제 출 문

국토 교통부 장관 귀하

이 보고서를 "축열 성능이 향상된 슬래브를 이용한 저에너지 복사냉난방시스템 개발"과제의 최종보고서로 제출합니다.

2015. 2. 16.

주관연구기관명 : 이화여자대학교 산학협력단
주관연구책임자 : 임 재 한
연구원 : 김 희 선
" : 이 현 화
" : 민 해 원
공동연구기관명 : 숭실대학교 산학협력단
공동연구책임자 : 김 수 민
공동연구기관명 : 포스코건설
공동연구책임자 : 고 종 철

보 고 서 요 약 서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>12첨단도시C06</td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td>2012. 4. 10.~
2015. 2. 9.</td><td>단 계
구 분</td><td>최종</td></tr>
<tr><td>연 구 사 업 명</td><td colspan="5">건설교통기술촉진사업</td></tr>
<tr><td rowspan="3">연 구 과 제 명</td><td>과제명</td><td colspan="4">축열성능이 향상된 슬래브를 이용한 저에너지
복사냉난방시스템 개발</td></tr>
<tr><td>공동과제명</td><td colspan="4">PCM 재료 및 구체축열용 콘크리트 배합 기술 개발</td></tr>
<tr><td>공동과제명</td><td colspan="4">구체축열시스템 시작품 제작 및 시공기술 개발</td></tr>
<tr><td>연 구 책 임 자</td><td>임재한</td><td>총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 : 25 명
내부 : 25 명
외부 : 명</td><td>총연구비</td><td>정부 : 575,000천원
기업 : 29,500천원
계 : 785,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2">이화여자대학교 산학협력단
건축공학과</td><td>참여기업명</td><td colspan="2">포스코건설
반석TVS, 나우설비</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="5">상대국명 : 상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)</td><td>보고서면수</td><td></td></tr>
</table>

본 연구에서는 국가적인 건물에너지 정책에 부합하는 제로에너지 건물의 복사냉난방시스템으로서 PCM을 활용한 구체축열 콘크리트 구조체를 개발하고, 이를 건축 설계에 적용하기 위한 PCM 재료 및 구체축열 콘크리트의 배합 기술, 구체축열 PC 슬래브의 최적 구조설계 기술 및 냉난방 설계 기술을 개발하고자 한다. 이를 위해 건축재료 및 건축구조, 건축설비 분야의 세부적인 기술로 구분하여 단계별 성능 목표 수준을 수립하고, PCM을 활용한 구체축열 복사냉난방시스템의 설계 기술 및 가이드라인을 제시하였다. 세부적인 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 축열성능이 향상된 슬래브의 열적거동에 따른 적용 PCM선정
- 친환경콘크리트 재료를 이용한 SSPCM 개발
- 축열성능이 향상된 콘크리트의 에너지효율 향상
- SSPCM 콘크리트의 재료 성능 및 구조성능 평가
- 축열성능이 향상된 슬래브용 배관을 포함하는 PC슬래브의 구조성능 평가
- 구조실험 설계 지침 및 구조 설계 매뉴얼 개발
- 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템의 설계 프로토타입 선정
- 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템 에너지절감 기술 개발
- 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템의 설계, 운영 매뉴얼 개발
- 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템의 시작품 제작
- 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템의 현장적용

색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	구체축열시스템, 복사냉난방시스템, 상변화물질, 중공슬래브, 에너지 절약
	영 어	Thermally activated building system, Radiant heating and cooling system, Phase change material, Hollow core slab, Energy saving

요 약 문

Ⅰ. 과제명

축열성능이 향상된 슬래브를 이용한 저에너지 복사냉난방시스템 개발

Ⅱ. 연구개발과제 개요(목적, 필요성, 범위 등을 기술)

콘크리트 구조체를 이용하는 구체축열 복사냉난방시스템은 배관을 콘크리트 내에 매설하여 건물 구조체를 축열(냉)함으로써 부하를 제거하거나 시간차에 의해 피크부하를 줄일 수 있는 냉난방시스템이다. 국내에서는 적용된 사례가 많지 않지만, 최근 유럽을 중심으로 저에너지 친환경 건축물 프로젝트에 에너지 절약기술로서 일반적인 오피스건물이나 공항, 컨벤션센터 등의 건물에 적용되고 있다. 구체축열 복사냉난방시스템이란 축열체로서 물이나 얼음이 아닌 건물 구조체를 이용한 축열방식이다. 콘크리트의 열용량은 약 2,023 kJ/m^{3}K로서 우수한 축열재로서 활용될 수 있다. 구체축열 복사냉난방시스템은 축열조가 불필요한 구체축열의 이점을 활용하고, 건물 구조체와 공조설비 기술을 통합 적용하여 건물에서의 에너지 활용을 보다 동적으로 계획하고 운영되는 공조시스템이다. 일반적으로 최근까지 국내외에서 적용되어온 구체축열 복사냉난방시스템은 현장에서 거푸집과 철근을 조립한 후, 콘크리트 타설 전 구조체 내에 배관을 설치하고, 구조체에 매설된 배관을 통해 온수나 냉수를 공급하여 기존 대류방식의 공조설비와 통합 운전되고 있다. 또한 이러한 구체축열 복사냉난방시스템의 축열 성능은 콘크리트 자체의 열용량에 크게 의존함으로써, 별도의 기준이 없는 한 구조적 안정성을 확보하는 차원에서의 구조체의 물리적 치수가 결정됨으로써 축열용량을 증대시키기에는 제약이 있게 된다. 그러므로 구체축열 복사냉난방시스템의 축열성능을 향상시키기 위한 건축재료적 기술개발이 냉난방설비의 에너지 절약을 고려한 효율적인 운전을 위해 반드시 필요하게 된다. 뿐만 아니라, 구체축열 복사냉난방시스템을 현장에서 적용하기 위해서는 오피스나 학교, 관공서 등 건물의 구조시스템과 통합 적용함으로써 구조 안정성 확보 및 경제성 확보가 필요하다. 일반적으로 적용되는 기존 습식 공법과 달리 중공 슬래브 구조부재를 이용하는 경우, 건물에서의 모듈화, 경량화가 용이하고, 건물의 자중이나 물량을 줄여 초기 투자비를 절감할 수 있기 때문에 경제적 이점을 크게 향상시킬 수 있다.

본 연구는 친환경 건축설비시스템의 일환으로 구체축열을 이용한 복사냉난방시스템 개발을 진행하는 것으로서 기존 연구와 달리 PCM 재료를 활용함으로써 구조체의 축열 성능을 향상하고, 중공슬래브를 활용하여 공기 단축 및 층고 저감, 물량 감소 등 제반 문제를 해결하고자 하였다. 지금까지 국내에서는 중공 슬래브를 이용한 구체축열 복사냉난방시스템이 개발되어 적용된 바가 없으며, 특히 PCM 재료를 활용하여 구체축열 복사냉난방시스템의 축열 성능을 향상하기 위한 연구는 진행된 바가 없다. 그러므로 본 연구에서는 건축설비 에너지성능 향상을 위해 구체축열 복사냉난방시스템에서 축열을 통한 냉난방 에너지의 효율적

활용에 초점을 맞춰 연구를 수행하였다. 뿐만 아니라, PCM을 활용한 구체축열용 중공 슬래브는 일반 콘크리트 슬래브와 비교하였을 때, 구조성능이 감소되는 것을 예상할 수 있으며, 특히 PCM을 적용한 경우 일반 콘크리트의 재료적 특성과 다르기 때문에 기존 설계기법을 그대로 적용하는 것은 불가능하다. 따라서 PCM을 도입한 중공 슬래브의 구조 설계시 구조거동 특성 뿐 아니라 콘크리트 재료의 특성을 파악하여 고려하는 것이 필요하다. 또한 중공체를 도입하는 경우 일반 슬래브 보다 전단 내력이 감소하고 균열이 잘 발생한다는 문제점이 있어 구조적 거동 특성을 파악하고 이를 바탕으로 기존의 설계식에서 추가적으로 고려해야 할 사항을 분석, 수정된 설계식을 제안하는 과정이 필요하다. 따라서 재료 및 부재의 개발, 거동 특성 파악, 설계식 검토 및 수정의 단계적 연구를 수행하였다. 그러나 3개년도의 연구기간 안에 PCM이 도입된 콘크리트 재료의 내화특성, 동결융해를 비롯한 장기적인 거동의 파악, 파괴 양상에 따른 보수 및 보강 기법 등을 제안하는 데 있어서는 무리가 있다고 사료되어 구조부재의 단기적 거동과 이를 바탕으로 하는 설계식의 제안을 연구의 범위로 하였다. 구체 축열성능 향상을 위한 PCM 재료 연구에서는 PCM 함침을 통한 SSPCM 재료 개발과 아울러 축열 모르터, 축열 콘크리트를 제작기술을 확보하도록 계획하였으며, 이를 통해 구체축열용 중공 슬래브 설계 및 시공을 위한 콘크리트 배합 기술을 확보하고자 하였다.

Ⅲ. 연구개발 수행내용 및 결과(연구수행과정, 연구수행결과 등을 기술)

1. 축열성능이 향상된 SSPCM 콘크리트 재료 개발
   가. 축열성능이 향상된 슬래브의 열적거동에 따른 적용 PCM 선정
   나. PCM 함침을 통한 축열 콘크리트 제조용 SSPCM 개발
   다. 축열성능이 향상된 SSPCM 콘크리트 개발
   라. 친환경 콘크리트 재료를 이용한 SSPCM 개발
   마. 축열성능이 향상된 콘크리트의 에너지 효율 향상
   바. SSPCM 콘크리트의 재료 실험을 통한 구조적 및 열적 성능 평가
   사. SSPCM을 혼입한 콘크리트의 28일 압축강도 및 인장강도 평가
   아. SSPCM을 혼입한 콘크리트의 온도에 따른 압축강도 평가
   자. SSPCM을 혼입한 콘크리트의 설계강도에 따른 배합수식 매뉴얼

2. 축열성능이 향상된 중공슬래브의 구조 성능 평가
   가. 온수 배관을 포함하는 중공슬래브의 시범 제작 및 구조성능 평가
   나. PCM 온도변화에 따른 중공슬래브의 유한요소해석을 통한 구조 거동 평가
   다. SSPCM을 혼입한 콘크리트의 구조적 거동과 구조실험 설계 지침
   라. SSPCM을 혼입한 중공슬래브의 구조적 거동 평가
   마. 구조 설계 지침

3. 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템의 설계 및 운영 기술
  가. 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템의 설계 프로토타입 선정
  나. 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템 에너지절감 기술 개발
  다. 동·하계 PCM 적용에 따른 구체축열시스템 에너지 소비량 분석
  라. 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템의 매뉴얼 개발

4. 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템 현장 적용 및 경제성 평가
  가. 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템의 시작품 제작
  나. 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템의 실용화 시작품 제작
  다. 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템의 현장적용
  라. 경제성 평가

Ⅳ. 최종 연구성과 및 적용실적

1. 논문 게재 성과
  SCI 논문 4편, 국내 논문 6편, 국내외 학술발표대회 논문 23편

2. 특허 성과
  국내 특허 4건 출원(1건 등록 예정)

3. 현장 적용 실적
  1단계 : 축열성능 향상된 슬래브를 이용한 복사냉난방시스템 프로토타입 개발
  2단계 : 프로토타입의 구조안정성 해석, 냉난방 성능 평가 수행 및 SSPCM 콘크리트 개발
  3단계 : 특허 출원 및 현장적용
  ・1-2차년도의 연구결과를 바탕으로 본 연구에서 개발한 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템의 실용화 시작품을 실제 프로젝트 적용 및 실용화 가능성 검토를 위하여 현장 적용
  ・대상 현장 : 포스코건설 기술연구소 실험동
  ・성능 비교실험을 위하여 실험동 내부 3개 Mock-Up Cell의 천정슬래브에 3가지 Type의 시스템을 설계하여 반영

Ⅴ. 연구목표 달성 및 효과

PCM 재료를 활용하여 축열성능을 향상시키고, 슬래브 구조 부재를 활용한 구체축열 복사냉난방시스템을 개발함으로써 오피스나 상가, 관공서 등의 건물에서 효율적인 에너지 사용이 가능할 것이다. 또한 본 연구는 건물에서의 신재생에너지 보급 활성화에 큰 역할을 할 수 있으며, 향후 건물에너지 절감에 효과적으로 적용될 수 있을 것이다. 경제·산업적 측면에서 신재생에너지 관련 산업이 활성화될 수 있으며, 건물에서 에너지 절감을 통해 건물주나 입주자, 에너지 유관 기관이나 국가적 측면에서 경제적 이득을 가져다 줄 수 있을 것이다. 또한 중공 슬래브 구조를 활용함으로써 중저층의 오피스나 상가, 관공서 건물에서 신축이나 증축에 활용됨으로써 층고를 저감하고, 구조물량을 감소함으로써 경제성을 확보해 나갈 수 있을 것이다. 뿐만 아니라, 실내 공조설비의 풍량을 저감하여 덕트 공간을 줄여 나감으로써 건물의 층고가 크게 낮춰서 상업용 건물에서의 개발 수익율을 향상시켜 나갈 수 있을 것이다.

Ⅵ. 연구성과 활용계획

국내의 패시브 제로에너지 건축물 구현을 위해서는 구체축열 복사냉난방시스템을 국내 친환경 저에너지 건축물에 적용되는 요소기술로서 활용이 가능하며, 특히 해외 기술 도입이 아닌 국내 자체 개발 기술이라는 점에서 의의가 있다. 본 기술은 기존의 습식 슬래브가 아닌 PCM 물질이 혼입된 중공 슬래브 형태로서 기술의 차별화가 가능하다. 정부는 전문 기술 인력 양성을 위한 교육 지원 등을 통해 본 기술의 원활한 시장 적용 및 활성화를 도모할 수 있고, 건물 에너지절약, 신재생에너지 보급 활성화를 위해서는 본 기술의 지속적인 성능평가 및 검증에 대한 후속 연구지원이 필요하다. 후속 연구 개발로 PCM 소재 및 구체축열시스템의 설계 기술을 확보하고, 실제 건물에 적용할 수 있도록 기술적인 연구를 지속적으로 수행할 것이며, PCM 재료 개발의 경우, 본 연구에서는 축열 성능을 확보한 혼화재료를 제작하여 이에 대한 원천 기술을 확보할 수 있으며, 추후 슬래브 외 벽 패널, 천정재 등 다양한 분야로의 활용방안에 대한 후속 연구 필요하다. 구체축열 복사냉난방시스템의 경우, 본 연구에서는 시제품을 제작하여 실제 현장에의 적용방안에 대한 기술력을 확보하였으며, 추후 본 시스템의 최적 제어방안, 성능 검증 등에 대한 후속 연구를 수행함으로서 시스템의 성능 향상을 도모할 수 있을 것으로 사료된다. 참여기업과 공동으로 실용화 및 사업화를 위한 후속 연구과제를 제안함으로써 향후 기술사업화를 위한 발판을 만들어 나가고자 한다.

CONTENTS

최 종 보 고 서

01 연구개발과제 개요 · 2

제1절 연구개발의 필요성 및 목적 2
1. 연구개발의 필요성 2
2. 연구개발의 목적 12
제2절 연구개발범위 및 방법 14
1. 연구개발범위 14
2. 연구개발방법 15
제3절 관련분야의 국내외 개술개발 현황 18
1. PCM적용 건축기술 개발 현황 18
2. 구체축열 복사냉난방시스템 기술 개발 현황 27
3. 중공슬래브 구조 기술 개발 현황 33

02 연구개발 수행 내용 및 결과 · 37

제1절 축열성능이 향상된 SSPCM 콘크리트 재료 개발 37
1. 축열성능이 향상된 슬래브의 열적거동에 따른 적용 PCM 선정 37
2. 친환경콘크리트 재료를 이용한 SSPCM 개발 59
3. 축열성능이 향상된 콘크리트 에너지 효율 향상 71
4. SSPCM 콘크리트 재료 성능 및 구조성능 평가 74
5. SSPCM을 혼입한 콘크리트 설계강도에 따른 배합수식 매뉴얼 80
제2절 축열성능이 향상된 슬래브의 구조성능 평가 86
1. 온수 배관을 포함하는 중공슬래브의 시범 제작 및 구조성능 평가 86
2. SSPCM을 혼입한 콘크리트의 구조적 거동과 구조실험 설계 지침 101
제3절 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템 설계 및 운영 기술 105
1. 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템의 설계 프로토타입 선정 113
2. 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템 에너지절감 기술 138
3. 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템의 매뉴얼 개발 162
제4절 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템 현장 적용 162
1. 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템의 시작품 제작 175
2. 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템의 현장적용 184

CONTENTS

최 종 보 고 서

03 최종 연구성과 및 적용실적 · 190

제1절 주요 연구 성과 190
제2절 현장 적용 실적 195

04 연구목표 달성 및 효과 · 197

제1절 연구개발 목표 달성도 197
제2절 연구성과 활용 방안 및 연구개발 효과 200

05 추가연구 필요성 · 202

06 참고문헌

01

연구개발과제 개요

제1절 연구개발의 필요성 및 목적
제2절 연구개발범위 및 방법
제3절 관련분야의 국내외 개술개발 현황



최 종 보 고 서

01 연구개발과제 개요

1절 연구개발과제 개요

1. 연구개발의 필요성

가. 연구개발 개요

최근 들어 산업용 전기 수요는 물론 가정이나 사무실 등 건물에서 냉난방 설비의 보급이 늘어나면서 점차 전기 사용이 증가하여 국가적인 전력 부하에도 큰 영향을 미치고 있다. 시간대별 부하 변동뿐만 아니라, 하절기 및 동절기와 같은 계절적인 부하 변동이 점차 커지면서 전기의 평균 부하 증가율에 비해 최대 전력 상승률이 급격히 증가하고 있다. 이에 정부에서는 장기적으로 전력 부족 현상을 해결하고 안정적으로 전력을 공급하기 위해 전력망의 확충과 전력수요관리, 전기요금의 현실화, 신재생에너지의 보급, 스마트그리드의 추진 등 다양한 정책을 추진하고 있다. 일반적으로 전력피크는 우리나라의 기후 특성상 건물에서 냉난방부하가 집중되는 여름철과 겨울철에 주로 발생하고 있다. 1980년대 초반까지는 겨울철 저녁시간에 전력 피크가 발생하였으나, 에어컨 등 냉방기기 보급이 시작되는 1981년 이후에는 대부분 여름철 주간시간에 전력 피크가 발생하고 있다. 최근에는 겨울철 난방 전력수요가 점차 확대되면서 겨울철 전력 피크가 여름철을 추월하기도 하였다. 이에 정부에서는 전력공급설비의 확충에 중점을 둔 공급측관리(SSM, Supply Side Management)에 대응되는 개념으로서 최소의 비용으로 소비자의 전기에너지 서비스 욕구를 충족시키기 위해 소비자의 전기 사용 패턴을 합리적인 방향으로 유도하기 위한 전력 수요관리(DSM, Demand Side Management)를 시행하고 있다. 전력수요관리(DSM)는 1970년대 미국에서 시작하였으나, 전력회사의 공급위주의 전력수급계획에 따라서 별로 관심을 갖지 못하였다. 후쿠시마 원전사태 이후 최근 들어서는 원전건설 반대, 송전시설 건립 반대 등 전력망의 확충에 큰 어려움을 겪으면서 전력수급계획에 있어서 최소비용계획(least cost planning)의 일환으로 공급측 대안과 수요측 대안의 최적조합을 찾는 통합자원계획(Integrated Resource Planning)개념의 확산되면서 수요 관리 방안에 대한 관심이 높아지고 있다. 최근에는 이와 같이 여름철, 그리고 겨울철에 냉난방에너지 소비가 급증하면서, 이로 인한 국가적인 전력 수급 불균형이 나타나고 있다. 실제 국내의 연도별 최대 전력 수요는 2000년대 이래 매년 5% 가량 증가해 왔으며, 발전설비도 매년 증가추세에 있다.(그림 1.1.1, 표 1.1.1 참고) 그러나 매년 전기 공급 예비율이 줄어듦으로 인해서 전기 수급에 매우 불안정한 상황에 이르렀으며, 최근에는 대규모 정전사태(black out)가 발생하면서 국가적인 대응 방안 마련이 절

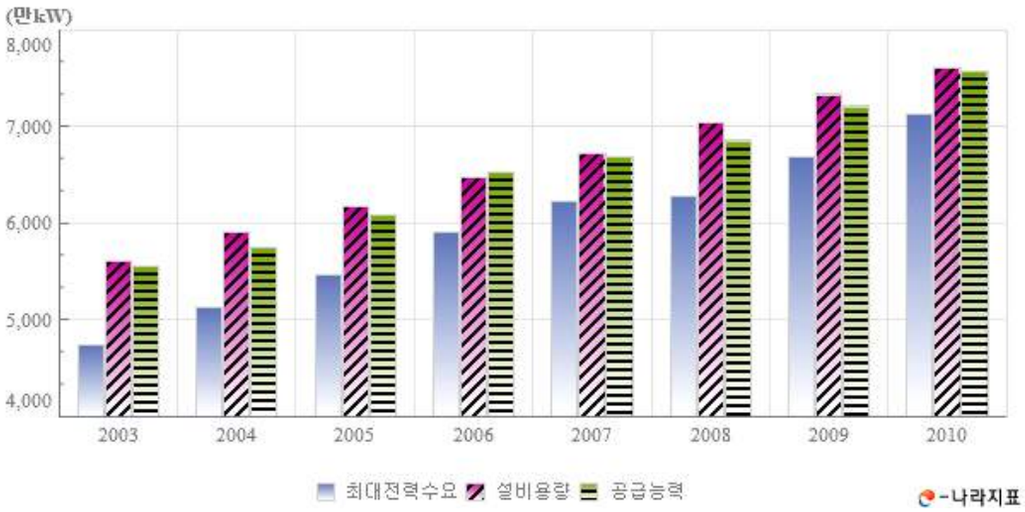


그림 1.1.1 국내 연도별 전력 수급 실정(한국 전력 거래소 자료)

실해졌다.

전력을 안정적으로 공급하고 저렴한 전력비용을 실현하기 위해서는 전력부하 평준화와 수요 측면에서의 적극적인 대응이 필요하다. 특히 건물에서의 냉난방 수요관리를 위해서는 축열식 공조시스템의 보급이 중요한 시점이다. 건물에서의 축열기술은 고효율 운전에 의한 에너지 절약 및 온실가스 저감은 물론 전력요금의 할인, 세금 우대 등 다양한 제도를 통해 정부는 물론 사용자 측면에서도 유리한 기술이다. 기존의 축열시스템은 수축열을 비롯하여 빙축열, 잠열축열 등 다양한 형태로 보급되고 있다. 그러나 기존 축열시스템의 경우, 기계실에서의 공간 확보 문제와 초기 투자비용 증대 등이 경제성 측면에서 크게 저해되고 있다. 이에 국내외에서는 초기 비용을 절감하고 건물에서 쾌적한 온열 환경을 유지하기 위한 구체축열 복사냉난방시스템에 대한 연구가 진행되고 있다. 구체축열 복사냉난방시스템은 일반적으로 온돌난방과 같은 복사냉난방시스템의 하나로서 건물의 콘크리트 구조체에 직접 열을 축적하여 냉난방 피크 부하를 이동하거나 작용온도(OT, Operative temperature)를 조절함으로써 쾌적한 실내 온열 환경 조건을 만족시킬 수 있다. 또한 지열이나 태양열 등 신재생에너지의 보급이 늘고, 고효율 히트펌프 기술이 발전하면서 에너지 효율적인 건물의 냉난방시스템으로 개발되고 있다. 최근에는 구조체의 축열 성능을 향상시키기 위해서 상변화물질(PCM, Phase chase material)을 이용한 복사냉난방시스템의 개발이 진행되고 있다. 상변화물질을 이용한 구체축열 복사냉난방시스템은 냉난방 수요에 따른 전력 부하 평준화 기술, 즉 축열을 통한 peak shifting 기술로서 전력수요 관리에 크게 기여할 수 있을 것이다. 상변화물질을 이용한 구체축열 복사냉난방시스템은 건물과 일체화된 축열 및 냉난방설비 기술로서 신재생에너지나 미활용에너지 등 저온수 난방열원, 고온수 냉방 열원을 활용하여 건물에서의 에너지 효율을 향상시킬 수 있으며, 건물에서의 냉난방 최대부하 시간을 이동하여 전력 부하의 평준화가 가능하다. 이에 본 연구에서는 건물구조체의 일부인 바닥 슬래브의 콘크리트 매스를 이용하고, 축열성능을 향상시키기 위해 상변화물질을 적용한 구체축열 복사냉난방시스템을 개발하고자 하였다.

표 1.1.1 국내 전력 수급 실정 (단위: 만kW)

연도	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
최대전력수요	4,739	5,126	5,463	5,899	6,229	6,279	6,680	7,131
전년대비증감률(%)	3.5	8.2	6.6	8.0	5.6	0.8	6.4	6.3
발전설비용량	5,608	5,913	6,174	6,478	6,720	7,035	7,331	7,608
전기 공급능력	5,549	5,753	6,082	6,518	6,678	6,852	7,207	7,575
예비전력	810	626	619	619	449	573	527	444
공급예비율(%)	17.1	12.2	11.3	10.5	7.2	9.1	7.9	6.2
설비예비율(%)	18.4	15.3	13.0	9.8	7.9	12.0	7.2	6.7

최근 국내에서는 E대학 건물에서 콘크리트 슬래브 내에 배관을 매설하여 지열시스템과 연계한 구체축열 공조시스템이 적용되었으며, 국내 설계 프로젝트에서도 점차 보급이 시도되고 있는 추세이지만, 실제 적용 사례는 아직까지 활발하지 않은 실정이다. 반면, 해외의 경우 최근에는 구체축열 공조시스템의 축열성능을 향상시키기 위해 PCM을 이용한 기술 개발을 진행하고 있으며, 이를 통해 신재생에너지나 미활용에너지의 활용이나 보급을 늘림으로써 건물에서의 에너지효율을 향상시키고 있다. 이와 같이 PCM을 활용한 구체축열 복사냉난방시스템을 개발하여 현장에 적용하기 위해서는 시스템의 설계단계에서 건축설비 및 건축구조, 건축재료적인 측면에서 세부 요소기술이 종합적으로 검토되고, 건물 운전단계에서 최대 전력 수요를 감안한 운전방법 및 건물에서의 에너지성능이 평가되어야 한다.

이에 본 연구에서는 국가적인 건물에너지 정책에 부합하는 제로에너지 건물의 복사냉난방시스템으로서 PCM을 활용한 구체축열 콘크리트 구조체를 개발하고, 이를 건축 설계에 적용하기 위한 PCM 재료 및 구체축열 콘크리트의 배합 기술, 구체축열 PC 슬래브의 최적 구조설계 기술 및 냉난방 설계 기술을 개발하고자 한다.(그림 1.1.2) 이를 위해 건축재료 및 건축구조, 건축설비 분야의 세부적인 기술로 구분하여 단계별 성능 목표 수준을 수립하고, PCM 재료 및 구체축열 복사냉난방시스템의 설계 기술, 가이드라인을 제시하고자 한다.

건물에너지 효율 향상을 위해 구체축열 공조시스템 개발이 요구됨

연구 필요성

구체축열 공조시스템의 개발을 통해

- 전력 부하 평준화 및 신재생에너지 보급 확대
- 기계실 면적 감소 및 층고 저감, 공조 설비 용량 감소를 통한 초기 투자비 절감
- 심야전기를 이용한 에너지 비용 절감
- PCM을 활용한 PC슬래브 개발을 통해 축열 성능 및 구조 안정성 확보

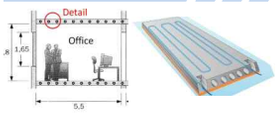
국내외 기술 동향

- 국내 : 구체축열시스템 기술 개발이 미흡
- 국외(유럽, 일본, 북미 지역)
  - ISO를 중심으로 구체축열 공조시스템 기술 표준화가 진행 중
  - 유럽을 중심으로 기술 개발이 진행되어 건물에서 활용되고 있음

PCM 이용 구체축열 공조시스템 개발을 위해서는 건축 설비, 구조, 재료의 융복합 연구 필요

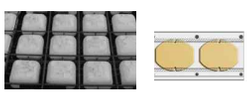
연구 내용

건축 설비 기술



- 구체축열 슬래브의 전열 특성 해석 및 구체축열 공조시스템 설계 기술 개발
- 구체축열 공조시스템의 최적 운영 기술 개발
- 구체축열 공조시스템의 에너지 절감 기술 개발

건축 구조 기술



- PCM 혼합 콘크리트 구조 설계 및 배합 기준 수립
- PC 중공 슬래브의 휨거동, 전단거동 평가 및 접합부 설계 기술 개발
- 시제품 제작 및 현장 적용 성능 평가

건축 재료 기술

- 구체축열시스템의 열적 거동에 따른 PCM 재료 및 친환경 콘크리트 재료를 이용한 SSPCM 개발
- SSPCM이 혼합된 축열 콘크리트 배합 기술 개발
- 구체축열용 콘크리트의 에너지 효율 향상 기술 개발

구체축열 공조시스템의 현장 적용을 위한 설계 및 제작, 운영 기술 개발

그림 1.1.2 연구 개요

나. 연구개발의 필요성

앞서 살펴본 바와 같이 최근 들어 지구온난화로 인해 갑작스런 기후 변화가 발생하면서 냉난방에너지 소비가 급증하고, 이로 인한 국가적인 전력 수급 불균형이 나타나고 있다. 실제 국내의 연도별 최대 전력 수요는 2000년대 이래 매년 5% 가량 증가해 왔으며, 발전설비도 매년 증가추세에 있다. 그러나 매년 전기 공급 예비율이 줄어듦으로 인해서 전기 수급에 매우 불안정한 상황에 이르렀으며, 최근에는 대규모 정전사태(black out)가 발생하면서 국가적인 대응 방안 마련이 절실해졌다. 90년대 후반에는 건물에서의 냉방수요가 급증하면서 전기소비가 증가하였고, 국가적 차원에서 에너지 수급불균형을 해소하기 위해 빙축열시스템이나 가스냉방, 지역냉방 등 열원의 다양성을 확보하기 위한 연구가 수행되어 왔으며, 건물의 공조시스템과 관련해서는 천장 복사냉방이나 온돌을 이용한 바닥복사냉난방 등 다양한 연구가 수행되었다. 과거와 달리 최근에 나타나는 에너지 수급 불균형은 여름철 냉방 수요 증가는 물론, 갑작스런 겨울철 한파로 인한 난방 수요 증가가 전력 수급 불균형이 주요 원인으로 거론되고 있다. 일반적으로 건물에서의 냉난방에너지 소비 및 전력 수요는 외기 기후 조건에 크게 영향을 받기 때문에 여름철에는 오후 3시부터 4시까지 냉방 수요가 급증하면서 전기의 순간예비율이 가장 낮아지게 되며, 겨울철에는 주로 오전 10시부터 12시까지 난방 수요가 급증하면서 전기의 순간 예비율이 가장 낮아지게 된다. 이러한 국가적 차원에서의 에너지 수급 문제를 해결하고, 건물에서 에너지의 효율적인 사용을 위해서는 구체축열을 이용한 냉난방시스템의 도입이 필요하다. 일반적으로 TABS(Thermally Activated Building System) 또는 CCA(Concrete Core Activation) 시스템으로 알려진 구체축열 공조시스템은 복사(radiation) 열전달에 의해 건물을 냉난방하는 공조시스템으로서, 저위의 열원, 즉 신재생에너지나 미활용온도차에너지와 같은 저온 난방 열원과 고온 냉방 열원을 적용할 수 있으며, 별도의 축열체를 두지 않고 건물 구조체를 축열체로 사용함으로써 건물냉난방에 소요되는 에너지를 효율적으로 사용할 수 있게 된다. 즉, 구조체의 축열 및 방열 특성에 따라 기존 대류 방식의 공조시스템과 통합 운영됨으로써 냉난방에 소요되는 전기의 피크 부하 발생 시간을 이동하거나 최대 냉난방 부하 크기를 줄일 수 있게 된다.

또한 최근 정부에서는 건물에서의 거주환경 개선에 대한 사회적 요구를 반영하고, 지구 온난화 및 화석에너지 고갈에 대비하기 위해 그린홈 및 제로에너지건물 보급에 주력하고 있다. 이에 정부 차원에서 2018년까지 그린홈 200만호 건설(신축100만, 기존 100만) 도입을 시사한 바 있으며, 주거용 건축물의 경우 2012년에는 에너지소비량 기준 대비 30% 감축을, 2017년에는 60% 감축(패시브하우스 수준)을, 그리고 2025년에는 제로에너지 건축물을 의무화할 것을 공표하였고, 비주거용 건물일 경우 2012년에는 기준이 되는 에너지 소비량 대비 15% 감축을, 2017년에는 30% 감축을, 2020년에는 60% 감축을, 2025년에는 제로에너지 건축물을 의무화할 것을 공표하였다. 그린홈 또는 제로에너지 건물의 보급을 위해서는 1차적으로 건물에너지 소비량을 최소화해야 하며, 건물에서의 효율적인 에너지 사용은 물론, 신재생에너지의 보급이 필수적으로 전제되어야 한다. 최근에는 건축물의 에너지 절약에 대한 관심이 커지면서 건물에서 효율적인 에너지 사용 및 신재생에너지 또는 미활용에너지 등의 보급에 많은 노력을 기울이고 있지만, 열원측면에서의 기술개발 및 보급이 활성화되고 있으며, 신재생에너지의 효율적인 활용을 위한 건물의 냉난방시스템 개발에 대한 연구가 미진한 실정이다.

- 최근 기후변화로 인한 냉난방 에너지 수요 및 전력 피크 부하가 증대됨
- 국가 차원의 에너지 관리 및 건물에너지 효율화를 위해서는 구체축열을 이용한 복사냉난방시스템 도입이 필요함
- 또한 정부에서는 2025년 제로에너지 건물을 정책적으로 확대 보급하고자 함
  제로에너지 건물에서는 지열이나 태양열 등 신재생에너지의 적용이 필수임

: 국내에서는 신재생에너지를 건물에서 효율적으로 활용하기 위한 공조시스템에 대한 연구개발이 미흡함

⇒ 제로에너지 건물에서 신재생에너지의 효율적인 활용을 위해서는 구체축열을 이용한 복사냉난방시스템 설비 기술이 통합 적용되어야 함

일반적으로 복사냉난방시스템은 패널이나 바닥에 열전도율이 양호한 배관이나 방열판 등을 이용해 냉난방하는 방식을 말한다. 복사냉난방시스템은 천장패널이나 모세관 튜브, 콘크리트 구조체 등을 활용하여 냉난방부하 중 현열부하를 제거하는 것으로서, 지금까지 국내에서는 기존 온수 온돌난방과 건식 복사난방, 그리고 온돌구조체를 냉방에 활용하기 위한 연구가 진행되었다. 콘크리트 구조체를 이용하는 구체축열 복사냉난방시스템은 배관을 콘크리트 내에 매설하여 건물 구조체를 축열(냉)함으로써 부하를 제거하거나 시간차에 의해 피크부하를 줄일 수 있는 시스템이다. 국내에서는 적용된 사례가 많지 않지만, 최근 유럽을 중심으로 저에너지 친환경 건축물 프로젝트에 에너지 절약기술로서 대형건물이나 공항, 컨벤션센터 등의 건물에 널리 사용되고 있다. 구체축열 복사냉난방시스템이란 축열체로서 물이나 얼음이 아닌 건물 구조체를 이용한 축열 방식이다. 콘크리트의 열용량은 약 2,023 kJ/m^3K로서 우수한 축열재로서 활용될 수 있다. 구체축열 복사냉난방시스템은 축열조가 불필요한 구체축열의 이점을 활용하고, 건물 구조체와 공조설비 기술을 통합 적용하여 건물에서의 에너지 활용을 보다 동적으로 계획하고 운영되는 공조시스템이다.

일반적으로 최근까지 국내외에서 적용되어온 구체축열 복사냉난방시스템은 현장에서 거푸집과 철근을 조립한 후, 콘크리트 타설 전 구조체 내에 배관을 설치하고, 구조체에 매설된 배관을 통해 온수나 냉수를 공급하여 기존 대류방식의 공조설비와 통합 운전되고 있다.(그림 1.1.3 참고) 이러한 구체축열 복사냉난방시스템은 일반적으로 대류방식의 공조설비와 달리 축열 및 방열을 통해 냉난방이 이뤄지기 때문에 반응시간을 고려한 시스템의 설계 및 운영기술이 필수적이다. 그러나 국내에서는 이와 같은 구체축열 복사냉난방시스템의 설계 및 운영에 대한 기술자료가 부족하여 실제 대류 방식의 공조시스템과 동일하게 운전되고 있으며, 신재생에너지와 통합 적용하는 경우에도 에너지 절감 효과를 크게 기대하지 못하고 있는 실정이다. 또한 이러한 구체축열 복사냉난방시스템의 축열 성능은 콘크리트 자체의 열용량에 크게 의존함으로써, 별도의 기준이 없는 한 구조적 안정성을 확보하는 차원에서의 구조체의 물리적 치수가 결정됨으로써 축열용량을 증대시키기에는 제약이 있게 된다. 그러므로 구체축열 복사냉난방시스템의 축열성능을 향상시키기 위한 건축재료적 기술개발이 냉난방설비의 에너지 절약을 고려한 효율적인 운전을 위해 반드시 필요하게 된다. 뿐만 아니라, 구체축열 복사냉난방시스템을 현장에서 적용하기 위해서는 오피스나 학교, 관공서 등 건물의 구조시스템과 통합 적용함으로써 구조 안

정성 확보 및 경제성 확보가 필요하다. 일반적으로 적용되는 기존 습식 공법과 달리 중공 슬래브 구조 부재를 이용하는 경우, 건물에서의 모듈화, 경량화가 용이하고, 건물의 자중이나 물량을 줄여 초기 투자비를 절감할 수 있기 때문에 경제적 이점을 크게 향상시킬 수 있다.



그림 1.1.3 구체축열 공조시스템 적용 사례

일반적으로 바닥 슬래브는 습식으로 거푸집 시공 후에 콘크리트를 타설하여 이뤄지게 된다. 최근에는 구조체의 자중 및 물량의 감소, 층간 소음 제어, 단열성능 개선 등의 효과가 있는 중공 슬래브를 도입하고자 하는 기술이 개발되고 있다.(그림 1.1.4) 기존에 개발된 중공슬래브는 길이 방향의 원형관을 중공체로 하는 1방향 슬래브가 대다수를 차지하고 있다. 그러나 1방향 슬래브는 교량판 등에 사용하기에는 적합하나, 일반적인 건축물에 사용되기에는 제약이 많기 때문에 2방향 슬래브에도 적합한 구조체 개발 연구가 진행되고 있다. 일반적으로 중공슬래브의 개발연구에서 고려되는 것은 중공체의 크기와 형태에 따른 중공률과 시공성을 비롯하여 전단성능 및 균열 양상이다. 지금까지 개발되어 상용되고 있는 중공체의 형태는 직육면체, 정육면체, (타)원형으로 다양하고, 직육면체나 정육면체는 중공률이 높은 반면 모서리에서 응력집중 현상이 발생하고, 지름이 일정한 원형 보다는 타원형이 중공률 및 시공성을 높이기 좋은 것으로 알려져 있다. 중공체의 형태는 전단내력에도 영향을 미치게 되는데, 이는 전단내력이 중공면적과 밀접한 관련이 있기 때문이다. 특히 2방향 중공슬래브는 1방향 중공슬래브에 비해 중공률이 높아 전단내력이 많이 감소할 것으로 예상되며 이에 대한 설계기준식은 계속 연구되고 있는 실정이다. 특히 기존 연구결과에 따르면, 중공 슬래브를 건축물에 적용하는 경우 콘크리트 물량 감소, 단열 성능 개선, 소음차단 등에 효과가 나타나는 것으로 보고되고 있다. 시공 편의성 및 공사 관리를 위해 대부분 슬래브 전체를 PC로 제작하지 않고 강선이나 중공파이프가 삽입되어 있는 슬래브의 하단부를 PC로 제작하고 상부는 현장에서 타설하여 다른 구조체와의 일체화를 높이는 Half PC 슬래브 및 시공기법이 연구, 개발되고 있다. 이러한 슬래브 구조의 경우, 슬래브 내 중공체가 삽입됨으로 해서 콘크리트 물량을 줄일 수 있지만, 구체축열 복사냉난방시스템으로 적용함에 있어서는 축열량이 크게 줄어들기 때문에 축열성능을 보완하기 위한 기술이 필요하다. 또한 슬래브에 매설된 배관 등 설비 구성요소로 인한 구조적 안정성을 설계 초기 단계에 확보해 나가는 것이 필요하다.

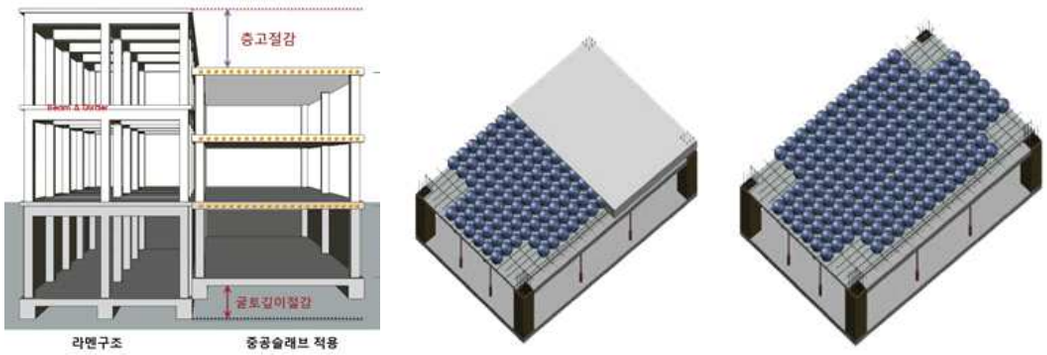


그림 1.1.4 중공 슬래브를 활용한 건물 적용 사례

상변화물질(PCM)을 이용한 잠열저장(Latent heat storage)방법에 대한 연구는 에너지 축열과 관련되어 최근 국내외에서 많은 연구가 진행되고 있다. 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 상변화물질의 잠열저장을 이용한 효율적인 에너지 사용에 대한 관심도 증가하여 건축물에도 PCM을 적용시켜 에너지를 저감시키는 기술 개발에 관한 연구가 진행되고 있다. 일반적으로 PCM은 물질 자체의 낮은 열전도율과 상변화과정에서 액체로 변환된 PCM이 유출되는 문제점 등으로 인하여 건축재료에 바로 적용되기에 한계가 있는 것으로 보고되고 있다. PCM이 가진 이러한 단점을 보완하기 위해 국내외 선행 연구에서는 다른 고분자 물질과의 혼합을 통하여 물리적인 특성 및 열적인 특성 등 PCM이 가진 단점을 극복하고 있다. 이러한 과정에서 PCM의 고체-액체 변화과정에서의 유출을 보완하는 것은 건축적용에 있어 중요한 문제이다. 기존의 논문이나 연구에서는 이러한 문제점을 보완하기 위하여 Macro-encapsulation 기술, Micro-encapsulation 기술, Composite PCM을 이용한 Shape Stabilized PCM (SSPCM) 기술 측면에서 접근하고 있다. 그리고 PCM이 갖는 낮은 열전도율과 연소성으로 인해 건축 재료로 적용되었을 때 성능이 제대로 발휘되지 못하거나 화재의 위험성이 나타날 수 있다. 이에 최근 연구에서는 이러한 단점을 극복하기 위해 열전도율을 증진시킬 수 있는 필러와 연소지연성능을 갖는 필러가 혼합된 Composite PCM을 연구하여 건축 재료로서 성능을 개선시키는 기술을 개발하고 있다.

중공 슬래브 구조체에 PCM을 활용하는 경우, 슬래브 구조체의 자중을 줄이면서도 축열량을 보완할 수 있기 때문에 기존 구체축열시스템의 축열성능을 보완해 나갈 수 있다. 이에 본 연구에서는 PCM을 활용한 구체축열 복사냉난방시스템을 개발하여 건물에서 냉난방부하의 피크치를 줄이고, 겨울철 및 여름철에 전력부하의 안정적인 수요관리를 위한 방안을 도출하고자 한다. 이를 위해 PCM을 활용한 구체축열 복사냉난방시스템의 설계 및 운영 기술을 개발하고, 축열 성능 향상 및 구조안정성을 확보하기 위한 슬래브 구조체의 재료 및 구조성능을 평가하였다. 또한 PCM을 활용한 구체축열 복사냉난방시스템에 적용하기 위한 PCM 재료 및 PCM 혼입 콘크리트 재료의 물리적 특성에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위해서 저에너지 친환경 건축설비기술은 물론 건축구조, 건축재료의 세부 기술을 융복합하여 연구를 수행하였다.

본 연구는 친환경 건축설비시스템의 일환으로 구체축열을 이용한 복사냉난방시스템 개발을

진행하는 것으로서 기존 연구와 달리 PCM 재료를 활용함으로써 구조체의 축열 성능을 향상하고, 중공슬래브를 활용하여 공기 단축 및 층고 저감, 물량 감소 등 제반 문제를 해결하고자 하였다. PCM 재료를 활용하여 축열성능을 향상시키고, PC 슬래브 구조 부재를 활용한 구체축열 복사냉난방시스템을 개발함으로써 오피스나 상가, 관공서 등의 건물에서 효율적인 에너지 사용이 가능할 것이다. 또한 본 연구는 건물에서의 신재생에너지 보급 활성화에 큰 역할을 할 수 있으며, 향후 건물에너지 절감에 효과적으로 적용될 수 있을 것이다. 경제·산업적 측면에서 신재생에너지 관련 산업이 활성화될 수 있으며, 건물에서 에너지 절감을 통해 건물주나 입주자, 에너지 유관 기관이나 국가적 측면에서 경제적 이득을 가져다 줄 수 있을 것이다. 또한 중공 슬래브 구조를 활용함으로써 중저층의 오피스나 상가, 관공서 건물에서 신축이나 증축에 활용됨으로써 층고를 저감하고, 구조물량을 감소함으로써 경제성을 확보해 나갈 수 있을 것이다. 뿐만 아니라, 실내 공조설비의 풍량을 저감하여 덕트 공간을 줄여 나감으로써 건물의 층고가 크게 절약됨으로써 상업용 건물에서의 개발 수익율을 향상시켜 나갈 수 있을 것이다.

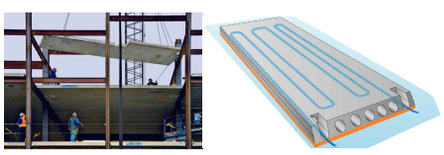
또한 구체축열 복사냉난방시스템의 경우, 복사열 교환에 의한 냉난방이 이뤄지므로 실내 온열환경이 크게 개선될 수 있다. 일반적으로 대류방식의 공조시스템의 경우, 실내 부하에 따라 과도한 기류가 발생하는 경우 거주자의 불쾌적을 야기하게 되며, 토출온도나 토출 풍량에 따라서 실내 온열환경이 크게 달라지게 된다. 구체축열 복사냉난방시스템의 경우, 기본적으로 복사냉난방 방식으로서 기존 대류 방식의 공조설비와 통합 적용됨으로써 토출되는 공기의 온도나 풍량을 줄여 기류 발생을 최소화할 수 있으며, 실내환경의 쾌적도를 향상시켜 업무의 효율성을 증대시켜 나갈 수 있다. 건물 실내 환경 개선에 대한 재실자의 요구가 커져가는 현 시점에서 구체축열 복사냉난방시스템은 쾌적한 실내 환경을 조성하기 위한 대안이 될 수 있을 것이다.

2. 연구개발의 목적

본 연구는 국가적인 건물에너지절약 정책에 부합하여 전력 피크 부하 관리와 제로에너지 구현을 위해 신재생에너지나 미활용에너지를 효과적으로 활용하기 위한 “축열성능이 향상된 슬래브를 이용한 저에너지 복사냉난방시스템”을 개발하는 것을 최종 목표로 하였다. 이를 위해 건축물 설계 단계에 적용하기 위한 PCM 재료 및 구체축열 콘크리트의 배합 기술, 구체축열 중공 슬래브의 최적 구조설계 기술 및 구체축열 복사냉난방 설계 기술을 개발하는 것을 세부적인 연구 목표로 설정하였다.

표 1.1.2 연구개발 목표

분 류	기술 개발 목표	비 고
PCM을 활용한 구체축열 복사냉난방시스템의 설계 및 운영 기술	• 구체축열 복사냉난방시스템 설계 매뉴얼 - 구체축열 중공 슬래브 설계 단계 및 기준 • 구체축열 복사냉난방시스템의 운영 가이드라인 - 열원의 설정 조건을 포함하는 운영 가이드라인	건축 설비기술 (주관연구기관)
PCM 재료 및 구체축열용 콘크리트 배합 기술	• 친환경 콘크리트재료를 이용한 PCM 제조 - SSPCM • 축열 콘크리트의 최적 배합 기술 - 축열 콘크리트 최적 배합비	건축 재료기술 (공동연구기관)
PCM을 활용한 구체축열 중공 슬래브 최적 구조 설계 기법	• PCM 활용 PC 슬래브 시작품 • PCM 활용 PC 슬래브의 구조 설계 매뉴얼 - 구조설계식	건축 구조기술 (주관연구기관)

AS IS		TO BE
	⇒	
습식 구조	구조 방식	중공 슬래브 구조
콘크리트	구조 재료	SSPCM 혼입 콘크리트
구조 및 설비 설계가 별도 진행	설계 방식	표준 설계 매뉴얼 활용
일반 공조설비와 같은 방식으로 운전	운영 방식	축열성능을 고려한 운영 매뉴얼 활용

본 연구는 PCM을 활용한 구체축열용 중공 슬래브 부재의 시작품을 개발하고, 이를 위해 PCM 재료는 물론 PCM과 콘크리트 혼합 배합 방법, 중공 슬래브 구조체의 설계 방법 및 구체축열 복사냉난방시스템의 설비 설계 가이드라인을 제시하고자 하였다. 이를 위해 PCM 재료 실험 및 구조 해석 및 에너지 해석, 실험실 축소 실험을 통해 단계적인 성능 목표를 수립하여 최적 배합 및 최적 구조설계, 설비설계 가이드라인을 제시하고자 하였다. 본 연구는 건축설비, 건축구조, 건축재료의 세부 기술이 융·복합되어 하나의 제품을 개발하고, 실제 건축물에 활용되기 위한 설계 기준 및 매뉴얼 개발을 최종 목표로 하고 있다. 실제 구체축열용 중공 슬래브를 제작하여 성능 평가를 위해 실험실 실험을 진행하고, 구조해석 및 전열해석을 통해 표준화된 설계 기준을 수립하고자 하는데 그 의의가 있다. 아울러 구체축열을 위한 PCM 소재의 개발을 통해 구체축열용 중공 슬래브의 축열 성능을 향상하고, 신재생에너지 및 전력 피크부하 저감을 위한 운영 가이드라인을 도출하여 실무적 활용이 가능하도록 연구 목표를 수립하였다.



2절 연구개발범위 및 방법

1. 연구개발 범위

지금까지 국내에서는 중공 슬래브를 이용한 구체축열 복사냉난방시스템이 개발되어 적용된 바가 없으며, 특히 PCM 재료를 활용하여 구체축열 복사냉난방시스템의 축열 성능을 향상하기 위한 연구는 진행된 바가 없다. 그러므로 본 연구에서는 건축설비 에너지성능 향상을 위해 구체축열 복사냉난방시스템에서 축열을 통한 냉난방 에너지의 효율적 활용과 전력 피크 부하 저감을 위한 운영 방안의 개발 등에 초점을 맞춰 연구를 수행하였다. 뿐만 아니라, PCM을 활용한 구체축열용 중공 슬래브는 일반 콘크리트 슬래브와 비교하였을 때, 구조성능이 감소되는 것을 예상할 수 있으며, 특히 PCM을 적용한 경우 일반 콘크리트의 재료적 특성과 다르기 때문에 기존 설계기법을 그대로 적용하는 것은 불가능하다. 따라서 PCM을 도입한 중공 슬래브의 구조 설계시 구조거동 특성 뿐 아니라 콘크리트 재료의 특성을 파악하여 고려하는 것이 필요하다. 또한 중공체를 도입하는 경우 일반 슬래브 보다 전단 내력이 감소하고 균열이 잘 발생한다는 문제점이 있어 구조적 거동 특성을 파악하고 이를 바탕으로 기존의 설계식에서 추가적으로 고려해야 할 사항을 분석, 수정된 설계식을 제안하는 과정이 필요하다. 따라서 재료 및 부재의 개발, 거동 특성 파악, 설계식 검토 및 수정의 단계적 연구를 수행하였다. 그러나 3개년도의 연구기간 안에 PCM이 도입된 콘크리트 재료의 내화특성, 동결융해를 비롯한 장기적인 거동의 파악, 파괴 양상에 따른 보수 및 보강 기법 등을 제안하는 데 있어서는 무리가 있다고 사료되어 구조부재의 단기적 거동과 이를 바탕으로 하는 설계식의 제안을 연구의 범위로 하였다. 구체 축열성능 향상을 위한 PCM 재료 연구에서는 PCM 함침을 SSPCM 재료 개발과 아울러 축열 모르터, 축열 콘크리트를 제작기술을 확보하도록 계획하였으며, 이를 통해 구체축열용 중공 슬래브 설계 및 시공을 위한 콘크리트 배합 기술을 확보하고자 하였다.

2. 연구개발 방법

가. PCM을 활용한 구체축열 복사냉난방시스템의 설계 및 운영 가이드라인 개발

연 차	주요 연구내용	수행방법
1차년도	▪ 구체축열 복사냉난방시스템의 시스템 개념 설계	▪ 구체축열 복사냉난방시스템의 설계 프로토타입 선정 ▪ 시뮬레이션을 통한 설계 대안 평가 - PCM 재료의 성능 기준 수립
	▪ 구체축열 복사냉난방시스템의 설계 기준 개발	▪ 기존 PCM재료를 활용한 구체축열 슬래브 제작 및 성능 현황 파악 ▪ 자료 및 문헌 조사를 통한 구체축열 설계 프로세스 개발 ▪ 전열해석 시뮬레이션을 통한 설계 기준 평가
2차년도	▪ 구체축열 복사냉난방시스템의 설계 기준안 검증 및 냉난방 운전성능 평가	▪ 냉난방 운전 성능 평가 실험 ▪ 실험실 실험을 통한 설계 기준안 검증
	▪ 구체축열 냉난방시스템의 에너지 절감 기술 개발	▪ 구체축열 복사냉난방시스템의 에너지성능 평가 시뮬레이션 수행 ▪ 에너지 해석 시뮬레이션을 통한 통합 시스템의 운전 성능 평가
3차년도	▪ 구체축열 복사냉난방시스템의 운영기술 개발 - 열원 운영 기술 개발 - 피크 부하 저감 기술 개발	▪ 개발된 PCM 재료를 이용한 구체축열용 중공 슬래브 시제품 제작 ▪ 실험실 성능평가 실험
	▪ 구체축열 복사냉난방시스템의 운영 가이드라인 개발	▪ 전열해석 시뮬레이션을 통한 운영 가이드라인 작성 - 운전방식에 따른 운영 가이드라인 개발

나. PCM 재료 및 구체축열용 콘크리트 배합 기술 개발

연 차	주요 연구내용	수행방법
1차년도	▪ 구체축열 시스템의 열적거동에 따른 적용 PCM의 선정	▪ 기존 문헌 및 실측을 통한 축열시스템이 적용된 건물의 열적 거동 파악 ▪ 구체축열 복사냉난방시스템에 적용가능한 PCM의 선정 및 열적·물리적 특성 분석
	▪ 친환경 콘크리트 재료를 이용한 SSPCM 개발	▪ 친환경 콘크리트 재료인 플라이애쉬 및 흄드실리카 등의 열·물성 분석 ▪ PCM 함침을 통한 축열 콘크리트 제조용 SSPCM 개발
2차년도	▪ SSPCM이 혼합된 축열 콘크리트 제조	▪ 배합 방법에 따른 SSPCM이 혼합된 콘크리트의 제조 ▪ 축열 성능 및 열적, 물리적 성능 평가
	▪ 구체축열용 콘크리트의 최적 배합 기술 개발	▪ 구체 축열 콘크리트 열성능·물리적 특성 분석을 통한 최적의 축열 콘크리트 배합기술 개발
3차년도	▪ 구체축열용 콘크리트의 에너지 효율 향상	▪ 콘크리트의 열적 거동 분석을 통한 축열성능 향상 방안 연구 ▪ 축열 성능 향상에 따른 에너지 저감 성능 평가

다. PCM을 활용한 구체축열 PC 슬래브 최적 구조 설계 매뉴얼 개발

연 차	주요 연구내용	수행방법
1차년도	▪ PCM이 도입된 콘크리트의 구조 성능 만족 기준 파악 ▪ 중공 슬래브의 기존 설계식 분석	▪ 해외 기준 및 연구문헌 조사 분석 ▪ 이론적 연구
	▪ 재료 실험을 통한 물성치 파악 ▪ 구조성능 만족을 위한 최적 배합비 검토	▪ 이론적 연구 ▪ 실험 및 검증
2차년도	▪ 중공 슬래브의 휨거동 특성 파악 ▪ 중공 슬래브의 전단거동 특성 파악	▪ 실험실 구조 실험 및 검증 ▪ 공법 개발
	▪ 중공 슬래브-기둥의 접합부 특성 파악	▪ 실험실 구조 실험 및 검증 ▪ 공법 개발
3차년도	▪ 거동특성을 바탕으로 기존 설계식의 검토 및 문제점 파악 ▪ 거동특성을 바탕으로 기존 설계식 수정 및 제안 ▪ 제안된 설계식에 따른 PCM 활용 구체축열 중공 슬래브의 시제품 제작	▪ 구조 설계식 제안 ▪ 시제품 제작
	▪ 시제품 현장 적용 가능성 파악 및 문제점 보완	▪ 구조 설계식 제안 ▪ 실험실 실험을 위한 시제품 현장 적용

3절 관련분야의 국내외 기술 개발 현황

1. PCM 적용 건축기술 개발 현황

지구온난화로 인한 기후변화 이슈가 대두되면서, 전 세계적으로 에너지 소비저감 기술은 화두가 되었다. 그리고 에너지 소비에 따른 환경영향의 감소를 위하여 새로운 에너지원 개발과 함께 에너지 저장시스템의 개발은 중요한 영역으로 자리잡고 있다. 최근 해외선진국에서는 여러 선행된 연구들을 통해서 개발되어진 열에너지 저장/변환/이용기술의 실용화를 적극적으로 추진하고 있다. 특히 상변화물질(Phase Change Material, PCM)을 이용한 축열시스템을 통해 다양한 형태의 미활용 열에너지를 축적하거나 저장하여, 필요한 시기 및 목적에 따라 적절히 활용하는 기술들이 주목을 받고 있다.

PCM을 건축물에 적용하기 위한 시도는 1980년 이전부터 시작되었다. 많은 연구에서 PCM을 활용하여 건물의 축열량을 증가시키는 방법들을 개발해 왔으며, 최근 다양한 유형의 실용화 가능한 PCM들이 개발되면서 실제 건물프로젝트의 적용도 활발하게 이루어지고 있다. 특히 날로 대형화/고층화되어가는 건축 흐름에 따라 많은 신축건물들이 경량구조화 경향을 보이고 있으며, 이에 따른 축열량 감소를 보완하는 기술의 필요성이 대두되고 있다. PCM을 통한 축열량 증가는 에너지 수요와 공급의 불일치에 대한 보정 효과로 냉난방 에너지를 저감할 수 있고, 축열을 통한 Peak Shifting으로 전력부하 평준화 효과를 얻을 수 있다. 또한 PCM의 활용은 실내 공기온도 변화주기를 감소시키고 장시간 설정온도에 가깝게 유지시킴으로써 효율적 냉난방과 함께 거주자의 쾌적성 증대를 가져온다.(그림 1.3.1 참고)

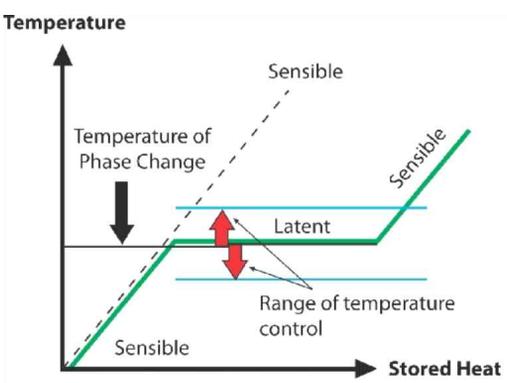


그림 1.3.1 PCM의 상변화축열을 통한 온도조절 효과

건축물의 구조체, 건자재, 설비시스템 등에 적용시 효율적인 축열 성능을 발휘하기 위해서, PCM은 단위부피 및 단위무게당 축열량, PCM 자체의 비열, 열전도율 등이 커야한다. 또한 일정한 온도에서 축열 및 방열을 통한 효율적인 에너지 저장을 위해, 일정한 온도에서 상변화가 이루어져야 한다. 상변화에 따른 부피변화가 작아야 하고, 독성이나 인화성이 없어야 하며, 화학적으로 안정하고 부식성이 없어야 한다. 무엇보다도 건축재료로 PCM이 활발히 적용되기 위해서는 가격이 저렴하고 쉽게 구할 수 있는 물질이어야 한다.

상변화물질의 적용방법에는 크게 Passive 방식과 Active 방식으로 나눌 수 있다. Passive 방식에는 별도의 설비시스템 없이 적용가능한 Trombe Wall과 같은 축열벽에 PCM 활용, PCM Wallboard, PCM Ceiling, PCM Floor Panel 등이 있다. Fraunhofer ISE 연구소 자료에 의하면, 일반적인 건자재와 PCM 플라스터로 시공한 두 벽체에 대하여 비교실험한 결과, 그림 1.3.2와 같이 최고 4℃의 온도차이를 보이고 있다. 또한 특정기후조건에서는 추가적인 냉난방시스템 없이도 PCM 활용을 통해 쾌적한 실온유지가 가능할 수 있다. Active 방식은 Passive PCM 적용 방식의 한계를 보완하기 위하여 냉난방시스템과 연계되어 활용하는 것으로, PCM에 활용된 건자재에 모세유관 등의 hydronic 시스템이 결합된 냉난방시스템이 가장 보편적으로 적용되고 있다. 예를 들면 Floor heating과 Ceiling Board Cooling, PCM이 설치된 열교환기, PCM을 통한 공조설비의 잉여열 저장 등으로 사용되는 것을 말할 수 있다. 이런 방식으로 건물은 상당히 작은 에너지로 실내의 적절한 온도를 유지할 수 있게 된다.

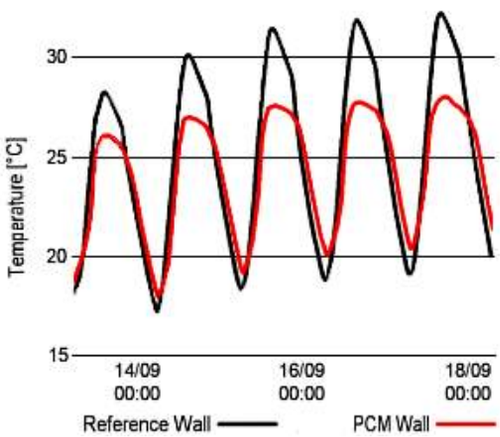


그림 1.3.2 PCM 플라스터를 적용한 벽체의 열성능 실험 (Fraunhofer ISE)

가. 건축물에서 PCM의 Passive 적용 방법

현재 PCM이 건축물에 가장 보편적이고 다양한 방식으로 적용된 것은 건물의 구조체를 구성하는 건축재료에 PCM을 혼입하거나 PCM을 활용한 내외부 마감재 등이며, 주로 Passive 친환경 저에너지 건축물 기술과 PCM이 융합되어 건축물에서 활용되어지고 있다. 이를 위해 플라스터나 모르타르에 미세캡슐화하거나 함침시킨 PCM을 혼입하여 현장에서 시공하거나, 석고보드 등 패널 형태로 공장생산한 후 현장에서 시공하기도 한다. 최근 PCM을 활용한 콘크리트 기술에 대해서도 활발한 연구가 진행되고 있으며, PCM 블록, PCM 타일, PCM 도료 등 건축 전반에 걸쳐 다양한 형태로 적용되고 있다.

