



심재에 따른 진공단열패널의 특성 및 장기성능 평가

김상명¹ · 프레드 에드먼드 보아포¹ · 김진희² · 김준태^{3*}

¹공주대학교 에너지시스템공학전공 박사과정, ²공주대학교 그린에너지기술연구소 연구교수,

³공주대학교 건축공학전공 교수

Long-term Performance and Characteristic Evaluation of Vacuum Insulation Panel (VIP) According to Core Material

Kim, Sang-Myung¹ · Fred Edmond Boaf¹ · Kim, Jin-Hee² · Kim, Jun-Tae^{3*}

¹Ph.D student, Department of Energy Systems Engineering, Kongju National University, Cheonan, Korea

²Research Professor, Green Energy Technology Research Center, Kongju National University, Cheonan, Korea

³Professor, Department of Architectural Engineering, Kongju National University, Cheonan, Korea

*Corresponding author: Kim, Jun-Tae, Tel: +82-41-561-8654, E-mail: jtkim@kongju.ac.kr

ABSTRACT

Recently to reduce energy consumption in the building sector, insulation regulation of the building envelope has been strengthened more and more. The strengthened regulation on insulation results in thicker building envelope and the thicker envelope makes inner space become narrow. One of the solutions to meet strengthened insulation regulation is using high efficient insulation for the building envelope. Vacuum Insulation Panel (VIP) is one of high efficient insulation which has 8~10 time lower thermal conductivity than existing insulations. By installing VIPs for building insulation, meeting the strict insulation regulation and maintaining large inner space are both possible. Generally, the lifetime of buildings is more than 50 years. However, the study on the long-term performance of VIPs is insufficient. In this paper, the performance and durability of VIPs were investigated. For the performance evaluation, VIPs from 5 companies were investigated. 4 types of VIPs based on fumed silica and 2 types of VIPs based on the glass fiber were tested. To analyze the performance of VIPs the thermal conductivity and inner pressure of VIPs were measured. For the analysis of the long-term performance for VIP, the accelerated aged test based on ISO standard was conducted. The accelerated test was done for 180 days and the test condition was kept at temperature of 50°C and relative humidity of 70%. This paper compared the performance of VIP depending on the core material. Also, it showed the performance changed according to time and the estimated long-term performance of VIPs based on the accelerated aging test result was discussed. This paper would be a foundational research to help apply VIPs for the building industry.

주요어 : 진공단열패널, 열전도율, 가속노화시험, 장기성능

Keywords: Vacuum Insulation Panel, Thermal conductivity, Accelerated aging test, Long-term performance

OPEN ACCESS

Journal of KIAEBS 2020 February, 14(1): 54-65
<https://doi.org/10.22696/jkiaeb.20200006>

pISSN : 1976-6483
 eISSN : 2586-0666

Received: December 21, 2019

Revised: January 30, 2020

Accepted: January 31, 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

건물의 에너지 소비량은 국내 전체 에너지 소비량 중 산업 및 수송 분야 다음으로 가장 높은 비중을 차지하고 있다. 정부에서는 건물 에너지 절감 및 온실가스 감축을 위하여 제로에너지빌딩 의무화 로드맵을 발표하고 건축물의 에너지절약설계기준을 강화하는 등 다양한 노력들을 추진하고 있다. 건물의 에너지 소비량 중 난방 및 냉방 부하는 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 이를 줄이기 위해서는 건물의 단열성능이 매우 중요하다. 건물의 단열성능을 향상시키기 위하여 건축물의 열관류율은 꾸준히 낮아지고 있으며, 현재 중부 1지역 기준 건물 외벽의 열관류율은 패시브 하우스 수준인 $0.15 \text{ W/m}^2\text{K}$ 까지 강화되었다(Korea Energy Agency, 2017). 점점 강화되고 있는 건축물의 단열기준을 만족하기 위하여 건물의 단열두께 또한 계속해서 증가하고 있다. 단열두께의 증가는 건축물 외벽 두께의 증가로 이어지고 있으며, 이는 건물의 실내 점유 공간 감소라는 문제점을 야기하고 있다.

