

# 가속노화 시험을 통한 진공단열패널(VIP)의 장기성능 평가 연구

김진희\* · 김준태\*\*\*

\*공주대학교 그린에너지기술연구소

\*\*공주대학교 건축학부

## The Study of Long-Term Performance Evaluation of Vacuum Insulation Panel(VIP) with Accelerated Aging Test

Kim Jin-Hee\* · Kim Jun-Tae\*\*\*

\*Green Energy Technology Research Center, Kongju National University

\*\*Department of Architectural Engineering, Kongju National University

†Corresponding author: jtkim@kongju.ac.kr

### Abstract

Energy efficiency solutions are being pursued as a sustainable approach to reducing energy consumption and related gas emissions across various sectors of the economy. Vacuum Insulation Panel (VIP) is an energy efficient advanced insulation system that facilitates slim but high-performance insulation, based on a porous core material evacuated and encapsulated in a barrier envelope. Although VIP has been applied in buildings for over a decade, it wasn't until recently that efforts have been initiated to propose and adopt a global standard on characterization and testing of VIP. One of the issues regarding VIP is its durability and aging due to pressure and moisture dependent increase of the initial low thermal conductivity with time; more so in building applications. In this paper, the aging of commercially available VIP was investigated experimentally; thermal conductivity was tested in accordance with ISO 8302 standard (guarded hot box method) and long-term durability was estimated based on a non-linear pressure-humidity dependent equation based on study of IEA/ECBCS Annex 39, with the aim of assessing durability of VIP for use in buildings. The center-of-panel thermal conductivity after 25 years based on initial 90% fractile with a confidence level of 90 % for the thermal conductivity ( $\lambda_{90/90}$ ) ranged from 0.00726-0.00814 (W/m K) for silica core VIP. Significant differences between manufacturer-provided data and measurements of thermal conductivity and internal pressure were observed.

**Keywords:** 진공단열패널(Vacuum insulation panel), 가속노화(Accelerated aging), 열전도율(Thermal conductivity), 내부압력(Internal pressure), 장기성능(Long-term performance)

### 1. 서론

오늘날의 건물은 패시브 건축을 넘어 제로에너지 건축을 추구하는 시대로 발전되고 있다.

 OPEN ACCESS



Journal of the Korean Solar Energy Society  
Vol.37, No.4, pp.35-47, August 2017  
<https://doi.org/10.7836/kjes.2017.37.4.035>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 18 May 2017

Revised: 28 August 2017

Accepted: 30 August 2017

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

건물에서 에너지 소비를 최소화하고 에너지를 생산하여 건물 자체적으로 에너지를 자립하기 위한 노력이 이루어지고 있다. 이를 위해 건물외피의 에너지손실을 최소화하기 위해 단열을 지속적으로 보강하고 있으며, 요구되는 단열기준을 만족하기 위해 단열두께는 지난 몇 년 사이 두 배에 가깝게 강화되었다.

이러한 배경 속에서 최근 몇 년 사이 고성능 단열재로서 진공단열패널이 건축산업 시장에서 소개되었으며 기초개발 단계를 거쳐 몇몇 기업을 통해 상용화가 시작되었다. 이미 유럽을 중심으로 진공단열패널의 건물적용에 대한 보급이 활발히 이루어지고 있는 실정이며 상용화가 이루어져 보급되고 있다. 그러나 건물에 진공단열패널의 적용 시 기존 일반 단열재에 비해 월등히 높은 단열성과 함께 열교 현상 및 몇몇 주의를 요하며 내구성 측면에서 문제를 갖고 있다. 따라서 건물에서 진공단열재 제품의 성능 및 내구성 확보는 중요하며 건물을 위해 장기성능의 평가는 요구된다.

진공단열패널을 위한 성능 평가기준은 아직까지 준비되어있지 않다. 그러나 전문가 그룹을 통해 진공단열패널의 열성능 및 내구성 평가방법은 이미 발표된 바 있다.

진공단열패널(VIP)은 외피재료로 밀봉된 다공성 코어 재료의 진공구조로 구성된 첨단 단열기술이며, 기존 전통적인 단열재들에 비해 매우 얇고 높은 단열성능으로 단열이 가능하다<sup>1,2,3</sup>. 이미 국외에서 다양한 연구가 이루어졌으며, 진공단열패널의 코어 및 외피봉지 재료의 조건에 따른 특성 및 최적화, 진공단열패널의 열적 및 기계적 특성 그리고 진공단열패널의 새로운 적용에 관한 연구뿐만 아니라 장기 내구성 평가연구들이 수행되었다<sup>4,5,6,7,8,9,10,11,12,13</sup>. 진공단열패널은 시간이 지남에 따라 초기 내부압력이 증가하는데, 이는 진공 및 밀봉공정 후 패널에 남아있는 잔류가스 및 코어재료에서의 가스배출 그리고 외피 봉지재의 밀봉영역에서 수분 침투 및 누기 때문이다<sup>14</sup>. 최근 한 연구에 따르면, 진공단열패널 내에 가스 및 수분침투에 의한 성능저하의 영향 외에도, 물리적으로 흡착된 물분자와 Si와 O를 포함하는 용존 이온에 의해 유도된 나노사이즈 SiO<sub>2</sub> 입자 사이 계면 면적의 증가 때문에 흠드실리카 구조는 장기적으로 변화한다고 발표하였다<sup>15</sup>.