(1) PCM 플라스터, PCM 모르타르

PCM 플라스터, PCM 모르타르는 일반적인 플라스터나 모르타르에 미세캡슐화하거나 함침시킨 PCM을 혼입하여 현장에서 시공하는 방식으로 가장 손쉽고 보편적으로 일반적인 건자재에 PCM 적용을 할 수 있는 방법이다. 그림 1.3.3은 독일의 재료물질 생산업체인 Maxit사의 PCM을 혼입한 석고모르타르를 시공하는 모습이다. PCM 제조기술의 선두주자인 독일의 BASF사에

서는 기존의 Micronal-PCM과 함께 Hydronic 시스템에 최적화한 새로운 마이크로캡슐 PCM을 개발하였다. 독일 Maxit사의 PCM 석고모르타르나 독일 DAW사의 PCM 플라스터 모두 마이크로캡슐 PCM을 활용하여 Hydronic 시스템에 적합하도록 개발한 제품이다. 지속적인 연구와 기술개발을 통해 2005년부터 Micronal-PCM은 많은 건물에 Passive 또는 Active 방식으로 시공되었다. 기술을 계속해서 뿌리내리기 위하여 건물에 적용하는 PCM 제품의 표준화와 품질안정성 작업을 하고 있다. 또한 독일과 네덜란드 등 유럽의 PCM 제품 생산자들은 협회를 만들고 품질인증기관에서 인증을 받았으며, 이와 함께 품질요소의 정밀한 조사와 테스트가 이루어지고 있다. 한편, 국내에서도 PCM을 혼입한 모르타르의 열성능 및 경제성에 대하여 평가하는 다수 연구들이 수행된 바 있다.



그림 1.3.3 PCM 석고모르타르의 시공 사례 (Maxit clima®)

(2) PCM 보드

PCM을 미세캡슐화하여 섬유보드 또는 석고보드에 적용시킬 경우 축열 및 방열에 대한 응답성이 좋아지게 되고, 수분의 증발과 상분리를 억제하는 효과를 얻을 수 있다. 또한, 벽체의 두께를 얇게 하면서도 잠열을 이용하여 열에너지를 충분히 저장할 수 있으므로 환경친화적 건축자재로서의 적용이 가능하다. 그림 1.3.4는 Micronal-PCM을 활용한 독일 Knauf사의 PCM Smart Board®이고, 그림 1.3.5는 미국 National Gypsum사의 Thermal CORE™ Panel이다. 한편, 우리나라에서도 한국보랄 등 석고보드 제조사를 중심으로 PCM 보드의 개발 및 상품화 연구를 수행하였다.

(3) PCM 블록

독일의 H+H Deutschland GmbH사는 축열량 증대를 위해 그림 1.3.6의 PCM을 혼입한 블록(CelBloc Plus®)을 개발하였다. 이러한 PCM 활용은 외벽을 통해 전달된 열의 이동을 늦추어주는 역할을 수행하고, 그 결과 같은 열관류율값으로도 실온의 변화폭을 줄여주어 좀 더 일정한 실온유지 효과를 가져온다. 국내에서도 한국에너지기술연구소에서 미세캡슐화된 상변화물질

을 함유한 축열블록의 열성능 특성에 관한 연구를 수행하였다.

(4) PCM 건축도장재, PCM 타일/Flooring

국내 탄소저감형 건설재료 기술개발 연구단은 환경부하 저감형 건축재료의 일환으로 PCM을 혼입한 건축용 도장재료 연구를 수행하고 있다. 이 연구에서는 PCM 소재 개발 및 잠열공법 성능평가와 함께, 실증하우스 적용 검토 및 에너지 소비량 검토를 수행할 계획이다. 그림 1.3.7과 같이 스페인에서는 PCM 타일을 제작하여 냉난방에너지 저감성능을 평가하기 위한 실험을 수행한 연구사례도 있다. 그림 1.3.8은 Wood Flooring에 PCM을 접목한 제품 사례이다.

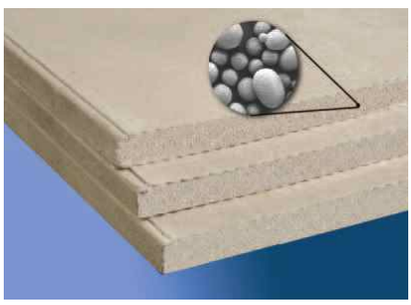


그림 1.3.4 Knauf사의 PCM 보드 (PCM SmartBoard®)

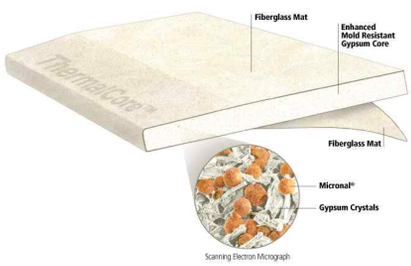


그림 1.3.5 National Gypsum사의 PCM 보드 (ThermalCORE™ Panel)



그림 1.3.6 H+H Deutschland GmbH사의 PCM 블록 (CelBloc Plus®)

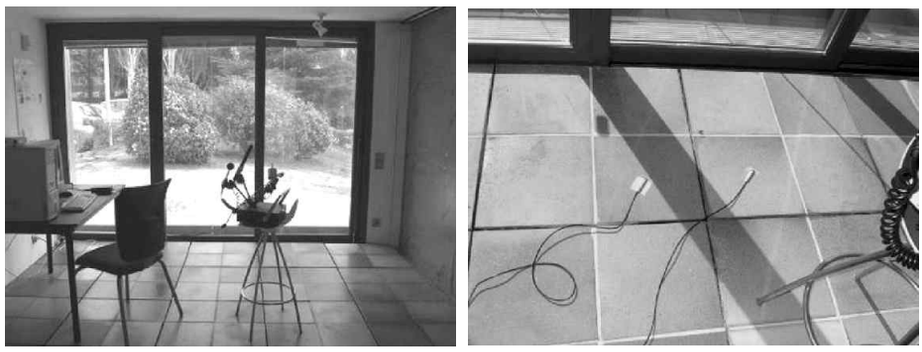


그림 1.3.7 PCM 타일의 성능 평가

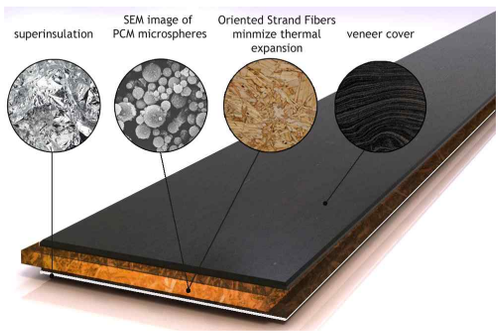


그림 1.3.8 PCM Solar Flooring

나. 건축물에서 PCM의 Active 적용 방법

Active 방식은 Passive 적용에서 언급한 사례들을 기반으로, Passive PCM 적용방식의 한계를 보완하기 위해 냉난방시스템과 연계되어 활용하는 것으로 Hydronic 시스템과 결합된 냉난방시스템이 가장 활발하게 적용되고 있다. PCM 보드를 활용한 천장패널 냉난방시스템, PCM을 적용하여 바닥복사시스템의 축열량을 증대시키는 방식 등이 대표적인 예이다. 물론 냉난방시스템의 효율 향상을 위한 방편으로 PCM이 적용되는 사례도 있다.

(1) PCM 보드를 활용한 천장패널 냉난방시스템

Hydronic 시스템에 적합하도록 개발된 PCM 석고모르타르나 PCM 플라스터를 사용하여 직접적으로 천장의 수배관시스템을 마감하는 현장 시공 사례도 있으나, 가장 보편적인 적용방식은 PCM 보드를 활용한 천장패널 냉난방시스템이다. 그림 1.3.9는 Fraunhofer ISE의 천장복사패널시스템과 PCM 보드를 연계한 실험체이고, 그림 1.3.10은 이러한 연구를 통해 개발되어진 Ilkazell사의 PCM보드를 활용한 천장복사 패널시스템(Ilkatherm) 제품과 그 설치 사례를 보여주고 있다. 이러한 PCM보드를 활용한 천장패널 냉난방시스템은 그림 1.3.11의 사례와 같이 지열 등 신재생열원과 연계되어 미활용 온도차에너지의 이용 효과를 더욱 향상시켜주는 역할을 수행한다.



그림 1.3.9 Fraunhofer ISE의 천장복사패널시스템과 PCM 보드 연계 실험체

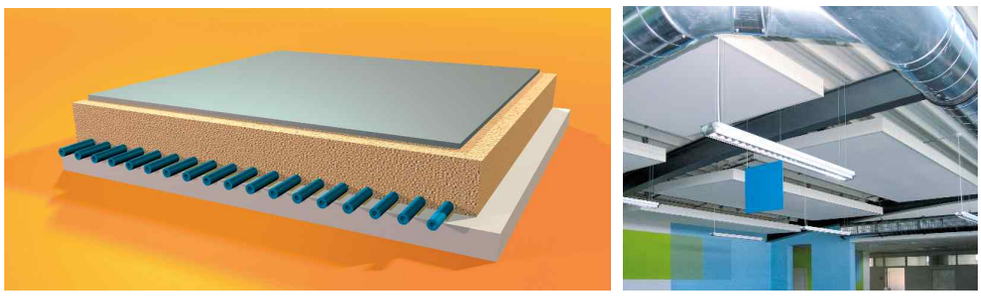


그림 1.3.10 Ilkazell사의 PCM보드를 활용한 천장복사 패널시스템(Ilkatherm)

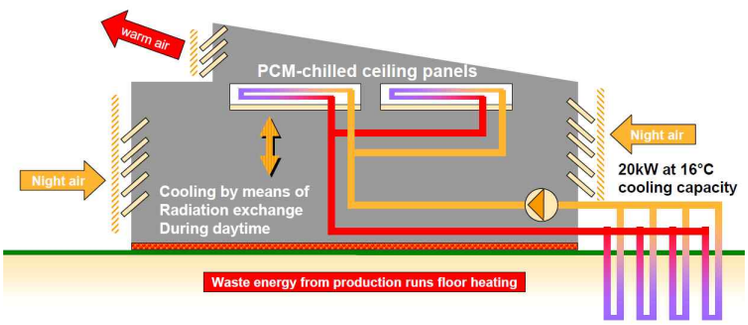


그림 1.3.11 지열과 연계된 PCM 천장냉방시스템

(2) PCM 활용 바닥난방시스템

국내 주거 건축물에 적용되는 일반적인 난방방식은 바닥난방방식이며, 이러한 바닥난방방식에 대한 PCM 적용은 상당한 에너지 소비저감 가능성을 가지고 있다. 바닥난방방식에 적용할 수 있는 PCM은 타 건축물에 적용되는 경우에 비해 용융점이 높아야 한다. 바닥난방방식에 의해 발생하여 바닥마감재을 통해 전달되는 열의 온도가 일반적인 실내온도보다 더 높은 온도이기 때문이다. 따라서 용융점이 높은 PCM을 사용함으로서 바닥 난방방식을 사용하는 국내의 건축물에도 적용이 가능하다. 한편, 일본에서는 그림 1.3.12와 같이 PCM을 활용한 바닥취출공조시스템을 개발한 사례도 있다.

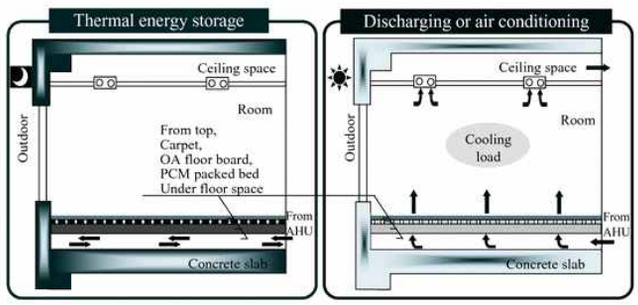


그림 1.3.12. PCM을 활용한 바닥취출공조시스템

(3) PCM 축열조 태양열시스템

기존의 태양열시스템에 PCM 축열조를 활용하여 태양열시스템의 집열 성능을 향상시킨 방식도 최근 해외에서 많은 활용되고 있다. 그림 1.3.13과 같이 축열조가 아닌 상변화 축열식 집열관으로 설계되어, 수집한 열을 집열관에 저장하여 태양열 집열관 및 축열조를 하나로 통합된 시스템의 사례도 있다.



그림 1.3.13 PCM 활용 상변화축열식 집열관 태양열시스템

다. PCM을 활용한 설비시스템의 효율 및 성능 향상

PCM은 건물에 적용된 일반적인 설비시스템의 효율 및 성능 향상을 위한 재료로도 사용되고 있다. 예를 들면, 동파방지밸브, 열회수시스템의 열매 활용, PCM을 활용한 열대지역 통신기지국, 태양광시스템의 과열방지 등이 있다.

(1) 동파방지밸브

겨울철 수배관의 동파 방지하기 위하여 열선 이용, 제어온도 이하시 밸브가 열리는 컨트롤 밸브, 일정 압력이상에서 파괴되어 물이 방출되는 동파방지밸브 등이 사용되고 있다. 그러나 이러한 동파방지밸브들은 지속적인 전기소비, 전원 차단시 작동 불능, 초기 작동 후 막힘으로 인한 동파 등의 문제점이 발생되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 방안으로 PCM을 이용한 동파방지밸브가 개발되었다. 작동원리는 물의 빙점 온도보다 높은 온도에서 액체상태에서 고체상태로 상변화하는 PCM을 선정하고 이 물질이 상변화에 따른 체적변화를 이용하여 밸브가 개방되고, 또한 상변화 온도보다 높은 온도에서는 PCM이 액체로 상변화하여 부피가 팽창함으로 밸브가 자동으로 닫히도록 설계되었다.

(2) 열회수시스템의 열매 활용

폐열회수를 위한 네트워크상에서 열저장 및 수송을 위한 기술로 PCM을 활용하기 위하여 우수한 열매체 제조 및 대량 생산 기술을 확보하고 고밀도 열수송 기술을 개발하는 연구가 진행되고 있다. PCM을 활용한 고밀도 열수송 매체 이용기술이 개발되면 시설 및 배관의 소형화로 시설투자비를 절감할 수 있으며, 유량감소에 따른 운영비 절감도 기대할 수 있다. 특히 열전달 특성이 향상된다는 점에서 폐열회수 이용을 더욱 촉진시킬 수 있으므로 미활용에너지 이용 네트워크상에서 효과적인 기술로 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

(3) PCM을 활용한 열대지역 통신기지국

PCM은 그림 1.3.14와 같이 열대지역 통신현장의 통신기지국에서 널리 사용되고 있다. PCM은 전력소모가 큰 장치에서 발생하는 열을 흡수하여 기지국의 온도가 최대 허용치 이하로 유지함으로써 정전시 기지국내의 고부가장치를 보호한다. 그리하여 디젤발전기의 사용을 최소화함으로써 열대지역의 수천개 통신현장에서의 에너지절약을 가능케 한다.



그림 1.3.14 PCM을 활용한 열대지역 통신기지국

PCM이 적용되고 있는 다양한 산업분야 중에서 건물분야는 냉방요구의 증가와 건축물의 대형화/고층화에 따른 경량구조화 추세로 PCM 적용의 주요 시장이 되고 있다. Markets and Markets 보고서에 따르면 전세계 PCM 기반의 건물 및 건축 적용 시장은 표 1.3.1과 같이 2009년 6,620만불에서 2015년 4억 1,550만 불로 증가할 것으로 예상된다. 표와 같이 PCM의 활용되는 경우 대략 100만톤의 PCM이 요구된다. 따라서 건물과 같은 대형 적용처에 PCM을 사용하는 경우 거대한 산업시장의 형성으로 성장잠재량이 기대된다. 전 세계적으로 PCM 기반의 건축물 활용 시장 규모는 매우 큰 것으로 보고되고 있으며, 향후 이에 대한 기술 개발이 국내외적으로 다각도로 수행될 것으로 보인다.

표 1.3.1 전 세계 PCM 기반의 건물 및 건축 적용 시장규모 (2008-2015, 단위: 백만$)

지역 구분	2008	2009	2010	2015	CAGR%
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: 한국건설기술연구원. 탄소저감형 건설재료 기술 기획보고서

지금까지의 저에너지 건축물을 위한 PCM 적용 동향을 통하여 우리는 다양한 형태의 기대효과를 살펴볼 수 있었다. PCM 적용시 1~2℃ 저감된 실내온도 변동폭으로 건축물의 효율적 에너지관리와 쾌적성 확보가 가능해진다. 또한 PCM은 건물의 냉난방시스템 및 미활용 온도차에너지시스템과의 연계를 통해 이들 시스템의 효율 및 활용성을 향상시키는 매개체가 될 수 있다. 이러한 장점으로 현재 건축물의 PCM 적용은 Passive적인 적용에서 Active적인 적용으로 옮겨가고 있다.

한편, 건축물에 PCM 적용의 확대를 위해서는 아직도 많은 미지의 연구과제를 가지고 있다. PCM 용융점, PCM 유형, 일반적인 건자재와 PCM의 혼합비율, 기후조건, PCM 적용을 위한 건물의 설계/시공조건 등 인자들에 대한 최적화가 우선적으로 필요하다. 이들 인자는 향후 건축물에서의 PCM 성공가능성을 보여주는 척도가 될 수 있다. 그리고 국내실정에 적합한 지속적인 기술검증 및 효과 파악을 통한 시장개척이 수반되어야 한다.

2. 구체축열 복사냉난방시스템 기술 개발 현황

전통적으로 국내에서는 주거건물에서 복사난방시스템이 적용되어왔다. 이에 90년대 초반에는 축열 성능 개선을 위해 PCM을 이용한 바닥난방시스템에 대해 연구를 수행한 바 있다. “잠열 축열식 온돌”이라 불리기도 한 이 시스템은 약 30°C에서 상변화를 수반하는 물질을 이용한 것으로서, 캡슐형과 파이프 봉입형으로 구분하여 전기열원으로 발열선을 이용하여 주거건물의 바닥난방에 적용하기 위한 시스템으로 개발되었다. PCM의 종류로는 염화칼슘6수화물(CaCl2 • 6H2O)로서 잠열의 크기는 45kcal/kg이며, 국내에서 생산 가능한 재료로서 캡슐형으로 포장되어 패널 형식으로 제작되어 바닥복사난방에 활용되었다. 이 시스템은 슬래브 위에 PE 필름을 깔고 단열재를 설치하고, 그 위에 다시 PE필름이 설치되고, 잠열재가 시공된 뒤 시멘트 모르터가 타설되고 바닥마감재가 시공되는 순서로 설치된다. 심야전기를 이용하여 발열선에 전기를 인가하면 열이 발생하여 축열이 되는 방식이다. 당시에는 기존 자갈축열재를 잠열축열재로 대신함으로써 골재난을 해소하고 공정을 단순화하기 위한 목적이 있었으며, 축열을 통해 간헐난방이나 운전방식에 따른 에너지 절감 효과를 제시한 바 있다. 최근에 있어서는 공동주택에서 충분한 열용량을 확보하면서도 바닥 구조체 두께를 줄이기 위한 목적으로 PCM물질을 활용하여 온수 바닥난방시스템이 개발된 바 있다. 이 경우에는 PCM물질로서 상변화온도 및 잠열량, 가격 등을 고려하여 약 32.4°C에서 상변화가 일어나는 황산나트륨10수화물(Na2SO4 • 10H2O)을 조핵제, 계면활성제, 증점제와 혼합하여 사용하였으며, 건축재료 연구와 병행되어 연구가 진행되었으며 기존 습식 온돌과 비교하여 약 3배 가량 축열량이 크게 나타나는 것으로 보고하였다. 지금까지 국내에서는 주거건물의 복사난방시스템 성능 개선을 위해 PCM 재료를 활용한 연구가 수행되어 왔으나, 기존 습식 온돌난방에서 모르터가 갖는 축열재로서 기능을 보완하기 위한 개선안으로서만 연구가 수행되어 왔다. 반면 외국에서는 슬래브나 벽체, 기초 등 건물 구조체 자체를 축열체로서 활용하여 신재생에너지와 연계된 공조시스템을 구축함으로써 오피스나 박물관 등 다양한 건물에서 효율적인 에너지 사용을 가능하게 있다. 나아가 PCM재료를 활용하여 구조체의 축열성능을 향상함으로써 신재생에너지나 미활용에너지의 활용 가능성을 높이고, 축열성능을 고려한 예측제어 방식 등 에너지 절감을 고려한 다양한 설비 기술이 접목되고 있다. 뿐만 아니라, 축열에 따른 반응 시간 지연 효과를 고려하여 설계 단계에서부터 시공, 운전 단계에 이르기까지 건물에서 체계적으로 관리될 수 있도록 시스템이 구축되고 있다.(그림 1.3.15 참고)

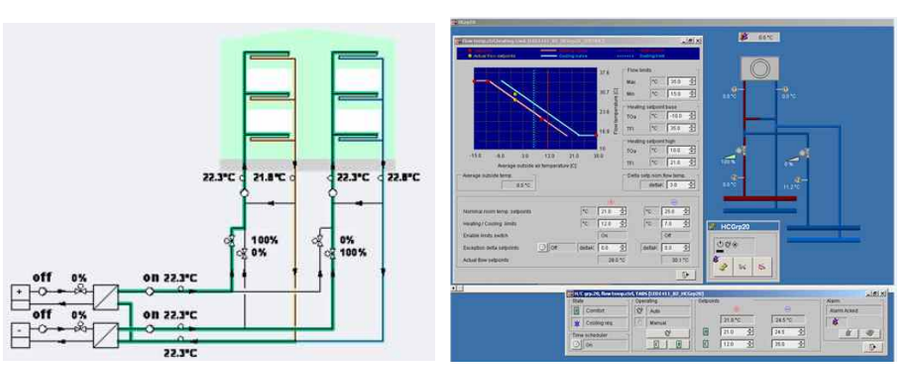


그림 1.3.15 구체축열 공조시스템의 설비 운영 사례

건축물에서 재실자의 쾌적감에 대한 욕구가 증가함에 따라 주거건물 및 상업시설 모두에서 건물에너지 사용량이 급증가하고 있다. 건축물에서 사용되는 에너지 소비량은 산업분야에 이어서 두 번째로 많은 양으로 세계 평균 전체에너지사용량의 30%를 차지하고 있다. 이러한 범지구적인 현상에 대처하기 위하여, 축열시스템은 미래 에너지기술 중 하나의 요소기술로 주목받고 있다. 축열시스템의 원리에는 현열, 잠열, 화학반응에 의한 방식으로 크게 3가지로 구분 된다. 특히, 잠열을 이용하는 방식은 고밀도, 고효율의 열저장 특성 때문에 다른 방식에 비하여 훨씬 더 적은 양의 부피만으로도 동일한 축열성능을 발휘할 수 있다. 이러한 장점으로 건축물, 태양열발전, 폐기열, 지중열 등의 분야에서 에너지 생산 및 관리분야에서 널리 사용되는 가장 효과적인 방안으로 여겨지고 있다.

잠열을 이용한 축열을 하는 대표적인 물질로서 상변화물질 (Phase change material: PCM)이 있다. PCM은 온도의 변화에 따라 상이 변하는 물질로서 상이 변할 때 열을 잠열의 형태로 축적하거나 방출을 하는 특성이 있다. 건물에너지 소비 원인 중에서 가장 많은 양을 차지하고 있는 부분은 외기환경에 대응하고, 쾌적한 실내 환경을 만들기 위한 냉·난방 설비장치 가동에 사용되는 부분이다. 때문에, PCM이 건축물에 적용 될 경우 온도가 상승하는 주간에는 열을 흡수한 후 온도가 하강하는 야간에는 재방출하는 효과와 오버히팅 시 타임랙(Time lag) 효과를 얻을 수 있고, 실내온도를 안정적으로 유지시켜 주어 냉·난방 부하를 줄여주기 때문에 건물 에너지를 절감할 수 있다. PCM이 건축물에 적용될 수 있는 방안은 아래의 그림 1.3.16과 같다. 전 세계적으로, PCM을 활용한 다양한 축열시스템이 적용된 중·경량의 실험적 건물이 지어졌고, 그 에너지성능을 확인하기 위하여 열적 거동이 파악 되었다.

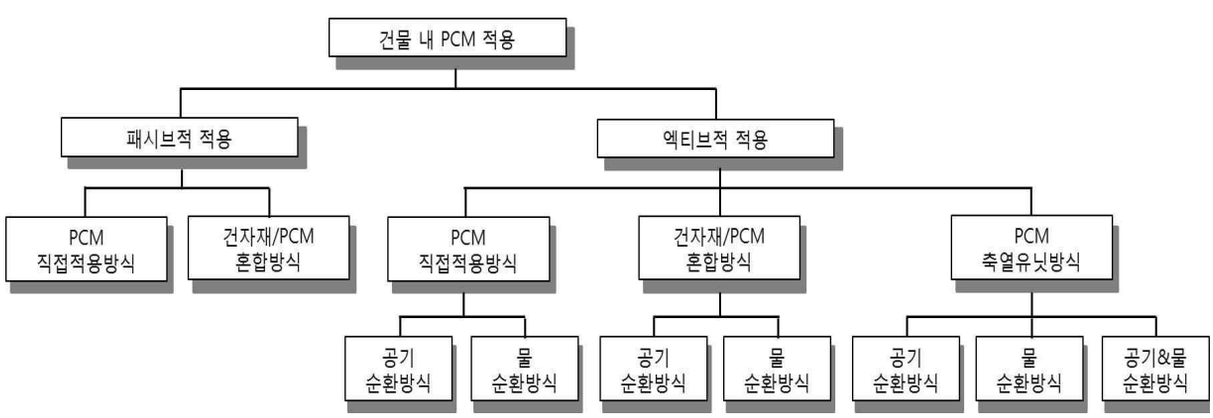
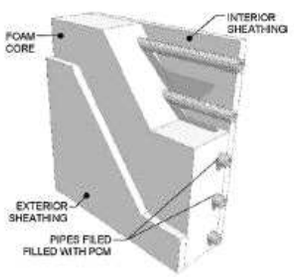
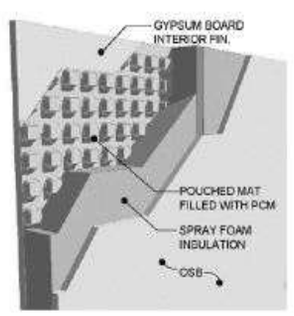
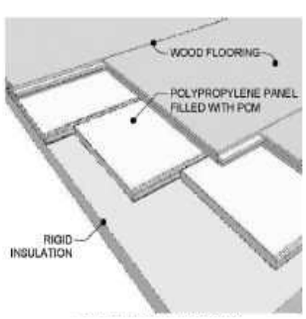
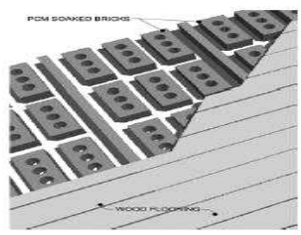
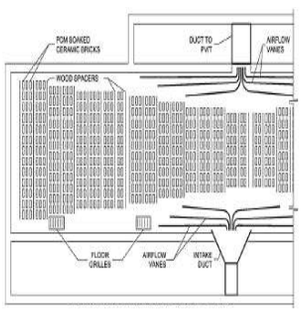
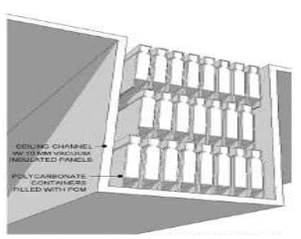
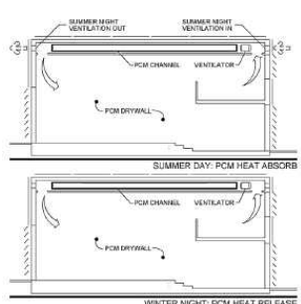
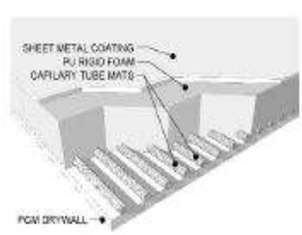
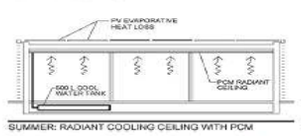
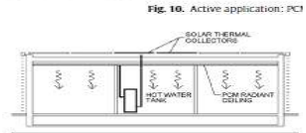


그림 1.3.16 건물 내 PCM 적용 방안

	건물정보	적용방법	열적성능
	· Canada · House · 2009	· 패시브적 적용 – PCM 직접적용방식 · 슬래브 · 폴리플로필렌 패널에 PCM 삽입	· 성능범위: 22~24℃ · 축열성능: 62.6kWh · 에너지 절감 성능: 2800kWh/yr → 2000kWh/yr
 b. KANSAS (SD2007)	· USA · House · 2007	· 패시브적 적용 – PCM 직접적용방식 · 벽체 & 천정 단열재 속에 매립 · 금속 파이프 속에 PCM 삽입	· 성능범위: 21~24℃ · 에너지 절감 성능: 하절기 실내피크온도 23~37% 감축
	· USA · House · 2009	· 패시브적 적용 – PCM 직접적용방식 · 벽체 내부 · 폴리에틸렌 캡슐에 PCM 삽입	· 성능범위: 24~28℃ · 축열성능: 118.5kWh · 에너지 절감 성능: 에너지감축량 – 하절기: 25.9% – 간절기: 12.1%
	· Spain · House · 2009	· 패시브적 적용 – 건자재/PCM 혼합방식 · 벽체 내부 · 혼합물: 폴리에틸렌 (40%) & PCM(60%) · 알루미늄보호패널	· 성능범위: 20~23℃ · 에너지 절감 성능: 하절기 실내피크온도 4.7℃ 감소 (36.6℃→32.8℃)

	건물정보	적용방법	열적성능
 	· Canada · House · 2005	· 액티브적 적용 – 건자재/PCM 혼합방식 – 공기순환방식 · 슬래브 · 혼합물: 공융PCM & 일반벽돌 함침 (7cm)	· 성능범위: 24~28℃ · 축열성능: 118.5kWh · 에너지 절감 성능: 건축물 실내 축열성능 약 30% 향상
 	· Germany · House · 2009	· 액티브적 적용 – PCM 직접적용방식 – 공기순환방식 · 천정 · 혼합물: 폴리카보네이트 패널에 PCM 삽입	· 성능범위: 25~27℃ · 축열성능: · 에너지 절감 성능: 연간 실내 오버히팅(28℃ 이상) 횟수 감소 (38% → 11%)
  Fig. 10. Active application: PCI  CM system as component with water thermal exchange: Dar	· Germany · House · 2007	· 액티브적 적용 – PCM 직접적용방식 – 물순환방식 · 슬래브 · 혼합물: 파이프 속 PCM 삽입	· 성능범위: 16~20℃ · 축열성능: · 에너지 절감 성능: 냉·난방 에너지 18~34% 감소

해외의 경우, 구체축열 복사냉난방시스템은 유럽을 중심으로 친환경 설비시스템으로서 인식되어 보급이 늘어가고 있다. 이는 건물 구조체의 축열기능을 활용함으로써 신재생에너지의 보급에 있어서 건물에너지 효율을 향상시킬 수 있기 때문이다. 해외에서는 친환경 건물에서 건물과 일체화된 구체축열 공조시스템의 설계 및 시공 기술에 대한 기술 개발이 다각도로 진행됨으로써, 건축 설비, 건축 구조 기술자들이 설계단계에서부터 운전 및 유지관리에 이르기까지 체계적인 엔지니어링 서비스가 제공되고 있다. 최근에는 구조체의 축열 성능을 향상시키기 위해 구체축열 공조시스템에 PCM 재료를 활용하여 축열 성능을 향상시기 위한 연구가 수행되고 있다.(그림 10 참고) PCM재료가 콘크리트 데크 플레이트에 적용됨으로써 열용량을 증대시켜 축열성능을 향상시키고 있으며, 이를 건축 설비적으로 효과적으로 활용하기 위한 연구가 수행되었다. PCM을 활용하여 단순히 축열성능을 향상시키는 것만이 아닌, 실내 환경 개선 및 건축설비의 설계 및 운영방식과 연계되어 연구개발이 수행되고 있다. 국내에서도 이와 같이 건축설비시스템의 일환으로서 건축 구조체의 일부를 활용하고 축열재료로서 PCM을 활용한 구체축열 공조시스템을 건물에 적용함으로써 건물에서 에너지 효율화와 냉난방 전력 수요의 효과적인 분산이 가능할 것이라 판단된다. 본 연구에서 활용하고자 하는 PCM 재료 기술 및 PC 슬래브 기술에 대해 해외의 연구동향을 살펴보면 다음과 같다.

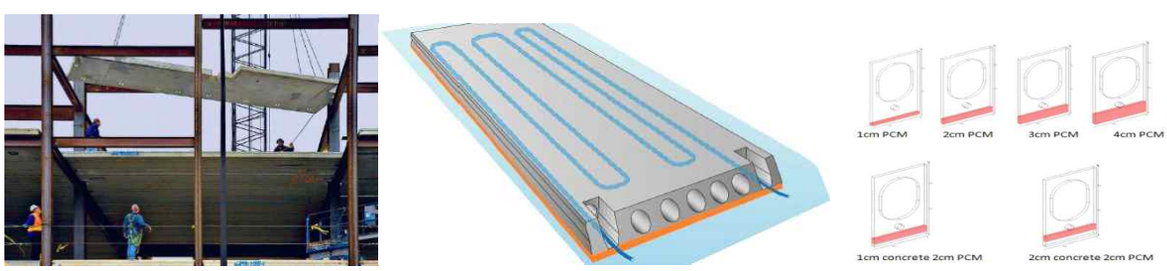


그림 1.3.17 PCM을 이용한 구체축열 공조시스템의 해외 기술 사례

3. 중공 슬래브 구조 기술 개발 현황

공장에서 제작되는 PC(Precast concrete) 구조부재는 기둥과 보가 다수를 차지하며 일반적인 슬래브를 PC로 제작하는 경우는 흔치 않았다. PC 슬래브를 제작하는 경우는 교량과 같이 모듈화가 용이하고 경량화가 요구되는 경우로써 프리스트레스 플랫 플레이트 슬래브가 대부분을 차지하고 있어왔다. 그러나 최근 자중 및 물량의 감소, 층간 소음 제어, 단열성능 개선 등의 효과가 있는 PC중공슬래브를 도입하고자 하는 기술이 개발되고 있다. 기존에 개발된 중공슬래브는 길이 방향의 원형관을 중공체로 하는 1방향 슬래브가 대다수를 차지하고 있다. 그러나 1방향 슬래브는 교량판 등에 사용하기에는 적합하나 일반적인 건축물에 사용되기에는 제약이 많기 때문에 국내에서도 2방향 슬래브에 적용하기 위한 중공슬래브 구조체 개발 연구가 진행되고 있다. 2방향 중공슬래브로는 국내의 S건설에서 개발 중인 I-슬래브, S엔지니어링의 SLAF를 비롯하여 유럽이나 일본과 미국 등지에서 활발하게 연구 개발되고 있다. 일반적으로 중공슬래브의 개발연구에서 고려되는 것은 중공체의 크기와 형태에 따른 중공률과 시공성을 비롯하여 전단 성능 및 균열 양상이다. 지금까지 개발되어 상용되고 있는 중공체의 형태는 직육면체, 정육면체, (타)원형으로 다양하며, 직육면체나 정육면체는 중공률이 높은 반면 모서리에서 응력집중 현상이 발생하고, 지름이 일정한 원형 보다는 타원형이 중공률 및 시공성을 높이기 좋은 것으로 알려져 있다. 중공체의 형태는 전단내력에도 영향을 미치게 되는데, 이는 전단내력이 중공면적과 밀접한 관련이 있기 때문이다. 특히 2방향 중공슬래브는 1방향 중공슬래브에 비해 중공률이 높아 전단내력이 많이 감소할 것으로 예상되며 이에 대한 설계기준식은 계속 연구되고 있는 실정이다.



그림 1.3.18 일반적인 1방향 중공슬래브



그림 1.3.19. S건설의 I-슬래브

중공 PC 슬래브가 물량감소, 단열 성능 개선, 소음차단 등에 효과가 있음에도 불구하고, 국내에서 아직까지 건축물에서 주차장을 제외하고 PC슬래브를 사용하는 경우는 드물다. 따라서 슬래브 전체를 PC로 제작하지 않고 강선이나 중공파이프가 삽입되어 있는 슬래브의 하단부를 PC로 제작하고 상부는 현장에서 타설하여 다른 구조체와의 일체화를 높이는 Half PC 슬래브 및 시공기법이 연구, 개발되고 있다.

중공슬래브의 개발단계는 국내의 경우 시장개척단계, 해외의 경우는 실용화 단계라고 할 수 있다. 현재 국내 시장에서 PC슬래브가 도입된 사례가 많지 않은 것은 PC슬래브가 가진 친환경적 이점에 비해 경제적, 시공성 면에서 효율이 떨어지기 때문이었던 것으로 판단된다. 또한

국내 PC 관련 전문기술인력의 부족과 건설 기술의 선진화 부족으로 현재 국내의 PC부재 생산 회사는 PC협의회 산하 10개사 정도로 알려져 있다. 그러나 친환경성에 대한 중요성이 날로 증가하고 있는 지금의 시점에서 PC슬래브가 가진 에너지 절감효과가 점차 부각될 예정이며, 또한 PC 슬래브와 그 시공기법의 개발로 공사기일의 단축, 생산성의 향상, 공장관리에 의한 품질의 향상 및 현장작업의 감소로 노동력 절감 등 경제적인 효율을 증대시키게 되어 그 수요는 더욱 증가할 수 있다. 뿐만 아니라, 현재 벽식 구조 시스템을 사용하고 있는 공동주택에서 거주민들의 요구에 맞는 주택형태를 제공하기 위하여 가변형 평면이 가능한 보-기둥 구조시스템 도입이 날로 확대되고 있기 때문에 PC 슬래브의 도입 가능성을 점차 확대될 것이라고 예측된다.

따라서 국내에서도 PC 슬래브 개발과 관련하여 활발한 연구가 진행되고 있다. 지금까지 PC 슬래브 구조체는 중량과다로 인하여 운반과 양중 상의 문제가 많아 국내 건설현장에 도입되기 어려운 점이 있었으나, 중공체의 도입으로 중량문제를 해결하고 중공체 형태의 개발을 통해 슬래브 두께를 최소화하기 위한 연구를 활발히 수행하고 있다. 국내에서 연구개발되어 건설현장에 적용된 대표적인 중공슬래브는 S건설에서 개발 중인 I-슬래브, S엔지니어링의 SLAF 등이 있다. I-슬래브의 경우 공장에서 경량체의 일부와 부분 프리캐스트 콘크리트 슬래브를 일체화하여 현장에 반입하는 Half PC slab의 형태를 띄고 있으나 현장적용에 있어 제한사항이 많고, 적용 건물의 형상에 따른 제품의 모듈화가 어려운 단점을 가지고 있다. SLAF의 경우는 이방향 중공슬래브의 소음 차단 성능에 집중하여 개발된 바, 기존 슬래브의 구조적인 성능을 만족하기에는 부족한 면이 있다. 최근 T사에서는 2방향 중공슬래브에 도입되는 타원형, 땅콩형태의 중공체와 이를 이용한 중공 슬래브의 시공방법에 대한 개발을 활발히 하고 있으며, 기존 공사에 비하여 현장 시공이 용이하고 공기를 단축할 수 있다는 장점을 내세우고 있다. 국내에서 관련 연구를 활발히 하고 있는 곳은 S공사로써 최근 T사와 함께 중공체를 개발하고, L건설, P건설사와 함께 저탄소 중공슬래브 구조시스템 개발 연구를 통하여 국내 건설현장에 맞는 슬래브 시스템 도입하고자 하고 있다.

국내 건설시장에서 PCM 소재와 중공 슬래브 구조 부재는 현재 건축재료 및 건축구조분야에서 기술 개발이 다각도로 수행되고 있는 분야로서, 건물에서 구체축열 복사냉난방시스템을 계획함에 있어서 구조체의 축열성능을 향상시키고, 구조부재의 재활용 및 공업화 시공이 가능한 친환경 설계 대안이 될 수 있을 것이다.

중공슬래브의 개발 및 적용이 활발한 곳은 친환경 건축물의 개발 및 도입이 빠른 유럽 국가이다. 2방향 중공슬래브의 경우, 대표적으로 덴마크 Bubble Deck사의 BubbleDeck와 스위스 Hanson사의 Cobiax Deck, 이탈리아 Daliform사의 U-boot 등이 주로 적용되고 있으며 아시아에서는 일본의 Daisun사의 Dausun Cubic과 momvoid사의 momslab, KAISER사의 KASIER Void Slab System 등이 가장 발달되어 있는 사례라 할 수 있다. PC부재 생산으로 보면, 북유럽의 핀란드의 Consolis사가 PC 부재 생산뿐 아니라, 제작 설비, 관리까지 총괄하는 초대형 기업으로 잘 알려져 있으며 이 밖에도 영국의 Bison, 독일의 DW systembau, Weiler등이 있다. 특히 일본에서는 국토기술연구소 주관으로 중공슬래브를 이용한 구체축열 공조시스템을 개발하여 사무소, 학교, 점포 등에 도입하고자 하는 연구가 활성화 되고 있다. 북유럽 국가들에서는 인력난을 겪으면서 PC에 대한 요구가 급증하였으며 그 중 중공슬래브 부재가 많이 개발되어

그 시장규모도 매우 크게 형성되어 있다. 미국은 유럽에 비해 PC공법의 사용이 늦게 시작되었으나 PCI(Precast/prestressed Concrete Institute)를 중심으로 연구활동이 활발하게 이루어져 대공간 구조물에 많이 도입되고 있다. 특히, 미국의 The Lloyd D. George United Sated Court House, Paramount Building과 같은 건축물은 100% PC 구조부재로 이루어져 있으면서 시공이 용이한 보-기둥 접합부 기술을 도입하여, 넓은 공간 사용이 가능하게 하면서도 경제적이고 안전한 PC 부재 설계의 결과물로 잘 알려져 있다.

해외 건설 수주 비율이 빠르게 증가하고 있는 실정에서 PC부재에 대한 기술력 부족은 건설기술의 진출에 있어서 제약적인 조건이 될 수 있는 바, 우리나라 건설환경에 적합하면서도 설비기술과 잘 융합된 중공 슬래브 부재 개발은 국제 건설기술에서의 경쟁력 제고를 위해서도 필요한 부분이라 할 수 있다. 나아가 친환경 건축물에서 건물의 에너지 절약을 고려한 친환경 설비 통합시스템으로의 개발이 바람직할 것이다.

02

연구개발 수행 내용 및 결과

제1절 축열성능이 향상된 SSPCM 콘크리트 재료개발
제2절 축열성능이 향상된 슬래브의 구조성능평가
제3절 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템 설계 및 운영기술
제4절 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템 현장적용



최 종 보 고 서

02 연구개발 수행 내용 및 결과

1절 축열성능이 향상된 SSPCM 콘크리트 재료 개발

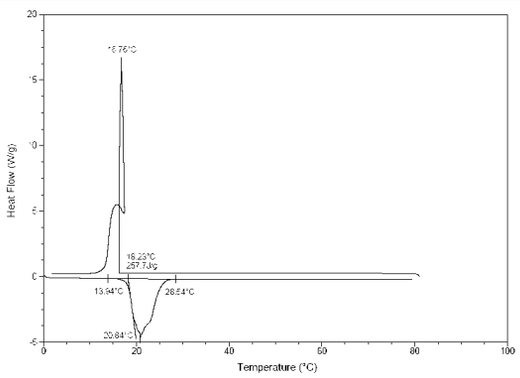
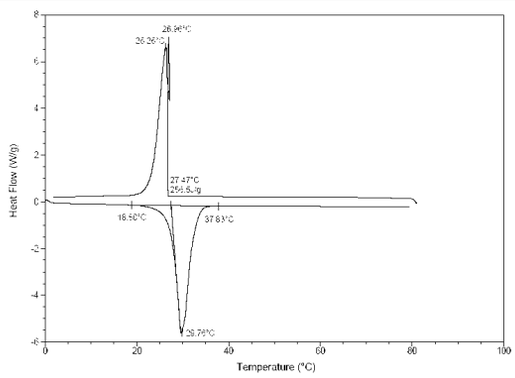
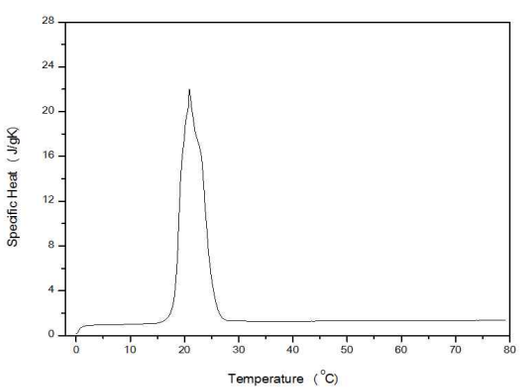
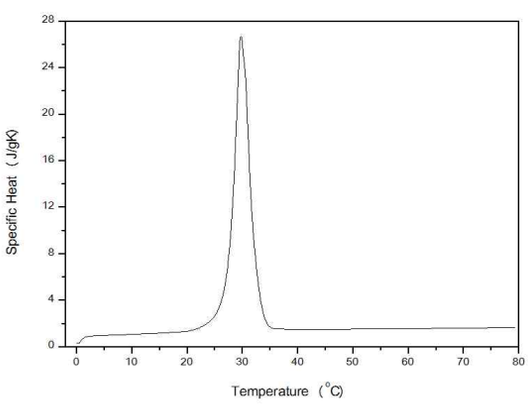
1. 축열성능이 향상된 슬래브의 열적거동에 따른 적용 PCM 선정

가. 적용 가능 PCM의 열적 특성 분석

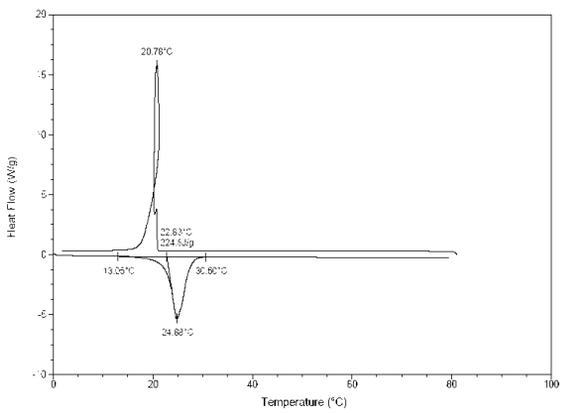
본 연구에서는 PCM이 가지고 있는 기본적인 물성에 대한 이해와 적용 대상과의 호환성을 염두하여 최적의 PCM을 산정하고자 하였다. 이를 위해 구체축열 복사냉난방시스템에 적용 가능한 최적의 상변화 온도 및 축열량을 가지고 있는 PCM을 선정하고자 하고자 하였다. 이를 위해 기존 국내외 문헌조사를 통하여 현재까지 연구되고 있는 PCM의 기본적인 물성에 대한 고찰과 더불어 DSC (축열량 분석장비) 및 TCi (열전도율 분석장비)를 이용하여 적용 가능한 PCM의 열적 특성분석을 실시하였다. TCi를 통한 열전도율 분석은 최소 직경 2cm에 높이 5mm의 시편에서 열을 보내고 되돌아오는 시간을 계산하여 열전도율값으로 환산하였다. 그리고 DSC 분석은 승온 속도 5℃/min로 0℃에서 80℃사이의 온도범위에서 승온 및 냉각시켜 발생하는 축열 커브를 적분하여 잠열량을 산정하고 피크가 발생하는 시점에서 상변화 온도를 도출하였다. PCM은 온도의 변화에 따라 상이 변하는 물질로써 상이 변할 때 열을 잠열의 형태로 열에너지를 축적하거나 방출시키다. PCM은 물질마다 혹은 같은 물질이라도 온도범위에 따라 종류가 다양하다. 일반적으로 PCM을 적용함에 있어서 건물 내 쾌적 온도 범위대의 PCM을 선정한다면, 온도가 상승하는 주간에는 열을 흡수한 후 온도가 하강하는 야간에는 열을 재방출하여 안정적으로 실내의 온도를 유지시켜 줄 수 있다. 본 연구의 구체축열 복사냉난방시스템에 적용하기 위하여 문헌 및 실험을 통해 연구된 PCM의 상변화온도 범위는 18 ~ 28℃로 선정하였다. 이 온도범위에서 상변화하는 PCM으로는 Hexadecane, Octadecane, Heptadecane, Dodecanol 이상 4종류에 대하여 1차적으로 열적 물성을 측정 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다. 본 연구에서는 최적의 상변화 온도를 가지는 파라핀계 상변화 물질 2가지를 1차적으로 선정하였으며(n-hexadecane, n-octadecane), 구체축열 복사냉난방시스템 적용을 위한 상안정성 및 낮은 열전도율 개선의 필요성을 확인하였다.

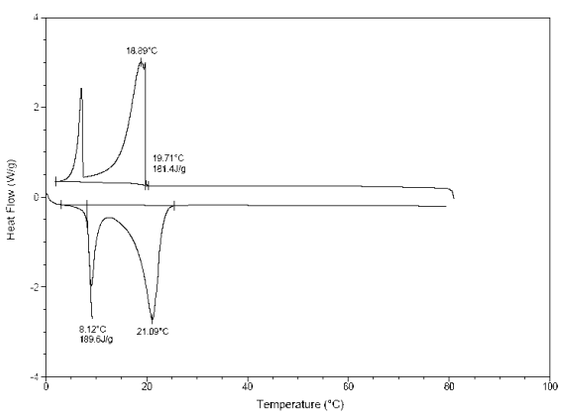
- Hexadecane: M.P= 19℃, k=0.39W/m • K, HC=257.7J/g
- Octadecane: M.P= 28℃, k=0.26W/m • K, HC=256.5J/g
- Dodecanol: M.P= 24℃, k=0.28W/m • K, HC=224.8J/g
- Heptadecnae: M.P= 21℃, k=0.33W/m • K, HC=189.6/g

M.P(melting point), k(thermal conductivity), HC(heat capacity)

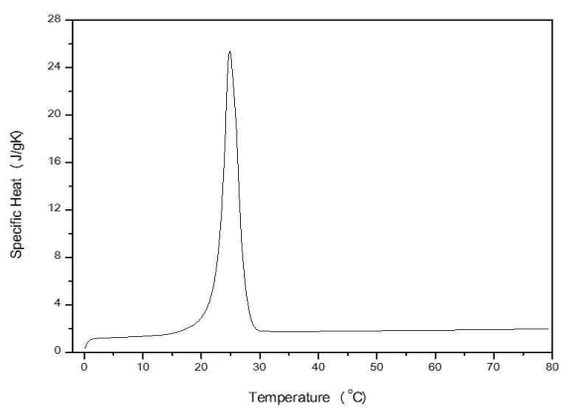
Hexadecane		Octadecane	
상변화온도 (℃)	19.0	상변화온도 (℃)	28.0
열전도율 (W/m·K)	0.39	열전도율 (W/m·K)	0.26
밀도 (kg/m^3)	777.0	밀도 (kg/m^3)	777.0
잠열량 (J/g)	257.7	잠열량 (J/g)	256.5
			
비열 (J/g·K)	Min=0.2 (at 0℃) Max=22.0 (at 20.9℃)	비열 (J/g·K)	Min = 0.3 (at 0℃) Max = 26.6 (at 29.8℃)
			

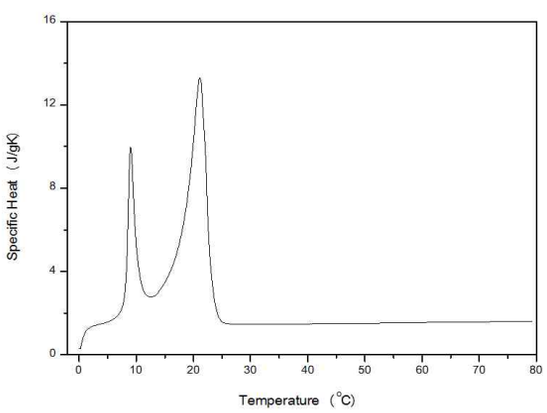
Dodecanol		Heptadecane	
상변화온도 (℃)	24.0	상변화온도 (℃)	21.0
열전도율 (W/m·K)	0.28	열전도율 (W/m·K)	0.33
밀도 (kg/m^3)	853.0	밀도 (kg/m^3)	773.0
잠열량 (J/g)	224.8	잠열량 (J/g)	189.6

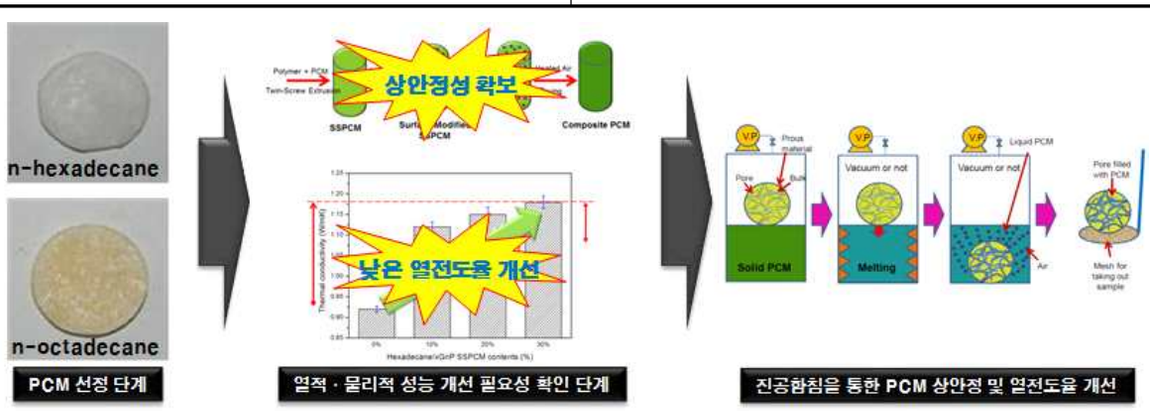




비열 (J/g·K)	Min = 0.3 (at 0℃) Max = 25.3 (at 25.4℃)	비열 (J/g·K)	Min=0.4 (at 0℃) Max=13.3 (at 21.1℃)







나. PCM 함침을 통한 축열 콘크리트 제조용 SSPCM 개발

(1) Exfoliated Graphite (xGnP)

우수한 기계적, 전기적, 열전도성을 가진 xGnP는 여러 겹의 층과 나노클레이가 혼합된 물질로서, 가격이 저렴하며 다른 물질에 적용되어 화학적 또는 물리적으로 물성 개선효과를 개선시킬 수 있는 다공성의 탄소 나노튜브의 소재이다.



그림 2.1.1 xGnP

비표면적 (m^2/g)	20.4
밀도 (g/cm^3)	2.4
공극부피 (cm^3/g)	0.081
열전도율 (W/m·K)	2-300
비열 (J/kg·K)	710

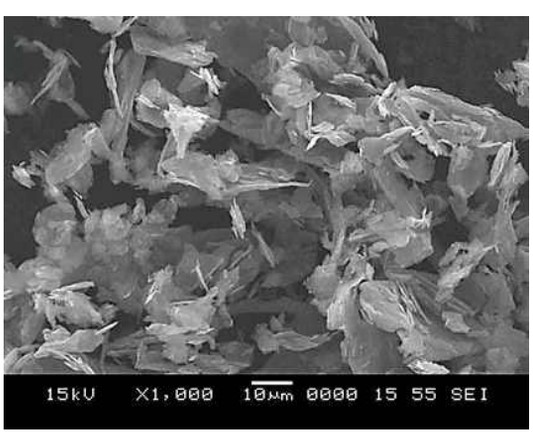


그림 2.1.2 xGnP의 SEM 이미지

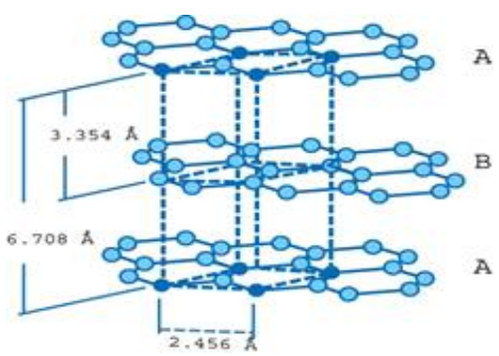


그림 2.1.3 xGnP의 분자구조

(2) Zeolite

높은 비표면적과 균일한 기공크기를 이용한 우수한 분자체 기능을 가진 분리 및 흡착을 위한 다공성 결정성 알루미노실리케이트로 이루어진 재료로서 다양한 산업분야에 첨가제로서 이용되며 첨가 계 내에서 우수한 분산 특성과 아울러 부반응이 없어 물리화학적으로 안정하다.

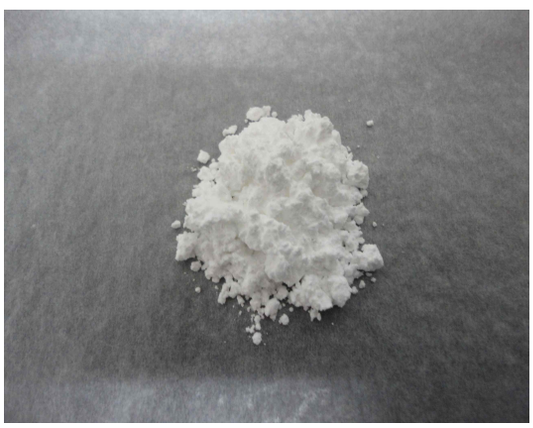


그림 2.1.4. Zeolite

비표면적 (m^2/g)	778
밀도 (g/cm^3)	1.95
공극부피 (cm^3/g)	0.35
열전도율 (W/m·K)	0.3-3.2
비열 (J/kg·K)	870

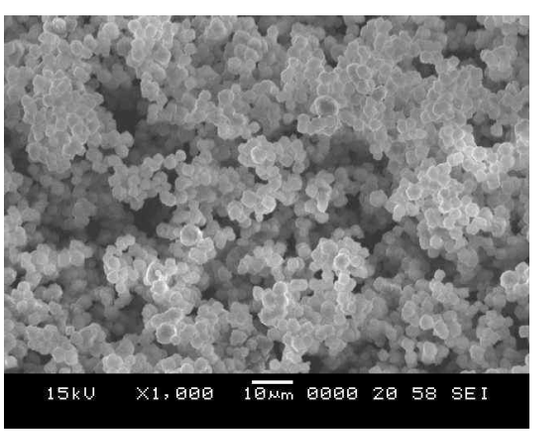


그림 2.1.5 Zeolite의 SEM 이미지

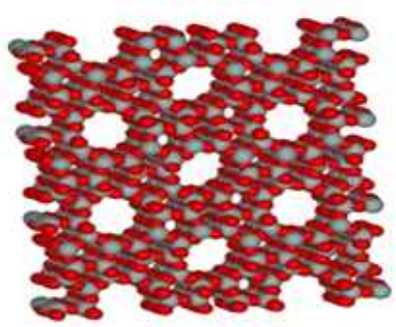


그림 2.1.6 Zeolite의 분자구조

(3) SSPCM 제조를 위한 진공함침법

건축물에 PCM을 단순히 적용할 경우, 상변화 온도 이상에서 고체상태의 PCM이 액체상태로 상변화를 하게 되면, 누출이 되어 건물에 손상을 가하게 된다. 따라서 액체상태의 PCM을 안정화시키기 위한 방안으로 다공성물질에 PCM을 함침 시키는 기술을 활용한 Shape-stabilized PCM (SSPCM)을 제조 및 연구를 진행하였다. SSPCM은 제조 과정 중에 화학적 변형 없이 다공성의 물질과 PCM 사이의 표면장력과 모세관력이 액상의 PCM이 중력 상쇄시켜 제조된 물질이다.

다공성의 물질을 플라스크 속에 삽입
↓
진공장치를 가동하여 플라스크 안을 진공화
↓
90분 동안 다공성물질의 기공 속 공기 제거
↓
액상의 PCM을 플라스크 속에 삽입
↓
PCM을 모두 삽입 후 마개를 막음
↓
진공상태에서 30분 동안 함침
↓
제조된 SSPCM을 80℃에서 24시간 동안 진공 건조

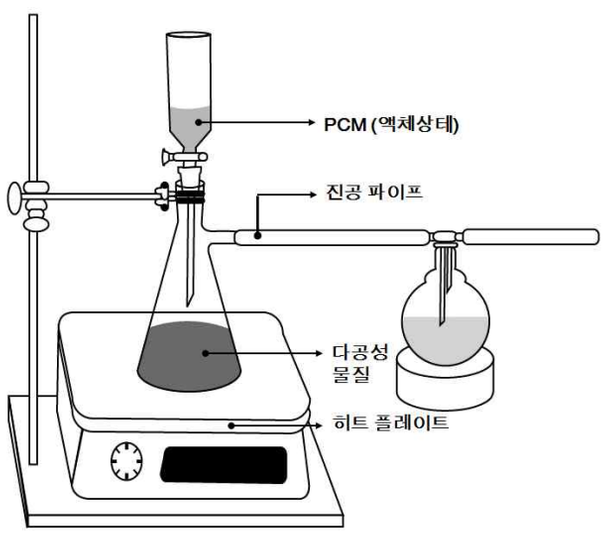


그림 2.1.7 SSPCM 제조를 위한 진공함침장치

(4) SSPCM 열적, 물리적 특성 분석

(가) SSPCM 열적·물리적 특성 분석 방법

· SSPCM의 상안정성 : 화학적 결합, 표면 분석

- Fourier transformation infrared spectrophotometer (FT-IR)
- Scanning electron microscope (SEM)

· SSPCM의 열적성능 : 상변화온도, 잠열량, 비열

- Deferential scanning calorimeter (DSC) : 0-80℃, 승온속도 5℃/min 분석

· SSPCM의 함침량 : 상온 20℃ ~ 600℃ 분석
- Thermogravimetric analysis (TGA)

(나) Hexadecane/xGnP SSPCM

그림 2.1.9는 xGnP와 Hexadecane이 xGnP에 함침된 Hexadecane/xGnP SSPCM의 실물이다. Hexadecane/xGnP SSPCM을 보면 에멀전 상태이다. 그러한 이유는 실험실 온도 20℃이고, 이 때 xGnP 기공 속에 존재하는 Hexadecane의 녹는점이 18℃이기 때문에 이 PCM은 액상으로 존재하기 때문이다.



그림 2.1.8 xGnP



그림 2.1.9 Hexadecane/xGnP SSPCM

① 화학적 결합

xGnP, Hexadecane, Hexadecane/xGnP SSPCM의 FT-IR 스펙트럼이 확인되었다. xGnP의 2350cm^{-1}(O=C=O)의 피크가 확인되었고, Hexadecane는 탄화수소계열의 상변화물질로, 717cm^{-1}(C=O), 1470cm^{-1}(C-H Bending), 2910cm^{-1}(C-H Stretch)가 확인되었다. 아래의 스펙트럼과 같이 Hexadecane/xGnP SSPCM에서 xGnP와 Hexadecane에서 확인된 피크값과 동일한 것으로 보아, 제조된 Hexadecane/xGnP SSPCM은 진공함침 중에 화학적 변형 또는 반응이 없이 물리적 결합임을 확인할 수 있었다.

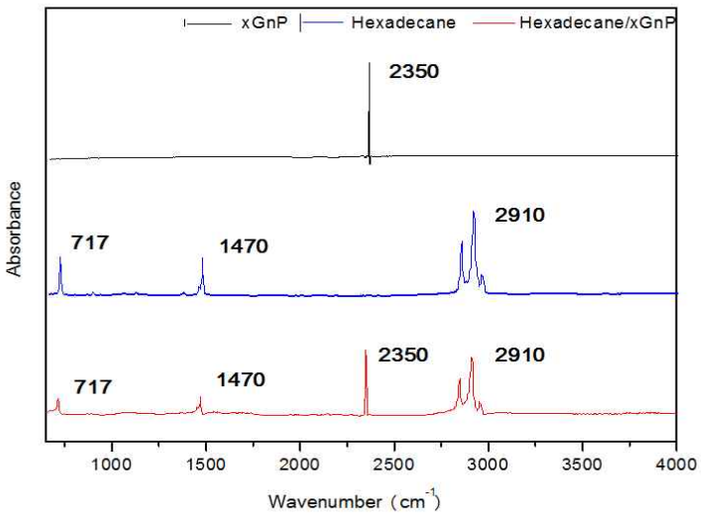


그림 2.1.10 Hexadecane/xGnP SSPCM의 FT-IR 스펙트럼

② 표면 분석

Hexadecane이 xGnP에 함침되기 전과 후의 SEM의 겉보기 사진 결과, 제조된 Hexadecane/xGnP SSPCM의 Hexadecane이 xGnP 입자들 사이에 고르게 분산되어 있이 확인되었고, Hexadecane/xGnP SSPCM에 함침 된 Hexadecane이 액상의 상유출 없이 안정된 상태로 유지되었다.

