산 로드맵을 구체화하기 위한 기초 자료의 측면에서 불합리한 부분을 내포한다. 국가 온실가스 감축목표(NDC, Nationally Determined Contribution)는 2018년을 기준 연도로 설정하고 있기 때문이다. 건물 부문에 할당된 배출량 절감분에 대한 그린리모델링의 기여분을 예측하고 로드맵을 구체화하기 위한 기초 자료로서 그린리모델링 편익은 준공 당시 시점이 아닌 그린리모델링 직전 시점, 정확히는 2018년 시점의 건물 성능과 비교하여 도출하는 것이 합리적인 방향으로 보인다. 또한 기후 조건, 이용자 특성 등의 외란에 의한 불확실성을 배제하고 건물 성능 향상에 의한 배출량 절감분만을 추출하려는 노력이 필요하다. 이미 이와 관련된 다양한 이슈가 제기되고 있지만, 본 논문에서는 그린리모델링 이전 기존 건물의 합리적인 성능 평가를 위한 고려사항 중 시간의 흐름에 따른 건물 외피 성능 저하, 특히 단열재의 성능 열화에 주목한다.

건축용 단열재 성능 열화는 단열재 장기 열저항이라는 개념을 통해 기존에 많은 연구가 이루어져 왔으며, 장기 열저항을 측정하여 단열재 성능의 경시 변화를 파악하는 것을 목적으로 하고 있다. 실험실 조건에서 가속 노화 실험(ISO 11561)을 수행하여 열전도율의 경시 변화를 도출하거나(김진희 외, 2020), 실험용 건축물 외피에 설치된 단열재의 열저항을 장기 측정하여 경시 변화 양상을 제시한 연구결과가 보고되고 있으며(최현중 외, 2021), 이들 모두가 귀중한 연구 결과이지만, 실제 운용되는 건물에 설치된 이후 10년 이상 경과된 노후 단열재의 성능이 어

떻게 변화되는지에 대한 데이터가 보고된 사례가 매우 적다(김현진·최세진, 2019).

본 연구에서는 그린리모델링의 성과 평가 절차에 실제 외피 성능이 반영될 필요가 있음을 강조하며, 단열재의 장기 성능 변화를 검토하기 위해 준공 이후 11~31년 경과된 노후 건축물의 그린리모델링 현장에서 채취한 단열재 샘플을 통해 열전도율 측정 결과를 제시한다. 또한, 준공 당시 단열재의 초기 성능 정보 불확실성에 따라 측정 열전도율에 밀도의 변화를 추가로 고려해 보정 절차를 제안한다. 마지막으로 측정 및 분석 결과에 근거하여 그린리모델링 성과 평가 관점의 단열재 이슈는 장기 열저항 만큼이나 초기 성능 검증의 중요함을 강조하고자 한다.

2. 단열재 채취 및 열전도율 측정

2.1 단열재 현장 취득 개요

본 연구에서 진행한 측정의 단열재 샘플은 국토교통부와 국토안전관리원에서 시행 중인 공공건축물 그린리모델링 지원사업 대상지의 일부(그린리모델링 과정에서 외벽 단열 보강을 위해 기존 벽체의 단열재가 철거되고 단열재를 신설하는 경우에 해당)에서 채취되었다.

본 논문의 결과는 51개소(강원도 소재)의 건물에서 채취한 53개 샘플에 대한 측정 결과에 기초하고 있으며, 준공 이후 11~31년이 경과한 시점에서 채취되었고, 모두 비드법 단열재(이후, EPS, Expanded Poly Styrene)에 해당한다.

2.2 열전도율 측정 결과

53개의 노후 단열재 샘플은 평판 열류계법에 의한 열전도율 측정기기(Netsch사의 HFM 446)에 의해 성능 측정이 이루어졌다. 또한 이 중 34개의 노후 단열재 샘플에 대해서는 인증시험기관에 위탁하여 KS L 9016에 규정된 시험방법에 따라 얻어진 열전도율

과 비교함으로써, 자체적으로 수행한 열전도율 측정 시험의 신뢰성을 검증하였다.

