



RESEARCH ARTICLE

## 가속노화 시험에 따른 건축용 단열재의 단열성능 및 경시변화 특성 비교 분석

김진희<sup>1</sup> · 김상명<sup>2</sup> · 김준태<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>공주대학교 그린에너지기술연구소 연구교수, <sup>2</sup>공주대학교 대학원 에너지시스템공학전공 박사과정,

<sup>3</sup>공주대학교 건축학부 건축공학전공 교수

## Comparisons of Thermal Insulation Performance and Aging Characteristics of Building Insulation Materials According to Accelerated Ageing Test

Kim, Jin-Hee<sup>1</sup> · Kim, Sang-Myung<sup>2</sup> · Kim, Jun-Tae<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Research Professor, Green Energy Technology Center, Kongju National University, Cheonan, Korea

<sup>2</sup>Ph.D student, Department of Energy System Engineering, Kongju National University, Cheonan, Korea

<sup>3</sup>Professor, Department of Architectural Engineering, Kongju National University, Cheonan, Korea

\*Corresponding author: Kim, Jun-Tae, Tel: +82-41-521-9333, E-mail: jtkim@kongju.ac.kr

### ABSTRACT

The insulation performance of the building is one of the most fundamental factors to reduce the energy use in building. The building's heating and cooling load account for the largest portion of the building energy consumption. And the insulation of building envelope is the main factor that directly affects the cooling and heating loads. For this reason, the thermal performance of the building insulation materials is very important for saving building energy. However, the building insulation materials have a problem in which the thermal performance has been deteriorated over time. Assuming that the lifetime of the building is about 50 years or more, the long-term performance of the insulation materials applied to the building is a very important factor affecting building energy consumption. In addition, the insulation material of building is generally located in the middle of the building envelope layers, which makes it very difficult to replace and retrofit when thermal insulation performance decreased. For these reasons, various standards have been proposed to test and evaluate the long-term performance of building insulation materials. In this study, the long-term performance of building insulation materials was tested and analyzed based on the standard of the accelerated aging test. The building insulation materials used in experiment were 5 types such as EPS, XPS, PF board, PIR-1 and PIR-2. The accelerated aging tests were conducted based on KS M ISO 11561 and BS EN 13166 standards. The results of the accelerated aging test for the materials were presented and the thermal conductivity of insulation materials were also compared.

**주요어 :** 건축 단열재, 가속노화시험, 단열성능, 열전도율, 경시변화 특성

**Keywords:** Building insulation material, Accelerated aging test, Insulation performance, Thermal conductivity, Ageing characteristics

### OPEN ACCESS

Journal of KIAEBS 2020 December, 14(6): 791-802  
<https://doi.org/10.22696/jkiaeb.20200067>

pISSN : 1976-6483  
eISSN : 2586-0666

**Received:** November 30, 2020

**Revised:** December 10, 2020

**Accepted:** December 13, 2020

© 2020 Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems.



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 서론

### 연구 배경 및 목적

2015년 파리협약에서 정부는 2030년까지 BAU (Business As Usual) 대비 37%의 온실가스 감축을 목표로 발표하였으며, 이를 달성하기 위해 2030 국가 온실가스 감축 로드맵을 수립하였다. 건물 분야는 2030년 BAU 대비 32.7%의 온실가스 절감을 목표로 하고 있으며, 이는 산업, 수송, 공공(기타) 부문 중 가장 높은 감축률을 목표로 하고 있다(국토교통부, 2018). 건물(가정·상업) 분야는 2018년 기준 국내 최종 에너지 소비량 중 17.8%를 차지하고 있으며, 이는 산업과 수송 분야 다음으로 3번째로 높은 비중을 차지하고 있다(Korea Energy Economics Institute, 2019). 건물의 냉난방을 위한 에너지 사용량은 전체 건물에너지 사용량 중 상당히 높은 비율을 차지하며 냉난방에너지 부하를 줄이기 위해서는 건물 외피의 단열성능이 가장 우선적으로 고려되어야 한다(Zhao and Magoules, 2012; Fouquier et al., 2013). 이러한 이유로 정부에서는 건물의 단열기준을 패시브 건축물 수준으로 향상시키는 제로에너지건축물 인증제도와 건축물의 에너지절약 설계기준(Korea Energy Agency, 2019) 등 다양한 정책들을 추진하고 있다. 이러한 배경속에서 건축시장에서는 단열성능이 높은 고성능 단열재의 수요가 높아지고 있으며 최근 페놀폼 단열재의 수요가 급증하고 있다.