건물의 강화된 단열기준을 만족시키면서 건물의 점유 공간을 확보하기 위해서 진공단열패널(VIP; Vacuum Insulation Panel)과 같은 고효율, 고성능 단열재가 건축시장에서 요구되고 있다. 진공단열패널은 기존 냉장고 및 가전제품에 주로 사용되는 고효율 단열재이며, 건축용으로 사용되는 일반 단열재보다 약 6~10배 이상 높은 단열성능을 가지고 있다. 높은 단열성능을 가진 진공단열패널은 일반 건축용 단열재 적용 시 요구되는 외벽의 단열두께를 1/10 수준으로 감소시킬 수 있어 단열기준을 만족하면서 실내 점유 공간 감소 문제를 해결할 수 있는 대안으로 주목받고 있다(Park et al., 2013). 이미 유럽을 중심으로 진공단열패널의 건물 적용을 위한 연구는 활발히 이루어지고 있으며, 상용화를 위한 제품 개발 및 보급이 진행되고 있다. 진공단열패널은 기존 단일 재료로 구성되어 있는 단열재와 달리 심재와 외피 그리고 기타 다양한 재료들로 구성되어 있는 복합단열재이다. 특히 진공단열패널을 구성하고 있는 심재는 단열 용량을 결정하고 진공단열패널의 장기성능에 매우 중요한 영향을 미치는 요소 중 하나이다. 심재의 구조 및 공극 크기는 진공단열패널 열전도율 및 시간이 지남에 따른 진공단열패널의 열전도율 증가에 직접적인 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다(Mukhopadhyaya et al., 2008). 이와 같이 기존 건축용 단열재와 다른 특성과 구조를 가진 진공단열패널을 건축물에 적용하기 위해서는 진공단열패널의 내구성 및 장기성능에 대한 검증 및 연구가 필요하며, 이를 위하여 진공단열패널의 장기성능 평가가 요구되고 있다(Kim et al., 2017). 이에 본 연구에서는 진공단열패널의 심재에 따른 단열성능 분석 및 가속노화 실험을 통한 진공단열패널의 장기성능 평가를 목적으로 하였다.

연구방법 및 범위

진공단열패널의 단열성능 및 장기성능 평가를 위하여 현재 국내외에서 생산 및 상용화되고 있는 진공단열패널 제품을 대상으로 성능측정 및 가속노화시험이 진행되었다. 실험은 국내외 5개의 제조사로부터 6종류의 진공단열패널 제품을 대상으로 수행되었으며, 4종류의 흡

드실리카(FS) 심재의 진공단열패널과 2종류의 글라스화이버(GF) 심재의 진공단열패널 샘플을 각각 2개씩 실험에 사용되었다. 진공단열패널의 가속노화시험은 건축용 진공단열패널을 위해 국제표준으로 제안된 ISO/DIS 16478 [Thermal insulation products for buildings - Vacuum insulation panels (VIP) - Products specification] 초안에 근거하여 진행되었다. 가속노화 실험은 총 180일 동안 진행되었으며, 가속노화 조건은 건구온도 50℃, 상대습도 70%로 설정되었다. 진공단열패널 샘플의 장기성능 분석을 위하여 초기 열전도율 및 진공단열패널 내부 압력(진공도)이 측정되었으며, 가속노화시험이 진행되는 동안 30일마다 진공단열패널 샘플의 열전도율 및 내부압력이 측정되었다.

진공단열패널

진공단열패널 개요

진공단열패널(VIP)은 기존 단열재로 사용되는 발포 폴리스티렌(EPS; Expanded polystyrene), 폴리우레탄(PU; Polyurethane), 유리솜(Glass wool) 보다 약 6 ~ 10배 낮은 열전도율을 가지고 있는 고효율 단열재이다(Liang et al., 2017). Figure 1은 기존 상용화 되고 있는 건축용 단열재와 진공단열패널이 동일한 단일성능을 가질 때 요구되는 단열재의 두께를 비교한 사진이다. 사진을 보면 진공단열패널은 기존 건축용 단열재인 글라스울, 스티로폼, 폴리우레탄폼보다 훨씬 얇은 단열재 두께만으로도 동일한 단열성능을 만족시킬 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 진공단열패널은 단일재료로 구성되어 있는 기존 단열재와 달리 다양한 재료들로 구성되어 있는 복합단열재이다. 일반적으로 진공단열패널은 심재, 외피재 그리고 흡착제 및 건조제 등으로 구성되어 있으며, 구성하고 있는 재료의 특성에 따라 진공단열패널의 단열성능 및 특성이 다르게 나타난다.



Figure 1. Comparative thickness of different insulation materials to achieve the same thermal performance (Jeon et al., 2016)

진공단열패널 특성

진공단열패널은 다공성 구조의 심재를 투습성과 투기성이 낮은 기밀한 금속성 외피재로 밀봉한 후 패널 내부를 진공상태로 유지시킴으로써 매우 낮은 열전도율을 가지는 고효율 단열재이다. 진공단열패널의 구성은 Figure 2와 같다.

