

## PCM 함유된 축열석고보드의 열환경특성

권오훈 · 윤희관 · 한성국 · 안대현\* · 심명진 · 조성운\*\* · 박종순 · 김재용<sup>†</sup>

충북대학교 환경공학과, \*충남도청 수질관리과, \*\* (주)엔엔에이치  
(2010년 7월 21일 접수, 2010년 8월 24일 채택)

### Thermal Environment Characteristic of the Heat Storage Gypsum Board Included with Phase Change Material

Oh-Hoon Kwon, Huy-Kwan Yun, Seong-Kuk Han, Dae-Hyun Ahn\*,  
Myeong-Jin Shim, Sung-Woon Cho\*\*, Jong-Soon Park, and Jae-Yong Kim<sup>†</sup>

Department of Environmental Engineering, Chungbuk University, Cheong-Ju 361-763, Korea  
\*Department of water management, Chungnam Provincial Government, Chungnam 301-763, Korea  
\*\*NATURE & HUMAN Co., Ltd., Chungnam 331-962, Korea  
(Received July 21, 2010; Accepted August 24, 2010)

기존 단열재의 주된 기능은 단지 열전달을 차단하는 기능과 건물로부터 열손실을 줄여주는 기능만을 수행했다. 반면, 축열재는 특정온도 범위 내에서 열에너지를 저장 또는 방출함으로써 건물에너지 사용량을 절감할 수 있다. 축열 건자재는 실내 공기온도 변화주기를 효과적으로 조절하여 일정하게 온도를 유지시킬 수 있다. 결과적으로 냉난방시스템 기능을 효율적으로 향상시킬 수 있다. 본 연구는 건축자재로 많이 이용되고 있는 석고보드에 상변화잠열물질을 축열재로 첨가하여 그 물성과 열환경 특성을 파악하였다. 또한 축열 건자재를 활용할 때 발생가능한 문제점을 확인하였다. 마지막으로 TVOC와 HCHO 함량 분석으로부터 오염물질의 배출가능성을 조사하여 축열 건자재의 환경 친화도를 검토하였다.

The main function of conventional insulation materials is only to block the heat transfer and reduce heat loss from the building. On the other hand, thermal storage materials can work as an energy saver by absorbing or emitting heat within a specific temperature range. Thermal storage materials for building can maintain a constant temperature by effectively regulating the cycle of indoor temperature. As a result, we can enhance the performance of a cooling and heating system efficiently. In this study, phase change materials (PCMs) were added as thermal storage materials into gypsum boards which are extensively used for building material and we found out the thermal environmental characteristics. In addition, we checked out some problems when applying the thermal storage materials to buildings. Finally, This study set out to examine the degree of environmental-friendly characteristics of thermal storage building materials by analyzing the amount of TVOC and HCHO contents with the possibility of pollutants emission.

**Keywords:** PCM, heat system, gypsum board, latent heat, microcapsule

### 1. 서 론

국내에서 석고보드가 최초로 생산된 것은 1974년이다. 그 기술은 발전에 발전을 거듭하여 배연탈황석고를 사용하여 저비중, 고강도 석고보드 제품의 생산이 가능해졌으며 세계 유수의 제품과 비교해도 그 품질수준에 손색이 없을 정도까지 기술이 발전하였다. 석고보드 자체는 안정된 결정상태이므로 기건 상태에서의 신축율이 극히 낮아 대기 온도 및 습도에 따라 신축 변형이 거의 없어 시공 후 뒤틀림이나 처짐, 균열의 염려가 적다. 이외에도 석고보드는 가공성과 시공 용이성 등으로 인하여 현재의 건설에 있어서 주요한 건축자재로 활용하고 있

다.

한편, 주거형태 및 건축자재의 변화와 냉난방을 위한 에너지사용량의 증대 및 유가인상 등 에너지 파동으로 에너지절약에 대한 시급한 대책들이 요구되어져 왔으며, 1970년대 1차 오일쇼크에 의하여 에너지 이용합리화에 관한 관심을 갖게 되었다. 우리나라도 건축물에 단열 규정 적용 및 그린 빌딩 제도를 도입하여 에너지의 효율적이고 합리적인 이용방법에 많은 혜택을 주고 있으나 아직 유럽이나 일본의 건물에 비하면 단열성능도 떨어지고 거주 온도에 따른 에너지의 소모가 많아 문제시 되고 있다. 앞서 말한 바와 같이 건축물의 에너지 절약 대책 중에는 새는 열을 막아내는 단열과 남은 열을 저장하였다가 필요할 때 적절한 양을 꺼내 사용하는 축열의 두 가지 방법이 있다 [1,2].

