

의류폐기물을 활용한 건물 내 플렉시블 덕트의 열적 성능 향상 분석

Thermal performance analysis of flexible ducts in buildings using clothing waste

○진 동 찬* 남 지 희** 김 수 민***
Jin, Dongchan Nam, Jihee Kim, Sumin

Abstract

To create insulation from recycled clothing waste for application in buildings' flexible ducts, analyzing its thermal efficacy through experiments. Globally, clothing waste poses significant environmental challenges due to its low recycling rates. With clothing fibers inherently porous, exceeding 80%, they offer promising insulation qualities. Our endeavor focuses on replacing conventional insulation materials surrounding vulnerable flexible ducts within edifices with bespoke textile-derived insulation. Through meticulous microstructural analysis and rigorous thermal experimentation, we seek to elucidate the unparalleled thermal performance of our novel insulation solution.

키워드 : 업사이클링, 의류폐기물, 단열재, 플렉시블 덕트, 폐기물 관리

Keywords : Upcycling, Clothing waste, Insulation, Flexible ducts, Waste management

1. 서론

1.1 연구의 목적

건물에서의 에너지 요구량을 감소시키는 일차적인 방법에는 건물의 배치, 주위환경, 형태, 구조, 공간구성, 외피 단열 등 여러 가지를 들 수 있다. 건축물에서 단열이라는 키워드는 건물 사용 에너지에 큰 영향을 주고 있으며, 그 중 배관에서의 효과적인 단열이 무엇보다 중요하나, 범규정은 주로 일반적인 부위를 대상으로 하고 있고, 벽체 내부의 배관과 같은 곳은 그 대상에 포함되지 않고 있다.

본 연구에서는 도심에서 버려지는 의류 폐기물을 재활용하여 단열재를 제작하고 단열이 취약한 덕트에 보강재료로서 설치하여 열적 성능을 분석하였다. 의류와 섬유는 한국에서 한 해 1,500 톤 이상 배출되는 폐기물로 심각한 환경 문제를 일으키고 있으며, 이를 해결하기 위한 많은 연구들이 진행되고 있다. 해당 논문을 통해 버려지는 의류들에 대하여 환경 개선이라는 이점과 이를 통해 건축적인 단열 효과의 증가에 대한 재료 측면의 친환경 업사이클링을 목표로 한다.

* 연세대 대학원 석사과정

** 연세대 대학원 박사과정

***연세대 건축공학과 정교수, 공학박사

(Corresponding author : Department of Architecture and Architectural Engineering, Yonsei University, kimsumin@yonsei.ac.kr)

이 성과는 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. 과제번호:2022R1A2C3008559.

2. 재료 및 실험방법

2.1 재료의 특성 및 시편 제조

의류 폐기물은 다공질로 이루어져 있어 열적 성능이 우수하여 건축자재로써 활용하기에 적합하다 (D. Jin. et al., 2024). 본 연구에서 사용된 의류폐기물은 국내의 부산시에서 수급되었으며 시편 제작을 위하여 옷을 천과 실의 형태로 파쇄시키는 오프닝 공정을 수행하였다. 분쇄된 의류를 실험을 진행하기 위하여 두가지 모양의 시편으로 제작하였다. 첫 번째는 열적인 실험을 진행하기 위해 100 mm × 100 mm × 20 mm 크기의 시편(CI)으로 제작하기 위하여 급형에 50 g의 의류폐기물을 넣고 열프레스기를 이용하여 150 °C에서 압착 가공하였다. 두 번째로는 플렉시블 덕트에 직접 적용하기 위하여 높이 250 mm, 내부 지름 100 mm의 가운데가 비어있는 원기둥의 형태로 말아서 제작하였다. CI의 외피가 고온이나 습기에 장시간 노출될 경우, 탈락의 위험이 있어 이를 방지하기 위하여 알루미늄을 이용하여 주변을 감싸는 시편(PCI)을 제작하였다.

2.2 분석 방법

의류폐기물의 미세구조 분석을 위해 전자주사현미경(SEM)과 물성을 확인하기 위하여 X선 분광법(EDS)을 동시에 행하였다. 시편들의 열전도율을 측정을 진행하였으며, 챔버를 이용하여 플렉시블 덕트에 제작한 원기둥 시편을 직접 설치하여 기존 크린을 단열재와 비교를 위해 데이터 로거를 이용하여 데이터를 얻고 분석을 진행하였다.

3. 결과 및 결론

3.1 미세구조 및 표면 물성 분석

그림 1은 150 °C 의 온도에서 압착된 섬유 가닥의 SEM 분석 이미지와 시편의 표면 EDS 분석이다. 고온 압착된 섬유 가닥의 시편을 보면, 섬유 가닥의 내부는 용융점이 250 °C 정도로 견제한 것과, 외부의 용융점이 70 °C 이므로 150 °C 의 온도에서 녹아내려 형태가 변형된 것을 확인할 수 있다. 또한, EDS 분석을 통해 시편 단면의 원소 정보를 알아내었다. 탄소(C)와 산소(O), 그리고 알루미늄(Al), 규소(Si), 황(S), 칼슘(Ca)의 구성으로 이루어져 있으며 C가 이 중 70% 이상의 구성요소임을 확인하였고, 이를 통하여 의류는 제조 및 폐기 단계에서 이산화탄소와 온실가스 배출에 크게 기여하며 환경오염을 일으키는 주원인 중 하나의 산업이라고 할 수 있다.