본 연구는 현재까지 개발된 진공단열패널 제품을 대상으로 열전도율 및 내부 압력을 평가하였으며 이를 바탕으로 진공단열패널의 내구연한 및 장기성능을 평가하는 것이 목적이다. 이를 위해 세계에너지기구의 건물분야 국제공동연구로 수행된 IEA/ECBCS(현재 EBC 프로그램) Annex 39 연구<sup>16</sup>에 기초하여 가속노화 챔버와 압력 보상에 의한 진공도 측정장비를 제작하였다. 제작된 장비를 통해 진공단열패널의 열전도율 및 내부압력을 측정하였으며, 측정된 값에 의해 진공단열패널의 내구연한 및 25년 후의 열전도율 값을 제시하였다.

## 2. 건물용 진공단열패널

### 2.1 진공단열패널의 개요

진공단열재는 통상적으로 VIP(Vacuum Insulation Panel)로 불려 지며 단열재 내부를 1 mbar 이하로 진공 처리하여 열전도율 값이 0.0045 W/mK 이하인 고성능 단열재이다. 따라서 열전도율이 0.031~0.045 W/mK 인 기존의 일반적인 건물용 단열재보다 단열성능이 약 10배가량 우수한 단열 판재이다. 주로 건물용이 아닌 냉

동기나 냉장고와 같은 전자기기에 사용하기 위해 개발되어 왔으나 건물에서의 에너지 효율 향상 및 제로에너지 건물의 보급 정책으로 건물용 진공단열패널의 개발이 확대되고 있다.

건물용 진공단열패널은 열저항과 열전도율, 내부압력, 외관(길이, 너비, 면적, 평탄도), 두께, 화재에 대한 반응, 기타(치수안정성, 변형, 압축강도 등) 등이 고려되어야 한다.

진공단열패널은 건물의 수명(사용기간)기간 동일한 성능으로 문제없이 잘 작동되어야 하며 건축자재로서 진공단열패널 제품의 내구성은 중요하다. 진공단열패널의 코어재료에서 내부 압력의 상승 및 수분의 축적은 진공단열패널의 장기 열저항과 수명에 영향을 주는 내구성능이다. 내부압력 상승 및 수분축적은 수분투과 무게만으로도 쉽게 측정할 수 있으나 진공단열패널의 내부압력을 측정하기 위한 일반적인 방법은 없다. ZAE-Bayeren, EMPA, NRC 은 압력을 감소시키는 것을 기초로 진공단열패널의 내부압력 측정을 성공적으로 적용하였다<sup>16)</sup>. 이는 진공챔버에 진공단열패널 시편을 넣고 지속적으로 챔버 내의 진공단열패널 주변압력을 감소시키는 방식이다.

## 2.2 진공단열패널의 성능

### (1) 열전도율

진공단열패널의 열전도율 평가는 단일 재료로 이루어진 기존의 단열재와 다르게 평가되어야 한다. 진공단열패널은 상대적으로 열전도가 높은 외피 봉지재를 갖는 불균일한 재료이며(Fig. 1), 이 때문에 패널의 가장자리에 열교(thermal bridge)를 형성한다(Fig. 2). 이 열교부위 때문에 진공단열패널의 유효 또는 전체 열전도율(effective thermal conductivity)은 패널 중앙의 열전도율 보다 더 높다. 진공단열패널의 유효 열전도율은 제품 자체뿐만 아니라 건물적용 부위에서 인접한 결합부재로부터 발생하는 모든 비 균질 요소에 영향 받는다. 진공단열패널의 유효열전도율은 패널의 크기, 두께, 중앙부 열전도율 그리고 선형열관류율에 의해 결정되며 다음 식(1)<sup>16)</sup>과 같이 계산될 수 있다.

$$\lambda_{eff} = \lambda_{cop} + \psi_{vip} \cdot d \cdot p / A \quad (1)$$

여기서,  $\lambda_{cop}$ 는 패널 중앙부의 열전도율(W/m K),  $d$ 는 패널의 두께(m),  $A$ 는 패널의 면적(m<sup>2</sup>),  $p$ 는 면적  $A$ 의 둘레(m) 그리고  $\psi_{vip}$ 은 선형열관류율(W/m K)이다. 유효열관류율( $\lambda_{eff}$ )은 패널 두께, 중앙부 열전도율, 외피 필름(barrier film)의 두께, 필름 열전도율에 의존된다. 이러한 배경으로 진공단열패널의 열저항과 열전도율은 1차원 열전달 상태의 열보호상자(Guarded hot box) 시험방법에 따라 측정되어야 하며 열교를 포함한 유효열전도율로 평가되어야 한다.