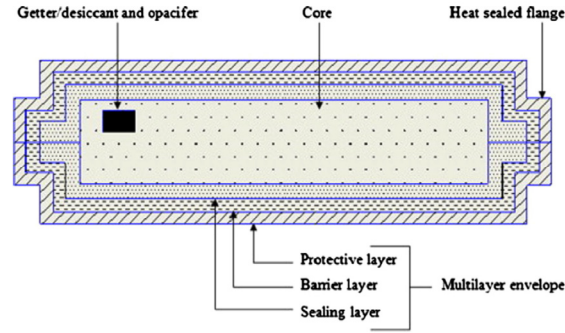


Figure 2. Composition of vacuum insulation panel (Kahnæs and Jelle, 2014)

진공단열패널을 구성하고 있는 재료의 특성은 진공단열패널의 단열 성능 및 장기내구성에도 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 진공단열패널의 심재는 100% 개방형 구조를 가지고 있으며, 10 nm 이하의 미세공극을 가진 다공성 재료가 심재로 이상적이다. 그 이유는 공극이 클수록 진공상태를 만들기 어렵고 매우 낮은 압력상태를 유지하기 어렵기 때문이다. 또한 매우 낮은 압력에서도 패널의 모양을 유지할 수 있는 압축강도가 요구된다(Baetens et al., 2010). 진공단열패널은 사용되는 심재에 따라 진공단열재 패널의 초기 단열 성능 및 특성이 다르게 나타난다. 진공단열패널 심재로는 글라스 화이버(GF; glass fiber)와 흙드실리카(FS; fumed silica)가 가장 많이 상용화되어 있으며, 이외에도 펄라이트(Perlite), 폴리우레탄 (PU foam), 폴리스티렌 폼(PS foam) 등이 사용되고 있다. Figure 3은 IEA/ECBCS Annex 39에서 발표된 심재에 따른 진공단열패널 특성을 분석한 그래프이며, 진공단열패널의 내부 압력이 증가할 때 심재종류에 따른 진공단열패널의 열전도율 변화를 비교분석하였다. 그래프를 보면 심재에 따라 진공단열패널의 초기 열전도율이 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 진공단열패널의 내부압력이 증가함에 따라 열전도율이 증가하는 것을 확인할 수 있는데, 글라스 화이버 심재의 경우 초기에 가장 낮은 열전도율을 가지지만 내부 압력 증가에 따른 열전도율 증가가 다른 심재보다 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 흙드 실리카를 심재로 사용한 진공단열패널은 압력 증가에 따른 열전도율 상승이 가장 적게 나타나는 것으로 나타났다.

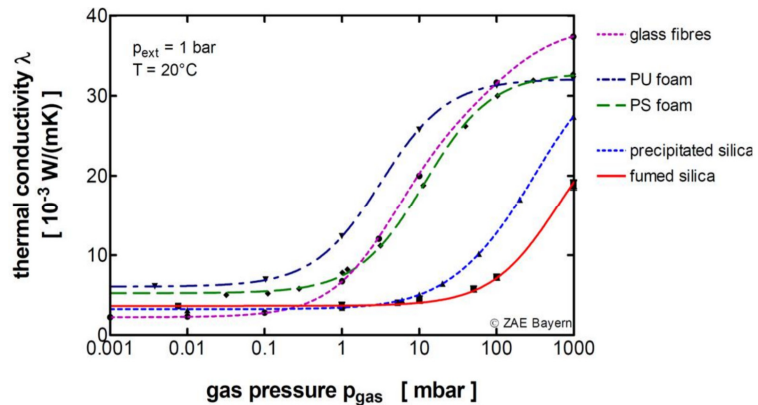


Figure 3. Thermal conductivity of different core materials (IEA/ECBCS Annex 39, 2005)

진공단열패널 가속노화시험 및 장기성능 평가

진공단열패널 성능 평가

심재에 따른 진공단열패널 장기성능 및 특성 분석을 위해 국내외 5개의 진공단열패널 제조사로부터 4종류의 흡드 실리카 진공단열패널(FS VIP)과 2종류의 글라스 화이버 진공단열패널(GF VIP) 제품을 준비하였다. FS VIP는 금속성 외피재(Metalized film)가, GF VIP의 경우 알루미늄 외피재(Aluminium film)가 적용되었다. Figure 4는 연구에 사용된 진공단열패널 샘플이며, 크기는 300 mm × 300 mm, 두께는 20 mm로 동일하다.

