

## 석고보드의 첨가제에 따른 오염물질 흡착 및 축열 성능에 대한 고찰

### Review on the heat storage performance and air pollutant adsorption properties of gypsum board according to the additives

서현정\* · 정수광\* · 임재한\*\* · 김수민\*\*\*†  
Seo Hyun Jeong\*, Jeong Su-Gwang\*, Lim Jae-Han\*\*  
and Kim Sumin\*\*\*†

(Received 4 February 2015; accepted 23 February 2015)

**Abstract :** Gypsum board is easy to manufacture of a variety of forms and has stable mechanical properties and thermal properties. And gypsum boards are widely used to the walls and ceiling of the building as the interior building materials. The studies about technology of applying the various features in the gypsum board with additives are being actively investigated. Development methods for enhancing performance of the gypsum board using additives are largely divided into two categories. The first case is functional gypsum board that is to improve the moisture absorption and moisture-proof properties. Also studies of adsorption and decomposition of indoor air pollutants of the gypsum board using porous materials as an additive are being actively investigated. Another case is applying thermal storage materials which gives the heat storage performance to gypsum board. In this paper, we would like to introduce the various cases of gypsum board applied various additives.

**Key Words :** 석고보드(Gypsum board), 건물 에너지 보존(Building energy conservation), 축열(Thermal energy storage), 상변화물질(Phase change material), 열적 성능(Thermal properties), 기능성 건축자재(Functional building materials)

\*\*\*† 김수민(교신저자) : 숭실대학교 건축학부  
E-mail : skim@ssu.ac.kr, Tel : 02-820-0665  
\*서현정, 정수광 : 숭실대학교 대학원 건축학과  
\*\*임재한 : 이화여자대학교 건축공학과

\*\*\*† Kim Sumin(corresponding author) : School of Architecture,  
Soongsil University.  
E-mail : skim@ssu.ac.kr, Tel : 02-820-0665  
\*Seo Hyun Jeong, Jeong Su-Gwang : School of Architecture,  
Graduate school, Soongsil University.  
\*\*Lim Jae-Han : Department of Architecture Engineering,  
Ewha Womans University.

## 1. 서 론

석고보드는 기계적, 열적 특성이 안정적이고, 다양한 형태로 제작이 가능하여 건물 벽과 천장 등 실내 건축 재료로써 널리 이용되고 있다<sup>1)</sup>. 또한, 석고보드는 높은 열 저항을 가지고 있으며, 안정적인 결정 상태로 존재하기 때문에 기건 상태에서의 신축률이 매우 낮아 실내의 온도 및 습도에 따른 변형이 거의 없어 시공 후 안정적인 형태를 유지하는 장점을 가지고 있다. 그리고 석고보드를 철골 구조에 적용할 경우에는 철골조에 추가 하중지지 능력과 뛰어난 내화성 및 높은 절연 성능을 부여할 수 있다<sup>2)</sup>. 최근 국내외에서 석고보드에 다양한 기능을 적용하는 기술 개발에 관한 연구가 활발하게 진행 중에 있으며, 특히 석고보드 제작 시 다공성 물질 및 다양한 첨가제를 혼합하여 석고보드의 성능을 개선하는 연구가 매우 활발하게 진행되고 있다. 이러한 연구를 통해 석고보드에 기능성을 부여하여 기능성 마감재로서 건축에 적용될 수 있음이 제시되었다.<sup>3),4),5),6),7)</sup> 특히 건축물 에너지 저감과 관련하여 난방시 열을 저장하였다가 비난방시 열을 방출하는 축열 성능을 가진 석고보드를 개발하는 연구가 활발하게 진행 중이다<sup>8),9),10),11)</sup>. 석고보드에 축열재를 첨가제로 혼합하는 경우 상변화 물질(Phase change materials; PCMs)을 적용하게 되는데, PCM은 특정 온도 구간에서 상이 변하면서 주변의 열을 흡수 및 방출하는 특징을 가지고 있다. 이 때, PCM은 열에너지를 현열이 아닌 잠열의 형태로 저장하기 때문에 타 건축재료에 비해 열에너지 저장 효율이 매우 높은 장점을 가지고 있다. 이러한 열에너지 저장 효율이 높은 재료를 건축 마감재로서 적용할 경우, 건축물 내의 열적 평형 및 피크 부하 저감을 유도할 수 있다<sup>9)</sup>.