Table 1은 각 단열재 샘플의 열전도율 측정 결과를 나타낸다. 자체적으로 수행된 열전도율 측정 결과는 인증시험기관의 측정 결과와 비교하여 일관되게 높게 나타나고 있지만 그 차이는 약 3% 정도로 이후 제시될 분석 결과에 큰 영향이 없다고 판단하고 이후 분석에는 자체 수행 열전도율 측정 시험 결과를 활용하였다.

Fig. 1은 설치 후 경과 연수 5년 간격으로 분류된 샘플에 대해 각 구간의 열전도율 측정치 평균과 샘플 개수를 나타낸 것이다. 설치 후 경과 연수 20년 이하의 채취 샘플이 대다수(53개 중 45개)를 차지하고 있어, 그 이상 오래된 단열재의 열전도율 측정치는 불확실성이 크다고 볼 수 있지만, 설치 후 경과 연수와 열전도율에는 큰 상관관계가 없어 보인다.

단열재의 장기 열저항을 검토하기 위해서는 제조 초기 열전도율을 파악해야 한다. 하지만, 측정 대상 샘플의 대다수(53개 중 39개)는 형별 성능 관계 내역 등의 설계도서가 남아있지 않거나, 단열재 규격 미 표기 등의 설계도서 정보 부실로 인해 제조 초기 성능 정보를 구체화할 수 없었다. 육안검사를 통해 EPS 1종과 2종을 구분하여 추정하는 것이 한계였다. 본 논문에서는 정보를 알 수 없는 39개의 단열재의 제조 초기 열전도율을, 설계도서로부터 단열재의 구체적인 정보를 확인할 수 있는 14개 단열재 샘플의 등급 내 열전도율 상한의 평균값(0.036W/mK, EPS 1종 1호 상당)으로 가정하였다.

Fig. 2은 설치 후 경과 일수에 따른 열전도율 변화량(thermal drift) 추이를 나타낸다. 제조 초기 성능에 대한 불확실한 가정이 결과에 큰 영향을 주고 있으나, 설치 후 경과 일수가 오래될수록 초기 열전도율로부터의 증가 폭이 오히려 작아지는 경향이 나타난다. 또한 동일 경과 시기의 채취 샘플에서도 열전도율 변화량의 편차가 크을 수 있다.

Table 1. Information on Expanded Polystyrene Insulation Collected from Retrofit Sites of Aged Buildings