현재 국내에서 사용되고 있는 주요 건축용 유기 단열재는 비드법단열재(EPS), 압출법단열재(XPS), 경질 우레탄단열재(PUR, PIR), 페놀 폼(PF board) 등이 있으며, 이러한 단열재는 다중의 셀로 구성되어 있어 경시변화에 의한 성능저하 가능성이 있다. 국내에서 발포제를 사용하는 단열재의 경시변화 평가는 한국산업표준인 KS M ISO 11561 (2009)에 따른 실험실 가속 시험법에 의해 평가되고 있다. 단열재의 단열성능 저하는 1차적으로 외부공기가 단열재 내부로 침투하면서 셀 내부 기포의 구성가스 비율이 급격히 변화하면서 발생한다. 그 후 2차적으로 셀 내부 독립기포에 주입되어 있는 충전가스가 서서히 외부로 빠져나감으로써 열성능 저하가 발생한다(Choi and Kang, 2013). 유기단열재들은 서로 다른 독립기포율을 갖고 있으며 특히, 페놀폼 단열재는 기존 유기 단열재에 비해 독립기포율이 매우 높은 단열특성을 갖는다. 그러나 KS M ISO 11561 표준 시험방법은 단열재의 독립기포율에 따른 경시변화를 고려하지 않고 있다. 특히 이 표준에서 제시하고 있는 단열재 가속 시험법은 단열재의 독립기포율에 따른 경시변화를 고려하지 않고 있으며, 시료 준비 단계에서 단열재의 셀들이 파괴되며 충전된 발포가스가 빠져나가고 이에 따라 단열성능이 저하되는 것으로 알려져 있다.

Choi et al. (2018)의 연구에 따르면, 국내의 단열재 장기 경시변화에 따른 열전도율 시험법은 단열재의 종류에 따라 KS M ISO 11561(단열재의 경시변화)과 KS M 3808(발포 폴리스티렌 단열재), KS M ISO 4898(경질 발포 플라스틱-건축물 단열재-규격서)에 명시되어 있으나, 모두 KS M ISO 11561을 인용하여 동일한 환경조건(온도  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ , 상대습도  $50\pm 5\%$ )에서 시료를 전처리 하고 있어, 구성 재료가 다양화, 고성능화 되고 있는 국내 단열재 성능시험에 대한 신뢰성을 나타내기엔 한계가 있다고 발표한 바 있다.

국외의 경우 EN 13166 『Thermal insulation products for buildings - Factory made phenolic foam (PF) products - Specification』 (BS EN 13166:2012, 2016)과 ISO 16478 『Thermal insulation

products for building – Factory made Vacuum Insulation Panels (VIP)』(International Organization for Standardization (ISO 16478, 2018))등 단열재의 독립 기포율 또는 단열재의 특성에 따라 다양한 기준들이 적용되어, 단열재의 특성을 고려한 전처리 과정 및 시험 환경을 제안하고 경시변화에 따른 성능평가 방법을 명시하고 있다.

국내 건축시장에서 그동안 EPS 및 XPS 등 폴리스티렌 계열의 단열재들이 큰 비중으로 적용되었고, 이러한 유기단열재의 단열성능 및 재료적 특성을 고려한 경시변화 성능에 대해 국가산업표준으로 KS M ISO 11561이 제정되었다. 그러나 지난 수년간 건물의 단열기준, 단열재의 여러 성능기준 등이 강화되면서 새롭게 제품화된 PIR, PF 그리고 진공단열재 등과 같은 고성능 단열재에 대한 성능평가가 명확하게 이루어지지 않고 있다. 특히 이들 재료의 물성을 반영한 장기 성능평가에 대한 시험 기준이 없는 상태이다. 이러한 배경으로 국내에서도 다양한 단열재의 특성을 고려한 성능평가 방법 및 표준 제안이 요구되고 있다.

본 연구의 목적은 국내 건축물에 대표적으로 사용되는 건축용 발포 단열재들을 대상으로 수행된 국내외 표준규격의 가속노화 시험결과를 바탕으로 단열재의 경시변화 특성을 비교 분석하는 것이다.

### 연구방법 및 범위

본 연구에서는 건축물에 적용되는 발포형 단열재의 장기성능 평가를 위한 가속노화 시험을 위해 폴리스티렌 단열재(EPS, XPS), 페놀폼(PF), 경질 우레탄폼 2가지 제품(PIR-1, PIR-2) 등 3종류, 총 5가지 단열 부재를 대상으로 하였다. 해당 단열재들의 장기성능을 비교 평가하기 위해 기존의 단열재 장기성능 평가법 규격인 KS M ISO 11561의 시험방법 B에서 제시하고 있는 슬라이싱 시험방법과 EN 13166 부속서 C에서 제시하고 있는 열가속화 시험 방법을 이용하였다. 실험 결과를 바탕으로 각 시험표준에서 제시된 방법에 따라 해당 단열재의 열전도율 및 경시변화 특성을 분석하였다.

