

가속내구성 조건에 따른 건축용 유기계 단열재의 단열성능 변화

Changes in Insulation Performance of Organic Insulating Materials for Building Construction by Accelerated Durability Test Conditions

임 순 현¹

이 건 철^{2*}

Lim, Soon-Hyun¹

Lee, Gun-Cheol^{2*}

Building Environmental Test Center, Korea Conformity Laboratories, 73, Yangcheong 3-gil, Cheongju, 28115, Korea ¹
Dept. of Architectural Eng., Korea National University of Transportation, Daehakro 50, Chungju, 27469, Korea ²

Abstract

The insulation performance of the insulation currently used in building structures is reflected only during design based on initial performance and the reduction in heat insulation performance due to the degradation of long-term durability is not reflected. This study reviewed the degradation of heat insulation performance due to the durability degradation of insulating materials through the accelerated durability test. The study findings showed that the foamed polystyrene insulation bead method did not show performance degradation due to aging in the standard environmental condition and laboratory accelerated test condition but the performance is degraded in the freeze-thaw test condition. On the other hand, in the case of the extrusion method, the degradation of the heat insulation performance was less in the freeze-thaw test condition, but the rapid performance degradation was caused by the release of the internal gas at the beginning of aging. In addition, the hard polyurethane foam insulation showed better initial insulation performance than other insulation materials, but the performance was found to be degraded somewhat under laboratory accelerated test conditions and freeze-thaw test conditions.

Keywords : building organic Insulating materials, accelerated laboratory test, freezing thawing test ,Insulating performance

1. 서 론

최근 기존 건축물 및 신규 건축물의 에너지기준 강화로 인해 건축물에서 소비되는 에너지를 절감시키기 위한 방법으로 건축용 단열재에 대한 관심과 규제가 증가하고 있는 상황이다[1]. 현재 구조물에 사용되는 단열재의 단열성능은 초기성능을 기준으로 설계 시에만 반영되고 있으며, 건축물에 시공된 뒤 장시간 사용 후의 단열성능의 변화에 대한 관리 는 이루어지지 못하고 있다. 그러나, 단열재의 수명기간 동

안 건축 구조물에서 단열성능을 유지하기 위해서는 시간과 다양한 환경영향에 따른 단열재의 성능저하를 고려해야 하 나 현재 국내에서는 장기적인 단열재의 성능변화에 대한 연구는 저조한 실정이다. 특히, 침수되거나 결로에 의해 발생 된 수분으로 인한 동결 융해가 반복되는 환경에서의 단열성 능 저하가 예상되나 이와 관련된 연구는 전무한 실정이다 [2,3].

따라서, 본 연구에서는 건축물에 대표적으로 많이 사용되고 있는 유기계 단열재 중 발포 폴리스티렌 단열재(EPS 1종 1호, EPS 2종 1호, XPS 1호) 및 경질 폴리우레탄폼 단열재 (PUR 2종 2호)로 동결융해 조건 및 시간의 변화에 따른 단 열성능저하 변화를 검토하여, 측정된 결과를 바탕으로 제품 별 사용수명, 기간별 단열성능 저하량 평가 조건에 맞는 단 열재 선택 등의 하나의 참고자료로 제시하고자 한다.

Received : October 14, 2016

Revision received : October 27, 2016

Accepted : November 14, 2016

* Corresponding author : Lee, Gun-Cheol

[Tel: 82-43-841-5207, E-mail: glee@ut.ac.kr]

©2016 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 Table 1과 같다. 즉, 사용 단열재 종류로는 건축공사 현장에서 일반적으로 가장 많이 사용되고 있는 발포 폴리스티렌 단열재(비드법 1종 1호, 비드법 2종 1호, 압출법 1호) 및 경질 폴리우레탄폼 단열재 (2종 2호) 4종류를 선정하였다.

가속 내구성 시험 조건으로는 표준 환경 조건에서 4개월의 예비시험 후 표준 환경 조건, 실험실 가속 조건(A법, B법) 및 동결 융해 조건의 시험을 실시하였다.