<sup>†</sup> 교신저자(e-mail: jykim4@korea.com)

Table 1. Specification of Encapsulated PCMs (phase change materials)

|                                      | A      | B        | C        |
|--------------------------------------|--------|----------|----------|
| Particle size ( $\mu\text{m}$ )      | 13     | 7        | 20       |
| Shell                                | Acryl  | Melamine | Melamine |
| Melting point ( $^{\circ}\text{C}$ ) | 26     | 24       | 28       |
| Heat of fusion ( $\text{J/g}$ )      | 142    | 211      | 166      |
| Phase                                | Powder | Powder   | Slurry   |

건축물의 단열방법은 단열재의 설치 위치에 따라 내단열과 외단열로 구분 할 수 있으며, 내단열은 현재 주로 공동주택들에 행해지고 있는 방법으로 외단열에 비하여 효율이 떨어지고, 단열재 뒷부분의 온도저하로 인한 결로 및 곰팡이 발생 등의 문제점을 안고 있다. 또 외단열의 경우 외부 표면이 거칠어 매연이나 기름때 섞인 먼지에 의한 오염의 제거가 어렵다는 단점이 있다[3,4].

이에 반하여 축열은 열저장효과를 이용하여 냉난방 부하가 적을 때 남은 열을 저장하였다가 최대 부하 때 이용하는 방법으로 현열 축열과 잠열 축열로 구분할 수 있으며, 건물 벽체나 천장 바닥 등 내부마감재로 사용되는 석고보드에 축열재를 활용함으로써 건축물 내외부의 열 변동 발생 시 열을 흡수 및 방출하여 열사용 부하를 완화시켜 냉난방 에너지를 절약하고 쾌적한 주거환경을 제공 할 수 있다[5].

따라서 본 연구는 상온에서 상변화특성을 갖는 상변화물질을 캡슐화하여 가공한 축열재를 현재 많이 사용되고 있는 석고보드에 부가하였을 때 건축자재로서 필요한 물성과 에너지절약 특성들을 파악하고 이를 통한 축열 건자재로의 최적 배합비율을 도출하고자 하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 재료

#### 2.1.1. 상변화물질(PCM)

본 연구에서는 캡슐화된 상온 상변화물질로, 국내에서 판매되고 있는 A, B, C 3종의 축열 미립자를 각각 구입하여 사용하였다. 실험에 사용한 축열 미립자의 주요 사양은 Table 1과 같다.

#### 2.1.2. 석고보드

시판되고 있는 반수석고( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ )를 주원료로 하였으며, 미량의 소포제 및 분산제가 부가된 원료를 사용하였다.

### 2.2. 제작방법

석고보드에 축열 성능을 갖도록 한 제품에 대한 규정은 없으나 KS F 3504에 의거 시험편의 크기를 만족시키는 정사각형의 아크릴제 성형틀을 준비하여 축열 석고보드를 제작하였다. 적절한 배합비를 얻기 위한 예비 실험으로 석고에 물의 양을 1 : 0.7~1 : 1까지 물을 가하고 강하게 교반하여 얻어진 슬러리를 아크릴제 성형틀에 부으며 유동성 및 건조 경화되는 특성을 파악하였다. 이상의 과정을 통하여 적절한 혼합비를 얻은 뒤 시험편에 석고보드용 성형틀을 올려놓은 다음 석고 혼합액을 제조하여 성형틀에 부어 가득 차도록 한다. 혼합과정에서 큰 기포가 생성될 수 있으므로 바이브레이터(Vibrator)를 이용하여 10 s 정도 탈포를 한 후 표면에 물이 비치기 시작하면 크래프트지(Craft Paper)를 덮고 건조되기를 기다린다. 30 min 정도 지나 경화가 이루어진 상태에서 탈형을 하고 건조기에 넣어 60  $^{\circ}\text{C}$ 에서 2 h 동안 완전 건조한다[6].

Figure 1은 축열석고보드를 제조하기 위한 몰드의 사진이다.