Type	Class	Duration Days (Years)	Thermal Conductivity* [W/mK]	Density [kg/m ³]	Type	Class	Duration Days (Years)	Thermal Conductivity* [W/mK]	Density [kg/m ³]		
-	-	9042 (24)	0.0470	0.0450	10.90	1	2	5256 (14)	0.0480	0.0460	10.91
-	-	8414 (23)	0.0416	0.0400	12.65	2	4	4939 (13)	0.0477	0.0460	10.98
-	-	11305 (30)	0.0454	0.0450	13.88	1	2	5284 (14)	0.0434	0.0420	11.32
-	-	8714 (23)	0.0429	0.0410	11.82	-	-	8694 (23)	0.0379	0.0380	18.90
-	-	5608 (15)	0.0438	0.0420	11.53	-	-	6475 (17)	0.0399	0.0390	14.97
-	-	5650 (15)	0.0446	0.0430	11.45	2	4	5257 (14)	0.0470	0.0460	10.83
-	-	5224 (14)	0.0417	0.0400	13.81	-	-	5671 (15)	0.0451	0.0440	12.61
-	-	6319 (17)	0.0425	0.0410	12.49	1	3	5844 (16)	0.0373	-	17.83
-	-	5092 (13)	0.0450	0.0440	11.02	-	-	10856 (29)	0.0419	-	13.07
-	-	6252 (17)	0.0434	0.0420	13.80	-	-	4075 (11)	0.0374	-	17.63
-	-	4789 (13)	0.0440	0.0430	10.84	-	-	5663 (15)	0.0421	-	13.20
-	-	4789 (13)	0.0482	0.0480	9.84	-	-	4613 (12)	0.0391	-	13.71
-	-	6652 (18)	0.0388	-	16.73	-	-	3818 (10)	0.0358	-	14.58
-	-	8769 (24)	0.0452	-	9.62	-	-	6172 (16)	0.0358	-	13.73
1	1	5712 (15)	0.0473	0.0450	11.03	-	-	6929 (18)	0.0409	-	13.61
1	1	4845 (13)	0.0497	0.0470	10.21	-	-	5298 (14)	0.0395	-	14.73
1	2	4581 (12)	0.0452	0.0430	11.28	-	-	4885 (13)	0.0414	-	12.93
1	1	5053 (13)	0.0448	0.0440	12.59	-	-	5310 (14)	0.0452	-	11.22
1	1	5208 (14)	0.0454	0.0440	11.76	-	-	4429 (12)	0.0442	-	11.63
1	2	4841 (13)	0.0463	0.0440	10.56	-	-	7179 (19)	0.0392	-	14.82
-	-	5628 (15)	0.0460	0.0450	10.02	-	-	6293 (17)	0.0444	-	12.02
-	-	5628 (15)	0.0407	0.0400	15.08	-	-	5752 (15)	0.0424	-	12.67
2	4	5257 (14)	0.0466	0.0440	10.77	-	-	6144 (16)	0.0413	-	13.63
2	4	5215 (14)	0.0444	0.0430	10.65	-	-	7196 (19)	0.0407	-	13.71
-	-	4715 (12)	0.0581	-	10.34	-	-	5403 (14)	0.0446	-	13.44
-	-	4941 (13)	0.0424	0.0420	12.32	-	-	8497 (23)	0.0374	-	15.53
1	1	5367 (14)	0.0447	0.0430	12.91	-	-	-	-	-	-

Note: * indicate data obtained from our experiments and a certified testing agency, respectively.

3. 측정 열전도율의 보정

제조 초기 열전도율에 대한 불확실성은 EPS의 장기 열저항에 대한 분석을 어렵게 한다. 또한 초기 성능 정보가 확보된 경우임에도 동일한 시간 흐름에 놓인 단열재 샘플 사이에서 열전도율 변화량의 편차

가 크게 나타나고 있으므로, 측정 결과로부터 열전도율 경년 변화 양상을 단정적으로 판단하는 것은 어렵다.

단열재 장기 열저항에 대한 기존 연구에서는 가속 노화 시험과 장시간 사용된 단열재 샘플에 대한 측정 양쪽 모두에서 설치 후 10년 이후 시점부터 EPS

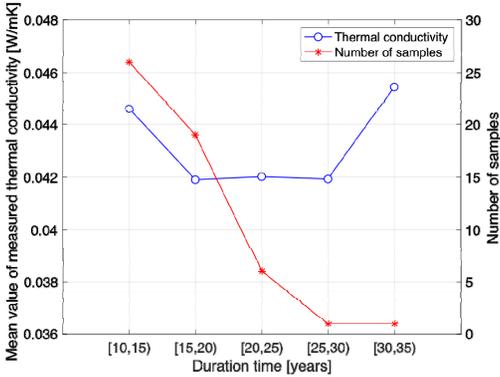


Fig. 1. Relationship between Duration Time and Thermal Conductivity of Samples

의 열전도율 변화는 미미하다고 보고되고 있으므로 (김현진·최세진, 2019), 전술의 측정 결과에는 시간의 흐름 이외의 요인이 영향을 미친다고 생각할 수 있다. 본 논문에서는 현장 채취된 단열재 샘플의 밀도에 초점을 맞추어 측정 결과를 재분석한다.