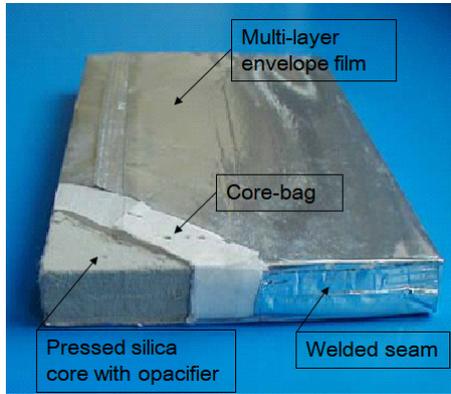


Fig. 1 Components of a VIP<sup>17)</sup>

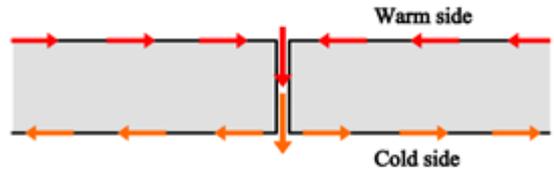


Fig. 2 Schematic representation of a cold bridge between two VIP

## (2) 노화 및 내구성능

진공단열패널의 열전도율 변화는 패널 내부의 압력과 수분 함유량에 의존되며 내부압력이 높을수록, 수분함유량이 증가할수록 열전도율은 증가된다. 진공단열패널의 가속노화에 따른 열전도율의 변화를 통해 내구성 및 장기성능은 평가될 수 있으며, 진공단열패널의 중요한 성능지표라 할 수 있다. 진공단열패널의 가속노화 (Accelerated aging: 에이징) 특성 평가를 위해, 시험방법은 3개의 진공단열패널에 대해 23°C/50% 조건에서 6개월 이상 저장되어야 하고, 저장 시작 후 3개월 그리고 6개월 후의 열전도율과 내부압력(패널무게)을 측정한다. 그리고 측정된 내부 압력과 무게로부터 연간 진공단열패널의 내부압력 변화와 무게변화로 장기성능 값(내구연한)에 대해 계산할 수 있다. 또한 계산된 내부압력과 무게 변화로 25년 후의 열전도율 값을 산출할 수 있다<sup>16)</sup>. 또한 가속노화 시험을 통해 진공단열패널 내부의 공기압력 증가에 의존하는 열전도율 변화는 평가될 수 있다. 초기 열전도율 시험조건은 EN 12667 및 ISO 8302에 따르며 초기 내부압력은 진공챔버에 의한 압력보상법으로 시험될 수 있다. 진공단열패널의 가속노화 시험을 위해 다음의 시험조건 및 기간이 경과한 후 최종 열전도율에 대해 측정한다. 두 개의 진공단열패널 시편을 통해 80°C와 -15°C로 12시간 간격으로 변화를 주어 8일 동안 항온항습 챔버에 저장한 후 열전도율과 80°C에서 180일 동안 저장한 후 열전도율 값을 측정하여 가속노화에 따른 성능을 평가할 수 있다.

## 3. 진공단열패널의 성능

### 3.1 열전도율

본 연구는 IEA ECBCS Annex 39에 기초하여 가속노화 시험방법에 따라 A, B, C 제조사의 진공단열패널 제품을 시험 평가하였다. 이를 위해 초기 열전도율과 가속노화 후 열전도율을 평가하였으며, ISO 8302 표준에 따라 시편 두 개를 이용하는 보호 상자(Guarded hot box) 시험장치를 이용하여 한국표준과학연구원에서 측정되었다. 시험은 하나로 간주되는 동일한 두 개의 시편이 사용되었으며, 두 시편 사이에 가해진 히터 열류량에 의해

고온면(가열판측)과 저온면(냉각판측)의 온도 차이에 의해 열전도율이 측정된다.

Fig. 3은 3개 제조사의 진공단열패널 샘플로서, 300 mm × 300 mm 크기, 20 mm 두께의 제품이다. Fig. 3에서, 샘플 A의 경우 글라스울 심재(based glass wool)의 진공단열패널로서 알루미늄 호일 외피이며 샘플 B, C의 경우, 흡드실리카(fumed silica) 심재(core material)의 진공단열패널로서 metalized film 외피이다. 사진에서 확인할 수 있듯이 각 제조사마다 진공단열패널 외형의 특성 차이는 다소 크다 할 수 있다. 특히 심재의 종류에 따라 진공단열패널의 표면 거칠기가 확연히 다른 차이를 보이며, 패널 측면의 마감 면의 고르기 또한 확연한 차이를 확인할 수 있다. 제조사로부터 제공받은 세 개의 진공단열패널의 초기 열전도율 값은 각각 0.0015, 0.00345 W/m K 그리고 0.00361 W/m K이며, 이는 제조사에서 자체 측정한 값이다.

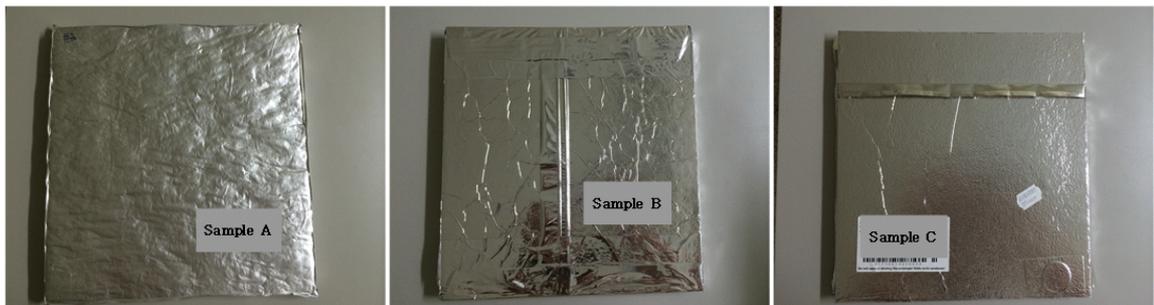


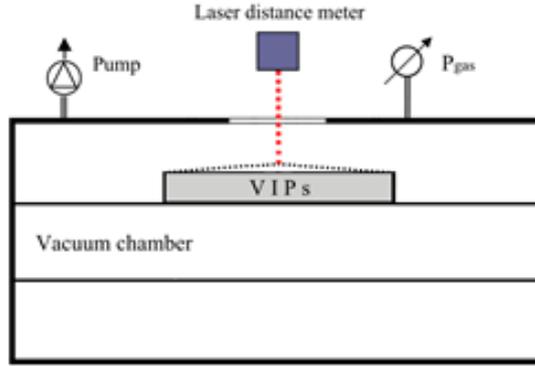
Fig. 3 VIP samples for thermal conductivity and aging experiment



Fig. 4 Constant temperature and humidity chamber for aging test of vacuum insulation panels: exterior (left) and Interior (right)