최근 석고보드에 관련되어 진행되고 있는 연구에서는 기능성 및 에너지소비 저감 건축 재료와 같은 친환경 건축 재료 개발에 관련된 연구에 초점이 맞춰져있으며, 석고보드 제작 시 첨가제를 혼합하여 제작하는 방법이 주를 이루고 있다. 본 연구에서는 석고보드 제작 시 혼합되는 첨가제의 종류 및 특성을 고찰하고, 해당 첨가제들을 혼합하여 제작한 석고보드의 성능 및 개발에 대한 사례를 확인하고 분석하고자 한다.

## 2. 석고보드 첨가제의 개요

기능성 석고보드의 개발에 관련된 연구는 현대 사회의 산업화와 도시화의 진행에 따른 산업시설 및 교통량 증가, 인구 집중화로 인한 환경오염의 문제성이 대두됨에 따라 활발하게 진행되고 있다. 본 연구에서는 석고보드 제작 시 적용되는 첨가제의 성능을 확인하고, 해당 첨가제를 석고보드에 적용하였을 때 나타날 수 있는 기능에 대하여 고찰하고자 한다. 석고보드에 적용되는 첨가제는 크게 두 가지 성능을 나타내고 있는 것으로 분석되는데, 첫 번째는 석고보드의 흡습 및 방습성능 개선과 실내 공기오염물질의 흡착 및 분해와 관련하여 다공성 물질을 첨가하는 것이고<sup>4),7),12),13)</sup>, 두 번째는 PCM을 적용한 축열 석고보드를 개발함으로써 건축물 에너지소비 저감에 관한 것이다<sup>1),2),8),9),10),11)</sup>. 석고보드에 적용되는 첨가제의 종류 및 각각의 특성은 다음과 같다.

### 2.1 다공성 물질 (Porous materials)

현대인들이 하루 중 대부분의 시간을 실내 공간에서 생활함에 따라 실내 환경의 개선에 대한 중요성이 크게 부각되고 있다. 실내 공기 질에 영향을 미치는 물질로는 휘발성 유기화

합물(Volatile organic compounds: VOCs) 및 중금속 물질 등 여러 가지 화학물질이 있으며, 특히 포름알데히드(HCHO)에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 다공성 물질은 물체의 표면에 수많은 공극 구조를 가지며 물리적 및 화학적 흡착 성능, 조습 성능이 뛰어난 물질을 말한다. 대표적으로 활성백토, 규조토, 벤토나이트 및 제올라이트 등이 있으며, 이러한 재료들을 석고보드 등 건축 내장 재료에 혼합하여 오염물질 흡착이 가능한 석고보드로 제조가 가능하다. 다공성 물질 중, 흑탄 및 활성탄의 경우는 최근 석고보드 사용 시 문제점으로 이슈화

되고 있는 라돈의 흡착 및 제거에 상당한 영향을 끼치는 것을 선행 연구를 통해 증명된 바 있다<sup>14)</sup>. 특히, 흑탄 및 활성탄을 차단 재료로 사용할 경우 석고보드 대조군과 라돈 방출량을 비교하였을 때 70% 이상이 감소되는 것을 확인하였고<sup>14)</sup>, 이는 기능성 석고보드 적용에 따른 라돈 흡착이 가능하다는 것을 의미한다. 그 밖에 활성 백토 등 비표면적이 넓은 다공성 물질을 적용하는 경우, 포름알데히드를 75%에서 90%까지 흡착하는 것을 확인하였으며<sup>4)</sup>, 다공성 물질 내부의 나노사이즈의 공극이 증가할수록 실내공기 오염물질의 흡착 성능이 높아짐을 확인하였다. 기능성 석고보드 제작을 위해 사용되는 다공성물질의 미세구조는 SEM (Scanning electron microscope) 분석장비를 통하여 분석이 가능하며, Fig. 1과 Fig. 2는 기능성 석고보드 제조 시 사용되는 다공성 물질 종류에 따른 미세구조를 보여준다.