표준 환경 조건은 온도 $23 \pm 2^\circ\text{C}$, 상대 습도 $50 \pm 5\%$ 의 항온 항습실에 4개월 거치 후 시험에 가정된 환경조건을 진행 하였다. 실험실 가속 조건의 경우 KS L 9016 규정에 따라 열전도율을 측정하였으며 측정기간은 0, 5, 10, 20, 40, 60, 80, 100일 측정을 실시하였다[4]. 또한, 동결융해에 가정된 환경조건은 동결융해가 반복되는 수중조건으로 하였으며, KS M ISO 20394의 규정에 따라 동결 융해 조건 시험을 진행하였다[5]. 실험사항으로는 동결융해 조건일 때의 열전도율 변화, 압축강도 변화, 흡수율 변화를 측정하였으며, 측정 사이클은 0, 25, 50, 100, 200, 300, 400, 500 사이클에서 측정을 실시하였다.

Table 1. Experimental design

Items	Variables
Types of insulation	4 <ul style="list-style-type: none"> • Expanded polystyrene type 1 No 1: EPS-1-1 • Expanded polystyrene type 2 No 1: EPS-2-1 • Extruded polystyrene type 1: XPS-1 • Polyurethane foam type 2 No 2: PUR-2-2
Leave period before testing	1 <ul style="list-style-type: none"> • Four months(120 days) leave on the temperature $23 \pm 2^\circ\text{C}$, humidity $50 \pm 5\%$ conditions
Test conditions	4 <ul style="list-style-type: none"> • Standard environment (Temperature $23 \pm 2^\circ\text{C}$, Humidity $50 \pm 5\%$) • Freezing-thawing test • Accelerated laboratory test <ul style="list-style-type: none"> - Method A - Method B
Measurement period (days)	8 <ul style="list-style-type: none"> • 0, 5, 10, 20, 40, 60, 80, 100
Freeze-thawing cycles	8 <ul style="list-style-type: none"> • 0, 25, 50, 100, 200, 300, 400, 500
Experiment	3 <ul style="list-style-type: none"> • Thermal conductivity • Water absorption ratio • Compressive strength • Independent microstructure analysis

2.2 사용재료

본 연구에서 사용한 단열재로써 비드법 발포 폴리에스티렌 단열재 EPS 1종 1호 및 EPS 2종 1호, 압출법 발포 폴리스티렌 1호는 국내 G사에서 생산된 제품을 사용하였으며, 경질 폴리우레탄 폼 단열재 PUR 2종 2호는 국내 Y사에서 생산된 제품을 사용하였다. 각각의 물리적 성질은 Table 2와 같다.

Table 2. Physical properties of insulating materials

Kinds	Density (kg/m ³)	Compressive strength (N/cm ²)	Absorbes amount (g/100cm ²)	Thermal conductivity (w/mk)
EPS-1-1	38	26	0.2	0.034
EPS-2-1	31	20	0.3	0.032
XPS-1	34	31	0.1	0.024
PUR-2-2	38	12	1.3	0.019

2.3 실험방법

표준 환경 조건 시험은 온도 $23 \pm 2^\circ\text{C}$, 습도 $50 \pm 5\%$ 의 항온 항습실에 Photo 1과 같이 거치 하여 계획된 기간에 따라 ISO 8301 규정에 준하여 열전도율을 측정하였다[6]. 동결융해 환경 조건 시험은 Photo 2와 같이 동결융해 500사이클 횟수 동안 계획된 사이클에 따라 $23 \pm 2^\circ\text{C}$, $50 \pm 10\%$ 실내에서 30~60분 방치 후 겉의 물기를 마른 형겅으로 닦은 후 열전도율, 압축강도, 흡수율을 측정하였다. 이때, 동결 융해 사이클은 Figure 1과 같다.