3.1 단열재 밀도와 열전도율의 상관관계

EPS의 열전도율은 발포폴리스티렌 고체부의 열전도율, 발포 가스 기체부의 열전도율, 적외선복사에 의한 열전도율의 합계로 표현된다. 일반적인 건축용 단열재의 밀도 범위(100kg/m³ 이하)에서 밀도 증가는 셀의 미세화에 따른 결과로 간주하며 그로 인해 열전도율은 감소한다. EPS도 마찬가지로 밀도에 따라 단열재 등급이 구분되며, 밀도가 클수록 열전도율이 낮게 나타나는 특성을 갖는다(권영철·김석, 2019). 하지만, 그 이상 밀도가 증가하면 반대로 열전도율이 오히려 증가하는 경향을 나타낸다고 보고되고 있다(Wang et al., 2022).

Fig. 3는 채취된 단열재 샘플의 밀도와 측정 열전도율의 관계를 나타낸다. 기존 연구와 마찬가지로 음의 상관관계가 나타나고 있으며, 선형모델(식 (1))을 통해 측정 밀도 범위(10~20kg/m³) 내에서 높은 정확도로 열전도율의 예측이 가능하다.

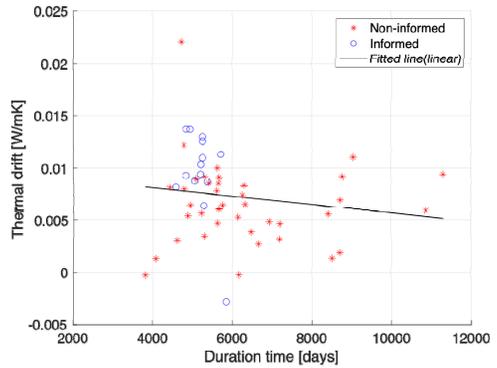


Fig. 2. Changes in Thermal Drift of Samples

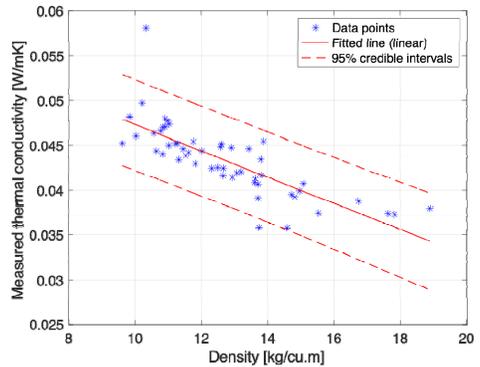


Fig. 3. Relationship between Density and Thermal Conductivity of Samples

$$\lambda_{pred} = -0.0015 \times \rho_{mea} + 0.0619 \quad (1)$$

여기서 λ_{pred} 는 열전도율 예측치[W/mK], ρ_{mea} 는 밀도 측정치[kg/m³]을 의미한다.

3.2 단열재 샘플의 밀도 범위

EPS 단열재는 밀도에 따라 1호 30kg/m³ 이상, 2호 25kg/m³ 이상, 3호 20kg/m³ 이상, 4호 15kg/m³ 이상으로 분류하고 있으며, 밀도가 클수록 단단하고 열전도율이 낮은 특성을 갖고 있다(권영철, 2023). 전술한 바와 같이 53개 중 14개 샘플은 단열재 등급

정보가 설계도서를 통해 구체화되고 있지만, 측정된 밀도는 해당 단열재의 기준(KS M 3808)에 크게 미치지 못하고 있다(Table 1 참조). 제조 이후 보관 상태 및 건물에 설치된 조건 등에 따라, 오랜 시간에 걸쳐 단열재 밀도는 변화할 수 있으나 압축 및 습기 흡수 등에 의해 시간에 따라 밀도는 증가할 가능성이 높다고 보는 것이 일반적이다.