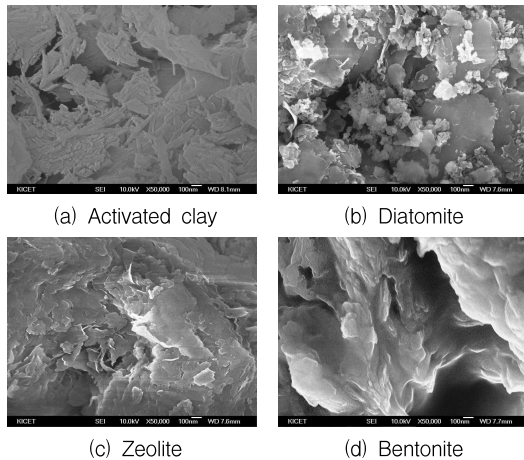


Fig. 1 SEM micrographs of porous materials<sup>4)</sup>

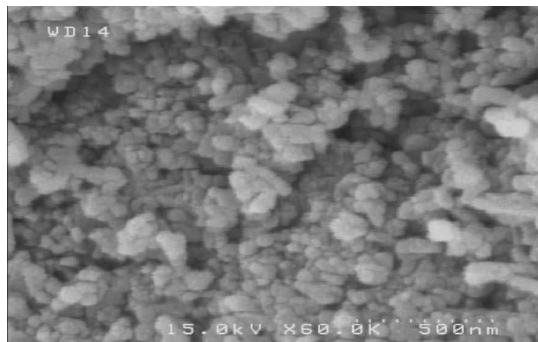


Fig. 2 SEM micrographs Activated carbon<sup>19)</sup>

## 2.2 상변화물질 (Phase change material ; PCMs)

PCM은 온도의 변화에 따라서 형상이 변화하는 물질로, 형상이 변할 때 열을 잠열의 형태로 흡수 및 방출하는 특성을 가지고 있다. 이러한 잠열의 경우, 동일 부피 대비 현열에 비하여 훨씬 더 많은 에너지를 저장 혹은 방출할 수 있다<sup>15)</sup>. PCM을 활용한 축열 방식은 높은 효율로 열에너지를 저장할 수 있어, 전세계적으로 태양열 발전, 폐열회수 시스템, 지중열교환 시스템 및 건물 공조 등 에너지 생산 및 관리 분야에 널리 사용되고 있다<sup>16),17)</sup>. PCM의 경우 온도의 변화에 따라 형상이 변화하는 특성 때문에 건축자재에 순수한 PCM을 적용할 경우, 액체 상태의 PCM이 누출될 수 있다는 단점을 가지고 있어, 건축물에 적용하

기 위해서는 먼저 PCM의 형태를 고정시키는 작업이 필요하다. PCM의 형태를 고정하는 상안정화 방법은 크게 3가지의 형태로 연구가 진행되고 있으며, 폴리머와 PCM의 혼합 방법, PCM을 캡슐의 형태로 제작하는 방법, 그리고 다공성 물질 내부에 PCM을 함침하여 상을 고정시키는 방법이 있다<sup>18)</sup>. 건축물 내부의 벽체나 천장 바닥 등 내부 마감재로 사용되는 석고보드에 PCM을 적용하는 경우, 외기온 변동으로 인한 냉난방 부하 발생 시 열을 흡수 및 방출함으로써 건축 재료의 열적 효율 향상 및 피크부하 저감과 에너지 절감 등의 효과를 도출할 수 있다. Fig. 3은 캡슐 형태로 제조된 PCM의 미세구조 이미지를 보여준다.

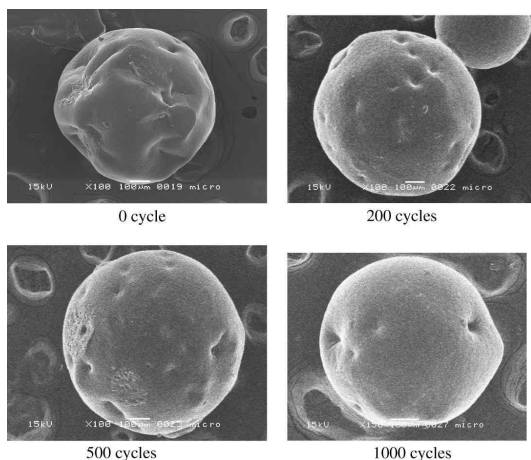


Fig. 3 Micro encapsulated paraffin profile evaluated by SEM at different thermal cycles<sup>20)</sup>

### 3. 석고보드 제작 사례

#### 3.1 기능성 석고보드 제작 사례

기능성 석고보드란 실내공기 오염물질 및 실내 수분의 흡착 및 분해 성능을 가진 석고보드로, 다공성 물질을 혼합재로 활용하여 개발 및 제작한 것을 말한다<sup>47)</sup>. Jeong E. J.는 활