Photo 1. Specimen on standard environment specimen

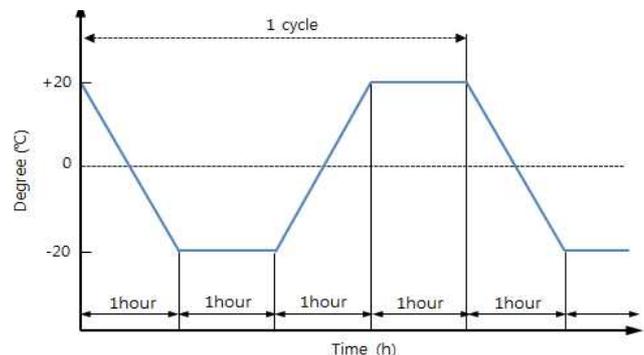


Figure 1. Freezing-thawing cycles

실험실 가속 조건 시험으로 A법은 단열재 심재 부위의 시간에 따른 열전도율 변화를 측정하기 위한 시험방법이며, B법은 표면을 처리하지 않는 단열재 제품의 열전도율을 측정하는 시험 방법이다. 따라서, 시험편의 전처리조건으로는 A법은 각 시료에서 Photo 5와 같이 $10 \pm 0.5\text{mm}$ 의 균질한 두께를 갖도록 얇게 슬라이싱 한 시험편을 준비하였고, B법은 Photo 6과 같이 $10 \pm 0.5\text{mm}$ 의 균질한 두께로 슬라이스 한 시험편을 적층하여 시험을 실시하였다.



Photo 3. Compressive strength test Photo 4. Absorption ratio test

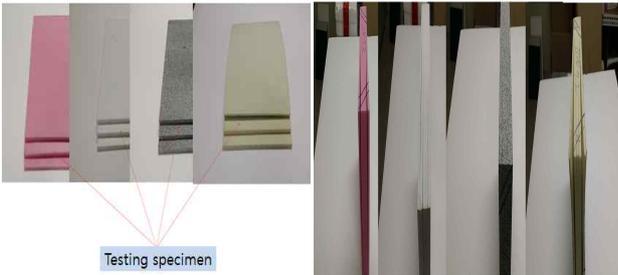


Photo 5. Specimen on accelerated laboratory test (A method)

Photo 6. Specimen on accelerated laboratory test (B method)

이때 시험편은 KS M ISO 11561 방법에 따라 온도 $23 \pm 2^\circ\text{C}$, 상대습도 $50 \pm 5\%$ 의 조건하에서 열전도율을 측정하였다[7].

3. 실험결과 및 분석

3.1 가속 내구성 조건 변화에 따른 단열성능

Figure 2는 표준 환경 조건에서의 시간경과별 열전도율을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 비드법 발포 폴리스티렌 단열재인 EPS 1종 1호 및 EPS 2종 1호는 표준 환경 조건에서 경시변화가 발생하지 않는 것으로 나타났다.

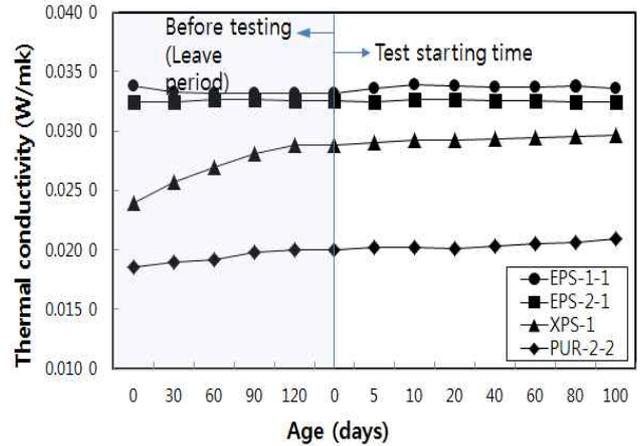


Figure 2. Thermal conductivity of standard environmental conditions

한편, 압출법 발포 폴리스티렌 단열재인 XPS-1은 초기 열전도율이 $0.024\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 으로 KS M 3808 품질 규정에 적합[8] 하였으나 시험전 방치 기간 120일이 지나면서 열전도율이 $0.029\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 으로 성능이 급격히 저하 되어 KS 품질기준 값인 $0.028\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 이하로 기준 값을 벗어났으며, 초기 열전도율 값과 약 120일 후의 열전도율 저하량은 약 21%의 높은 경시변화를 나타내었다. 그러나 그 이후 100일간의 열전도율 값은 $0.030\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 으로 4%의 경시변화를 나타내어 초기에 급격한 경시변화가 일어나고 120일 이후에는 경시변화가 완만해 짐을 알 수 있다. 경질 폴리우레탄 폼 단열재인 PUR-2-2는 초기 열전도율이 $0.019\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 으로 다른 단열재에 비해 초기 단열성능이 매우 뛰어났다. 한편, 초기 방치 기간인 120일 후의 열전도율 값은 $0.020\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 으로 5%의 경시변화를 나타내었고, 그 이후로도 약 5% 경시변화를 더 나타내었다. 이상의 시험 결과를 고려해 볼 때 표준 환경 조건에서는 EPS 단열재가 단열성능 유지 능력이 가장 우수한 것으로 사료된다.