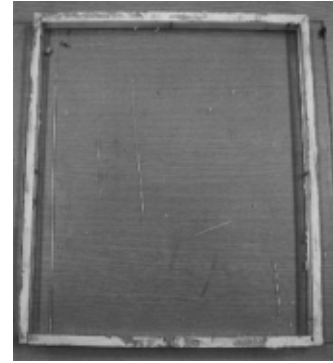


Figure 1. Photograph of gypsum board containing PCM.

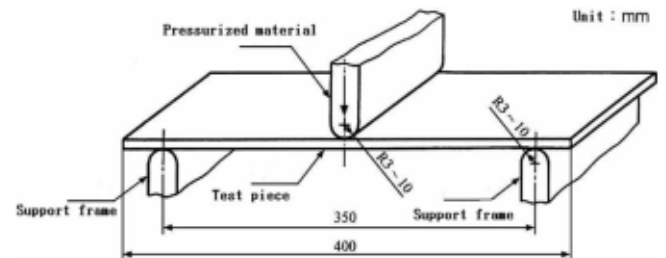


Figure 2. Apparatus of load tester.

### 2.3. 성능평가

#### 2.3.1. 두께측정

시편은  $40 \pm 2$   $^{\circ}\text{C}$ 로 조정된 건조기 속에서 향량이 될 때까지 건조시킨 후 측정하였다. KS 규정에는 모양, 치수 및 허용차에 대하여 두께  $\pm 0.5$  mm, 길이 + 3 mm, 나비 - 3 mm로 정의하고 있으며, 5매 이상의 시료를 추출하여 5회 이상 측정하였고, 시료의 나비 방향으로 20 mm 이상 안쪽 3점을 측정하여 평균값으로 두께를 결정하였다[7].

#### 2.3.2. 휨 하중 파괴 시험

휨 파괴 하중 시험은 JIS A 6901에 의거 시험편을 Figure 2에 나타난 방법과 같이 길이 방향은 시험편의 표면을 아래 방향으로 나비 방향은 표면을 위 방향으로 하여 스패는 350 mm로 하고 집중 하중을 스패 중앙의 전체 나비에 가하여 실시하였다. 이때 평균 하중 속도는 250 N/min  $\pm$  20%로 하였다.

#### 2.3.3. 열환경 특성시험

##### 2.3.3.1. 비열 측정

축열 석고보드의 정량적인 열적 특성을 알아보기 위해서는 열용량이 측정되어야만 하며, 이 데이터는 축열 석고보드를 건축물에 적용 시 에너지 절감 효과에 대한 수치모사에 필요한 데이터로 사용된다. 국내에서는 고체의 비열 측정을 위한 장비가 없는 관계로 비열계산 원리를 이용한 실험실 사이즈의 작은 고체비열 측정 장치를 제작하였으며 Figure 3에 그 원리를 보였으며 실험은 KSL 9016에 의거 실시하였다[8,9].

##### 2.3.3.2. TVOCs, HCHO 분석

축열 석고보드로부터 방출되는 TVOCs (총휘발성유기물질), HCHO (포름알데히드)를 소형 챔버법으로 측정 분석하였다. 챔버는 스테인리스강 재질로 된 20 L 용기로, 시편을 넣고 외부에서 여과된 청정공기