## 건축용 단열재의 가속노화시험

### 건축용 단열재 시료

가속노화 시험을 위한 단열재 5가지로 EPS, XPS, PF, PIR-1, PIR-2 시험샘플을 준비하였다(Figure 1).

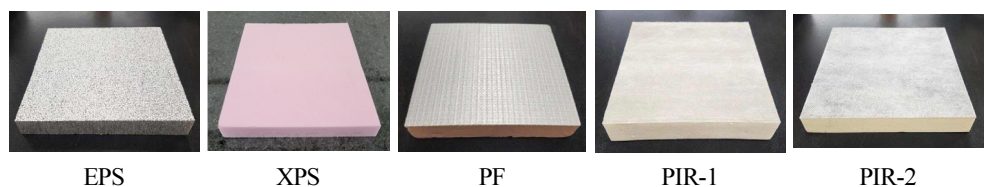


Figure 1. Samples of the insulation product used for the study

실제 성능측정은 국가공인시험기관에 의뢰하여 진행되었으며, 시험을 위한 단열재 시료는 KS M ISO 11561과 EN 13166 표준에서 제시하는 방법에 따라 각각 별도로 준비하였다.

KS M ISO 11561의 가속노화시험을 위해 단열재 시료는 50 mm의 단열재 시료를 (10±0.5) mm 두께로 슬라이스(slice) 하여 슬라이스된 채로 50 mm의 단열재 시료를 보관하고 열전도율 측정에 사용되었다. KS M ISO 11561 실험을 위해 준비된 단열재 시료는 Figure 2와 같다.



Figure 2. Specimens of the insulation materials for KS M ISO 11561

EN 13166에 따른 가속노화시험은 열 가속화 시험법으로 시험되었으며, 사용된 시료는 앞의 KS규격과 달리 재료를 슬라이스 하지 않고 50 mm 두께의 단열재를 그대로 사용하였다. 이 규격 실험에 사용된 단열재 시료의 사진은 Figure 3과 같다.



Figure 3. Specimens of the insulation materials for EN 13166 of the heat ageing method

또한 KS A 0006 『시험 장소의 표준 상태』 (Korean Agency for Technology and Standards (KS A 0006, 2019))에서 규정하는 온도  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ , 상대 습도  $50 \pm 5\%$ 의 항온항습실에 50 mm 두께의 단열재 시료들을 거치하였다. 슬라이스 되지 않은 50 mm의 단열재를 KS M ISO 11561 가속노화시험법과 동일한 조건에서 거치하고 단열성능을 측정하여 단열재의 가속시험 시 단열재 시료의 슬라이스 방법이 단열재의 장기성능에 미치는 영향을 비교 분석하였다.

### 가속노화 시험

KS M ISO 11561의 경우 단열재의 독립 기포율을 고려하지 않고 시료의 슬라이싱에 의한 방법으로 시험되며, EN 13166의 경우 단열재의 독립 기포율 고려하여 슬라이스법과 열 가속

화법으로 가속노화 시험방법이 구분되어 있다. KS M ISO 11561에서 제시하고 있는 시험방법 B의 가속노화 조건으로 진행되었으며 시험은  $(97 \pm 7)$  일간 진행되었다. 시험조건은 실내온도( $23 \pm 2$ )°C와 상대습도( $50 \pm 5$ )%에서 진행되었으며 일정 간격으로 열전도율을 측정하였다.

EN 13166은 독립 기포율 90% 이상의 단열재 등 모든 단열재 시험이 가능한 열 가속화 방법으로 실험을 진행하였다. EN 13166의 열 가속 시험법은 70°C 열 가속법과 110°C 열 가속법 2가지가 있으며, 표준에 따른 가속시험 기간 및 시험조건은 Table 1과 같다.

**Table 1.** Accelerated ageing test conditions according to the standards

Standard	KS M ISO 11561	EN 13166	
Method	Method B	Heat ageing at 70°C	Heat ageing at 110°C
Specimen	Slicing ( $10 \pm 5$ ) thickness of 50 mm	Thickness of 50 mm	
Ageing period	$(91 \pm 7)$ days	$(175 \pm 5)$ days	7 days at $(70 \pm 2)$ °C then $(14 \pm 1)$ days at $(110 \pm 2)$ °C
Ageing condition	$(23 \pm 2)$ °C $(50 \pm 5)$ % RH	$(70 \pm 2)$ °C	
Measurement period of thermal conductivity	Measurement interval: 15 ~ 30 days (10 times)		Measurement interval: Initial day and 14th day (2 times)

두 시험표준에서, 슬라이스 방법(KS M ISO 11561)의 경우 상온조건에서 10 mm 슬라이싱의 50 mm로 단열재를 보관하여 91일간 열전도율을 측정하여 25년 후 변화된 장기 열전도율을 평가한다. 열가속화 방법(BS EN 13166)의 경우 70°C에서 175일간 또는 70°C에서 1주간 전처리 후 110°C에서 14일간 열전도율을 측정하여 25년 후 변화된 장기 열전도율을 평가한다.