Figure 3은 실험실 가속 시험 A법에 의한 단열재 종류별 경시변화 결과를 나타낸 것이다. 실험실 가속시험 A법에서는 EPS-2-1, EPS-1-1의 경시변화 경향은 평행한 직선을 그리는 반면 XPS-1 및 PUR-2-2는 장기간에 걸쳐 경시변화가 계속해서 일어나고 있음을 알 수 있다. 특히 PUR-2-2는 초기 1개월 이내의 경시변화가 매우 빠름을 알 수 있다.

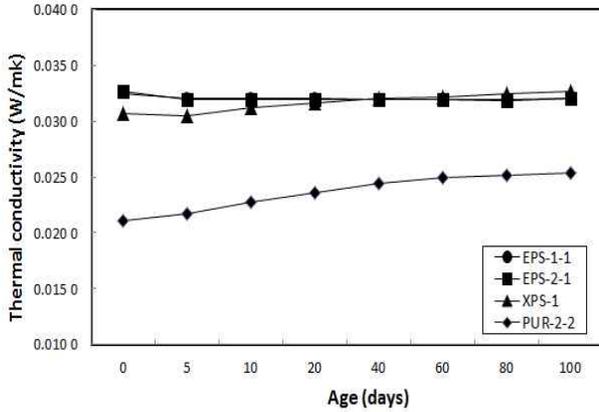


Figure 3. Thermal conductivity by accelerated laboratory test A method

Figure 4는 실험실 가속 시험 B법에 의한 단열재 종류별 열전도율 변화를 나타낸 것이다. B법의 경우도 A법의 실험 결과와 유사한 경향을 나타내었다. 즉, EPS-1-1 및 EPS-2-1은 시간경과에 대한 열전도율의 저하가 없는 반면, XPS-1 및 PUR-2-2는 재령경과에 따른 성능저하를 나타내었다. XPS-1의 경우 초기 열전도율이 0.029W/(m·K)에서 0.033W/(m·K)으로 14%의 경시변화 감소를 나타내었다. 또한, PUR-2-2의 경우도 초기 열전도율이 0.021W/(m·K)에서 0.026W/(m·K)으로 약 24%의 단열성능이 저하 되었다.

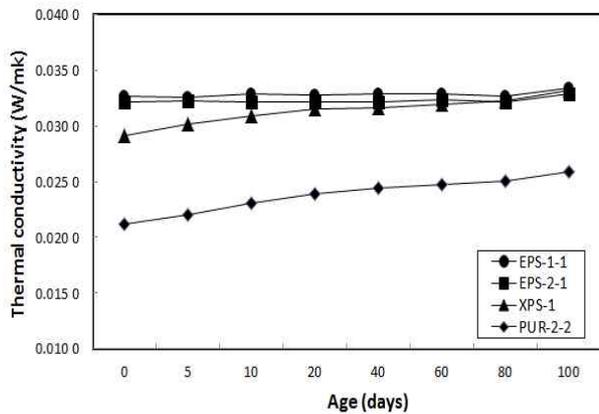


Figure 4. Thermal conductivity by accelerated laboratory test B method

Figure 5는 동결 융해 사이클 변화에 따른 열전도율 변화를 나타낸 그래프이다. 사이클 횟수는 총 500회를 진행하였다. 먼저, EPS-1-1은 25 사이클에서 KS M 3808의 품질기

준인 0.036W/(m·K)을 초과하였고, 100사이클 이후 급격한 열전도율 저하를 나타내었다. 즉, 0사이클에서 열전도율이 0.034W/(m·K), 500사이클 종료 후 열전도율이 0.055W/(m·K)로 약 62%의 단열성능 저하를 나타내었다. 또한, EPS-2-1의 경우도 EPS-1-1과 유사한 경향을 나타내었는데, 0사이클에서의 열전도율이 0.033W/(m·K)이었으며, 500사이클 종료 후에는 0.063W/(m·K)으로 약 91% 단열성능 저하를 나타내었다.