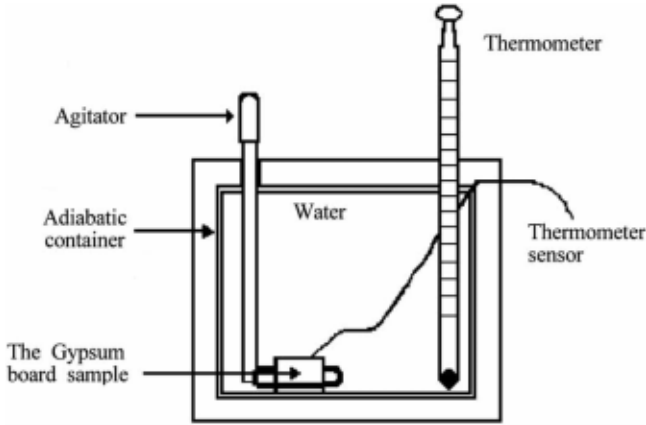
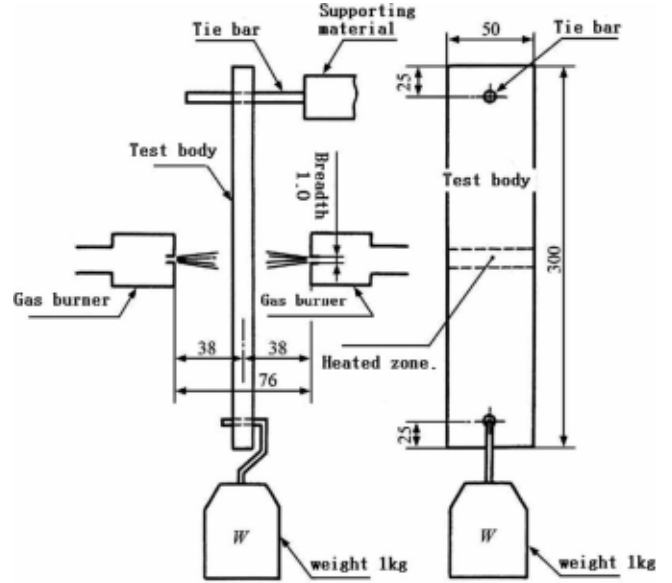
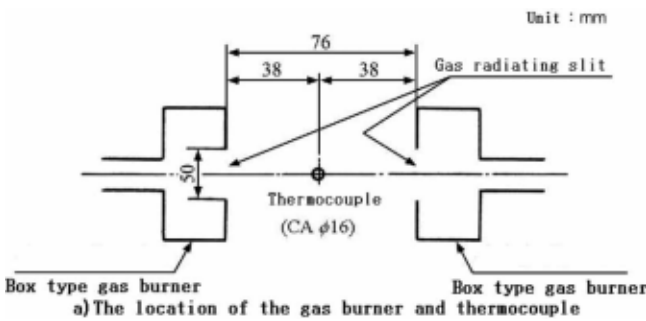


Figure 3. Specific heat measurement apparatus.



b) The location of the gas burner and test piece  
Figure 5. Flammability tester.



a) The location of the gas burner and thermocouple  
Figure 4. Flammability tester.

를 주입하면서 건축 재료에서 발생하는 오염물질의 방출량을 GC-MS와 HPLC로 측정하였다.

2.3.3.3. 난연성시험

난연성 시험의 시험편은 위와 같은 방법으로 시료를 건조한 후 Figure 4와 같이 프로판 가스를 열원으로 하는 2대의 가스버너를 그 앞 끝 사이 거리가 76 mm가 되도록 직선상에 수평으로 고정된 후 각각의 가스버너로부터 거의 균등하게 화염을 방사시켜 2대의 가스버너 중간점에 열전대의 온도가  $1000 \pm 5$  °C가 되도록 유입 공기량으로 화염을 조정하였다. 그 후 Figure 5와 같이 한 끝을 지지 봉으로 지지하고 다른 끝에  $1000 \pm 10$  g의 추를 달아 시험편을 2대 가스버너의 중앙 위치에 유지하고 시험편의 중앙부를 Table 2에 나타낸 시간 동안 가열하는 방법으로 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 성능평가

3.1.1. 두께 측정

Figure 1의 몰드를 이용하여 얻어진 축열 석고보드에 대하여 두께를 측정된 결과 10.4, 10.3, 10.5, 9.9, 11, 10 mm인 시료를 얻었다.

3.1.2. 휨강도 측정

압축 및 휨강도는 Tables 3, 4와 같은 결과가 나왔다. 강도 시험을 한 결과 일반 석고보드 기준을 만족하지 못하였다. 이는 양산되는 석고보드의 경우 양면에  $150 \sim 200$  g/m<sup>2</sup>하는 고강도의 크래프트지로 보강하여 강도를 유지하였으나 본 실험에서 제조한 축열 석고보드는

Table 2. KS F 3504 Heating Time

| Sample thickness (mm) | Heating time (min) |
|-----------------------|--------------------|
| 12.5                  | 8                  |
| 15.0                  | 10                 |
| 25.0                  | 15                 |