본 연구에서는 70°C 열가속 시험 조건으로 진행되었으며 시험은 70°C에서  $(175 \pm 5)$ 일 진행한 후 실내온도  $(23 \pm 2)$ °C, 상대습도  $(50 \pm 5)$ % 조건에서 단열재 시료들의 무게가 안정화 되었을 때 열전도율이 측정되었다. 열전도율은 KS ISO 8301 (Korean Agency for Technology and Standards (KS L ISO 8301, 2006)) 방법에 따라 측정되었다.

## 가속노화 시험결과

### 표준환경 조건 시험결과

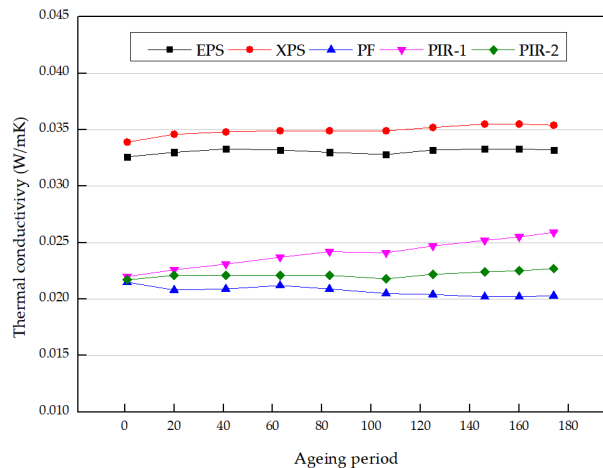
Table 2는 KS A 0006 『시험 장소의 표준 상태』에서 규정하고 있는 표준 환경 조건인 온도  $(23 \pm 2)$ °C, 상대습도  $(50 \pm 5)$ %에서 175일 동안 5개 단열재들의 열전도율 측정결과를 나타낸 것이며 Figure 4는 열전도율 변화를 나타낸 그래프이다.

PIR-1의 열전도율은 약 0.004 W/m K 증가하였으며, 다른 3가지 단열재 시료 EPS, XPS, PF, PIR-2의 경우 열전도율은 각각 약 0.001 W/m K 증가하여 상대적으로 미미한 증가추세

를 나타내었다. PF의 경우 오히려 열전도율이 약 0.001 W/m K 감소한 것으로 나타났으나 이는 실제 단열성능의 향상보다는 시험의 오차에 의한 것으로 판단되었다. PIR-1의 열전도율 변화는 초기 열전도율과 비교해 약 18% 증가하였으며 다른 단열재들의 열전도율 증가에 따른 단열성능저하는 5% 이하로 분석되었다.

**Table 2.** Change of thermal conductivity of the insulation materials under standard environment condition

Days	Thermal conductivity (W/m K)				
	EPS	XPS	PF	PIR-1	PIR-2
1	0.0326	0.0339	0.0215	0.0220	0.0217
20	0.0330	0.0346	0.0208	0.0226	0.0221
41	0.0333	0.0348	0.0209	0.0231	0.0221
64	0.0332	0.0349	0.0212	0.0237	0.0221
83	0.0330	0.0349	0.0209	0.0242	0.0221
106	0.0328	0.0349	0.0205	0.0241	0.0218
125	0.0332	0.0352	0.0204	0.0247	0.0222
146	0.0333	0.0355	0.0202	0.0252	0.0224
160	0.0333	0.0355	0.0202	0.0255	0.0225
175	0.0332	0.0354	0.0203	0.0259	0.0227



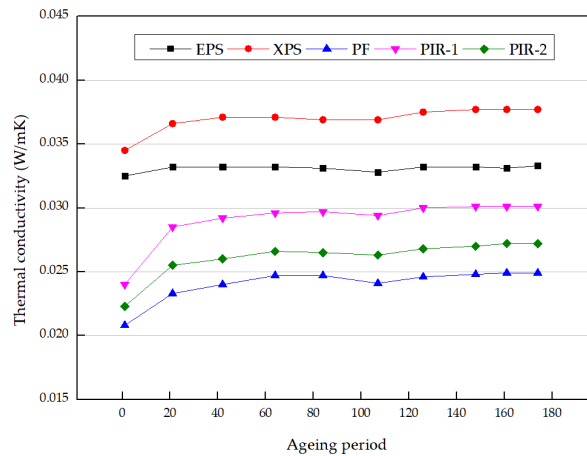
**Figure 4.** Change of thermal conductivity depending on the ageing period

### 슬라이스 가속시험법(시험법 B)에 의한 경시변화 특성

Table 3은 단열재 시료들을 KS MISO 11561 가속 노화시험법에 따라 50 mm 두께의 단열재를 10 ± 0.5 mm로 슬라이싱한 후 175일 동안의 열전도율 변화를 측정된 결과이며, Figure 5는 이 결과를 그래프로 나타낸 것이다. KS MISO 11561의 슬라이스 법에 따른 가속노화 시험은 91일 동안 열전도율 측정으로 규정하고 있으나 EN 13166의 열가속 시험법에 따른 가속노화 시험결과와 비교하기 위해 175일 동안의 열전도율 변화를 측정하였다.

