

PCM을 이용한 에너지절약형 건축재료

1. 서론

국내·외의 부문별 에너지 사용비중을 살펴보면 건축물 부문에서 소비되는 에너지가 많은 양을 차지하고 있는 모습을 알 수 있다. 우리나라에서는 최종 에너지소비 중 건축물 부문의 에너지 소비는 20%를 넘어서고 있다(2008년 기준 22%). 이는 점점 증가 추세를 나타내고 있으며, 산업화가 완료단계에 있는 선진국일수록 산업 부문에 비하여 건축물 부문의 에너지소비 비중은 증가하는 경향을 보이는데, 미국 2008년 기준 48%, EU의 경우 2005년 기준이 37.9%에 달한다. 또한 화석 연료의 고갈 등의 원인으로 국제 유가는 높은 폭으로 상승하고 있으며 수입되는 유류의 많은 부분이 건축물의 냉난방에 쓰이고 있다. 이와 같은 상황을 고려해 볼 때, 정부에서 제시하고 있는 이산화탄소 감축 목표를 달성하고 국가적인 에너지 절감에 기여를 하기 위해서는 건축물의 에너지 효율을 향상시킬 필요가 있다.

이러한 이유로 국내·외에서는 저에너지 친환경 건축과 관련된 연구가 활발히 진행되고 있으며 국가 정책적으로도 저탄소 녹색성장의 일환으로 그린홈 200만호의 공급을 통하여 저에너지 주택의 보급을 추진하고 있으며, 해외의 많은 국가 역시 향후 10년 안에 제로에너지 건축물의 보급 또는 의무화를 추진하고 있다. 또한 발리로드맵, 교토의 정서 등의 국제 환경 협약의 영향으로



김 수 민

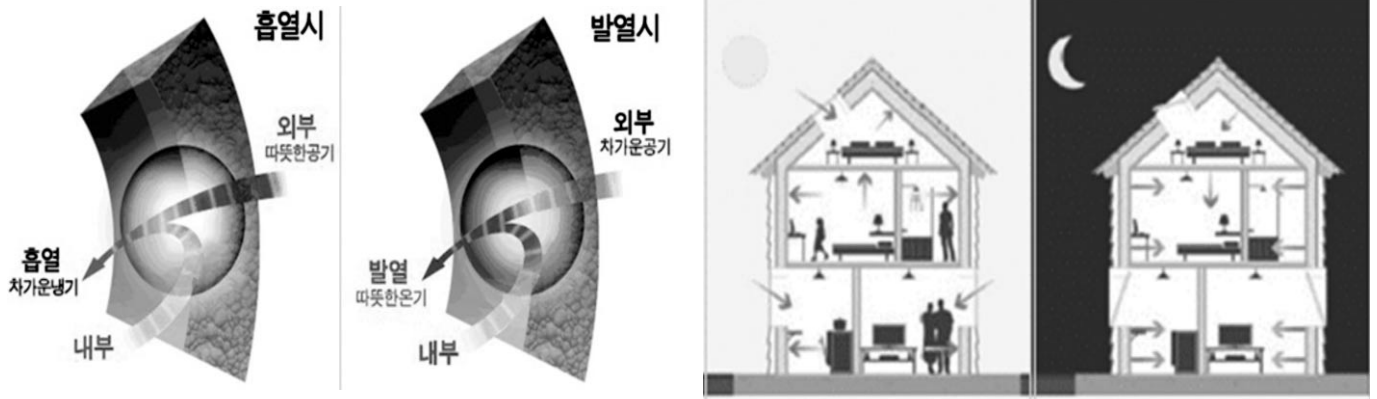
▶ 1975년
▶ 숭실대학교 건축학부 조교수
▶ 관심분야 : 친환경건축재료, 건물에너지, 실내공기질