성백토(Activated clay), 규조토(Diatomite), 벤토나이트(Bentonite) 및 제올라이트(Zeolite)를 각각 5%, 10%의 비율로 첨가하고 소석고, 경화제, 감수제, 지연제 및발포제 등을 혼합하여 석고보드를 제조하였다<sup>4)</sup>. Fig. 4는 다공성 원료 자체 및 기능성 석고보드의 흡수 및 방습 특성을 보여준다. 활성백토의 경우, 흡수율은 각각 34.5%와 31.6%로 나타났으며, 방습율의 경우 30.9%와 27.4%로 확인되었다. 규조토는 24.4%와 28.2%의 흡수율과 15.8%와 25.0%의 방습율을 나타내었으며, 벤토나이트는 26.8%와 26.4%의 흡수율 및 방습율을 나타내었다. 제올라이트는 33.7%와 32.6%의 흡수율 및 방습율을 나타내었으며, 특히 활성백토와 제올라이트의 경우에는 흡수율 및 방습율이 모두 30%를 상회하였다. 이러한 다공성 물질의 흡수율 및 방습율은 해당 재료 내부의 미세구조 기공 특성에 따라 비표면적의 부피와 서로 비례관계에 있는 것을 알 수 있었다. 일반 석고보드의 24시간 흡수량은 17.45g/m<sup>2</sup>, 방습량은 14.15g/m<sup>2</sup>인데 반해 다공성 원료를 5% 첨가한 석고보드의 흡수량은 비표면적의 부피와 비례하여 활성백토, 규조토, 제올라이트, 벤토나이트 순으로 우수한 흡수 성능을 보이는 것으로 확인하였다. 첨가제를 5% 첨가한 석고보드 중 흡수성이 가장 우수한 것은 활성백토를 첨가한 석고보드로 흡수량이 51.5g/m<sup>2</sup>이며, 일반 석고보드와 비교하였을 때 흡수량이 3배 가까이 증가하는 결과를 보여주었다<sup>4)</sup>. 이를 통해, 다공성 물질의 기공 부피에 따른 흡수 및 방습량이 비례하여 증가하는 것을 확인하였고, 다공성 물질을 첨가제로 첨가하여 제작한 석고보드가 실내 건축 재료로 활용될 경우, 고온 다습하여 습기 및 곰팡이 발생이 우려되는 실내 환경의 공기질 향상에 긍정적인 영향을 끼칠 수 있을 것으로 판단하였다.

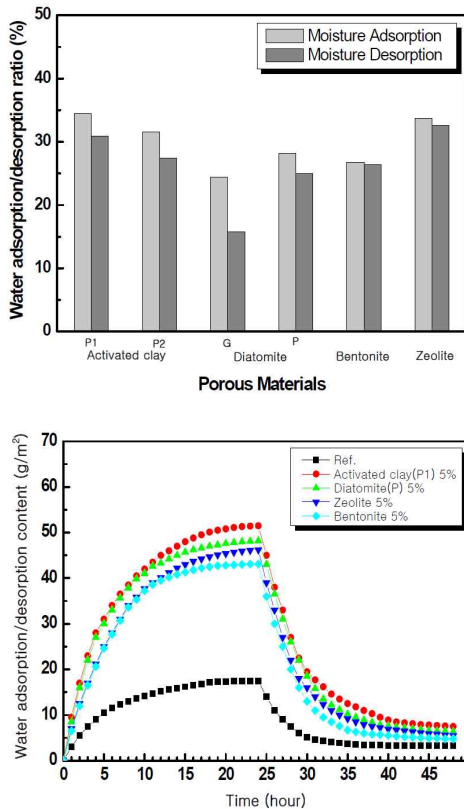


Fig. 4 Absorption performance of moisture-proof porous materials and functionality gypsum board<sup>4)</sup>

Kim H. J. et al.은 기능성 석고보드의 포름알데히드 저감 성능평가를 위하여 실험시험을 실시하였다. 실험은 기능성 석고보드를 시공한 실험실 1과 일반 석고보드를 시공한 실험실 2의 포름알데히드 농도를 비교하는 것으로 진행되었으며, 결과는 Fig. 5에 보여진다<sup>7)</sup>. 그래프를 보면, 기능성 석고보드의 포름알데히드 방출 농도를 일반 석고보드와 비교하였을 때 초기에 약간 더 높은 농도를 보이다가 10일차에 시공 전 농도의 60% 정도인  $0.03\text{mg}/\text{m}^3$  까지 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이후  $0.1\text{mg}/\text{m}^3$ 로 다시 증가하는 추세를 보이다가 28일차에  $0.03\text{mg}/\text{m}^3$ 로 농도가 다시 감소하였다<sup>7)</sup>. 실험실에 별도의 환기를 실시하지 않았

다는 점을 감안하였을 때, 누기로 인한 포름알데히드의 감소가 아닌, 기능성 석고보드의 포름알데히드 절감효과라고 판단할 수 있다.