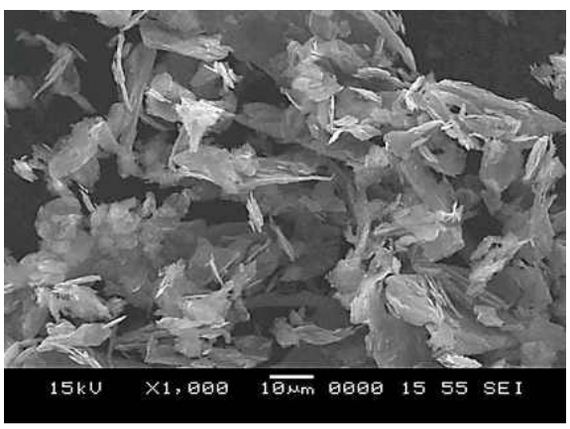


그림 2.1.11 xGnP의 SEM

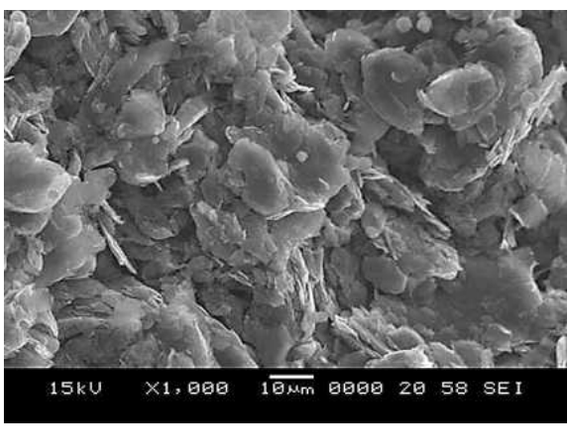


그림 2.1.12 Hexadecane/xGnP SSPCM의 SEM

③ 상변화온도 및 잠열량

온도가 상승함에 따라 제조된 SSPCM의 녹는점은 Hexadecane의 녹는점과 유사하게 16-25℃의 범위에서 일어나고 있으며, 21.8℃에서 축열성능이 최대값을 보였고, 이 온도범위에서의 온도 상승 시 축열량은 96.4J/g이었다. 어는점의 경우 17-12℃의 범위에서 일어났으며, 14.6℃에서 열방출성능의 최대값을 보여주었으며, 온도 하강 시 열방출량은 94.8J/g이었다. 이 때, 온도상승 시의 축열량과 온도 하강 시 열방출량의 차이가 1.6J/g으로 SSPCM의 축열과 열방출 성능이 안정적으로 나타났다.

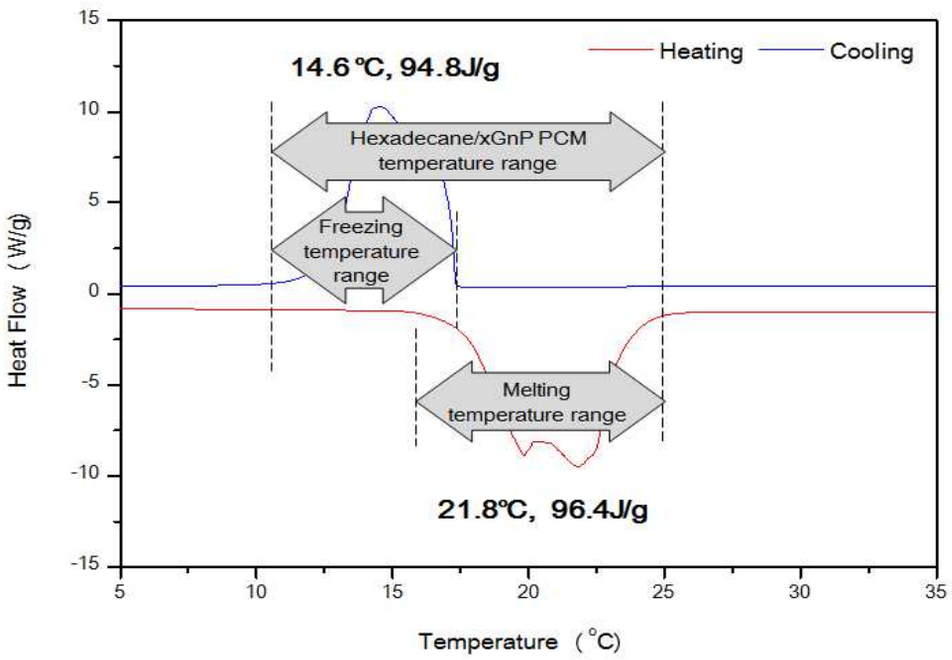


그림 2.1.13 Hexadecane/xGnP SSPCM의 DSC 그래프

④ 비열

Hexadecane/xGnP SSPCM의 비열은 Hexadecane이 고체에서 액체로 상변화 과정에서는 비열이 상승하게 되고, 21.8℃에서 비열은 10.0J/g·K이다. 그 후 PCM이 액체상태가 되면 비열은 급속이 감소하였다.

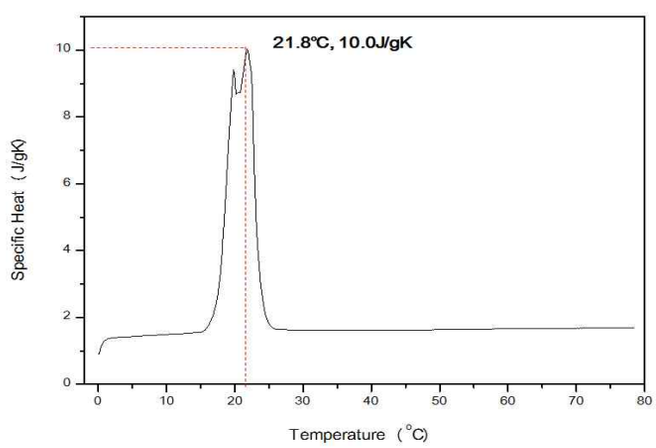


그림 2.1.14 Hexadecane/xGnP SSPCM의 비열

⑤ Hexadecane/xGnP SSPCM의 함침량

Hexadecane이 xGnP에 함침 된 양을 확인하기 위하여 TGA 분석을 실시하였다. 온도가 상승하고 100℃에서 Hexadecane이 급격하게 열분해 되기 시작하여 205℃에서 열분해가 종료되

었다. xGnP는 탄소나노소재이기 때문에 TGA 분석의 온도범위에서는 열분해가 되지 않는다. 그러므로 열분해 된 물질은 Hexadecane이라고 판단되며, 약 48.8%가 함침 되었다.

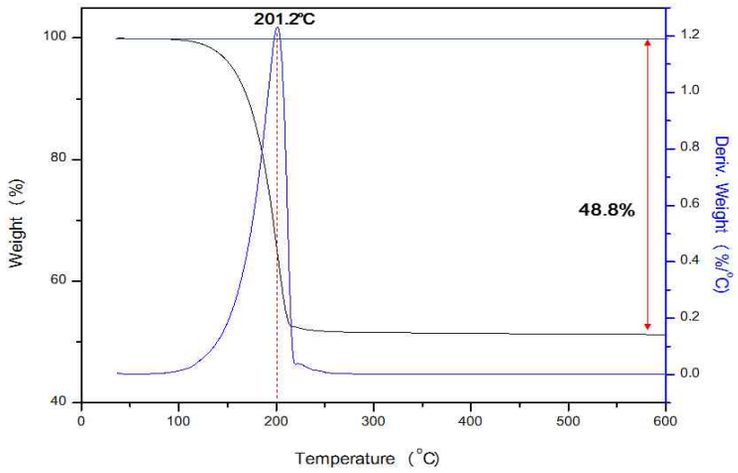


그림 2.1.15 Hexadecane/xGnP SSPCM의 함침량

(다) Octadecane/xGnP SSPCM

xGnP와 Octadecane이 xGnP에 함침된 Octadecane/xGnP SSPCM의 모습으로 실험실 온도 20℃가 Octadecane의 녹는점 28℃보다 낮기 때문에 그림 2.1.17과 같이 고체 상태로 존재한다.



그림 2.1.16 xGnP



그림 2.1.17. Octadecane/xGnP SSPCM

① 화학적 결합

xGnP, Octadecane, Octadecane/xGnP SSPCM의 FT-IR 스펙트럼이 확인되었다. xGnP에서는 2350cm^{-1}(O=C=O)의 피크가 확인되었고, Octadecane은 탄화수소계열의 상변화물질로, 717cm^{-1}(C=O), 1470cm^{-1}(C-H Bending), 2910cm^{-1}(C-H Stretch)가 확인되었다. 아래의 스펙트럼과 같이 Octadecane/xGnP SSPCM에서 xGnP와 Octadecane에서 확인된 피크값과 동일한 것으로 보아, 제조된 Octadecane/xGnP SSPCM은 진공함침 중에 화학적 변형 또는 반응이 없이 물리적 결합임을 확인 할 수 있었다.

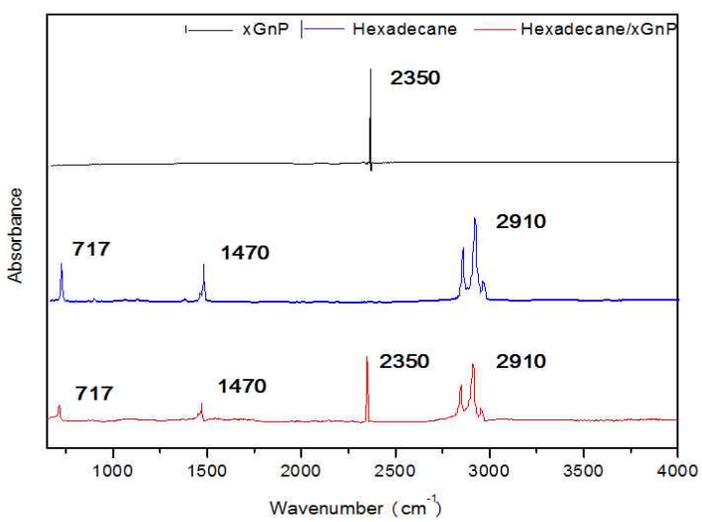


그림 2.1.18 Octadecane/xGnP SSPCM의 FT-IR 스펙트럼

② 표면 분석

Octadecane이 xGnP에 함침되기 전과 후의 SEM의 겉보기 사진 결과, 제조된 Octadecane/xGnP SSPCM의 Octadecane이 xGnP 입자들 사이에 고르게 분산되어 있이 확인되었고, Octadecane,/xGnP SSPCM에 함침된 Octadecane,이 액상의 상유출 없이 안정된 상태로 유지되었다.

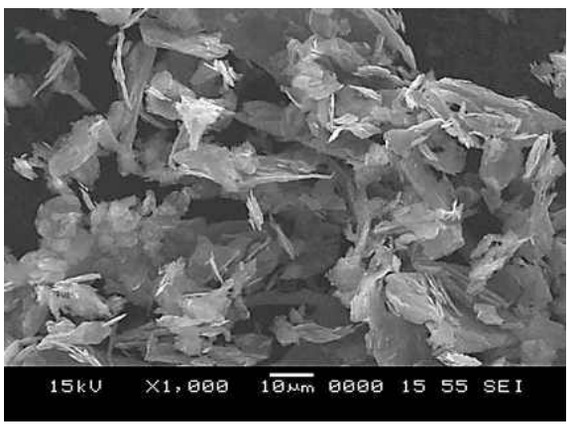


그림 2.1.19 xGnP의 SEM

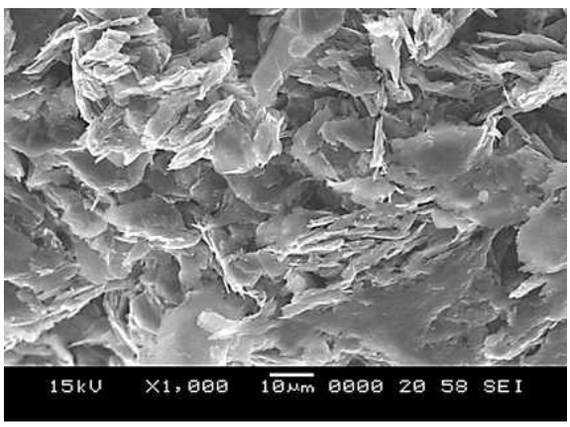


그림 2.1.20 Octadecane/xGnP SSPCM의 SEM

③ 상변화온도 및 잠열량

DSC 곡선에 보이는 것과 같이 온도가 상승함에 따라 제조된 SSPCM의 녹는점은 Octadecane의 녹는점과 유사하게 26-35℃의 범위에서 일어났으며, 31.3℃에서 축열성능이 최대값을 보여주었고 이 온도범위에서의 축열양은 110.9J/g이었다. 어는점의 경우 26-19℃의 범위에서 일어났으며, 24℃에서 열방출성능의 최대값을 보여주었으며, 열방출량은 104.5J/g이었다. 이 때, 온도상승 시의 축열량과 온도 하강 시 열방출량의 차이가 6.4J/g로 반복된 온도변화에도 SSPCM이 안정된 상태로 우수한 열적성능을 보여주었다. 본 실험에서 제조된 Octadecane/xGnP SSPCM의 상변화 온도가 26℃에서 시작되기 때문에 건축물에 적용하기 위한 골재를 유지하기 위해서는 상변화 온도 이하에서 보관되어야 한다.

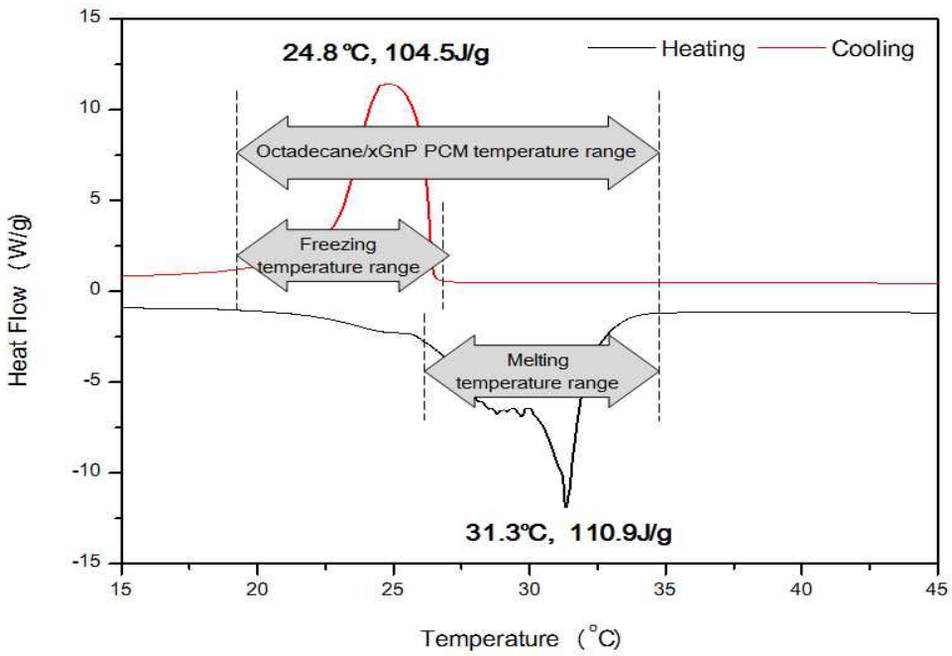


그림 2.1.21 Octadecane/xGnP SSPCM의 DSC 그래프

④ 비열

Octadecane/xGnP SSPCM의 비열 곡선을 나타내었다. Octadecane/xGnP SSPCM의 비열은 Octadecane이 고체에서 액체로 상변화를 하는 과정에서 비열이 상승하게 되고, 완전히 액체상태가 되면 다시 비열은 감소한다. DSC 분석을 통한 Octadecane/xGnP SSPCM의 비열은 31.3℃에서 14.1 J/g·K이었다.

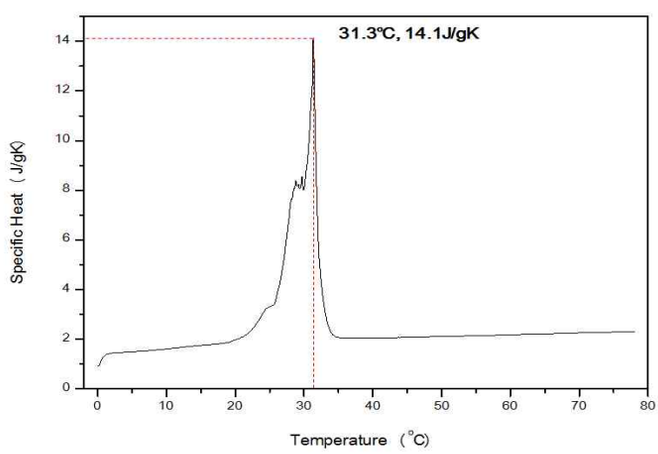


그림 2.1.22 Octadecane/xGnP SSPCM의 비열

⑤ Octadecane/xGnP Hexadecane/xGnP SSPCM의 함침량

Octadecane/xGnP SSPCM을 상온 20℃에서 온도를 600℃까지 상승시킴에 따라 열분해 된 정도를 분석되었다. 온도가 일정하게 상승하고 약 145℃에서 Octadecane이 급격이 열분해 되

기 시작하여 207.7℃에서 최대값을 보이게 되며, 270℃에서 어떠한 물질도 열분해 되지 않았다. xGnP는 거의 순수한 탄소나노 소재로 본 연구에서 진행한 TGA 온도 범위 대에서는 열분해 되지 않기 때문에, 열분해된 물질은 Octadecane이다. TGA 분석결과 Octadecane은 Octadecane/xGnP SSPCM의 질량대비 약 56.0%가 함침되었다.

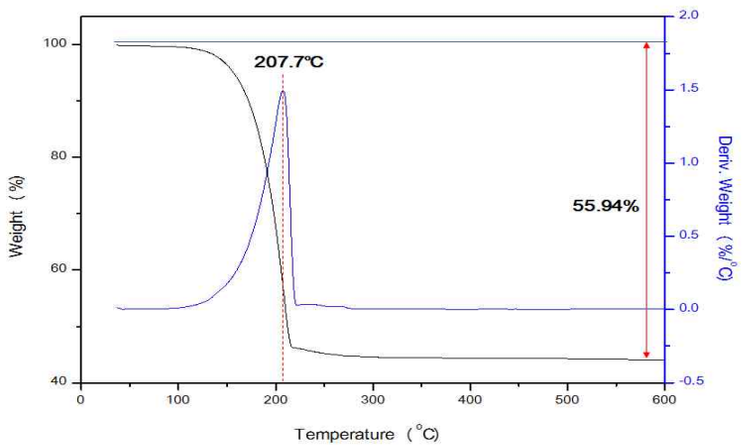


그림 2.1.23. Octadecane/xGnP SSPCM의 함침량

나. 축열성능이 향상된 SSPCM 콘크리트 개발

(1) 축열성능이 향상된 SSPCM 콘크리트의 밀도

축열성능이 향상된 SSPCM 콘크리트의 물리적 성능을 평가하기 위하여 각각 0, 10, 20 및 30wt%의 SSPCM이 혼합된 콘크리트의 밀도를 분석하였다. 샘플은 일반적인 콘크리트와 SSPCM이 혼합된 콘크리트, 그리고 SSPCM을 각각 3개씩 준비하여 측정을 실시하였다. 시험은 KS L 3114에 나오는 방법을 기준으로 22 ± 1℃의 온도와 41 ± 1%의 상대습도 조건에서 실시하였다. 일반적으로 SSPCM은 오일 기반의 PCM이 함침되어 제조된 것으로 물보다 비중이 낮다. 제조된 콘크리트의 밀도는 평균 2.44g/cm^{3}을 나타내는 것으로 확인하였다. 측정 시 미량의 샘플을 가지고 분석해서 편차가 0.2-0.3 정도로 나타나는 것을 확인하였다. 물의 비중이 1g/cm^{3}임을 감안하였을 때 제조된 콘크리트의 비중은 물의 2.4-2.5배 정도인 것으로 분석하였다. SSPCM이 들어간 콘크리트의 경우 SSPCM의 혼합율이 높아짐에 따라 밀도가 낮아지는 것으로 확인하였다. 10wt%가 들어간 경우, 2.21g/cm^{3}의 값을 보였고 20wt%가 들어간 경우 평균적으로 2.05g/cm^{3}의 밀도 값을 보이는 것으로 확인하였다. 하지만 30wt%가 들어간 경우 평균 2.09g/cm^{3}으로 20wt%가 들어간 경우보다 밀도가 소폭 상승한 것으로 나타났다. 이 경우는 샘플의 사이즈가 매우 작기 때문에 샘플 추출 과정에서 과다한 콘크리트가 혼입되어 한 샘플의 밀도 값이 크게 측정이 되어 평균값을 상승시키는 요인으로 작용하였다. 따라서 본 연구진은 보정 값으로서 밀도 값 차이가 많이나는 3번째 샘플을 제외한 값을 산정하여 최종적으로 2.01g/cm^{3}의 값을 30wt%의 SSPCM이 들어간 콘크리트의 밀도 값으로 도출하였다. 끝으로 SSPCM의 밀도를 산정하려고 하였으나, SSPCM의 경우 비중이 물보다 작기 때문에 KS L 3114의 시험방법으로는 측정이 불가함을 확인하였다. 추후, 다른 측정 장비 및 시험방법으로 이를 도출해야 할 것으로 판단된다.

결과적으로 SSPCM이 많이 혼합될수록 축열 콘크리트의 밀도 값은 줄어듦을 확인할 수 있었다. 이를 토대로 에너지 시뮬레이션 평가 및 기타 시험을 위한 기초연구를 수행할 수 있을 것으로 보인다. 아래의 표와 그래프는 일반적인 콘크리트와 축열 성능이 향상된 SSPCM콘크리트의 밀도 측정값을 보여준다.

표 2.1.1 SSPCM 콘크리트의 밀도 분석결과

밀도(부피비중)

시편	번호	건조무게 (g)	수중무게 (g)	포수무게 (g)	밀도 - 부피비중 (g/cm^3)	비고
Reference	1	3.7955	2.3673	4.0256	2.29	
	2	4.1149	2.6286	4.1767	2.66	
	3	4.3477	2.7255	4.5709	2.36	
	평균				2.44	
10wt% of SSPCM	1	3.3423	2.0622	3.4942	2.33	
	2	3.5453	2.1301	3.8118	2.11	
	3	4.1531	2.5117	4.4132	2.18	
	평균				2.21	
20wt% of SSPCM	1	3.2979	1.9384	3.5482	2.05	
	2	3.4541	2.0468	3.7035	2.08	
	3	3.1267	1.8033	3.3604	2.01	
	평균				2.05	
30wt% of SSPCM	1	3.3744	1.9469	3.6304	2.00	
	2	2.9922	1.7220	3.2029	2.02	
	3	4.2013	2.5465	4.3977	2.27	
	평균				2.09 보정 값-(2.01)	
SSPCM	1	측정불가				
	2	측정불가				
	3	측정불가				

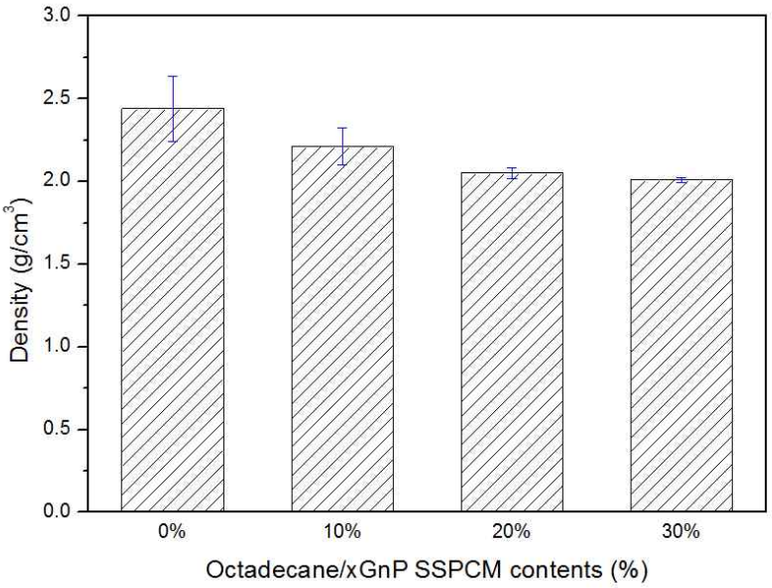


그림 2.1.24 SSPCM 콘크리트의 밀도 분석 그래프

(2) 축열성능이 향상된 SSPCM 콘크리트의 축열량

축열성능이 향상된 SSPCM 콘크리트의 축열량을 분석하기 위하여 Deferential scanning calorimeter(DSC)를 이용하여 제조된 SSPCM의 융해점과 응고점, 비열, 잠열량을 0~80℃ 사이에서 승온속도 5℃/min의 분석조건으로 확인하였다. 먼저, 콘크리트의 경우 DSC 데이터 상 어떠한 잠열 피크를 보이지 않음을 확인할 수 있었다. 이를 통하여 콘크리트가 축열 성능이 발현되지 않는 재료임을 파악하였다. SSPCM이 들어간 축열성능 향상 콘크리트는 SSPCM의 혼합량의 증가에 따라 잠열량이 늘어나는 모습을 보여주었으며, 융해점과 응고점이 모두 비슷한 온도에서 일어남을 확인하였다. 융해점과 응고점이 동일한 것은 사용된 PCM이 n-octadecane으로서 28℃에서 상변화를 일으키기 때문이다. 10wt%의 SSPCM이 들어간 콘크리트의 경우 융해점이 27.08℃이고 응고점은 24.54℃, 융해 시 잠열량은 5.272J/g, 응고 시 잠열량은 5.530J/g을 보였다. 20wt%의 SSPCM이 들어간 콘크리트는 융해 시 잠열량이 20.58J/g이고, 응고 시 잠열량이 19.64J/g을 보여주었다. 10wt%의 SSPCM이 들어간 콘크리트와 비교했을 때, 약 4배의 잠열성능이 향상된 것을 확인하였다. 2배정도 늘어날 것으로 당초 예상하였으나 분석된 잠열량의 상승효과는 컸다. 반면, 30wt%의 SSPCM이 들어간 콘크리트의 경우 융해 시 잠열량은 26.68J/g, 응고 시 잠열량은 23.46J/g으로 분석되었다. 앞서 분석되었던 SSPCM 20wt%가 들어간 콘크리트와 비교하여 잠열성능의 향상은 크지 않음을 확인하였다. 원인을 분석해보면 샘플링 과정에서 SSPCM이 콘크리트 내부에서 균일하게 존재하지 않았기 때문인 것으로 확인되었다. 또한, DSC의 경우 소량의 샘플만으로도 분석이 가능하기 때문에 시료채취 시 SSPCM의 혼합량의 차이가 잠열량의 차이로 나타난 것으로 확인하였다. 결론적으로 20wt%의 SSPCM이 들어간 콘크리트의 SSPCM 함량이 의도치 않게 높아지면서 아래의 표와 같은 결과를 보여주었다. 축열성능의 향상 콘크리트의 DSC 분석결과 그래프는 아래에 나타나있다.

표 2.1.2 축열향상 콘크리트의 융해 및 응고 시 열적 특성

Sample	융해점 (℃)	융해 시 잠열량 (J/g)	응고점 (℃)	응고 시 잠열량 (J/g)
Concrete	-	-	-	-
Concrete with 10wt% SSPCM	27.08	5.272	24.54	5.530
Concrete with 20wt% SSPCM	27.70	20.58	25.02	19.64
Concrete with 30wt% SSPCM	27.75	26.68	24.67	23.46

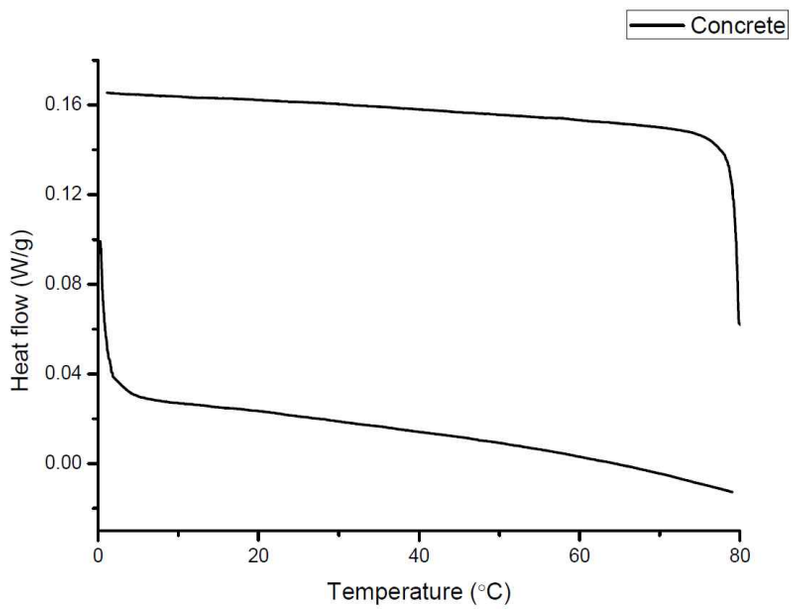


그림 2.1.25 콘크리트의 DSC 분석 그래프

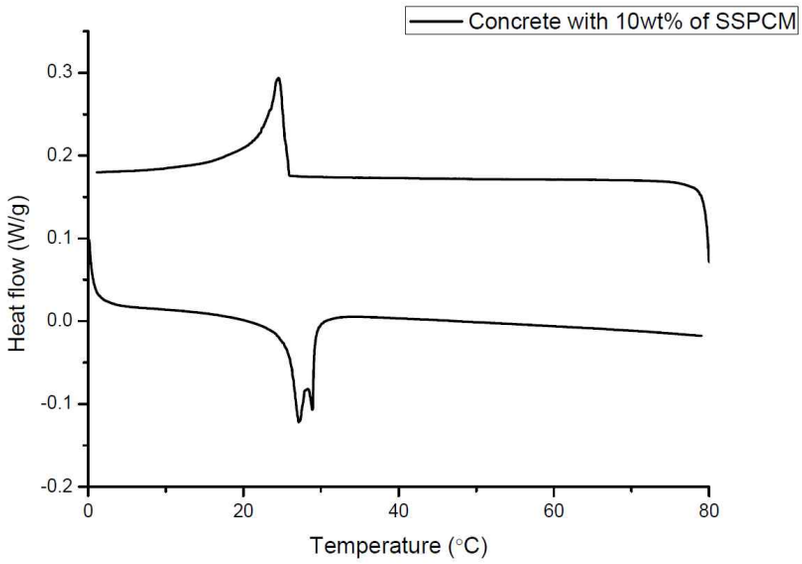


그림 2.1.26 10wt%의 SSPCM이 들어간 콘크리트의 DSC 분석 그래프

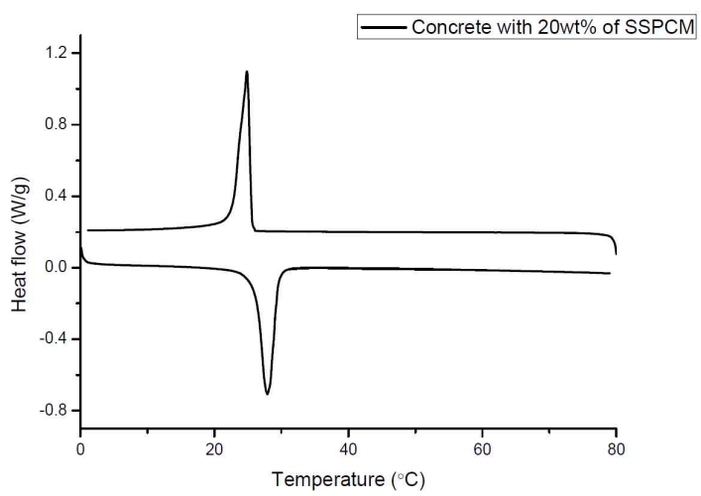


그림 2.1.27 20wt%의 SSPCM이 들어간 콘크리트의 DSC 분석 그래프

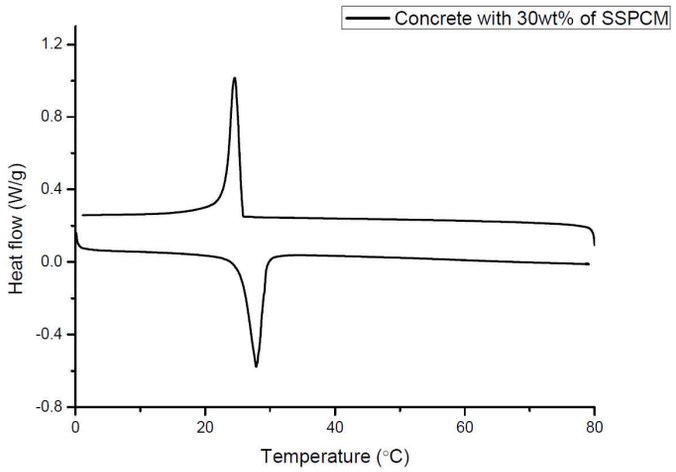
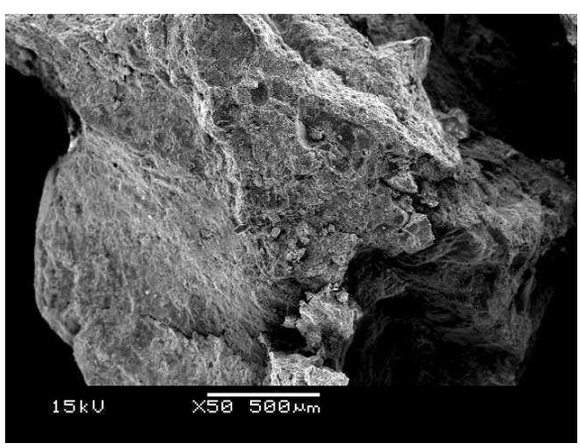


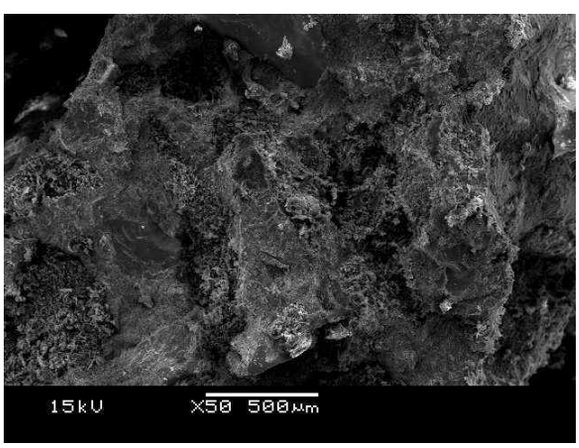
그림 2.1.28 30wt%의 SSPCM이 들어간 콘크리트의 DSC 분석 그래프

(3) 축열성능이 향상된 SSPCM 콘크리트의 미세구조

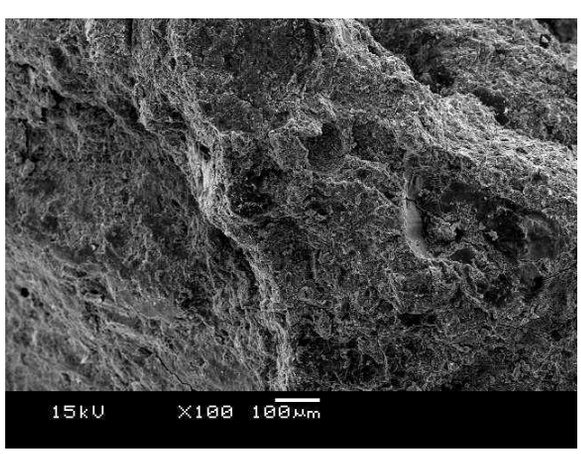
축열성능이 향상된 SSPCM 콘크리트의 미세구조 분석 결과는 아래의 그림으로 나타내었다. 미세구조 분석이기 때문에 SSPCM의 혼합율과는 별개로 30wt%의 SSPCM이 들어간 콘크리트와 일반적인 콘크리트를 대상으로 분석을 실시하였다. 분석은 2개의 샘플을 각각 50배, 100배 그리고 200배 확대한 이미지를 찍는 것으로 진행하였다. 아래의 그림에서 콘크리트는 단면이 매우 단단한 형태를 보여주는 것을 알 수 있다. 마찬가지로 SSPCM이 들어간 콘크리트 역시 단단한 형태를 보여주는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 SSPCM이 들어간 콘크리트의 경우 SSPCM 알갱이가 곳곳에 박혀있는 것을 확인할 수 있다. SSPCM과 콘크리트 사이에 공극 및 균열이 없는 것을 미루어보아 SSPCM이 콘크리트에 잘 혼합된 것을 확인할 수 있었다. 결론적으로 오일 기반의 PCM이 콘크리트와 잘 혼합이 잘 되며, 호환성이 좋은 것을 확인할 수 있었다. 추후, 콘크리트 및 기타 건축재료 적용 시 본 연구의 호환성 검증 연구를 기반으로 긍정적인 파급효과를 가져올 수 있을 것으로 판단되었다.



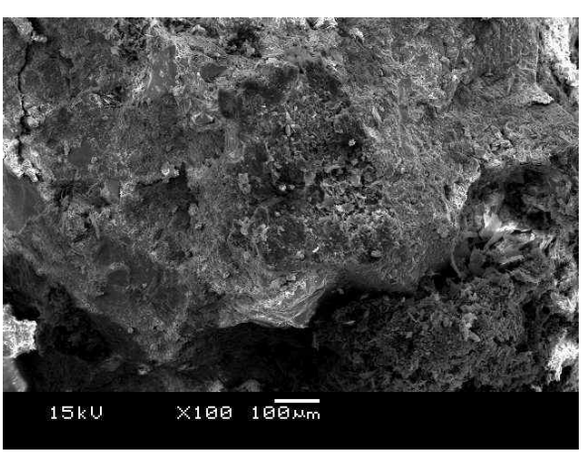
(가) 콘크리트 x50



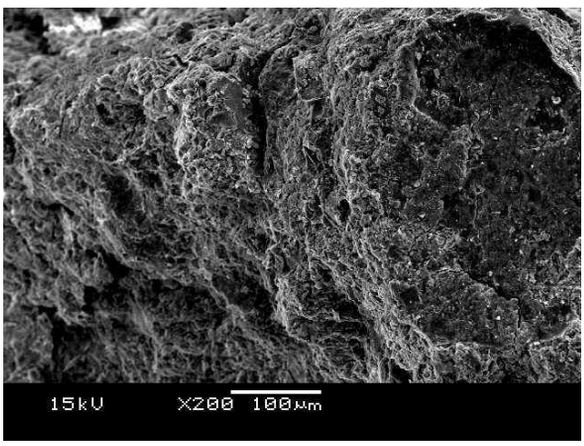
(나) 축열 콘크리트 x50



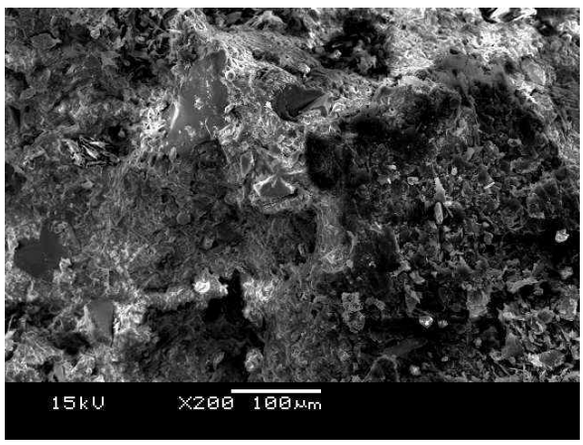
(다) 콘크리트 x100



(라) 축열 콘크리트 x100



(마) 콘크리트 x200



(바) 축열 콘크리트 x200

그림 2.1.29 콘크리트와 SSPCM 혼합 콘크리트의 미세구조 분석

2. 친환경 콘크리트 재료를 이용한 SSPCM 개발

가. 친환경콘크리트 재료 적용을 위한 지방산 계열의 PCM

PCM을 건축물에 적용하기 위해서는 PCM의 성질과 분류에 따른 특성을 잘 알아야 한다. PCM은 기본적으로 열을 축적하거나 방출하는 방식으로 건축물 내의 냉난방부하를 감소시키면서 그 고유의 역할을 수행할 수 있어서 PCM의 열역학적인 성질은 건축물 적용에 있어 매우 중요하다. 같은 PCM이라도 잠열의 성능이 우수한 것의 효율이 높다. 각각의 PCM은 종류마다 서로 다른 용융점과 응고점을 가지고 있다. 따라서 재실자가 느끼는 쾌적한 온도범위에서 상변화를 일으키는 PCM을 적용하면 에너지 측면에서 큰 효과를 얻을 수 있다. 그러나 아직 가격이 고가라는 단점이 있다. 지방산 계열의 PCM은 유기 PCM에 속하며, 종류는 코코넛유, 옥수수유, 면실유, 땅콩유, 올리브유, 팜유, 팜핵유, 유채유, 캐놀라유, 참깨유, 대두유, 해바라기유, 피마자유, 아마인유, 홍화유, 자트로파유 등이 있으며 이 중 코코넛유와 팜유의 가격이 비교적 저렴하게 형성되어 있다. 지방산 계열의 PCM인 코코넛유와 팜유는 이러한 가격이 비교적 저렴하게 형성되어 있고, 상변화온도 또한 적당하다고 판단된다. 이에 본 연구에서는 친환경콘크리트 재료 적용과 더불어 비용을 절감시키기 위하여 친환경 PCM 소재인 팜유와 코코넛유를 이용하여 2단계로 실용적인 SSPCM을 개발을 진행하였다. 상온에서의 코코넛유와 팜유의 모습과 물성을 아래의 그림 2.1.30과 2.1.31 그리고 표 2.1.3에 나타내었다.



그림 2.1.30 코코넛유



그림 2.1.31 팜유

표2.1.3. 코코넛유와 팜유의 물성

	Coconut oil	Palm oil
상변화온도 (℃)	25.69	16.89
잠열량 (J/g)	110.4	127.3
열전도율 (W/m·K)	0.3210	0.2891

나. 지방산 계열 PCM 기반 SSPCM의 형태학적 분석

진공함침법으로 제조된 지방산 계열 PCM 혼합물의 형태를 분석하기 위하여 SEM 측정을 실시하였다. 그림 2.1.32와 2.1.33은 코코넛유와 팜유가 함침되고 난 후, xGnP의 SEM 이미지를 보여준다. 그림을 살펴보면 xGnP의 입자들 사이에 코코넛유와 팜유가 고르게 분산되어 있음을 확인할 수 있다. 순수한 코코넛유와 팜유의 SEM 영상 또한 촬영하였으나, SEM은 본래 전기적으로 도체인 물질만 감지하여 측정할 수 있으므로 열전도율이 낮은 코코넛유와 팜유의 경우 전기적으로 도체를 형성시켜 주는 gold coating과정을 거쳤음에도 불구하고 SEM 영상에 나타나지 않았다.

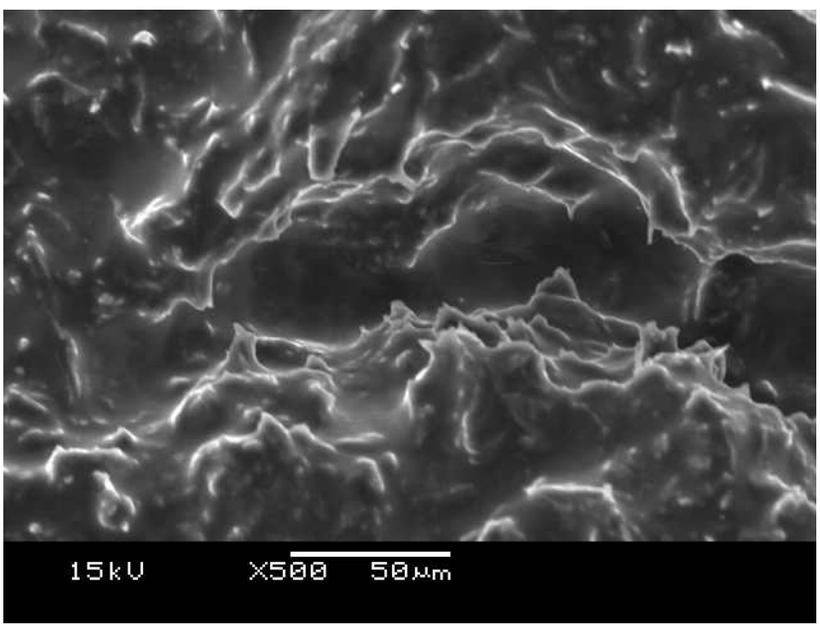


그림 2.1.32 xGnP에 함침된 코코넛유 SSPCM의 SEM 영상

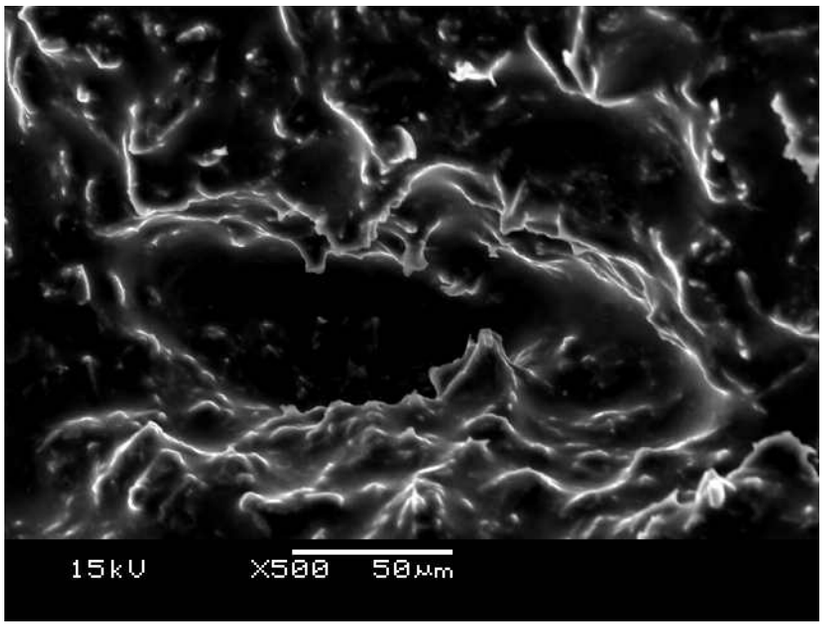


그림 2.1.33 xGnP에 함침된 팜유 SSPCM의 SEM 영상

다. 지방산 계열 PCM 기반 SSPCM의 화학적 결합 분석과 열전도율 분석

지방산 계열 PCM과 탄소 나노 재료의 상호작용을 알아보기 위해서 지방산 계열 PCM 혼합물의 구조 간 화학적 결합을 FT-IR분석을 통해서 알아보았다. 순수한 코코넛유와 팜유의 대표적인 피크점은 2920, 2851cm^{-1} 에서 나타나며 표 4와 같이 이는 각각 에스테르의 $-CH_3$, $-CH_2$ 기를 나타낸다. 또한 1740, 1149-1157cm^{-1} 범위의 파동수는 각각 C=O, C-O기를 나타낸다. xGnP에 코코넛유와 팜유를 함침시킨 SSPCM의 피크와 코코넛유와 팜유의 피크가 동일함을 그림 2.1.34를 통해 알 수 있다. 이는 코코넛유, 팜유와 탄소 나노 재료 간 화학적 결합이 일어나지 않고 물리적 결합만이 이루어졌음을 나타낸다. 따라서 두 물질은 혼합 후에도 고유의 물성이 변함없이 안정된 상태를 유지하고 있음을 알 수 있다.

표 2.1.4 FT-IR 스펙트라와 결합 파동수 범위

결합	파동수 범위(cm^{-1})
$-CH_3$	2920
$-CH_2$	2851
C=O	1740
C-O	1149-1157

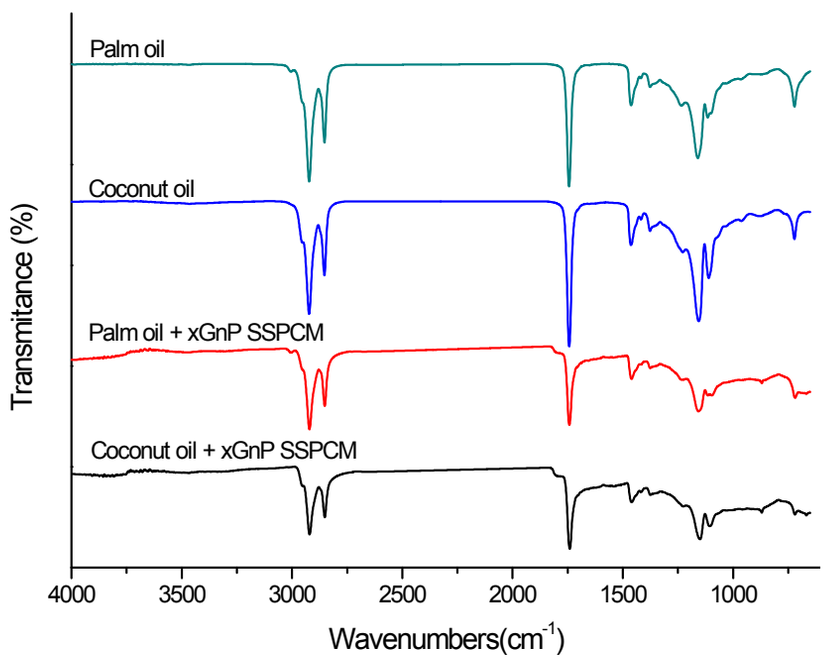


그림 2.1.34 제조된 SSPCM의 FT-IR 스펙트라

열전도율이 낮은 문제점을 극복하기 위하여 열전도율이 높은 다공성 탄소나노재료인 xGnP에 코코넛유와 팜유를 함침시킨 후 TCi를 이용하여 xGnP에 함침된 코코넛유, 팜유 SSPCM의

열전도율을 측정하였다. 코코넛유와 팜유의 녹는점이 상온보다 낮은 관계로 측정 시 온도를 9℃로 설정하여 측정하였다. xGnP에 함침된 코코넛유 SSPCM의 열전도율은 약 1.3303W/m·K으로 순수한 코코넛유의 열전도율인 0.3210W/m·K보다 약 414% 상승하였다. xGnP에 함침된 팜유 SSPCM의 열전도율은 약 1.2638W/m·K으로 순수한 팜유의 열전도율인 0.2891 W/m·K보다 약 437%의 상승률을 보였다. 두 SSPCM 모두 400%이상의 증가율을 보였으며 낮은 열전도율이 고열전도율 탄소나노재료인 xGnP에 함침되어 4배가량 증가되었음을 그림 2.1.35와 2.1.36을 통해 확인할 수 있다. 제조된 SSPCM과 코코넛유, 팜유의 열전도율과 증가율을 표 2.1.5에 나타내었다.

표 2.1.5 제조된 SSPCM과 코코넛유, 팜유의 열전도율과 증가율

Sample	열전도율(W/mK)	증가율(%)
Coconut oil	0.3210	414
Coconut oil / xGnP SSPCM	1.3303	
Palm oil	0.2891	437
Palm oil / xGnP SSPCM	1.2638	

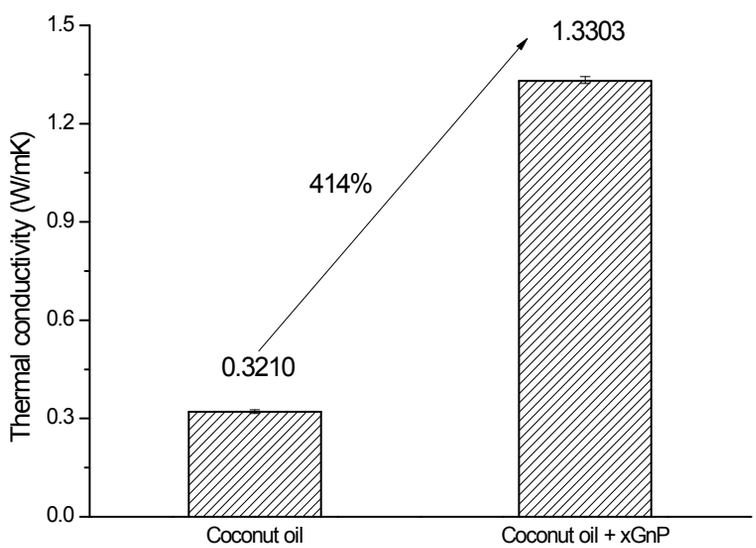


그림 2.1.35 xGnP에 함침된 코코넛유의 열전도율

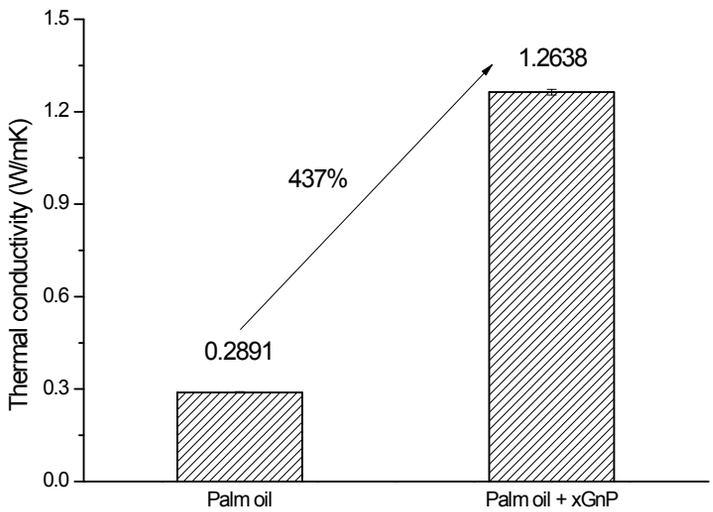


그림 2.1.36 xGnP에 함침된 팜유의 열전도율

라. 지방산 계열 PCM 기반 SSPCM의 열적 특성 분석

DSC 분석을 통해 코코넛유와 팜유, xGnP에 함침된 코코넛유, 팜유의 녹는점, 냉각점, 잠열량 등의 열 성능을 평가할 수 있다. 그림 2.1.37을 살펴보면 순수한 코코넛유는 냉각 시 7.34℃에서 상변화 피크를 가지며 승온 시 23.14℃에서 피크를 나타냄을 알 수 있다. xGnP에 함침된 코코넛유의 Heat flow는 냉각 시 10.84℃, 승온 시 22.67℃의 피크를 나타내었으며, 약간의 오차를 제외하고는 순수한 코코넛유의 흐름과 유사한 경향성을 보였다. 또한 녹는점과 냉각점의 차이가 비슷하게 유지되었으므로 과냉각 현상에 대한 우려가 발생하지 않았다. 그림 2.1.38에서 순수한 팜유는 냉각 시 7.89℃와 1.60℃에서 상변화 피크를 가지며 승온 시 8.60℃와 0.02℃에서 피크를 나타냄을 알 수 있다. xGnP에 함침된 팜유의 Heat flow는 냉각 시 5.52℃와 -1.08℃, 승온 시 6.82℃와 -1.83℃의 피크를 나타내었으며, 코코넛유와 마찬가지로 유사한 경향성을 보였다. 냉각점과 녹는점 그리고 Heat flow의 피크값을 적분하여 계산한 잠열량과 잠열량 변화율을 표 2.1.6와 2.1.7에 나타내었다. xGnP에 함침된 코코넛유의 냉각점은 14.95℃이며 녹는점은 26.93℃로, 순수한 코코넛유의 냉각점 14.76℃와 녹는점 26.78℃가 거의 동일하게 나타났다. xGnP에 함침된 팜유 역시 마찬가지로 냉각점은 9.20℃이며 녹는점은 18.33℃로, 순수한 팜유의 냉각점 8.55℃와 녹는점 17.26℃가 거의 동일한 경향성을 보였다. 이는 코코넛유와 xGnP 사이에 화학적 반응이 일어나지 않았기 때문에 본래의 열 성능이 유지되었기 때문으로 판단된다.

표 2.1.6 융해 시 열적 특성

Sample	녹는점 (℃)	잠열량 (J/g)	잠열량 변화율(%)
Coconut oil	26.78	110.4	25.4
Coconut oil/xGnP SSPCM	26.93	82.34	
Palm oil	17.26	127.3	39.4
Palm oil/xGnP SSPCM	18.33	77.18	

표 2.1.7 냉각 시 열적 특성

Sample	냉각점 (℃)	잠열량 (J/g)	잠열량 변화율(%)
Coconut oil	14.76	105.0	26.1
Coconut oil/xGnP SSPCM	14.95	77.64	
Palm oil	8.55	53.75	37.5
Palm oil/xGnP SSPCM	9.20	33.58	

xGnP에 함침된 코코넛유 SSPCM의 냉각시 잠열량은 77.64J/g, 융해 시 잠열량은 82.34J/g이며, 순수한 코코넛유의 비교하였을 때 냉각시 잠열량은 105.0J/g, 융해 시 잠열량은 110.4J/g으로 약 25%의 잠열량 감소율을 보였다. xGnP에 함침된 팜유 SSPCM 역시 마찬가지로 냉각 시 잠열량은 33.58J/g, 융해 시 잠열량은 77.18J/g이며, 순수한 팜유의 경우 냉각 시 잠열량은 53.75J/g, 융해 시 잠열량은 127.3J/g으로 약 38%의 잠열량 감소율을 보였다. 이는 xGnP의 3차원 그물 구조가 PCM의 열 흐름을 방해하여 PCM의 잠열량 감소를 일으킨다고 판단된다.

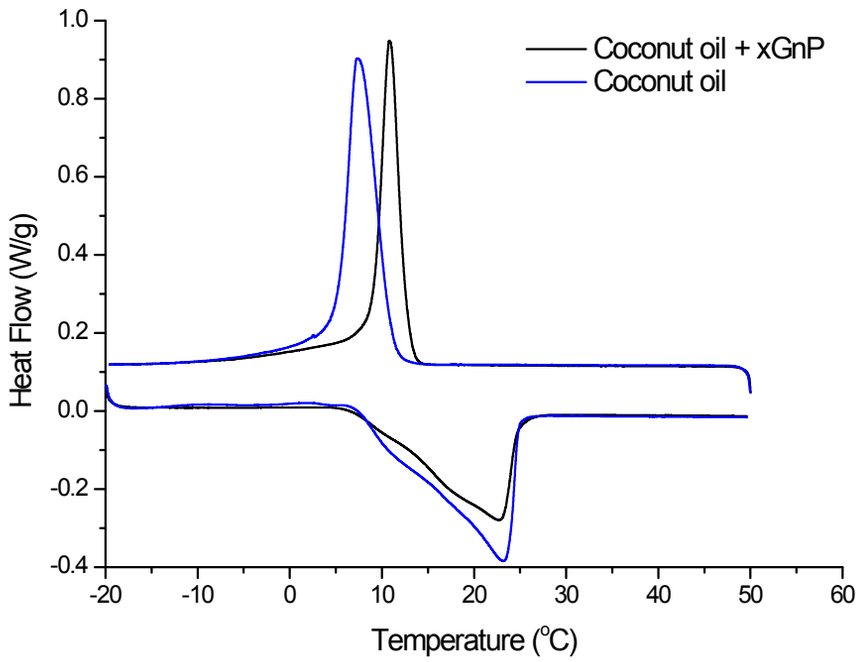


그림 2.1.37 xGnP에 함침된 코코넛유 SSPCM의 열적 특성

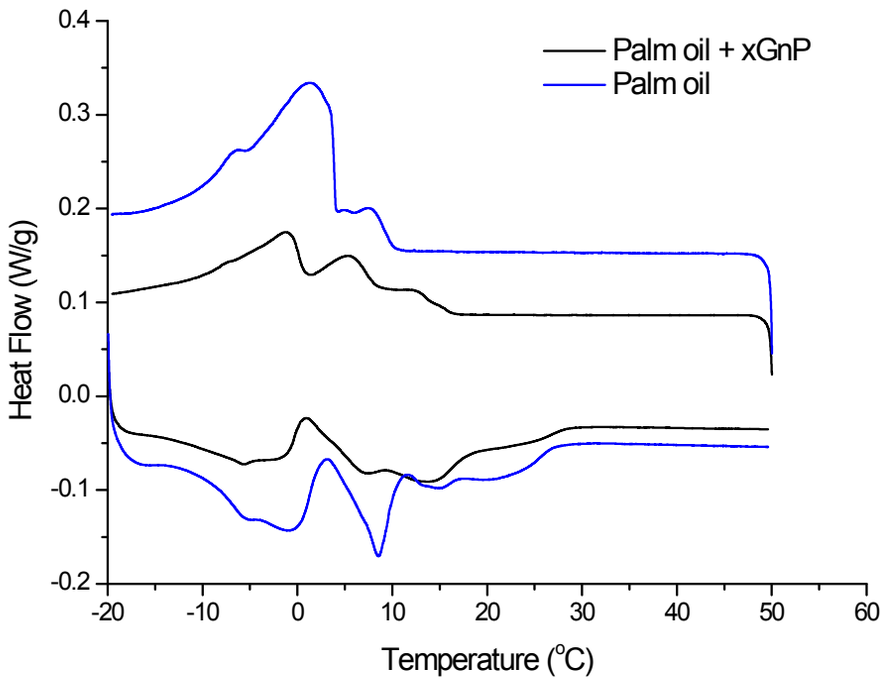


그림 2.1.38 xGnP에 함침된 팜유 SSPCM의 열적 특성

지방산 계열 PCM 혼합물의 열적 안정성은 TGA 분석을 통해 평가할 수 있으며, 분석 결과로 xGnP에 함침된 코코넛유, 팜유 SSPCM을 상온 20℃에서 600℃까지 상승시킴에 따라 열분해 된 판단할 수 있다. 그림 2.1.39은 xGnP에 함침된 코코넛유 SSPCM의 TGA 곡선을 나타낸다. 약 245℃에서 열분해를 시작하였으며 약 420℃ 초과 시 혼합물에서 xGnP에 함침된 코코넛유 SSPCM만 남아있음을 알 수 있다. xGnP는 거의 순수한 탄소 나노 재료로 본 연구에서 수행한 TGA 온도 범위 대에서는 열분해 되지 않기 때문에, 열분해 된 물질은 코코넛유이며, 질량대비 xGnP에 함침된 코코넛유는 76.07%이다. 그림 2.1.40의 순수한 코코넛유의 열적 안정성 분석 결과와 비교해 보았을 때 유사한 경향성을 보이는 것을 확인할 수 있다.

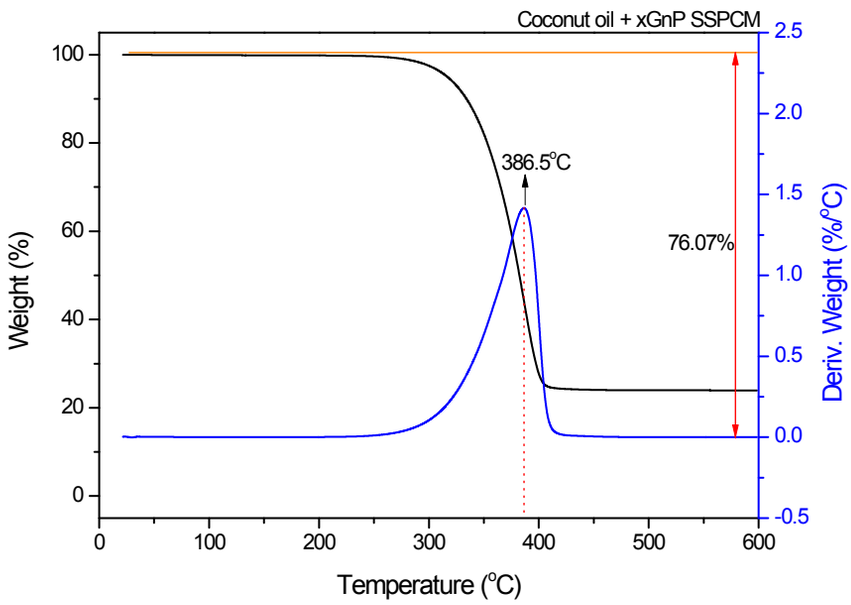


그림 2.1.39 xGnP에 함침된 코코넛유 SSPCM의 열적 안정성

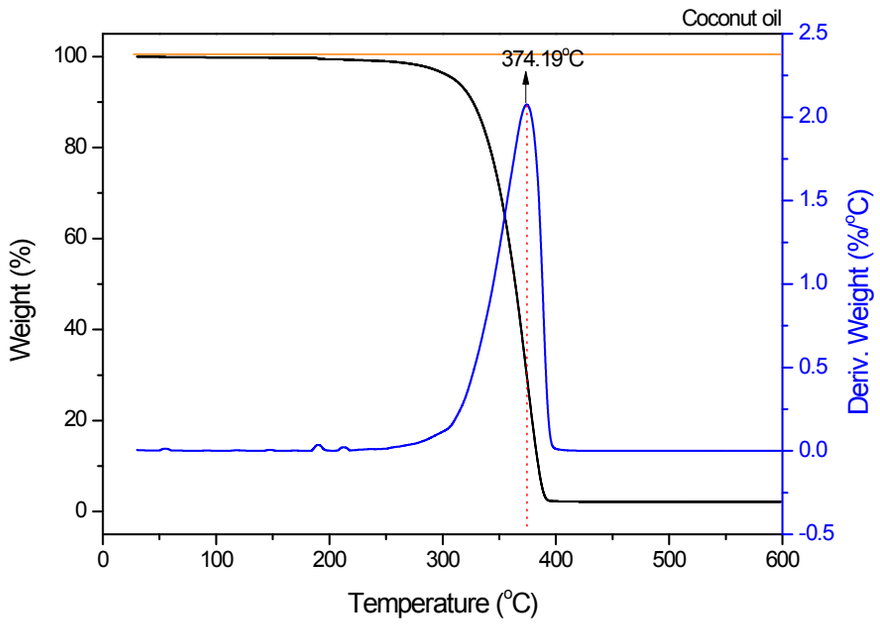


그림 2.1.40 코코넛유의 열적 안정성

그림 2.1.41은 xGnP에 함침된 팜유 SSPCM의 TGA 곡선을 나타낸다. 약 260℃에서 열분해를 시작하였으며 약 480℃ 초과 시 혼합물에서 xGnP에 함침된 팜유 SSPCM만 남아있음을 알 수 있다. xGnP는 TGA 분석을 수행한 온도범위에서 열분해 되지 않기 때문에, 열분해 된 물질은 팜유인 것으로 판단되며, 질량대비 xGnP에 함침된 팜유는 80.07%이다. 그림 2.1.42의 순수한 팜유의 열적 안정성 분석 결과와 비교해 보았을 때 유사한 경향성을 보이는 것을 확인할 수 있다. 결과적으로 xGnP에 함침된 코코넛유, 팜유 SSPCM은 100℃ 이하의 온도범위에서 질량변화를 일으키지 않으므로 건축물에 적용할 시 열적 안정성을 가진다고 판단된다.