세 개의 진공단열패널 시험샘플의 열전도율을 측정하였으며, Fig. 4와 같이 진공단열패널 시험은 8일 동안 80°C와 -15°C로 12시간 간격으로 온도 변화를 가하는, 가속노화 시험조건으로 항온항습 챔버에서 노출 후 다시 열전도율 값을 측정하였다. 진공단열패널의 노화 및 가속노화 조건을 만들기 위해 항온항습 챔버를 제작하였으며 제작된 챔버는 DIN 12880, IEC 60068 표준에 기초하여 제작하였다. 챔버는 테스트 시편 크기 1 m × 1 m × 1 m (가로/세로/높이)까지 측정이 가능하며 요구되는 시험주기를 설정하여 시편을 보관할 수 있다. 온도 -40°C ~

150°C, 습도 45 ~ 95%범위로 작동이 가능하며(온도 0.3~0.1, 습도 0.5~0.6의 오차) Fig. 5는 조성된 가속노화 조건을 위한 항온항습 챔버의 외관 모습이다.



**Fig. 5** Conceptual diagram of the vacuum chamber measured the VIP envelope lift-off by pressure compensation

열전도율 시험결과, 샘플 A, B, C 는 시험조건, 평균온도 10°C에서 0.00143, 0.00387 그리고 0.00429 W/m K로 각각 나타났다. 그리고 평균온도 23°C에서 0.00235, 0.00420, 그리고 0.00448 W/m K 로 각각 나타났다. C 제조사 진공단열패널 제품의 경우, 제조사에서 제시한 자체 측정 열전도율 값과 달리, 초기 열전도율 값은 0.00429 W/m K로 나타났다. 이와 같이 시험방법에 따라 진공단열패널의 단열성능 차이가 30% 가량 나는 것을 확인할 수 있다.

이후 가속노화 조건에 대한 열전도율 시험결과, 샘플 A, B, C의 열전도율은 0.00185, 0.00394 그리고 0.00431 W/m K로 나타났다. 샘플 A의 경우 가속노화 전 열전도율에 비해 가속노화 후 열전도율이 약 29% 증가되었으며 3개의 샘플 중 가장 높게 증가되었다. 샘플 B, C의 경우 가속노화 후 0.00387, 0.00429 W/m K로 각각 나타났으며 이는 초기 열전도율에 대비하여 증가율이 각각 1.8% 0.5% 미만으로 분석되었다.

추가적으로 샘플 C의 경우 가속노화 16일 이후 측정결과, 열전도율은 0.00461 W/m K로 나타났으며 초기 열전도율(0.00429 W/m K) 대비 약 7.5% 증가되었다.

### 3.2 진공단열패널의 내부압력

#### (1) 진공챔버

열전도율 평가와 함께 진공단열패널의 내부압력 변화 시험을 수행하였으며 제품의 초기 진공도와 가속노화 후 내부압력, 즉 진공도를 평가하였다. 열전도율 및 장기성능에 영향을 미치는 진공단열패널들의 내부압력 평가를 위해 진공챔버를 제작하였다. 진공챔버는 IEA/ECBCS Annex(Subtask A)에 기초하였으며 압력보상에 의한 내부압력 측정 시험장치이다. 챔버는 테스트 시편 1 m × 1 m × 1 m (가로/세로/높이) 까지 측정이 가능하며 진공도 0.001 Torr (0.0013 mbar) 까지 낮출 수 있다. 진공챔버는 0.1%의 오차율을 갖는 장치로서 미세 거리

변화를 측정하는 고정밀도 레이저 센서가 함께 장치 되어있다. 진공챔버에서 레이저 센서의 측정거리는 130 mm, 측정 범위는  $\pm 15$  mm ~  $\pm 12$  mm 이며,  $\pm 0.1\%$  FS ~  $\pm 0.25\%$  FS의 정확도를 갖는다. 측정원리는 진공 단열패널 내에 작은 과압으로 인해 패널외피와 코어재료가 분리되는 시점에서 외부압력과 함께 광학거리 측량의 평균값이 기록된다. 챔버 내에 감압에 의해 챔버 내의 압력과 진공단열패널 내부 압력이 동일해지는 시점을 분석하여 진공단열패널의 내부압력을 결정할 수 있다. Fig. 5에서 제작 된 압력보상법에 의한 진공챔버를 이용한 진공단열패널의 내부압력 측정장치의 개념도를 보여주고 있다. 챔버 내의 압력이 진공단열패널 압력 이하로 감소되면, 진공단열패널 외피는 코어표면(core surface)으로부터 박리된다(lifts off). 이것은 레이저센서를 사용하여 기록 될 수 있으며 외피표면의 거리는 챔버압력의 함수로서 패널 외피표면 위쪽에 위치한 레이저센서 미터로 지속적으로 측정된다. Fig. 6은 진공챔버에 정밀 레이저 센서가 장치 된, 압력보상에 의한 진공도 측정 장비의 외관 모습이다.



Fig. 6 Internal pressure measuring device for VIP

## (2) 내부압력(진공도) 시험방법

진공단열패널의 내부 압력 및 진공도는 시간경과에 따른 변화에 의해 제품의 열전도율이 변화되며, 내구성 및 장기성능을 결정하는 중요한 요소이다. 초기 제조사에 의해 제공되는 진공단열패널의 진공도는 각기 다른 측정방식 및 추산방식으로 결정되어 제품의 성능지표로 나타내고 있다. 따라서 적절한 성능수준에 맞는 표준 조건에서 동일한 방법으로 내부압력을 측정하여 비교해야 한다.