**Table 3.** Change of thermal conductivity of the insulation materials under standard environmental conditions

Days	Thermal conductivity (W/m K)				
	EPS	XPS	PF	PIR-1	PIR-2
1	0.0325	0.0345	0.0208	0.0240	0.0223
20	0.0332	0.0366	0.0233	0.0285	0.0255
41	0.0332	0.0371	0.0240	0.0292	0.0260
64	0.0332	0.0371	0.0247	0.0296	0.0266
83	0.0331	0.0369	0.0247	0.0297	0.0265
106	0.0328	0.0369	0.0241	0.0294	0.0263
125	0.0332	0.0375	0.0246	0.0300	0.0268
146	0.0332	0.0377	0.0248	0.0301	0.0270
160	0.0331	0.0377	0.0249	0.0301	0.0272
175	0.0333	0.0377	0.0249	0.0301	0.0272

**Figure 5.** Change of thermal conductivity depending on the ageing period (KS M ISO 11561)

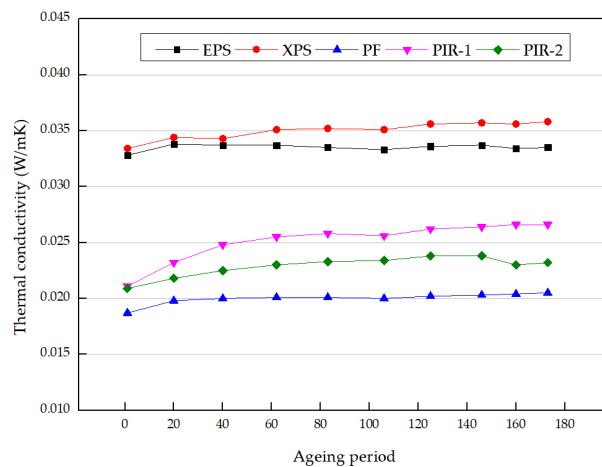
시험결과, 단열재 슬라이싱 후, 20일 까지 시험 초기에 단열성능 저하가 나타났으며 상대적으로 EPS, XPS에 비해 PIR-1, PIR-2, PF의 단열성능 저하가 더 크게 나타났다. 단열재에 따라 20일까지 열전도율 증가폭은 다르게 나타났는데 PIR-1 폴리우레탄 단열재의 열전도율 증가는 0.0045로 가장 크게 나타났다. 그 뒤로 PIR-2, PF, XPS 순으로 열전도율이 0.002~0.003 W/m K 범위에서 증가하였다. 그래프에서 보면, XPS, PIR-1, PIR-2 그리고 PF 단열재는 슬라이싱 후, 시험초기인 20일째에 열전도 변화폭이 크게 나타나고 이후 열전도율 변화폭은 크게 나타나지 않는 것을 알 수 있다. XPS, PF, PIR-1, PIR-2의 20일째 열전도율 측정 값은 초기 열전도율 대비 하여 각각 7%, 19%, 24%, 19% 증가한 것으로 나타났다. 이는 앞서 동일한 환경조건인 KS A 0006 표준시험조건에서 PIR-1을 제외한 모든 단열재들의 열전도율 변화가 5% 이하인 것에 비해 큰 차이를 나타내며 이는 시료의 슬라이싱에 의한 영향으로 분석되었다. 따라서 EPS를 제외하고 XPS, PIR, PF 단열재는 슬라이싱만으로 단열성능 저하가 나타나는 것으로 분석되었다. 특히 발포가스 함유율이 상대적으로 높은 PIR과 PF 단열재는 EPS나 XPS 단열재에 대비하여 시료의 초기 슬라이싱에 의한 영향이 큰 것으로 확인되었다.