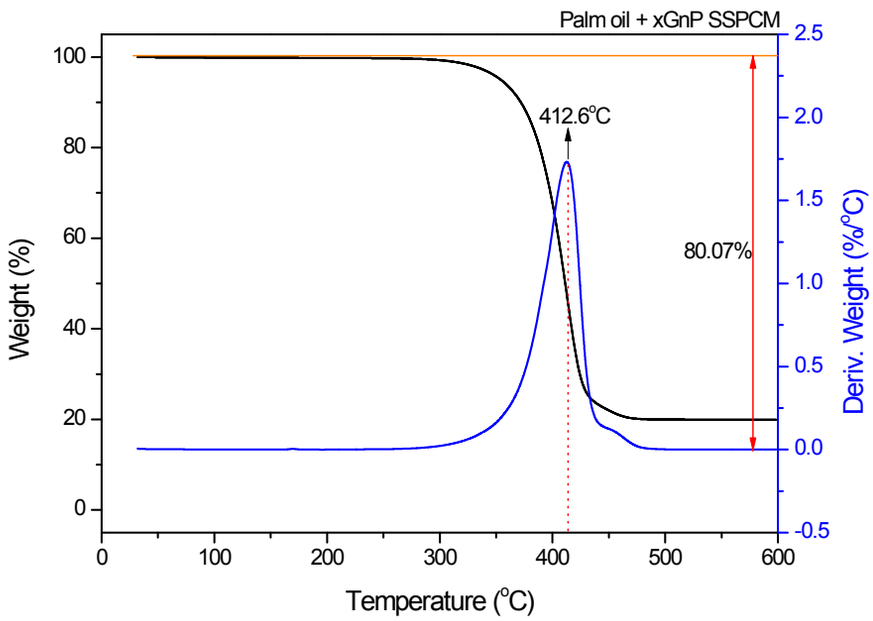


그림 2.1.41 xGnP에 함침된 팜유 SSPCM의 열적 안정성

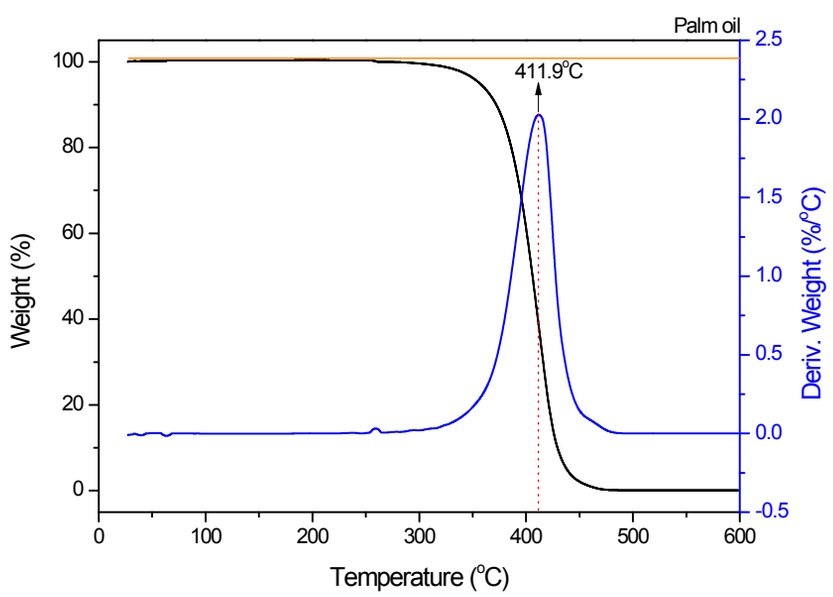


그림 2.1.42 팜유의 열적 안정성

3. 축열성능이 향상된 콘크리트의 에너지 효율 향상

가. 축열성능이 향상된 콘크리트의 엔탈피 분석

축열성능이 향상된 콘크리트의 엔탈피는 DSC 분석결과를 기반으로 비열값을 산정하고 엔탈피를 계산하였다. 분석은 0, 10, 20 그리고 30wt%의 SSPCM이 혼합된 콘크리트로 진행하였다. 아래의 그림은 축열 콘크리트의 혼합율에 따른 엔탈피 결과를 보여준다. 그림 2.1.43에서처럼 SSPCM의 혼합량이 많아질수록 최종 엔탈피가 가장 높은 것을 확인할 수 있다. 80℃까지 승온시킨 시점에서 일반 콘크리트의 경우 398.83J/g의 엔탈피를 갖는 것을 확인하였다. 그리고 10wt%의 SSPCM이 들어간 콘크리트의 경우 459.64J/g인 것을 확인하였고, 20wt%와 30wt%의 SSPCM을 혼합시킨 축열 콘크리트의 경우 각각 602.77J/g과 716.67J/g의 엔탈피 값을 갖는 것으로 분석하였다. 중요한 것은 PCM의 상변화가 일어나는 시점에서 엔탈피값이 크게 상승했다는 점이다. 즉, 상변화 온도 구간에서 축열량이 크게 증가해 전체 엔탈피 값의 상승을 가져왔다. 또한 현열 구간에서 역시 SSPCM이 많이 들어간 콘크리트의 기울기가 더 큰 것을 확인할 수 있다. 이것은 0℃에서 상변화 구간에 도달하기까지 엔탈피 총합이 SSPCM이 많이 들어갈수록 큰 것을 통하여 알 수 있다. 향후 콘크리트 시공 시 다양한 상변화 온도를 가진 PCM을 적용함으로서 축열성능 향상을 가져올 수 있을 것으로 판단된다.

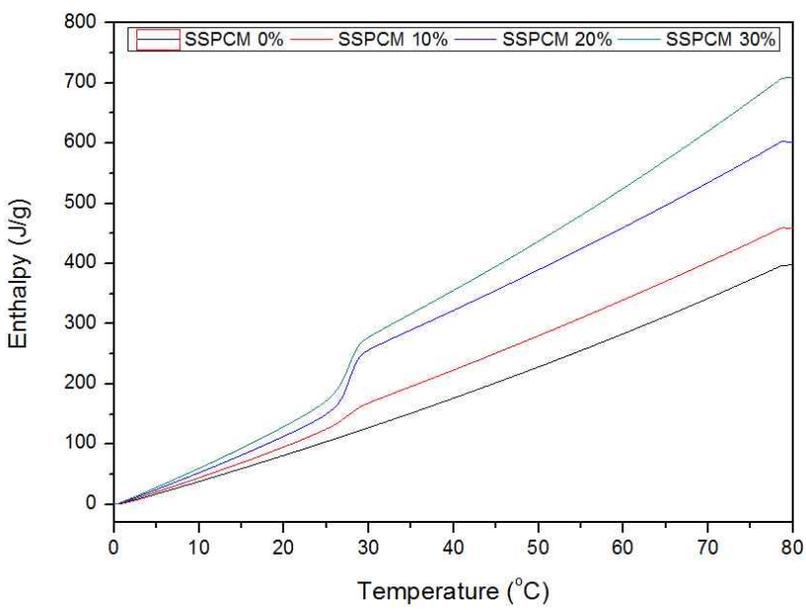


그림 2.1.43 축열 콘크리트의 엔탈피 결과 분석

나. 축열성능이 향상된 콘크리트의 열전도율 분석

축열성능이 향상된 콘크리트 열전도율 분석 역시 마찬가지로 SSPCM의 혼합율에 따른 축열콘크리트의 열전도율을 분석하였다. 설계강도 50MPa의 콘크리트 공시체의 열전도율은 평균

2.01W/mK로 측정되었다. 일반 콘크리트의 열전도율은 1.2 - 1.6W/mK인데 고강도 콘크리트의 경우 밀도 및 골재의 구성이 달라 2.01W/mK까지 열전도율이 향상된 것으로 분석하였다. 10, 20 그리고 30wt%의 SSPCM이 혼합된 콘크리트의 열전도율은 각각 1.97, 1.69W/mK 그리고 1.60W/mK로 점점 열전도율이 낮아지는 경향을 보이는 것으로 확인하였다. SSPCM의 열전도율은 1.363W/mK이기 때문에 SSPCM의 함량이 높아질수록 열전도율이 점점 떨어지는 결과가 나온 것으로 분석하였다. SSPCM의 경우 n-octadecane을 기반으로 제조되었기 때문에 50MPa의 콘크리트보다 낮은 열전도율을 가지고 있다. 하지만, n-octadecane이 0.26W/mK의 매우 낮은 열전도율을 가지고 있기 때문에 순수한 PCM을 적용했을 때보다는 열전도율의 감소가 덜 한 것으로 판단하였다. 열전도율 측정 시, 열전도율을 측정하는 센서의 크기가 1.5cm인데, 공시체 지름은 7-8cm로 센서를 옮길 때마다 조금씩 오차를 보인 것으로 확인하였다. 이는 센서에 닿는 공시체 부분의 SSPCM 분산정도에 따라 다소 오차가 발생한 것으로 분석하였다. 따라서 전체적인 경향성과 데이터 값의 평균값으로 최종 열전도율을 산출하였다. 아래의 그림은 축열 콘크리트의 공시체의 사진과 열전도율을 나타내었다.



그림 2.1.44 측정에 사용된 축열 콘크리트 공시체

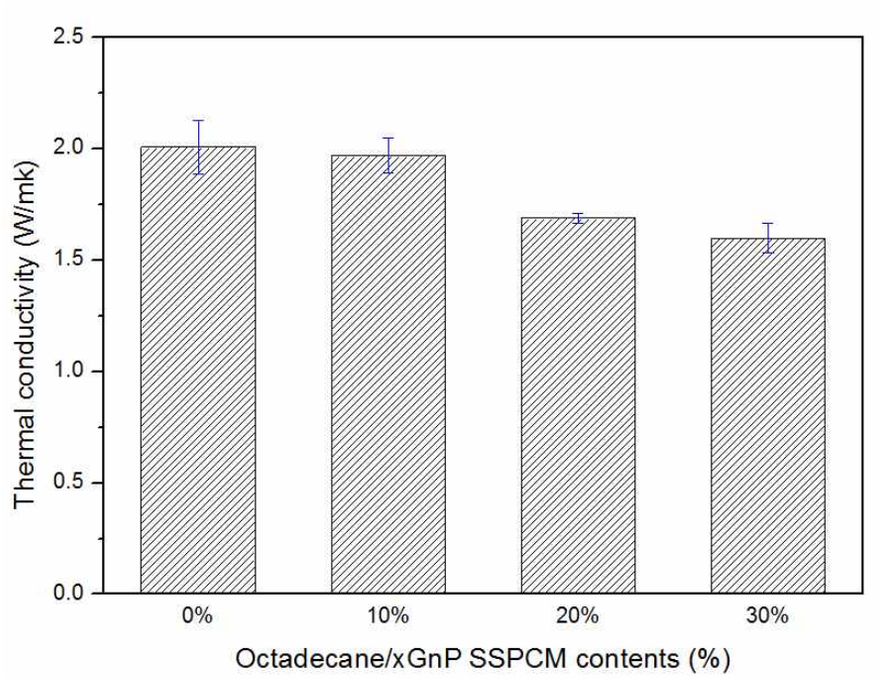


그림 2.1.45 축열 콘크리트의 열전도율 분석 결과

4. SSPCM 콘크리트의 재료 실험을 통한 구조적 및 열적 성능 평가

가. SSPCM을 혼입한 콘크리트의 28일 압축강도 및 인장강도 평가

(1) 실험 변수 및 실험체 제작

콘크리트의 설계강도 40MPa, 물/시멘트비 35.4%로 산정하여, SSPCM을 혼입하지 않은 실험체와 콘크리트 질량 대비 2%, 4%, 6%의 SSPCM을 추가 혼입한 실험체를 변수로 하는 35CONT, 35PCM2R, 35PCM4R, 35PCM6R의 실험체를 제작하였으며, 이에 대한 배합량은 표 1과 같다.

표 2.187 SSPCM 혼입 콘크리트 배합량

실험 변수	SSPCM (kg/m³)	W/C (%)	부피에 따른 질량비(kg/m³)			
			물	시멘트	잔골재	굵은골재
35CONT	0	35.4	178	502.6	617.8	1081.7
35PCM2R	50.26					
35PCM4R	100.5					
35PCM6R	150.8					

(2) 가력 및 측정 방법

35CONT, 35PCM2R, 35PCM4R, 35PCM6R 4가지의 변수를 통한 구조 재료 실험을 통하여 역학적 성질에 대해 알아보고자 하였다. 그림 2.1.46은 압축강도를 측정하기 위해 가력 실험을 수행하는 모습이며, 그림 2.1.47는 인장강도를 측정하기 위해 할렬인장강도를 측정 실험을 수행한 모습이다.



그림 2.1.46 압축강도



그림 2.1.47 인장강도

(3) 실험 결과 및 분석

(가) 압축강도

① 양생기간에 따른 압축강도

SSPCM을 혼입한 콘크리트의 7, 14, 21, 28일자 별 압축강도는 그림 2.1.48로 확인할 수 있으며, SSPCM 2%는 남색, 4%는 빨간색, 6%는 주황색으로 표기하였다. 2%, 4%, 6% 혼입률의 세 실험체 모두 양생기간이 길어질수록 압축강도가 증가하는 경향을 보였고, SSPCM 혼입률이 증가할수록 낮은 압축강도를 나타냈다.

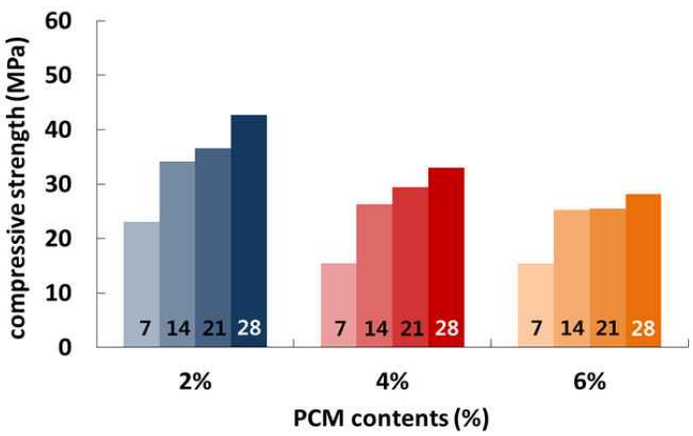


그림 2.1.48 양생기간에 따른 압축강도

② 28일 압축 강도

구조 재료 실험의 4가지의 변수의 28일 최대 압축강도와 변형률 그래프를 통하여 역학적 특성을 알아보고자 하였으며, 녹색은 35CONT, 남색은 35PCM2R, 빨간색은 35PCM4R, 주황색은 35PCM6R을 나타내며, 28일 압축강도는 양생기간에 따른 압축강도와 같이 SSPCM 혼입률이 증가할수록 압축강도가 감소하는 경향을 보이며 그림 2.1.49를 통해 확인할 수 있다.

28일 최대 압축강도 값은 35CONT는 48.9MPa, 35PCM2R은 42.8MPa, 35PCM4R은 33.2MPa, 35PCM6R은 28.1MPa이며, 28일 35CONT를 기준으로 35PCM2R, 35PCM4R, 35PCM6R는 87%,

67%, 57%의 28일 압축강도가 발현하였다.

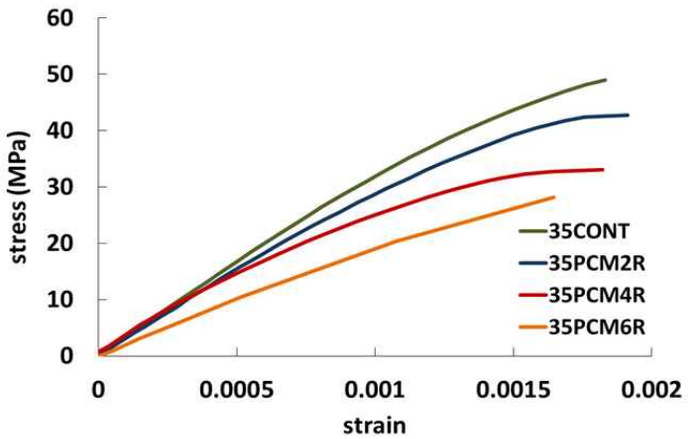


그림 2.1.49 28일 응력-변형률 그래프

(나) 탄성계수 측정

구조 재료 실험을 통한 탄성계수는 28일 응력-변형률 그래프 그림 2.1.49에서 28일 압축강도 값의 40%의 값을 해당 변형률로 나누어 계산하여 값을 산정하였고, 이는 그림 2.1.50과 같다. 탄성계수를 계산한 결과, 35CONT는 33.5GPa, 35PCM2R은 30.2GPa, 35PCM4R은 28.4GPa, 35PCM6R은 20.2GPa이며, 28일 압축강도와 같은 추이로 SSPCM의 혼입률이 증가할수록 감소하는 경향성을 갖는다.

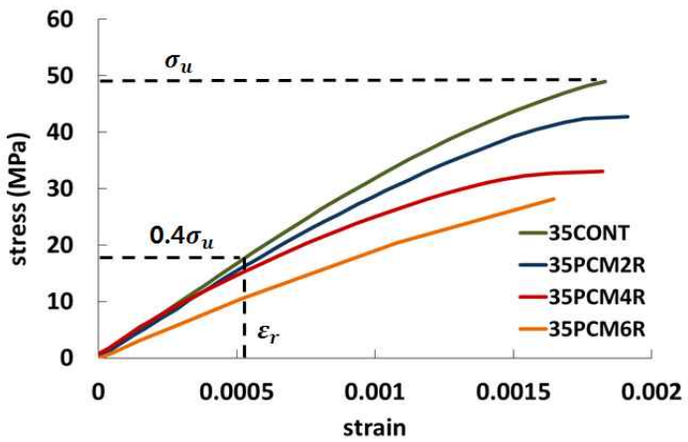


그림 2.1.50 탄성계수

(다) 인장강도

구조재료실험을 통해 얻은 인장강도의 그래프는 그림 2.1.51에 나타냈다. 주황색 기둥은 35CONT, 보라색은 35PCM2R, 붉은색은 35PCM4R, 녹색은 35PCM6R을 나타냈으며, 이에 대한 수치는 35CONT는 3.33MPa, 35PCM2R은 3.65MPa, 35PCM4R은 3.75MPa, 35PCM6R은 3.91MPa이다. 증가 비율은 35cont를 100% 기준으로 하였을 때, 108.8%, 111.2%, 114.8% 로 강도가 발현하는 것을 확인할 수 있었으며, 압축강도와 반대로 인장강도에서는 SSPCM의 혼입률

이 증가할수록 증가하는 경향성을 나타냈으며, SSPCM이 균열억제 효과가 있기 때문인 것으로 추측할 수 있다.

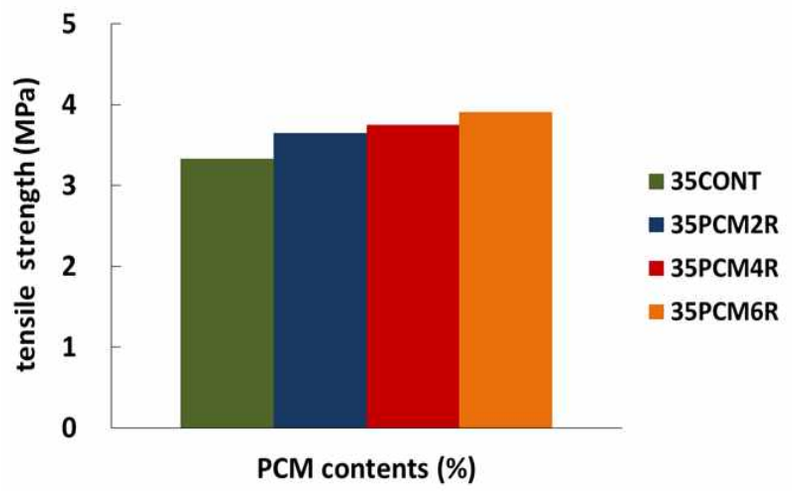


그림 2.1.51인장강도

나. SSPCM을 혼입한 콘크리트의 온도에 따른 압축강도 평가

(1) 실험 변수 및 실험 과정

SSPCM을 혼입한 콘크리트의 온도에 따른 압축강도를 평가하기 위한 실험 변수는 표2와 같다. 표 2.1.9에서의 실험체 중 35CONT, 35PCM2R, 35PCM4R, 35PCM6R은 SSPCM을 혼입한 콘크리트를 상온 20℃에서 28일 압축강도를 평가한 것이며, 35PCM2H, 35PCM4H, 35PCM6H는 28일 양생한 실험체를 동결융해시험기에서 35℃로 하루 동안 넣어 두고 실험을 진행하였다. 그리고 35PCM2C, 35PCM4C, 35PCM6C는 28일 양생한 실험체를 35℃에서 하루 동안 유지시킨 후, 다시 상온 20℃에서 24시간 이상 온도를 식힌 후 실험하였다.

표 2.1.9 SSPCM을 혼입한 콘크리트의 온도에 따른 압축강도 실험 변수

실험체	SSPCM 혼입률(%)	온도
35CONT	0	상온 20℃
35PCM2R	10	
35PCM4R	20	
35PCM6R	30	
35PCM2H	10	35℃
35PCM4H	20	
35PCM6H	30	
35PCM2C	10	35℃ → 상온 20℃
35PCM4C	20	
35PCM6C	30	

(2) 실험 결과 및 분석

SSPCM을 혼입한 콘크리트의 온도에 따른 28일 압축강도 실험결과는 그림 7과 같으며, 그림 7에서의 상온 20℃에서 실험을 진행한 실험체 35CONT, 35PCM10, 35PCM20, 35PCM30의 최대 압축강도를 기준으로 하였을 때, 35℃를 가하여 상변화가 일어난 실험체 5PCM2H, 35PCM4H, 35PCM6H는 78~81%의 압축강도 발현률을 확인 할 수 있으며, 압축강도가 19~22% 감소하였다. 35PCM2C, 35PCM4C, 35PCM6C 실험체의 경우, 35CONT, 35PCM2R, 35PCM4R, 35PCM6R 실험체와 유사한 98~100% 강도 발현률을 보였으며, SSPCM의 상 변화가 일어나는 35℃에서는 압축강도가 떨어지지만, SSPCM이 다시 고체로 변화하는 상온 20℃에서는 압축강도가 회복되는 것으로 분석할 수 있다.

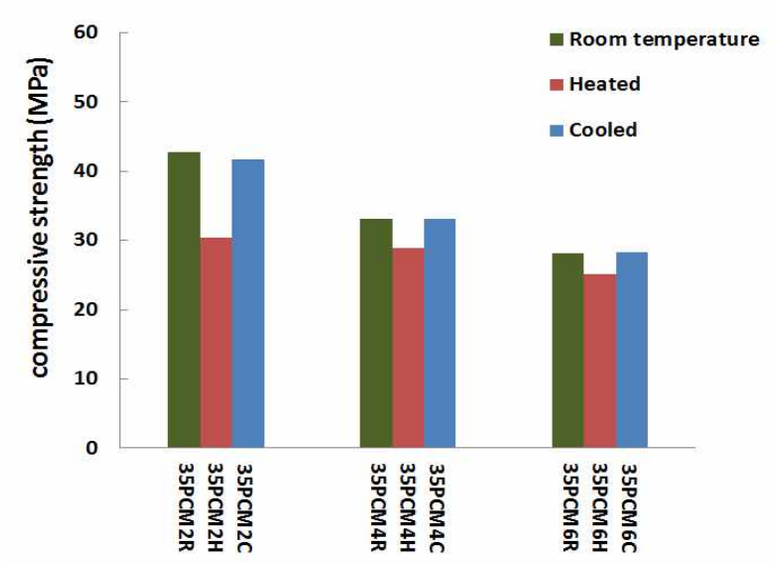


그림 2.1.52 SSPCM을 혼입한 콘크리트온도에 따른 압축강도

5. SSPCM을 혼입한 콘크리트의 설계강도에 따른 배합수식 매뉴얼

가. 구조재료실험을 평가를 통한 설계강도에 따른 PCM혼입 콘크리트 배합수식 매뉴얼

본 연구에서는 상변화물질인 SSPCM이 혼입된 콘크리트 제조방법에 관한 배합수식 매뉴얼을 작성하고자 하며, 콘크리트의 축열 성능을 극대화하면서 구조재료의 강도확보를 위해 혼입되는 상변화물질 SSPCM의 적정 배합률에 관한 SSPCM 혼입 콘크리트 배합수식 매뉴얼에 대하여 연구해보고자 한다.

(1) SSPCM 혼입률에 따른 배합강도 관계식

본 연구에서 콘크리트 배합강도(Fcr)는 콘크리트 배합을 정할 때 목표로 하는 압축강도를 말하며, 설계기준강도(Fck)는 콘크리트 부재를 설계할 때 기준이 되는 압축강도를 말하며, 아래의 수식 2와 같다.

$$F_{cr} = [(1 + (0.069 \times P)) \times F_{ck}] + 10$$

수식 2 콘크리트 배합강도(Fcr)

수식 1에서 P는 상변화물질 SSPCM 혼입율이며, F_{ck}는 기 설정된 설계기준강도이고, Fcr은 상변화물질 SSPCM 혼입율(P)에 따른 강도 저감효과를 고려한 콘크리트 배합강도이며, 강도는 MPa(N/mm2)의 단위로 나타낸다.

(2) SSCPM 혼입률에 따른 물시멘트비 관계식

본 연구의 상변화물질 SSPCM 혼입률에 따른 콘크리트 제조방법에 있어서, 물/시멘트비(W/C)는 다음 수식 2에 따라 산출되는 것이 바람직하다. 여기서 물/시멘트비(W/C)는 시멘트 중량에 대한 유효 수량의 중량 백분율을 의미한다. 수식 2에서 W/C는 물/시멘트비이고, F_{cr}은 상변화물질 혼입율(P)에 따른 강도 저감 효과를 고려한 콘크리트 배합강도이다.

$$W/C = \frac{14.4}{(F_{cr} - 2.2)}$$

수식 3
물/시멘트비(W/C)

(3) SSPCM혼입률에 따른 배합량

(가) 잔골재율(S/a)과 단위수량(W) 산정

본 연구에서의 SSPCM 혼입률에 따른 배합량 산정을 위해 표 3의 굵은 골재(G)의 최대치수에 따른 조립률과 물/시멘트비(W/C)를 고려하여 잔골재율(S/a)를 산정하고자 한다.

표 2.1.10 굵은 골재 최대 치수에 따른 잔골재율과 단위수량 산정표

굵은 골재의 최대 치수 (mm)	단위 굵은 골재의 용적 (%)	조립률 (%)	물/시멘트비 (%)	슬럼프 (mm)	AE제를 사용하지 않는 콘크리트		
					갇힌 공기 (%)	잔골재율 (%)	단위 수량 (kg)
15	58	2.8	55	80	2.5	49	190
20	62	2.8	55	80	2.0	45	185
25	67	2.8	55	80	1.5	41	175
40	72	2.8	55	80	1.2	36	165

표 2.1.10에 기 설정된 굵은 골재(G)의 최대치수 값에서의 조립율이 기 설정된 조립률보다 0.1 이상으로 큰 경우에는 잔골재율(S/a)을 기 설정된 잔골재율(S/a)보다 0.5% 크게 조정하며, 표 3에 기 설정된 굵은 골재(G)의 최대치수 값에서의 조립율이 기설정된 조립률보다 0.1 이하로 작은 경우에는 잔골재율(S/a)을 기 설정된 잔골재율(S/a)보다 0.5% 작게 조정한다.
표 3에 기 설정된 굵은 골재(G)의 최대치수 값에서의 물/시멘트비(W/C)가 기 설정된 물/시멘트비(W/C)보다 1 이상으로 큰 경우에는 잔골재율(S/a)을 기 설정된 잔골재율(S/a)보다 0.05% 크게 조정하며 물/시멘트비(W/C)가 기 설정된 물/시멘트비(W/C)보다 1 이하로 작은 경우에는 잔골재율(S/a)을 기 설정된 잔골재율(S/a)보다 0.05% 작게 조정한다.
표 3에 기 설정된 굵은 골재(G)의 최대치수 값에서의 슬럼프가 설계목표 슬럼프보다 10mm 이상으로 큰 경우에는 AE제를 사용하지 않는 콘크리트의 단위수량 값에 1.2%를 곱한 만큼의 수량을 더 감하여 작게 조정하며, 슬럼프가 설계목표 슬럼프보다 10mm 이하로 작은 경우에는 AE제를 사용하지 않는 콘크리트의 단위수량 값에 1.2%를 곱한 값 만큼의 수량을 더 추가하여 더 크게 조정한다.

(나) 단위 시멘트량(C) 산정

본 연구에서 상변화물질 SSPCM을 혼입한 콘크리트의 단위 시멘트량(C)은 수식 3과 같이 나타나며, 수식 3에서 C는 단위 시멘트량으로서 단위는 kg/m3이고, W/C(%)는 물/시멘트비이고, W는 AE를 사용하지 않는 콘크리트의 단위수량으로서 단위는 'kg' 이다.

$$C = \frac{100}{W/C(\%)} \times W$$

수식 4 단위 시멘트량(C)

(다) 단위골재량의 절대용적(A) 산정

본 연구에서 수식 4의 단위골재량의 절대용적(A)를 구하기 위한 것이며, W는 AE를 사용하지 않는 콘크리트의 단위수량이고, C는 단위시멘트량이고, P는 상변화물질 SSPCM의 혼입률이며, S/a는 잔골재율이다.

$$A = \frac{1000 - [W + (\frac{C}{\text{시멘트밀도}}) + (W + C) \times (\frac{P}{SSPCM\text{밀도}}) + \text{공기량}]}{[1 + S/a \times \text{잔골재밀도} + (1 - S/a) \times \text{굵은골재밀도} \times (\frac{P}{SSPCM\text{밀도}})}$$

수식 5 절대용적(A)

(라) 잔골재량(S)과 굵은골재량(G) 산정

본 연구에서 잔골재량(S)은 수식 4에 따라 산정된 잔골재 절대용적(A)에 잔골재밀도를 곱하여 산정하며, 굵은골재량(G)도 수식 4에 따라 산출된 굵은골재 절대용적(A)에 굵은골재 밀도를 곱하여 산정한다.

$$S = (\text{잔골재 절대용적}) \times (\text{잔골재 밀도})$$

수식 6 잔골재량(S)

$$G = (\text{굵은골재 절대용적}) \times (\text{굵은골재 밀도})$$

수식 7 굵은골재량(G)

나. 배합수식에 따른 SSPCM을 혼입한 콘크리트의 28일 압축, 인장강도 및 휨-전단 거동에 대한 평가

(1) 실험 변수 및 실험체 제작

본 연구에서는 상변화물질인 SSPCM이 혼입된 콘크리트 제조방법에 관한 배합수식 매뉴얼을 적용하여 SSPCM 혼입율에 따른 실험 변수를 정하고, 이에 따른 배합량을 산정하고자 한다. SSPCM 혼입률에 따른 변수는 0%, 4%, 6%로 정하였다. SPCM을 혼입한 실험체의 경우, 목표 설계강도 30MPa에 따른 배합수식 매뉴얼을 적용하여 배합량을 산정하였다. 표 2.1.11는 압축강도와 인장강도 및 휨-전단 거동을 평가하기 위한 총 배합량이다.

표 2.1.11 배합수식 매뉴얼을 적용한 SSPCM 혼입 콘크리트 배합량

실험 변수	SSPCM (kg/㎥)	W/C (%)	부피에 따른 질량비(kg/㎥)			
			물	시멘트	잔골재	굵은골재
0%	0	46.56	5.75	12.35	23.75	42.49
4%	3.02	32.77	5.44	16.60	15.43	38.12
6%	4.30	30.02	5.42	18.05	13.19	35.11

압축강도와 인장강도 실험을 위한 공시체의 치수는 KS F 2403(콘크리트의 강도 시험용 공시체의 제작 방법)에 의거하여, 지름 10cm, 높이 20cm의 공시체 규격을 사용하였고, 휨-전단 강도 실험을 위한 보의 규격은 KS F 2408(콘크리트의 휨강도 시험방법)에 따라 가로, 세로

15cm, 높이 55cm로 실험체를 제작하였으며 그림 2.1.53과 같다.

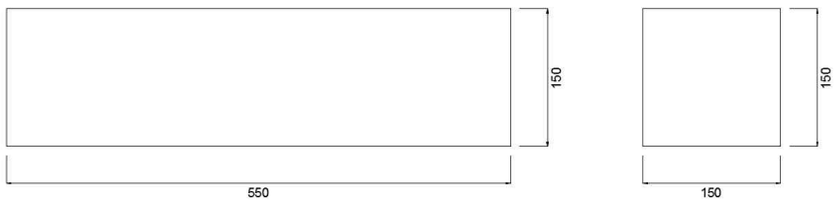


그림 2.1.53 콘크리트 휨-전단 거동을 평가하기 위한 보의 규격
(단위:mm)

(2) 3점 재하 가력 방법

휨-전단 거동을 평가하기 위한 3점 재하 가력 방법은 그림 2.1.54와 같으며, 변형률을 측정하는 게이지는 보의 옆면에 20mm씩 간격으로 보의 상단에서부터 20mm, 40mm, 60mm의 위치에 3개의 게이지를 부착하였고, 보 상단의 중심을 기준으로 좌우 150mm 간격으로 2개의 게이지를 부착하여 실험하였다. 보의 지지점은 보의 하단 양 끝에서 50mm 간격으로 배치하였고, 보의 중앙에 가하는 힘은 1분 당 0.3mm의 속도를 주어 측정하여 그림 2.1.55과 같은 방법으로 처짐과 최대하중에 대해 알아보고자 하였다.

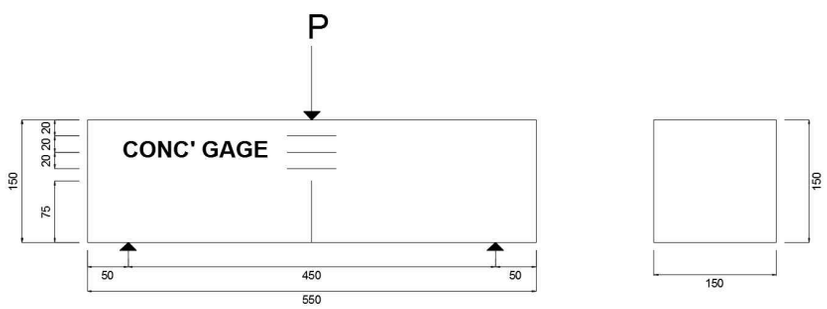


그림 2.1.54 콘크리트 휨-전단 거동 측정 방법 (단위:mm)



그림 2.1.55 휨-전단 거동 실험

(3) 실험 결과 및 분석

(가) 배합수식에 따른 SSPCM을 혼입한 콘크리트의 28일 압축강도 및 인장강도

배합수식에 따른 SSPCM을 혼입한 콘크리트의 28일 압축강도 결과는 표 5이며, SSPCM 혼입률 0% 실험체의 경우는 SSPCM 혼입률 4%와 SSPCM 혼입률 6%의 압축강도보다 크게 높은 값을 나타냈으며, SSPCM 혼입률 4%와 6%의 실험체는 유사한 압축강도가 발현되었다. SSPCM을 혼입하지 않는 경우에 비해서는 압축강도가 저감하나 SSPCM을 혼입한 콘크리트 4%, 6% 실험체가 혼입률이 달라도 유사한 압축강도가 발현하는 것을 보아 배합수식 매뉴얼이 타당한 것으로 분석할 수 있다.

표 2.1.12 28일 압축강도

시험체	최대 압축강도(MPa)	변형률
0%	37.30	0.0018
4%	29.41	0.0015
6%	29.56	0.0016

그리고 배합수식에 따른 SSPCM을 혼입한 콘크리트의 인장강도 결과는 표 6과 같으며, 0%, 4%, 6% 세 개의 변수가 거의 유사한 값을 가진 것을 확인할 수 있는데, 이는 인장강도는 모두 배합수식 매뉴얼에 부합한다는 것으로 분석되어진다.

표 2.1.13 28일 인장강도

시험체	인장강도 (MPa)
0%	3.32
4%	3.21
6%	3.18

(나) 3점 재하 실험 분석

배합수식에 따른 SSPCM을 혼입한 콘크리트 공시체의 압축강도를 가지고 현행 기준 전단강도 설계식 $\frac{1}{6}\times\sqrt{f_{ck}}\times b\times d$에 적용한 전단강도와 SSPCM을 혼입한 콘크리트의 전단강도를 측정한 값은 표 7와 같이 나타냈다. 이는 SSPCM 혼입률 4% 실험체만이 현행 기준 전단강도 설계식과는 유사한 값을 갖으며, SSPCM 혼입률 6% 실험체는 설계기준에 적합하지 않는 것으로 분석된다.

표 2.1.14 압축강도를 대입한 전단강도

시험체	설계기준에 의한 전단강도 (kN)	실험에 의한 전단강도 (kN)
4%	20.86	21.23
6%	20.39	12.55

SSPCM을 혼입한 콘크리트의 휨 응력은 $f = \frac{3PL}{2BH^2}$ 공식에 적용하여 계산하였고 표 9와 같은 결과를 얻었다. 그러므로 배합 설계식 유도에 따른 휨 응력은 압축강도가 유사하더라도 휨 응력의 경우는 SSPCM 혼입률이 증가함에 따라 저하되는 경향성을 갖는 것으로 분석된다.

표 2.1.15 3점 재하 실험을 통해 얻는 휨 응력

시험체	계산식에 의한 휨 응력 (N/mm2)
4%	5.19
6%	3.07

다만, 3점 재하 실험에서 가해진 하중이 전단력과 휨모멘트로 동시에 가해진 만큼, 순수전단거동을 파악하기 위한 전단실험이 수행되어야 할 것으로 판단된다. 특히, 할렬인장실험에서는 SSPCM이 인장응력에 미치는 영향이 미미한 것으로 파악되었음에도 불구하고, 3점 재하 실험에서는 휨응력이 SSPCM 혼입률에 따라 변화하는 것으로 나타나 순수전단거동을 파악하기 위한 추가 연구가 필요한 것으로 보인다. 또한, 장기적 측면에서의 재료성능을 파악하기 위한 추가 재료실험을 통해 creep이나 건조수축과 같은 특성이 정의된다면, SSPCM이 혼입된 콘크리트의 안정적인 상용화가 가능할 것으로 판단된다.

2절 축열성능이 향상된 중공슬래브의 구조 성능 평가

1. 온수 배관을 포함하는 중공슬래브의 시범 제작 및 구조성능 평가

가. 하중재하실험을 통한 온수배관을 포함하는 슬래브의 휨-전단 성능 평가

SSPCM을 포함하는 이방향 중공 콘크리트 슬래브는 내부의 축열 성능을 확보함으로써 냉난방 설비에 필요한 에너지를 절약하는 장점을 가지고 있다. 그러나 SSPCM을 포함하는 이방향 중공 콘크리트 슬래브 시스템에는 PCM에 열을 전달하는 온수배관이 슬래브 내부에 설치됨으로써 하중 재하시 균열이나 처짐을 증가시킬 가능성이 있어, 이를 확인해 볼 필요가 있다. 따라서 본 연구는 구체축열용 온수 배관이 삽입된 슬래브의 배관 방향에 따른 휨-전단 거동 평가를 위한 실험 연구를 진행하였다.

(1) 실험 변수 및 실험체 제작

온수배관에 따른 슬래브의 휨-전단 성능을 평가하기 위하여 중공체 아래로 지나는 온수배관의 유무와 그 방향을 실험 변수로 정하여 실험체를 제작하였고 실험체 변수는 표 10과 같다. 각 변수의 휨 성능 평가를 위한 PC슬래브는 길이 6000mm, 두께 250mm, 폭 940mm로 제작하였고 전단성능 평가를 위한 PC슬래브는 길이 2700mm, 두께 250mm, 폭 940mm로 제작하였다. 실험체 제작에 사용된 콘크리트는 28일 압축강도 24MPa을 가지며, 중공체 높이는 약 150m, 최대 지름은 약 260mm이다. 중공체는 그림 11와 그림 12과 같이 배치하였으며, 온도배관은 그림 13, 그림 14과 그림 15와 같이 장 방향 또는 단 방향으로 중공체의 중앙 하부를 지나도록 배치되었다.

국토해양부 제정 콘크리트구조기준(2012)에 의거하여, 휨 실험체의 경우 하부 주 철근은 D13, 상부 주철근은 D10으로 배근되었으며, 전단 실험체의 경우, 하부 주 철근은 D16, 상부 주 철근은 D10으로 배근되었다. 온도철근은 실험체에 관계없이 모두 300mm 간격을 갖는 D10 철근으로 배근되었다. 그림 16과 그림 17은 중공체가 삽입된 실험체 제작 사진이다.

표 2.2.1 실험 및 해석 변수 상세

변수 / 실험체명	온수배관방향	휨실험	전단실험
TVS250-PCM-M-P	NA	O	X
TVS250-PCM-M-X	장변	O	X
TVS250-PCM-M-Y	단변	O	X
TVS250-PCM-S-P	NA	X	O
TVS250-PCM-S-X	장변	X	O
TVS250-PCM-S-Y	단변	X	O

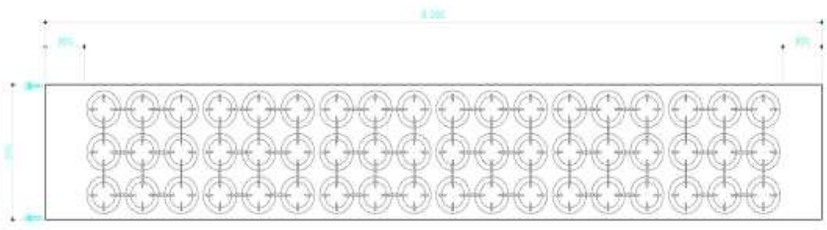


그림 2.2.1 휨 실험체의 중공체 배치와 실험체 단면도

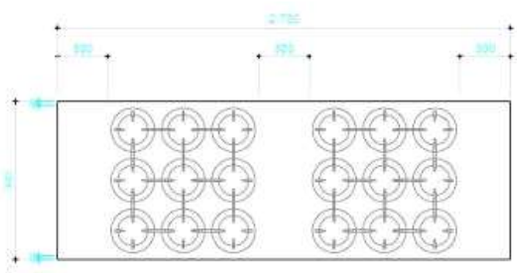


그림 2.2.2 전단실험체의 중공체 배치와 실험체 단면도

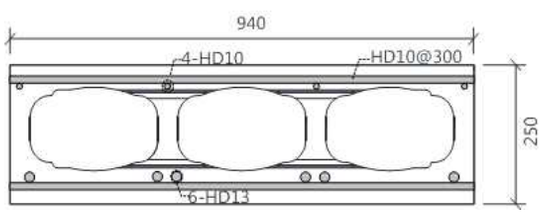


그림 2.2.3 EXP-250-PCM-M(S)-P 실험체의 단면 상세

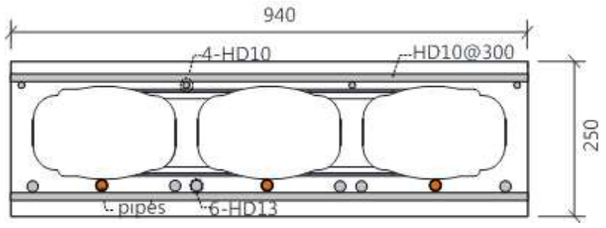


그림 2.2.4 EXP-250-PCM-M(S)-X 실험체의 단면 상세

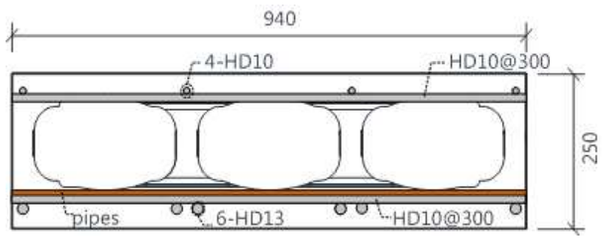


그림 2.2.5 EXP-250-PCM-M(S)-Y 실험체의 단면 상세



그림 2.2.6 중공체가 삽입된 전단 실험체



그림 2.2.7 중공체가 삽입된 휨 실험체

(2) 가력 및 측정 방법

휨-전단 실험체는 제작 후 약 30일간 상온에서 양생한 후, 4점 재하 실험을 수행하기 위해 그림 18와 그림 19와 같이 실험을 진행하고자 하였으며, 그림 20과 같이 지지대 위에 설치하였다. 보의 중앙과 1/4 지점에는 LVDT (Linear Variable Differential Transformer)를 설치하여 가력 중 발생하는 슬래브의 처짐을 기록하였고, 슬래브 상부와 측면에 총 세 개의 콘크리트 게이지를 부착하여 변형률을 측정하였다. 하중은 4점 재하의 형태로 500kN의 로드셀을 이용하여 0.25mm/min의 속도로 가력하였으며, 데이터 로거(Data logger)를 통하여 가력하중과 처짐, 변

형률을 기록하였다.

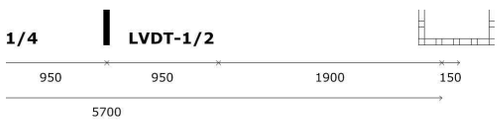


그림 2.2.8 휨 실험체 가력 및 측정 장치

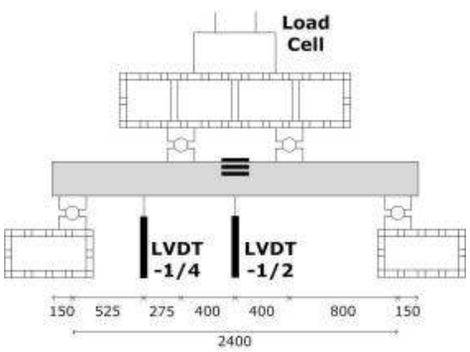


그림 2.2.9 전단 실험체 가력 및 측정 장치



그림 2.2.10 가력 실험 설치

(3) 실험 결과 분석

그림 21와 그림 22는 온수배관 방향에 따른 하중-처짐 곡선을 비교한 것으로 곡선의 형태나 최대 하중이 온수배관의 유무와 배관 방향에 관계없이 매우 유사하여 온수배관이 포함되어도 휨-전단성능에 미치는 영향은 거의 없다.

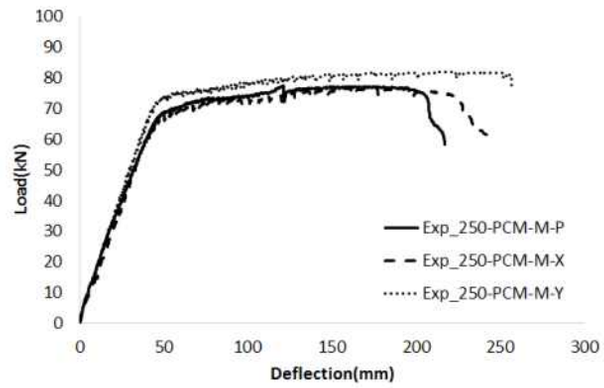


그림 2.2.11 휨 실험체의 하중-처짐 곡선

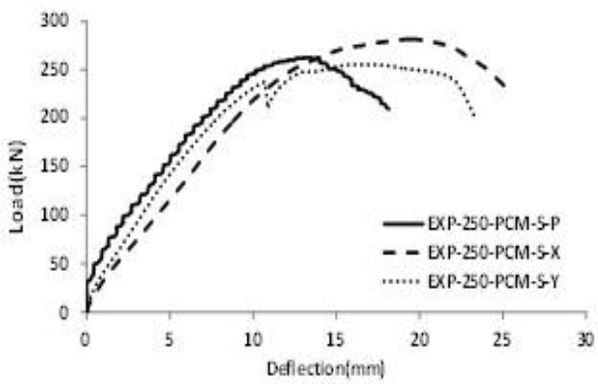


그림 2.2.12 전단실험체의 하중-처짐 곡선

휨 실험의 경우, 온수배관이 포함되지 않은 250-PCM-M-P 실험체가 오히려 다른 실험체에 비해 비교적 일찍 파괴되었으며, 이는 온수배관이 있는 실험체에서 연성이 잘 확보되는 것으로 유추해 볼 수 있다. 온수배관이 단 방향으로 배치된 250-PCM-M-Y 실험체의 경우, 다른 실험체에 비해 최대하중이 약간 크게 나타났으나 그 차이가 10% 미만인 것을 보았을 때 온수배관의 방향에 따른 영향이라고 판단하기는 어렵다. 다만, 실험체를 제작할 때 중공체 하부에 온수배관을 배치하기 위해 250-PCM-M-Y 실험체에서만 주 철근을 온도철근 하부에 배근하게 되는데 슬래브의 유효깊이가 다른 실험체에 비해 약 15mm 가량 커진 것이 그림 21에서 나타난 것과 같은 차이를 나타내게 된 주요 원인이라고 유추해 볼 수 있다. 전단실험의 경우에도 그림 22과 같이 온수배관이 포함되지 않은 실험체가 일찍 파괴되었으며, 최대하중의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

또한, 모든 실험체에서 초기 균열이 발생한 시점도 대부분 비슷하였으며, 그림 23~그림 28에서 보이는 바와 같이 슬래브 측면에서 관찰하였을 때 실험체 모두 유사한 양상의 휨 또는 전단 균열을 볼 수 있다. 가력실험 후 관찰한 슬래브 바닥면에서는 슬래브의 단변 방향으로 큰 균열이 일정한 간격으로 발생한 것을 알 수 있는데, 이는 중공체가 상하로 가장 볼록한 부분, 즉, 전단 면적이 가장 작은 부분을 따라 균열이 발생한 것으로 중공 슬래브에서 통상적으로 나타나는 균열의 양상이라 할 수 있다. 그러나 이러한 균열의 양상은 온수배관의 유무나 방향에 관계없이 유사하게 관찰됨에 따라 온수배관의 유무나 방향이 균열 양상에 영향을 미치지는 않

는 것으로 판단된다.

그림 2.2.13 250-PCM-M-P 실험체의
균열양상



그림 2.2.14 250-PCM-M-X 실험체의
균열양상



그림 2.2.15 250-PCM-M-Y 실험체의
균열양상



그림 2.2.16 250-PCM-S-P 실험체의 파괴 후 균열양상



그림 2.2.17 250-PCM-S-X 실험체의 파괴 후 균열양상



그림 2.2.18 250-PCM-S-Y 실험체의 파괴 후 균열양상

나. 유한요소해석을 통한 PCM 콘크리트 중공슬래브 구조적 거동에 대한 평가

(1) 해석 방법

실험결과의 검증 및 변수해석을 위하여 유한요소 해석기법을 이용하여 구조거동을 예측해 보았다. 해석 변수는 실험 변수와 동일하게 계획하였고, 해석 모델은 실험체와 동일한 크기와 물성치를 갖도록 모델링되었다. 표 10에서 나타난 바와 같이 실험체에 따른 해석모델을 계획하였다. 유한요소 해석을 위해서는 ABAQUS 6.10-3을 이용하였으며, 콘크리트와 철근의 비선형 물성치를 고려한 정적 비선형 기하 해석을 수행하였다. 그림 29~그림 31에서 나타낸 바와 같이, 콘크리트 유한요소는 3차원 사면체 요소가 사용되었으며, 철근은 3차원 트러스 요소로 구축되었다. 구조거동에 크게 영향을 미치지 않는 PCM이나 중공체는 따로 유한요소로 모델링하지 않고 빈 공간으로 모델링하였다.

표 2.2.2 실험 및 해석 변수 상세

실험 변수 (EXP- : 실험체, FEA- : 해석모델)	온수배관 방향
EXP-250-PCM-M-P FEA-250-PCM-M-P	없음
EXP-250-PCM-M-X FEA-250-PCM-M-X	x-축
EXP-250-PCM-M-Y FEA-250-PCM-M-Y	y-축
EXP-250-PCM-S-P FEA-250-PCM-S-P	없음
EXP-250-PCM-S-X FEA-250-PCM-S-X	x-축
EXP-250-PCM-S-Y FEA-250-PCM-S-Y	y-축

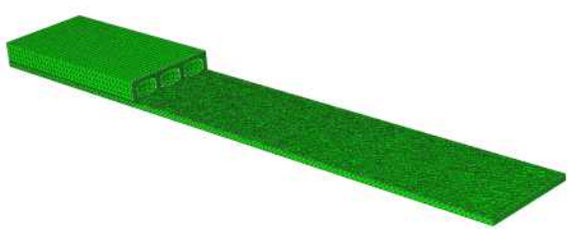


그림 2.2.19 FEA-250-PCM-M-P
유한요소모델의 부분단면

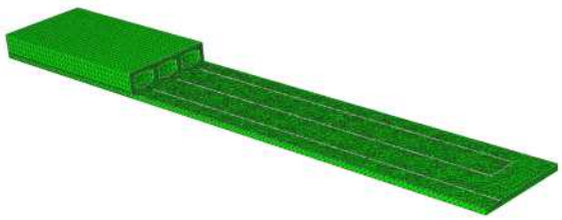


그림 2.2.20 FEA-250-PCM-M-X
유한요소모델의 부분단면

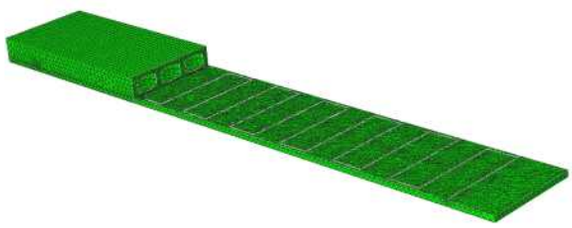


그림 2.2.21 FEA-250-PCM-M-Y
유한요소모델의 부분단면

(2) 해석 결과

구조해석 결과 나타난 하중-처짐 곡선과 응력분포를 비교 분석해 보았다. 먼저, 가력실험과 모든 조건을 동일하게 하여 해석을 수행한 모델에 대해 실험에서 얻은 하중-처짐 곡선과 비교해 보았다. 그림 32에서 나타낸 바와 같이 FEA로 시작하는 휨 실험체에 대한 해석 모델의 하중-처짐 곡선은 온수배관의 유무와 배관 방향에 관계없이 유사하였으며, 실험결과와 비교해도 매우 비슷한 것을 알 수 있다. 다만, 초기 강성은 실험결과에 비해 해석결과가 약간 높게 나타나는 경향이 있는데, 이는 철근을 모델링할 때, 유한요소 모델에서는 온도철근과 상하부 주 철근, 콘크리트가 모두 완벽하게 일체화 되어 있는 것으로 모델링을 하였으나 실제로는 가력 초기에 중공체가 약간씩 움직이면서 온도철근과 주 철근 사이, 콘크리트와 철근의 접착력이 떨어져 강성에도 영향을 미치기 때문인 것으로 이해할 수 있다. 다만, 이러한 차이를 극복하기 위해 철근과 철근이 닿는 부분에 새로운 경계조건을 입력하거나 철근과 콘크리트의 계면을 모델링하는 방법은 매크로한 구조거동을 파악하고자 하는 본 연구의 범위에서 벗어나기 때문에 생략하기로 한다. 따라서 초기강성에서 나타나는 미미한 차이를 무시하고 보았을 때, 실험결과와 해석결과에서 나타나는 전체적인 하중-처짐의 곡선이 매우 유사하므로 본 해석에 사용된 모델링 방법은 적절한 것으로 판단된다. 반면, 그림 33에서 전단실험체의 해석모델에 대한 하중-처짐 곡선을 살펴보면, 실험결과와 해석결과가 다소 상이한 양상을 보인다. 이는 전단실험에서 전단거동이 주거동이 되는 것에 반하여, 해석모델에서는 콘크리트 전달모델이 포함되어 있지 않아 나타나는 것으로 분석된다.

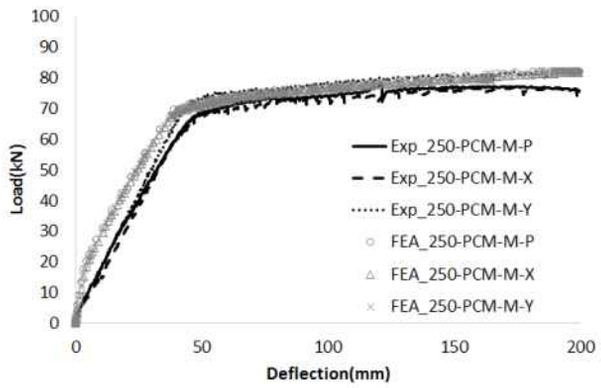


그림 2.2.22 휨실험체의 해석과 실험의 하중-처짐 곡선

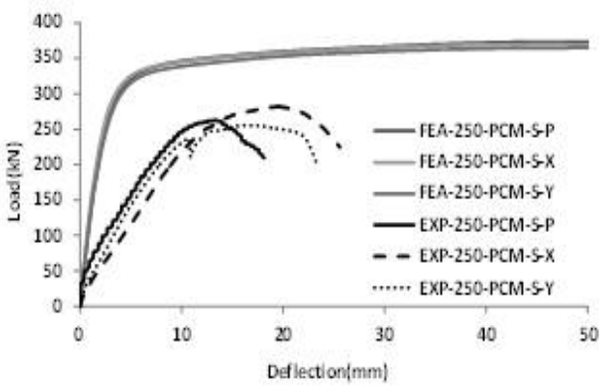


그림 2.2.23 전단실험체의 해석과 실험의 하중-처짐 곡선

그림 34~그림 36은 휨 실험을 시뮬레이션 한 모델 측면에서의 주응력을 나타낸 그림으로, 온수배관의 유무나 배관 방향에 관계없이 유사한 크기의 응력분포 양상을 가지고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 통상적으로 휨 부재를 해석했을 때 상부 압축응력과 하부 인장응력이 고르게 분포되어 나타나는 양상과는 달리, 응력의 분포가 고르지 않고 경계면이 울퉁불퉁한 것이 관찰되었다. 중공체 주변에서 응력의 집중현상이 나타나기 때문인데, 이를 좀 더 자세히 살펴보기 위해 슬래브 모델의 부분 단면을 그림 37~그림 39에 나타냈다. 그림 37~그림 39에서 보이는 바와 같이 중공체가 상하로 볼록한 부분, 즉, 전단 면적이 가장 작은 부분에서 비교적 높은 응력분포가 나타나고 있는데, 중공체에 의한 단면 결손으로 인해 힘을 받을 수 있는 콘크리트의 면적이 작기 때문에 상대적으로 높은 응력분포를 나타내는 것으로 이해할 수 있다. 그러나 온수배관에 의한 단면결손은 중공체 면적에 비해서 아주 작기 때문에 응력분포의 양상이나 크기에 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

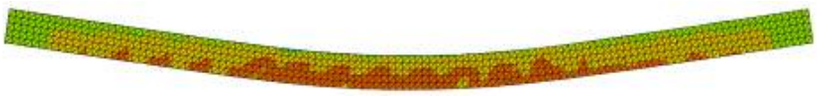


그림 2.2.24 FEA-250-PCM-M-P 모델 측면의 주응력 분포

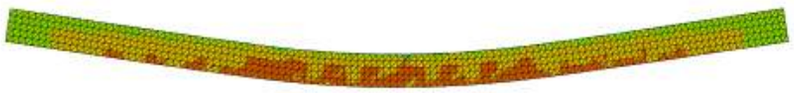


그림 2.2.25 FEA-250-PCM-M-X 모델 측면의 주응력 분포



그림 2.2.26 FEA-250-PCM-M-Y 모델 측면의 주응력 분포

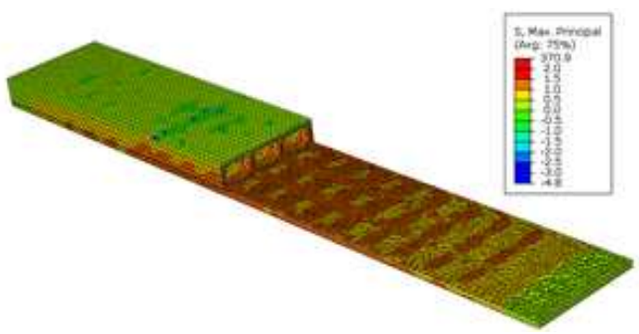


그림 2.2.27 FEA-250-PCM-M-P 모델 부분
단면에서의 주응력 분포

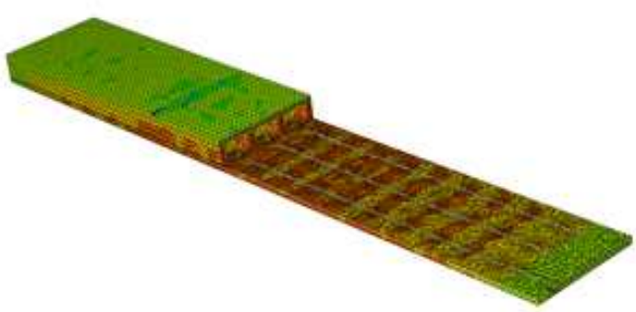


그림 2.2.28 FEA-250-PCM-M-X 모델 부분 단면에서의
주응력 분포

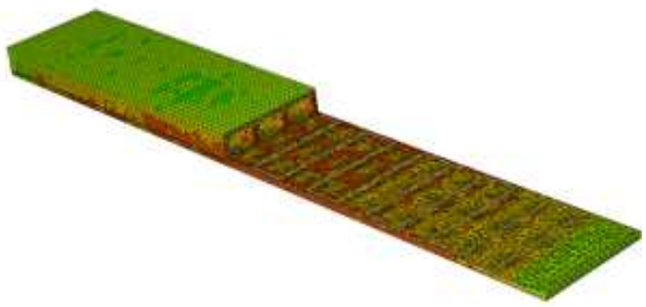


그림 2.2.29 FEA-250-PCM-M-Y 모델 부분 단면에서의 주응력 분포

다. PCM 온도변화에 따른 중공슬래브의 유한요소해석을 통한 구조 거동 평가

(1) 해석 방법

본 연구에서는 온수배관을 통해 슬래브 내부에 열이 도달했을 때 나타나는 구조거동의 변화를 파악하기 위하여 해석 연구를 수행하였다. 유한요소해석 기법을 이용하면 실제로 온수배관에 일정한 온도의 온수를 보내면서 가력실험을 수행해야 하는 시간적, 경제적 어려움 없이 비교적 정확하고 빠르게 열적변화에 의한 구조거동 변화를 관찰할 수 있을 뿐 아니라, 중공체와 온수배관 주변의 콘크리트에서 발생하는 응력변화를 예측할 수 있는 장점이 있다. 앞서 실험결과와의 비교 분석을 통하여 검증된 해석모델을 이용하여 열 해석을 진행하였다. 표 11은 열전달 해석을 한 해석모델과 열전달을 고려하지 않은 기존 해석모델을 나타낸다. 온수배관의 유무와 배관의 방향에 따른 구조성능의 차이가 없으므로 열 전달해석은 장방향으로 배관이 배치된 해석모델에 대해서만 진행하였다. 열적 변화를 고려하여 구조거동을 파악하기 위해서는 콘크리트와 철근의 온도에 따른 물성치 변화를 고려해야하기 때문에, 온도에 따른 열팽창 계수와 탄성계수의 변화를 그림 40과 그림 41과 같이 입력하였다. 열팽창 계수와 탄성계수의 변화정도는 골재의 화학적 성분에 따라 달라지는데, 국내에서 채취된 대부분의 골재는 규질을 띄고 있어 Siliceous를 기반으로 한 물성치를 사용하였다. 또한, 온수배관과 PCM의 온도가 50℃로 동일해졌을 때를 가정하여, 온도가 콘크리트와 철근에 전달될 수 있도록 콘크리트와 철근의 비열과 열전도율 값을 입력하였다. PCM은 경제성과 설비 효율을 감안하였을 때, 중공체 내부에서 약 30mm의 깊이 정도로만 차 있는 것으로 가정하고 해당 부분에만 50℃의 온도조건을 부여하였으며 온수배관에는 전체 절점에 50℃를 부여하였다. 또한, 슬래브 외부와 단면에서 발생하는 주응력 분포와 함께, 온수배관과 중공체를 중심으로 온도가 전파되는 양상을 분석할 수 있었다.