Table 3. Compression Strength of PCM Gypsum Board

| Item    | Load (N) | Area (mm <sup>2</sup> ) | Compression hardness (N/mm <sup>2</sup> ) |
|---------|----------|-------------------------|---|
| 1       | 13,530   |                         | 5.4                                       |
| 2       | 13,430   | 2,500                   | 5.4                                       |
| 3       | 12,940   |                         | 5.2                                       |
| Average |          |                         | 5.3                                       |

Table 4. Flexural Strength of PCM Gypsum Board

| Items   | Load (N) | Area (mm <sup>2</sup> ) | Load strength (N/mm <sup>2</sup> ) |
|---------|----------|-------------------------|------------------------------------|
| 1       | 1,310    |                         | 3.1                                |
| 2       | 2,246    | 424                     | 5.3                                |
| 3       | 1,910    |                         | 4.5                                |
| 4       | 1,969    |                         | 4.6                                |
| Average |          |                         | 4.3                                |

규격에 맞는 크래프트지를 보강하지 못한 것이 주원인이었으나, 부가되는 물의 비율, 종이에 의한 초기 흡습량, 생산 분위기 온습도 및 건조시간 등에 의하여 압축 및 휨강도의 차이가 커진다는 사실을 알게 되었다.

3.1.3. 열환경 특성 시험

3.1.3.1. 비열 측정

축열 석고보드의 열특성 실험을 위하여 비열 측정을 시행하였다. 온도센서가 내장된 축열 미립자를 함유하지 않은 일반 석고보드 시편

**Table 5. Experimental Data of Specific Heat Measurement Specimen**

| Items  | Result  | Unit |
|--|---------|------|
| Mass of Gypsum specimen                                      | 50.54   | g    |
| Volume of Gypsum specimen                                    | 37.50   | mL   |
| Density of Gypsum specimen                                   | 1.35    | g/mL |
| The temperature of the heated gypsum specimen                | 90      | ℃    |
| The temperature of the incipient water                       | 18.1    | ℃    |
| The equilibrium temperature of the water and gypsum specimen | 19.4    | ℃    |
| The turnaround time to the equilibrium temperature           | 48      | min  |
| The weight of the water within the insulating container      | 1981.84 | g    |

**Table 6. Density & Sensible Heat of PCM**

|                                 | Hexadecane | Octadecane | Melamine |
|---------------------------------|------------|------------|----------|
| Sensible heat solid (kcal/kg℃)  | 0.394      | 0.418      | 0.400    |
| Sensible heat liquid (kcal/kg℃) | 0.523      | 0.530      | -        |
| Melting point (℃)               | 18         | 28         | 354      |
| Density (g/mL)                  | 0.773      | 0.782      | 1.490    |

**Table 7. Thermal Conductivity of PCM Gypsum Board**

| Items                                    | Sample name  | Result | Test method     |
|--|--------------|--------|-----------------|
| Heat conductivity (W/m · K) (Temp. 20 ℃) | Gypsum       | 0.144  | KS L 9016: 2005 |
|  | PCM C 10 wt% | 0.163  |                 |
|  | PCM C 20 wt% | 0.150  |                 |
|  | PCM B 10 wt% | 0.128  |                 |
|  | PCM B 20 wt% | 0.144  |                 |
|  | PCM A 10 wt% | 0.128  |                 |
|  | PCM A 20 wt% | 0.138  |                 |

의 실험 데이터들은 Table 5에 나타내었다.

이의 측정 결과를 이용하여 물의 비열을 1 kcal/kg · ℃로 가정하고 위의 열량보존법칙을 이용하여 계산하면 석고보드 비열은 0.722 kcal/kg · ℃이며, 열용량은 비열에 질량을 곱한 값으로 0.037 kcal/℃이다. Table 6에 본 연구에서 사용된 축열 미립자 원료물질의 고체, 액체 상태에서의 비열 및 밀도를 나타내었다. 이러한 각각의 원료물질들의 비열, 밀도값을 이용하여 축열 미립자가 첨가된 석고보드의 비열, 밀도값을 예측할 수 있으며, 상변화 물질이 고체, 액체상태일 경우와 10, 20 wt% 첨가된 경우에 대한 결과를 Table 7에 보였다.

### 3.1.3.2. TVOCs, HCHO 방출량 측정

Table 8은 2종의 축열 석고보드 A, B에 대한 TVOCs와 HCHO의 방출량 측정결과이다.