### 열가속 시험법(70°C)에 의한 경시변화 특성

Table 4는 EN 13166의 70°C 열가속 시험법에 따른 단열재의 열전도율 측정결과를 나타낸 표이다. 70°C 열가속화 시험은 단열재 시료들을 (70 ± 2)°C 조건에서 (175 ± 5)일간 동안 진행하는데, 각 측정시점에 온도(23 ± 2)°C, 상대습도(50 ± 5)%에서 일정한 무게를 유지한 후 측정하였다. Figure 6은 열가속 시험법에 따른 열전도율 변화를 나타낸 그래프이다. 시험결과, EPS, XPS, PF, PIR-2의 가속조건 후 열전도율은 초기 열전도율과 비교해 약 0.001 ~ 0.002 W/m K 범위 안에서 증가하였으며, PIR-1의 경우는 약 0.006 W/m K 증가한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 EPS, XPS, PF, PIR-1, PIR-2의 초기 열전도율 대비 각각 2.1%, 7.2%, 9.6%, 26.1%, 11% 증가한 것이다. 그래프에서 보면, EPS, XPS, PF의 20일째 열전도율 변화는 시험 초기와 비교해 소폭 증가하였으나 이후 변화폭이 미미한 것을 알 수 있다. 반면, PIR 단열재는 상대적으로 다른 단열재에 비해 가장 크게 열저항 성능이 저하된 것으로 분석되었다.

**Table 4.** Change of thermal conductivity of the insulation materials under standard environment condition

Days	Thermal conductivity (W/m K)				
	EPS	XPS	PF	PIR-1	PIR-2
1	0.0328	0.0334	0.0187	0.0211	0.0209
20	0.0338	0.0344	0.0198	0.0232	0.0218
41	0.0337	0.0343	0.0200	0.0248	0.0225
64	0.0337	0.0351	0.0201	0.0255	0.0230
83	0.0335	0.0352	0.0201	0.0258	0.0233
106	0.0333	0.0351	0.0200	0.0256	0.0234
125	0.0336	0.0356	0.0202	0.0262	0.0238
146	0.0337	0.0357	0.0203	0.0264	0.0238
160	0.0334	0.0356	0.0204	0.0266	0.0230
175	0.0335	0.0358	0.0205	0.0266	0.0232



**Figure 6.** Change of thermal conductivity depending on the ageing period (EN 13166 - Heat ageing at 70°C)



### 시험조건 및 방법에 따른 열전도율 변화 비교

앞서 분석결과를 통해 KS M ISO 11561과 EN13166 표준에 의한 시험조건 및 방법에 따라 단열재들은 서로 다른 경시변화 특성을 갖는 것으로 확인되었다. 특히, 슬라이싱에 의한 단열성능 저하가 단열재 종류에 따라 서로 다른 특성을 나타냈으며, PIR과 PF 단열재는 다른 단열재에 비해 슬라이싱에 의한 영향이 상대적으로 더 크게 나타났다.

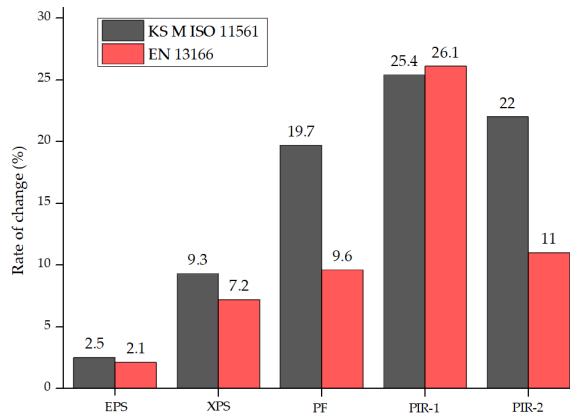
Table 5는 앞서 분석된 서로 다른 시험조건 및 방법의 가속노화 시험에 따른 단열재별 초기 열전도율과 가속시험 후 측정된 열전도율을 나타낸 것이다. 표준환경인 상온조건에서 175일 동안의 열전도율 변화는 PIR-1 단열재를 제외하고 초기 열전도율 대비 5% 이하의 변화 폭으로 미미한 것으로 분석되었다.

KS M ISO 11561의 슬라이싱 방법의 91일간 시험에서는 EPS의 경우 가속노화에 따른 열전도율 변화는 미미하게 나타나 단열성능 저하가 나타나지 않았다. XPS는 약 0.002 W/m K, PF는 0.004 W/m K 각각 증가하였으며, PIR 단열재의 경우 약 0.004~0.006 W/m K로 가장 큰 단열성능 저하가 나타났다. 91일 이후 175일까지 열전도율 변화는 미미한 수준으로 단열재들의 열전도율은 유사한 수준으로 분석되었다.

EN 13166의 열가속 시험방법에서는 EPS의 경우 약 0.001 W/m K, XPS의 경우 약 0.003 W/m K, PIR-1의 경우 0.006 W/m K의 열전도율이 증가하여 KS M ISO 11561과 비슷한 수준의 열전도율 변화를 보였다. 그러나 PF와 PIR-2 단열재는 약 0.002, 0.003 W/m K으로 각각 나타나, 슬라이스법(KS M ISO 11561)보다 단열성능 저하가 적은 것으로 확인되었다.