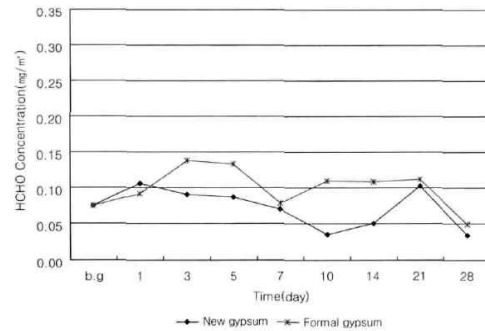


Fig. 5 Concentration change of HCHO from gypsum construction<sup>7)</sup>

Kim Y. S. et al.은 석고보드에 다공성 물질을 첨가한 시험편의 포름알데히드 흡착 및 재방출 농도 측정에 대한 연구를 수행하였다. 실험은 12시간동안 진행되었으며, 활성백토, 규조토, 제올라이트, 벤토나이트를 10% 첨가하여 제작한 시험편을 사용하였으며, 실험결과를 Fig. 6에 나타내었다. 그래프에서 포름알데히드를 흡착한 시험편은 시간이 지날수록 일정량의 포름알데히드를 재방출하였으나, 3시간을 기점으로 하여 재 방출되는 포름알데히드 양이 줄어들었고, 흡착된 양에 비하여 미미한 수준임을 확인하였다<sup>4)</sup>. 결론적으로 다공성 물질이 첨가된 석고보드의 포름알데히드 흡착 능력이 향상되었음을 알 수 있었고, 흡착속도 또한 증가함을 알 수 있었다. 이러한 특성은 앞에서 언급하였던 수분의 흡착 특성과도 유사한 결과로, 석고보드 패널의 기공 특성과 비례 관계에 있음을 알 수 있다. 기능성 석고보드의 개발은 쾌적한 실내 환경을 조성하는데 기여할 수 있으며 향후 시공 방법 및 내구성을 보완한다면 친환경 건축자재로서 다양한 분야 및 건

축부위에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

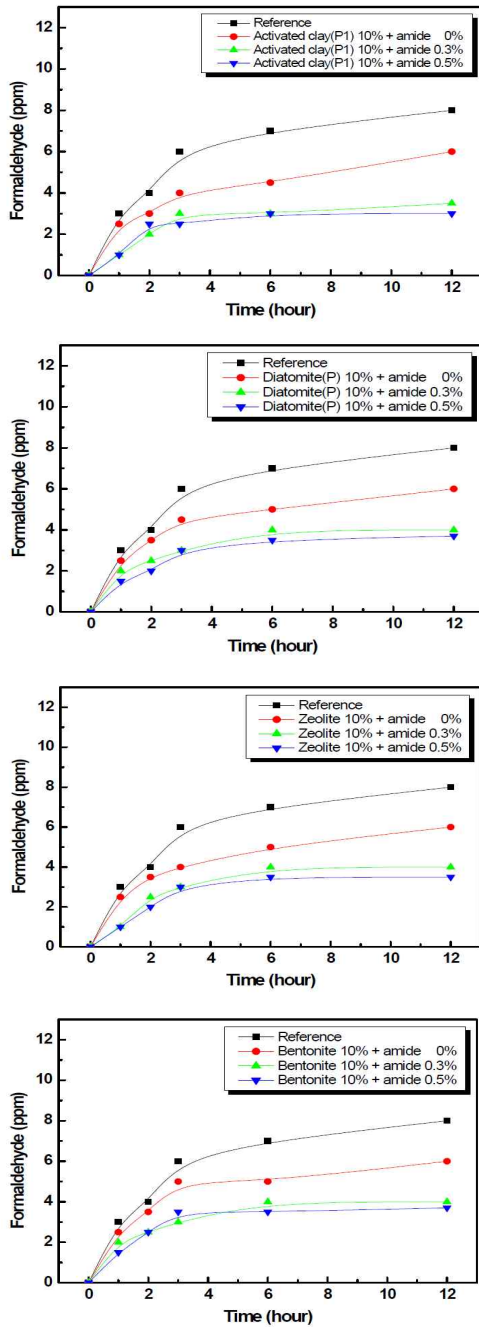


Fig. 6 Adsorption and Decomposition for HCHO of functionality gypsum board<sup>4)</sup>