본 연구는 3개 제조사의 샘플을 대상으로 압력보상법에 의한 진공단열패널의 내부압력 즉, 진공도를 측정하였다. 압력보상방법에 의한 진공도 측정은, 챔버 내의 압력을 진공단열패널의 내부압력 이하로 감소시키면 진공단열패널 외피 마감재는 코어표면과 박리되게 된다. 이때, 챔버 내의 압력변화에 따라 진공단열패널의 외피 마감재가 박리되는 과정은 레이저 센서를 사용하여 진공단열패널 표면과 레이저 센서 사이의 거리를 측정하여 묘사된다. 따라서 챔버 내의 압력변화에 따른 진공단열패널 위에 고정된 레이저센서 사이의 거리를 지속적으로 측정하여 진공단열패널의 외피재가 코어로부터 박리되는 시점을 찾을 수 있다. 그리고 더 이상 측정거리 변화

가 생기지 않는 임계점을 확인할 수 있으며, 1차원 선형관계의 추세선 분석을 통해 추세선 교차점에서  $0.3 \text{ mbar} \pm 5\%$  정확도로 시험샘플의 내부압력이 결정되었다.

### (3) 실험결과

3개의 제조사들로부터 제공 받은, 샘플들의 내부압력은 샘플 A 1.3 mbar, 샘플 B 0.725 mbar, 샘플 C 0.542 mbar 수준이다. 앞서 설명된 압력보상법에 의한 내부압력 시험결과 각각의 압력은 샘플 A 100 mbar, 샘플 B 2.4 mbar, 샘플 C 1.7 mbar로 평가되었으며, 압력변화에 따른 레이저 거리변화는 Fig. 7에서 확인할 수 있다.

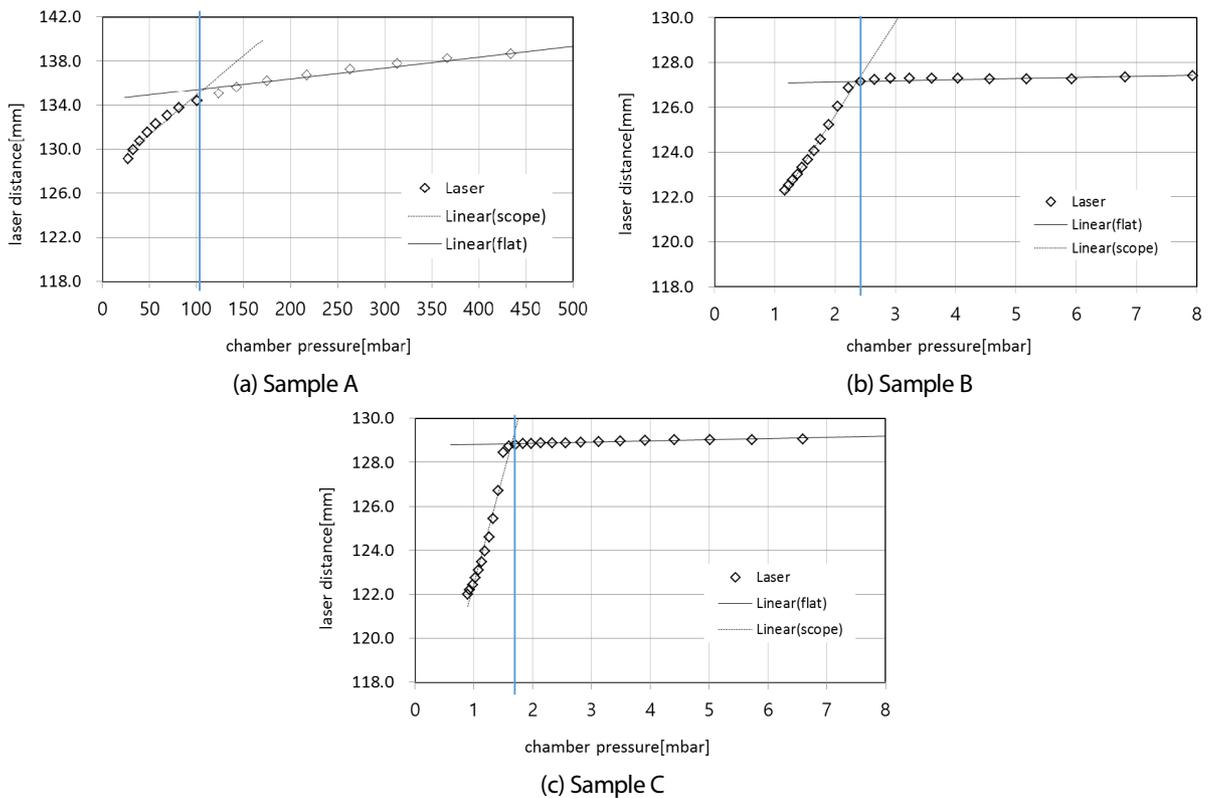


Fig. 7 Determination of the internal pressure

시험결과로부터, 시험 샘플들의 내부압력은 제조사에서 제공한 내부압력과는 큰 차이가 나는 것을 확인할 수 있으며 특히, 샘플 A는 매우 큰 압력 차이를 갖는다. 측정결과 그래프에서 보면, 샘플 A는 압력변화에 따른 레이저 거리 변화가 다른 샘플들에 비해 높은 압력 범위에서 레이저 거리의 변이특성을 찾을 수 있으며, 변이 차이 또한 큰 것을 알 수 있다. 또한 시험결과 분석을 통해 내부압력 평가를 위한 압력변화에 따른 임계점을 결정짓기 어려운 결과를 나타냈다. 이에 따라 샘플 A를 대상으로 여러 차례의 내부압력 측정 시험평가를 수행하였으나, 매 회마다 동일한 시험결과를 나타냈다. 이러한 결과에서 글라스울 심재의 샘플 A는 다른 흠드실리카 심재의