현재는 감축의무를 가지지 않는 국가들도 앞으로 의무감축 국가가 됨으로서 향후 많은 국가들이 저에너지 친환경 건축과 관련된 연구가 중요 시 될 것이다. 현재 연구가 진행되고 있는 그린빌딩 기술은 크게 Passive와 Active로 나눌 수 있으며 그 중에서도 높은 비용을 들이지 않고 건축물 자체에서 에너지를 절약할 수 있는 Passive 기술의 적용이 우선시 되어야 할 것으로 생각된다. Passive 기술은 간단하게 건축물부하 절감기술로서 단열보강, 고효율 단열창호, 기밀 시공 등을 들 수 있다. 이러한 다양한 Passive 기술 부분에서도 특히 건축재료 부분에 있어서는 건축물에 사용 및 손실되는 에너지 저감을 위해 많은 연구가 진행되고 있으며, 벽체와 창호의 단열 성능 향상, 건축물의 에너지 절약형 설계를 통한 사용에너지 저감, 에너지 절약형 재료의 사용을 통한 에너지 절약 등의 연구가 활발히 진행되

고 있다. 2010년 국토해양 R&D 발전전략에서는 탄소저감형 건설재료를 CO₂ 발생을 근본적으로 저감하고, 에너지 소비 및 환경부하 저감이 가능하여 경제성이 확보된 건설재료의 생산, 공정, 재활용 등 모든 기술로써 정의하고 있을 정도로 건축에서 재료는 건물에너지를 결정하는 가장 주요한 요소라 할 수 있다.

2. PCM의 잠열에너지 저장 특성

상변화물질(Phase Change Materials; PCM)은 축열의 성능을 이용하는 재료로서 주변의 온도가 상승하면 녹으면서 열을 흡수하고, 주변의 온도가 낮아지면 결정화 하면서 열을 방출하는 축열과 방열성을 반복적으로 나타내는 에너지 저장 물질이다. 어떤 물질이 상전이 될 때 즉, 고체에서 액체(또는 액체에서 고체), 액체에서 기체(또는 기체에서 액체)가 될 때는 열을 흡수하거나 방출하게 되는데 이때의 열을 잠열(latent heat)이라 한다. PCM은 일정한 온도범위에서 잠열에 의한 축열을 하게 되므로 현열에 비해 현저하게 높은 열을 저장할 수 있다. 예로써, 물의 경우 0℃의 얼음(고체)에서 물(액체)로 상전이 될 때 1 g당 80 cal(335J)의 열을 잠열로써 흡수한다. 이 열량은 같은 양의 물을 0℃에서 80℃까지 올릴 수 있는 현열량과 같다. 이러한 잠열의 큰 열저장/방출 효과를 이용하여 에너지를 저장하거나



[그림 1] PCM을 적용한 건축물의 축열 효과

온도를 일정하게 유지시키는 목적으로 사용되는 물질을 상변화물질(PCM)이라 한다.

건물에서 PCM은 건축재료로서 건물의 바닥재, 벽재, 천장재 등에 적용될 수 있으며, 적용된 재료의 온도가 용융점보다 높아질 경우 열을 흡수하여 저장하였다가 용융점보다 낮아지면 저장하였던 열을 방출한다. PCM의 적용으로 인한 이러한 열적 변화는 건물 안에서 주간에는 쾌적 범위 이상으로 올라가는 열을 재료에 저장함으로써 실내온도를 쾌적하게 유지하고 야간에는 재료에서 방출되는 열로써 실내온도를 쾌적 범위 이하로 떨어지지 않도록 유지시켜 주는 효과를 발휘함으로써 에너지 저감 효과를 가져온다. 그림 1은 PCM재료 및 PCM재료가 적용된 건축물의 축열 효과를 보여준다.

3. 건축재료 적용을 위한 PCM 연구 동향

건물의 냉난방에너지 저감 기술로써 열에너지 저장물질인 PCM을 적용하는 것이 많은 기대효과를 갖고 있지만 일반적인 PCM 물질을 건축재료로써 직

접 적용하기에는 몇가지 극복해야 할 문제점이 있다. 따라서 최근 20년간 이러한 문제점을 해결하고 건축재료로써 PCM의 적용성 및 효율성을 향상시키기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히 PCM 물질 자체의 낮은 열전도율과 상변화 과정에서 액체로 변환된 PCM이 유출되는 문제, 그리고 연소성에 관한 문제점에 대한 해결방법은 건축재료로써 적용되기 위한 필수요소라고 할 수 있겠다.