### 3.2 축열 석고보드 제작 사례

건축물에서 열의 이동은 건축 자재 고유의 특성과 외부 및 내부의 온도, 기류 속도 등에 따라 다양하게 표현이 가능하며<sup>8)9)10)11)</sup>, 건축물의 에너지 사용량과 밀접한 관계를 보인다. 건축물에서 사용되는 에너지 저감을 위한 방법은 크게 두 가지로 단열과 축열에 의한 방법이 있다. 단열은 단열재의 설치 위치에 따라 내단열 및 외단열로 구분할 수 있다. 내단열의 경우 주로 공동 주택에 시공되는 방법으로 외단열에 비해 효율이 떨어지고, 단열재 뒷부분의 온도 저하로 인하여 결로 및 곰팡이 발생 등의 문제점을 가지고 있다. 또한, 외단열의 경우에는 외부 표면의 오염 물질로 인해 단열 성능이 떨어진다는 단점이 있다. 이에 비하여 축열은 열을 저장하는 효과를 활용하여 열용량이 큰 물체에 에너지를 저장하는 방식으로 현열, 잠열 및 화학적인 방법으로 열에너지를 저장하는 방법이 있다<sup>21)22)</sup>. 축열의 원리는 외부 온도가 높은 낮에 발생하는 열을 흡수하여 실내로 유입되는 열을 흡수하여 외부 온도가 떨어지는 밤에 흡수했던 열을 방출하여 건물의 실내 온도의 변화 폭을 조절하는 방식으로 이해할 수 있다.

Shukla N. et al.은 시차주사 열량계(Differential Scanning Calorimeter; DSC)를 활용하여 캡슐화된 PCM(micro encapsulated PCM; MPCM)을 적용한 석고보드의 열적 성능을 평가하였다. MPCM이 적용된 석고보드의 열용량 분석 결과는 Fig. 7에 나타내었다. 그래프에서 보듯이 용융점은 24°C의 온도에서 발생되며, 응고점의 경우에는 -40°C에서 피크가 발생된다. 상이 변화하기 시작한 19°C에서 더 이상의 열적 거동이 없는 25°C까지의 잠열은 115kJ/kg으로 확인되었다. Fig. 8에서 보이는 그래프는 PCM을 혼합한 석고보드의 단위 면적당 엔탈

피 곡선으로 나타낸 체적 열용량을 나타낸다. 체적 열용량은 PCM이 용융되는 동안 시험편에 흡수되었던 열이 방출되는 것을 나타내며, 이를 통해 잠열이 약 28kJ/kg으로 확인하였다<sup>11)</sup>.

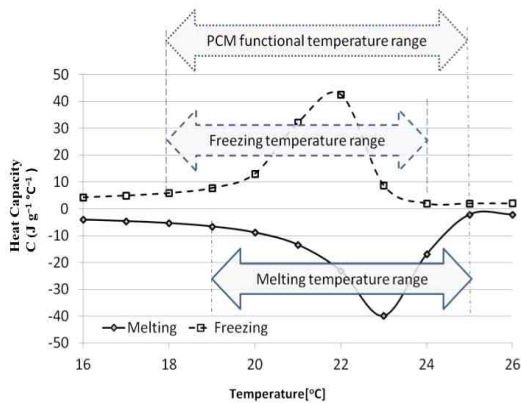


Fig. 7 Temperature-dependent heat capacity of micro-encapsulated PCM powder measured using DSC method. Melting and freezing cycles show sub-cooling of 1°C<sup>11)</sup>.

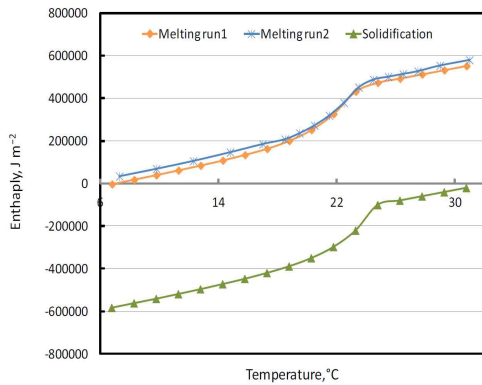


Fig. 8 Enthalpy (in terms of heat per unit normal area) as a function of temperature for 1/2" thick PCM impregnated gypsum board<sup>11)</sup>.

이러한 엔탈피 온도 단계의 크기는 상태 함수로써 상변화 과정을 나타낼 수 있는데, 엔탈피 곡선의 변화를 통하여 MPCM을 포함한 석

고보드의 잠열값이 일정하게 나타나는 것을 확인하였고, 이는 안정적인 잠열값을 가지고 있음을 의미한다. Fig. 9는 시험편에 대한 체적 열용량을 나타낸 것을 보여준다. 시험편의 체적 열용량은 적용되는 PCM의 용융 및 응고 사이클과 매우 유사한 형태를 보여주었다<sup>11)</sup>. 결과적으로 본 연구는 체적 열용량과 단위 면적당 엔탈피 그래프 특성을 통해 MPCM을 함침하여 석고보드를 제작했을 때, MPCM의 자체적인 열적 성능이 크게 변하지 않는다는 것과<sup>11)</sup>, MPCM을 적용한 축열 석고보드가 건축물 에너지 성능을 향상시키는데 긍정적인 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다.