샘플 B, C에 비해 표면이 매우 거칠고 굴곡이 많은 표면의 영향으로 분석되었다. Fig. 3에서 각 샘플들의 표면특성을 확인할 수 있다. 따라서 글라스울 심재의 표면이 거친 특성의 진공단열패널의 내부압력 측정 결과의 정확도는 매우 낮은 것으로 판단된다. 이에 따라 글라스울 심재의 표면특성을 갖는 진공단열패널의 내부압력 측정을 위해, 진공챔버를 이용한 압력보상법 시험방법 외에 적절한 압력측정 시험방법이 고려되어야 한다. 샘플 B, C의 경우, 압력증가에 따른 외피재 박리에 의한 레이저거리는 5mm 이내의 변화로 나타났으며 선형 추세선의 교차점에서 시험샘플의 내부압력이 결정되었다.

시험 샘플들은 IEA ECBCS Annex (Subtask B)의 가속노화 조건에 저장한 후, 장기성능 평가를 위해 다시 내부압력측정 시험을 수행하였다. 측정 결과, 샘플 A의 압력은 150 mbar, 초기 내부 압력에 비해 1.5 배로 크게 증가 되었으며 샘플 B, C는 각각 3, 1.8 mbar로 미미한 수준으로 증가되었다(Fig. 8).

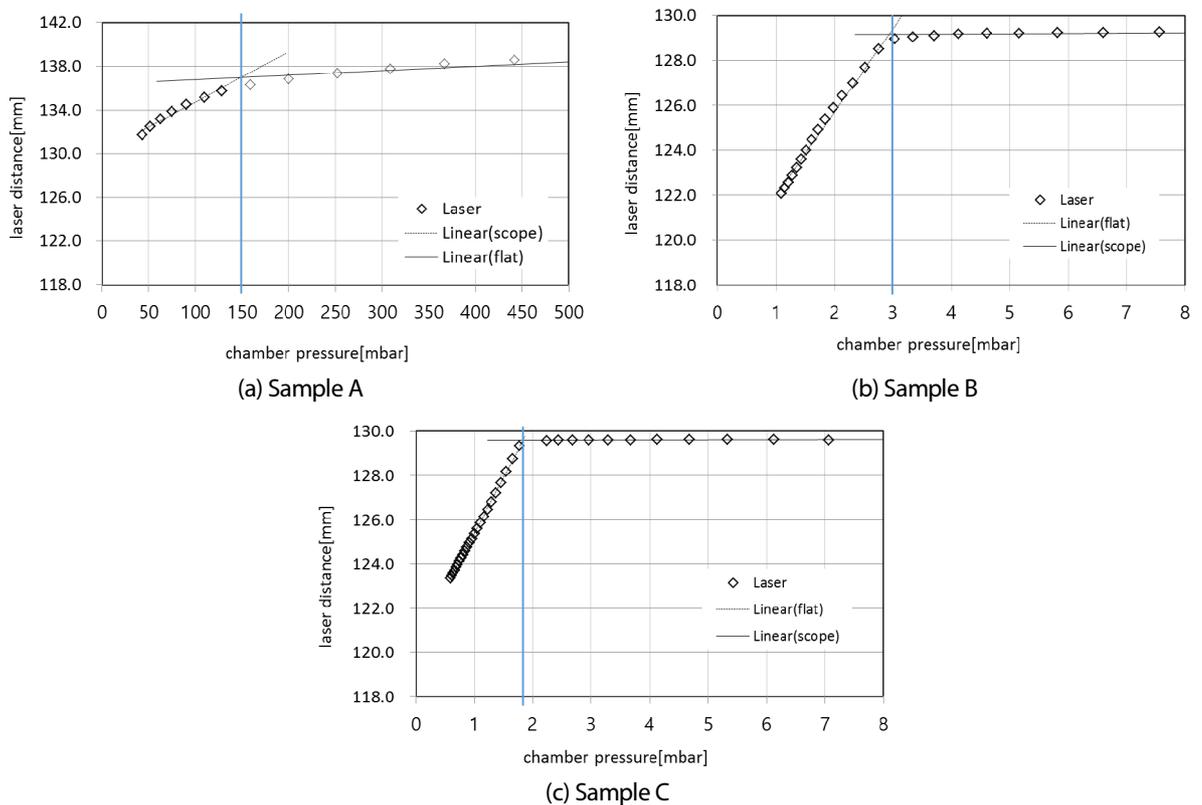


Fig. 8 Determination of the internal pressure

### 3.3 진공단열패널의 장기성능

진공단열패널에 대한 표준화된 내구성 기준은 아직 없다. 그러나 앞서 언급된 연구보고에 따라, 예컨대 패널의 내부 압력이 100 mbar 이고 압력감소가 2 mbar/year 라면 진공단열패널의 내구 연한은 50년으로 예측할 수 있다고 발표한 바 있다. 진공단열패널의 코어에서 습도를 무시하고, 초기 열전도율 약 0.004 W/m K에서 25년

후에 0.006 W/m K으로 50년 후에 열전도율은 0.008 W/m K로 변화될 것이다. 이에 따라 건물에서 진공단열패널의 적용 및 설계조건에 따라 열전도율은 0.007 ~ 0.010 W/m K이 될 수 있다<sup>16)</sup>.

앞서 수행된 열전도율 및 내부압력과 가속노화 시험결과를 바탕으로 샘플 B C의 장기성능을 위한 내구 연한을 평가하였다. 각 샘플들의 초기 열전도율 및 내부압력 그리고 가속노화 후 열전도율 및 내부압력변화 결과는 Table 1에서 나타냈다.