3.1 PCM의 열전도율 향상

냉난방에너지 저감을 위한 건축 재료로써 PCM이 잠열저장 효과를 효율적으로 발휘하기 위해서는 실내 쾌적온도 유지를 위해 주변의 열이 실내 쾌적범위 이상으로 상승하였을 때 빠르게 열을 흡수하고 쾌적범위 이하로 떨어졌을 때는 저장된 열을 빠르게 방출하는 것이 필요하다. 하지만 PCM은 고유의 특성으로 열전도율이 낮은 단점이 있기 때문에 이를 극복하기 위한 연구가 진행되고 있다. 낮은 열전도율로 인해 재료 주변온도로부터 PCM으로의 열전달 효율이 떨어지면 상변화가 일어나지 않

거나 지연되어 그만큼 열에너지 저장효율이 떨어지기 때문이다.

최근 낮은 PCM의 열전도율을 향상시키기 위한 연구로는 주로 열전도율이 높은 충전재(filler)를 PCM과 혼합시킴으로써 고열전도율의 Composite PCM을 제조하는 연구로 이루어지고 있다. 그림 2는 고열전도 Composite PCM 제조의 예로써 Exfoliated Graphite nanoplatelets (xGnP)를 유기PCM인 파라핀과 혼합시키는 과정을 보여주고 있다. xGnP는 고열전도율 물질인 흑연을 개질시킨 나노사이즈의 물질로써 미세한 분산이 용이하고 질량비 5% 소량의 함유만으로도 파라핀의 열전도율을 74% 향상시키는 결과를 나타냈다.

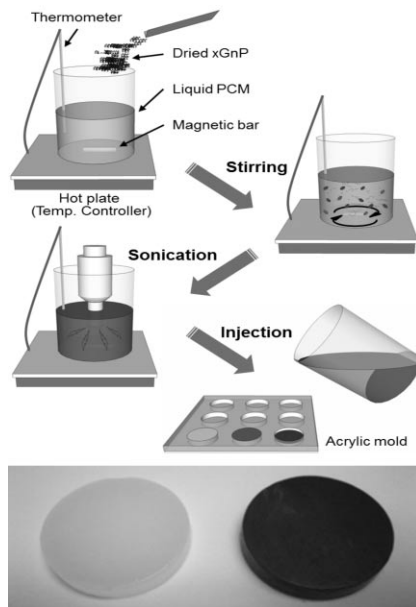
3.2 MPCM과 SSPCM

(1) MPCM (Micro-encapsulated PCM)

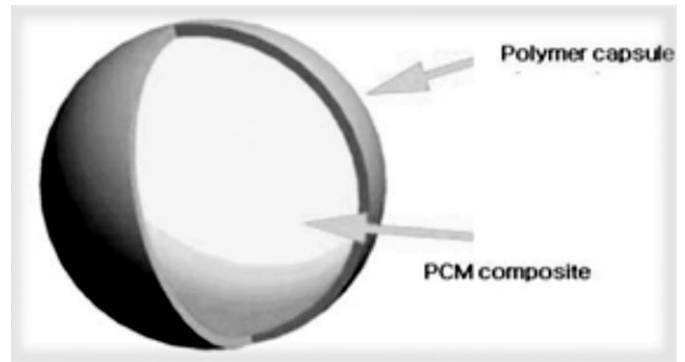
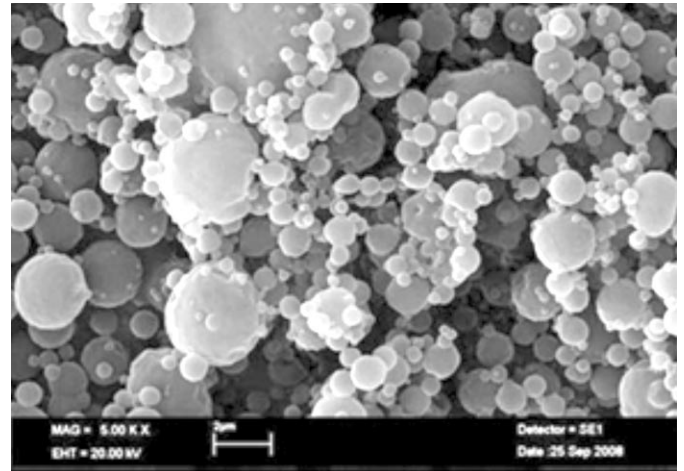
PCM이 에너지저장 시스템으로써 많은 장점을 가지고 있지만 상변화시 액체상태의 PCM이 유출되는 문제점을 해결해야만 건축재료로써 적용이 가능하다. MPCM은 Core 물질로써 상변화 물질을 사용하고 상안정한 물질을