단, 축열 석고보드 A와 축열 석고보드 B의 시편 제조시 부가한 축열 미립자(캡슐화된 PCM)의 제조사에 서로 다른 물질을 사용한 것에 기인하는 것으로 축열 석고보드 A는 캡슐의 껍질 재질로 아크릴을 사용하며, 아크릴의 중합 시 용매로 톨루엔을 사용함으로써 용매 중에

**Table 8. TVOC & HCHO Test Result of PCM Gypsum Board**

| Items   | A PCM gypsum board | B PCM gypsum board |
|---|--------------------|--------------------|
| TVOCs [ $\mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ] | 428                | 225                |
| HCHO [ $\mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ]  | 7                  | 25                 |
| HB level  | II                 | III                |

**Table 9. HB Label Certification Guide Line (Healthy Building Material)**  
(Unit :  $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ )

| Classifies            |      | General material            |  |
|-----------------------|------|-----------------------------|--|
| Clover mark V (♣♣♣♣♣) | TVOC | 0.10 Under                  |  |
|                       | HCHO | 0.015 Under                 |  |
| Clover mark IV (♣♣♣♣) | TVOC | 0.10 More than ~0.20 Under  |  |
|                       | HCHO | 0.015 More than ~0.05 Under |  |
| Clover mark III (♣♣♣) | TVOC | 0.20 More than ~0.40 Under  |  |
|                       | HCHO | 0.05 More than ~0.12 Under  |  |
| Clover mark II (♣♣)   | TVOC | 0.40 More than ~2.00 Under  |  |
|                       | HCHO | 0.12 More than ~0.60 Under  |  |
| Clover mark I (♣)     | TVOC | 2.00 More than ~4.00 Under  |  |
|                       | HCHO | 0.60 More than ~1.25 Under  |  |

남아 있던 미량의 톨루엔으로 인하여 TVOCs가 비교적 높은 수치로  $428 \mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 에 달하였으나 HCHO는  $7 \mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 이었고, 축열 석고보드 B는 멜라민을 축열 미립자 캡슐의 껍질 재질로 사용한 것으로 중합과정에 포르말린을 사용함으로써 중합 시 잔류하게 된 포르말린에 의하여 HCHO가  $225 \mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 로 축열 석고보드 A에 비하여 높게 검출되었으나 TVOCs는  $25 \mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 이었다.

친환경건축자재인증마크(HB 마크)는 일반자재, 도료, 접착제의 자재별 등급기준으로 구성되어 있으며 일반자재의 경우 I등급부터 V등급으로 Table 9에 등급기준별 오염물질의 농도범위를 나타내었다.

한편, 주택설계기준에서는 건축자재환경성능을 일반적으로 HB III 등급 이상을 선호하고 있으므로 축열 석고보드 B는 HB III등급으로 환경 성능면은 다소 친환경적이나 축열 석고보드 A는 HB II등급으로 환경성능의 개선이 필요한 것으로 나타났다.

### 3.1.3.3. 난연성 시험

난연성 평가의 결과는 Table 10과 같다.

제작된 축열 석고보드는 모두 12 mm 이하로 난연 기준 2급에 해당되며, 시험결과 전체 두께에 대한 용융이나 구멍이 뚫린다든지 등의 변형은 일어나지 않았으나 잔염이 30 s 이하이어야 하는 데에도 불구하고 120 s 이상의 잔염을 내었으며, 발연계수도 60 이하이어야 하지만 60을 초과하여 난연성 평가 기준을 만족 시키지 못하였다. 이것은 석고보드에 10% 이상의 혼입된 캡슐화된 축열 미립자에 의한 것으로 축열 미립자의 껍질은 열경화성인 고분자 물질로  $450 \text{ }^\circ\text{C}$  이상의 온도에서는 열분해가 일어나면서 발연하는 특성을 가지고, 또 축열 미립자 내부의 심물질은 탄소수 16~22인 탄화수소화합물로 가연성이 높기 때문인 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