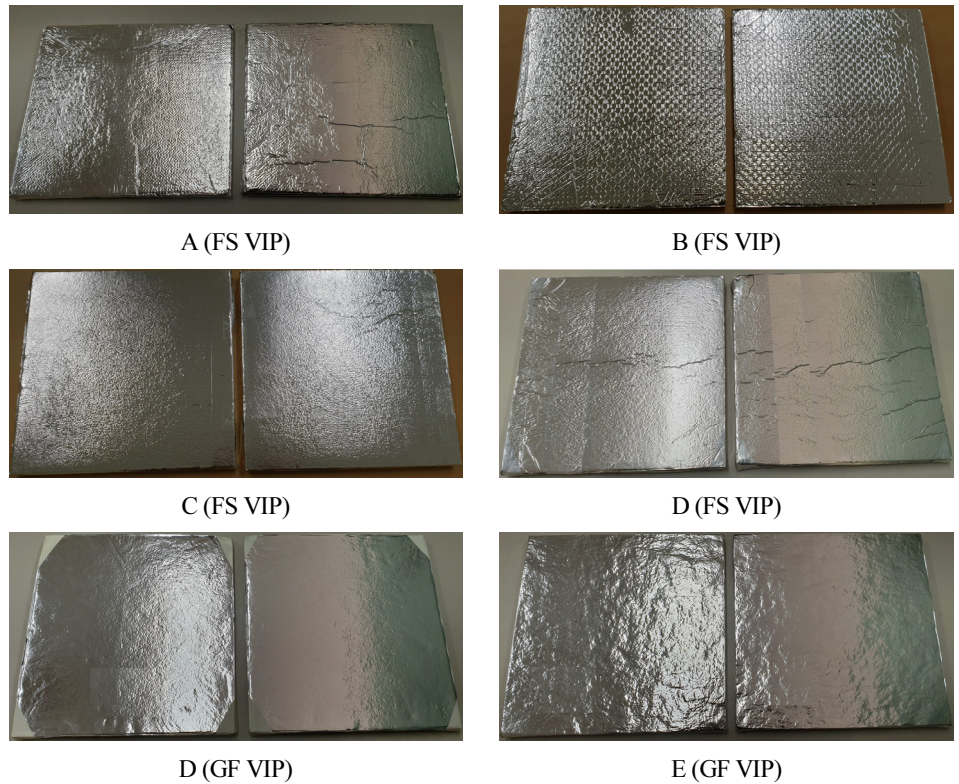


Figure 4. VIP samples for experiment

열전도율 및 재료 물성치가 다른 외피재와 심재 등 다양한 재료로 구성되어 있는 복합 단열재인 진공단열패널은 패널의 중심부와 모서리 등 진공단열패널의 위치에 따라 단열 성능의 차이가 발생할 수 있다. 또한 단열성능이 저하되는 추세도 패널 위치에 따라 다르게 발생할 수 있다. 본 실험에서는 진공단열패널 중심부의 열전도율을 측정하였으며, 실험에 사용된 모든 진공단열패널은 패널 중심부 동일한 위치에서 열전도율이 측정되었다. 열전도율은 ISO 8301 표준에 근거한 Heat flow meter 방식의 열전도율 측정 장비를 사용하였다(Figure 5).



Figure 5. Thermal conductivity measuring equipment

진공단열패널의 내부압력(진공도)은 IEA/ECBCS Annex 39 Study on VIP-components and Panels for Service Life Prediction of VIP in Building Applications (Subtask A)에서 제시하고 있는 진공단열패널 내부압력 측정 방법으로 측정되었다. 진공단열패널 내부압력 측정 장비의 원리는 Figure 6과 같다. 측정원리는 진공 챔버의 내부 압력을 감소시키면 챔버 내부 압력이 진공단열패널 내부 압력과 동일해지는 시점부터 진공단열패널의 외피가 심재로부터 박리되게 된다. 이를 레이저 센서로 거리를 측정하고 심재에서 외피가 박리되는 시점을 분석하여 진공단열패널의 내부압력을 결정할 수 있다. Figure 7은 본 연구에서 사용된 진공단열패널 내부압력 측정을 위해 사용된 측정 장비이며, 진공챔버와 레이저 센서로 구성되어 있다.