〈표 1〉 재료의 열전도율 비교

재 료	열전도율(W/mK)
합판	0.12
파티클보드	0.14
알루미늄	201
구리	400
PCM(Paraffin)	0.4



[그림 2] xGnP/Paraffin Composite의 제조 방법

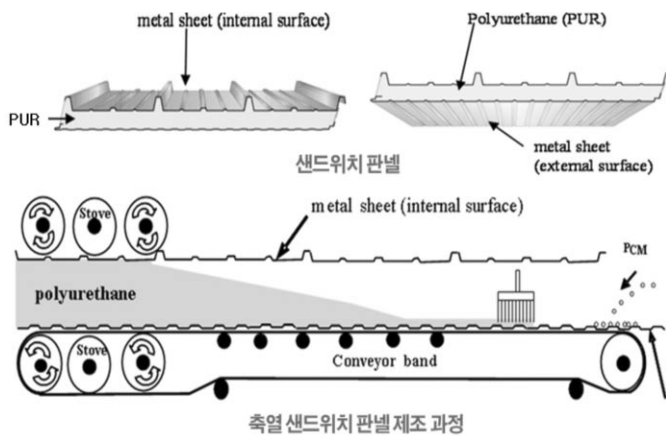


[그림 3] MPCM의 미세입자 및 구조

Shell 물질로 사용하여 PCM을 캡슐화시켜 만들어진 마이크로 사이즈의 PCM 캡슐을 말한다. MPCM은 액체상태의 PCM의 유출을 방지할 뿐만 아니라 PCM을 감싸고 있는 막으로 인해 외부의 영향으로 인한 PCM의 화학적 변화도 보호 할 수가 있다. 또한 캡슐화로 인해 열교환 면적을 증가시킬 수 있으며 작고 유동적인 잠열저장 시스템의 구현을 가능하게 해준다. MPCM의 제조 방법은 Interfacial polymerization, In situ polymerization 그리고 sol-gel 방법 등으로 다양하다. 그림 3은 마이크로 단위의 MPCM의 SEM(주사전자현미경) 사진을 통해 미세한 입자 사이즈와 Core&Shell 구조를 나타내고 있다.

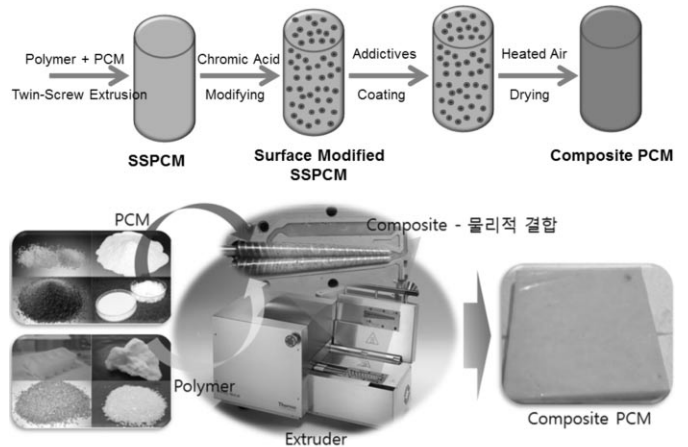
MPCM은 이러한 미세한 입자 사이즈와 구조로 인하여 건축 복합재료의 혼합재로 사용되었을 때 원재료의 물성과 화학성질을 변화시키지 않고 잠열성능을 증가시킬 수가 있다. 캡슐의 사이즈는 1 μm 에서 300 μm 까지 제조과정에 의해 결정이 되므로 건축복합재료에 적용하기위한 적합성을 고려하여 선택적이라 할 수 있다. 따라서, 천장 패널이나 석고보드 등의 내장재료부터 샌드위치 판넬과 같은 외장재까지 MPCM을 건축재료로서 적용하여 복합재를 제조하고 평가하는 연구는 지속적으로 이루어고 있다. 그림 4는 MPCM을 샌드위치 판넬에 적용하는 제조 방법을 보여준다.