본 연구는 캡슐화 된 축열 미립자를 건축자재인 석고보드에 적용함

Table 10. Non-Flammability Estimate of PCM Gypsum Board

| Spec.          | Melting | Transformation | Crack of back            | Flame (s) | Flame coefficient | Area/min       |     |
|----------------|---------|----------------|--------------------------|-----------|-------------------|----------------|-----|
| Thickness (mm) | No      | No             | Sample thickness/10Below | 30 s less | 60 less           | 3 min 100 less |     |
| 1              | 10.4    | No             | No                       | 0.0       | 120 upper         | 88             | 595 |
| 2              | 10.3    | No             | No                       | 0.0       | 120 upper         | 96             | 414 |
| 3              | 10.5    | No             | No                       | 0.0       | 120 upper         | 73             | 459 |
| 4              | 9.9     | No             | No                       | 0.0       | 120 upper         | 64             | 560 |

으로 인하여 에너지 절약뿐만 아니라 건축자재로의 본래 기능을 할 수 있는가에 대하여 알아보기 위함이다. 또한 환경적 측면에 있어서 어떠한 영향을 미치는가를 알아보기 위한 실험에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 축열 석고보드의 강도를 측정된 결과 동일 면적에 유사한 힘을 가하였을 때의 압축강도는 평균  $5.3 \text{ N/mm}^2$ 를 나타냈으며, 휨강도는 동일면적에 최저 1310 N의 힘을 가하였을 때  $3.1 \text{ N/mm}^2$ 를 나타냈으며 최고 2136 N의 힘을 가하였을 때는  $5.3 \text{ N/mm}^2$  값을 나타내었다.

2) 축열 석고보드의 열환경 특성 시험결과 축열 미립자 C를 함유한 경우 양이 증가할수록 비열이 작아지지만, 축열 미립자 A와 B를 함유한 경우 양이 증가할수록 비열이 커졌다. 즉 상변화 영역보다 낮은 온도와 상변화 후에서의 비열이 감소함을 알 수 있었으며, 특히 상변화 온도 이하에서의 비열이 더 작았고, 이는 캡슐 내부 물질의 비열 변화에 기인한 것임을 알 수 있었다.

3) 오염물질 방출 가능성을 파악하기 위하여 TVOC함량과 HCHO 함량을 측정된 결과 축열 미립자 A의 경우에는 TVOC가  $428 \mu\text{g/m}^2 \cdot \text{h}$ , HCHO가  $7 \mu\text{g/m}^2 \cdot \text{h}$ 로 검출되었으며, 축열 미립자 B의 경우에는 각각 225,  $25 \mu\text{g/m}^2 \cdot \text{h}$ 로 B의 경우가 더 친환경적이라고 말할 수 있었다. 각기 농도가 다르게 나타나는 양상은 A의 벽물질은 아크릴계수지이고, 용매로 톨루엔을 사용하기에 TVOC가 높으며, B의 경우 벽물질은 멜라민수지이고, 중합 과정에 포르말린을 사용하기 때문에 HCHO가 높은 것으로 추정되었다.

4) 난연성 시험결과 발연계수가 60을 초과하여 난연성 기준을 충족하지 못하였다. 이것은 석고보드에 10% 이상 혼입된 캡슐화된 축열 미립자에 의한 것으로 축열 미립자의 겹질은 열경화성인 고분자 물질로  $450 \text{ }^\circ\text{C}$  이상의 온도에서는 열분해가 일어나면서 발연하는 특성을 가지고, 또 축열 미립자 내부의 심물질은 탄소수 16~22인 탄화수소 화합물로 가연성이 높기 때문인 것으로 판단되었다.

## 참 고 문 헌

1. B. Boh and B. Sumiga, *Mater. Geoenviron.*, **55**, 329 (2008).
2. K. Lin, Y. Zhang, X. Xu, H. Di, R. Yang, and P. Qin, *Energy Build.*, **37**, 15 (2005).
3. E. M. Alawadhi, *Energy Build.*, **40**, 351 (2004).
4. L. Shilei, Y. Zhang, and H. Di, *Energy Convers. Manage.*, **48**, 2016 (2007).
5. C. Cheng, S. Pouffary, N. Svenningsen, and M. Callaway, UNEP (2008).
6. D. W. Hawes and D. Feldman, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **27**, 91 (1992).
7. G. Zhou, Y. Zhang, X. Wang, K. Lin, and W. Xiao, *Sol. Energy*, **81**, 1351 (2007).
8. D. Heim and J. A. Clarke, *Energy Build.*, **36**, 795 (2004).
9. Y. Zhang and X. Liang, *Mater. Des.*, **16**, 91 (1995).