**Table 1** Thermal conductivity and internal pressure of vacuum insulation panels before and after aging

Item	Sample A	Sample B	Sample C	Note
Thermal conductivity (W/m K)	0.0015	0.0039	0.00361	Provided by manufacturer
	0.00235	0.00420	0.00448	
Thermal conductivity after 8 days of accelerated aging	0.00185 (29% increase)	0.00394 (1.8% increase)	0.00431 (0.46% increase)	ISO 2302 Standard (Mean temp. 10°C, 23°C)
	0.00284 (21% increase)	0.00450 (7.1% increase)	0.00450 (0.46% increase)	
Thermal conductivity after 16 days of accelerated aging	-	-	0.00461 (7.5% increase)	
	-	-	0.00483 (7.8 increase)	
Internal pressure(mbar)	1.3	0.725	0.542	Provided by manufacturer
	100	2.4	1.7	By pressure compensation (Vacuum chamber)
Internal pressure after 8 days of accelerated aging	150	3	1.8	

진공단열패널 샘플들의 장기성능은 다음 식(2)를 이용하여 계산될 수 있으며 25년의 내구 연한을 위한, 25년 후 열전도율은 식(3)을 이용해 계산할 수 있다<sup>17)</sup>.

$$\lambda_a(t) = \lambda_{90/90} + \lambda_p \cdot p_a \cdot t + \lambda_{XW} \cdot X_{W,eq} \cdot (1 - e^{(-t/\tau)}) \tag{2}$$

$$\lambda_a(25) = \lambda_{90/90} + \lambda_p \cdot p_a \cdot 25 + \lambda_{XW} \cdot X_{W,eq} \cdot (1 - e^{(-25/\tau)}) \tag{3}$$

여기서,  $\lambda_{90/90}$ 는 90% 신뢰도 수준의 열전도율(W/mK),  $\lambda_p$ 는 내부압력에 의존하여 증가하는 열전도율(W/m K. bar. a),  $P_a$ 는 VIP의 연간 내부압력 증가 값(mbar/a),  $t$ 는 시간(a),  $\lambda_{XW}$ 는 습도에 의존하여 증가하는 열전도율 값(W/mK)/mass-%,  $X_{W,eq}$ 는 환경 온도 23°C, 50% RH(mass-%)에서 보정습도,  $\tau$ 는 습도보상 시간 상

수  $\text{mass-}\% / (\text{mass-}\% / \text{a})$ 이다.

계산을 위해, 제조사에서 제공한 열전도율 값과 ISO 8302 표준에 의해 측정된 열전도율 값(mean temperature 23°C)을 각각 이용하여 샘플 B, C의 25년 후 열전도율을 계산하였다. 측정된 열전도율 및 내부 압력 외 파라미터 값은 IEA/ECBCS Annex 39에서 보고된, 흙드실리카, 메탈라이즈 외피를 갖는 진공단열패널의 특성 값을 적용하여 계산하였으며 계산된 열전도율 값과 함께 Table 2에 나타냈다. 보고된 이전 연구에 따르면<sup>16)</sup>, 흙드실리카 진공단열패널의 25년 후 열전도율은 0.008 이하이다.

**Table 2** Parameters used for silica core material in IEA/ECBCS Annex 39<sup>16)</sup> (except  $\lambda_{90/90}$  values)

Parameters	$\lambda_{90/90}$	$\lambda_P$	$P_a$	$t$	$\lambda_{XW}$	$X_{W,eq}$	$\tau$	$\lambda_a$ (25)
Sample B	0.0042 (based on manufacturer data of 0.0039)	0.035	2	25	0.5	6.4	35.6	0.00756
	0.0045 (based on our data of 0.00420)							
Sample C	0.0039 (based on manufacturer data of 0.0036)	0.035	2	25	0.5	6.4	35.6	0.00726
	0.00478 (based on our data of 0.00448)							

평가 결과, 제조사로부터 제공받은 초기 열전도율 값에 의한 25년 후의 샘플 B, C의 열전도율은 0.00756, 0.00726으로 각각 계산되었다. 따라서 노화시험 후 열전도율이 0.008 이하로 VIP의 수명은 25년으로 간주될 수 있다. ISO 8302 표준 시험방법에 의한 열전도율 값으로 계산된, 샘플 B, C의 25년 후 열전도율은 각각 0.00786, 0.00814로 평가되었다. 샘플 B의 경우 열전도율은 0.008 이하로 25년의 수명기간을 갖지만 샘플 C는 B보다 열전도율이 약간 높아 내구 연한이 25년보다 짧은 것으로 평가되었다.

#### 4. 결론

본 연구는 상용화된 진공단열패널 제품의 열전도율 및 내부압력을 평가하였으며 실험결과를 바탕으로 진공 단열패널의 장기성능(내구연한)을 평가하였다. 열전도율은 ISO 8302 시험표준에 의해 시험하였으며 내부압력은 압력보상법에 의한 진공챔버를 이용하여 시험하였다.

시험결과로부터 제조사에서 제공한 열전도율 및 내부압력 값과 본 연구를 통해 측정된 값은 다소 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 진공단열패널의 표준화된 성능검증이 요구되며 이를 위한 평가기준이 필요

하다. 특히 글라스울 심재 진공단열패널의 경우 내부압력 측정을 위한 시험 및 평가기준은 면밀한 검토가 필요하며 별도로 준비되어야 할 것이다.