표 2.2.3 실험 및 해석 변수 상세

실험체	온수배관 방향	열 전달해석
FEA-250-PCM-M-P	없음	없음
FEA-250-PCM-M-X	x-축	없음
FEA-250-PCM-M-Y	y-축	없음
FEA-250-PCM-M-X-Heated	x-축	고려함

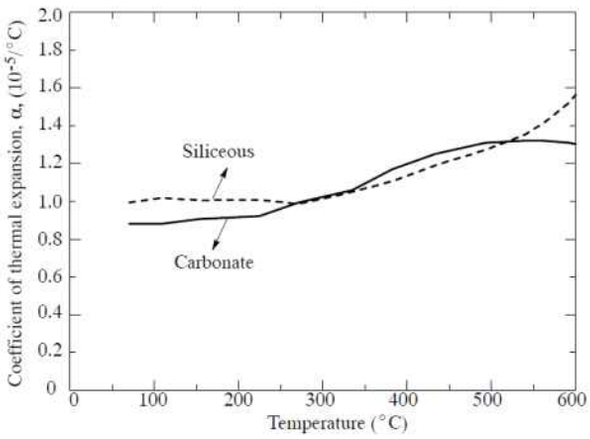


그림 2.2.30 온도에 따른 콘크리트 열팽창 계수

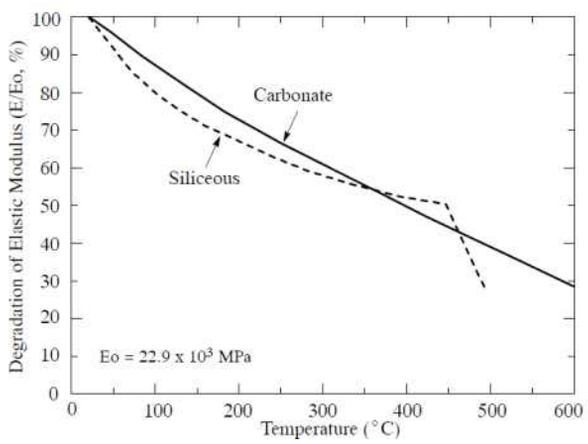


그림 2.2.31 온도에 따른 콘크리트 탄성계수 저감률

(2) 해석 결과

FEA-250-PCM-M-X-Heated 모델을 사용하여 PCM이 들어가 있는 중공체 하부와 온수배관이 놓인 부분에 동일하게 50℃의 초기 온도를 주고 가력실험에서 수행한 방법과 동일하게 하중을 가력하여 그 결과를 그림 42~그림 45로 나타냈다. 결과적으로 중공체 하부와 온수배관 부위에 상대적으로 높은 온도가 분포하고 있으며, 인접해 있는 콘크리트로 열이 전달되는 것을 볼 수 있다. 열전달 해석 결과로부터 이방향 중공슬래브모델의 하중-처짐 곡선을 구하여 열전달을 고려하지 않은 해석결과와 비교했을 때에도 매우 유사한 것을 알 수 있다. 따라서 이방향 중공 슬래브에 축열성능을 더하기 위하여 온수배관을 통해 약 50℃의 열을 전달하는 것은 구조거동에 영향을 미치지 않는 것으로 판단할 수 있다. 슬래브 측면과 부분단면에서의 주응력 분포도 열응력을 고려하지 않고 해석을 수행하여 얻은 그림 35와 그림 38은 주응력의 분포나 값의 측면에서 차이가 없어, PCM을 포함하는 이방향 중공슬래브의 열적변화에 따른 구조 및 역학적 거동의 차이는 미미한 것으로 사료된다.

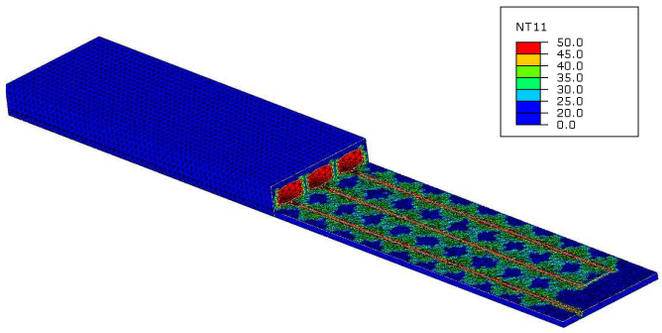


그림 2.2.32 열전달 해석결과 온도분포 양상

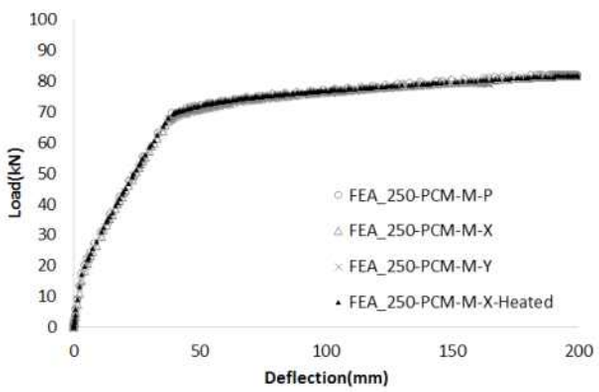


그림 2.2.33 열전달 해석의 하중-처짐 곡선 비교

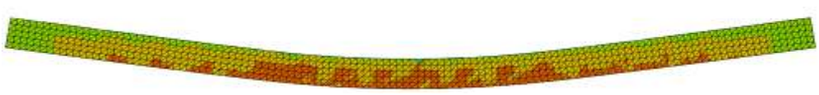


그림 2.2.34 열전달 해석결과 슬래브 측면의 주응력 분포

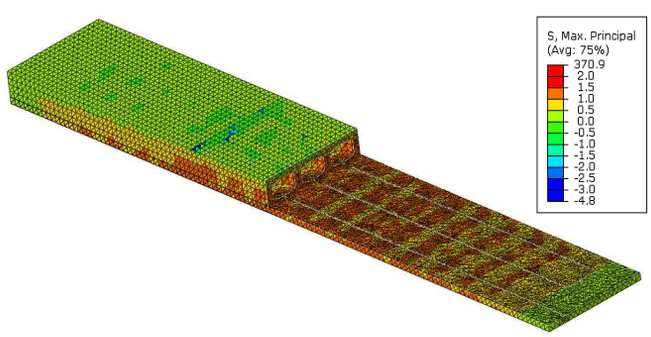


그림 2.2.35 열전달 해석결과 슬래브 부분단면에서의 주응력 분포

2. SSPCM을 혼입한 콘크리트의 구조적 거동과 구조실험 설계 지침

가. SSPCM을 혼입한 중공슬래브의 구조적 거동 평가

(1) 해석 방법

본 연구에서는 SSPCM을 혼입한 콘크리트를 사용하여 중공슬래브를 제작하고, 온수배관을 통하여 SSPCM에 열이 도달했을 때 나타나는 구조거동의 변화를 파악하기 위해 ABAQUS 6.10-3 프로그램을 통해 모델링을 수행하고 유한 요소 해석을 수행하였다. 해석 대상이 되는 중공 슬래브의 길이는 6000mm, 폭 940mm, 두께 250mm이며, 중공체의 높이는 150mm, 지름은 260mm으로 슬래브에 중공체를 장변 방향으로 19열 배치하였으며, 그림 46과 같다.
온수배관은 중공체 아랫면에 장방향 배치하였고, 철근은 국토 교통부 제정 콘크리트 기준에 따른 사무실 용도로 가정하여 상부 주 철근과 온도 철근은 HD-10, 하부 주 철근은 HD-13으로 배근하였으며, 그림 47과 같다.

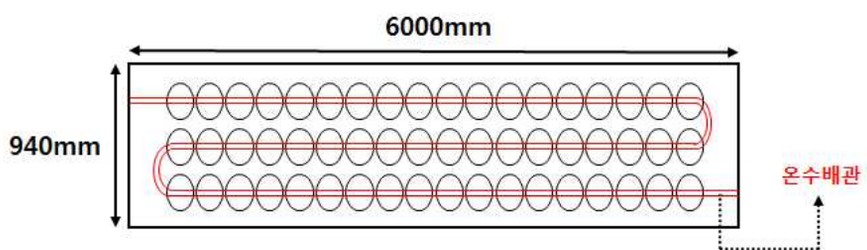


그림 2.2.36 SSPCM이 혼입된 콘크리트 중공 슬래브 평면

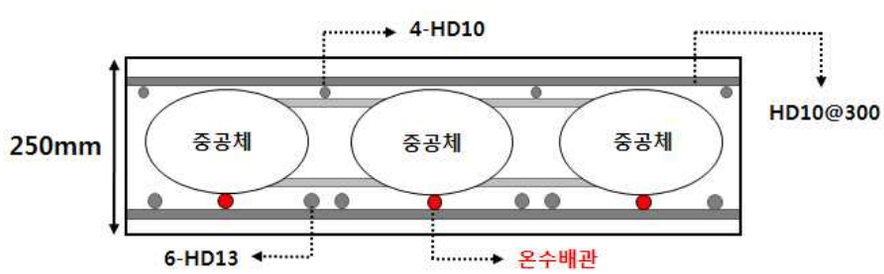


그림 2.2.37 SSPCM이 혼입된 콘크리트 중공 슬래브 단면

SSPCM을 혼입한 콘크리트 중공 슬래브는 3차원 사면체 요소로 모델링하였고, 철근은 3차원 트러스 요소를 이용하여 모델링하였다. 중공체와 온수배관의 경우에는 구조거동에 기여하는 바가 극히 미미할 것이라 판단되어 물성치는 모델링하지 않고 빈 공간으로 모델링 하였다. 그리고 중공 슬래브의 지지점은 단순지지 형태인 힌지와 롤러를 슬래브 끝단에 모델링 하였고, 하중은 4점 재하의 형태로 설계하중을 적용하고 철근과 콘크리트는 완벽히 일체화되어 있는 것으로 가정하여 해석을 수행하였다. 모델링 한 슬래브의 모습과 온수배관과 중공체가 배치된 모습은 그림 48과 같다.

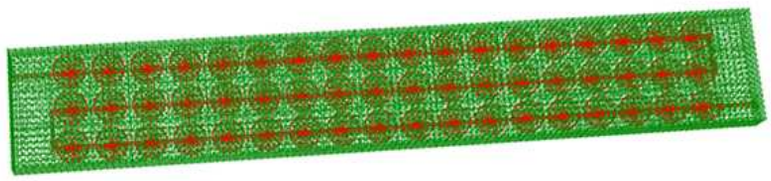


그림 2.2.38 아바쿠스를 이용한 SSPCM 혼입 콘크리트 중공 슬래브 설계

(2) 해석 결과

앞서 재료실험을 통해 얻은 35CONT, 35PCM2R, 35PCM4R, 35PCM6R 총 4종류의 PCM 혼입콘크리트 응력-변형률 곡선을 대입하여 중공 슬래브를 모델링하고 유한요소 해석을 수행하여 양쪽 지지점의 수직 반력을 합산하여 구한 하중 값과, 가장 변위가 클 것으로 예상되는 슬래브 하부의 중간 부분에서의 처짐 값으로 하중-처짐 곡선을 그림 49와 같이 나타냈다. 그림에서 나타낸 바와 같이 SSPCM 혼입률에 따른 압축강도 차이가 있다고 하더라도 주거동에는 큰 차이가 나타나지 않았는데, 이는 슬래브의 휨 거동에 있어서 인장 철근이 주 역할하기 때문인 것으로 분석된다.

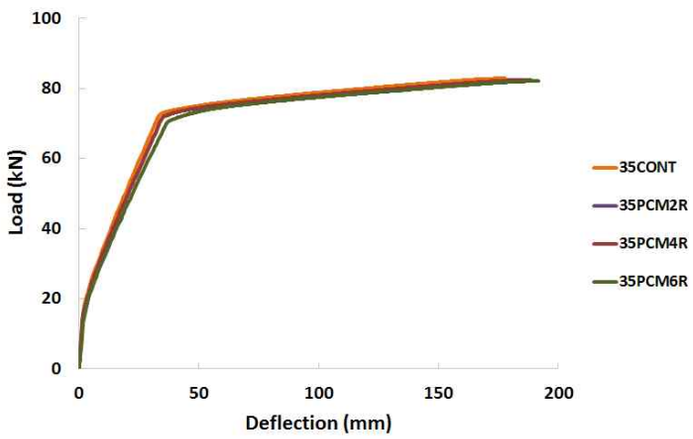


그림 2.2.39 하중-처짐 곡선

SSPCM 혼입 중공 슬래브의 유한 요소 해석 결과에서 주응력 분포를 그림 50과 그림 51를 통해 살펴보면, 35CONT, 35PCM2R, 35PCM4R, 35PCM6R 4종류 모두 중공체가 있는 슬래브의 중간 부분에서 응력 집중현상을 확인할 수 있었다.

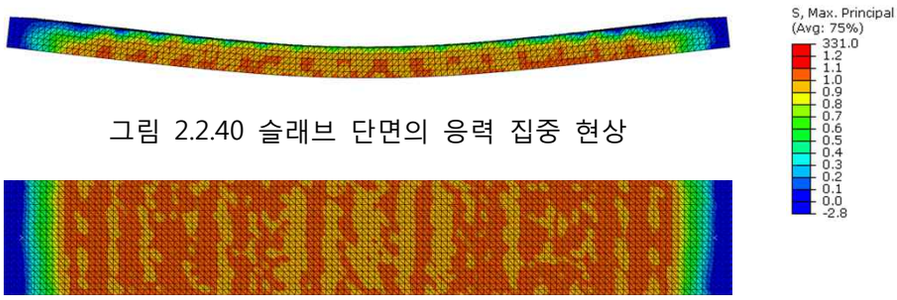


그림 2.2.40 슬래브 단면의 응력 집중 현상

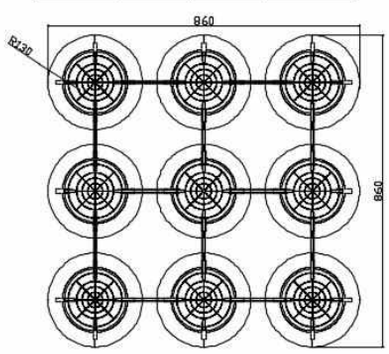
그림 2.2..41 슬래브 하부의 응력 집중 현상

나. 구조 설계 지침

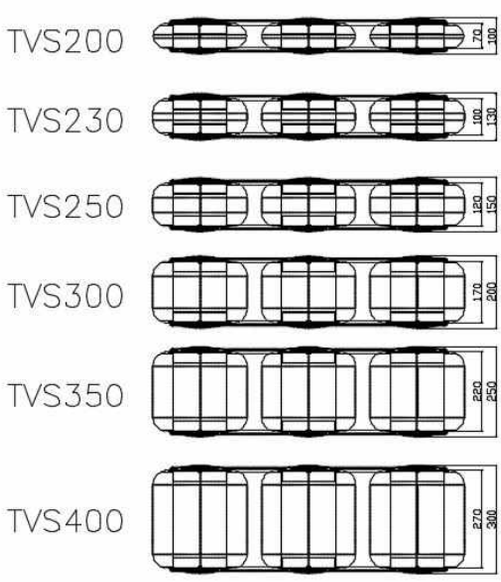
(1) 구조 설계 지침의 기본 목표 및 적용 범위

SSPCM을 혼입한 콘크리트의 구조적 안전성을 평가하고자 SSPCM의 혼입율 4%, 6%의 콘크리트를 휨-전단 거동을 기존에 제안된 현행 구조 설계식과 비교해보았다. 이를 기존에 제안된 현행 구조 설계식이 실험값과 유사한 경우에는 기존의 설계식을 그대로 사용하고자 하며, 기존 설계식이 실험값과 부합하지 않을 경우에는 기존의 설계식을 보완하여 SSPCM 혼입률에 따른 새로운 구조 설계 지침을 제안하고자 하였다. 본 연구에서는 SSPCM 혼입에 따라 저하되는 압축강도를 고려한 새로운 배합설계 기법(pp. 78, 5장 참고)에 따라 콘크리트 슬래브로 사용 가능한 목표강도를 만족시킬 수 있는 것으로 평가되었으며, 중공체는 아래 그림과 같이 슬래브 두께에 따라 납품이 가능하도록 모듈화 되어 제작된다.

구분	슬래브 두께	경량체 높이	스트로폼 높이
TVS200	200	100	70
TVS230	230	130	100
TVS250	250	150	120
TVS300	300	200	170
TVS350	350	250	220
TVS400	400	300	270



[평면]



[단면]

그림 2.2.42 슬래브 두께에 따른 중공체 설계 매뉴얼 (mm)

앞서 수행한 실험 및 해석결과, 새로 제시된 배합설계 기법에 따라 SSPCM이 혼입된 콘크리트를 배합하고, 현행 구조 설계식에 따라 슬래브 설계를 수행하는 경우, 휨 거동은 일반 콘크리트 슬래브와 유사하게 발휘되는 것으로 나타나, SSPCM이 혼입된 중공 슬래브의 휨설계는 새로 제시된 배합설계 기법과 현행 구조설계식을 따르는 것으로 제안할 수 있다.

(2) 전단강도에 대한 구조 설계 지침

현행 기준의 전단강도 설계 원칙에서 해당 부재의 전단력이 작용하는 단면은 수식 7을 이용하여 기본으로 설계되고 있는데, 이를 따라 SSPCM 혼입률 전단강도 분석한 결과를 대입하여 전단 설계 지침을 제안하고자 한다.

$$V_u \leq \varnothing V_n$$

수식 7 기본
전단강도
설계원칙

수식 7에서의 V_u는 해당 단면의 계수 전단력이고 V_n은 공칭전단강도을 의미하는데, 여기서의 V_n은 수식 8과 같이 전개되며 V_c는 콘크리트의 전단강도, V_s는 전단철근의 전단강도이다. V_c는 콘크리트의 전단강도는 수식 9를 이용하여 구할 수 있는데, 콘크리트의 전단강도 V_c에 SSPCM이 혼입된 콘크리트의 실험값을 대입하여 이를 비교해보고자 한다.

$$V_n = V_c + V_s$$

수식 8 공칭
전단강도

$$V_c = \frac{1}{6} \times \sqrt{f_{ck}} \times b \times d$$

수식 9 현행 기준의
전단강도 설계식

수식 9를 이용하여 계산한 설계강도 24MPa로 설정된 SSPCM 혼입률 4% 콘크리트와 SSPCM 혼입률 6% 콘크리트의 전단강도를 분석한 결과, SSPCM 혼입률 4% 콘크리트만이 현행 기준의 전단강도 설계식에 적합하였으며, SSPCM 혼입률 6% 콘크리트는 부 적합하고, 현행 기준의 전단강도 설계식의 60%의 강도가 발현되는 것으로 분석할 수 있었다. 그러므로 SSPCM 혼입률 6%의 실험체의 전단강도 설계식은 수식 9에 강도감소계수로 0.6을 곱하여 수식 10으로 제안한다.

$$V_c = 0.6 \times \frac{1}{6} \times \sqrt{f_{ck}} \times b \times d$$

수식 10 SSPCM 혼입율 6%
전단강도 설계식

따라서 제안된 수식 9와 수식 10은 실험을 통해 얻은 SSPCM 혼입률 4% 콘크리트 전단강도 V_c와 SSPCM 혼입률 6% 콘크리트 전단강도 V_c에 모두 부합하게 된다. 또한, 수식 8의 공칭 전단강도 V_n은 수식 11과 같이 변형할 수 있으며, 얻어진 콘크리트 전단강도 V_c를 이용하여 전단철근 전단강도 V_s의 값을 구할 수 있다.

$$V_s = V_n - V_c$$

수식 11 전단철근
전단강도

3절 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템의 설계 및 운영 기술

1. 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템의 설계 프로토타입 선정

가. 구체축열 복사냉난방시스템의 기존 연구 동향

전통적으로 국내에서는 주거건물에서 복사난방시스템이 적용되어왔다. 이에 90년대 초반에는 축열 성능 개선을 위해 PCM을 이용한 바닥난방시스템에 대해 연구를 수행한 바 있다. “잠열축열식 온돌”이라 불리기도 한 이 시스템은 약 30°C에서 상변화를 수반하는 물질을 이용한 것으로서, 캡슐형과 파이프 봉입형으로 구분하여 전기열원으로 발열선을 이용하여 주거건물의 바닥난방에 적용하기 위한 시스템으로 개발되었다. PCM의 종류로는 염화칼슘6수화물(CaCl2 • 6H2O)로서 잠열의 크기는 45kcal/kg이며, 국내에서 생산 가능한 재료로서 캡슐형으로 포장되어 패널 형식으로 제작되어 바닥복사난방에 활용되었다. 이 시스템은 슬래브 위에 PE 필름을 깔고 단열재를 설치하고, 그 위에 다시 PE필름이 설치되고, 잠열재가 시공된 뒤 시멘트 모르터가 타설되고 바닥마감재가 시공되는 순서로 설치된다. 심야전기를 이용하여 발열선에 전기를 인가하면 열이 발생하여 축열이 되는 방식이다. 당시에는 기존 자갈을 잠열 축열재로 대신함으로써 골재난을 해소하고 공정을 단순화하기 위한 목적이 있었으며, 축열을 통해 간헐난방이나 운전방식에 따른 에너지 절감 효과를 제시한 바 있다.

최근에 있어서는 공동주택에서 충분한 열용량을 확보하면서도 바닥 구조체 두께를 줄이기 위한 목적으로 PCM물질을 활용하여 온수 바닥난방시스템이 개발된 바 있다. 이 경우에는 PCM물질로서 상변화온도 및 잠열량, 가격 등을 고려하여 약 32.4°C에서 상변화가 일어나는 황산나트륨 10수화물(Na2SO4 • 10H2O)을 조핵제, 계면활성제, 증점제와 혼합하여 사용하였으며, 건축재료 연구와 병행되어 연구가 진행되었으며 기존 습식 온돌과 비교하여 약 3배 가량 축열량이 크게 나타나는 것으로 보고하였다. 지금까지 국내에서는 주거건물의 복사난방시스템 성능 개선을 위해 PCM 재료를 활용한 연구가 수행되어 왔으나, 기존 습식 온돌난방에서 모르터가 갖는 축열재로서 기능을 보완하기 위한 개선안으로서만 연구가 수행되어 왔다. 반면 최근까지 외국에서는 슬래브나 벽체, 기초 등 건물 구조체 자체를 축열체로서 활용하여 신재생에너지와 연계된 공조시스템을 구축함으로써 오피스나 박물관 등 다양한 건물에서 효율적인 에너지 사용을 가능하게 있다. 나아가 PCM 재료를 활용하여 구조체의 축열성능을 향상함으로써 신재생에너지나 미활용에너지의 활용 가능성을 높이고, 축열성능을 고려한 예측제어 방식 등 에너지 절감을 고려한 다양한 설비 기술이 접목되고 있다. 뿐만 아니라, 축열에 따른 반응 시간 지연 효과를 고려하여 설계 단계에서부터 시공, 운전 단계에 이르기까지 건물에서 체계적으로 관리될 수 있도록 시스템이 구축되고 있다.

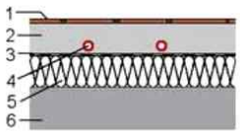
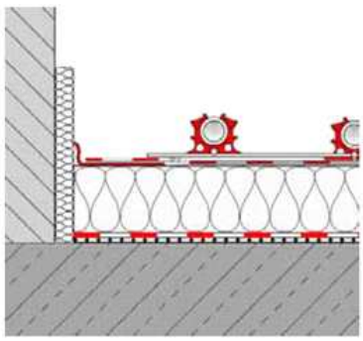
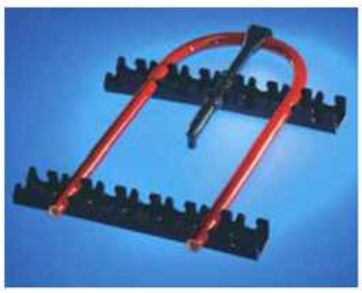
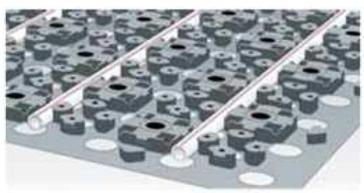
나. 복사냉난방시스템 사례 조사 및 중공슬래브 적용 프로토타입 선정

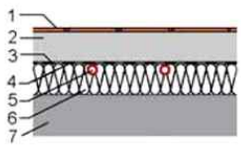
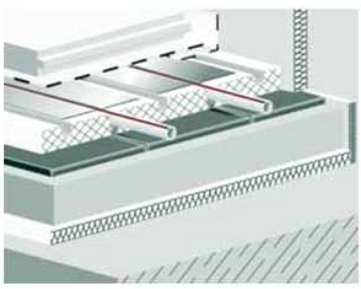
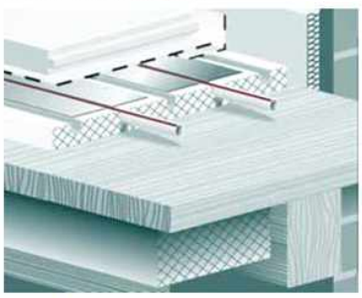
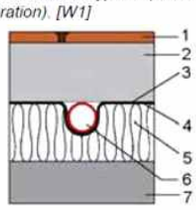
rehva(2007)의 Low temperature heating and high temperature cooling에 의하면 복사 냉난

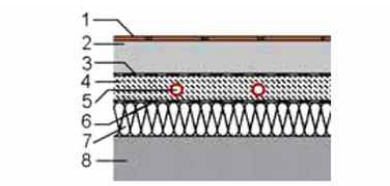
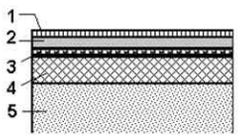
방 시스템은 크게 복사 냉난방 패널 타입 (Radiant heating and cooling panels), 바닥 매설 타입 (Embedded surface heating and cooling system), 콘크리트 구조체를 축열체로 이용하는 구체축열시스템 (Thermally activated building system)으로 나눌 수 있다. 구조체와는 무관하게 설치되는 복사 냉난방 패널 타입의 경우는 콘크리트 중공 슬래브를 이용하는 본 연구 범위에서 제외시킬 수 있다. 바닥 매설 타입 및 구체축열시스템은 설치방식 및 방열(축열)특성에 따라 표 1과 같이 크게 7가지 프로토타입 (Prototype)으로 나눌 수 있다.

표 2.3.1 복사 냉난방 시스템 프로토타입

바닥 매설 타입 (Embedded surface heating and cooling system)			
Type명	이미지	특징	관련 기준

Type A	 **Figure 4.9** *Floor structure type A (EN15377, EN1264): 1 = Floor covering, 2 = Weight bearing, and thermal diffusion layer (cement screed, anhydrite screed, asphalt screed), 3 = Polyethylene foil, 4 = Pipes, 5 = Thermal insulation, 6 = Ceiling/Building structure.*  **Figure 7.3 a** *System type A, holder 1. (Source: Uponor Corporation). [W1]*  **Figure 7.3 b** *System type A, holder 1. (Source: Uponor Corporation). [W1]*  **Figure 7.3 c** *System type A, holder 2.*  **Figure 7.3 d** *System type A, holder 3. (Source: Uponor Corporation). [W1]*	System with pipes embedded in the screed or concrete (“wet” system)	스크리드에 습식으로 매설된 시스템을 의미함. 국내 및 유럽의 바닥 난방에 있어서 가장 일반적인 형태임. 단열층 위쪽으로 파이프 코일을 위치시킨 후, 스크리드를 시공하여, 파이프가 완전히 묻히게 함. 스크리드 층은 파이프를 흐르는 열매체(온수)로부터 열을 받아(전도 열전달), 실내 방열면으로 전달하는 역할을 하게 됨.

Type B	 **Figure 4.10 a** *Floor structure type B (EN15377, EN1264): 1 = Floor covering, 2 = Weight bearing and thermal diffusion layer (cement screed, anhydrite screed, asphalt screed), 3 = Polyethylene (PE) foil, 4 = Heat conducting (diffusion) plate (device), 5 = Pipe coil, 6 = Thermal insulation, 7 = Ceiling/Building structure.*  **Figure 7.3 e** *Installation of type B. (Source: Uponor Corporation). [W1]*  **Figure 7.3 f** *Installation of type B. (Source: Uponor Corporation). [W1]*  **Figure 4.10 b** *Floor structure type B (EN15377, EN1264): 1 = Floor covering, 2 = Screed, 3 = Splitting foil layer, 4 = Screed, 5 = Pipe coil, 6 = Vapour barrier, 7 = Thermal insulation, 8 = Ceiling/Building structure.*	System with pipes embedded outside the screed (“dry” system)	단열층에 파이프 코일을 매설한 시스템. 단열층에 매설되어 있기 때문에 수평적인 열흐름을 제한할 수 있음. 온도 분포를 향상시키기 위해 heat conducting elements를 이용하기도 함. Metal conducting device와 같은 건식 스크리드에 매설되므로, 습식 시스템에 비해 열용량은 낮은 편임.

Type C	 ***Figure 4.11*** *Dry floor structure type C: 1 = Floor covering, 2 = Weight bearing and thermal diffusion layer (cement screed, anhydrite screed, asphalt screed), 3 = Splitting foil layer (vapour barrier), 4 = Heat conducting plate (device), 5 = Thermal insulation layer (System plate), 6 = Pipe coil, 7 = Ceiling/Building structure.*	System with pipes embedded in the screed	파이프 코일이 두 번째 스크리드 층에 매설된 시스템. Type A 시스템과 유사함.
Type D	 ***Figure 4.12*** *Heating cooling floor with plane section system - type D, with 1 = Floor surface covering, 2 = Screed material, 3 = Plastic plane section boards, 4 = Acoustic insulation and 5 = Building structure.*	Plane section systems	플라스틱 파이프 대신, 모세관 그리드(capillary grids)를 형성하고 있는 플라스틱 패널을 이용하는 시스템. 이 경우, 열교환되는 표면이 매우 넓기 때문에 이론적으로 매우 균일한 표면 온도 분포를 나타낼 수 있음. 5mm 두께의 모듈로 매우 좁은 바닥 구조체도 만들 수 있어, 개보수 시 많이 사용됨. 비용이 고가이며 설치 과정에서 품질 확보가 어렵기 때문에, 상용화는 되었으나 최근에는 거의 사용하지 않음.

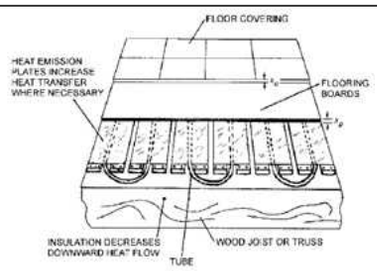
<table>
<tr>
<td>Type G</td>
<td>


Figure 4.13 a Pipe in subfloor, type G (EN15377-1) [C14] [1]

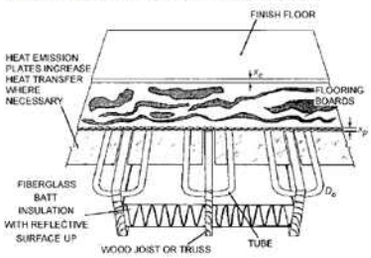
Figure 4.13 b System construction [C14]


Figure 4.14 a Pipe under subfloor, type G (EN15377) [C14] [1]

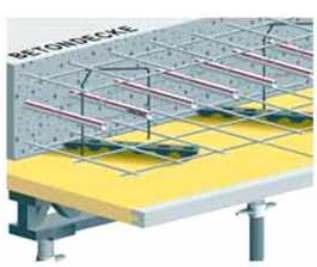
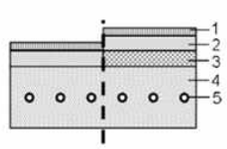
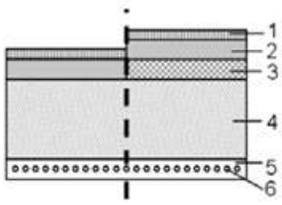
Figure 4.14 b System construction [C14]
</td>
<td>System with pipes embedded in a wooden construction</td>
<td>목재 구조에 다양한 시공 방법을 이용해서 냉난방 파이프를 매설할 수 있음.
파이프는 바닥 표면에 부착되거나, sub floor로 사용되는 콘크리트 혹은 gypsum 보드 층에 매설되거나, 열전달 효율을 높이기 위해 금속 패널로 된 sub floor에 부착될 수 있음.
최적의 바닥 온도 및 쾌적을 위해서, 파이프는 주로 50~100mm 간격으로 배치됨.</td>
</tr>
<tr>
<td colspan="4">구체축열시스템 (Thermally activated building system)</td>
</tr>
<tr>
<td>Type E</td>
<td>

Figure 4.21 a 3D ceiling and floor building structure. (Source: Uponor Corporation). [W1]


Figure 4.21 b TABS with and without acoustic insulation, 1 = floor surface covering, 2 = screed, 3 = acoustic insulation, 4 = building structure and 5 = plastic pipes.
</td>
<td>System with pipes embedded in the massive concrete slabs</td>
<td>벽체나 층간 슬래브에 파이프가 매설됨. 열매체로 냉온수 외에 공기 등의 다른 것도 가능함.
그림 4.21과 같이 콘크리트 슬라브 중앙 철근 사이로 파이프가 매설됨. 파이프의 매설 위치는 TABS 설계 접근 방법에 따라 달라질 수 있음.
파이프 직경은 17~20mm 정도임.
파이프 매설 간격은 150~200mm 임.
파이프 코일은 금속 그리드 위에 부착된 모듈 형태로 공급되며, 건물 현장에 직접 설치됨.
열용량을 크게 만들기 위해, 구조체에 파이프를 매설함.</td>
</tr>
</table>

Type F	 ***Figure 4.22 b*** *TABS "F" with and without acoustic insulation, 1 = floor surface covering, 2 = screed, 3 = acoustic insulation, 4 = building structure, 5 = plastic micro pipes and 6 = plaster or gypsum.*  ***Figure 4.22 a*** *Construction of a cooling grid. [39]*	Capillary pipes embedded in a layer at the inner surface	그림 4.22와 같이 직경 5mm의 작은 플라스틱 튜브로 그리드를 만들어, 슬래브에 부착되는 plaster or gypsum board에 매설하는 시스템임. 바닥 및 벽체 모두에 적용되며, 방음 및 차음을 위한 패널에 매설될 수도 있음. 이 시스템은 독일에서 개발되었으며, 현재 상용화됨. 기본적으로 냉방을 위한 것이며, 플라스틱 튜브를 이용하기 때문에 유연하게 적용이 가능하여, 건물의 개보수에 사용됨. 냉방 시, 상부 구조체로의 열전달이 이루어지며, 따라서 간접적으로 건물 구조체의 열용량을 이용하게 됨. (secondarily activated) -> Type E보다 반응시간은 빠름.

본 과제에서 제안하는 PCM을 활용한 구체축열 공조시스템에서의 PCM 활용 중공 축열 구조체는 그림 1, PCM 매트 활용 축열 구조체는 그림 2, 기존 구조체는 그림 3과 같다.

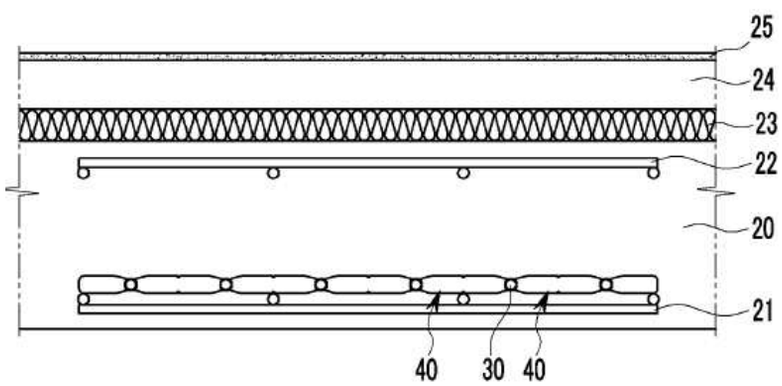


그림 2.3.1 PCM 활용 중공 축열 구조체 (40번 중공, 30번 파이프)

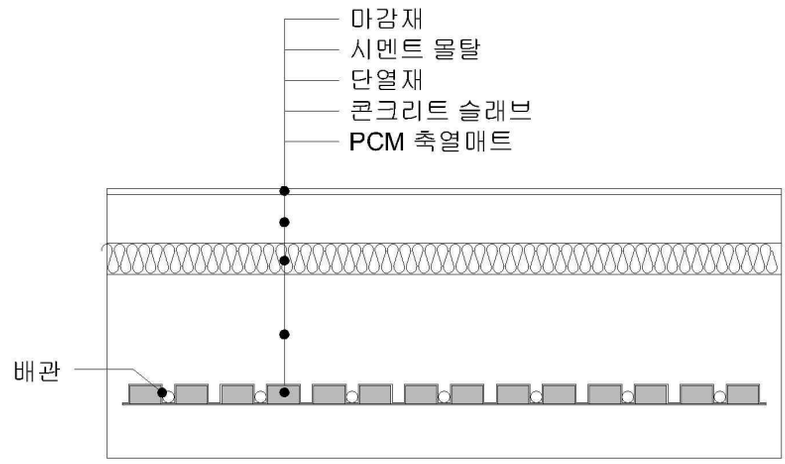


그림 2.3.2 PCM 매트 활용 축열 구조체

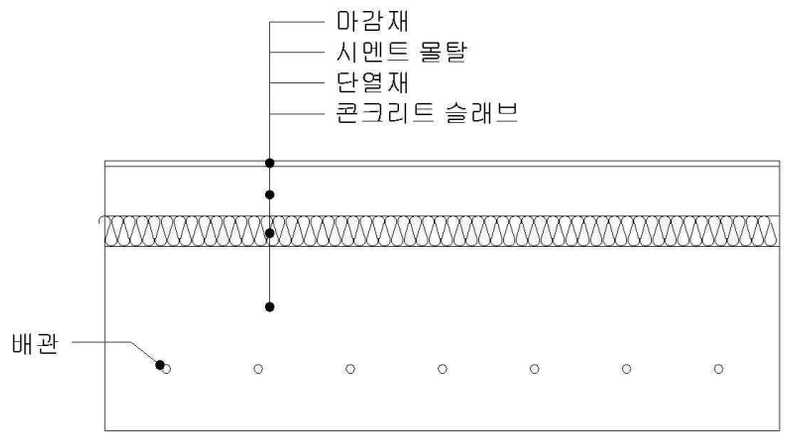


그림 2.3.3 기존 구조체

본 과제에서 제시하는 PCM 활용 구체축열 공조시스템(그림1, 그림2)은 콘크리트 구조체를 축열체로 이용하는 시스템이므로, 복사 냉난방 시스템의 프로토 타입 중, Type E 및 F를 적용할 수 있다. 국내 및 국외 복사 냉난방을 위한 구체축열시스템의 경우 Type E를 활용한 사례가 많으며, Type F에 비해 Type E에서 콘크리트 구조체를 명확하게 축열체로 이용할 수 있다. 또한, PCM의 축열성능을 효율적으로 사용하기 위해, PCM과 냉온수 배관 간의 거리를 최단으로 하는 것이 타당하다고 생각하여, 콘크리트 구조체 내부에 배관을 매설하는 Type E가 적절할 것으로 판단된다. 따라서, 본 과제에서 제시하는 PCM 활용 축열 구조체와 기존 프로토 타입 E를 조합한 최종 PCM 활용 축열 구조체의 프로토타입은 PCM 매트 혹은 PCM 중공 사이로 배관이 매설되는 형태를 가지게 된다.

2. 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템 에너지절감 기술 개발

가. 구체축열 공조시스템 최적 운영 방안

그림1은 건축물의 냉난방 부하 특성을 고려한 구체축열 복사냉난방시스템의 운영 방안 개념이다. 난방부하 기간 동안 외기온도가 내려갈수록 난방부하는 증가하는 것을 그림상 적색 선으로 표현한 것이며, 냉방 부하 기간 동안 외기 온도가 올라갈수록 냉방 부하는 증가하는 것을 청색 선으로 나타난 것이다. 이 선의 기울기는 건물의 단열 성능 및 내부 발열 특징과 같이 다양한 요인이 있다. 이 선들은 외기온도에 따른 부하 특성이 반영된 것으로, 구체축열 복사냉난방시스템의 방냉 또는 방열량 특성을 고려한 것이다. T_{sf}는 천장 및 바닥에 매설된 파이프에 의한 복사냉난방 방열량을 통한 표면온도 값이다. 방열량이 증가하면 표면온도가 증가하며, 방냉량이 증가하면 표면온도가 내려간다. 구체축열 시스템의 방열량의 결정요인은 천장 및 바닥의 허용 쾌적 표면온도에 의하여 결정되어지며, REHVA에서는 허용 표면온도를 권장하고 있다. 그러므로 허용 표면온도 ($T_{sf-\max}$)와 쾌적 표면 온도 사이의 구체축열 시스템 방열량이 된다. 예를 들면 그림 1과 같이 T_{sf}값이 $T_{sf-\max}$보다 높아지는 P1 이상의 방열량은 권장하지 않는다.

구체축열시스템의 방냉량을 결정하기 위해서는 결로에 의한 요인이 가장 중요하다. 표면온도 (T_{sf})와 실내 노점 온도 (T_{dew-i})의 결로를 방지하기 위한 최적 운전 방안을 이용하거나 환수온도 (T_{wr}) 또는 표면온도가 실내 노점온도보다 높게 유지하는 방안이다. 결국 하단의 그림과 같이 P2, P3는 결로가 발생할 수 있는 위치에 있기 때문에 권장하지 않는다.

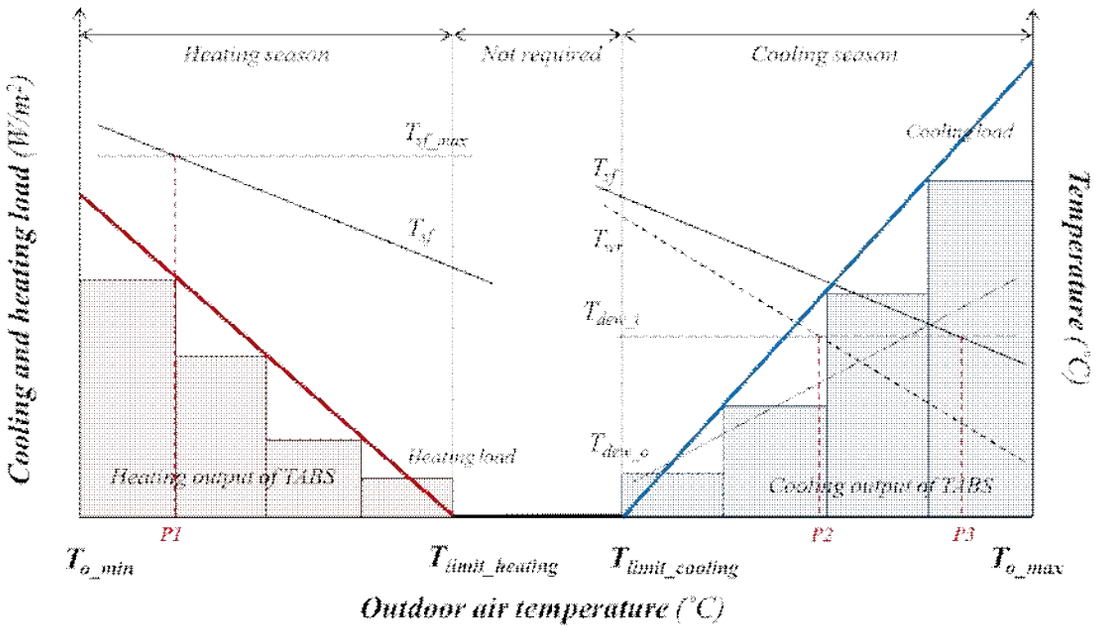


그림 2.3.4 구체축열 복사냉난방시스템 최적 운영방안 개념도

나. 동·하계 PCM 적용에 따른 구체축열시스템 에너지 소비량 분석

(1) 분석 개요

구체축열시스템(Thermally Activated Building System, TABS)는 콘크리트 슬라브 등의 건물 구조체 자체에 배관을 매설하고 냉난방을 하는 복사 방식의 냉난방 시스템이다. 실온에 가까운 공급온도로, 저온 난방 및 고온 냉방이 가능한 시스템으로 지열 열교환기 등의 신재생에너지 시스템과 연계되어 에너지 효율을 높일 수 있어, 최근 대규모 친환경건축물에의 적용에 관심이 높아지고 있다.

국내에서는 이화캠퍼스복합단지(Ewha Campus Complex, ECC)에 최초로 적용되어 있으며, 강의실 및 교수 연구실, 행정실 등의 천장면을 방열면으로 적용되어 있다. 천장이 방열면일 경우, 냉난방 시 재실자의 불쾌적을 방지하기 위한 표면온도가 권장온도 범위로 제한되며, 냉방의 경우 여름철 차가운 방열면으로 인한 표면 결로 발생 위험성으로 인해 역시 표면 온도, 즉 방열 및 방냉량이 제한된다.

현재, 구조분야에서 콘크리트의 물량을 줄이면서 구조적으로 안전한 시스템을 고안하기 위해 이방향 중공슬라브를 고안하여 제안하고 있다. 이 시스템을 적용하였을 경우, 콘크리트의 물량이 줄어들었기 때문에 앞서 예시를 든 이화캠퍼스복합단지와 같은 콘크리트 슬라브의 매스가 큰 축열체를 갖는 TABS를 적용할 경우, 축열성이 저하될 것이다. 이에, 줄어든 축열성을 보완하기 위하여 PCM을 적용하여 확인하고자 한다. 국내 전형적인 동계,하계 한 주간을 대상으로 냉난방 시의 공기식 냉방시스템과 이방향 중공슬라브에 파이프를 매설한 구체축열시스템을 함께 사용할 경우에 대해 에너지 소비량을 분석하였다.

분석을 위해 공기식 냉방시스템은 중앙공조의 변풍량 (VAV, Variable Air Volume) 방식을 선택하고, 이방향 중공슬라브에 적용된 구체축열시스템의 경우는 하단의 그림과 같이 적용되어 있는 설계안을 이용하였다.

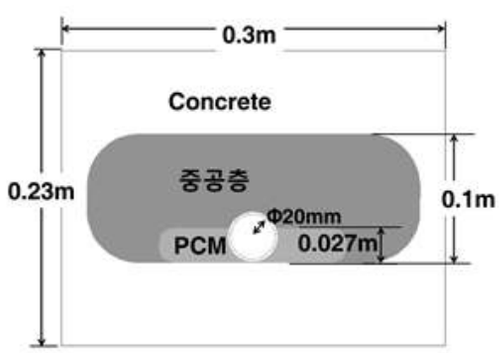


그림 2.3.5 중공슬라브에 적용한 TABS 설계안

(2) 대안설정

대안설정 변수로는 PCM이 적용되지 않은 중공슬라브 TABS, 상변화온도가 상이한 2개의 PCM을 적용한 중공슬라브 TABS을 이용하였다. TABS가 적용되지 않고 모두 VAV시스템으로 조절되고 PCM이 적용된 케이스 2개를 이용하였다. 공급 냉수온도의 경우 18℃, 공급 온수온도의 경우 30℃ 실내 내부발열 조건은 국내 건물에너지효율등급인증제도 운영규정[1]에서 제시하고 있는 대규모 오피스의 내부발열량을 기준으로 내부 발열량을, TABS와 VAV 운전조건은 연속운전(24시간 운전)으로 적용하였다.

(3) 건물 모델링 개요

건물의 모델링 (건물 및 HVAC 시스템)은 Designbuilder 3.1을 이용하였으며, Designbuilder 3.1은 EnergyPlus 7.0.0을 Calculation Engine으로 사용하는 User Interface 프로그램이며, EnergyPlus input파일인 IDF 파일로 변환하여 IDF launch 및 IDF Editor 프로그램을 이용하여 대안별 상세 output을 도출하여, 분석을 진행하였다.

건물의 평면은 아래와 같으며, 기준층을 대상으로 3개층에 대해 시뮬레이션을 진행하였다. Zone은 아래 그림과 같이 크게 9개로 나누어 북쪽 및 남쪽 zone은 재실 zone으로 시스템을 적용하였고, 중간의 Hall은 비재실 zone으로 비공조 구역으로 설정하였다. 건물 층고는 3.5m로 설정하였다. 건물 외피 구성과 내부 스케쥴은 아래의 표에 나타내었다.

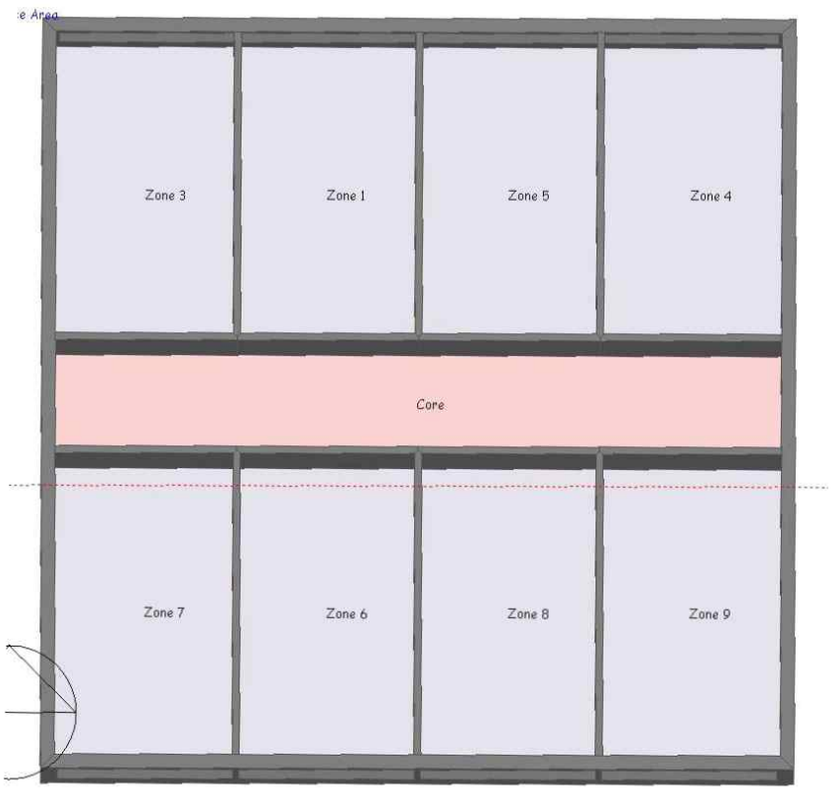


그림 2.3.6 모델링 건물 평면도

1) 에너지관리공단, 건축물에너지효율등급인증제도운영규정, 시행 2011.4.5

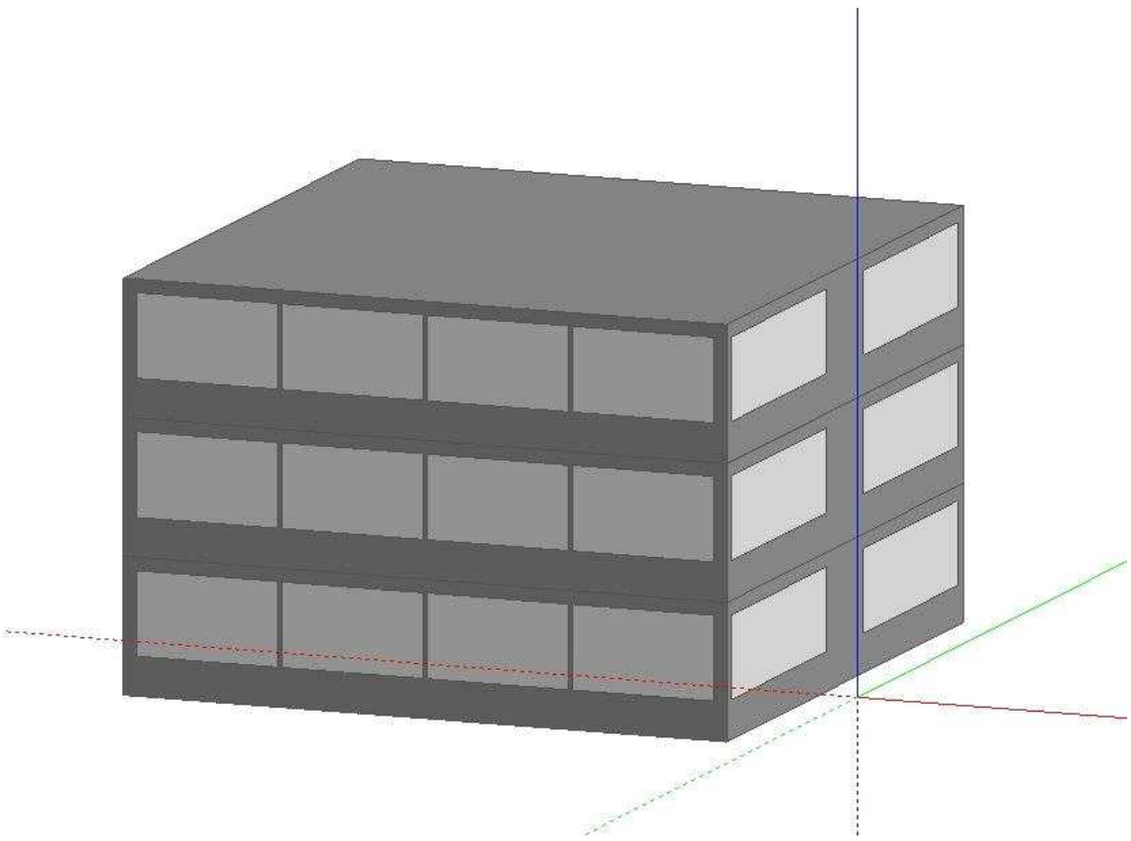


그림 2.3.7 모델링 건물 조감도

표 2.3.2 건물 외피 구성

구분	재료	적용두께 (m)	구분	재료	적용두께
커튼월 스팬드럴	Quartz glass	0.006	커튼월 창	Trp Clr 3mm/13mm Air	
	Air	0.040	U-value (W/m2K)		1.778
	Steel	0.010	파티션	Gypsum board	0.025
	EPS	0.080		Air	0.1
	Steel	0.010		Gypsum board	0.025
U-value (W/m2K)		0.434	U-value (W/m2K)		1.639

표 2.3.3 내부 스케쥴

실내설정온도	냉방	26 °C	내부 발열량	10 W/m2	
	난방	20 °C	재실 스케쥴	월~금 9:00 ~ 18:00	
냉난방 setback	없음		운전 스케쥴	1	24시간 운전
최소외기도입률	10 L/person·s				
침기율	0.7 ac/h				

EnergyPlus 7.0.0은 1차원 전도로 해석하는 동적 에너지해석 툴로서, 이방향 중공슬라브의 경우 바닥슬라브 안쪽으로 중공체와 PCM이 같은 간격으로 위치해있음으로 그 간격을 1차원 전도로 해석이 가능하도록 변환하였다. 산출과정은 아래와 같다.

PCM의 셀의 경우 TABS의 중공체 내부에 위치해 있으며 PCM 셀의 전체 부피를 산출할 경우,

0.0862m x 0.0862m x 3.14(π) x 0.027m (W x L x H) = 0.00106859m3 ....(1)

TABS 부피를 산출할 경우 ,

0.3m x 0.3m x 0.23m = 0.0207m3 (W x L x H) ....(2)

그러므로 PCM 셀을 연속적인 1개의 레이어 두께로 환산할 경우 아래와 같다.

0.00106859m3/ 0.09 m2 = 0.012m .....(3)

중공 슬래브를 계산하려고 연속적인 레이어 두께로 환산된 적용두께는 아래의 표와 같다.

표 2.3.4 EnergyPlus 중공슬래브 및 PCM적용 중공슬래브 적용두께

구분	재료	적용두께(m)	구분	재료	적용두께(m)
중공슬래브	concrete	0.0855	PCM함유 중공슬래브	concrete	0.0855
	중공층	0.059		중공층	0.047
				PCM	0.012
	concrete	0.0855		concrete	0.0855

적용된 PCM 셀의 물성치는 아래와 같다.

표 2.3.5 PCM 적용 물성치

	Hexadecane	Octadecane
Melting point (°C)	20	29
Conductivity (W/m K)	0.39	0.26
Density (kg/m3)	777	777
Specific heat (J/kg K)	1,390	1,200
Latent heat (J/kg)	281,000	267,000

(4) HVAC 모델링 개요

HVAC 모델링은 DesignBuilder에서 제공하는 Detailed HVAC을 이용하여 모델링 한 후, 역시 IDF 파일로 변환하여 EnergyPlus에서 상세 output을 확인하였다. 아래 그림은 DesignBuilder의 HVAC 모델링 이미지를 나타내었고, 표에는 열원 및 시스템 개요를 나타내었다.

표 2.3.6 열원 및 시스템 개요

<table>
<tr><td>Zone/sys</td><td colspan="2">TABS+VAV</td><td>Airloop</td><td>AHU</td></tr>
<tr><td>TABS type</td><td colspan="2">Constant flow rate</td><td>Heating coil</td><td>Boiler</td></tr>
<tr><td rowspan="2">TABS inlet/outlet</td><td>냉방시</td><td>Chiller와 연결</td><td rowspan="2">Cooling coil</td><td rowspan="2">Chiller</td></tr>
<tr><td>난방시</td><td>Boiler와 연결</td></tr>
<tr><td>VAV type</td><td colspan="2">VAV with reheat coil</td><td>Fan type</td><td>Variable fan</td></tr>
</table>

하계 TABS의 경우, Chilled ceiling 모듈을 이용하여 모델링 될 수 있으며, TABS는 총 3가지 제어 방식으로 운전이 결정된다. 첫 번째는 냉수온도를 제어하기 위한 것으로 아래 그림와 같이 4가지 설정값에 의해 제어된다. 실의 온도가 High control temperature schedule value 이하로 내려가면 냉수 공급온도는 Low 값에서 High 값으로 선형 증가하게 되고, Low control temperature 이하로 내려가면 시스템 운전이 정지된다. 두 번째는 TABS의 운전 시간을 직접 설정해 주는 것이고, 세 번째는 결로 발생 시 시스템 운전을 정지시키는 방식에 의해 제어된다.

모델링 시, 결로 발생 시 시스템 운전을 정지시키는 제어 방식을 이용하였으며, 냉수온도의 경우 control temperature와 상관없이 일정하게 주기 위해, High/Low water temperature를 동일하게 주고, low control temperature를 아주 낮게 설정하여 (0도) 부하에 따라 일정한 온도의 냉수가 공급될 수 있도록 설정하였다. 즉, TABS의 운전은 결로 발생 시 정지되며, 그 외의 경우에는 TABS의 운전 스케쥴에 의해서만 결정되도록 설정하였다.

동계 TABS의 경우, Radiant Floor 모듈을 이용하여 모델링 될 수 있으며, TABS는 총 3가지 제어 방식으로 운전이 결정된다. 첫 번째는 온수온도를 제어하기 위한 것으로 하계 TABS 경우와 같이 4가지 설정값에 의해 제어된다. 실의 온도가 High control temperature schedule value 이하로 내려가면 온수 공급온도는 Low 값에서 High 값으로 선형 증가하게 되고, Low control temperature 이하로 내려가면 시스템 운전이 정지된다. 두 번째는 TABS의 운전 시간을 직접 설정해 주는 것이고, 세 번째는 결로 발생 시 시스템 운전을 정지시키는 방식에 의해 제어된다.

온수온도의 경우 control temperature와 상관없이 일정하게 주기 위해, High/Low water temperature를 동일하게 주고, low control temperature를 설정온도로 설정하여 (20도) 부하에 따라 일정한 온도의 온수가 공급될 수 있도록 설정하였다. 즉, TABS의 운전 스케쥴에 의해

서만 결정되도록 설정하였다.

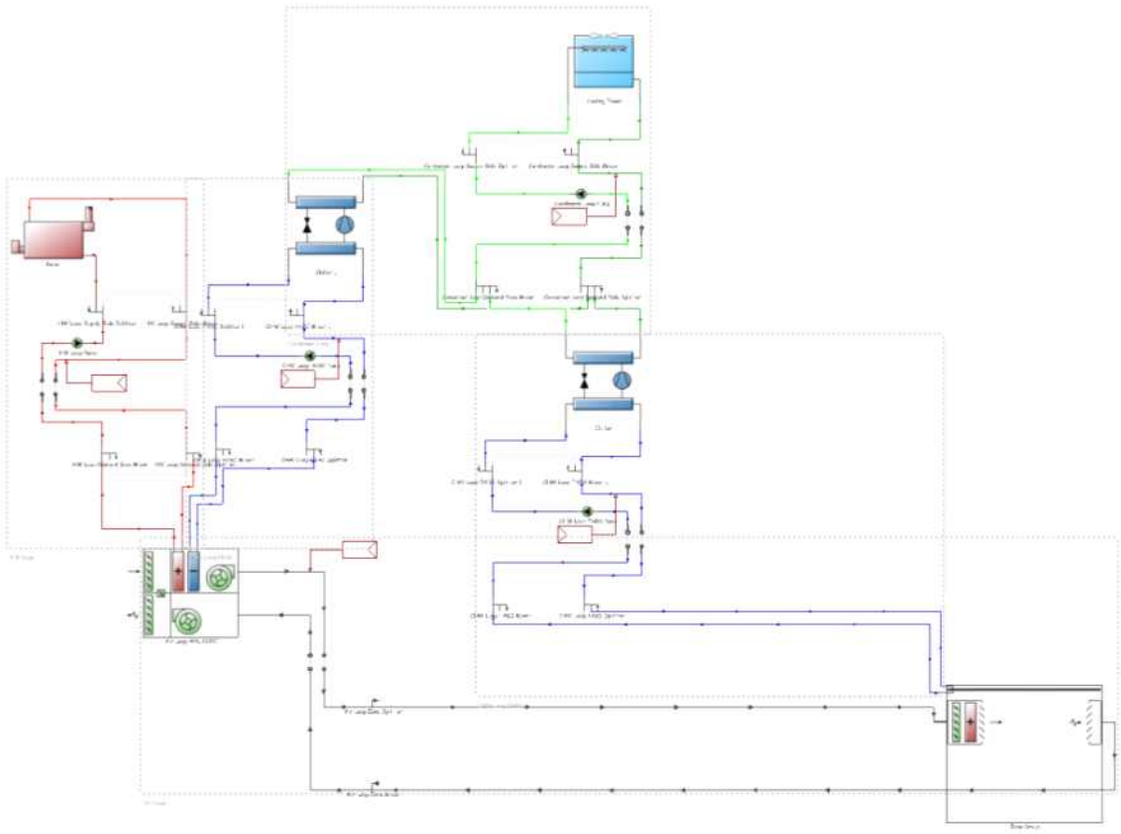


그림 2.3.8 하계 Detailed HVAC 모델링 (TABS+VAV)

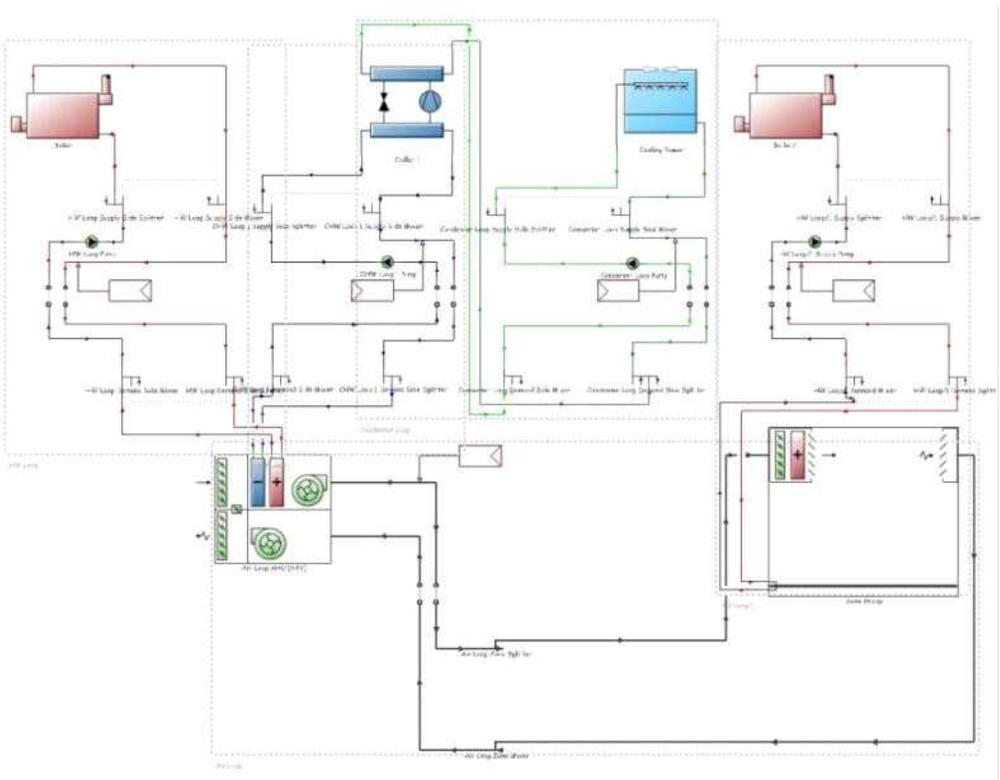


그림 2.3.9 동계 Detailed HVAC 모델링 (TABS+VAV)

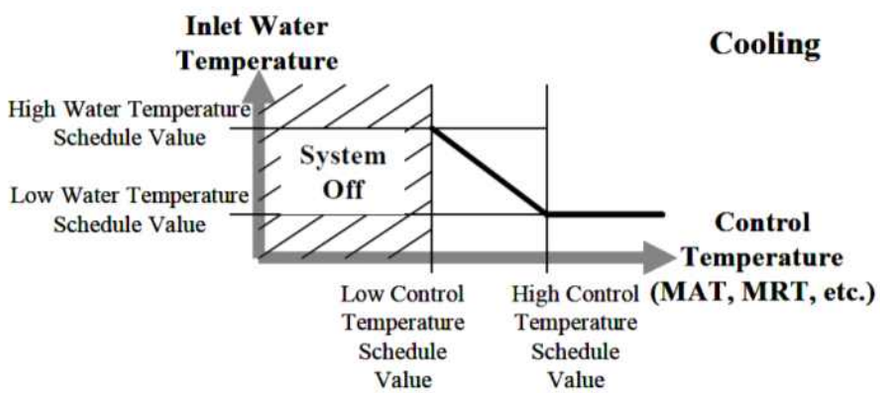


그림 2.3.10 TABS 냉수온도 제어방식 (냉난방/constant flow rate type)

(5) 결과분석

하계의 경우, 중공슬래브가 설치된 TABS를 기본베이스 모델로 하고, 중공슬래브 하단에 Octadecane, Hexadecane PCM이 각각 적용되었을 경우와 TABS를 적용하지 않고 VAV시스템으로만 적용된 경우에 각각의 PCM이 중공슬래브에 적용될 경우에 여름철 8월 3일부터 9일까지 총 1주일에 대한 에너지시뮬레이션을 진행하였다. TABS와 VAV시스템이 함께 있는 경

우, TABS로 냉방을 먼저 수행하는 것으로 설정하였다. 실내설정온도는 26℃로 설정하였으며, TABS의 공급냉수온도는 18℃로 설정하였다. TABS를 적용 시, 결로발생 시 시스템이 꺼지도록 Auto Control이 되도록 하였다. 냉방피크부하 및 평균 실내온도, 평균복사온도 등을 분석하고자 한다.