해당 14개 샘플은 설계도서상에서 비드법 1종 2호(열전도율 0.037W/mK 이하) 이상의 등급으로 표시되어 있으나, 이 중 13개 샘플의 밀도가 15kg/m³ 미만(KS M 3808 등급 외)이 되고 있다.

이상의 측정 결과를 고려하면 설계도서상의 정보는 신뢰하기 어려운 것으로 판단되며, 이러한 설계도서에 기반하여 도출된 당시 외벽 열관류율 기준 준수 여부 또한 불투명하다.

3.3 열전도율 측정치 보정

전술의 분석 결과에 근거하여 채취된 단열재 샘플은 한 종류의 단열재(밀도와 열전도율의 관계가 하나의 선형모델로 설명 가능)로 가정함과 동시에, 샘플의 대다수(53개 중 47개)가 KS M 3808의 밀도 기준을 만족하고 있지 못하므로 모든 단열재 샘플의 실체는 KS M 3808 기준 외(건축물의 에너지절약 설계기준 상의 라등급 단열재)에 해당하는 것으로 가정하고 추가분석을 수행한다.

EPS를 포함한 발포플라스틱 단열재는 제조 단계에서 표면층(내부의 고배율 발포 수지 부분에 비해 밀도가 높으며, 가스 차단성을 가지므로 발포 가스의 확산 억제 효과 있음)이 형성된다. 하지만 이들 단열재는 현장 설치 과정에서 절삭 가공되며, 본 연구에서는 열전도율 측정 시험 규격에 맞추어 재단하는 과정도 추가되었으므로 상대적으로 밀도가 높은 표면층이 절삭되었다고 가정하면 기준 대비 밀도 저하는 필연적이라고 생각된다.

이상의 몇 가지 가정에 기초하여 설치 후 경과 일

수와 열전도율 변화의 관계를 면밀하게 분석하기 위해서는 동일한 밀도에서의 열전도율 분석이 이뤄져야 함에도 불구하고, 채취 단열재 샘플의 밀도는 큰 편차를 보인다(Table 1 및 Fig. 3 참조). 본 논문에서는 식 (2)를 통해 측정 열전도율에 대한 밀도보정을 수행하였으며, 보정된 열전도율을 통해 단열재 열전도율의 경시 변화에 대해 분석하는 것으로 한다.

$$\lambda_{cali} = \frac{\lambda_{pred}(\overline{\rho_{mea}}) \times \lambda_{mea}}{\lambda_{pred}(\rho_{mea})} \quad (2)$$

여기서, λ_{cali} 는 보정된 열전도율[W/mK], λ_{mea} 는 측정된 열전도율[W/mK], $\overline{\rho_{mea}}$ 는 측정 샘플 전체의 평균 밀도[kg/m³](=12.72), λ_{pred} 는 식 1에 의해 산출된 열전도율 예측치를 의미한다. 이러한 보정을 통해 모든 샘플을 동일 밀도(12.72kg/m³)의 제조 초기 열전도율이 0.043W/mK인 단열재로 가정하고 측정된 열전도율을 검토할 수 있다고 생각된다.

Fig. 4은 단열재 열전도율 측정치를 밀도 보정 전과 밀도 보정 후로 나누어 설치 후 경과 일수와의 관계를 나타낸 것이다. 밀도 보정 전의 경우 열전도율이 설치 후 시간 경과에 따라 점차 감소하는 기존 지식과 상반되는 결과를 보이는 것과 달리, 밀도 보정

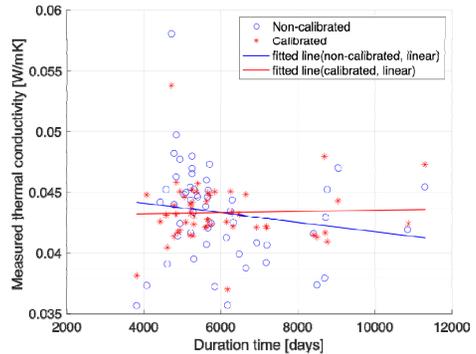


Fig. 4. Relationship between Duration Time and Thermal Conductivity Calibrated with Density