PUR-2-2의 경우도 동결 융해 사이클이 증가함에 따라 저하하는 것으로 나타내었는데, 100사이클 이후 더욱 현저한 저하 경향을 나타내었다. 즉, 0사이클에서의 열전도율이 0.020W/(m·K)이었으나, 500사이클 종료 후 열전도율 값이 0.046W/(m·K)으로 약 130%의 단열성능 저하를 나타내어 4종의 시험편중 동결 융해 저항성에 가장 약한 재료로 평가 되었다.

XPS-1의 경우는 이전의 단열재에 비해 동결융해에 따른 성능저하가 미비한 것으로 나타났는데, 0사이클에서 0.029 W/(m·K), 500사이클 종료 후 0.031W/(m·K)로 약 7% 저하를 나타내었다. 여기서의 결과로 유추해 볼 때 발포 폴리스티렌 압출법이 습기 또는 수분이 많고 동결이 우려되는 장소 시공에서 다른 단열재에 비해 효과적일 것으로 사료된다.

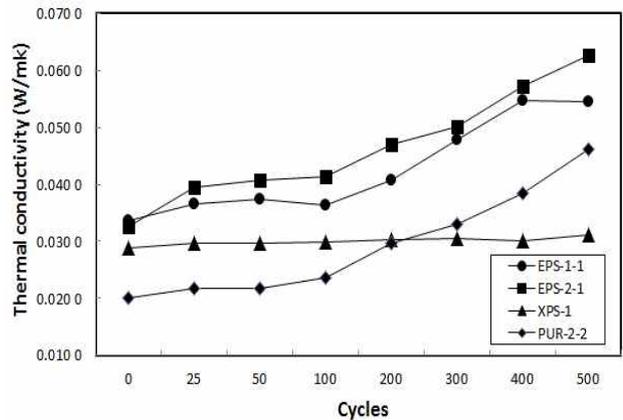


Figure 5. Thermal conductivity by freezing-thawing test

3.2 압축강도

Figure 6은 동결 융해 사이클 증가에 따른 압축강도를 나타낸 것이다. 동결 융해 전 압축강도는 XPS- 1이 31N/cm², EPS-1-1이 26N/cm², EPS-2-1이 20N/cm², PUR-2-2가 12N/cm²로 발포 폴리스티렌 압출법의 압축강도가 가장 크고,

경질 폴리우레탄 폼 단열재가 가장 작은 것으로 나타났다.

동결 용해 사이클 증가에 따른 압축강도는 EPS-2-1의 경우 300사이클 까지 다소 감소하다가 500사이클 종료 후에 다시 압축강도가 회복되는 경향을 나타내고 있으나, 전반적으로 동결용해 사이클 증가에 따른 강도저하는 나타나지 않았다.

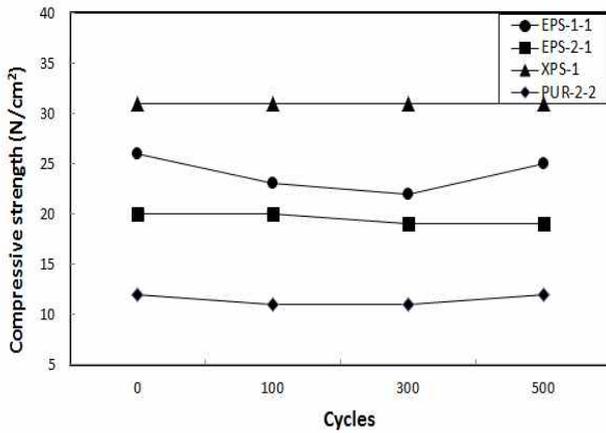


Figure 6. Compressive strength by freezing-thawing test

3.3 흡수율

Figure 7은 동결 용해 사이클 변화에 따른 흡수율 변화를 나타낸 것이다. 전반적으로 EPS-1-1, EPS-2-1, PUR-2-2의 경우는 동결 용해 사이클이 증가할수록 흡수율이 증가하는 것으로 나타났는데, 100사이클 이후 급격한 흡수율의 증가를 나타내었다.