진공단열패널의 초기 열전도율 측정과 함께 가속노화 시험을 통해 열전도율과 내부압력을 평가하였으며, 시험결과를 바탕으로 진공단열패널의 장기성능인 내구연한을 평가하였다. 글라스울 심재의 진공단열패널은 가속노화 시험을 통해 열전도율 및 내부압력 변화가 크게 나타났으나 흙드실리카 심재의 진공단열패널의 경우 열전도율 및 내부압력변화는 미미한 수준으로 나타났다. 따라서 장기성능 측면에서 흙드실리카 심재의 진공단열패널이 건물에서 더 유리할 것으로 판단된다. 흙드실리카 심재 진공단열패널의 장기성능, 가속노화 후 열전도율은 약 0.008 W/m K 수준으로 약 25년의 내구연한을 갖는 것으로 평가되었다.

연구결과를 바탕으로, 진공단열패널의 단열성능 및 내구성능은 글라스울 또는 흙드실리카의 심재에 따라 크게 차이거나 나는 것으로 확인되었다. 따라서 건설시장에서 다양한 제품을 소비자가 적절히 선택할 수 있도록 제품의 성능표시 및 정보제공에 대한 노력이 필요하다. 이에 따라 서로 다른 진공단열패널 특성이 반영된 성능평가 및 시험방법이 요구되며, 건물에서 효율적으로 적용되기 위해 성능표준화는 하루 빨리 준비되어야 할 것이다.

## 후기

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2015R1D1A1A01059050)과 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20162010104270).

## REFERENCES

1. Caps, R., Beyrichen, H., Kraus, D., Weismann, S., Quality Control of Vacuum Insulation Panels: Methods of Measuring Gas Pressure, *Vacuum*, Vol. 82, No. 7, pp. 691-699, 2008.
2. Kwon, J. S., Jang C. H., Jung, H., Song, T. H., Effective Thermal Conductivity of Various Filling Materials for Vacuum Insulation Panels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, No. 23, pp. 5525-5532, 2009.
3. Kalnæs, S. E. and Jelle, B. P., Vacuum Insulation Panel Products: A State-of-the-art Review and Future Research Pathways, *Applied Energy*, Vol. 116, pp. 355-375, 2014.
4. Binz, A., Moosmann, A., Steinke, G., Schonhardt, U., Fregnan, F., Simmler, H., Brunner, S., Ghazi Wakili, K. and Bundi, R. and Heinemann, U., Vacuum Insulation in the Building Sector-Systems and Applications (Subtask B), *IEA/EBC Annex 39*, Vol. 39, pp. 1-134, 2005.
5. Boafu, F. E., Chen, Z., Li, C., Li, B., Xu T., Structure of Vacuum Insulation Panel in Building System, *Energy and Buildings*, Vol. 85, pp. 644-653, 2014.
6. Johansson, P., *Vacuum Insulation Panels in Buildings: Literature Review*, Chalmers University of Technology, 2012.

7. Li, C. D., Duan, Z. D., Chen, Q., Chen, Z. F., Boafu, F. E., Wu, W. P., Zhou, J. M., The Effect of Drying Condition of Glassfibre Core Material on the Thermal Conductivity of Vacuum Insulation Panel, *Materials & Design*, 2013.
8. Li, C. D., Chen, Z. F., Boafu, F. E., Chen, Q., Zhang, J., Zhou, J. M., Ye, X. L., Li, C. Y., Determination of Optimum Drying Condition of VIP Core Material by Wet Method, *Drying Technology*, Vol. 31, No. 10, pp. 1084-1090, 2013.
9. Li, C. D., Chen, Z. F., Boafu, F. E., Xu, T. Z., Wang, L., Effect of Pressure Holding Time of Extraction Process on Thermal Conductivity of Glassfiber VIPs, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 214, pp. 539-543, 2013.
10. Xiaobo, D., Yimin G., Chonggao B., Yongnian H., Zhen'gang X., Optimization of Glass Fiber Based Core Materials for Vacuum Insulation Panels with Laminated Aluminum Foils as Envelopes, *Vacuum*, Vol. 97, pp. 55-59, 2013.
11. Simmler, H. and Brunner, S., Vacuum Insulation Panels for Building Application: Basic Properties, Aging Mechanisms and Service Life. *Energy and Buildings*, Vol. 37, No. 11, pp. 1122-1131, 2005.
12. Boafu, F. E., Juntae, K., and Chen, Z., Configured Cavity-core Matrix for Vacuum Insulation Panel: Concept, Preparation and Thermophysical Properties, *Energy and Buildings*, Vol. 97, pp. 98-106, 2015.
13. Brunner, S. and Simmler, H., In Situ Performance Assessment of Vacuum Insulation Panels in a Flat Roof Construction, *Vacuum*, Vol. 82, No. 7, pp. 700-707, 2008.
14. Porta, P., Gas Problem and Gettering in Sealed-off Vacuum Devices, *Vacuum*, Vol. 47, No. 6, pp. 771-777, 1996.
15. Brunner, S. and K. Ghazi Wakili, Hints for an Additional Aging Factor Regarding the Thermal Performance of Vacuum Insulation Panels with Pyrogenic Silica Core, *Vacuum*, Vol. 100, pp. 4-6, 2014.
16. Simmler, H., Brunner, S., Heinemann, U., Schwab, H., Kumaran, K., Mukhopadhyaya, P., Quenard, D., Sallee, H., Noller, K., Kucukpinar-Niarchos, E., Stramm, C., Tenpierik, M., Cauberg, H. and Erb, M., Vacuum Insulation Panels: Study on VIP-components and Panels for Service Life Prediction of VIP in Building Applications (Subtask A), IEA/EBC Annex 39, 2005.
17. ISO/TC 163/SC3 Working draft; ISO/CD 16478 Thermal insulation products-Vacuum insulated panels (VIPs) – Specification, Technical Committee ISO/TC 163, Thermal performance and energy use in the built environment, 2013.