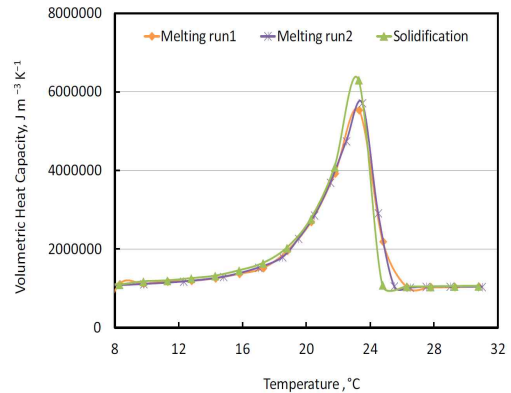


Fig. 9 Volumetric heat capacity as a function of temperature for 1/2" thick PCM impregnated gypsum board<sup>11)</sup>.

Fig. 10은 PCM의 함유량에 따른 석고보드 시험편의 DSC 곡선을 보여준다. 결과적으로 PCM의 함유량이 증가함에 따라 석고보드의 축열 성능 역시 비례하여 증가하는 것을 확인할 수 있었다<sup>9)</sup>. 캡슐화하지 않은 n-octadecane을 혼합한 석고보드의 경우 축열 성능이 크게 향상되지 않았으나, 캡슐화 비율이 높은 PCM일 수록 열적 성능이 향상되는 것을 확인하였다.

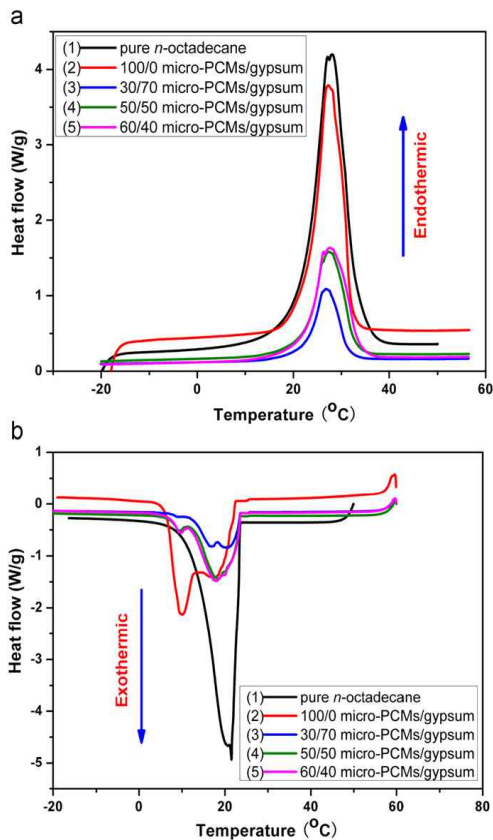


Fig. 10 DSC thermograms of the thermal-regulated gypsum boards incorporated with 3 wt% glass fibers and different weight percentages of micro-PCMs: (a) heating thermograms; (b) cooling thermograms<sup>9)</sup>.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 건축자재로 사용되는 석고보드 제작 시 사용되는 첨가제의 종류에 따라 발현되는 석고보드의 성능에 대한 연구를 고찰하고, 국내 및 국외에서 연구되고 있는 첨가제 및 석고보드의 종류 및 특성에 대하여 확인하였다. 석고보드의 첨가제로 사용 가능한 재료로 오염물질 및 습기 흡착 성능을 가진 규조토, 활성백토, 활성탄 등의 다공성 물질과 축열 성능으로 인하여 건물 에너지 소비량 저감에 기여할 수 있는 상변화 물질이 있음을 확

인하였다. 결과적으로 첨가제의 종류에 따라 제작된 석고보드의 성능 평가 결과를 고찰하였을 때, 첨가제 본연의 성능 발현이 잘 이루어지는 것을 확인하였다. 하지만 첨가제를 적용하여 제작한 석고보드에서 첨가제의 성능과 동시에 건축자재 본연의 성능이 잘 발현될 수 있는 지에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

#### 후 기

본 논문은 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비지원 14CHUD-C061954-03에 의해 수행되었습니다.

#### Reference

1. Kontogeorgos. D. A, Founti. M. A, A generalized methodology for the definition of reactive porous materials physical properties: Prediction of gypsum board properties, Construction and Building Materials, Vol. 48, pp. 804-813, 2014.
2. Kontogeorgos. D. A, Wakili. K. G, Hugi. E, Founti. M, Heat and moisture transfer through a steel stud gypsum board assembly exposed to fire, Construction and Building Materials, Vol. 26, pp. 746-754, 2012.
3. Gunschera. J, Mentese S, Salthammer T, Andersen J. R, Impact of building materials on indoor formaldehyde levels: Effect of ceiling tiles, mineral fiber insulation and gypsum board, Building and Environment Vol. 64, pp. 138-145, 2013.
4. Jeong. E.J, Hygroscopic and Formaldehyde Absorption Characteristics of Gypsum Board Fabricated Using Porous Materials, Division of Materials Science Engineering Graduate School Hanyang University, 2010.