표 2.3.7 각 대안별 설명

구분	설명
Case1	중공슬래브 TABS+VAV
Case2	중공슬래브 TABS Ocatadecane 적용(29℃) + VAV
Case3	중공슬래브 TABS Hexadecane 적용(20℃) + VAV
Case4	중공슬래브 Octadecane 적용 (29℃) + VAV (복사냉난방 시스템 없음)
Case5	중공슬래브 Hexadecane (20℃) 적용 + VAV (복사냉난방 시스템 없음)

8월 3일부터 8월 9일까지 각 케이스별 냉방피크부하의 경우, 기본 모델 case1과 비교하여 PCM의 녹는점 온도가 20℃인 Hexadecane을 적용한 case3의 냉방피크부하가 1.1% 절감하는 것으로 나타났으며, 녹는점이 29℃인 Octadecane의 경우, 냉방피크부하가 case1에 비하여 23.1% 증가하는 것으로 나타났다. TABS가 적용되지 않은 Case4, Case5는 각각 case1에 비하여 63.9%, 67.8% 증가한 것으로 나타났다.

표 2.3.8 각 대안별 냉방피크부하 및 증감율

구분	설명	냉방피크부하 (W/㎡)	증감율(%)
Case1	중공슬래브 TABS+VAV	21.7	-
Case2	중공슬래브 TABS Ocatadecane 적용(29℃) + VAV	26.7	23.1
Case3	중공슬래브 TABS Hexadecane 적용(20℃) + VAV	21.4	-1.1
Case4	중공슬래브 Octadecane 적용 (29℃) + VAV (복사냉난방 시스템 없음)	35.5	63.9
Case5	중공슬래브 Hexadecane (20℃) 적용 + VAV (복사냉난방 시스템 없음)	36.4	67.8

8월 3일부터 9일까지 각 케이스별 냉방에너지소비량의 경우, 구체축열 복사냉난방시스템 TABS가 적용된 Case1,2,3이 VAV시스템만 적용된 Case4,5에 비하여 냉방에너지소비량이 감소하는 것으로 나타났다.

Case1,2,3과 같이 구체축열 복사냉난방 시스템 TABS가 설치된 대안 중에 녹는점 20℃

Hexadeacne PCM을 적용한 경우가 가장 냉난방에너지소비량이 감소하는 경향이 나타났다. 이는 녹는점 온도가 20℃인 Hexadecane이 구체축열 복사냉난방시스템 TABS에서 축열량을 상승시킴으로서 나타나는 현상으로 판단된다.

결론적으로, VAV시스템만 적용된 경우에 비하여 TABS와 VAV시스템이 적용된 case1,2,3이 냉방에너지소비량 및 냉방피크부하 저감에 기여하는 것으로 나타났다. 특히 여름철에는 녹는점 온도가 20℃인 Hexadecane이 냉방부하 및 냉방에너지소비량 저감에 크게 기여하는 것으로 나타났다.

표 2.3.9 각 대안별 냉방부하 및 증감율

구분	설명	냉방에너지소비량 (kWh/㎡)	증감율(%)
Case1	중공슬래브 TABS+VAV	5,412	-
Case2	case1+Ocatadecane (29℃)	8,462	56.4
Case3	case1+Hexadecane (20℃)	5,361	-0.9
Case4	VAV + Octadecane (29℃)	11,178	106.5
Case5	VAV + Hexadecane (20℃)	11,246	107.8

결론적으로, VAV시스템만 적용된 경우에 비하여 TABS와 VAV시스템이 적용된 case1,2,3이 냉방부하 및 냉방피크부하 저감에 기여하는 것으로 나타났다. 특히 여름철에는 녹는점온도가 20℃인 Hexadecane이 냉방부하 및 냉방피크부하 저감에 크게 기여하는 것으로 나타났다.

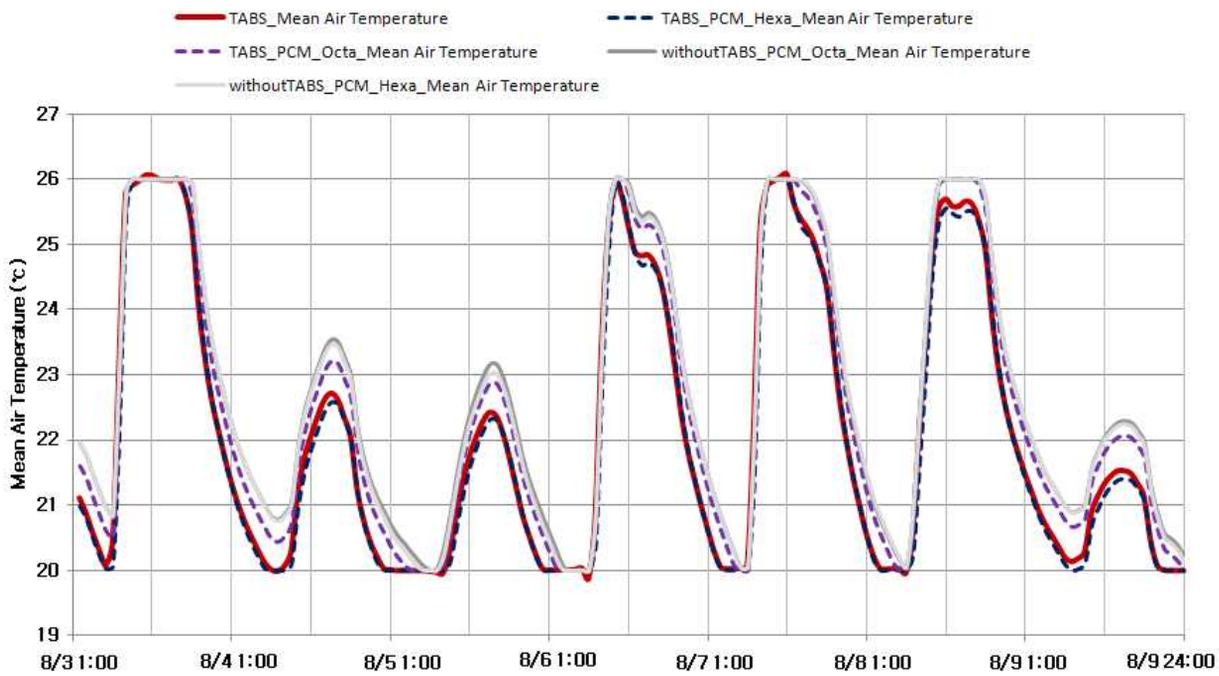


그림 2.3.11 각 케이스별 평균실내온도 경향

평균실내온도의 변화를 확인해본 결과, Case1의 경우 하단의 그림의 빨간색 선의 양식이며, TABS에 PCM이 적용된 Case2, Case3의 경우 점선으로 표시되었으며, VAV시스템에 PCM이 적용된 Case4, Case 5는 회색선으로 표시되어있다. 앞서 피크부하의 저감 및 냉방에너지소비량이 가장 적게 나타난 결과가 Case3가 Case1에 비하여 실내온도가 미세한 차이가 있는 것으로 나타났으며, Case2에 적용된 Ocatadecane의 경우 축열성능이 실내온도에 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다.

각 케이스별 평균복사온도의 차이는 하단의 그림과 같다. 평균실내온도의 차이는 크게 결과에 차이에 나타나지 않았으나, 평균복사온도의 경우 쾌적성에도 큰 영향을 미치는 항목이기에 살펴본 결과, Case 4,5의 경우 VAV시스템만 적용한 결과 MRT온도가 TABS가 적용된 Case1,2,3의 결과에 비하여 높고 그 변화가 큰 것으로 나타났다. TABS에 어떤 녹는점의 PCM을 선택하는 것에 따라서 그 결과가 상이한 것으로 확인되었다. 29℃ 녹는점의 PCM Octadecane의 경우, 평균복사온도의 온도가 Case1, 3에 비하여 높은 결과를 나타내는 것으로 나타났다. 냉수온도에 따른 콘크리트 슬라브 주변의 온도에 축열성이 반영되는 결과에 따라 적절한 PCM을 적용해야할 것으로 판단된다. Hexadecane PCM이 적용된 경우 PCM이 미적용된 TABS에 비하여 평균복사온도가 아주 미비하게 차이가 있는 것으로 나타났다.

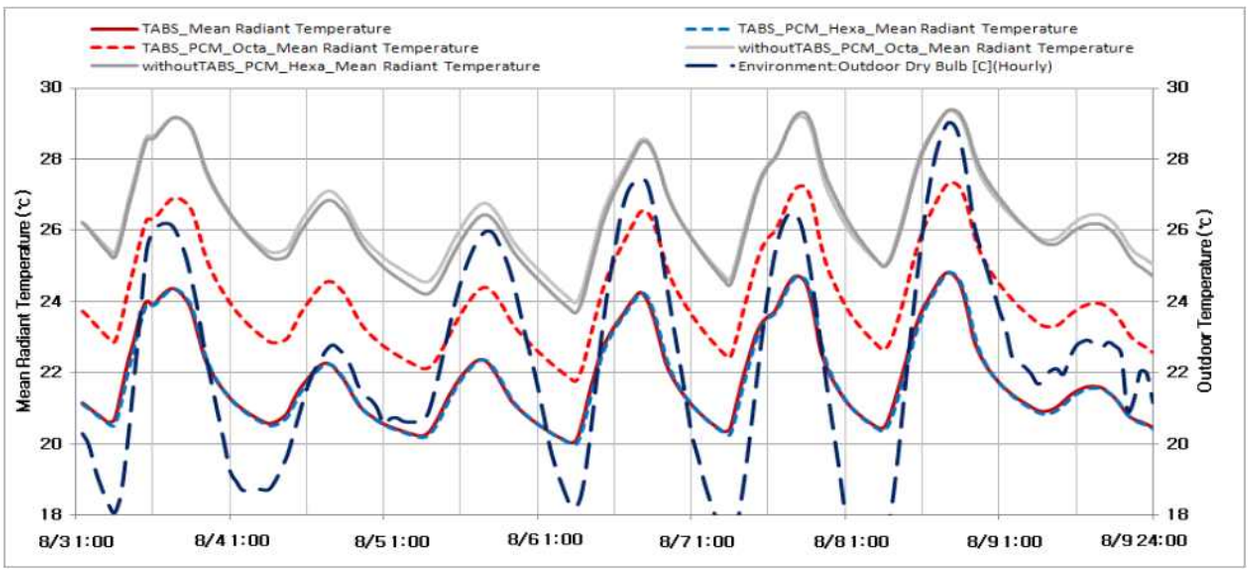


그림 2.3.12 각 케이스별 평균복사온도 경향

동계의 경우, 중공슬래브가 설치된 TABS를 기본베이스 모델로 하고, 중공슬래브 하단에 Octadecane, Hexadecane PCM이 각각 적용되었을 경우와 TABS를 적용하지 않고 VAV시스템으로만 적용된 경우에 각각의 PCM이 중공슬래브에 적용될 경우에 겨울철 12월 15일부터 21일까지 총 1주일에 대한 에너지시뮬레이션을 진행하였다. TABS와 VAV시스템이 함께 있는 경우, TABS로 난방을 먼저 수행하는 것으로 설정하였다. 실내설정온도는 20℃로 설정하였으며, TABS의 공급냉수온도는 30℃로 설정하였다. TABS를 적용 시, 결로발생 시 시스템이 꺼지도록 Auto Control이 되도록 하였다. 난방피크부하 및 평균 실내온도, 평균복사온도 등을 분석하고자 한다.

표 2.3.10 각 대안별 설명

구분	설명
Case1	중공슬래브 TABS+VAV
Case2	중공슬래브 TABS Ocatadecane 적용(29℃) + VAV
Case3	중공슬래브 TABS Hexadecane 적용(20℃) + VAV
Case4	중공슬래브 Octadecane 적용 (29℃) + VAV (복사냉난방 시스템 없음)
Case5	중공슬래브 Hexadecane (20℃) 적용 + VAV (복사냉난방 시스템 없음)

12월 15일부터 12월 21일까지 각 케이스별 난방피크부하의 경우, 기본 모델 Case1이 가장 낮은 난방피크부하를 갖는 것으로 나타났으며, 녹는점이 29℃인 Octadecane을 적용한 Case2의 경우가 녹는점이 20℃인 Hexadecane을 적용한 Case3에 비하여 난방피크부하 저감되는 것으로

나타났다. TABS시스템 없이 VAV시스템만 적용한 경우에 각각의 PCM을 적용할 경우, Case1에 비하여 난방피크부하가 증가하는 것으로 나타났다.

표 2.3.11 각 대안별 난방피크부하 및 증감율

구분	설명	난방피크부하 (W/㎡)	증감율(%)
Case1	중공슬래브 TABS+VAV	9.0	-
Case2	중공슬래브 TABS Ocatadecane 적용(29℃) + VAV	12.4	37.6
Case3	중공슬래브 TABS Hexadecane 적용(20℃) + VAV	18.0	99.3
Case4	중공슬래브 Octadecane 적용 (29℃) + VAV (복사냉난방 시스템 없음)	28.0	209.7
Case5	중공슬래브 Hexadecane (20℃) 적용 + VAV (복사냉난방 시스템 없음)	27.9	208.5

12월 15일부터 21일까지 각 대안별 난방에너지소비량의 경우, 구체축열 복사냉난방시스템 TABS가 적용된 Case1,2,3이 VAV시스템만 적용된 Case4,5에 비하여 난방에너지소비량이 감소하는 것으로 나타났다.

구체축열 복사냉난방 시스템 TABS가 설치된 대안 중에 PCM들을 적용할 경우 PCM이 적용되지 않은 대안보다 더 많은 난방에너지소비량이 나오는 것을 확인할 수 있었다. 난방 시, PCM의 녹는점 온도가 구체축열 복사냉난방 시스템 TABS에 축열성이 더 확보될 수 있는 적절한 PCM 적용이 중요할 것으로 판단된다.

평균 실내온도의 변화를 확인해본 결과, Case1의 경우 하단의 그림의 빨간색 선의 양식이며, TABS에 PCM이 적용된 Case2, Case3의 경우 점선으로 표시되었으며, VAV시스템에 PCM이 적용된 Case4, Case 5는 회색선으로 표시되어있다. 각각의 녹는점이 다른 PCM을 적용한 TABS는 기존 모델 Case1에 비하여 평균실내온도가 낮게 나타났으며 TABS가 적용되지 않은 Case4, Case5와는 확연한 차이가 있는 것으로 나타났다.

각 케이스별 평균복사온도의 차이는 하단의 그림과 같다. 평균실내온도의 차이는 TABS 적용 유무의 결과에 크게 차이가 있는 것으로 나타났으며, 평균복사온도의 경우 쾌적성에도 큰 영향을 미치는 항목이기에 살펴본 결과 기존 모델 Case1과 녹는점 29℃인 Octadecane이 적용된 Case2가 거의 차이가 없는 것으로 나타났으며, 녹는점 20℃인 Hexadecane이 적용된 Case3의 경우 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. TABS가 미적용된 Case4,5의 경우에는 Case1과 비교하여 많은 차이가 있는 것으로 나타났다. TABS가 적용된 Case1,2,3의 경우가 TABS가 미적용된 Case4,5에 비하여 평균복사온도값이 더 높게 유지되는 것으로 확인되어 재실자의 쾌적도는 높을 것으로 판단되어진다. 기존 TABS 실측값과 유사한 것으로 판단되어지며 TABS 적용 건물일 경우, 겨울철에는 재실자들이 덥다라고 느끼는 수준일 것으로 판단된다. 온수온도에 따른 콘크리트 슬라브 주변의 온도에 따라 PCM이 반응하면서 축열성이 반영되어 평균실내온도 및 평균복사온도에 반영된 것으로 판단된다.

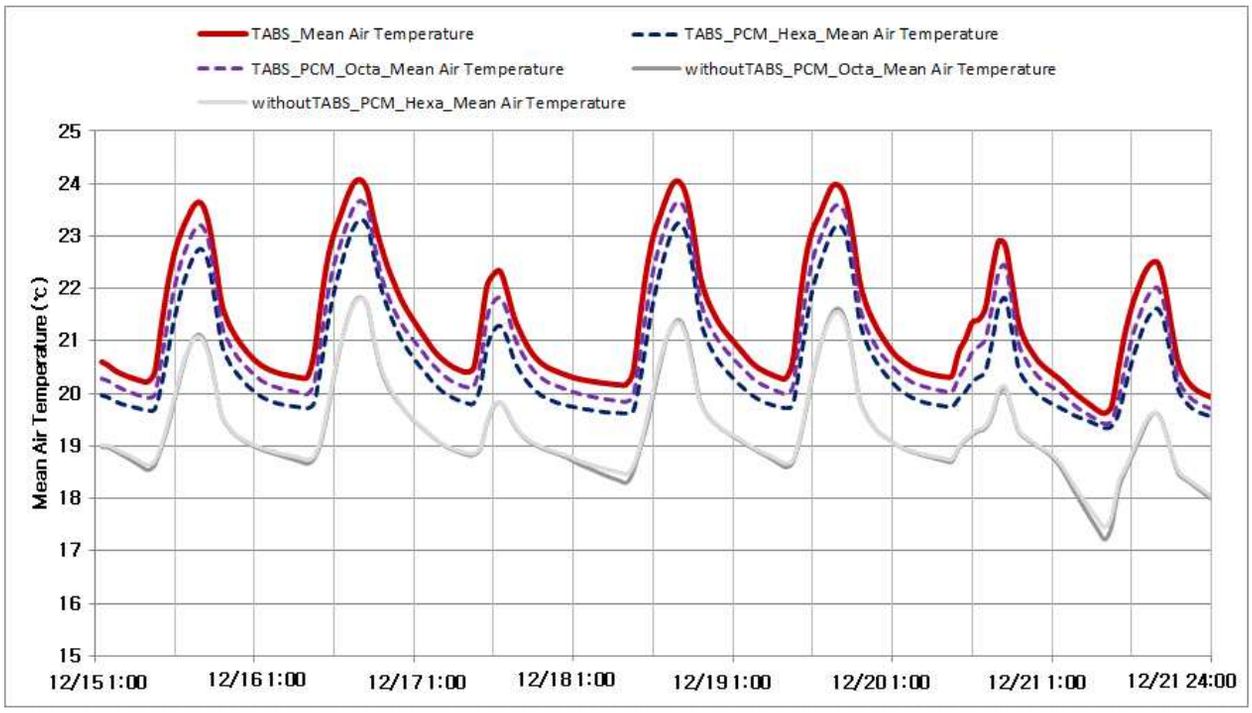


그림 2.3.13 각 케이스별 평균 실내온도 경향

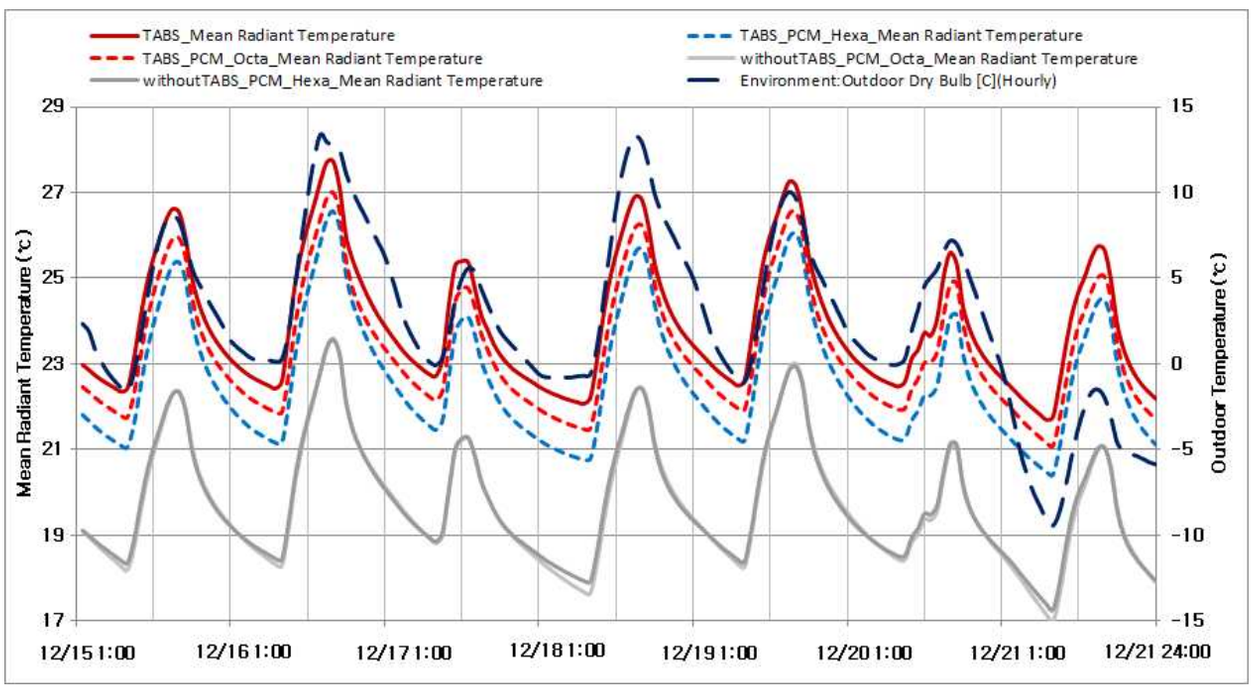


그림 2.3.14 각 케이스별 평균복사온도 경향

나. 구체축열시스템과 상변화물질을 적용한 건축물의 에너지절감 효과 및 실내 열적 쾌적성 비교

(1) 에너지 해석을 위한 1차원 모델 변환

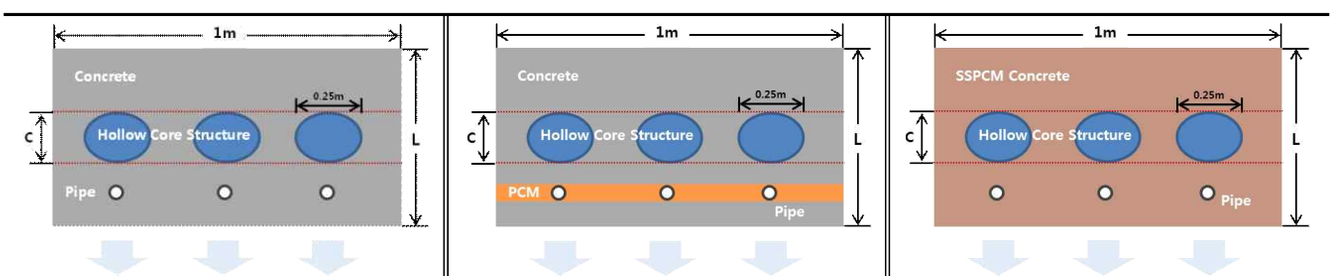
구체축열시스템(TABS)과 상변화 물질(PCM)을 건축물에 적용할 경우, 연간 에너지 소요량과 냉난방 부하, 실내 온도 등에 어떻게 기여하는지 알기 위해서는 EnergyPlus 에너지 해석 프로그램을 활용할 수 있다. 그런데 표 5의 a, b, c와 같이 중공 슬라브(Hollow core slab)는 콘크리트 중간에 타원형으로 경량 중공체가 있는 반면, EnergyPlus 프로그램은 건축물을 구성하는 재료의 단면을 1차원적인 층의 구성으로만 입력하고 해석할 수 있다. 따라서 기본 모델(표 5의 a, b, c)을 1차원적인 구성(표 5의 a', b', c')으로 변환시키기 위해 Physibel BISTRA 3.1w 프로그램을 활용하였다.

표 2.3.12 기본 모델의 층별 구성 및 두께

층별 구성	두께(m)
콘크리트	0.065
콘크리트&경량 중공체	0.1
콘크리트	0.065

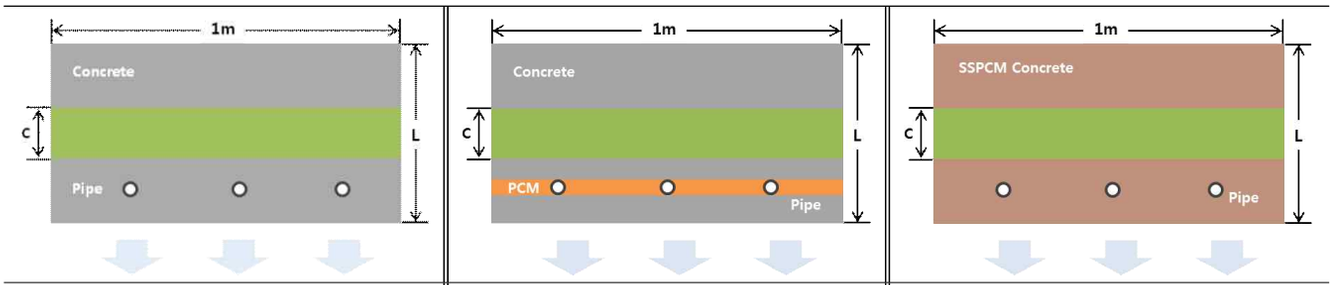
본 연구의 목적에 따라 모델의 가장 중요한 요소는 축열 성능이므로, 기본 모델을 1차원적으로 변환함에 있어 열용량을 기준으로 하여 두 모델 간에 동일한 성능을 확보하고자 하였다.
기본 모델의 열용량을 구하는 식은 다음과 같고, 슬라브 내 세 개의 타원형 경량 중공체는 타원의 면적[2]을 구하는 식을 통해 계산하였다. 모델에 포함된 파이프는 체적의 비율이 미미하므로 열용량 산정 시에 제외하였다.

표 2.3.13 중공 슬라브(TABS) 모델의 개념도



a) 기본 모델 | b) PCM을 적용한 기본 모델 | c) SSPCM concrete를 적용한 기본 모델

3) 타원의 면적$(m^2) = \pi \times$ 장축 반경$(m) \times$ 단축 반경(m)
$= 0.785 \times$ 장축 직경$(m) \times$ 단축 직경(m)



a') 1차원 변환 모델 | b') PCM을 적용한 1차원 변환 모델 | c') SSPCM concrete를 적용한 1차원 변환 모델

$$HeatCapacity_{slab} = (L-c) \cdot 1 \times Density_{conc} \times Specific\,Heat_{conc}$$
$$+(0.785 \times 0.25 \times 3) \cdot c \times Density_{cav} \times Specific\,Heat_{cav}$$
$$+(1-0.785 \times 0.25 \times 3) \cdot c \times Density_{conc} \times Specific\,Heat_{conc}$$

여기서, L은 모델의 총 두께, c는 경량 중공체가 포함된 부분의 두께를 말한다.

표 2.3.14 기본 모델의 구성 재료별 물성치

구분	밀도 (kg/㎥)	비열 (J/kgK)	열전도율 (W/mK)
콘크리트	2300	930	0.0588
경량 중공체	15	1300	2.3256

이때, $L = 0.23m, c = 0.1m$이므로 중공 슬래브의 열용량은 $367184.4375 J/m^2K$이다.

앞 절에서 산정한 기본 모델의 열용량과 동일한 값을 가지는 1차원 모델을 구현하기 위해 Physibel BISTRA 3.1w 전열 해석 프로그램을 이용하였다. 아래 표 5의 a', b', c'와 같이 기본 모델에서 경량 중공체가 포함된 두께 c만큼의 층을 'C layer'라는 새로운 특성을 가지는 물질의 층으로 가정해보았다.(이때의 L과 c는 각각 $0.23m, 0.1m$로 기본 모델의 경우와 동일하다고 보았다.)

기본 모델과 동일한 열용량과 방열량을 가지도록 하는 C layer의 물리적(열적) 특성을 결정하기 위해 다음 그림 2, 3과 같은 원리로 열전도 저항을 구하고, 이로부터 C layer의 열전도율과 밀도, 비열을 도출하였다.

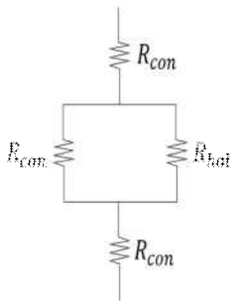


그림 2.3.15. 기본 모델의 열전도 저항 산정 원리

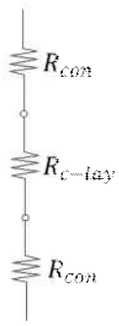


그림 2.3.16 1차원 변환모델의 열전도 저항 산정 원리

그림 2, 3에 나타난 열전도 저항 산정 원리를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$R_{total} = R_{con} + \frac{1}{\frac{1}{R_{con}} + \frac{1}{R_{hol}}} + R_{con}$$

$$R_{total} = R_{con} + R_{C-layer} + R_{con}$$

이때, 1차원 모델의 C layer의 열전도 저항 값은 기본 모델의 C layer에 해당하는 층의 열전도 저항 값과 같다고 할 수 있다.(C layer를 제외한 각 층의 열전도 저항은 고유 열전도율의 역수에 층 두께를 곱한 값이다.)

표 2.3.15 C layer의 열적 특성

구분	밀도 (kg/㎥)	비열 (J/kgK)	열전도율 (W/mK)
C layer	1000	891.144375	1.2

표 7에서 나타난 C layer의 열적 특성을 바탕으로 기본 모델을 1차원으로 변환한 후 Physibel BISTRA 3.1w 프로그램을 통해 확인한 결과, 변환 전과 후의 방열량과 온도의 차이는 표 6과 같이 나타났다. 본 연구에서 중점적으로 살피게 될 실내 온도(T_{max}, T_{min})의 경우 기본 모델과 1차원 변환 모델 간의 오차가 0.2~0.4%로 매우 적게 나타났으므로, 1차원으로 변환한 모델을 다음 에너지 해석 프로그램에 활용하기에 적절하다고 판단하였다.

(2) EnergyPlus 7.0을 통한 에너지해석

(가) 시뮬레이션 대상 건물 개요

에너지 해석 프로그램에 적용한 건물은 서울특별시에 위치한 S대학의 8층 연구시설을 모델링한 것이다. 이 건물의 외벽은 경량 벽체로 이루어져 있으며, 그 구성과 각 재료의 특성은 다음 그림 4, 표 8과 같다.

각 층의 면적은 698.7㎡이며, 그림 5는 대상 건물의 기준층 평면을 나타낸다. 붉게 표시된 영

역은 난방이 실시되는 공간을 나타낸다. 본 연구에서는 해당 기준층의 중공 슬라브(천장과 바닥)에 PCM을 적용하고, 각 경우에 따른 시뮬레이션 결과를 비교 해보았다.



그림 2.3.17 기준층 평면(붉은 영역은 난방 공간)

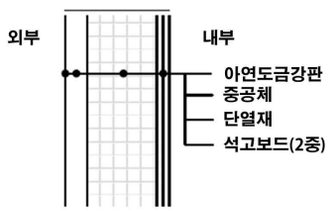


그림 2.3.18 외벽 구성

표 2.3.16 외벽의 재료 구성 및 물리적 특성

구분	열전도율 (W/mK)	두께 (m)	비열 (J/kgK)	밀도 (kg/m³)
아연도금강판	45.3	0.0012	5000	7830
중공체	-	0.063	-	-
단열재	0.02	0.1	1470	30
석고보드	0.18	0.0125	1000	600
석고보드	0.18	0.0125	1000	600
R-value (m²K/W)	5.14			

(나) 프로그램 입력 조건

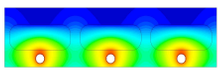
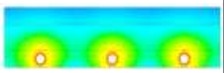
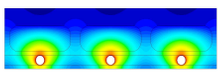
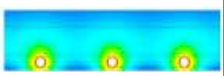
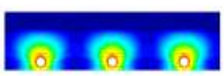
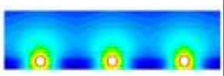
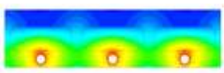
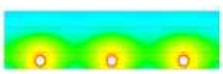
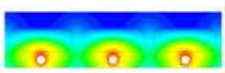
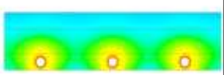
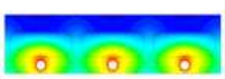
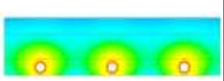
동적 에너지 해석 시뮬레이션을 위해 EnergyPlus 7.0 프로그램을 활용하였다. 이때 표면 열전달의 계산을 위해 기본 알고리즘은 CTF(Conduction Transfer Function)로 설정하였다.[3] 에너지 해석에 필요한 기후 데이터는 서울특별시를 기준으로, 미국 에너지부 EERE(Energy Efficiency & Renewable Energy)에서 실시간으로 제공되는 EPW(EnergyPlus Weather) 파일을 적용하였다. Heat Balance Algorithm은 유한차분법(Finite Difference Method, FDM)으로 설정하고, 3분 간격으로 계산되도록 하였다. 그 이외의 기본적인 프로그램 입력 정보는 다음 표 9와 같고, HVAC 시스템은 별도의 조건을 입력하지 않아도 냉난방 부하에 맞게 적용이 가능한 “IdealLoadsAirSystem”으로 설정하였다.

3) Yoon-Bok Seong, Jae-Han Lim, Energy Saving Potentials of Phase Change Materials Applied to Lightweight Building Envelopes, Energies, 6, 2013

표 2.3.17 프로그램 기본 입력 값

구분		입력 값
내부 발열량(W/㎡)	사람	6.2
	기계	14
재실밀도(명/㎡)		0.11
조명밀도(W/㎡)		20
환기량(㎥/㎡h)		6
기계/조명 스케쥴		(평일)9:00～18:00
HVAC 스케쥴		(평일)7:00～18:00
설정 온도(℃)	난방	22
	냉방	26

표 2.3.18 중공 슬라브(TABS) 모델의 1차원 변환

기본 모델					1차원 변환 모델					
Case 구분	온도 분포도	Thermal Output (W/m)	T_{max} (℃)	T_{min} (℃)	Case 구분	온도 분포도	Thermal Output (W/m)	T_{max} (℃)	T_{min} (℃)	T_{max} 오차 (%)
A) Base model		51.68	27.68	23.17	A') 1D model		49.39	27.69	23.07	0.4
B) Base _Octa		33.47	26.90	21.30	B') 1D _Octa		31.90	26.83	21.26	0.3
C) Base _Hexa		27.15	26.98	20.35	C') 1D _Hexa		26.64	26.93	20.42	0.2
D) Base _SSPCM 10		55.12	27.89	23.63	D') 1D _SSPCM10		53.14	27.77	23.56	0.4
E) Base _SSPCM 20		52.24	27.80	23.27	E') 1D _SSPCM20		50.21	27.68	23.20	0.4
F) Base _SSPCM 30		51.03	27.76	23.12	F') 1D _SSPCM30		48.97	27.66	23.04	0.4

* 위 각 case별 온도 분포도는 난방 6시간째의 분포를 나타냄.



* Case 구분:

A) Base model- 중공 슬라브(TABS) 기본 모델, A') 1D model- 중공 슬라브(TABS) 1차원 변환 모델,

B) Base_Octa- Octadecane PCM을 적용한 기본 모델, B') 1D_Octa- Octadecane PCM을 적용한 1차원 변환 모델,

C) Base_Hexa- Hexadecane PCM을 적용한 기본 모델, C') 1D_Hexa- Hexadecane PCM을 적용한 1차원 변환 모델,

D) Base_SSPCM10- SSPCM concrete 10%을 적용한 기본 모델, D') 1D_SSPCM10- SSPCM concrete 10%을 적용한 1차원 변환 모델,

E) Base_SSPCM20- SSPCM concrete 20%을 적용한 기본 모델, E') 1D_SSPCM20- SSPCM concrete 20%을 적용한 1차원 변환 모델,

F) Base_SSPCM30- SSPCM concrete 30%을 적용한 기본 모델, F') 1D_SSPCM30- SSPCM concrete 30%을 적용한 1차원 변환 모델

* 시뮬레이션(Physibel BISTRA 3.1w 프로그램) 입력 조건

- ASHRAE Fundamental 2009을 기준으로 하여, 파이프 내 유량은 30℃에서의 표면열전달계수 894.3W/㎡K을 환산 값으로 적용하고, 스케쥴은 8시간동안 간헐 난방 하는 것으로 설정하였다.
- 경계 조건: 상하층 온도 $T=20℃$, 표면열전달계수 11.63W/㎡K

(3) 시뮬레이션 결과

(가) 에너지절감 효과 분석

다음 표 10은 각 case별 연간 총 소요 에너지를 나타내고 있으며, 이때의 총 소요 에너지란 냉난방은 물론, 기계 및 조명 등에 소요되는 모든 에너지를 말한다. 1차원 기본 모델(1D Model)을 적용한 경우 건물에서의 총 연간 소요 에너지는 약 89,562kWh로 나타난 반면, SSPCM 30%를 적용한 모델(1D_SSPCM30)의 경우 76,577kWh로 총 연간 소요 에너지가 14.5% 절감되었음을 알 수 있다.

표 11, 12은 EnergyPlus 7.0 프로그램 에너지 해석 시뮬레이션 결과 난방 기간(11월~3월)과 냉방 기간(4월~10월)에 나타난 연간 총 냉난방 부하와 냉난방 최대 부하, 실내 최저 및 최고 온도를 보여준다. 난방 기간과 냉방 기간은 프로그램 상에서와 같이 실시간 날씨 데이터에 따라 난방 및 냉방이 가동되는 기간을 기준으로 하였다.

난방 설정 온도는 22℃로 설정하였고, 난방 기간에 해당하는 11월부터 3월까지의 연간 총 난방부하는 1차원 기본 모델을 적용한 경우 16,099kWh, 콘크리트에 SSPCM을 30% 섞은 모델의 경우 12,287kWh로 최대 24%까지 절감되었다.

냉방 설정 온도는 26℃로 설정하였고, 냉방 기간에 해당하는 4월부터 10월까지의 연간 총 냉방 부하는 1차원 기본 모델을 적용한 경우 25,038kWh, SSPCM 30%가 적용된 모델의 경우 16,547kWh로 최대 약 34%까지 감소하였다. 최대 냉방 부하(피크 부하)는 1차원 기본 모델을 적용한 경우 30,684kWh, SSPCM이 30% 적용된 모델의 경우 22,450kWh로 약 27% 감소하였다.

표 2.3.19 Case별 연간 총 소요 에너지 비교

구분	연간 총 소요 에너지(kWh)
1D Model	89561.74
1D_Octa	89405.77 (↓0.17%)
1D_Hexa	88938.54 (↓0.70%)
1D_SSPCM10	82321.37 (↓8.08%)
1D_SSPCM20	76711.90 (↓14.35%)
1D_SSPCM30	76576.70 (↓14.50%)

표 2.3.20 난방 기간(11월~3월) 실내 열적 특성 비교
(1차원 기본 모델과 차이가 10% 이상 날 경우 진하게 표시)

구분	연간 총 난방부하(kWh)	난방 최대 부하(W)	실내 최저 온도(℃)
1D Model	16099.23	39556.61	10.91
1D_Octa	16168.26 (↑0.43%)	41191.27 (↑4.13%)	10.20 (↓6.50%)
1D_Hexa	15741.09 (↓2.22%)	39759.80 (↑0.51%)	10.94 (↑0.26%)
1D_SSPCM10	13337.31 **(↓17.16%)**	39907.19 (↑0.89%)	13.34 **(↑22.32%)**
1D_SSPCM20	12197.54 **(↓24.24%)**	39899.01 (↑0.87%)	13.46 **(↑23.36%)**
1D_SSPCM30	12287.30 **(↓23.68%)**	39890.31 (↑0.84%)	13.66 **(↑25.24%)**

표 2.3.21 냉방 기간(4월~10월) 실내 열적 특성 비교
(1차원 기본 모델과 차이가 10% 이상 날 경우 진하게 표시)

구분	연간 총 냉방부하(kWh)	냉방 최대 부하(W)	실내 최고 온도(℃)
1D Model	25037.76	30683.69	32.36
1D_Octa	24828.73 (↓0.83%)	29430.64 (↓4.08%)	31.96 (↓1.23%)
1D_Hexa	24801.03 (↓0.95%)	31411.29 (↑2.37%)	32.47 (↑0.35%)
1D_SSPCM10	20830.73 **(↓16.80%)**	27406.23 **(↓10.68%)**	30.57 (↓5.53%)
1D_SSPCM20	16750.22 **(↓33.10%)**	22138.54 **(↓27.85%)**	28.45 **(↓12.09%)**
1D_SSPCM30	16546.91 **(↓33.91%)**	22449.02 **(↓26.84%)**	28.37 **(↓12.32%)**

(나) 실내 열적 쾌적성 분석

PCM을 적용할 경우 에너지 절감 측면에서 뿐만 아니라 재실자가 느끼는 실내 열적 쾌적감에 얼마나 기여하는지 알아보기 위해 냉난방 기간의 실내 온도와 예상 평균 온열감(Predicted Mean Vote, PMV)[4]을 분석해보았다.

4) 예상 평균 온열감(Predicted Mean Vote, PMV)이란 실내 환경의 열적 쾌적성을 학문적으로 연구한 Fanger(1982)에 의해 수치화된 실내 열적 쾌적 지수이다. 활동량(metabolic rate), 착의량(thermal resistance), 온도(air temperature), 평균 복사온도(mean radiant temperature), 상대 기류속도(relative air velocity), 수증기 분압(partial water vapour pressure)에 따라 결정될 수 있다. 춥다(cold) -3, 서늘하다(cool) -2, 약간 서늘하다(slightly cool) -1, 알맞다(neutral) 0, 약간 따뜻하다(slightly warm) +1, 따뜻하다(warm) +2, 덥다(hot) +3으로 나뉘며, 국제표준화기구 ISO 7730에 따르면 +0.5~-0.5의 범위에서 재실자의 95%가 열적으로 쾌적하다고 느낀다.

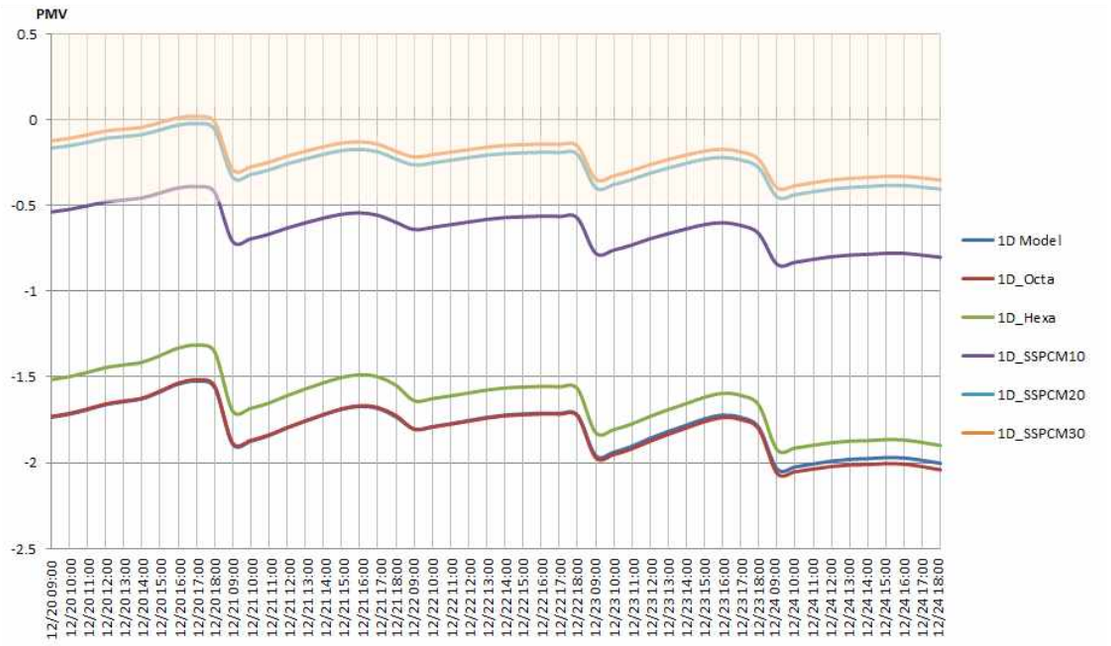


그림 2.3.19 동절기(동지 12월 22일) PMV 그래프(색깔 표시 영역은 PMV –0.5~+0.5 열적 쾌적 범위)

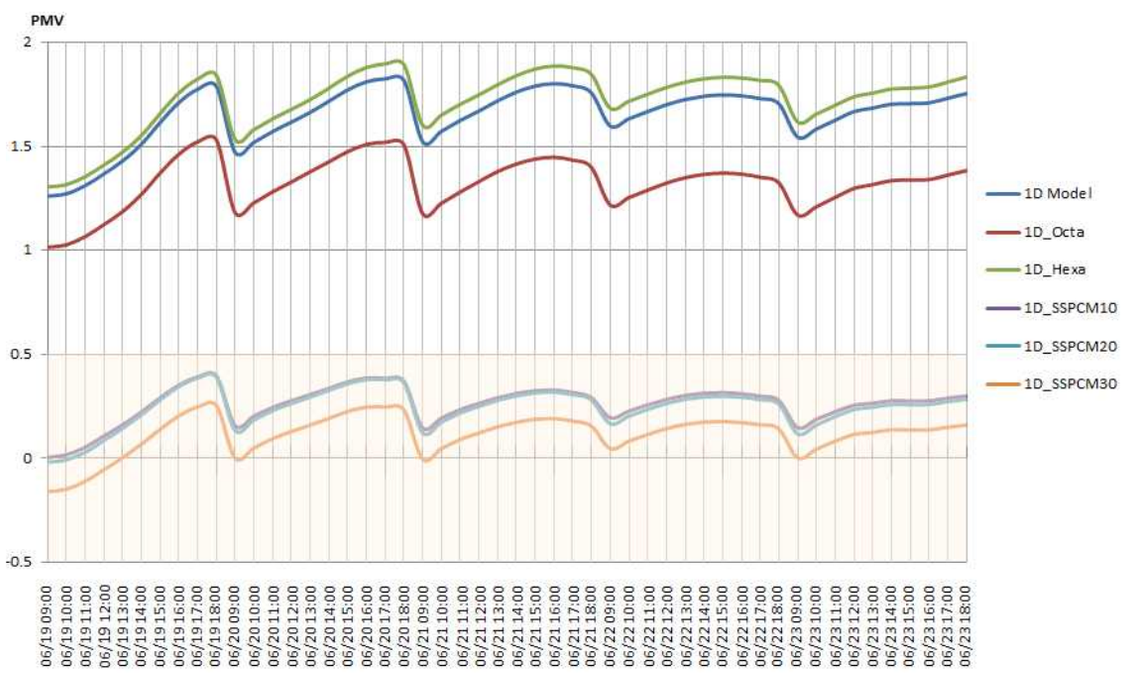


그림 2.3.20 하절기(하지 6월 21일) PMV 그래프(색깔 표시 영역은 PMV –0.5~+0.5 열적 쾌적 범위)

표 11과 같이, 난방기간인 11월부터 3월까지 1차원 기본 모델(1D Model)의 실내 최저 온도는 10.91℃인 반면, SSPCM 30%가 적용된 모델(1D_SSPCM30)의 경우 13.66℃로 약 25% 높게 나타났다. 냉방기간인 4월부터 10월까지 실내 최고 온도 또한, 1차원 기본 모델의 경우 32.36℃, SSPCM 30%가 적용된 모델의 경우 28.37℃로 약 12% 낮게 나타남을 알 수 있다.(표 12)

실내 온도뿐 아니라 재실자의 상태와 기타 실내 조건을 고려해서 열적 쾌적도를 구체적으로 알아보기 위해 예상 평균 온열감(PMV)을 분석해보았다. 다음 그림 6과 7은 각각 동절기와 하절기 중 동지와 하지를 기준으로 5일 동안의 PMV를 그래프로 나타낸 것이다. 동절기의 경우 동지인 12월 22일을 기준으로 20일부터 24일까지의 값을, 하절기의 경우 하지인 6월 21일을 기준으로 19일부터 23까지의 값을 분석하였다. PMV는 재실자가 느끼는 온열감을 예측한 수치이므로 하루 중 재실시간에 해당하는 오전 9시부터 오후 6시까지의 값만 나타내었다.

ISO 7730에 따르면 PMV 값이 -0.5~+0.5 사이 범위에 있으면 재실자의 95%가 쾌적함을 느낀다. 에너지 해석 결과, 전반적으로 1차원 기본 모델의 경우보다 Octadecane, Octadecane/xGnP SSPCM 10%, 20%, 30%가 적용된 경우 열거한 순서대로 PMV 값이 0에 가깝게 나타났다. 1차원 기본 모델의 경우 하절기 중 1.83으로 가장 높은 값의 PMV가 나타난 6월 20일 17시에 SSPCM 30% 콘크리트를 적용한 모델은 PMV 값이 0.25로 나타났다. 마찬가지로, 1차원 기본 모델이 동절기 중 -2.04로 가장 낮은 값의 PMV가 나타난 12월 24일 9시에 SSPCM 30% 콘크리트를 적용한 모델은 PMV 값이 -0.40으로 나타났다. 이처럼 SSPCM 30%가 적용된 모델이 1차원 기본 모델(1D Model)과 PMV 값이 최대 약 ±1.5까지 차이 나면서 효과적으로 -0.5~+0.5 사이 범위를 유지하는 것을 볼 수 있다.

3. 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템의 매뉴얼 개발

가. 시뮬레이션을 통한 PCM 재료의 성능 기준 수립

(1) PCM을 적용한 구체축열시스템의 축열 및 방열 특성 분석

(가) 연구방법 및 절차

PCM 적용에 따른 구체축열시스템의 축열 및 방열 특성은 Physibel Voltra 6.0W를 이용, 하계와 동계로 나누어 분석하였다. 축열 특성은 콘크리트 구조체에 다양한 상변화온도의 PCM 적용, 각각에 대한 축열 성능을 검토하였다. 방열 특성은 축열 성능이 가장 우수한 PCM에 대해 공급되는 냉수 및 온수의 유량과 온도 조건에 따른 방열 성능을 검토하였다.

(나) 시뮬레이션 개요

본 연구는 3차원 비정상상태 전열해석 프로그램인 Physibel Voltra 6.0W를 이용, 구체축열시스템에 PCM 적용 시 상변화온도 변화에 따른 축열량과 냉수 및 온수의 공급온도와 유량 변화에 따른 방열량을 평가하였다.

시뮬레이션 평가모델은 국내 E대학 건물, 지하 2층 강의실(상하부 모두 강의실이며, 강의실 크기는 가로×세로=7m×4m임)에 적용되어 있는 구체축열시스템을 대상으로 하였으며, PCM은 그림 2와 같이 기존 배관 사이사이에 배치하는 것으로 모델링하였다.

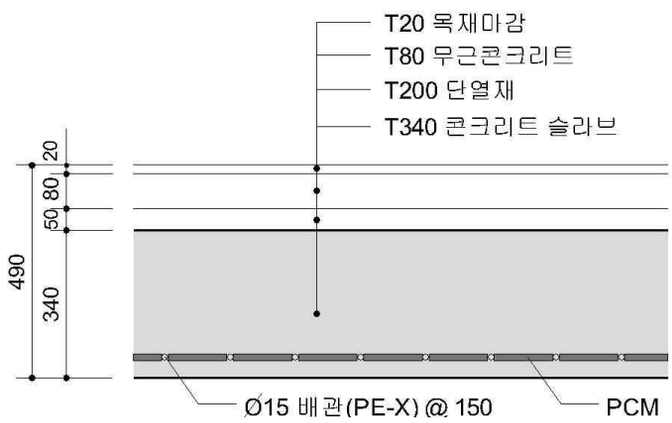


그림 2.3.21 시뮬레이션 단면(PCM 적용 단면)

PCM을 적용한 구체축열시스템의 하계 축열 특성 분석을 위해, PCM을 적용하지 않은 S_Base와 콘크리트 구조체의 온도분포를 고려, 상변화온도를 18℃부터 24℃까지 설정한 S_PCM_18, S_PCM_20, S_PCM_22, S_PCM_24를 계획하였다. 이 때 냉수의 공급온도 및 유량은 E 대학 하계 운전조건인 19℃, 10LPM으로 설정하였다.

동계 축열 특성 분석을 위해서는 마찬가지로 PCM을 적용하지 않은 W_Base와 콘크리트 구

조체의 온도분포를 고려, 상변화온도 22℃부터 28℃까지의 W_PCM_22, W_PCM_24, W_PCM_26, W_PCM_28을 계획하였으며, 온수 공급온도 및 유량은 E 대학 동계 운전조건인 29℃, 10LPM으로 설정하였다. 또한, 각 PCM들의 온도-비열 값은 공융 PCM (Hexadecane 35%+Octadecane 65%) 실측값을 기준으로 잠열량은 같고 상변화온도만 변화하는 것으로 가정, 수평 이동하여 설정하였다.(표 1, 표 2의 온도-비열 그래프 참조)

표 2.3.22 하계 축열 특성 분석 시뮬레이션 개요

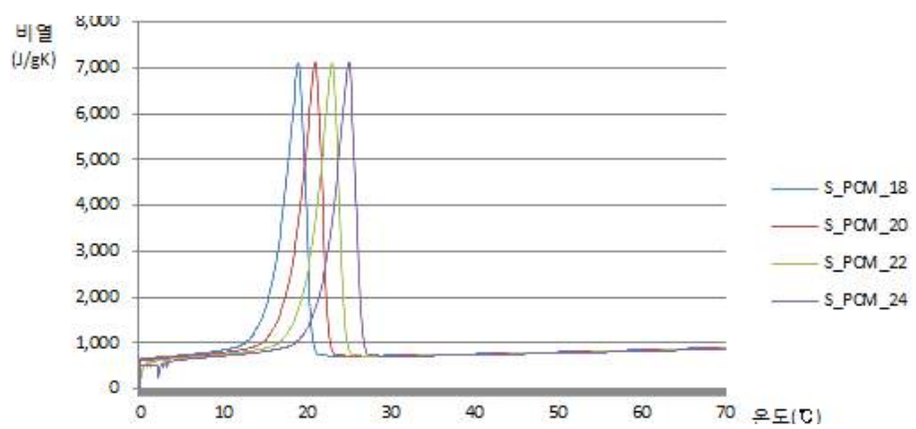
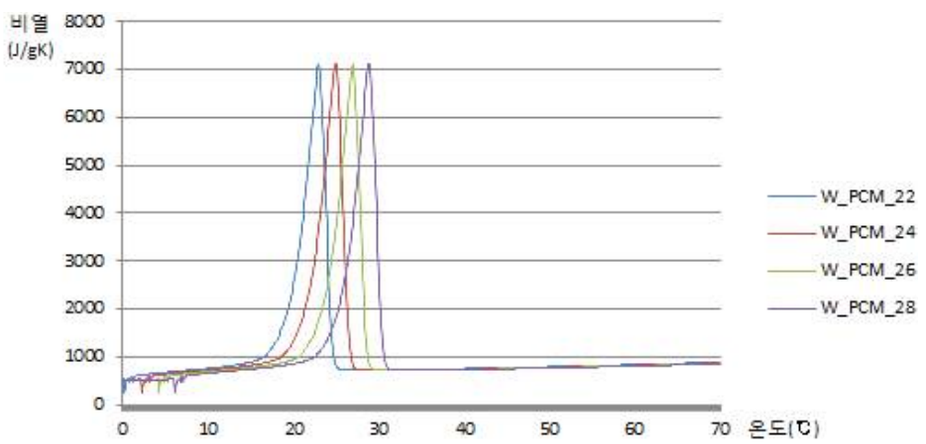
구분	S_Base	S_PCM_18	S_PCM_20	S_PCM_22	S_PCM_24
PCM 적용여부	×	○	○	○	○
PCM 상변화온도	-	18℃	20℃	22℃	24℃
냉수 공급온도	19℃	19℃	19℃	19℃	19℃
냉수유량	10LPM	10LPM	10LPM	10LPM	10LPM
PCM 온도-비열 그래프					

표 2.3.23 동계 축열 특성 분석 시뮬레이션 개요

구분	W_Base	W_PCM_22	W_PCM_24	W_PCM_26	W_PCM_28
PCM 적용여부	×	○	○	○	○
PCM 상변화온도	-	22℃	24℃	26℃	28℃
온수 공급온도	29℃	29℃	29℃	29℃	29℃
온수유량	10LPM	10LPM	10LPM	10LPM	10LPM
PCM 온도-비열 그래프					

PCM을 적용한 구체축열시스템의 축열 특성 분석을 바탕으로 적정 PCM 상변화온도를 선정한 뒤, 해당 PCM을 적용한 경우에 대해 냉수 및 온수의 유량과 공급온도에 따른 방열 특성을 분석하였다.

하계 방열 특성 분석은 E 대학 실제 운전조건인 유량 10LPM, 공급온도 19℃에서, 유량은 6LPM부터 14LPM까지, 냉수 공급온도는 15℃에서 23℃까지, 총 10개의 시뮬레이션 케이스를 설정하였다.

동계 방열 특성 분석 역시 마찬가지로 E 대학 실제 운전조건인 유량 10LPM, 공급온도 29℃에서, 유량은 6LPM부터 14LPM까지, 공급온도는 25℃에서 33℃까지, 총 10개의 시뮬레이션 케이스를 계획하였다. 모든 시뮬레이션은 하계 실내온도 26℃, 동계 실내온도 20℃로 설정하였으며, 축열 및 방열 패턴이 안정화되도록 5일간 돌려서 마지막 하루에 대해 축열량 및 방열량을 산출하여 분석하였다.

표 2.3.24 하계 방열 특성 분석 시뮬레이션 개요

구분	S_19_6	S_19_8	S_19_10	S_19_12	S_19_14
PCM 상변화온도	22℃	22℃	22℃	22℃	22℃
냉수 공급온도	19℃	19℃	19℃	19℃	19℃
냉수유량	6LPM	8LPM	10LPM	12LPM	14LPM
구분	S_15_10	S_17_10	S_19_10	S_21_10	S_23_10
PCM 상변화온도	22℃	22℃	22℃	22℃	22℃
냉수 공급온도	15℃	17℃	19℃	21℃	23℃
냉수유량	10LPM	10LPM	10LPM	10LPM	10LPM

표 2.3.25 동계 방열 특성 분석 시뮬레이션 개요

구분	W_29_6	W_29_8	W_29_10	W_29_12	W_29_14
PCM 상변화온도	22℃	22℃	22℃	22℃	22℃
온수 공급온도	29℃	29℃	29℃	29℃	29℃
온수유량	6LPM	8LPM	10LPM	12LPM	14LPM
구분	W_25_10	W_27_10	W_29_10	W_31_10	W_33_10
PCM 상변화온도	22℃	22℃	22℃	22℃	22℃
온수 공급온도	25℃	27℃	29℃	31℃	33℃
온수유량	10LPM	10LPM	10LPM	10LPM	10LPM

(다) 시뮬레이션 결과 분석

구체축열시스템의 축열 성능 향상을 위해 PCM을 적용, 케이스별 축열 및 방열 성능을 분석한 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

구체축열시스템에 PCM 적용 시, 하계, 동계 모두 축열성능이 다소 향상되었으며, 상변화온도가 PCM이 매설된 주변의 온도와 비슷할 때 가장 축열이 많이 되는 것으로 나타났다.(하계, 동계 모두 PCM 매설 근처인 표면 온도가 약 23℃로 나타났으며, 축열 성능은 22℃에서 가장 우수하게 나타났다.) 상변화온도 22℃인 PCM을 적용한 구체축열시스템에 대해 냉수 또는 온수의 유량 및 공급온도에 따른 방열(방냉)량 산출 결과, 일반적인 구체축열시스템의 물리적 거동에 유사한 경향을 보여, PCM 적용으로 인한 축열 성능이 향상이 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으며, 추후 이에 대한 보완 연구를 진행하고자 한다.

나. PCM 적용한 구체축열시스템 전열 해석 연구

(1) 시뮬레이션 조건 및 방법

구체축열시스템의 시뮬레이션 평가 모델은 국내 E대학 건물, 지하 2층 강의실(상하부 모두 강의실이며, 강의실 크기는 가로×세로=7m×4m임)에 적용되어 있는 시스템을 대상으로 하였으며, 그림과 같이 PCM 물질은 기존 배관 사이에 배치하는 것으로 모델링하였다. 본 연구에서는 3차원 비정상상태 전열해석 프로그램인 Physibel Voltra 6.0W를 이용하여 구체축열시스템에 PCM 적용에 따른 축열 및 방열 특성을 분석하고자 하였다. 이를 위해 난방기 운전을 기준으로 온수의 공급 시간 변화에 따른 방열 및 축열 특성을 평가하는 것으로 하였다. 기존 실측연구를 바탕으로 실제 구체축열시스템에서 운전되고 있는 온수 유량 및 온도 조건을 반영하여 각각 10 LPM, 29℃로 고정된 것으로 가정하였다.