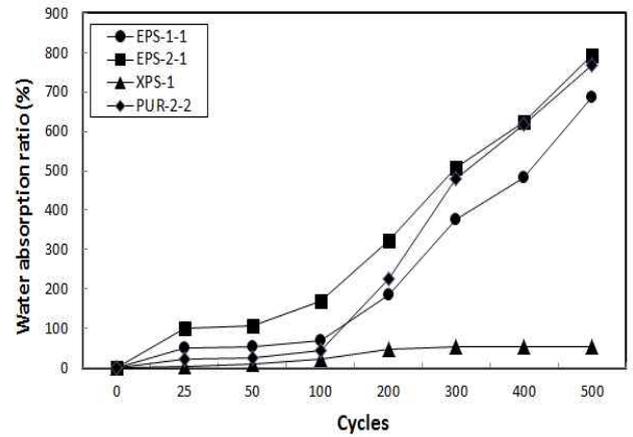


Figure 7. Water absorption ratio by freezing-thawing test

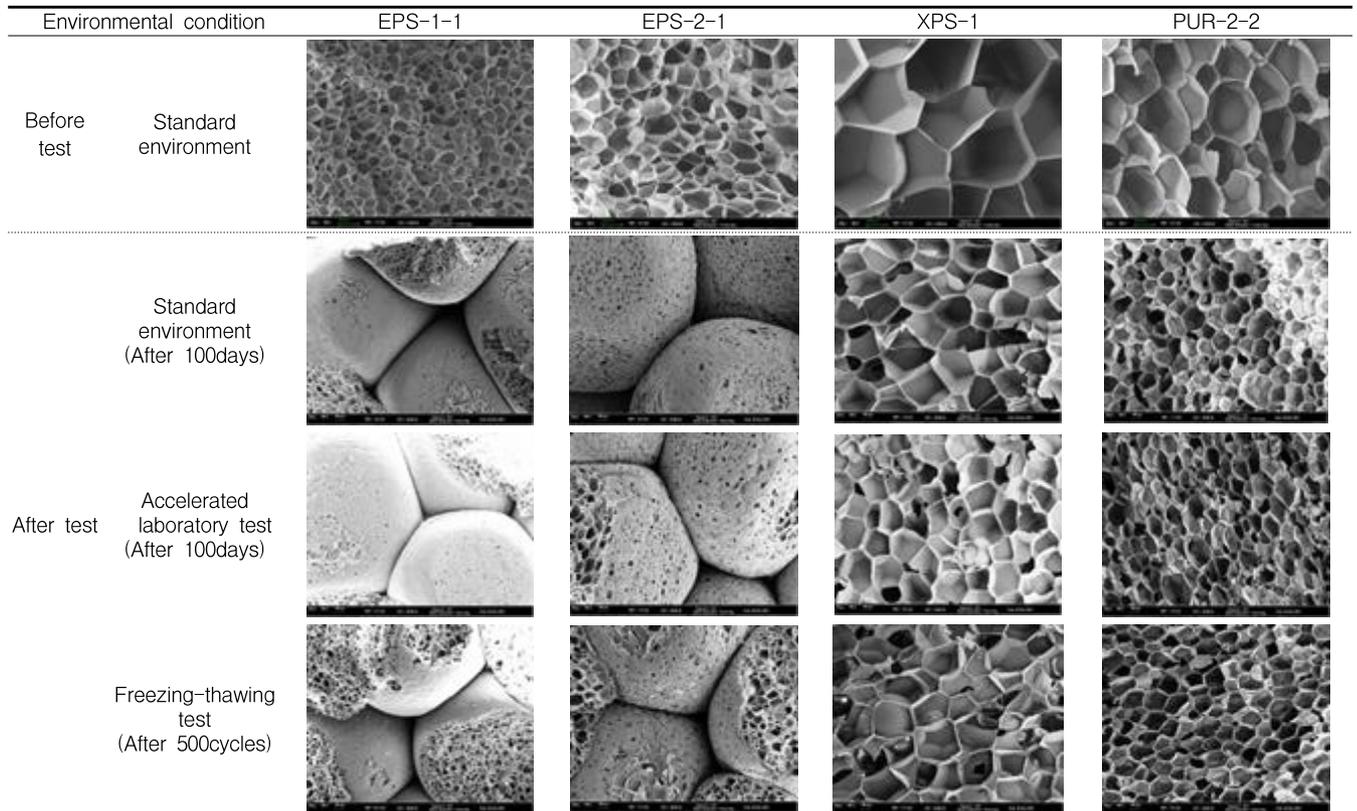


Figure 8. Independent microstructure analysis($\times 100$)