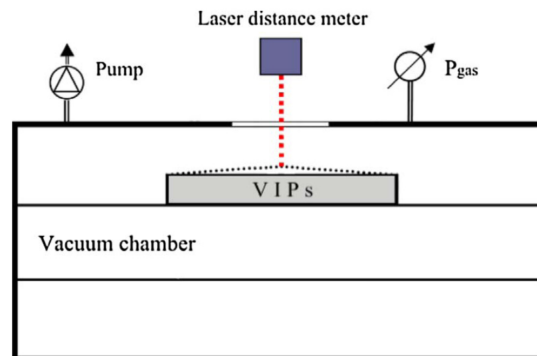


Figure 6. Conceptual diagram of the vacuum chamber equipment based on pressure compensation method (Kim et al., 2017)



Figure 7. Inner pressure measuring equipment for VIP

진공단열패널 샘플들의 초기 성능 및 특성을 평가하기 위해 가속노화시험 이전에 진공단열패널 샘플들의 열전도율 및 내부압력을 측정하였다. 실험을 통해 측정된 진공단열패널 샘플들의 초기 열전도율 및 내부압력 값은 Table 1과 같다.

Table 1. Thermal conductivity and inner pressure of VIPs

VIP Sample		Thermal conductivity (W/mK)	Inner pressure (mbar)
A (FS)	1	0.00458	9.7
	2	0.00469	9.3
B (FS)	1	0.00399	2.6
	2	0.00395	2.7
C (FS)	1	0.00401	1.7
	2	0.00398	1.5
D (FS)	1	0.00401	1.3
	2	0.00390	1.4
D (GF)	1	0.00241	35.9
	2	0.00234	44.6
E (GF)	1	0.00232	17.1
	2	0.00234	19.6

진공단열패널 샘플들의 초기 열전도율을 비교해보면 FS 심재의 진공단열패널 열전도율은 0.0039 ~ 0.00469 W/mK 사이의 값을 가지며, GF 심재의 진공단열패널의 경우 초기 열전도율은 0.00232 ~ 0.00241 W/mK 사이의 값을 가지는 것으로 나타났다. GF 심재 진공단열패널의 초기 열전도율은 FS 심재 진공단열패널 보다 약 2배 낮은 열전도율 값을 가지는 것으로 분석되었다. 진공단열패널 초기 내부압력은 제조사에 따라 차이가 발생하는 것을 확인 할 수 있었으며, 진공단열패널의 내부압력은 대체적으로 GF 심재의 진공단열패널 샘플이 FS 심재 진공단열패널 보다 높은 것으로 확인되었다.

진공단열패널 가속노화시험

초기 열전도율 및 내부압력이 측정된 진공단열패널 샘플들은 진공단열패널 국제표준으로 제안되고 있는 ISO/DIS 16478 Thermal insulation production for buildings – Vacuum insulation panels (VIP) - Products specification (ISO, 2018)에 근거하여 180일 동안 가속노화시험을 진행하였다. 가속노화시험을 위하여 Figure 8과 같은 항온항습 챔버가 사용되었으며, 가속노화시험 조건은 건구온도 50℃, 상대습도 70%로 설정하였다. 가속노화시험을 통한 진공단열패널의 장기성능 분석을 위하여 30일 간격으로(30일, 60일, 90일, 120일, 150일, 180일) 진공단열패널의 열전도율 및 내부압력이 측정되었다.



Figure 8. Constant temperature and humidity chamber for aging test of VIPs (left: exterior, right: inside of equipment)

Figure 9는 가속노화시험이 진행됨에 따라 진공단열패널 샘플들의 열전도율 변화를 30일 간격으로 나타낸 그래프이다.