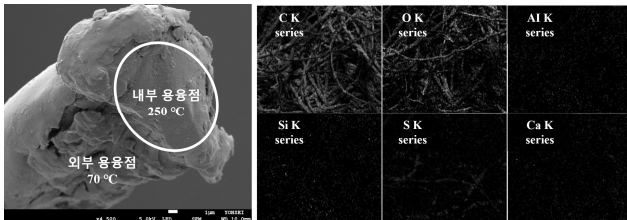


그림 1 섬유 한가닥의 SEM 이미지와 EDS 표면 분석

3.2 열전도율 분석

보드 형태로 제작된 시편들을 평판열류계법을 활용하여 열전도율을 측정된 결과, 평균온도가 20 °C 일 때 CI의 열전도율은 0.0450 W/m·K, 온도 40 °C 일 때 열전도도는 0.0460 W/m·K로 나타났다. PCI의 시편의 경우 평균온도가 20 °C 는 0.0845 W/m·K, 40 °C 에서는 0.0898로 나타났으며 다음 그림 2.에 제작한 시편과 열전도율 그래프를 나타내었다. CI의 경우 무기 섬유 단열재나 비드법 보온판과 비교하여도 충분한 열적 능력을 가지고 있다. PCI의 열전도율이 CI 보다 높은 이유는 패키징 시에 의류폐기물의 특성인 기공들을 막아 다공성이 줄어 열전도율이 상승하는 것으로 확인된다. 이는, 폐기물을 재활용하여 건축용 단열재로 사용하는 선행 연구들보다 좋은 열적 성능을 가졌다고 볼 수 있으며(Mahbuba Imroz Khan. et al., 2024), 환경적 영향성까지 고려한다면 충분한 가치를 지닐 것으로 사료된다.

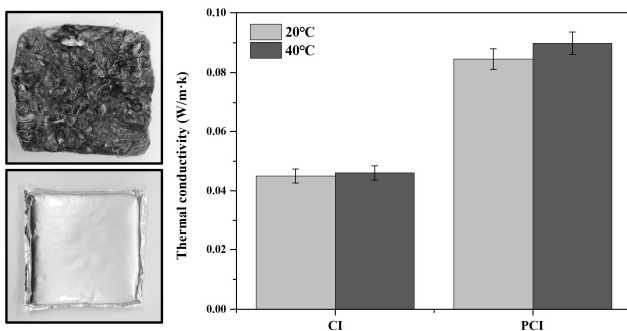


그림 2 제조된 시편과 열전도율

3.3 실제 적용 후 온도 데이터 분석

챔버와 플렉시블 덕트, HVAC장비를 이용하여 덕트 내부에 대류를 공기의 흐름을 만들고, PCI와 기존 실제 사용 단열제인 폴리우레아와 데이터로거 이용 온도 데이터 비교를 진행하였다. 다음 그림 3.과 같이 설치를 진행하고, 원기둥 모양의 시편과 기존 단열 보호 플렉시블 덕트와 온도를 측정하였으며, 실험실의 온도는 18 °C로 고정, 덕트 내부 기류의 온도는 40, 60, 80 °C로 온도를 30분간격으로 올려가며 측정을 진행하였다.



그림 3 플렉시블 덕트 실제 적용 사진

측정 결과 모든 온도별로 기존의 폴리우레아 재질의 단열 덕트보다 PCI의 열 차단 효과가 높은 것이 확인되었다. 각 온도별 최소 1.3 °C 에서부터 최대 2.1 °C 까지 확인한 차이를 발견할 수 있었다. 의류폐기물을 단열재를 제작하고 이에 대한 연구 결과, 건축자재로 재활용함으로써 업사이클링 가능성을 시사한다.

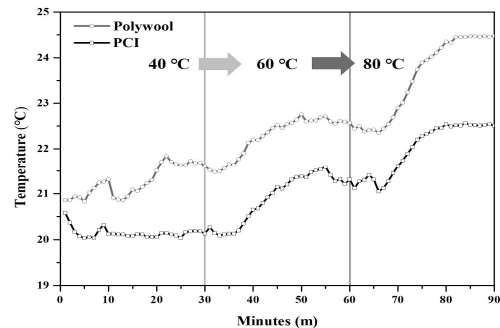


그림 4 챔버-덕트 연결 후 덕트 외부 온도 변화 그래프

4. 결론

형태학적 열적 성능 비교 결과, 의류폐기물은 기존단열재와 비교 시 높은 수준의 단열성능을 나타냈다. 폐기과정에서 심각한 환경오염을 유발하는 의류폐기물의 재활용을 통해 건축자재로서의 가능성을 확인하였으며 추후 지속적인 사용을 위한 내구성에 대한 검증을 수행할 예정이다.

참고문헌

1. D. Jin, J.Y. Choi, J. Nam, H. Yuk, S. Kim, Innovative building materials by upcycling clothing waste into thermal energy storage matrix with phase change materials, Waste Management, Vol. 175, 328-338
2. Mahbuba Imroz Khan, Lijing Wang, Rajiv Padhye, Textile waste management in Australia: A review, Resources, Conservation & Recycling Advances, Vol. 18, 2024