(2) SSPCM (Shape-Stabilized PCM)
최근 새로운 타입의 상안정화 시킨 PCM을 일컬어 SSPCM이라 하고 있다. SSPCM의 제조 방법은 크게 폴리머와의 결합을 통한 방법과 다공성물질에 함침하는 방법으로 나눌 수 있다. 폴리머를 이용한 SSPCM은 PCM물질과 폴리머와의 물리적 결합을 통해 상유출을 막는 Composite PCM을 말한다. 여기서 폴리머는 PCM의 상유출을 막는 골조역할을 하고 PCM은 골조안에서 축열성능을 발휘한다. SSPCM은 화학적 결합이 아닌 물리적 결합으로 이루어지므로 상안정 상태로 PCM 고유의 축열성능을 유지 할 수 있다. 그림 5는 폴리머와의 물리적 결합을 이용한 SSPCM



Celilia Castellon et al., Effect of microencapsulated phase change material in sandwich panels (2010)

[그림 4] PCM이 적용된 축열 샌드위치 판넬의 제조 과정



[그림 5] SSPCM의 제조방법에 대한 모식도

의 제조 방법의 모식도를 나타낸다.

SSPCM은 폴리머와 PCM의 혼합과 산처리와 코팅 그리고 건조에 따른 순서로 제작이 되고, 건조시키는 물더에 따라 모양 및 크기를 결정하여 제작할 수 있는 장점이 있다. 골조역할을 하는 HDPE, PP, SBS 등 폴리머의 물리적 특성에 따라 제작된 SSPCM은 강도면에서 MPCM보다 유리하다.

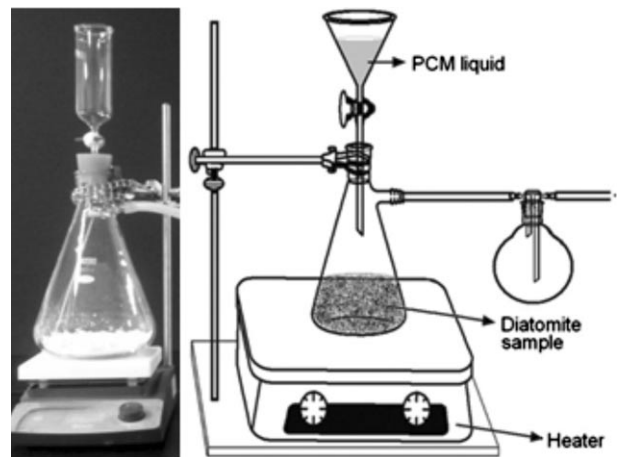
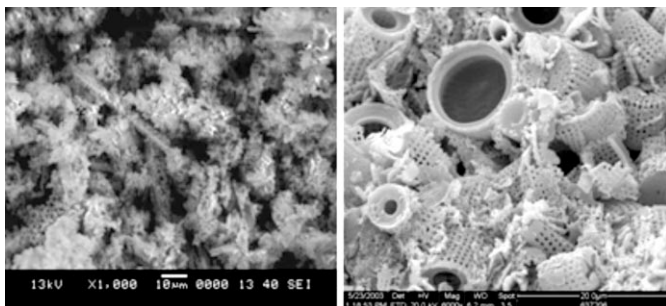
다공성 물질에 함침을 통한 SSPCM은 규조토나 화산재와 같이 공극이 많은 물질의 공극 속에 PCM을 함침시키는

원리로 제조된다. 규조토나 화산재의 공극은 매우 미세하여 진공함침법에 의해 한번 함침이 된 PCM은 액체 상태가 된다고 하더라도 모세관현상과 표면장력에 의하여 공극 밖으로 다시 유출되지 않는다. 그림 6은 다공성 물질인 규조토의 현미경사진과 진공함침을 위한 실험 장치를 보여준다.

3.3 PCM의 난연성에 관한 연구

PCM은 파라핀계 물질의 특성으로 인

해 건축에 적용하기 위해서는 난연성에 대한 고려를 해야 한다. 따라서 PCM에 난연성을 부여하기 위한 연구 또한 다양한 분야에서 이루어지고 있다. 최근에는 불연성 재료인 흑연 등을 혼합함으로써 연소 저항성을 높이고 실리카와 같은 열 저항성이 높은 물질에 PCM을 함침 시키는 등 PCM이 가지고 있는 낮은 열 저항성을 극복하고 있다. 또한, 흑연 이외에도 나노마그네슘 하이드록사이드를 이용하여 파라핀 계열의 PCM에 불연성을 부여하기 위한 연구



[그림 6] 다공성 물질을 이용한 진공함침법에 의한 SSPCM 제조

도 이루어지고 있다.