EPS-1-1의 경우 0사이클에서 500사이클까지 총 흡수율은 질량비로 687%로 나타났으며, EPS-2-1의 경우 792%, PUR-2-2의 경우 769%로 비교적 많은 양의 물을 흡수하였다. 반면 XPS-1은 다른 단열재에 비해 동결 용해 사이클 증가에 따른 흡수율 증가가 현저하게 낮은 것을 알 수 있다. 특히, 100사이클 까지는 흡수율의 변동의 거의 나타나지 않았고, 100사이클 이후에서 약간 증가하는 것으로 나타났는데 500사이클 이후 약 54%의 흡수율 증가를 나타내었다.

3.4 독립 미세구조

Figure 8은 각 가속 내구성 조건에서의 독립 미세구조 형상을 전자현미경으로 촬영한 사진이다. 전반적으로 단열재의 셀 형상은 벌집구조로 고르게 발포된 것을 확인할 수 있다.

셀 크기는 EPS-1-1이 평균 30~100 μm , EPS-2-1이 평균 30~120 μm , XPS-1이 평균 150~450 μm , PUR-2-2가 평균 100~300 μm 의 셀 크기로 4종류의 단열재 중에서 XPS-1 및 PUR-2-2의 셀 크기가 비교적 크게 발포되어 있음을 알 수 있다.

먼저 표준 환경 조건에서 100일 경과후의 셀 구조는 사진에서 알 수 있듯이 표면에서의 박리나 균열, 천공 등의 외관적으로 이상이 발견되지 않았으며 안정적인 셀 구조 형상을 유지 하였다.

또한, 10mm로 슬라이싱 하여 실험실 가속시험을 실시한 경우 EPS-1-1은 사진에서 알 수 있듯이 셀 구조의 표면에서 박리나 균열, 천공 등의 외관적으로 이상이 발견되지는 않았으며 안정적인 셀 구조 형상을 유지 하였다. 또한, EPS-2-1은 일부 셀들을 감싸는 표층이 갈라져 박리된 파편이 미미하게 발견되었으나 전반적으로 안정적인 셀 구조 형상을 유지 하였다. 반면, XPS-1 및 PUR-2-2는 일부 셀이 갈라지고, 셀에 천공이 발견 되었는데 이는 내부 가스가 치환되거나 방출 되면서 발생된 것으로 사료된다.

동결 용해 환경 조건에서 500사이클을 가속한 경우는 모든 시험체가 표면이 많이 손상된 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 건축용 유기계 단열재를 대상으로 가속내구성 조건에서의 단열성능 변화를 검토하기 위한 연구로써