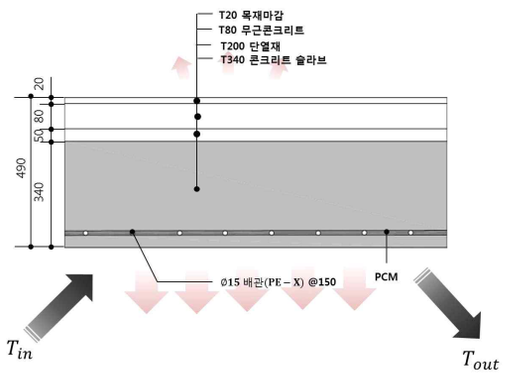


그림 2.3.22 PCM이 적용된 구체축열시스템 모델 개념

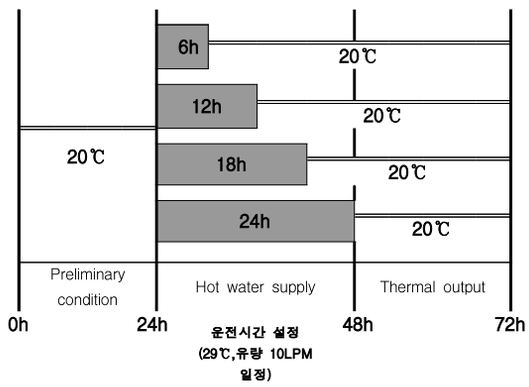


그림 2.3.23 시뮬레이션 스케쥴

(2) 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 평가 모델에 온수를 6시간, 12시간, 18시간, 24시간 동안 공급한 뒤 멈춘 경우, 온수 공급 이후에도 축열된 열에너지가 실내로 지속적으로 방열되고 있음을 알 수 있다. 표 1과 같이 기존 구체축열시스템(PCM 미적용)과 대비하여 PCM이 적용된 경우에는 평균 방열량이 다소 감소하게 됨을 알 수 있다. 이는 PCM의 적용으로 인해 슬래브 구조체에 열에너지가 축열되었기 때문으로 판단된다. 다만, 축열 성능을 향상하기 위해서는 PCM의 재료적인 성능 개선이 필요할 것으로 판단된다. 또한 구체축열시스템의 운전 조건으로서 공급 온도와 유량, 그리고 PCM의 상변화 온도 및 재료 특성에 따른 설계 조건 등의 변수에 따라 축열 및 방열 특성에 대한 분석이 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

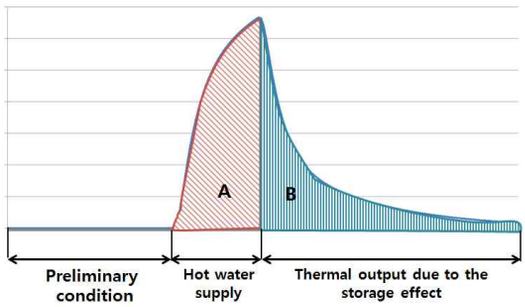


그림 2.3.24 구체축열 시스템의 축열 및 방열 특성

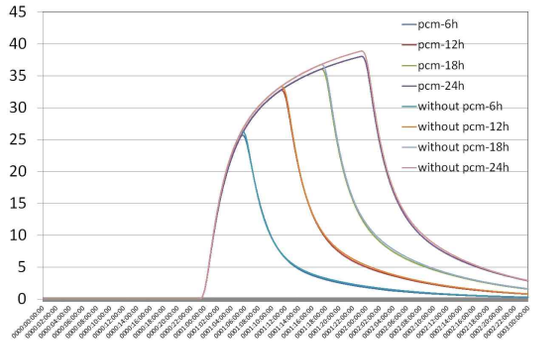


그림 2.3.25구체축열 시스템의 축열 및 방열 특성

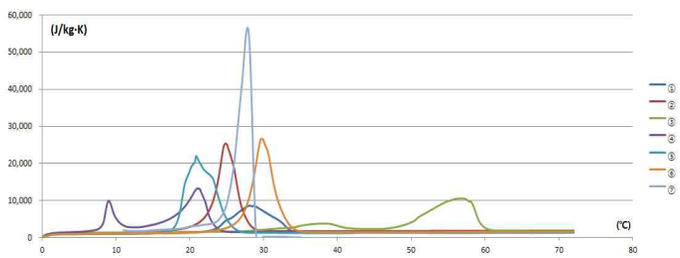
표 2.3.26 운전 정지 후 방열 지속 시간,
운전시간에 따른 평균 방열량 및 운전시간동안 평균방열량

운전시간		방열 지속 기간	평균방열량 (W/㎡)	운전시간동안 평균방열량 (W/㎡)
PCM 적용	6h	7시간 16분	3.37	3.36
	12h	11시간 31분	6.76	7.88
	18h	14시간 18분	10.09	11.74
	24h	15시간 56분	13.33	14.94
PCM 미적용	6h	7시간 30분	3.49	3.46
	12h	12시간 09분	6.94	8.06
	18h	14시간 53분	10.34	11.99
	24h	16시간 24분	13.65	15.26

다. PCM을 적용한 구체축열시스템의 최적 PCM 적용에 관한 분석

(1) 기존 PCM의 녹는점, 밀도, 비열 비교

표 2.3.27 기존 PCM 녹는점, 밀도 및 비열 물성치

구분	녹는점 (℃)	밀도 (kg/㎥)	특성	비열
①	22.0	777.0	공융PCM	
②	24.0	853.0	유기CPM	
③	64.0	0.88	유기CPM	
④	21.0	773.0	유기CPM	
⑤	20.0	777.0	유기CPM	
⑥	29.0	777.0	유기CPM	
⑦	26.0	0.98	공융PCM	

(2) 결과분석

(가) 냉방조건

실내온도 26℃이며 냉수를 12시간동안 19℃로 공급한 뒤 멈춘 경우, 냉수 공급 이후에도 축열된 열에너지가 실내로 지속적으로 방냉되고 있음을 알 수 있다.

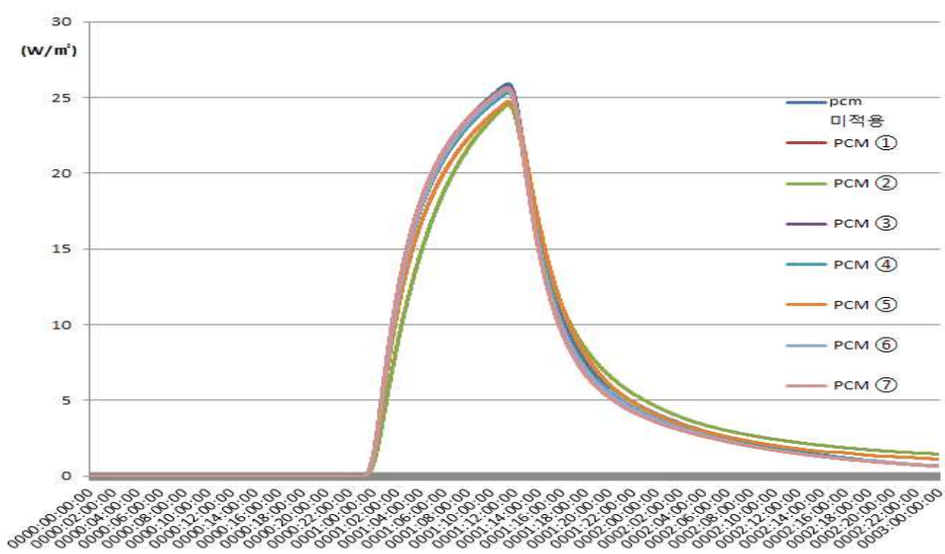


그림 2.3.26 냉방

평균 방냉량은 PCM 미적용 대안이 5.40 W/㎡으로 가장 높았으며, PCM ⑤, PCM ②, PCM ①, ③, ④, PCM ⑥, PCM ⑦의 순으로 낮아지는 것으로 나타났다. 운전시간동안 평균 방냉량은 PCM③ 대안이 17.51 W/㎡으로 가장 높았으며, PCM ⑦, PCM 미적용, PCM ⑥, PCM ②, ④, PCM ⑤, PCM ③의 순으로 낮아지는 것으로 나타났다. 방냉 지속 기간의 경우, PCM ②

대안이 10시간 31분으로 가장 긴 시간 동안 방냉하는 것으로 나타났으며, PCM ⑤, PCM 미적용, PCM ①, PCM ④, PCM ⑥, PCM ③, PCM ⑦의 순으로 방냉 지속 시간이 짧아지는 것으로 나타났다.

표 2.3.28 운전시간에 따른 평균 방냉량 및 운전시간동안 평균방냉량

구분	평균 방냉량 (W/㎡)	운전시간동안 평균 방냉량 (W/㎡)	방냉 지속 기간
PCM 미적용	5.40	17.35	9시간 17분
PCM ①	5.28	17.12	8시간 35분
PCM ②	5.31	15.32	10시간 31분
PCM ③	5.28	17.51	8시간 17분
PCM ④	5.28	17.12	8시간 34분
PCM ⑤	5.35	16.37	9시간 21분
PCM ⑥	5.24	17.21	8시간 23분
PCM ⑦	5.23	17.50	7시간 56분

(나) 난방조건

실내온도 20℃이며 온수를 12시간동안 29℃로 공급한 뒤 멈춘 경우, 온수 공급 이후에도 축열된 열에너지가 실내로 지속적으로 방열되고 있음을 알 수 있다.

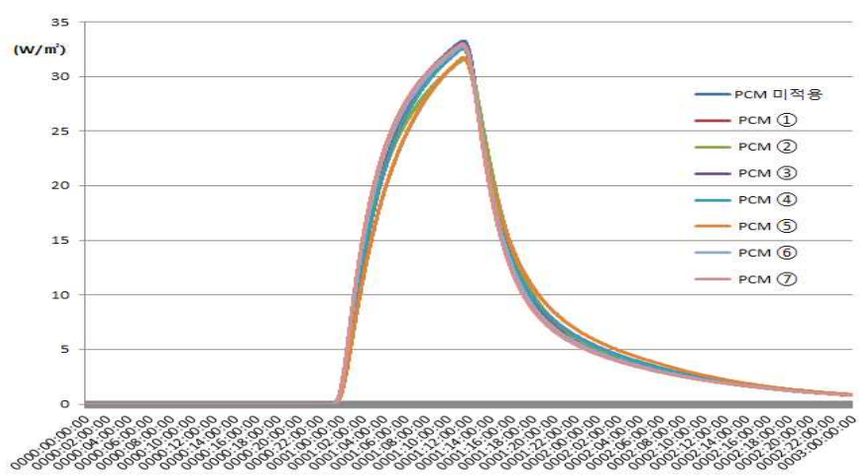


그림 2.3.27 난방

평균방열량은 PCM 미적용 대안이 6.94 W/㎡으로 가장 높았으며, PCM ③, PCM ①, PCM ⑥, PCM ⑦, PCM ④, PCM ⑤의 순으로 낮아지는 것으로 나타났다. 운전시간동안 평균방열량은 PCM ③ 대안이 22.54 W/㎡으로 가장 높았으며, PCM ⑦, PCM 미적용, PCM ⑥, PCM ②, PCM ④, PCM ③, PCM ②의 순으로 낮아지는 것으로 나타났다. (표 2.3.29 참조)

방열 지속기간의 경우, PCM ⑤ 대안이 10시간 51분으로 가장 긴 시간 동안 방열하는 것으로 나타났으며, PCM 미적용, PCM ④, PCM ②, PCM ①, PCM ⑥, PCM ③, PCM ⑦의 순으로 방열 지속 시간이 짧아지는 것으로 나타났다.

표 2.3.29 운전시간에 따른 평균 방열량 및 운전시간동안 평균방열량

구분	평균방열량 (W/㎡)	운전시간동안 평균방열량 (W/㎡)	방열 지속 기간
PCM 미적용	6.94	22.34	9시간 50분
PCM ①	6.76	21.85	9시간 19분
PCM ②	6.73	21.05	9시간 34분
PCM ③	6.79	22.54	8시간 47분
PCM ④	6.72	21.33	9시간 47분
PCM ⑤	6.71	20.08	10시간 51분
PCM ⑥	6.75	22.25	8시간 48분
PCM ⑦	6.73	22.53	8시간 24분

라. 구체축열 복사냉난방시스템의 설계 기준안 검증 및 냉난방 운전성능 평가

(1) 구체축열 복사냉난방시스템의 설계기준안

건물의 바닥 등의 슬래브와 같은 콘크리트 구조체에 배관을 둘러싸면서 매설되는 축열체에 관한 배관을 둘러싸는 축열체를 특허출원하였으며 배관을 통하여 열유체가 유동함으로써 콘크리트 구조체의 열용량에 의존하지 않고 축열량을 상승시킬 수 있는 방안을 모색하였다.

본 기술 개발을 통해 종래 기술에 비하여 열유체가 통과하는 배관에 직접 축열체가 위치함으로써, 축열성능을 비약적으로 상승시킬 수 있고 이를 통해서 재실자의 쾌적감과 에너지 절약을 동시에 획득할 수 있다. 뿐만 아니라, 콘크리트 구조체의 자중을 절감하면서도 구조적 안정성을 확보함으로써, 시멘트나 골재 등 물량을 저감함으로써 건축 분야에서 전생애 기간동안의 온실가스 발생을 줄일 수 있다. 또한 본 연구에서의 기술 개발에 따른 축열 구조 조립체를 복사냉난방 시스템에 적용함으로써 건물에서 발생하는 최대 냉난방 부하를 줄임으로써 설비 시스템의 용량을 줄일 수 있으며, 냉난방 운전시에도 타임랙 효과를 이용하여 피크 시간대에 요구되는 냉난방 에너지 소비 패턴을 달리 조절할 수 있다. 이를 통해 국가적 차원에서 냉난방에너지 수요관리에 적극적으로 대처할 수 있으며, 건물에서의 거주자 쾌적을 저해하지 않으면서도 에너지 효율적인 냉난방 운전이 가능하다.[5] 다양한 방식의 축열성능을 향상시킬 수 있는 배관을 둘러싸는 축열체를 고려하였으며 이 중 하단의 그림과 같이 중공 슬래브에 배관을 둘러싸는 축열체를 고려하여 제작하였다.

5) 특허출원번호 10-2013-0068577

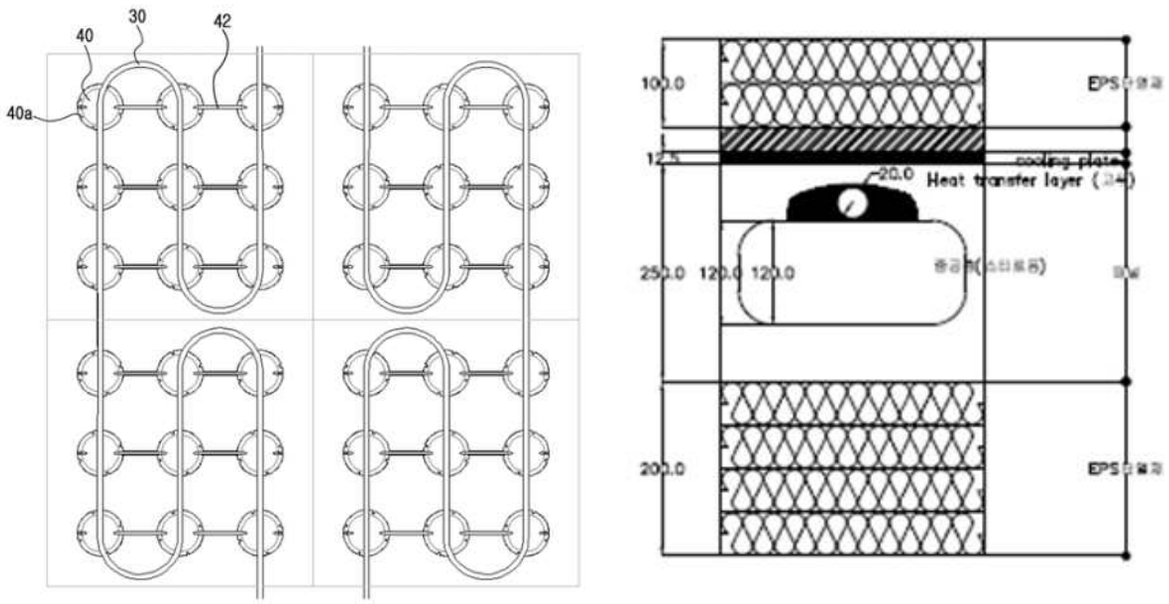
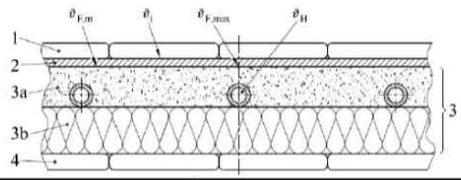


그림 2.3.28 중공 슬라브에 배관을 둘러싼 축열체에 관한 기준안 제작

(2) 설계 기준안 검증 방법

패널을 이용한 냉난방 시스템은 패널을 부착하거나 매입된 형태로 물, 공기, 전기 등과 같이 온도가 순환되어 바닥, 벽, 또는 천장의 온도가 변화하여 실내 표면의 온도를 제어하는 것이다. 온도 제어되는 표면이 50% 이상 복사에 의해 이루어지는 것을 의미한다. 냉난방 패널의 방열, 방냉특성은 입출수 온도와 방열, 방냉량의 관계로써, 실의 냉난방 부하를 제거하기 위해 설치되는 냉난방 패널의 가장 기본적인 열성능이다. 즉, 설계된 패널에서 방열특성을 구하는 것은 그 패널의 성능을 평가하는데 중요한 과정이다. 이를 평가하기 위해, 외국의 경우에는 각 패널 특성에 맞는 공급수온도-방열량 그래프를 패널업체에서 기준에 따라 실험하여 제공하고 있다. EN1264에 의한 실험방법은 실험 장치의 설치에 따른 비용과 공간소요 문제가 적어 실험체 뿐 아니라, 실험 조건, 측정법, 분석법 또한 자세히 제시되어 있어 실험을 통한 방열, 방냉 특성 평가에 적용되기에 유리하다고 사료된다. EN1264 실험법은 비용 및 공간 소요가 큰 챔버를 대체한 Cooling Plate를 통해 실 외부의 부하를 모사한다. EN1264에서 제시한 기본적인 실험체의 단면은 다음 아래 그림과 같다.



구 성 층	기 호
1) 상부 Cooling plate	$\vartheta_{F,m}$ =평균 바닥표면온도, ℃
2) 열전달층	$\vartheta_{F,max}$ =한계 바닥표면온도, ℃
3) 패널	ϑ_i =Cooling plate 표면온도 (실온), ℃
3a) 파이프가 매설된 모르타르 층	ϑ_H =판내 난방수 온도, ℃
3b) 단열재	
4) 하부 Cooling plate	

그림 2.3.29 EN1264에서 제시한 실험체 단면

(가) Cooling Plate

상부와 하부에 두어 실의 부하를 모사한다. 상부 Cooling Plate는 패널이 위치한 실의 부하를, 하부 Cooling Plate는 패널이 위치한 실의 아래층 실이나 지중 등 열이 손실될 수 있는 부분을 모사한다. 내부에는 물이 이동할 수 있는 경로가 있으며, 평면은 1,000㎜ × 1,000㎜ 이상으로 제작한다. EN1264에 제시된 Cooling Plate의 형상은 아래 그림과 같다.

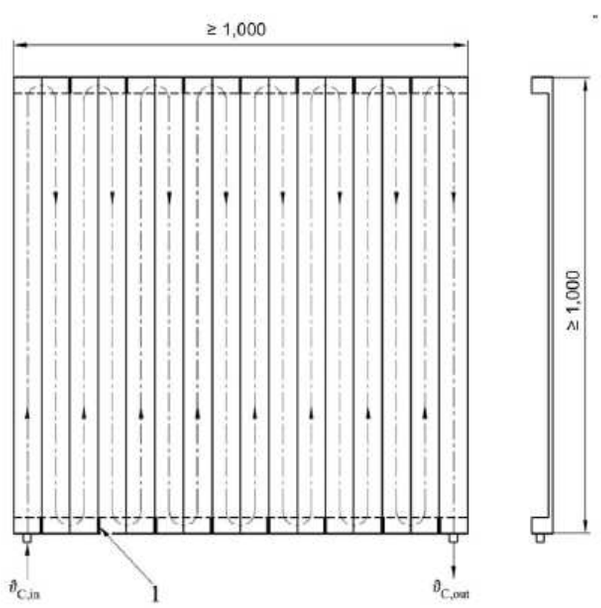


그림 2.3.30 Cooling Plate 형상 개념도

본 실험에서는 쿨링 플레이트를 제어하기 위한 실험시설의 제어가 어렵고 공간이 많이 차지한다는 단점으로 인하여 열전소자를 이용하여 일정한 온도를 제어가능 하도록 제작하였다. 열전소자를 이용하여 제작한 쿨링 플레이트의 원리 및 제작품은 아래의 그림과 같다.

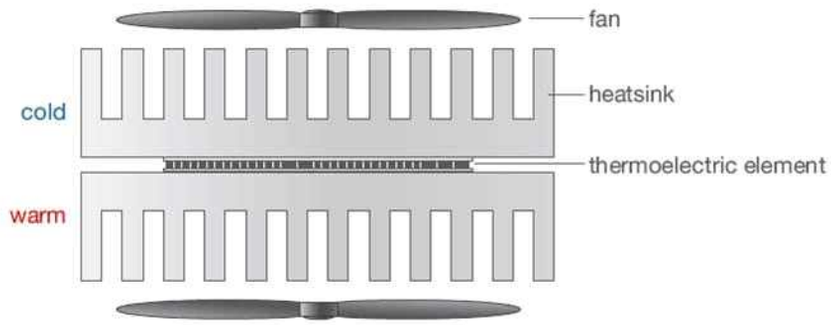


그림 2.3.31 열전소자 제작 원리



그림 2.3.32 쿨링플레이트 제작품

(나) 열전달층 (Heat transfer layer)

바닥과 주변의 대류, 복사 열교환을 전도로 모사하여 하나의 층으로 나타낸 부분이다. 저항은 대류, 복사 열교환을 합한 0.0926±0.1㎡℃/W 으로 한다.

(다) 패널

일반적으로 사용되는 여러 가지 시편, 즉, 습식, 건식 등의 패널을 적용한다. 패널과 그 하부(슬래브나 부가적인 단열재 등)를 모사하는 단열재로 이루어진다.

(2) 실험조건 및 방법

(가) Cooling Plate와 패널의 설정표면온도

EN1264에서는 그 실험 조건을 Cooling Plate가 설정 표면온도를 유지하고 패널은 설정 바닥 최고 온도를 유지할 때로 정의한다. 각각의 설정 표면온도는 다음과 같은 과정에 의해 결정되

었다. EN1264에서 패널의 방열량은 하단의 식으로 계산한다.

$$q = K_N \cdot \triangle v_H$$

여기서,

q : 바닥 난방 패널의 방열량, W/㎡

K_H : 상당 열투과 계수, W/㎡℃

$\triangle v_H$: 관내 난방수 온도 (v_H)와 상부 Cooling plate 표면온도 (v_i)의 차 (=$v_H - v_i$), ℃

$\triangle v_H$를 구할 때 v_H를 측정할 필요가 있는데, 이는 본래 관내를 직접 측정해야한다. 하지만 관내에 센서를 설치하는 데에는 어려움이 따르므로, EN1264에서는 $\triangle v_H$를 하단의 식과 같이 입출수 온도와 실내 온도를 이용한 대수평균온도차 식을 사용한다.

$$v_H = \frac{v_V - v_R}{\ln \frac{v_V - v_i}{v_R - v_i}}$$

여기서,

$\triangle v_H$: 관내 난방수 온도 (v_H)와 상부 Cooling Plate 표면온도 (v_i)의 차 (=$v_H - v_i$),℃

v_V : 바닥난방 패널 입수 온도, ℃

v_R : 바닥난방 패널 출수 온도, ℃

v_i : Cooling Plate 표면온도 (실온 모사), ℃

EN1264에서는 방열특성을 평가하기 위한 결과물로 위의 식에 따른 Characteristic curve, 즉, 방열 특성 그래프를 제시하며, 이는 아래 그림과 같이 나타난다.

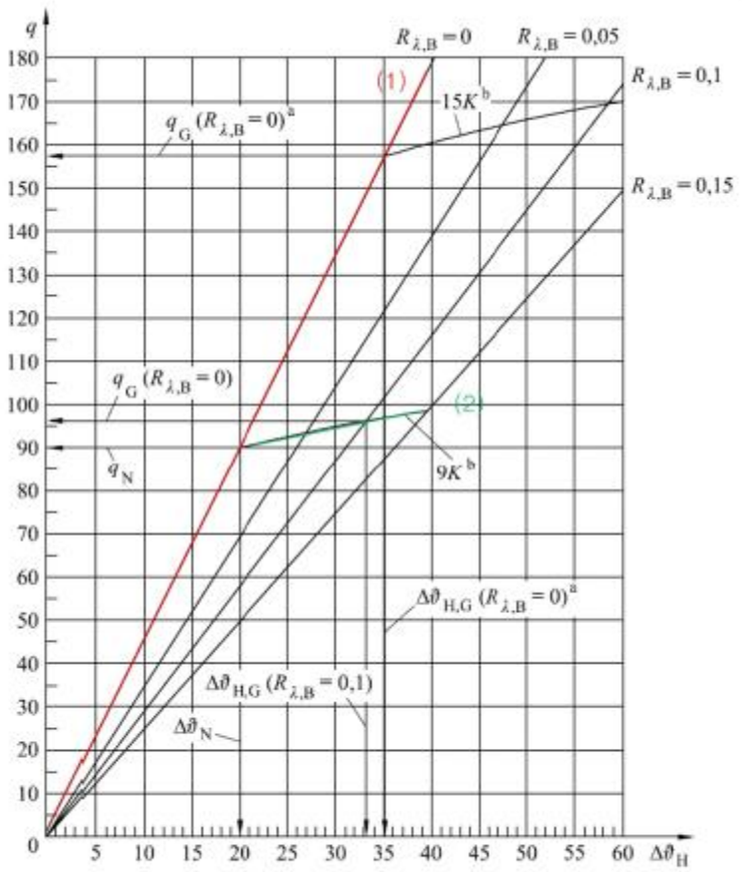


그림 2.3.33 성능 특성 곡선(Characteristic curve)

가로축은 $\triangle v_H$, 즉, 배관 내 난방수 온도와 상부 Cooling plate 표면온도의 차이고, 세로축은 그 때의 방열량 q 값이다. 즉, 일정$\triangle v_H$일 때의 방열량 q를 평가하여, 그 때 기울기 K_H를 구할 수 있다. 즉, K_H는 해당 패널의 방열특성을 보여준다.

방열량 q는 $\triangle v_H$에 의해 비례적으로 변화하며, $\triangle v_H$가 어떤 값이 되든 q는 나타난다. 즉, 기울기 K_H를 구하는 것은 어떤 경우에서든 가능하다.

방열량이 가장 큰 부분에서 바닥 난방 패널의 최대 허용 방열량 ($q_{G,\max}$)이 나올 때 방열량 실험을 하는 것이 유리하다는 결론이 나온다. EN1264에서는 바닥 마감이 되지 않은 상태에서 패널의 방열량이 가장 큰 부분의 방열량이 바닥난방 패널의 최대 허용 방열량($q_{G,\max}$)인 상황이 실험 조건에 적합하다. 이는 위의 그림의 (1) Characteristic curve과 (2) 한계 방열량의 교점에 해당한다. 바닥난방 패널의 최대 허용 방열량은 아래의 식으로 구할 수 있다.

$$q = 8.92(v_{flr} - v_i)^{1.1}$$

여기서,

q : 바닥난방 패널의 방열량, W/㎡

v_{flr} : 바닥난방 패널의 바닥표면온도, ℃

v_i : Cooling Plate 표면온도 (실온 모사), ℃

위의 식의 변수 중 v_{flr}에 패널의 방열량이 가장 큰 부분의 온도인 바닥난방 패널 표면 최고 온도($v_{F,\max}$)를 넣으면 바닥난방 패널의 최대 허용 방열량 ($q_{G,\max}$)를 구할 수 있다.

(3) 측정 및 분석 방법

(가) Cooling plate

열전소자를 이용하여 쿨링 플레이트를 제작하였으며 쿨링플레이트의 설정온도는 20℃이며 오차범위는 ±0.5℃로 제작하였다.

(나) 패널

표면온도 측정은 하단의 그림과 같이 표시된 부분에서 이루어진다. v_i를 각각 측정하여 아래의 식을 이용하여 바닥난방 패널 표면 평균 온도($v_{F,m}$)와 바닥난방 패널 표면 최고 온도($v_{F,\max}$)를 계산한다.

$$v_{F,m} = (\sum_{2}^{8} v_{F,i} + \sum_{11}^{17} v_{F,i} + \frac{v_{F,1} + v_{F,9} + v_{F,10} + v_{F,18}}{2})/16$$

$$v_{F,\max} = \frac{v_{F,5} + v_{F,14}}{2}$$

여기서,

$v_{F,m}$: 바닥난방 패널 표면 평균 온도, ℃

$v_{F,i}$: 바닥난방 패널 표면 지점(i)온도, ℃

$v_{F,\max}$: 바닥난방 패널 표면 최고 온도, ℃

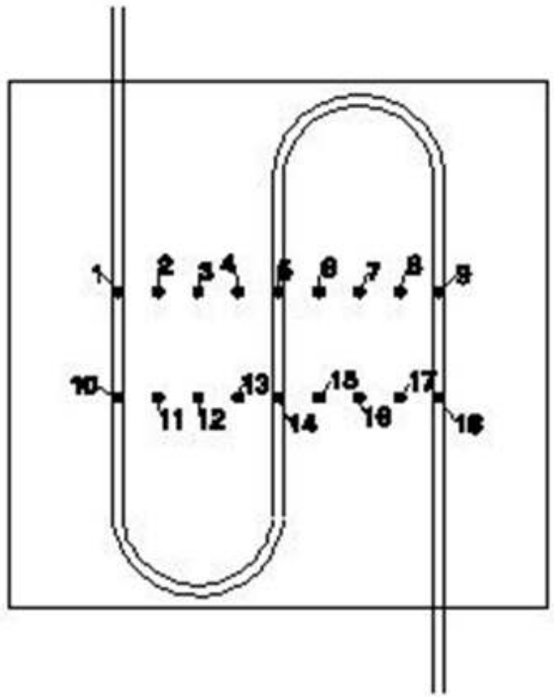


그림 2.3.34 패널 표면온도 측정 부분

(4) 분석 및 평가

(가) 배관을 둘러싸는 축열체 개요

배관을 둘러싸는 축열체를 분석을 위해 가장 기본이 되는 2가지 모델을 제작하였다. 중공슬라브에 PE-X 파이프를 연결하여 가장 기본이 되는 TABS를 갖추고, 앞서 설명한 모델에 PCM을 담은 용기(container) 사이로 배관이 지나가는 축열체를 제작하였다. 제작과 관련한 사진 및 도면은 아래와 같다.



그림 2.3.35 중공슬라브 TABS 상세

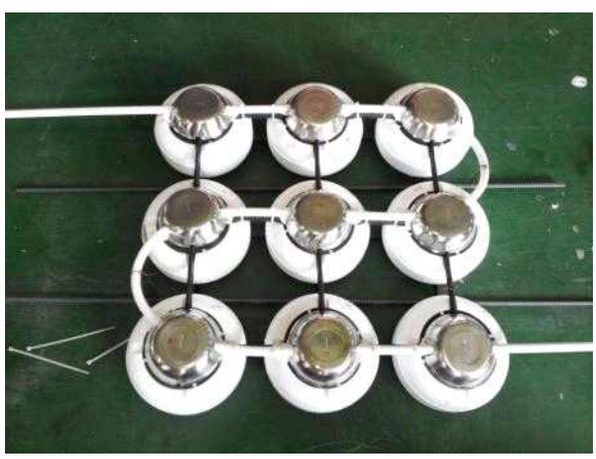


그림 2.3.36 PCM 용기 및 배관 상세

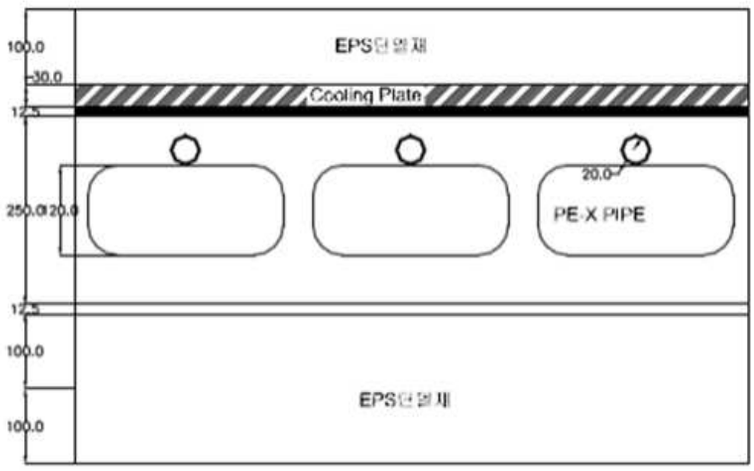


그림 2.3.37 중공슬라브 TABS 도면

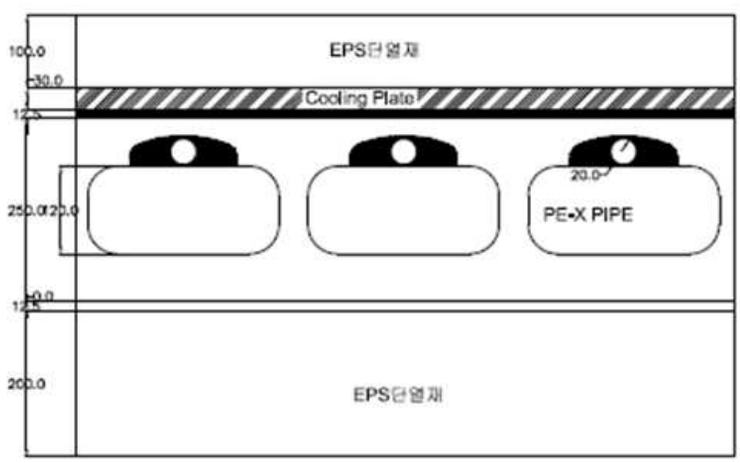


그림 2.3.38 PCM이 함유된 중공슬라브 TABS 도면

실험실 전경은 아래의 그림과 같다.



그림 2.3.39 실험체 위 Cooling plate 설치



그림 2.3.40 Cooling plate 제어장치 모습



그림 2.3.41 열원수조 제어장치



그림 2.3.42 데이터로거 장치 전경



그림 2.3.43 열원제어장치



그림 2.3.44 열원장치 전경

(나) 분석 및 평가

중공슬래브 TABS 사례의 경우, 측정결과는 아래 표와 같다.

표 2.3.30 중공슬래브 TABS 분석결과

구분	중공 슬라브 TABS (슬라브 마감재가 없는 경우, $R_{\lambda,B}=0$)								
	v_V (바닥난방패널 입수 온도,℃)			v_R (바닥난방패널 출수 온도,℃)			v_i (Cooling plate 온도,℃)		
	28.65			28.264			20.0		
패널 표면 온도	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	21.42	19.08	19.89	19.56	20.24	19.46	18.81	19.73	21.46
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	21.73	19.29	19.24	20.17	22.40	20.30	19.08	19.53	21.36

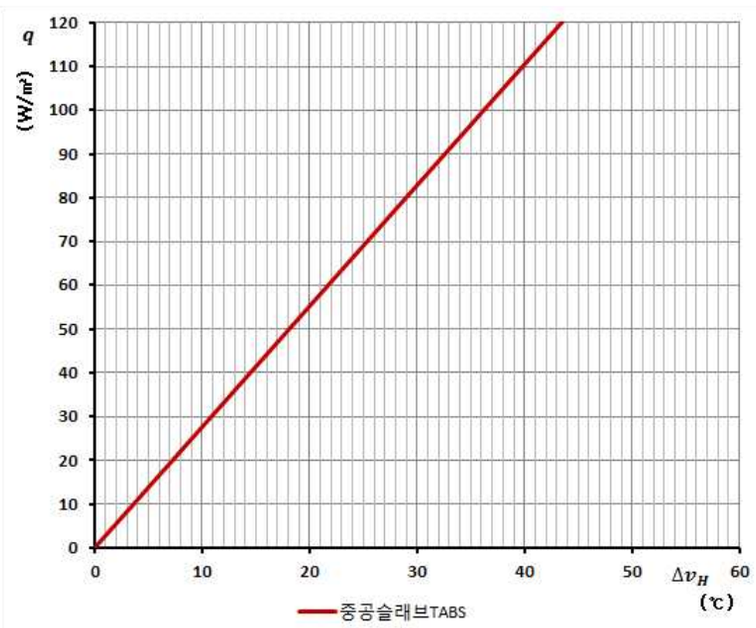


그림 2.3.45 중공슬래브 TABS 방열성능곡선

Δv_H의 값이 약 10℃일 경우, 방열량 q가 30W/㎡에 근사치에 해당하는 것으로 나타났다.

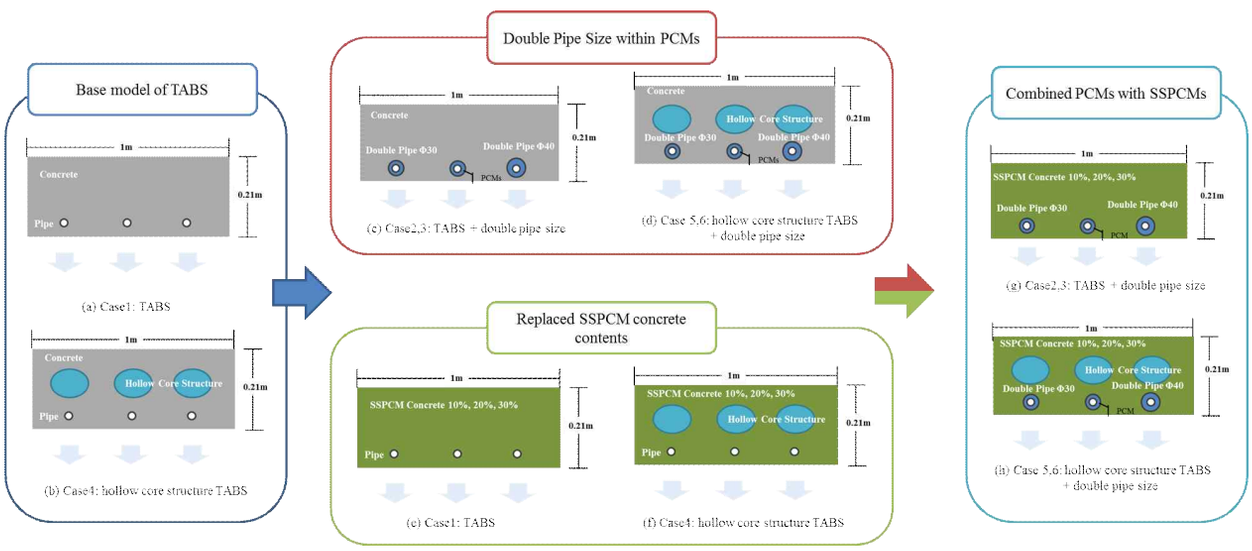
현재, PCM이 적용된 중공슬래브 TABS에 대한 방열성능 특성에 대한 실험을 중에 있으며, 그 결과값은 위와 같이 산출 가능할 것으로 판단된다.

마. PCM을 적용한 구체축열 냉난방시스템의 열적성능 설계기준

(1) 시뮬레이션 개요

본 연구에서는 2차원 비정상상태 시뮬레이션을 통해 구체축열시스템의 냉난방 시의 축열 및 방열량을 평가하는 것으로 하였다. 2차원 비정상상태 전열해석 도구로써 Physivel BISTRA 1.0W 프로그램을 이용하였다. Physibel BISTRA 1.0W 프로그램은 2차원 비정상상태 전열해석 프로그램으로 열평형 방정식을 유한차분법의 알고리즘에 의해 풀어주는 프로그램이다.

그림 2와 같이 구체축열시스템의 base model은 너비 1.1m, 높이 0.21m의 콘크리트 슬래브 내에 배관을 매설한 것이고 PCM을 적용하는 모델의 경우 Octadecane과 Hexadecane 두 종류의 PCM이 적용되며 이중배관의 직경을 30mm와 40mm로 구분하였다. SSPCM 콘크리트는 SSPCM의 함량을 10%, 20%, 30%로 구분하였다.



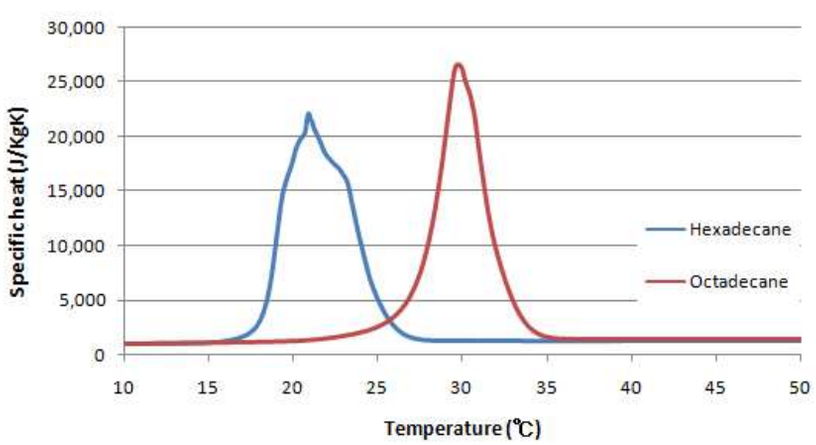


그림 2.3.46 PCM의 비열

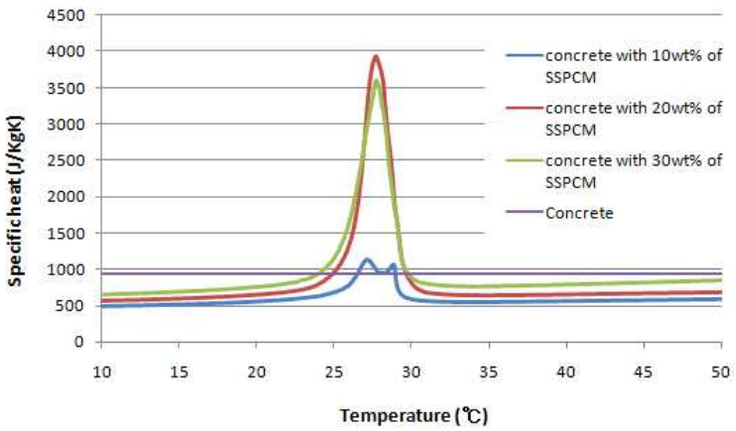


그림 2.3.47 콘크리트와 SSPCM 콘크리트의 비열

구체축열시스템과 인접해 있는 상·하부 공간의 실내온도는 하계와 동계 각각 26, 20℃, 구조체 표면열전달율은 상·하부 표면을 동일하게 11.63W/㎡K, 배관 내 흐르는 물은 ASHRAE 기준에 따라 700~900W/㎡K로 설정하였고, 각 재료별 물성치는 표 1와 같다. 냉수 온도는 16℃, 18℃, 20℃, 온수 온도는 26℃, 28℃, 30℃로 나누어 분석하였고, 유량 스케줄은 간헐냉난방 6시간, 8시간, 연속냉난방 24시간을 수행하였다. 전열해석은 1분 간격으로 24시간에 걸쳐 진행하였고 콘크리트 구조체 내의 열손실은 없는 것으로 가정하였다. 이를 통해 구조체의 축열시간, 방열(냉)량, 천장 표면의 최저온도(냉방), 최고온도(난방)를 분석하였다. 예를 들어 그림 3과 같이 평가 모델에 온수를 6시간, 8시간 동안 공급한 뒤 멈춘 경우, 온수 공급 이후에도 축열된 열에너지가 실내로 지속적으로 방열되고 있음을 알 수 있고, 24시간 연속 난방인 경우는 온수의 온도가 일정하게 유지되고 있음을 알 수 있다.

표 2.3.31 TABS components and materials in BISTRA simulation

	Conductivity (W/mK)		Density (kg/m^3)		Specific heat (J/kgK)	
Concrete	1.7		2300.0		930.0	
PE-X Pipe	0.41		1200.0		1470.0	
Hollow core structure	0.043		15.0		1300.0	
	Temperature (℃)		Heat transfer coefficients in pipe (W/m^{2}K)		Operating Schedule	
	Cooling	Heating	Cooling	Heating	Total simulation durations	Cooling and Heating durations
Water flow	20	30	801.8	894.3	24 hours	8 hours

(2) 결과 분석

시뮬레이션 수행 시 시간에 따른 방열(냉)량, 최고온도, 평균온도를 결과 값으로 설정하여 각 변수들의 데이터를 적용한 뒤 분석하였다. 이중배관의 직경, PCM의 종류, SSPCM의 함량, 유

량 운전 스케줄을 변수로 두었는데 예상과는 달리 유량 운전 스케줄 간의 방열, 축열 성능의 차이는 나타나지 않았다. 따라서 모든 분석은 8시간 냉난방 시스템을 기준으로 하였다.

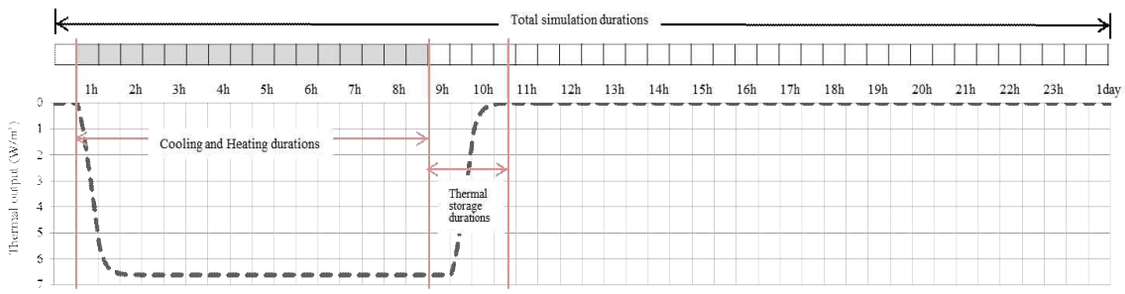


그림 2.3.48 Descriptions of simulation operating schedule and thermal storage durations

	Without PCM	PCM		SSPCM Concrete contents			Code Name	Cooling 20℃/8hours			Heating 30℃/8hours		
		Octa -decane	Hexa -decane	10%	20%	30%		Thermal Storage Duration (min)	Thermal output (W/m²)	Minimum Tempera-ture(℃)	Thermal Storage Duration (min)	Thermal output (W/m²)	Minimum Tempera-ture(℃)
Case1: TABS	√						c1_w	71	6.7	21.29	77	11.2	27.85
				√			c1_sp10	61	6.8	21.22	63	11.4	27.97
					√		c1_sp20	63	6.7	21.29	66	11.2	27.85
						√	c1_sp30	65	6.7	21.32	68	11.1	27.8
Case2: TABS+double pipe Φ30		√					c2_octa	69	6.0	21.84	75	9.9	26.94
			√				c2_hexa	68	6.2	21.67	74	10.4	27.22
		√		√			c2_octa_sp10	64	6.0	21.79	66	10.0	27.01
		√			√		c2_octa_sp20	67	6.0	21.84	69	9.9	26.94
		√				√	c2_octa_sp30	69	5.9	21.86	71	9.9	26.91
			√	√			c2_hexa_sp10	63	6.3	21.62	66	10.5	27.3
			√		√		c2_hexa_sp20	66	6.2	21.67	68	10.3	27.21
			√			√	c2_hexa_sp30	68	6.2	21.69	71	10.3	27.18
Case3: TABS+double pipe Φ40		√					c3_octa	71	5.5	22.19	77	9.1	26.36
			√				c3_hexa	70	5.9	21.91	77	9.8	26.81
		√		√			c3_octa_sp10	65	5.5	22.15	67	9.2	26.41
		√			√		c3_octa_sp20	68	5.5	22.19	70	9.1	26.35
		√				√	c3_octa_sp30	71	5.5	22.2	72	9.1	26.33
			√	√			c3_hexa_sp10	65	5.9	21.87	69	9.9	26.88
			√		√		c3_hexa_sp20	68	5.9	21.91	71	9.8	26.81
			√			√	c3_hexa_sp30	70	5.9	21.93	73	9.8	26.79
Case4: Hollow core structure TABS	√						c4_w	64	6.3	21.65	70	10.5	27.25
				√			c4_sp10	61	6.4	21.56	63	10.7	27.4
					√		c4_sp20	62	6.3	21.65	65	10.5	27.25
						√	c4_sp30	64	6.3	21.68	67	10.4	27.19
Case5: Hollow core structure TABS+double pipe Φ30		√					c5_octa	66	5.8	22.03	71	9.6	26.62
			√				c5_hexa	65	6.0	21.88	71	10.0	26.87
		√		√			c5_octa_sp10	62	5.9	21.97	64	9.8	26.72
		√			√		c5_octa_sp20	64	5.8	22.03	65	9.6	26.62
		√				√	c5_octa_sp30	66	5.8	22.05	67	9.6	26.59
			√	√			c5_hexa_sp10	62	6.1	21.82	64	10.1	26.97
			√		√		c5_hexa_sp20	64	6.0	21.88	66	10.0	26.87
			√			√	c5_hexa_sp30	65	6.0	21.9	67	10.0	26.83
Case6: Hollow core structure TABS+double pipe Φ40		√					c6_octa	68	5.4	22.27	72	9.1	26.21
			√				c6_hexa	69	5.8	22.02	73	9.7	26.63
		√		√			c6_octa_sp10	63	5.5	22.23	65	9.1	26.28
		√			√		c6_octa_sp20	65	5.4	22.27	66	9.1	26.21
		√				√	c6_octa_sp30	67	5.4	22.29	68	9.0	26.19
			√	√			c6_hexa_sp10	63	5.9	21.98	66	9.8	26.7
			√		√		c6_hexa_sp20	65	5.8	22.02	68	9.7	26.63
			√			√	c6_hexa_sp30	67	5.8	22.04	69	9.6	26.6

(가) 이중배관 직경

이중배관 직경 ϕ40mm의 모든 케이스들이 ϕ30mm보다 축열시간이 다소 긴 것으로 나타났다. 직경 ϕ30mm의 포함된 PCM의 양보다 직경 ϕ40mm의 포함된 PCM의 양이 약 2배임으로 더 효과적인 것으로 사료된다.

(나) 이중배관 속 PCM

이중배관 속 Octadecane PCM의 모든 케이스가 Hexadecane PCM보다 축열시간이 긴 것으로 나타났으며, 이것은 콘크리트 슬라브 주변의 온도가 Octadecane에 더 효과적이였던 것으로 판단된다.

(다) SSPCM 질량비

30% SSPCM 콘크리트로 교체한 모든 케이스에서 20%, 10%에 비교하여 축열시간이 긴 것으로 나타났다.

(라) PCM과 SSPCM 혼합

이중배관 속에 Hexadecane이 포함되며 30% SSPCM 콘크리트 케이스가 방열(냉)량이 다른 혼합안들과 비교하여 더 높은 것으로 나타났다.

(마) 구체축열시스템 및 중공슬라브 구체축열시스템의 설계가이드

방열량을 결정하는 중요한 요소는 쾌적성이다. 이에 가장 허용가능한 천장온도는 REHVA에서 권장하는 27℃ 천장온도를 넘지 않을 것을 권고하고 있다.

방냉량의 경우, 결로에 대한 고려가 중요하다. 결로의 경우 노점온도 이하로 떨어지는 것으로 가정할 경우, 우리나라 여름철 환경에 따라 천장의 표면온도가 19.5℃ 이하일 때, 결로가 발생할 수 있을 것으로 판단하였다.

적절한 구체축열시스템의 설계가이드로서, 냉방조건일 때 결로가 발생하지 않고 난방조건일 때 불쾌적하지 않는 조건을 만족하는 경우에는 위에 제시된 결과표에서 명암부분이 있는 케이스들에서 적절성이 나타났다.

4절 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템 현장 적용 및 경제성 평가

1. 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템의 시작품 제작

가. 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템의 실험용 시작품 제작 (2차년도)

본 연구에서의 “축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템”의 특징은 전술한 바와 같이 건식공업화(PC 포함) 시공성과 PCM을 활용한 축열성능 확보에 있다. 이를 위하여 기존 습식방식의 구체축열 슬래브를 비롯하여, PC슬래브, 데크 플레이트 등 다양한 슬래브시스템에 대한 검토를 하였다. 이 중 건식공업화 시공(PC 포함) 특성과 PCM을 활용한 축열성능이 최적으로 조합될 수 있는 중공체 삽입 PC슬래브시스템을 연구의 Base Model로 선정하였다. PCM을 통해 중공체에 의한 축열체 결손을 보완 및 강화할 수 있으며, 3차년도에 실시한 현장적용 측면에서도 중공체 삽입 PC슬래브시스템은 최적시스템으로 사료되었다. 아래 그림 2.4.1은 PCM을 적용한 중공체 삽입 PC슬래브시스템의 개념도이며, 이를 기반으로 본 연구의 실험용 시작품을 제작하였다.

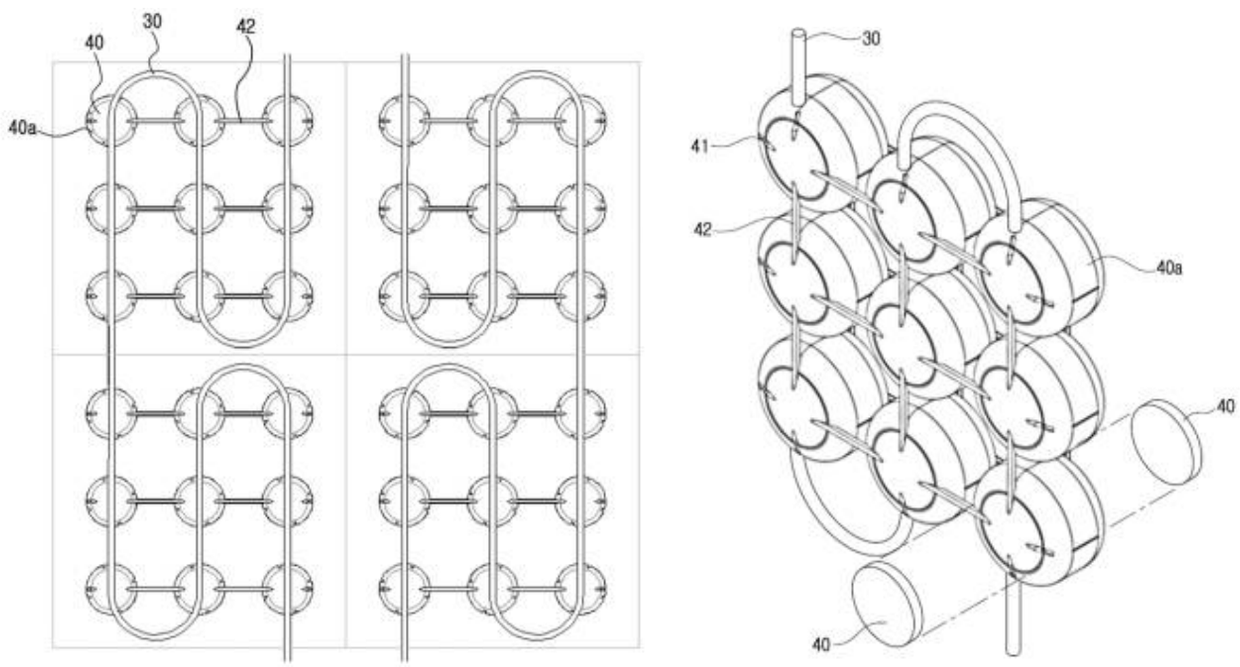


그림 2.4.1 PCM을 적용한 중공체 삽입 PC슬래브시스템 개념도

본 연구에서는 구조 및 냉난방성능 평가를 위한 실험체를 겸하는 시작품 제작을 수행하였다. 그림 2.4.2와 같이 중공체 삽입 PC슬래브시스템의 도입에 따른 구체축열시스템의 배관에 따른 휨 및 전단 성능 평가를 위해 우선적으로 구조실험용 시작품을 제작하였다.

또한 냉난방성능 평가를 위한 실험용 시작품을 표 5.1과 같이 ① 일반 RC 슬래브, ② RC 중공 슬래브 + 배관 파이프(PCM이 없는 경우), ③ RC 중공 슬래브 + 배관 파이프 + PCM 삽입

등 세가지 타입으로 제작하였다. PCM 적용을 위하여, 중공체 아래에 금속재질의 용기를 설치하고 내부에 PCM 채운 후, 내부에 배관을 설치하였다.



그림 2.4.2 구조성능 실험용 시작품 제작 (2차년도)

표 2.4.1 냉난방성능 실험용 시작품의 제작 사양

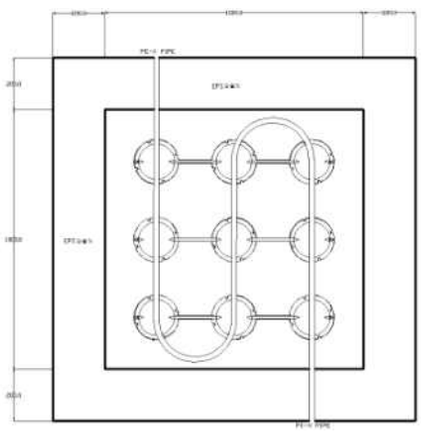
	세부 내용	비고
실험용 시작품 제작		시작품 사이즈 : 1000×1000×250mm 실험변수 : 1) 일반 RC조 2) 중공슬래브 3) 중공슬래브+PCM



그림 2.4.3 냉난방성능 실험용 시작품 제작 (2차년도)

나. 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템의 실용화 시작품 제작 (3차년도)

축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템의 실험용 시작품 제작과 함께, 2차년도에 본 연구과제에서는 “배관을 둘러싸는 축열체(Heat regenerator surrounding pipes)”라는 이름으로 특허출원을 진행하였다.

본 발명은 그림 2.4.4와 같이 슬래브와 같은 콘크리트 구조체에 배관을 둘러싸면서 매설되는 축열체에 관한 것으로, 배관을 통하여 열유체가 유동함으로써 콘크리트의 열용량와 함께 전체 구조체의 축열량을 상승시킬 수 있는 기술이다. 열유체가 통과하는 배관에 직접 축열체가 위치함으로써, 본 발명에 의하여 종래 기술에 비하여 축열 성능을 비약적으로 상승시킬 수 있고, 이를 통하여 재실자의 쾌적감과 에너지 절약을 동시에 획득할 수 있다.

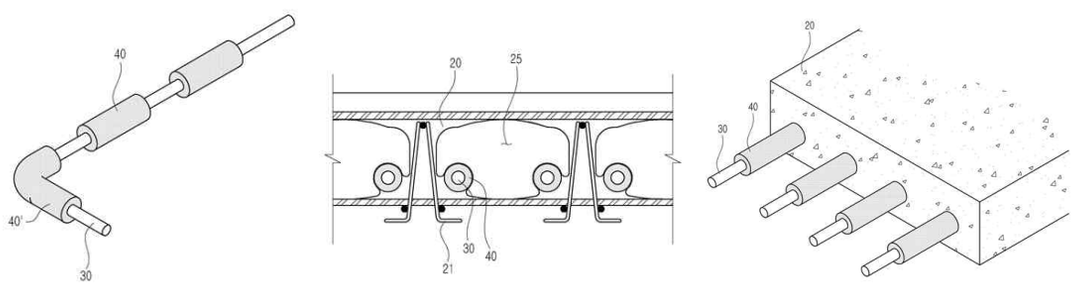


그림 2.4.4 특허출원한 배관을 둘러싸는 축열체의 형상도

2차년도의 “배관을 둘러싸는 축열체”특허출원에 기반하여 3차년도에는 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템의 실용화 시작품을 제작하였다. 특히 “PCM 구체축열 이중배관”은 본 연구에서 가장 핵심적인 실용화 시작품으로써, 열유체가 통과하는 배관을 감싸는 이중관 형태의 주름관에 PCM 재료를 채우고 이를 양단에서 새지 않도록 고안된 주름관 마개를 적용하였다. 이 PCM 구체축열 이중배관은 3차년도 연구실적으로 특허출원진행중이며, 금형제작 및 시험생산

을 통해 포스코건설 충주연구소 현장적용시 활용하였다.

(1) PCM 구체축열 이중배관의 구성자재

그림 2.4.5의 단면도 및 그림 2.4.6의 형상도와 같이 기존의 온수배관에 축열체를 둘러싸는 형태로 이중배관을 제작하였으며, 온수배관과 이중관 형태의 주름관 사이에 PCM 재료를 채우고 이를 막기 위한 마개를 제작하였다. 이중배관의 마개는 케이블 그랜드와 유사한 형태로 향후 양산을 위해 생산성을 고려하여 제작하였다.

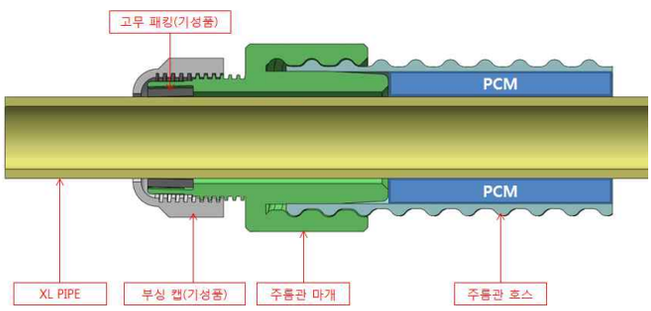


그림 2.4.5 이중배관 제작 단면도

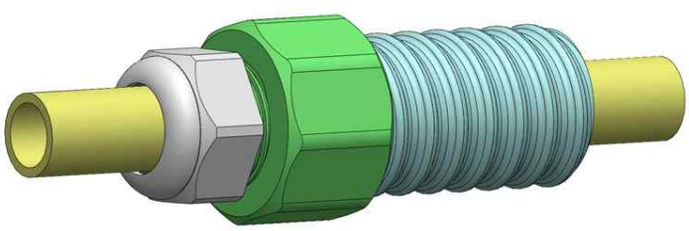


그림 2.4.6 이중배관 형상도

(가) 배관의 선정

축열체를 넣을 배관 선정시 시공성을 고려하여 투명나선배관을 선정하였다. 현장에서의 작업성이나 축열체의 용량 및 누액을 확인할 수 있으며. 나선이 둘러져 있어서 작업하중에 안전하기 때문이다.

- 배관의 선정기준
  - 가볍고 유연할 것
  - 취급 및 설치 용이할 것
  - 내약품성 우수할 것

표 2.4.2 투명주름관 나선배관의 물성

규 격 Size		내 경 I.D (mm)	외 경 O.D (mm)	파열압력(kg f/㎠) B.P			상용압력(kg f/㎠) W.P 수온10℃ W.Temp
(mm)	(inch)			수온 (10℃)	수온 (30℃)	수온 (50℃)	
32	1 1/4	32.0±0.5	38.0±1.0	14.0	11.0	5.0	8.0

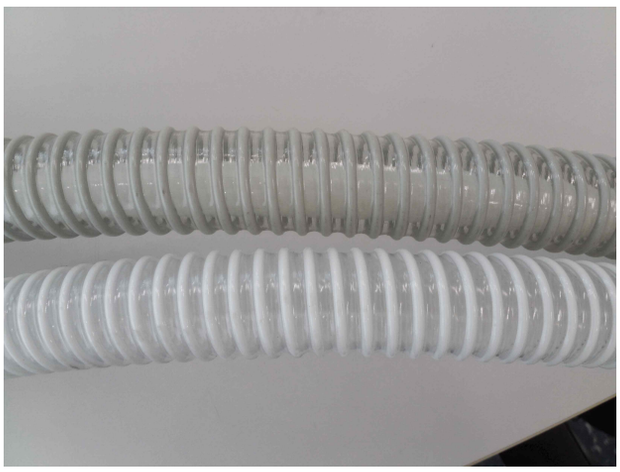


그림 2.4.7 투명주름관 나선호스

(나) 배관 마개의 제작

이중배관에 축열체를 넣고 누액이 되지 않도록 마개를 제작하였다. 향후 양산을 고려하여 기성 제품과 유사한 형상으로 아래 그림 2.4.8과 같이 제작하였다.