후의 결과는 설치 후 시간 경과에 따라 열전도율이 높아지는 경향을 나타낸다. 또한 EPS의 경우 설치 후 경과 연수 10년 이후 기간에서 성능 열화는 미미하므로 기존 지식과 일치하는 분석 결과를 얻을 수 있다.

또한 설치 후 경과 시간이 유사한 단열재 사이의 열전도율 편차도 절반가량 감소했음이 확인된다 (초기 열전도율(0.043W/mK)과의 RMSE(평균제곱근오차)는 보정 전 약 0.004W/mK에서 보정 후 약 0.002W/mK로 감소). 하지만 여전히 KS M 3808 기준의 단열재 등급이 달라지는 레벨의 편차를 나타내며, 동일 등급의 단열재가 설치되었다고 하더라도 시공 상태, 설치 부위, 건물 운영 조건에 따라 건물생애주기 안에서 단열재 성능변화 양상은 크게 달라질 수 있음을 예상할 수 있다.

4. 그린리모델링 성과 평가 관점에서 초기 성능 검증의 중요성

본 논문에서 제시하고 있는 실험 결과는 특정 지역에 위치하는 소규모 건축물에서 채취된 샘플에 국한된 조사결과이므로 확대해석하지 않도록 주의해야 한다. 하지만 기존의 연구 결과 및 본 측정 결과에서 볼 수 있듯이 EPS 단열재의 장기 열저항의 변화는 크지 않다고 하면, EPS가 설치된 건축물의 장기 열성능은 준공 시점의 성능 및 운영 단계에서의 성능 유지를 위한 관리 여부에 지배된다고도 말할 수 있다. 설계도서와 상이한 단열재가 설치되었을 것이라는 합리적 의심이 가능한 밀도 측정 결과와 동일 등급, 동일 경과 시간 내 채취된 단열재 샘플 사이의 열전도율 편차가 심하다는 점은 준공 시점의 성능 검증 및 운영 단계의 성능 관리가 이루어지지 않고 있음을 보여준다. 그리고 탄소중립 목표 달성을 위한 건축부문의 노력으로서 그린리모델링의 성과를 검증하는 과정에서 준공 시점 및 운영 단계의 성능 검증 관점은 무엇보다 중요하다. 이것은 빌딩커미셔닝의 체계적인 적용을 통해 해결될 수 있다.

계적인 적용을 통해 해결될 수 있다.

현행 공공건축물 그린리모델링 성과 평가의 한계는 개보수 프로젝트의 기획-설계-시공-운영 전주기에서 성능 검증 관점이 부재한 것이 원인이라고 생각된다. 건물 성능 검증의 근간은 문서화된 성능 요구사항(OPR, Owner's Performance Requirements)이며, 이를 건물생애주기 동안 발휘시키기 위한 절차가 필요하다. 현재의 공공건축물 그린리모델링은 1) 성능 목표에 대한 문서화가 이뤄지지 않은 상태 (설계도서가 남아있지 않은 경우가 많고, 정량적인 노후화 진단 과정이 전무하므로 엄밀한 에너지 성능 개선율 목표를 정의할 수 없음)에서 출발하여, 2) 준공 시점 대비 에너지 성능 개선 20%라는 불명확한 성능 목표에 기초한 설계안에 미래 성능이 좌우(개별 건물의 성능개선이 아닌 과거 기준과의 일률적인 비교에 의해 "건축물의 에너지절약 설계기준" 등에 기반한 사양중심 설계가 이루어지며 건물 특성이 반영되지 못하고 성능 보장이 어려움)되며, 3) 에너지 성능 개선에 관한 주요 공정에 대한 품질 관리 부족 (에너지 성능 개선이 목표인 공사임에도 이에 대한 준공 시점의 검증 과정이 전무)에 따라 준공 이후 다양한 하자가 발생하고 있으며, 4) 배출량 절감 목표의 달성 여부는 설계 성능이 아닌 실제 배출량에 근거하여 평가함에도 건물생애주기 탄소 배출량의 가장 큰 비율을 차지하는 운영 단계에서 건축물 에너지 소비효율에 대한 유지 관리가 전혀 이뤄지지 않는 등 성능 검증 관점이 제대로 반영되어 있지 못하다.