**Table 5.** Comparison of difference of thermal conductivity between initial and aged value depending on standard

Insulation	Thermal conductivity	Standard condition 23°C/175 days	KS M ISO 11561 Slicing method/91 days (175 days)	EN 13166 Heat ageing at 70°C/175 days
EPS	Initial	0.033	0.033	0.033
	After ageing with 91 days (175 days)	0.033	0.033 (0.033)	0.034
XPS	Initial	0.034	0.035	0.033
	After ageing with 91 days (175 days)	0.035	0.037 (0.038)	0.036
PF	Initial	0.022	0.021	0.019
	After ageing with 91 days (175 days)	0.020	0.025 (0.025)	0.021
PIR-1	Initial	0.022	0.024	0.021
	After ageing with 91 days (175 days)	0.026	0.030 (0.030)	0.027
PIR-2	Initial	0.022	0.022	0.021
	After ageing with 91 days (175 days)	0.023	0.027 (0.027)	0.024



**Figure 7.** Comparison of thermal performance change rate according to standard ageing test

Figure 7은 KS MISO 11561의 슬라이싱 방법과 과 EN 13166 열 가속 법에 따른 가속 노화 시험 후 단열재별 단열성능의 변화율을 보여주는 그래프이다.

그래프에서 보면, 두 시험방법에 따른 EPS, XPS, PIR-1의 열전도율 변화는 큰 차이가 없으나 PF와 PIR-2의 열전도율 변화는 크게 차이가 나는 것을 알 수 있다. 이는 단열재 시료의 슬라이싱에 의한 영향으로 상대적으로 독립기포율이 높은 PF와 PIR-2 단열재에 대해 슬라이싱 유무에 따라 단열성능에 더 큰 영향을 미치는 것으로 분석된다. 단열재의 독립기포율은 EPS의 경우 65%수준으로 알려져있고 PIR의 경우 제조방식에 따라 독립기포율이 약 85~95% (Hejna et al., 2017) 수준으로, 제조사마다 상이한 것으로 알려져 있으며, PF의 경우 독립기포율은 90% 이상이어야 된다고 명시되어 있다(BS EN 13166:2012, 2016).

PIR-1의 경우 앞서 분석을 통해 슬라이싱에 의한 초기 단열성능 저하가 큰 것으로 확인되었으나 두 시험표준에 따른 장기성능 차이가 유사한 것은 열가속화에 따른 PIR-1 단열재의 경시변화 특성에 의한 것이다. PIR-1 단열재는 슬라이스 및 열가속화 시험에서 초기 열전도율이 높게 나타났으며, 지속적으로 공기유입 및 가스확산이 발생되어 가속노화에 따른 단열성능의 저하가 더 큰 것으로 분석되었다. 이는, 같은 종류의 PIR 단열재라도 제품 간의 화학구조가 상이할 수 있고 독립기포율이 다르기 때문으로 판단된다.

KS MISO 11561의 경우 가속화 시험 시 단열재 시료를 10 mm 두께로 슬라이스 하여 준비하도록 규정하고 있으며, 단열재의 독립 기포율 및 단열재의 발포가스 확산계수 등에 따른 시험방법을 따로 분류하여 규정하지 않는다. 그러나 EN 13166의 경우 가속화 시험 방법을 슬라이스와 열 가속화 법으로 나누어 단열재의 독립 기포율 90% 이상일 경우 열 가속화 법으로 시험하도록 명시되어 있으며, 발포제의 종류, 면제 유무에 따른 추가 보정계수 적용 등 단열재의 특성을 반영하도록 하여 KS MISO 11561 보다 조금 더 구체적인 성능평가 방법을 제시하고 있다. 다른 단열재들과 달리 독립 기포율이 90% 이상인 PF의 경우 이러한 재료적 특성으로 인해 KS MISO 11561에 의한 장기성능 평가 시 슬라이싱에 의해 시험초기 단열성능이 크게 저하되는 것으로 나타났다. 따라서 PF와 PIR-2와 같이 독립 기포율이 높은 단열재의 경우 기존 국내 시험규격에서 제시하는 슬라이스 시험방법에 의한 장기성능 평가시 다른 단열재에 비해 불리한 결과를 갖는 것으로 분석되었다.

## 결론

본 연구에서는 KS M ISO 11561과 EN 13166 표준에 의한 가속노화 시험결과를 통해 폴리스티렌 단열재(EPS, XPS), 페놀폼(PF), 경질 우레탄폼 2가지 제품(PIR-1, PIR-2) 등 5가지 단열재의 175일 동안 열전도율 변화 및 경시변화 특성을 비교 분석하였다.