4. 국내외 PCM 기술 및 시장 동향

최근 저에너지 과학기술은 재생 가능한 에너지를 찾고 있다. 그 중 하나는 에너지 저장장치를 개발하는 것이다. 이것은 새로운 에너지를 개발하는 것 못지않게 중요하다. 열에너지 저장 시스템은 에너지 절감을 얻는 잠재적인 요인을 제공하고 에너지 사용과 관련된 환경적인 요인을 감소시킨다. 잠열저장(Latent heat storage)은 상대적으로 새로운 연구 분야이고 1970년대 후반과 1980년대 초반 사이의 에너지 위기 중에 많은 관심을 받기 시작하여 30년간 지속적으로 많은 분야에서 연구되어오고 있다. 건축물의 에너지소비량이 지속적으로 증가함에 따라 전력의 큰 수요와 제한된 양의 화석연료로 인해 효율적인 에너지 사용에 대한 관심을 크게 증가시켰고, 이에 상변화 물질의 잠열저장을 이용한 효율적인 에너지 사용에 대한 관심도 증가하여 건축물에도 PCM을 적용시켜 에너지를 저감시키는 기술 개발에 관한 연구가 진행되고 있다.

PCM은 크게 유기물질과 무기물질, 공유화합물로 분류할 수 있으며 4천여 종의 물질이 상변화물질로 분류되고 있

지만 실질적으로 활용 가능한 물질은 200여종이다. 저온용으로는 주로 파라핀계 물질과 무기수화물이 이용되어왔는데, 무기수화물의 경우 연구의 주안점은 잠열재의 안정성을 위한 조해제 및 상변화물질화를 담기위한 용기 개발 또는 마이크로캡슐화 그리고 이를 이용하는 축열조의 설계와 시스템 개발이라고 할 수 있다. PCM을 이용한 제품 개발은 건축뿐만 아니라 다양한 분야에서 이루어지고 있다. 미국의 Acu Temp사에서는 냉장체인 시스템에 PCM과 진공단열 기술을 활용하여 제품을 개발하여 의약 및 생약제품의 저장 및 수송 등에 적용함으로써 온도에 민감한 제품들을 선적하는 컨테이너를 개발하였다. 또한 Aegis Building Technologies사에서는 PCM을 의복에 적용하여 열에너지 관리 방법에 대한 기술력을 보유하고 있다.

최근에는 냉방요구의 증가와 건설 산업의 현대화 및 경량화 추세로 건물분야는 상변화물질 적용의 주요 시장이 되고 있다. 건물 분야에서 상변화 물질 사용은 최근 상용화되어 냉열저장과 수송부문보다 적용 시장이 크게 형성되었다. 염 수화물 기반의 상변화 물질은 건물 및 건축용 상변화 물질 시장의 48%를 점유 하고 있으며, 이러한 상변화 물질은 주로 천장, 블록, 바닥재로 사용되

거나 마이크로 캡슐화된 형태(MPCM)로 응용되어 활용되고 있다. BASF는 건물 및 건축 적용을 위하여 파라핀 기반의 MPCM을 개발하였고, 파라핀 기반 상변화물질 시장의 80% 이상을 점유하고 있다고 보고되었다.

세계 PCM 기반의 건물 및 건축 적용 시장은 표 2와 같이 2009년 6,620만 불에서 2015년 4억 1,550만불로 증가할 것으로 예상 되었다.

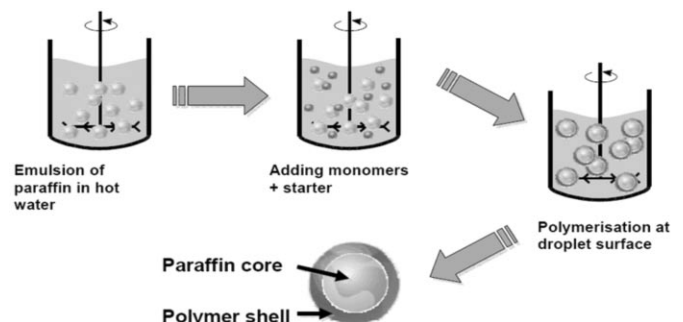
상변화물질이 건물의 냉난방에너지 저감을 위한 목적으로 건물에 적용되는 경우, 지속적인 지구온난화 문제로 인하여 2020년부터는 냉방이 난방보다 더욱 많은 에너지를 사용할 것으로 예상된다. 또한 표 2와 같이 PCM이 활용되는 경우 대략 100만톤의 PCM이 요구되므로 건물과 같은 대형 적용처에 PCM이 사용되는 경우 거대한 시장형성으로 성장 잠재량이 기대되며, 건자재로서 대규모로 적용이 되기까지는 10 ~ 15년 정도 소요될 것으로 예상되고 있다.