다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 가속 내구성 조건 변화에 따른 단열 성능으로 표준 환경 조건에서의 열전도율은 발포폴리스티렌 단열재 비드법의 경우 경시변화에 따른 성능저하가 나타나지 않았으나, 압출법의 경우 경시변화 초기에 급격한 성능저하를 나타내었다. 또한, 실험실 가속 시험 방법의 경우 비드법 발포폴리스티렌 단열재는 경시변화에 따른 성능저하가 거의 발생하지 않는 반면, 압출법 발포폴리스티렌 단열재 및 경질 폴리우레탄 폼 단열재는 경시변화 증가에 따른 단열성능 저하를 나타내었다. 동결 용해 시험 방법의 경우 비드법 발포폴리스티렌 단열재 및 경질 폴리우레탄 폼 단열재는 동결 용해 사이클이 증가할수록 단열성능이 감소하는 것으로 나타난 반면, 압출법 발포폴리스티렌 단열재는 동결 용해 사이클 증가에 따른 성능저하가 극히 적은 것으로 나타났다.
- 2) 동결 용해 반복에 따른 흡수율은 비드법 발포폴리스티렌 단열재 및 경질 폴리우레탄 폼 단열재의 경우 사이클이 증가할수록 흡수율이 증가하는 것으로 나타났으며, 특히 100사이클 이상에서는 더욱 급격한 증가경향을 나타내었다. 반면, 압출법 발포폴리스티렌 단열재의 경우는 동결 용해 사이클 증가에 따른 흡수율 증가는 매우 적은 것으로 나타났다.
- 3) 단열재의 셀 구조는 표준 환경 조건의 경우 표면 박리나 균열, 천공 등의 외관적으로 이상이 발견되지 않았으며 안정적인 셀 구조 형상을 유지 하였다. 실험실 가속시험을 실시한 경우는 XPS-1 및 PUR-2-2는 일부 셀이 갈라지고, 셀에 천공이 발견 되었다. 또한, 동결 용해 환경 조건에서 500사이클을 가속한 경우는 전반적으로 셀 내외부의 박리된 모습을 많이 찾아 볼 수 있었다.

요 약

현재 건축구조물에 사용되는 단열재의 단열성능은 초기성능을 기준으로 설계 시에만 반영하고 있으며, 장기 내구성 저하에 따른 단열성능 감소는 반영되고 있지 않다.

본 연구에서는 가속내구성 시험을 통해 단열재의 내구성 저하에 따른 단열성능 저하를 검토하였다.

연구결과, 발포폴리스티렌 단열재 비드법의 경우 표준환

경 조건 및 실험실 가속 시험 조건에서는 경시변화에 따른 성능저하가 나타나지 않았으나, 동결 융해 시험 조건에는 성능이 저하하는 것으로 나타났다. 반면, 압출법의 경우 동결 융해 시험 조건에서는 단열성능 저하가 작았지만, 경시변화 초기에 내부 가스의 방출로 급격한 성능저하를 나타내었다. 또한, 경질 폴리우레탄 폼 단열재의 경우 다른 단열재에 비해 초기 단열성능이 매우 뛰어났으나, 실험실 가속 시험 조건 및 동결 융해 시험 조건에서는 성능이 다소 저하하는 것으로 나타났다.

키워드 : 건축용 유기계 단열재, 실험실 가속 시험, 동결 융해 시험, 단열성능

Acknowledgement

The research was supported by a grant from the Academic Research Program of Korea National University of Transportation in 2014.

References

1. Han MC, Cho BY, Lee GC, Noh SG, Jeon KN. Engineering properties of cement composite panel for outer wall depending on the types and combinations of insulation Materials. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 2011 Apr. ;11(2):127-35.
2. Lee SE, Kang JS, Jeong YS, Choi HJ. An experimental study on the thermal conductivity change of building insulation materials with environmental condition and long-time elapse. *Journal of the Architecture Institute of Korea*, 2003 Dec. ;19(12):235-41.
3. Choi BH, Kang JS. The thermal performance of building insulation materials according to long-term aging. *Korea Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*. 2013 Nov. ;25(11):617-23.
4. KS L 9016, Test Methods for Thermal Transmission Properties of Thermal Insulation, Korea Industrial Standards, Seoul(Korea): Korean Standards & Certification Information Center; 2012.
5. KS M ISO 20394, Thermal Insulating Materials — Determination of Freeze-thaw, Korea Industrial Standards, Seoul(Korea): Korean Standards & Certification Information Center; 2012.
6. KS L ISO 8301, Thermal Insulation—Determination of Steady-State Thermal Resistance and Related Properties—Heat Flow Meter Apparatus, Korea Industrial Standards, Seoul(Korea): Korean Standards & Certification Information Center; 2011.
7. KS M ISO 11561, Aging of thermal insulation materi-

als—Determination of the long-term change in thermal resistance of closed-cell plastics(accelerated laboratory test methods). Korea Industrial Standards, Seoul(Korea): Korean Standards & Certification Information Center; 2009.

8. KS M 3808, Cellular Polystyrene for Thermal Insulation, Korea Industrial Standards, Seoul(Korea): Korean Standards & Certification Information Center; 2011.