그린리모델링, 나아가서는 제로에너지건축물을 포함한 녹색건축물 확산이 건축 부문에 할당된 배출량 절감 목표 달성에 실질적으로 기여하기 위해서는 건축프로젝트 전주기에서 성능 유지를 지원하는 절차가 필요하다. 특히 기획 및 설계단계에서 예측된 건물 성능과 준공 시점 및 운영 단계에서 평가된 성능 사이의 간극을 줄이는 것을 목표로 지속적인 성능 검증 과정이 도입되어야 할 것이다. 본 논문에서

제시한 측정 결과는 검증 과정의 부재가 건물 성능 평가에 미치는 영향에 대한 간접적인 증거로서 의의가 있다.

5. 결론

2020년 이후 매년 약 2,000억 원의 국고가 투입되는 공공건축물 그린리모델링 사업은 현재의 사회 및 산업 프레임 안에서 투자 비용 회수가 어려운 그린리모델링 산업 전반의 체질 개선을 목적으로 한다고 보인다. 구체적으로는 시장 확대를 통한 초기비용 절감, 성과홍보를 통한 인식 개선 등을 통해 그린리모델링 정량적 편익 및 정성적 기대효과를 정리하여 향후 민간 확대를 도모하기 위해서 일 것이다. 그리고 이 과정에는 설계도서에 기반하여 예측된 에너지 성능 개선율이 아닌 실제 사용량에 근거하여 평가한 건축물 에너지 성능 향상의 실질적 증거가 중요한 역할을 할 것이다.

본 논문에서는 공공건축물 그린리모델링 과정에서 철거되는 단열재 샘플을 수거하여 열전도율과 밀도 등 단열성능과 관련된 물성치에 대한 측정 결과를 제시하였다. 단열재의 장기 열저항은 제조 초기 단계의 열전도율을 추정하기 위한 자료가 남아있지 않다는 한계로 인해 명확한 변화 양상을 도출하기 어려웠지만, 설계도서를 통해 추정한 정보에 기반하여 비드법 단열재의 경우 기존 지식과 동일하게 설치 후 10년 이상 경과 시 성능변화가 크지 않다는 결과를 얻을 수 있었다. 하지만 동일 등급, 동일 경과 기간의 단열재에서 측정된 열전도율의 편차가 크고, 특히 단열재 샘플의 밀도가 설계도서상에 기재된 설치 단열재의 등급 기준에 크게 못 미친다는 결과가 얻어졌다.

2020년 이후 이루어진 공공건축물 그린리모델링 대상지의 대부분은 재사용 승인 이후 긴 시간이 경과하지 않았기 때문에, 그린리모델링 성과에 대해

실제 에너지 사용량에 기반한 실질적 탄소 배출량 절감 증거를 제시하기까지는 시간이 필요할 것으로 보인다. 따라서 현시점에서는 설계도서에 기반한 예측을 통한 그린리모델링 성과 평가는 물론 필요하다. 그리고 향후 사용량 데이터가 축적됨에 따라 그린리모델링 성과는 다시 한번 평가될 것이라고 예상된다. 준공 시점과 운영 단계에서의 성능 검증은 이러한 평가과정에서 중요한 역할을 하게 될 것이다. 국가 탄소중립을 위해 필수적 요소인 노후 건축물 에너지 소비효율 개선 사업인 그린리모델링의 성과가 평가 절하되지 않도록 건물 성능 검증 과정 절차 정비가 필요함에 대한 근거자료로 본 연구 결과를 활용하고자 한다.