독일의 BASF사는 저에너지 건축을 위한 PCM 기술을 보유하고 있는 가장 큰 기업이라고 할 수 있다. BASF사는 1965년에 설립되어 오일, 가스, 플라스틱, 화학 분야에서 다양한 비즈니스를 하고 있는 기업으로 연간 500억달러(2009년 기준) 수준의 상당한 매출규모

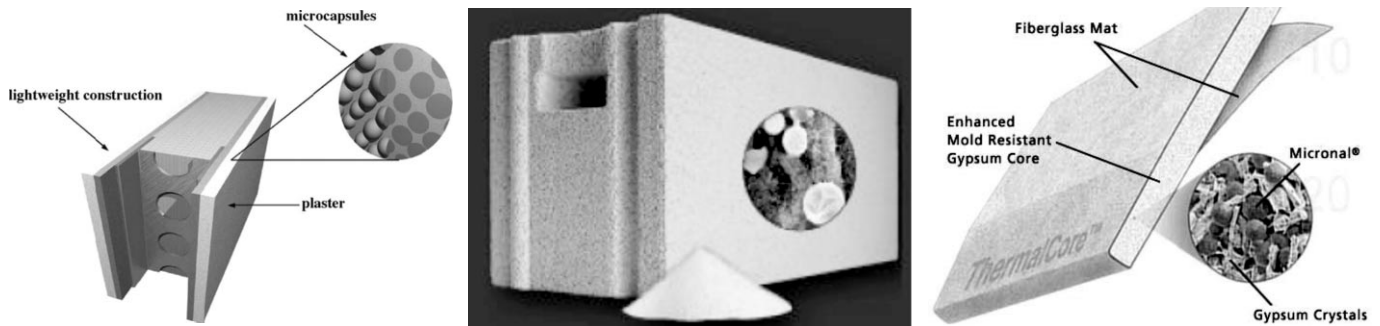
〈표 2〉 전세계 PCM 기반의 건물 및 건축 적용 시장 규모 (2008~2015, 단위: 백만\$)

Region	2008	2009	2010	2015	CAGR% (2015-2015)
Americas	10.8	13.8	17.7	76.1	33.9
EMEA	22.8	32.6	43.7	235.6	40.1
APAC	14.7	19.8	25.5	103.8	32.4
Total	48.3	66.2	86.9	415.5	36.7

출처: 탄소저감형 건설재료 기술개발 기획보고서, 한국건설기술연구원



[그림 7] BASF사의 Micronal PCM 제조 기술



[그림 8] PCM이 적용된 건축재료

로써, PCM 분야에서는 건축물 실내 쾌적범위 온도의 용융점을 갖는 PCM 재료를 이용하여 건축용 보드, 플라스터 등에 혼합성이 용이한 분말형태의 Micronal PCM을 개발하여 축열 건축 재료를 생산하고 있다.

또한, 지속적인 연구와 기술개발을 통하여 2005년부터는 Micronal PCM의 대량생산 영업을 시작하였으며, 다른 건축자재들처럼 취급이 용이하고 일반 석고보드, 마감재 및 컴파운드 형태로 사용 할 수 있도록 제품을 생산, 유통하고 있다.

5. 건물 에너지저감 성능 평가

건축물의 냉난방에너지는 실내를 열적으로 쾌적하게 유지하기 위해 필요한 에너지부하량에 의해 결정이 된다. 따라서 PCM재료가 건축물에 적용돼 잠열성능을 발휘 할 때와 적용되지 않았을 때 각각의 실내온도건동 분석을 통해 냉난방에너지부하량을 비교함으로써 PCM의 건축물의 냉난방에너지 저감 효과를 평가할 수 있다. 그림 9는 PCM 타일의 냉난방에너지 저감 성능 평가를 위한 실험의 모습의 한 예를 보

여준다.