시험결과로부터, KS M ISO 11561 표준의 슬라이스 시험방법의 경우 EPS를 제외하고 모든 단열재들은 시료의 슬라이싱에 의해 시험초기 단열성능 저하가 나타났으며 특히, 독립기포율이 높은 PF와 PIR 단열재에서 크게 나타났다. 175일간 열전도율 변화는 슬라이싱에 의해 시험 초기에 크게 나타나고 이후 미미하게 변화되는 것으로 확인되어 슬라이싱에 의한 영향이 상대적으로 큰 것으로 확인되었다.

반면, EN 13166 표준의 열 가속 시험방법은 단열재를 슬라이싱하지 않고 70°C의 높은 온도조건으로 열 가속화하는 방식으로 이에 의한 각 단열재들의 열전도율 측정결과, EPS, XPS, PIR-1은 슬라이스 방법과 유사한 수준으로 나타났다. 그러나 PF와 PIR-2 단열재는 KS M ISO 11561의 슬라이스 방법보다 단열성능 저하가 적게 나타났으며 슬라이스 방법에 의한 열전도율 변화대비 절반 수준인 것으로 확인되었다.

EPS 단열재는 서로 다른 두 시험방법에 의한 열전도율 변화가 매우 유사한 수준으로 확인되었으며 단열재의 슬라이싱에 의한 영향 없이 가속노화 시험에 따른 열전도율 변화도 미미한 것으로 확인되었다. 반면, 다른 단열재들은 서로 다른 시험방법에 따라 열전도율 변화가 다르게 나타나고 가속노화 시험에 의해 단열재별로 7~26%의 열전도율 변화가 나타나는 것으로 확인되었다. 특히, 재료의 독립기포율이 높은 PF와 PIR 단열재는 슬라이싱에 의한 영향으로 각기 다른 두 시험표준에 따른 열전도율 변화는 두 배 수준으로 크게 차이가 있는 것으로 확인되었다.

현재 국내에서 사용되는 건축용 단열재의 경시변화 측정은 KS M ISO 11561 슬라이스 시험방법에 따라 이루어지고 있다. 그러나 본 연구의 분석결과를 통해, 시험방법에 따라 단열재의 경시변화 특성이 다르게 나타나는 것을 확인하였다. 특히, 독립기포율이 높은 단열재는 슬라이싱에 의한 영향으로 열전도율 변화가 큰 것으로 확인되었다. 따라서 다양한 단열재들의 장기성능 측정방법의 신뢰성 향상을 위해, 향후 단열재의 독립기포율, 발포제 종류, 면재 유무 등 재료의 다양한 특성을 반영한 경시변화 측정방법에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

## 후기

이 연구는 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 이공학개인 기초 후속연지원사업의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(NRF-2018R1D1A1A09083870).

## References

1. Choi, B.H., Kang, J.S. (2013). The thermal performance of building insulation materials according to long-term aging. *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, 25(11), 617-623.
2. Fouquier, A., Robert, S., Suard, F., Stephan, L., Jay, A. (2013). State of the art in building modelling and energy performance prediction: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 272-288.
3. Hejna, A., Kirpluks, M., Kosmela, P., Cabulis, U., Haponiuk, J., Piszczyk, L. (2017). The influence of crude glycerol and castor oil-based polyol on the structure and performance of rigid polyurethane-polyisocyanurate foams. *Industrial Crops and Products*, 95, 113-125.
4. Zhao, H.X., Magoules, F. (2012). A review on the prediction of building energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3586-3592.
5. Choi, M.H., Hong, S.H., Koh, G.H., No, S.T., (2018). Comparison of domestic and foreign standards for long-term thermal conductivity of insulation materials, *Proceeding of Architectural Institute of Korea conference*, 38(2), 336-337.
6. Korea Energy Agency. (2019). *Commentary of Energy Conservation Design Standard of Building*.
7. Korea Energy Economics Institute. (2019). *Yearbook of energy statistics*.
8. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2018). *Revision of the Basic Roadmap to Achieve National Greenhouse Gas Reduction Goals in 2030*.
9. BS EN 13166:2012. (2016). *Thermal insulation products for building - Factory made phenolic foam (PF) products - Specification*. BSI Standard Publication.
10. ISO 16478. (2018). *Thermal insulation products for buildings – Vacuum insulation panels (VIP) - Products specification*. International Organization for Standardization.
11. KS A 0006. (2019). *Standard atmospheric conditions for testing*. Korean Agency for Technology and Standards.
12. KS L ISO 8301. (2006). *Thermal insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties - Heat flow meter apparatus*. Korean Agency for Technology and Standards.
13. KS M ISO 11561. (2009). *Ageing of thermal insulation materials - Determination of the long-term change in thermal resistance of closed-cell plastics (accelerated laboratory test methods)*. Korean Agency for Technology and Standards.