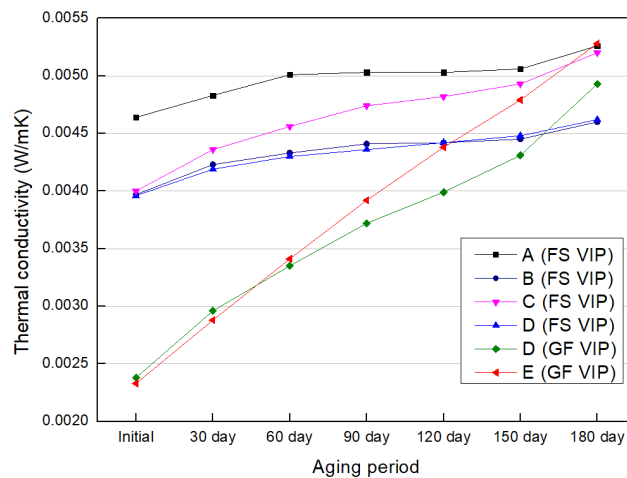


Figure 9. Change of thermal conductivity depending on the aging period

가속노화시험을 통한 진공단열패널 샘플들의 열전도율 변화를 분석한 결과 전체적으로 가속노화시험이 진행됨에 따라 진공단열패널 샘플들의 열전도율이 상승하는 것으로 나타났다. 또한, FS 심재와 GF 심재의 진공단열패널 샘플들의 열전도율 비교를 통해 진공단열패널을 구성하고 있는 심재의 종류에 따라 열전도율 증가 추세가 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그래프를 보면 FS 심재의 진공단열패널의 경우 60일까지 열전도율이 상승하지만 60일 이후부터는 일정한 열전도율을 유지하는 것으로 나타났으며, 150일 이후 열전도율이 다시 증가하는 것으로 확인되었다. 그러나 GF 심재의 진공단열패널의 경우 가속노화시험 동안 열전도율이 꾸준한 기울기로 증가하는 것을 확인할 수 있다. GF 심재의 진공단열패널 샘플의 열전도율이 증가 추세는 FS 심재의 진공단열패널 샘플보다 더 크게 나타났으

며, 이로 인해 초기 FS 진공단열패널 보다 낮은 열전도율을 갖고 있던 GF 심재의 진공단열패널이 가속노화시험이 진행되면서 FS 심재의 진공단열패널 열전도율을 역전하는 것으로 나타났다.

Table 2는 진공단열패널의 초기 열전도율과 가속노화시험이 끝난 180일 후 열전도율 값과 열전도율 증가율을 나타낸 것이다. 가속노화시험에 따른 열전도율 증가는 GF 심재의 진공단열패널이 약 101.3 ~ 127.6%로, 초기 열전도율 값의 두 배 이상 증가 된 것으로 분석되었다. FS 심재의 진공단열패널의 경우 180일 후 열전도율은 초기 열전도율 대비 약 13 ~ 35% 증가한 것으로 분석되었다. 이를 통해 진공단열패널의 심재에 따라 경시변화에 따른 열전도율 증가는 GF 심재가 FS 심재보다 약 3 ~ 10배 높은 것으로 분석되었다.

Table 2. Thermal conductivity and inner pressure of VIPs

VIP Sample		Thermal conductivity (W/mK)	Thermal conductivity after 180 days (W/mK)	Inner pressure (mbar)
A (FS)	1	0.00458	0.00522	13.97
	2	0.00469	0.0053	13.01
B (FS)	1	0.00399	0.00454	13.78
	2	0.00395	0.00457	15.69
C (FS)	1	0.00401	0.00541	34.91
	2	0.00398	0.00528	32.66
D (FS)	1	0.00401	0.00478	19.2
	2	0.0039	0.00463	18.72
D (GF)	1	0.00241	0.00515	113.69
	2	0.00234	0.00471	101.28
E (GF)	1	0.00232	0.00528	127.59
	2	0.00234	0.00527	125.21

시간이 지남에 따른 진공단열패널의 열전도율이 증가되는 원인은 Figure 10을 통해 확인할 수 있다. Figure 10은 가속노화시험 기간 동안 측정된 진공단열패널의 열전도율과 내부압력을 분석한 표이다. 그래프를 보면 시간이 지남에 따라 진공단열패널의 열전도율이 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 이와 동시에 진공단열패널의 내부압력 또한 증가하고 있는 것을 확인할 수 있다. 시간이 지남에 따라 외부의 습기와 기체가 진공단열패널 내부로 침투하게 되며, 이로 인해 진공단열패널 내부 압력이 증가한 것으로 분석된다. 진공단열패널 내부압력의 증가 추세는 진공단열패널의 열전도율 증가 추세와 유사하며, 이를 통해 진공단열패널의 내부 압력증가가 진공단열패널 열전도율 증가로 이어진 것으로 분석되었다. 또한 진공단열패널의 내부압력의 증가 및 이에 따른 열전도율 증가는 심재의 종류에 따라 차이가 크게 나타났으며, FS 및 GF 심재의 구조 및 공극 크기가 가속노화 시험에 따른 진공단열패널 장기 성능에 영향을 준 것으로 분석되었다.