5. Kim. S, Incombustibility, physico-mechanical properties and TVOC emission behavior of the gypsum - rice husk boards for wall and ceiling materials for construction, *Industrial Crops and Products*, Vol. 29, pp. 381-387, 2009.
6. Kim. Y. S, Yoon. S. W, Lee. J. I, Shin. H. W, Lee. J. H, Lee. C. M, Jung. S. W, Evaluation of correlation between indoor radon concentration and the attribution of gypsum board content in building materials, *Journal of Korean society for Indoor Environment*, Vol. 10, pp. 217-226, 2013.
7. Kim. H. J, Song. K. D, Lee. Y. G, A Study on the mock up test for reduction of HCHO using the functional gypsum board, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 20, pp. 814-819, 2008.
8. Oliver. A, Thermal characterization of gypsum boards with PCM included: Thermal energy storage in buildings through latent heat, *Energy and Buildings*, Vol. 48, pp. 1-7, 2007.
9. Zhang. H, Xu. Q, Zhao. Z, Zhang. J, Sun. Y, Sun. L, Xu. F, Sawada. Y, Preparation and thermal performance of gypsum boards incorporated with microencapsulated phase change materials for thermal regulation, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 102, pp. 93-102, 2012.
10. Cherki. A, Remy. B, Khabbazi. A, Jannot. Y, Baillis. D, Experimental thermal properties characterization of insulating cork - gypsum composite, *Construction and Building Materials*, Vol. 54, pp. 202-209, 2014.
11. Shukla. N, Fallahi. A, Kosny. J, Performance characterization of PCM impregnated gypsum board for building applications, *Energy Procedia* Vol. 30, pp. 370-379, 2012.
12. Yoon. S. W, Kim. Y. J, Jang. B. W, Byun. J. I, Yoon. J. Y, Performance evaluation of several radon detectors in the standard chamber and dwellings, *Journal of Radiation protection*, Vol. 33, pp. 173-181, 2008.
13. Kim. C. K, Choi. J. H, Kang. J. H, A study on the reduction of indoor radon contamination, *Journal of Korean Society of Radiological Science*, Vol. 29, pp. 53-56, 2006.
14. Cho. Y. M, Lee. H. H, Effect of Black Charcoal and Activated Carbon for Reduction of Radon Radioactivity that Emitted from Building Materials, *Journal of the Korea Furniture Society*, Vol. 22, pp. 13-17, 2011.
15. Kim. S, Jeong. S. G, Lee. J. H, Kim. S, Preparation and Thermal Properties of Octadecane/xGnP Shape-Stabilized Phase Change Materials to Improve Heat Storage Performance of Buildings, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 25, pp. 126-130, 2013.
16. Farid. M. M, Khudhair. A. M, Razack. S. A. K, Al-Hallaj. S, A review on phase change energy storage: materials and applications, *Energy Conversion and Management*, Vol. 45, pp. 1597-1615, 2004.
17. Zalba. B, Marin. J. M, Cabeza. L. F, Mehling. H, Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 23, pp. 251 - 283, 2003.
18. Jeong. S. G, Yu. S, Jang. S, Park. J. S, Kim. T, Lee. J. H, Kim. S, Preparation of Shape Stabilized PCM Using Porous Materials for Application to Buildings, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 25, pp. 432-437, 2013.
19. Karimi. H, Ghaedi. M, Application of artificial neural network and genetic algorithm to modeling and optimization of removal of methylene blue using activated carbon. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 20, pp. 2471-2476, 2014.

20. Hawlader. M. N. A, Uddin. M. S, Zhu. H. J, Encapsulated phase change materials for thermal energy storage : Experiments and simulation, International Journal of Energy Research, Vol. 26, pp. 159-171, 2002.
21. Hadjieva. M, Kanev. S, Argirov. J, Thermo Physical Properties of Some Paraffins Applicable to Thermal Energy Storage, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 27, pp. 181-187, 1992.
22. Rozanna. D, Salmiah. A, Chuah. T. G, Medyan. R, Thomas. S. Y, Sa'ari. M, A Study on Thermal Characteristics of Phase Change Material in Gypsum Board for Building Application, Journal of Oil Palm Research, Vol. 17, pp. 41-46, 2005.