PCM이 적용된 건축복합재료의 잠열 성능이 건물의 냉난방에너지를 얼마나 저감시키는가에 대한 주요 평가요소는 기후, 적용된 PCM의 용융점, 두께, 위치, 적용 방법 등이 있다. PCM은 각각의 용융점에서 열에너지 저장 성능을 발휘하기 때문에 적용되는 곳의 기후를 고려하여 건축물의 온도 거동을 파악하고 가장 효율적으로 성능을 발휘하는 PCM을 선정하는 것이 필요하다. 또한, 일사 등의 영향을 고려하여 PCM 재료가 적용되는 방위와 위치의 선정, 에너지



Isabel Cerón, Energy and Buildings (2011)

[그림 9] PCM 타일의 성능 평가 방법

지저감 성능과 적용 면적 및 두께를 비교하여 가장 경제적인 적용 방안을 선정하는 것 등 많은 변수가 고려된다. 하지만 이러한 많은 변수들을 직접 건물에 적용하여 실험하는 것은 시간적으로나 경제적으로 한계가 있다. 하지만 최근 다양한 변수들에 대하여 시간적, 경제적 문제를 해결하고 PCM 건축물의 냉난방에너지 저감을 평가하기 위해 건물 에너지시뮬레이션 프로그램을 사용해 분석하고 있다. Enuergy Plus, Tmsys, Esp-r과 같은 건물에너지 시뮬레이션은 이미 많은 연구를 통해 검증된 프로그램으로 위에서 언급된 PCM의 다양한 변수들을 입력하여 가장 효율적인 냉난방에너지 저감 방안을 분석할 수 있다.

6. 결론

PCM은 잠열에너지 저장을 통한 축열재로서 건축재료로 적용되었을 때 건물에서 발생하는 냉난방에너지를 저감시킬 수 있는 에너지 저감형 친환경재료라 할 수 있다. 전 세계적인 이슈인 지구온난화와 에너지절약에 대한 관심이 증가 할수록 PCM관련 연구 및 시장은 더욱 증가할 것으로 예상된다. 국외의 경우에는 이미 많은 연구를 통해 건축물에 적용할 수 있는 PCM재료가 개발되어 대규모의 시장을 형성해 가고

있는 반면에 국내의 경우 아직 상변화 물질에 대한 인식이 부족하고 연구개발이 비교적 부족한 실정이다. 따라서 적극적인 PCM 건축재료의 연구개발과 학계와 산업계의 협력을 통해 장점을 소비자들에게도 인식시켜 기술개발과 시장의 성장을 도모할 필요가 있다.

참고문헌

1. Sumin Kim and Lawrence T. Drzal, High latent heat storage and high thermal conductive phase change materials using exfoliated graphite nanoplatelets, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 93(2009) 136-142.
2. Jisoo Jeon, Jeong-Hun Lee, Jungki Seo, Su-Gwang Jeong, Sumin Kim, Application of PCM thermal energy storage system to reduce building energy consumption, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* (2012).
3. Jisoo Jeon, Su-Gwang Jeong, Jeongki Seo, Sumin Kim, High thermal performance composite PCMs loading xGnP for application to building using radiant floor heating system, *Solar Energy Materials and Solar Cells* (2012).
4. Isabel Ceron, Javier Neila, Mohamed Khayet, Experimental tile with phase change materials (PCM) for building use, *Energy and Buildings* 43 (2011) 1869-1874.
5. Celilia Castellon, M Medrano, J Roca, LF Cabeza, Effect of micro-encapsulated phase change material in sandwich panels, *Renewable Energy* 35 (2010) 2370-2374.
6. Ali Karaipekli, Ahmet Sarı, Capric-myristic acid/vermiculite composite as form-stable phase change material for thermal energy storage, *Solar Energy* 83 (2009) 323-323.
7. Y.P. Zhang, K.P. Lin, R. Yang, H.F. Di, Y. Jiang, Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings, *Energy and Buildings* 38 (2006) 1262-1269.
8. 정수광 전지수 서정기 김수민 건축물에너지저감을위한 PCM 적용에대 한고찰 한국건축친환경설비학회는 문집제권제호 (2011) 1-61.
9. 한국건설기술연구원 탄소저감형건설재료기술개발기획보고서 (2011).
10. www.corporate.basf.com/en