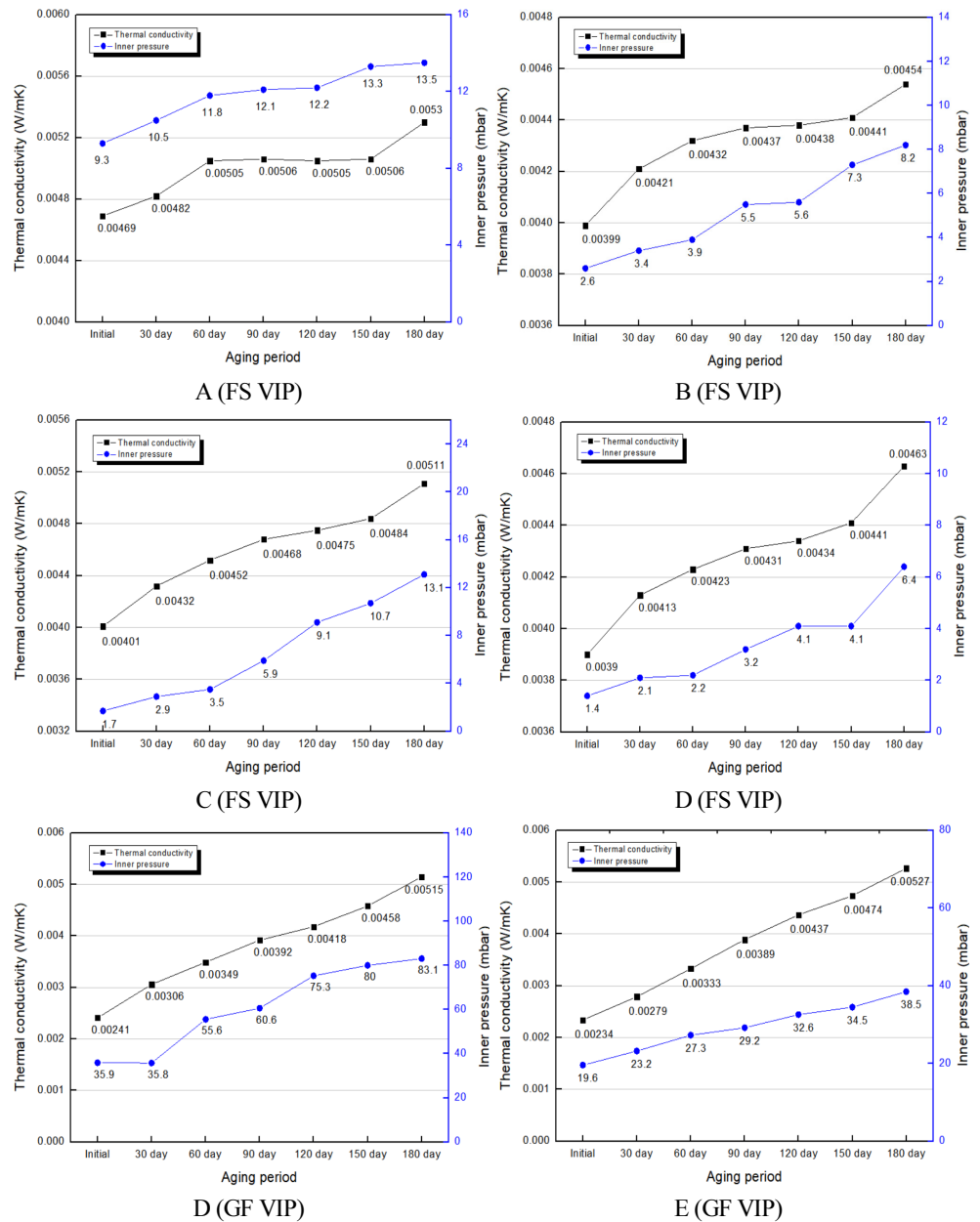


Figure 10. Change of thermal conductivity and inner pressure

결론

본 논문에서는 180일 동안 진행된 가속노화시험을 통해 진공단열패널의 장기성능을 평가하였으며, 심재에 따른 진공단열패널의 특성을 비교분석 하였다. 본 논문의 연구결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 진공단열패널들의 초기 열전도율은 심재의 종류에 따라 다르게 나타나고 있으며, 흙드실리카(FS) 심재의 경우 0.0039 ~ 0.00469 W/m K, 글라스 화이버(GF) 심재의 경우 0.00232 ~ 0.00241 W/m K 사이의 값을 가지는 것으로 확인되었다.