참고문헌

1. 국토교통부(2023), “용도별 건축물 현황 및 인허가 추이 현황”, 세종.
2. 권영철(2023), 「건축환경계획」, 세종: 한솔아카데미.
3. 권영철·김석(2019), “고성능 진공단열재의 건축적인 적용에 관한 연구”, 「LHI Journal」, 10(3): 23~32.
4. 김수민·조현미(2020), “기존 건축물의 에너지 효율화 및 리트로핏 패키지 방안”, 「LHI Journal」, 11(1): 95~101.
5. 김진희·김상명·김준태(2020), “가속도화 시험에 따른 건축용 단열재의 단열성능 및 경시변화 특성 비교 분석”, 「한국친환경설비학회 논문집」, 14(6): 791~802.
6. 김현진·최세진(2019), “20년 이상 경과된 노후건축물의 단열재 성능평가에 관한 실험적 연구”, 「한국건축시공학회지」, 19(6): 539~547.
7. 이종성·유정현·임주호·김효진(2010), “친환경주택평가기법개발 및 지원방안에 관한 연구”, 「LHI Journal」, 1(1): 27~34.
8. 임종연(2021), “탄소중립 달성을 위한 건축물 에너지 소비량 절감에 대한 기대와 과제”, 「한국그린빌딩협회지」, 22(2): 33~38.
9. 최현중·허정호·강재식·최경석·안호상(2021), “건축용 단열재의 장기 경시변화 보정계수 산정”, 「한국생

활환경학회지」, 28(2): 199~210.

10. KS(2021), “KS M 3808 발포 폴리스티렌(PS) 단열재”.
11. KS(2022), “KS L 9016 보온재의 열전도율 측정 방법”.
12. ISO(2019), “ISO 11561 Ageing of Thermal Insulation Materials: Determination of the Long-Term Change in Thermal Resistance of Closed-Cell Plastics (Accelerated Laboratory Test Methods)”.
13. UN Environment Programme (2022), *Global Status Report for Buildings and Construction*, Nairobi.
14. Wang, J., L. Hu, W. Li and Y. Ouyang (2022), “Development and Perspectives of Thermal Conductive Polymer Composites”, *Nanomaterials*, 12(20): 3574.

요약

본 논문에서는 공공건축물 그린리모델링 과정에서 철거되는 단열재 샘플을 수거하여 열전도율과 밀도 등 단열 성능과 관련된 물성치에 대한 측정 결과를 제시하였다. 단열재의 장기 열저항은 제조 초기 단계의 열전도율을 추정하기 위한 자료가 남아있지 않다는 한계로 인해 정확한 변화 양상을 도출하기 어려웠지만, 설계도서를 통해 추정된 정보에 기반하여 비드법 단열재의 경우 기존 지식과 동일하게 설치 후 10년 이상 경과 시 성능변화가 크지 않다는 결과를 얻을 수 있었다. 하지만 동일 등급, 동일 경과 기간의 단열재에서 측정된 열전도율의 편차가 크고, 특히 단열재 샘플의 밀도가 설계도서상에 기재된 설치 단열재의 등급 기준에 크게 못 미친다는 결과를 얻었다. 준공 시점 및 운영 단계의 성능 관리가 되지 않고 있다는 것을 보여주는 실험 결과이며, 그린리모델링 등 건축물에너지 성능 개선을 적절히 평가하기 위해서는 건물생애주기에 걸친 성능 검증인 빌딩커미셔닝의 적용이 중요하다.

주제어: 비드법 단열재, 열저항, 그린리모델링, 빌딩커미셔닝