- (2) 진공단열패널의 장기성능분석을 위한 가속노화시험 결과 시간이 지남에 따라 진공단열패널의 열전도율은 증가하는 것으로 분석되었으며, 열전도율 및 내부압력이 유사한 추세로 상승하는 것이 확인되었다. 가속노화가 진행됨에 따라 외부로부터의 수분 및 기체가 진공단열패널 내부로 침투하게 되며, 이로 인한 진공단열패널 내부압력 증가가 열전도율의 증가에 영향을 미치는 것으로 확인되었다.
- (3) FS와 GF 심재에 따라 가속노화에 따른 진공단열패널의 열전도율 증가 추세는 다르게 나타났다. FS심재의 진공단열패널의 경우 가속노화 초기 열전도율이 증가하지만 60일 이후 일정한 단열성능을 유지하는 것으로 확인되었다. 그러나 GF 심재의 진공단열패널의 경우 FS 심재 진공단열패널보다 큰 추세로 열전도율이 계속해서 증가하였으며, 이로 인해 초기 매우 낮은 열전도율을 가지고 있음에도 불구하고 FS 심재 진공단열패널보다 높은 열전도율로 증가하였다. 가속노화시험 후 진공단열패널의 열전도율 증가는 GF 심재가 FS 심재보다 약 3 ~ 10배 높은 것으로 확인되었다.
- (4) 본 연구를 통해 심재에 따른 진공단열패널의 장기성능을 확인할 수 있었으며, 실험결과를 통해 경시변화에 따른 단열성능 저하 및 장기성능은 FS 심재의 진공단열패널이 GS 심재의 진공단열패널 보다 크게 유리하다는 것이 확인되었다.

본 연구를 통해 진공단열패널의 장기성능은 심재의 종류에 따라 크게 영향을 받는 것으로 분석되었다. 하지만 진공단열패널의 심재뿐만 아니라 심재를 둘러싸고 있는 외피 또한 진공단열패널의 장기성능에 영향을 미치는 중요한 요소이며, 본 연구에서는 동일한 심재에 동일한 종류의 외피재가 적용된 진공단열패널 샘플을 실험함으로써 외피에 대한 고려 및 분석이 충분히 반영되지 못했다는 한계가 있다. 향후 추가 연구에서는 진공단열패널의 심재뿐만 아니라 외피 종류에 따른 진공단열패널의 특성 및 장기성능에 대한 실험 및 분석이 필요하다.

후 기

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 이공학개인지초 후속연구지원사업(No. NRF-2018R1D1A1A09083870)과 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20173010013420).

References

1. Baetens, R., Jelle, B.P., Thue, J.V., Tenpierik, M.J., Grynning, S., Uvsløkk, S., Gustavsen, A. (2010). Vacuum insulation panel for building application: A review and beyond. *Energy and Buildings*, 42(2), 147-172.
2. Jeon, W.P., Kwon, G.J., Kim, J.H., Kim, J.T. (2016). The Study on Thermal Performance Evaluation of Building Envelope with VIPs. *Korea Institute of Ecological Architecture and Environment Journal*, 16(1), 5-10.

3. Kalnæs, S.E., Jelle, B.P. (2014). Vacuum insulation panel products: A state-of-the-art review and future research pathways. *Applied Energy*, 116, 355-375.
4. Kim, J.H., Boafo, F.E., Kim, S.M., Kim, J.T. (2017). Aging performance evaluation of vacuum insulation panel (VIP). *Case Studies in Construction Materials*, 7, 329-335.
5. Liang, Y., Wu, H., Huang, G., Yang, J., Ding, Y. (2017). Prediction and Optimization of Thermal Conductivity of Vacuum Insulation Panels with Aerogel Composite Cores. *Procedia Engineering*, 205, 2855-2862.
6. Mukhopadhyaya, P., Kumaran, K., Normandin, N., van Reenen, D., Lackey, J. (2008). High-performance vacuum insulation panel: development of alternative core materials. *Journal of Cold Regions Engineering*, 22(4), 103-123.
7. Park, S.H., Koo, B.K., Lim, J.H., Ryu, S.R., Song, S.Y. (2013). Energy Performance and Economic Analysis of EIFS using Vacuum Insulation Panel. *Proceeding of the Architectural Institute of Korea Conference*, 33(1), 269-270.
8. IEA/ECBCS Annex 39 (2005). Study on VIP-components and Panels for Service Life Prediction of VIP in Building Applications (Subtask A).
9. Korea Energy Agency. (2017). Commentary on Energy Conservation Design Standard of Building.
10. ISO/DIS 16478. (2018). Thermal insulation products for buildings - Vacuum insulation panels (VIP) - Products specification.