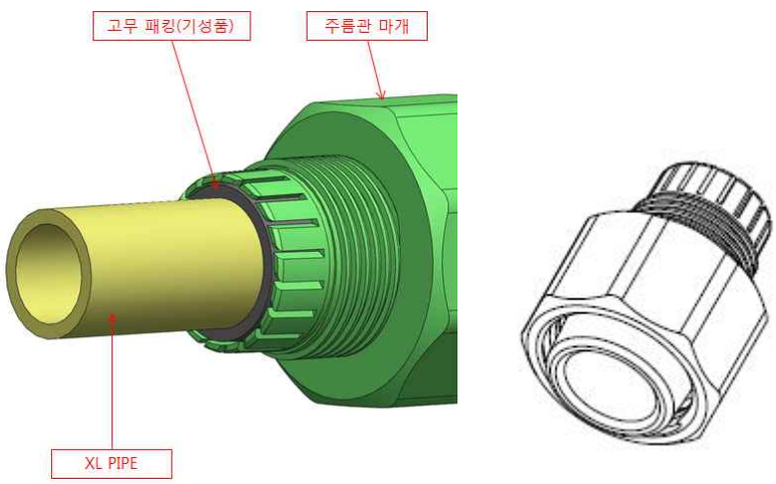


그림 2.4.8 축열체 마개 상세도

(2) 이중배관 시작품 제작



그림 2.4.9 배관의 재단



그림 2.4.10 축열체 마개의 관입깊이 표시



그림 2.4.11 축열체로 사용한 코코넛 오일



그림 2.4.12 축열체 주입



그림 2.4.13 누액방지 본딩

그림 2.4.14 축열체 마개 삽입

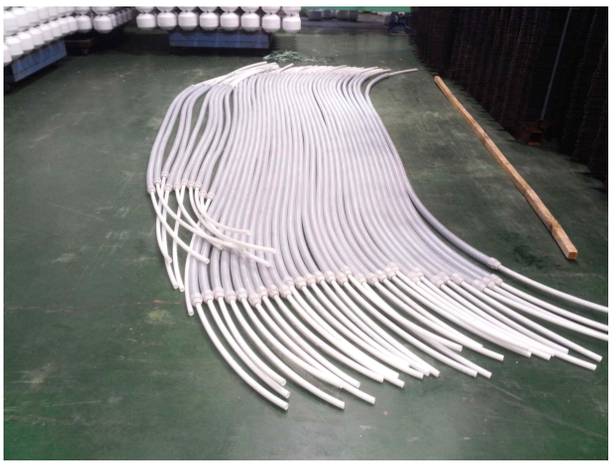


그림 2.4.15 이중배관 제작 완료

다. TVS PCM 특기시방서 작성

설계안대로 시작품 제작을 수행하면서, PCM을 활용한 구체축열 공조시스템의 시공 프로세스를 검토하고 시공상의 문제점을 파악 및 분석하였다. 그리고, 시작품의 시공성 분석을 바탕으로 시공관리사항 등을 포함한 TVS PCM 특기시방서를 작성하였다.

특기시방서는 적용범위, 시스템의 개요, 안전수칙 등의 일반사항과 시공 준비 및 사전 점검사항, 자재관리, 설치공정, 시공관리 등의 시공 관련 내용으로 구성되어 있다. 다음 서류는 TVS PCM 특기시방서 전문이다.

특기시방서

(TVS PCM)

2014년

|주| 반석 TVS
TVS Korea Co.,Ltd.

TVS Total Value Solution	특기시방서	문서번호 :
		개 정 일 :
	TVS PCM	개정번호 :
		페 이 지 :

1. 일반사항

가. 적용범위

본 시방서는 TVS 시스템의 유니트 패널을 일반거푸집공법에 설치하는데 있어 구체 축열을 위한 상변화 물질(이하 PCM) 및 난방배관을 중공슬래브 위에 접목시켜 시공함으로써 건축물 에너지 효율을 향상시킬 수 있는 바닥구조 시공에 적용된다.

나. 관련시방

이 공사와 관련이 있는 사항 중 이 시방서에 언급된 것 이외의 사항은 콘크리트 표준시방서의 해당사항에 따른다.

다. TVS PCM 280 시스템의 개요

(1) TVS PCM 280 시스템은 슬래브두께 280mm의 이방향 중공슬래브에 PCM 및 난방배관을 접목한 것으로 시공방법은 기존 중공슬래브와 동일하다.

(2) 경량체는 상·하부의 프레임 캡(Frame cap) 의해 유니트 패널(900mm×900mm)의 형태로 공장에서 조립된다.

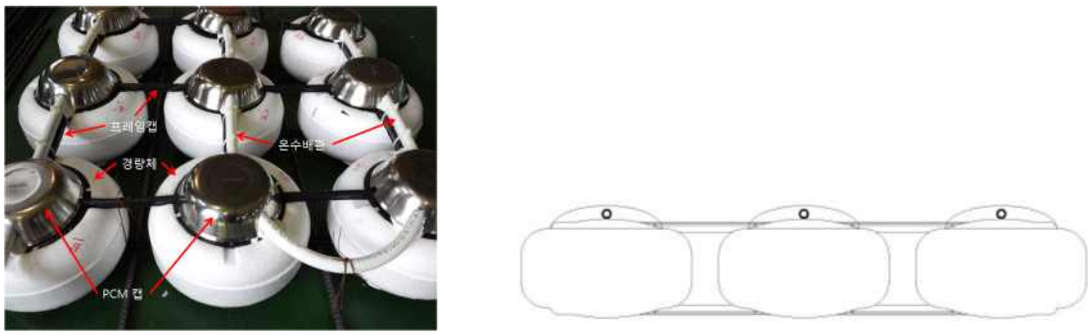
(3) 유니트 패널(900mm×900mm) 위에 난방배관이 U자 형태로 설치되고 각각의 프레임 캡 위에 PCM 캡이 조립된다.

(3) 하부 보강근은 미리 계획하여 추가 배근할 수도 있으며, 한 개의 유니트 패널은 현장사정과 운반, 건물의 규모에 따라 조정이 가능하다. 또한 전선관의 배치나, 개구부의 위치 그리고 간벽의 위치에 맞게 구성이 가능하다.

(4) TVS PCM 280 시스템의 유니트 패널은 슬래브의 상·하부 철근사이에 설치하므로, 상부철근의 스페이서 역할도 겸하게 된다.

(5) TVS 시스템은 거푸집공사 및 하부철근 배근공사 후에 유니트 패널을 배치하여 현장타설하며, 모든 접합부의 상세 또한 기존의 무량판구조와 같다.

(6) TVS PCM 280시스템의 각 부 명칭은 아래와 같다.



(a) 시스템 명칭 (b) 시스템 단면

그림 2.4.16 TVS PCM 시스템의 명칭

라. 안전수칙

(1) 유니트패널을 설치하기 전에 반드시 거푸집 및 동바리 설치의 안전상태를 점검하여 위험요소를 사전에 제거한 후 유니트패널을 설치하여야 한다.

(2) 거푸집 및 동바리 설치기준은 무량판구조와 동일하며, 가설공사 표준시방서의 해당사항에 따른다.

(3) 합판거푸집의 경우 일반 합판거푸집시방에 준하며, 사용되는 합판은 부력방지장치의 고정에 지장이 없도록 12㎜ 내수합판 또는 그에 준하는 자재를 사용하여야 한다.

(4) TVS시스템의 유니트 패널 취급시 와이어메쉬에 의한 긁힘/상처 등에 유의해서 작업하여야 한다.

(5) PCM 캡 취급시 PCM이 새지 않도록 유의해서 작업하여야 한다.

(6) 가급적 작업자 1인당 25kg 기준으로 작업하는 것이 효율적이다.

(7) 부재의 자중에 의한 전도 등에 유의하고 고소작업 시 특히 안전 발판 설치 등 충분한 작업공간의 확보 후 작업이 요구된다.

(8) 유니트 패널을 설치하기 전에 작업장 내부의 안전 상태를 점검하여 위험요소를 사전에 제거한 후 작업을 실시한다.

(9) 크레인 등을 사용하여 유니트 패널을 설치 위치에 반입 시, 작업자는 반입되는 주변의 밑에 있어서는 안 된다.

(10) 유니트 패널의 경량체는 난연소재를 사용하였으나, 화기에 취약하므로 야적 및 설치 전 후 특히 화재발생에 유의해야 한다.

(11) 가급적 소화기 및 소방기구를 주변에 배치하는 것이 좋다.

(12) 부득이 유니트 패널의 설치 후 용접 등이 요구될 시 경량체에 충분한 물축임 및 소화대책 강구 후 작업이 요구된다.

2. 시공

가. 시공 준비 및 사전 점검사항

TVS 시스템의 유니트 패널을 설치하기 위한 선행 작업이 모두 끝나고 나면, 먼저 유니트 패널의 야적위치 및 하부철근의 설치 순서 등을 고려하여 작업자들의 원활한 작업 활동 공간이 확보될 수 있도록 사전에 설치위치에 따른 작업 순서를 계획한다.

나. 자재관리

(1) TVS시스템의 경량체는 발포 폴리스티렌을 사용하였으므로, 취급 시 화재가 발생하지 않도록 특히 유의하여야 한다.
(2) 또한 경량체 원료의 특성상 휘발성 오일 또는 본드류에 의해 손상될 수 있으므로, 폼 오일 등 경량체가 손상될 수 있는 화학제품에 경량체가 직접 닿지 않도록 유의하여야 한다.
(3) TVS시스템의 경량체 고정을 위한 상·하부 프레임캡(FRAME-CAP)에 변형이 발생할 경우 경량체가 이탈 될 수 있으므로 유니트 패널의 양중 및 운반 등의 취급 시 유의하여야 한다. 따라서 유니트 패널의 양중 시 패널 변형이 최소화 되도록 한다.
(4) 야적시 태양광에 장기 노출 될 경우 경량체의 표면의 산화가 발생 경량체를 구성하고 있는 입자의 응집력이 감소하여 경량체표면이 약화되므로 천막등으로 포장하여 보관하여야 한다.

다. 설치공정

TVS 시스템의 설치공정은 그림 2와 같다.

라. 시공관리

(1) 기준선 먹매김 후 하부 철근을 배근하는 것이 바람직하다.
(2) 무량판구조와 마찬가지로 슬래브 자체가 보 역할을 감당해야 하므로 이음 및 정착 길이의 확보가 중요하다.
(3) 유니트 패널을 설치하기 위한 선행 작업을 마친 후 구조도면에 따라 하부철근을 배근하며, 하부철근의 현장 설치 간격은 가능한 한 유니트 패널의 규격을 반영하여 150, 300, 600㎜ 모듈로 배치한다.
(4) 하부철근의 스페이서 고정은 일반 철근콘크리트 슬래브의 규정과 동일하며, 구조도면에 정해진 하부피복을 만족하여야 한다.
(5) 유니트 패널 설치 시 구조도면에 따라 X, Y방향으로 경량체의 간격이 일정하게 유지되도록 유니트 패널을 배치한다.
(6) 규격화 된 유니트 패널(900㎜×900㎜)을 배치도에 따라 규칙적으로 설치한 후 패널과 패널은 연결재로 연결하며 구조도면에 따라 기둥 및 벽체 주변, 슬래브 단부, 오프닝부위 등의 부분적인 경량체 제거부위 및 보강부위를 확인하여 보정한다.

(7) 전선관 등 매립용 설치물의 경우, 스페이서 프레임(Spacer Frame)설치로 생기는 상부철근과 유니트 패널 사이의 공간(H=30mm)과 패널과 패널 사이의 공간에 배치하거나 필요 시 경량체를 제거하여 설치하여야 하기 때문에, 유니트 패널 설치 후에 전선관 등을 배관하는 것이 바람직하다.

(8) 패널의 상·하부에 설치되는 철근의 경우, 가능한 각각의 경량체와 경량체 사이에 위치되도록 배치한다.

(9) TVS PCM 유니트 패널 설치 후 부력방지장치(부력방지앙카 및 철근조립고리) 설치위치는 그림 3과 같이 설치함을 기준으로 하며 설치 개수는 패널이 부력에 의해 떠오르지 않기 위한 정도로서 표 1을 기준으로 한다.

(10) 유니트 패널의 배치 후 상부철근의 설치가 완료되고 나면, 콘크리트 타설 전 검측을 받은 후에 필요 시 보강 조치를 한다.

(11) 설치된 유니트 패널 위에 다발철근 등의 중량물이 적재되지 않도록 하여, 유니트 패널의 파손을 방지한다.



그림2.4.17 TVS PCM 280 설치 공정

표 2.4.3 부력방지 앙카 및 철근조립고리 설치 기준

구 분	개소/1㎡	용도 및 설치
부력방지앙카	1.7778EA	합판+하부근+유니트판넬+상부근 ➔ 일체화
철근조립고리	1.2345EA	하부근+유니트판넬+상부근 ➔ 일체화 부력방지앙카 표준시공시 제외(현장여건상 필요시 설치)

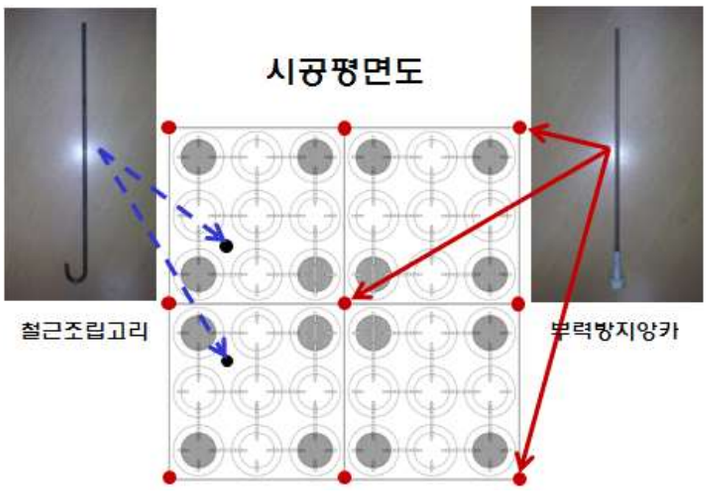


그림 2.4.18 철근조립고리 및 부력방지앙카 설치도

(12) 경량체의 부분 파손 시 교체하고, 교체작업이 불가능할 경우 파손된 경량체를 제거한다.

(13) 콘크리트 타설시하부 1/3을 선 타설하고(콜드조인트가 발생하지 않는 범위)2/3를 타설하도록 한다.(부력제거목적)

(14) 진동기에 의한 다짐은 일반 슬래브와 동일하게 실시한다.

(15) 부력방지장치는 콘크리트 양생 후 제거가 용이하도록 고안되었으며, 충격에 약하므로 PVC 고정부분이 가급적 변형되지 않도록 하고 진동 다짐 시에도 직접 닿는 일이 없도록 함이 바람직하다.

2. 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템의 현장적용

가. 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템의 실용화 시작품 현장적용 개요

1,2차년도의 연구결과를 바탕으로 3차년도에는 본 연구에서 개발한 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템의 실용화 시작품을 실제 프로젝트 적용 및 실용화 가능성 검토를 위하여 현장에 적용하였다. 대상 현장은 공동연구기관인 포스코건설이 2014년 충주에 건설한 기술연구소 실험동이다(그림 5.16~5.18 참조). 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템의 성능 비교실험을 위하여 실험동 내부 3개 Mock-Up Cell의 천정슬래브에 3가지 Type의 시스템을 설계하여 반영하였다.



그림 2.4.19 포스코건설 충주기술연구소 배치도



그림 2.4.20 포스코건설 충주기술연구소 실험동

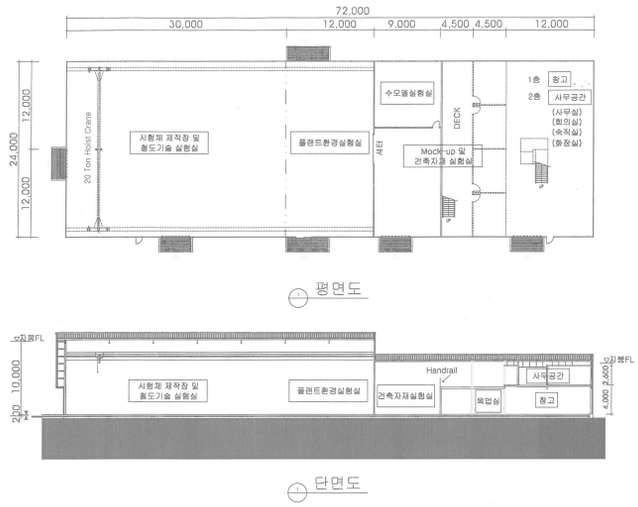


그림 2.4.21 충주기술연구소 실험동의 평면도와 단면도

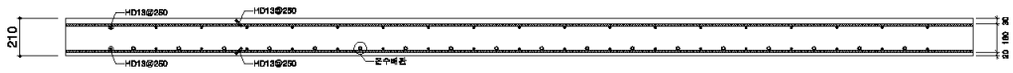
2014년 10월 실험동 Mock-Up Cell의 2층 천정슬래브 타설시 본 연구에서 개발한 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템을 현장 시공하였다. 수차례에 걸친 충주기술연구소 현장회의를 통해 공정 및 작업의 간섭체크를 하였고, 12월 준공 전에 열원설비, 수배관시스템 설치 및 시운전을 완료하였다. 향후 현장 적용된 구체축열시스템을 대상으로 냉난방 운전을 통한 성능 평가를 추가적으로 진행할 계획이다.

나. 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템의 실용화 시작품 현장 시공

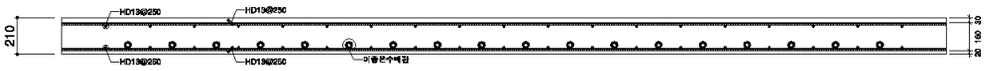
(1) 시작품 현장 시공을 위한 설계 및 시공계획

3차년도 시작과 동시에 포스코건설 충주기술연구소 연구실험동 Mock-up Cell에 적용할 시작품 Type을 검토하였다. 그림 5.19와 같이 초기 3개의 Mock-up Cell에 대하여 3 Case의 시스템을 반영한 천정슬래브를 검토하였다.

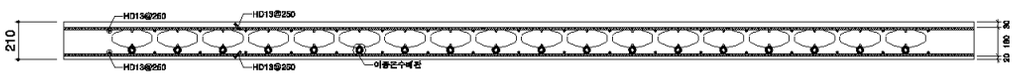
- Case1 : 구체축열시스템 기본형 - 온수배관
- Case2 : 구체축열시스템 - 이중온수배관 + PCM
- Case3 : 구체축열시스템 - 이중온수배관 + PCM + 중공슬래브



<Case1 : 구체축열시스템 기본형 – 온수배관>



<Case2 : 구체축열시스템 – 이중온수배관+PCM>



<Case3 : 구체축열시스템 – 이중온수배관+PCM+중공슬래브>

그림 2..4.22 연구실험동 Mock-up Cell에 적용할 시작품 Type

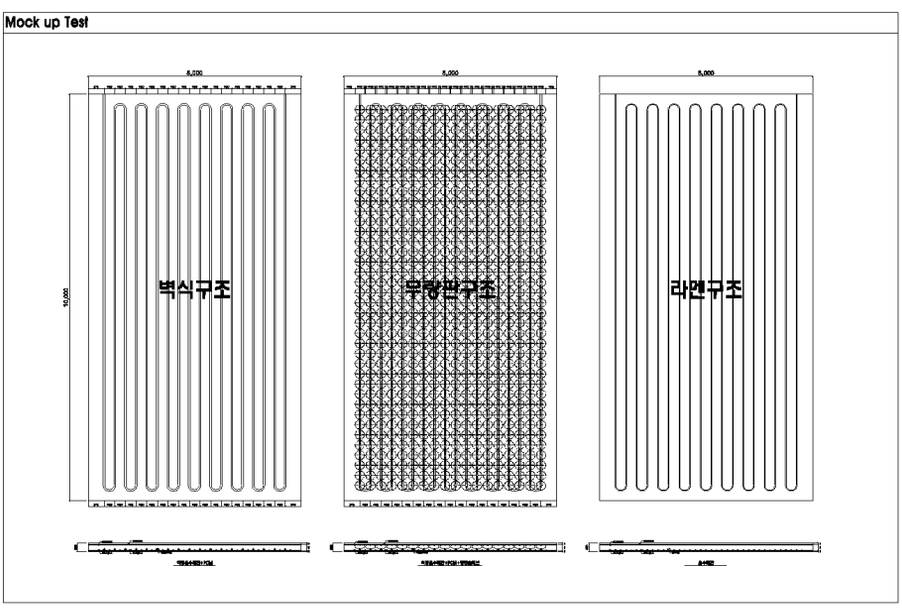


그림 2.4.23 3개 Mock-up Cell에 대한 초기 시작품 설치 계획

진행 도중 현장의 불가피한 연구실험동 설계변경에 따라서 그림 5.21와 같이 수정된 시작품 현장적용 설계를 진행하였다. 2개의 Mock-up Cell 중심(Case 1,3)으로 시스템 온열환경 및 에너지성능 비교실험을 실시할 수 있도록 현장 적용을 실시하였고, 나머지 2개의 소규모 공간으로 나누어진 Mock-up Cell에서는 시작품 적용에 따른 시스템 거주성능 중심의 평가를 실시할 수 있도록 설계하였다.

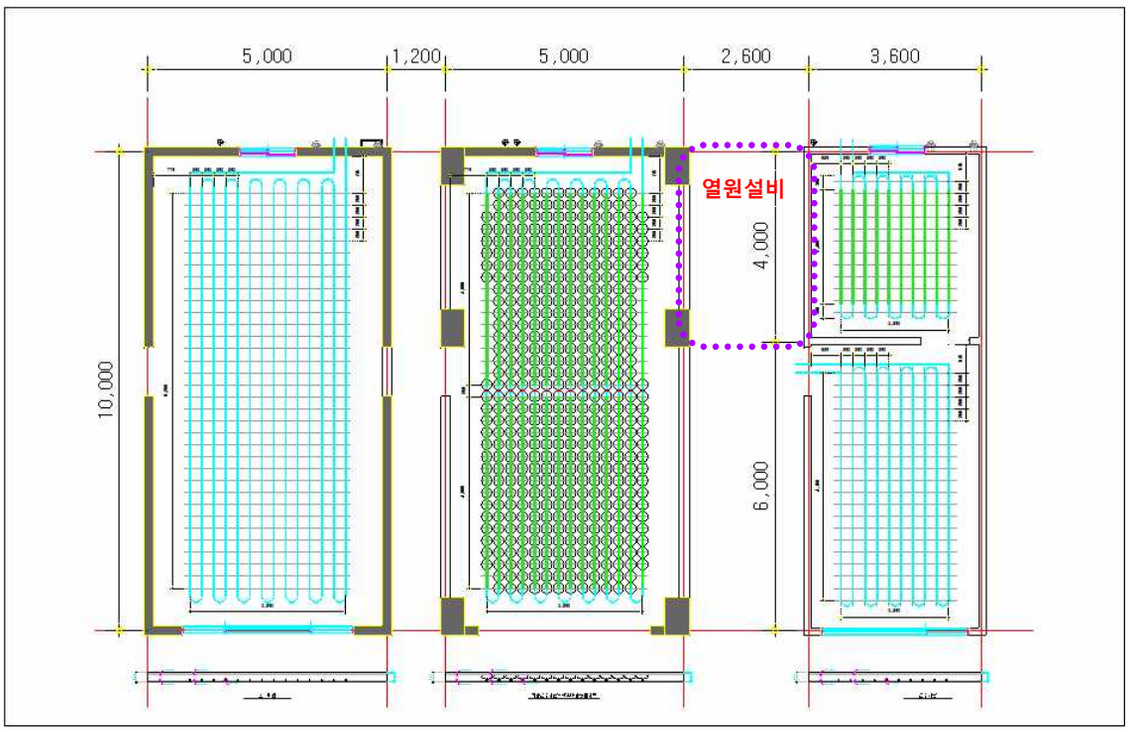


그림 2.4.24 연구실험동 설계변경에 따른 수정된 시작품 현장적용 도면



그림 2.4.25 충주기술연구소 실험동 공사진행현황 (2014.09.17)

(2) 시작품의 현장 시공 진행사항

전술한 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템의 실용화 시작품 제작과정과 같이 대상 현장에 적용을 위한 PCM 구체축열 이중배관을 공장에서 제작하였다. 시작품의 현장 시공시 온수배관 및 이중배관은 250mm 피치로 설계되었고 이에 맞추어서 배관시공 준비를 하였으며 축열체는 이중배관 길이당 0.5L를 주입하였다. 시작품의 현장 시공 진행사항은 다음과 같다.

(가) 현장반입

하부철근이 완료된 후 이중배관을 현장에 반입하여 시공한다.

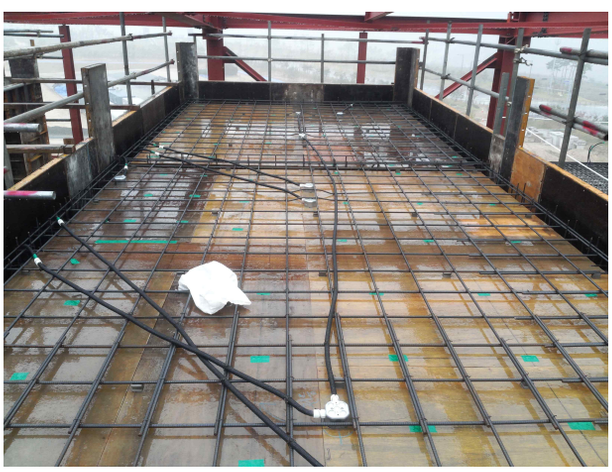


그림 2.4.26 하부철근 배근

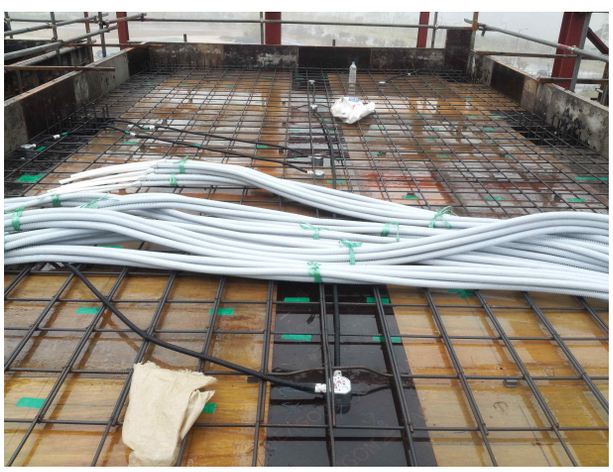


그림 2.4.27 배관 현장반입

(나) 온수관 배관 (Case 1)

온수관은 기존 시공방법대로 연결부위 없이 250mm 간격으로 시공한다. 필요한 요소마다 결속하여 온수관을 고정시킨다.

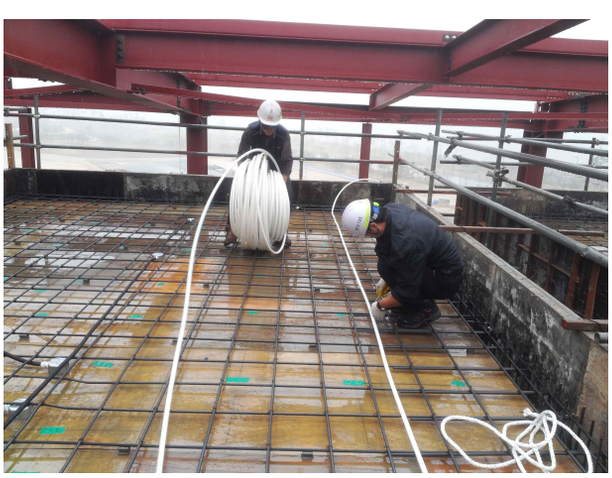


그림 2.4.28 온수관 배관

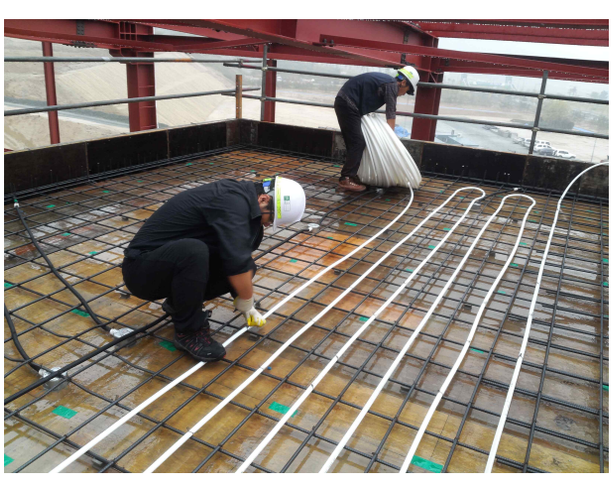


그림 2.4.29 온수관 배관 및 결속

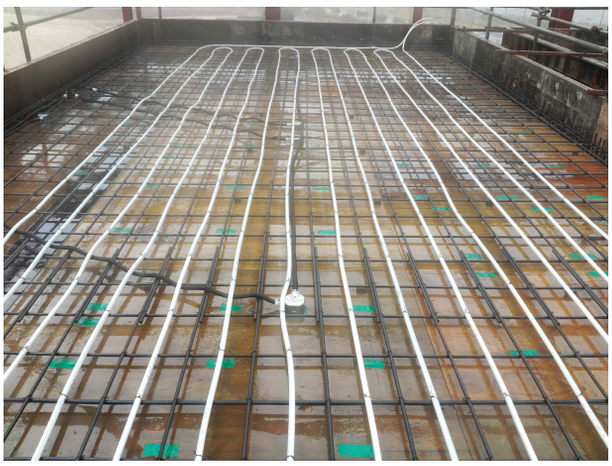


그림 2.4.30 온수관 배관 완료

(다) 이중관 배관 (Case 3)

이중배관도 온수관과 동일하게 250mm 간격으로 시공한다. 연결부위 시공을 위하여 직관부를 우선으로 시공한 후 결속한다. 직관부의 연결은 공구를 사용하여 PB소켓으로 연결하며, 누액이 되지 않도록 신중하게 시공한다. 곡관부의 연결은 온수배관을 여유롭게 절단한 후 U자형으로 구부려 PB소켓으로 시공한다. U자형으로 구부릴 경우 꺽어질 위험이 있으므로 조심하여 다루어야 한다.

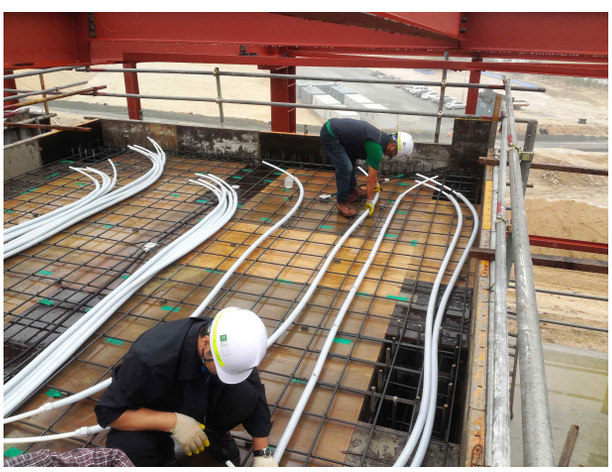


그림 2.4.31 이중배관 시공



그림 2.4.32 이중배관 연결(직관부)

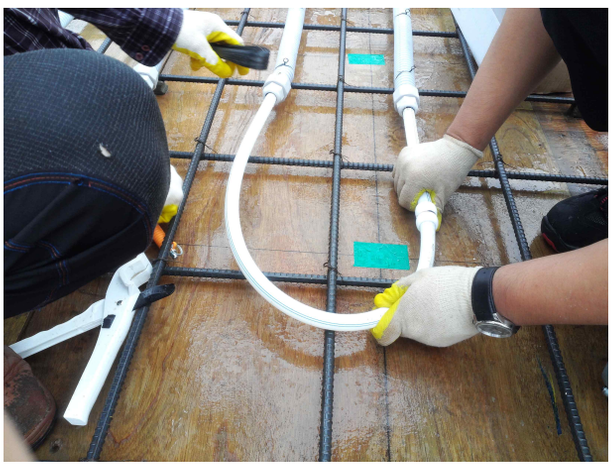


그림 2.4.33 이중배관 연결(곡관부)

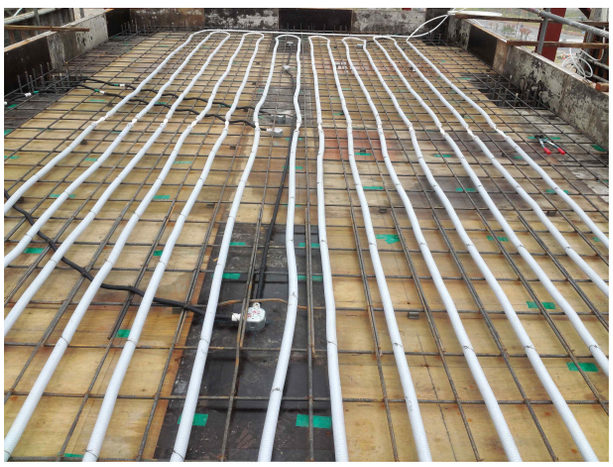


그림 2.4.34 이중배관 시공완료

(라) 유니트 패널 시공 (Case 3)

이중배관이 완료된 후 유니트 패널을 반입하여 설치한다. 유니트 패널을 하부철근에 결속하고 난 후 이격거리를 확인하여 경량체를 제거한다.

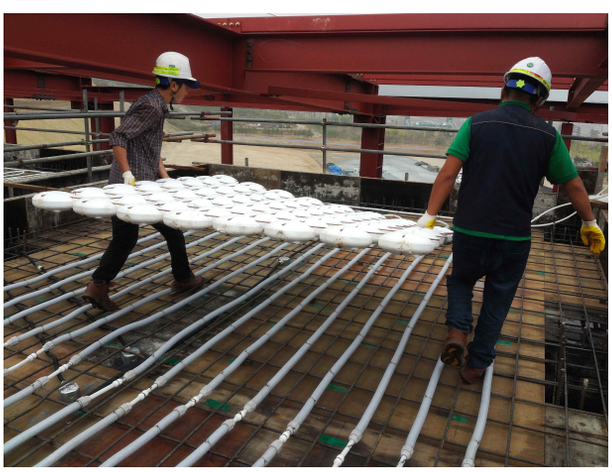


그림 2.4.35 유니트 패널 반입



그림 2.4.36 유니트 패널 판개



그림 2.4.37 유니트 패널 설치



그림 2.4.28 이격거리 확인 및 경량체 제거

(마) 상부철근 배근

유니트 패널 시공완료 후 상부철근을 배근한다.



그림 2.4.29 상부철근 배근

(마) 부력방지앙카 시공

유니트 패널의 부력을 방지하기 위하여 합판거푸집에 일정 간격으로 천공을 한 후 아래층에서 부력방지앙카를 삽입한다. 삽입된 부력방지앙카는 상부철근에 결속하여 피복두께 유지 및 부력을 방지하는 역할을 한다. 부력방지앙카 시공간격은 전술한 특기시방서를 참고하여 적용한다.

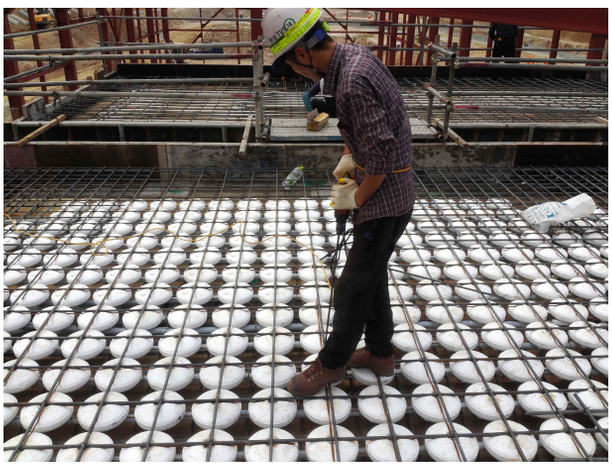


그림 2.4.30 부력방지앙카 천공



그림 2.4.31 부력방지앙카 시공



그림 2.4.32 부력방지앙카 확인

(바) 콘크리트 타설

콘크리트 타설은 콘크리트 표준시방서를 기준으로 하여 시공한다.



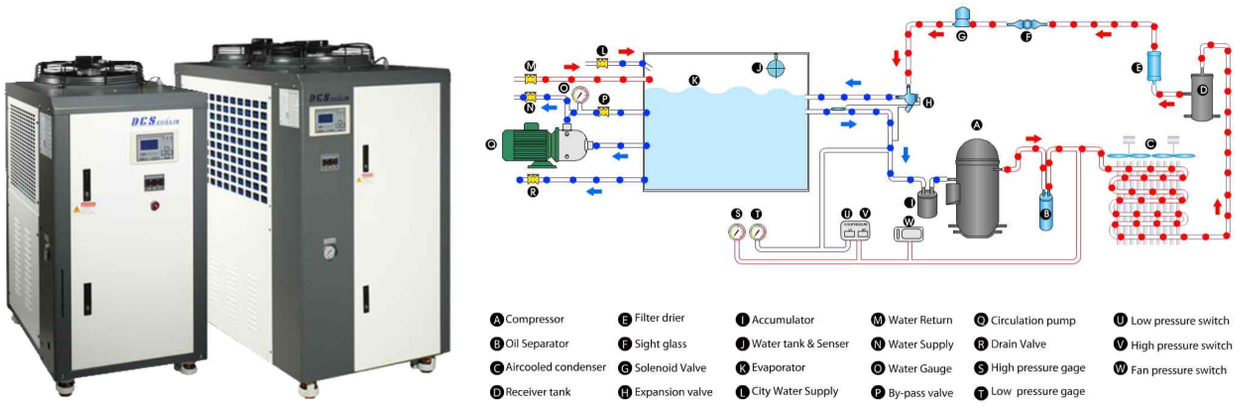
그림 2.4.33 콘크리트 타설



그림 2.4.34 콘크리트 양생

(3) 시작품의 현장 시공후 열원설비 및 수배관시스템 설치

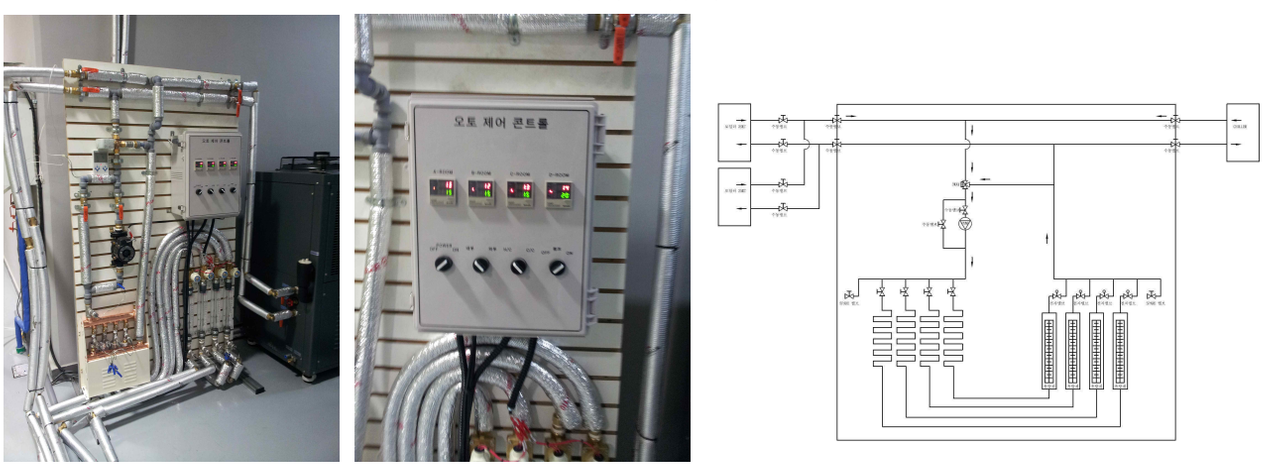
냉동기 및 보일러의 설치와 수배관 및 제어시스템의 설치는 건축기계설비 설계기준(국토교통부 2010년 제정)에 따라서 진행한다.



(a) 냉동기 외형 및 작동 개념도



(b) 보일러 외형 및 구성 요소



(c) 수배관 및 제어시스템

그림 2.4.35 열원설비, 수배관 및 제어시스템 설치

3. 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템의 경제성 평가

가. 경제성 평가 개요

(1) 대상 건물

에너지 해석 프로그램에 적용한 건물은 서울특별시에 위치한 S대학의 8층 연구시설을 모델링한 것이다. 이 건물의 외벽은 경량 벽체로 이루어져 있으며, 그 구성과 각 재료의 특성은 다음 그림 2.4.36, 표 2.4.3과 같다. 각 층의 면적은 714.58㎡이며, 그림 2.4.35는 대상 건물의 기준층 평면을 나타낸다. 붉게 표시된 영역은 냉난방이 실시되는 공간은 523.37㎡이다.



그림 2.4.36 기준층 평면(붉은 영역은 난방 공간)

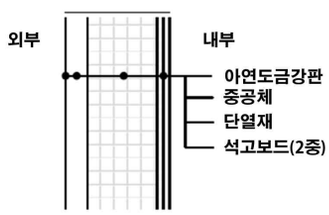


그림 2.4.37 외벽 구성

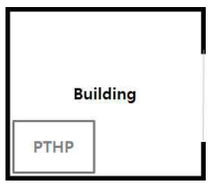
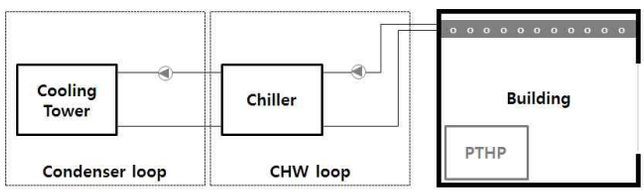
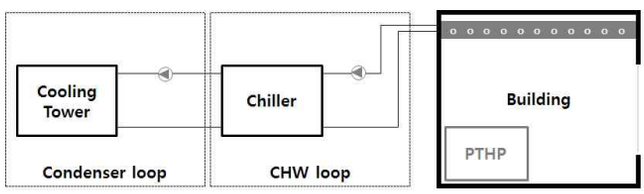
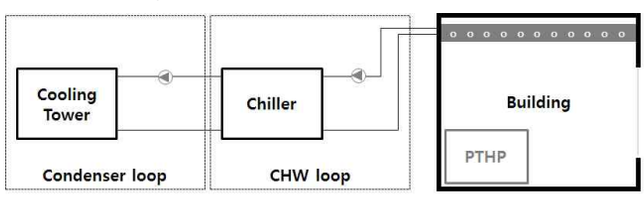
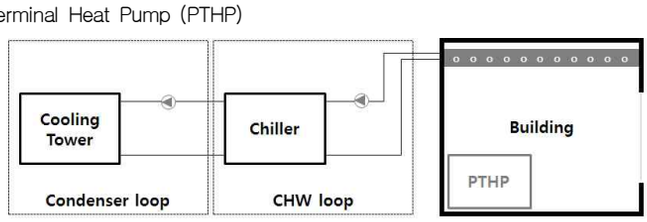
표 2.4.3 외벽의 재료 구성 및 물리적 특성

구분	열전도율 (W/mK)	두께 (m)	비열 (J/kgK)	밀도 (kg/㎥)
아연도금강판	45.3	0.0012	5000	7830
중공체	-	0.063	-	-
단열재	0.02	0.1	1470	30
석고보드	0.18	0.0125	1000	600
석고보드	0.18	0.0125	1000	600
R-value (㎡K/W)	5.14			

(2) 프로그램 입력 조건

앞서 언급한 건물에는 기존안의 경우, 사무실에 주로 사용되는 EHP(Electricity Heat Pump)로 실의 냉난방의 담당하는 경우이며, 통합안1의 경우, 실온은 EHP로 제어하되, 냉동기 및 냉각탑과 연결된 구체축열시스템이 현열부하의 일부를 담당하는 경우이다. 통합2,3,4의 경우에는 각각 통합안1에 중공슬라브 구체축열시스템의 SSPCM 콘크리트 질량이 각각 10%, 20%, 30%로 증가시킨 경우이다.

표 2.4.4 경제성 평가 대안 계획

기존안
• 실온제어: Packaged Terminal Heat Pump (PTHP) 
통합안1
• 구체축열시스템(TABS) + 냉동기 + 냉각탑 • 실온제어: Packaged Terminal Heat Pump (PTHP) 
통합안2
• 구체축열시스템(TABS)+SSPCM 10% concrete + 냉동기 + 냉각탑 • 실온제어: Packaged Terminal Heat Pump (PTHP) 
통합안3
• 구체축열시스템(TABS)+SSPCM 20% concrete + 냉동기 + 냉각탑 • 실온제어: Packaged Terminal Heat Pump (PTHP) 
통합안4
• 구체축열시스템(TABS)+SSPCM 30% concrete + 냉동기 + 냉각탑 • 실온제어: Packaged Terminal Heat Pump (PTHP) 

나. 경제성 평가 결과

기존안과 SSPCM콘크리트가 적용된 건물에 소요되는 비용은 아래의 표의 기준과 같다. 콘크리트 설계강도 30MPa의 기준으로 부피 1㎥기준으로 배합량은 표2.4.5와 같다. 기존안과 통합안1~4까지 모두 적용되는 이방향중공슬래브가 적용된 사례로서, 3m x 3m 의 높이 0.21m를 기준으로 콘크리트 배합량은 아래 표 2.4.6와 같다.

표 2.4.5 콘크리트 부피 1㎥기준 배합량

설계강도 (MPa)	SSPCM 혼입률 (%)	부피 (m3)	시멘트 C (kg)	물 W (kg)	잔골재 S (kg)	굵은골재 G (kg)	SSPCM (kg)
30MPa	0	1	401.79	158.58	601.36	1258.46	0.00
	6 (콘크리트 무게대비)	1	514.48	150.99	375.87	1000.79	122.53

표 2.4.6 슬래브 부피 3m X 3m X 0.21m, (중공률 20% 기준, 배합량)

설계강도 (MPa)	SSPCM 혼입률 (%)	부피 (m3)	시멘트 C (kg)	물 W (kg)	잔골재 S (kg)	굵은골재 G (kg)	SSPCM (kg)
30MPa	0	1.512	607.51	239.77	909.26	1902.79	0.00
	6 (콘크리트 무게대비)	1.512	777.89	228.30	568.32	1513.19	185.26

앞 장에서 언급한 시뮬레이션 모델의 축열성능이 향상된 구체축열시스템이 적용된 면적은 523.37㎡임으로, 통합안 2~4까지 적용된 SSPCM 콘크리트의 양은 9203.2kg 소요되는 것으로 나왔다. SSPCM 콘크리트를 제조하기 위해서 소요되는 비용은 아래 표 x와 같다. 앞서 통합안 2~4까지 적용되는 SSPCM콘크리트 양은 9203.2kg으로서 palm oil로 함침된 SSPCM을 적용할 경우, 약 5.6백만원인 것으로 나타났다.

표 2.4.7 PCM, Silica Fume의 혼합량에 따른 SSPCM 단가 산정

PCM	PCM 단가 (/kg)	Silica fume 단가 (/kg)	함침율 (%)	Silica fume 혼합량 (%)	SSPCM 단가 (/kg)	원화 환산 (15.02.09 기준)
n-hexadecane	135$	0.15$	50	50	67.575$	74,075원
n-octadecane	42$	0.15$	55	45	23.1675$	25,396원
palm oil	0.661$	0.15$	80	20	0.5588$	612원
coconut oil	1.191$	0.15$	76	24	0.94116$	1,031원

EnergyPlus를 통해 기존안과 통합1~4의 에너지해석을 수행하였으며, 하계 5~10월동안 에너지소비량 평가를 진행하였다. 실내존에 적용된 냉난방시스템 9:00~18:00 ON, 실내 설정온도 24℃ 기준으로 설정하였다. 이에 기존안 대비 구체축열시스템이 적용된 통합안 1~4는 6.0%~8.3%의 냉방전기소비량 감소 효과가 있는 것으로 나타났다. 이에 그 결과는 아래의 표x와 같다. 통합안 4, SSPCM 콘크리트 30%가 적용된 구체축열시스템이 기존안에 비해 총 전기소요에너지가 7.4% 절약되는 것으로 나타났다.

표 2.4.8 기존안 및 통합안1~4의 총 전기소요에너지 (kWh기준)

	기존안	통합안1	통합안2	통합안3	통합안4
May	3,721.8	3,661.0	3,497.0	3,414.8	3,397.5
June	4,180.2	4,090.6	3,949.1	3,858.3	3,847.1
July	4,599.6	4,475.9	4,384.5	4,280.0	4,283.1
August	4,875.5	4,752.0	4,601.9	4,504.0	4,494.6
September	3,940.4	3,857.1	3,786.9	3,684.8	3,688.9
October	3,034.6	3,014.5	2,924.9	2,828.6	2,831.4
Total	24,352.0	23,851.1	23,144.3	22,570.4	22,542.7
에너지소비량 차이	-	- 500.9	- 1,207.7	- 1,781.6	- 1,809.4

상업용 건물의 경우, 한국전력공사에서 산업용(을)의 해당하는 요금을 부여할 것이며, 이에 고압A의 선택1의 요금을 부과하여 그 결과는 아래와 같다. 통합안 4, SSPCM 콘크리트 30%가 적용된 구체축열시스템이 기존안에 비해 연간 냉방전기소요에너지의 사용료는 약 18.3만원을 절약하는 것으로 나타났다.

표 2.4.9 기존안 및 통합안1~4의 총 전기소요에너지 사용료 (원)

	기존안	통합안1	통합안2	통합안3	통합안4
May	320,219.2	315,111.8	301,318.5	294,401.3	292,947.2
June	485,854.0	475,589.1	459,389.7	448,989.6	447,713.0
July	533,873.1	519,711.7	509,245.3	497,282.3	497,635.0
August	565,462.5	551,321.7	534,134.1	522,930.3	521,855.1
September	338,607.6	331,603.8	325,700.0	317,109.2	317,459.0
October	262,429.0	260,741.1	253,205.8	245,106.1	245,343.3
Total	2,506,445.4	2,454,079.2	2,382,993.3	2,325,818.8	2,322,952.5
차	-	- 52,366.2	- 123,452.1	- 180,626.6	- 183,492.9

이에, 앞서 언급한 Palm oil로 만든 SSPCM 콘크리트 30%를 적용한 통합안4의 경우 기존안 대비하여 30.7년에 회수되는 것으로 나타났다. 앞서 언급한 회수기간에 비하여 재료의 비용을 더욱 줄이고, 함침율을 높일 수 있도록 개선을 하고, 난방기간에도 효과가 있는 것으로 나타날 경우 회수기간이 더 낮아질 것으로 판단된다. 전기사용료의 상승도 고려되어진다면 그 회수기간은 더 줄어들 것으로 판단된다.

03

최종 연구성과 및 적용실적

제1절 주요 연구 성과
제2절 현장 적용 실적



최 종 보 고 서

03 최종 연구성과 및 적용실적

1절 주요 연구 성과

핵심성과별 연구개발내용	분기 단위 추진계획												주요실적
	1차년도				2차년도				3차년도				
	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	
축열성능이 향상된 슬래브의 열적거동에 따른 적용 PCM선정	••••••••••••••••••••												• 재료시험 5건
친환경콘크리트 재료를 이용한 SSPCM 개발					••••••••••••••••••••								• 국외논문 3건 • 국내논문 7건 • 배합매뉴얼 작성
축열성능이 향상된 콘크리트의 에너지효율 향상								••••••••••••••••••••••••					• 학술발표대회 3건
SSPCM 콘크리트의 재료 성능 및 구조성능 평가	••••••••••••••••••••••••••••												• 학술발표대회 1건
축열성능이 향상된 슬래브용 배관을 포함하는 PC슬래브의 구조성능 평가					•••••••••••••••••••••••••••••								• 국내논문 1건 • 국내학술대회 1건 발표
구조실험 설계 지침 및 구조 설계 매뉴얼 개발					•••••••••••••••••••••••••••••								• 구조설계매뉴얼 개발 1건 • 특허출원 1건
축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템의 설계 프로토타입 선정	••••••••••••••••••••												• 특허출원 1건 • 학술발표대회 2건 • 구체축열 공조시스템 설계도면 1건 • 구체축열 슬래브 전열해석 보고서 1건
축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템 에너지절감 기술 개발					••••••••••••••••••••								• 특허출원 1건 • 국내논문 1건 • 학술발표대회 3건 • 시제품 1건
축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템의 설계, 운영 매뉴얼 개발					•••••••••••••••••••••••••••••								• 학술발표대회 6건 • 특허출원1건 • 특허등록 1건 • 설계 및 운영매뉴얼 개발 1건
축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템의 시작품 제작	••••••••••••••••••••••••••••												• 구체축열 중공 슬래브 시작품 1건 • TVS PCM 특기 시방서 1건
축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템의 현장적용								••••••••••••••••••••••••					• 현장적용 1건

1. 논문 게재 성과

게재 연도	논문명	저자			학술지명	Vol. (No.)	국내외 구분	SCI 구분
		주저자	교신 저자	공동 저자				
2013	Chemical retreating for gel-typed aerogel and insulation performance of cement containing aerogel	김석환	김수민	서정기 차정훈	Construction and Building MATERIALS	40 pp 501 -505	국외	○
2013	건축물 축열성능 향상을 위한 Octadecane/xGnP SSPCM 제조 및 열적성능분석	김석환	김수민	정수광 이정훈	대한설비공학회		국내	×
2013	축열건자재 적용을 위한 Hexadecane/xGnP SSPCM 제조 및 열적특성	김석환	김수민	임재한	한국태양에너지학회		국내	×
2013	PCM을 활용한 구체축열시스템의 축열 및 방열 특성 연구	이현화	임재한	이수진 송진희 김수민 송승영	설비공학논문집	v.25 n.12	국내	×
2014	Thermal characteristics of mortar containing hexadecane/xGnP SSPCM and energy storage behaviors of envelopes integrated with enhanced heat storage composites for energy efficient buildings	김석환	김수민	장성진 정옥영 정수광	Energy and Buildings	70 pp. 472-479	국외	○
2014	Thermal performance enhancement of mortar mixed with octadecane/xGnP SSPCM to save building energy consumption	김석환	김수민	백송이 정수광 이정훈	Solar Energy Materials and Solar Cells	122 pp. 257-263	국외	○
2014	PCM을 포함하는 중공슬래브의 배관방향에 따른 휨거동 평가를 위한 실험 및 해석 연구	김나은	김희선		대한건축학회		국내	×
2014	Thermal and Mechanical Characteristics of Concrete Mixed with Shape Stabilized Phase Change Material	민해원	김희선	정수광 김수민	Cement & Concrete Composites Journal		국외	○
2015	첨가제에 따른 석고보드의 오염물질 흡착 및 축열 성능에 대한 고찰	서현정	김수민	정수광 정민희 임재한	한국태양에너지학회		국내	×
2015	축열 성능 향상 SSPCM 혼합 콘크리트 제조 및 열적특성 분석	정수광	김수민	장성진 임재한 김희선 류성룡	한국태양에너지학회		국내	×

2. 학술대회 발표 성과

구분	발표일	발표명	저자	학술대회명	국내외 구분
1	2012.10.21	열효율 향상을 위한 xGnP가 혼합된 SSPCM 제조 및 평가	정수광, 김석환, 이정훈, 임재한, 김수민	2012 한국건축친환경설비학회 추계학술발표대회	국내
2	2012.10.25	합판의 열전도율 개선을 통한 목질마루바닥재의 열성능 개선	서정기, 김석환, 박윤, 김수민	2012 대한건축학회 추계학술발표대회	국내
3	2012.10.25	고효율 바닥복사난방시스템을 위한 그라파이트 함유 고열전도 모르타르	김석환, 서정기, 김수민	2012 대한건축학회 추계학술발표대회	국내
4	2012.11.01	공간형태별 일조와 일사가 실내온열환경에 미치는 영향	김석환, 임재한, 김수민	2012 한국태양에너지학회 추계학술발표대회	국내
5	2012.10.21	PCM (Phase Change Material)을 적용한 구체축열시스템의 축열 및 방열 특성 분석	이수진 이현화 김수민 임재한 송승영	2012 한국건축친환경설비학회 추계학술발표대회	국내
6	2012.11.01	상변화물질을 적용한 구체축열시스템 전열 해석 연구	이수진 이현화 김수민 임재한 송승영	2012 한국태양에너지학회 추계학술발표대회	국내
7	2013.06.17	Optimized Operation Strategy of a Thermally Activated Building System (TABS) in a Campus Buildling	송진희, 임재한, 송승영, 이현화	CLIMA 2013	국외
8	2013.05.24	Insulation performance of cement containing aerogel	김석환, 김수민	Building Solution World Congress	국외
9	2013.06.26	Improving thermal conductivity of Bio-based PCMs composites using carbon nanomaterials	유슬기, 정수광, 정옥영, 김수민	International Symposium on Green Manufacturing and Applications (ISGMA 2013)	국외
10	2013.10.25	무기계 단열Board에 상변화물질 함침을 통한 열적성능 평가	정옥영, 김석환, 유슬기, 정수광, 서정기, 김수민	대한건축학회 2013 추계학술발표대회	국내
11	2013.10.25	건축물 에너지 저감을 위한 Bio 기반 고열전도율 상안정 PCM 제조 및 평가	정수광, 정옥영, 김석환, 김수민	대한건축학회 2013 추계학술발표대회	국내

12	2013.11.01	Octadecane/xGnP SSPCM 제조 및 고축열 모르타르의 열적성능 분석	김석환, 정옥영, 정수광, 임재한, 김수민	한국태양에너지학회 2013 추계학술발표대회	국내
13	2013.10.25	구체축열을 위한 이방향 중공슬래브에서 배관방향에 따른 구조거동 평가	김나은 주은희 김상모 임재한 김희선	2013년도 대한건축학회 추계학술발표대회	국내
14	2014.3.14.	질화붕소를 이용한 Bio 기반 상안정 PCM의 제조 및 열적 성능평가	정수광, 위승환, 임재한, 김수민	2014년도 한국태양에너지학회	국내
15	2014.7.14.-16	Evaluation of Thermal Performance of Bio-based Phase Change Materials Composites Using Carbon Nano-materials	정수광 유슬기 임재한 김수민	10th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics	국외
16	2014.10.28.-29	Energy efficient form stable Phase change materials for energy saving and thermal comfort in buildings	정수광 김수민	Energy Forum	국외
17	2014.3.14.	SSPCM 몰탈을 적용한 바닥난방시스템 전열특성	이현화 박민주 김석환 김수민 임재한 송승영	2014년도 한국태양에너지학회	국내
18	2014.10.23.~25	중공슬래브 구체축열시스템의 2차원 열전달 특성	이현화 손지숙 임재한 송승영	2014년도 대한건축학회 추계학술발표대회	국내
19	2014.10.23.~25	PCM을 적용한 구체축열시스템의 설계기준	이현화 김윤지 임재한 송승영	2014년도 대한건축학회 추계학술발표대회	국내
20	2014.11.28.-29	Evaluation of the Thermal Performance of a Thermally Activated Building System (TABS) Using Phase-Change Materials	이현화 김윤지 임재한 김수민 송승영	The 2nd Asia Conference of International Building Performance Simulation Association	국외
21	2014.11.8.	오피스 건물에서 PCM을 이용한 중공슬래브의 에너지절감 가능성 평가	이현화, 임재한, 손지숙 송승영 김수민	한국생활환경학회 2014 추계 학술발표대회	국내
22	2014.10.15.-17	PCM 혼입 콘크리트를 적용한 중공슬래브의 역학 및 구조적 거동에 대한 연구	민해원 김희선	2014년 한국콘크리트학회 추계학술대회	국내
23	2014.7.13.-19	Compressive strength of concrete mixed with phase change material (PCM) under thermal changes.	김희선 민해원 류은미 안아영	22nd International Conference on Composites/Nano Engineering (ICCE-22)	국외

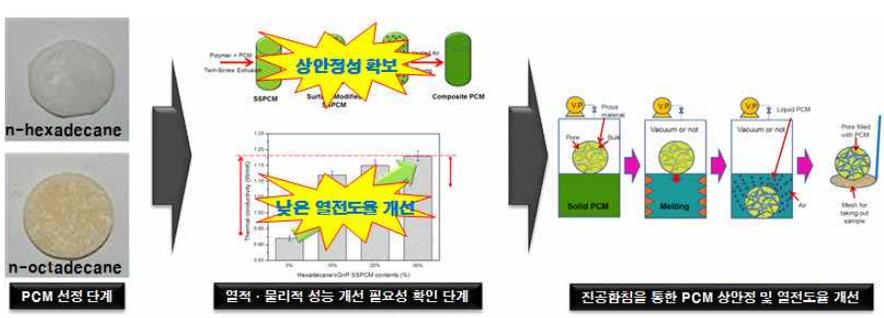
3. 특허 성과

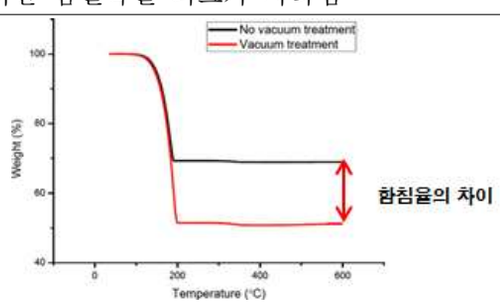
출원된 특허의 경우					등록된 특허의 경우				
출원연도	특허명	출원인	출원국	출원번호	등록연도	특허명	등록인	등록국	등록번호
2012	축열 구조체	이화여자대학교 산학협력단	대한민국	10-2012-0109462	2015	배관을 둘러싸는 축열체	이화여자대학교 산학협력단	대한민국	10-1515289-00-00
2013	배관을 둘러싸는 축열체	이화여자대학교 산학협력단	대한민국	10-2013-0068577					
2014	상변화물질이 혼입된 콘크리트 제조방법	이화여자대학교 산학협력단	대한민국	10-2014-0076708					
2014	PCM이중배관 매입구조를 이용한 구체축열시스템	이화여자대학교 산학협력단	대한민국	10-2014-0180447					

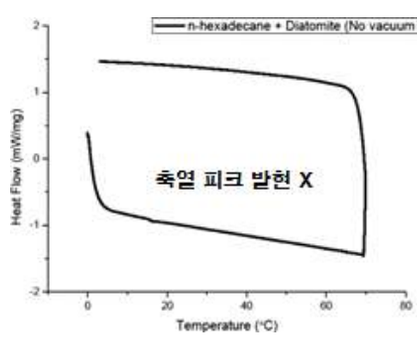
4. 연구개발 최종성과물

주요 연구목표	최종성과물	기술수요처
Ⅰ. PCM을 활용한 구체축열 복사냉난방시스템의 설계 및 운영 매뉴얼 개발	구체축열 공조시스템 설계 매뉴얼 (표준 방열량 산정기준) 구체축열 공조시스템 운영 매뉴얼	PC 슬래브 회사 건설회사 건축설비설계사무소
Ⅱ. PCM 재료 및 구체축열용 콘크리트 배합 기술 개발	친환경 콘크리트재료를 이용한 SSPCM 제조 기술(SSPCM 재료) 고효율 축열 콘크리트의 최적 배합 기술(최적 배합비)	PC 슬래브 회사 건설회사
Ⅲ. PCM을 활용한 구체축열 중공 슬래브 최적 구조 설계 기법 개발	구체축열용 중공 슬래브 시작품 PCM활용 구체축열용 중공 슬래브 거동 특성(구조설계식) PCM활용 구체축열용 중공 슬래브의 구조 설계기법(상세 detail)	건축구조설계사무소 건설회사

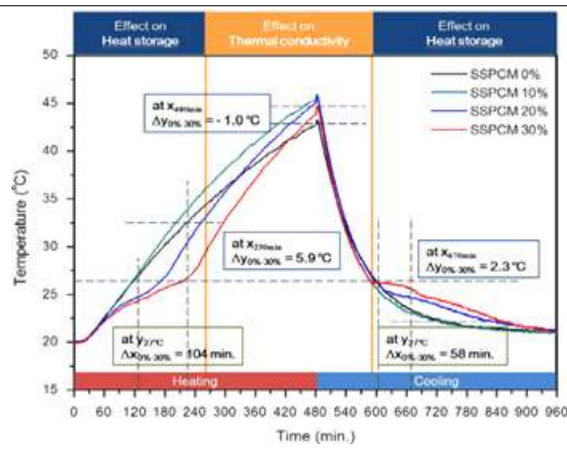
2절 개별 연구 성과

<table>
<tr><td colspan="2">구 분</td><td>구체 축열 복사냉난방시스템 의 열적거동에 따른 적용 PCM 선정</td></tr>
<tr><td colspan="2">정의(설명)</td><td>- PCM이 가지고 있는 기본적인 물성에 대한 이해와 적용 대상과의 호환성을 염두하여 최적의 PCM을 산정하고자 함</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 표</td><td>- 구체 축열 복사냉난방시스템에 적용 가능한 최적의 상변화 온도 및 축열량을 가지고 있는 PCM 선정하고자 함.</td></tr>
<tr><td rowspan="4">핵심 요소 기술</td><td>개념</td><td>- 문헌조사를 통하여 국내외에서 연구되고 있는 PCM의 기본적인 물성에 대한 고찰과 더불어 DSC (축열량 분석장비) 및 TCi (열전도율 분석장비) 를 이용하여 적용 가능한 PCM의 열적 특성분석을 실시</td></tr>
<tr><td>방법</td><td>- TCi를 통한 열전도율 분석은 최소 직경 2cm에 높이 5mm의 시편에서 열을 보내고 되돌아 오는 시간을 계산하여 열전도율값으로 환산
- DSC 분석은 승온 속도 5℃/min로 0℃에서 80℃사이의 온도범위에서 승온 및 냉각시켜 발생하는 축열 커브를 적분하여 잠열량을 산정하고 피크가 발생하는 시점에서 상변화 온도를 도출함</td></tr>
<tr><td>특징</td><td>○ Hexadecane: M.P= 19℃, k=0.39W/m•K, HC=257.7J/g
○ Octadecane: M.P= 28℃, k=0.26W/m•K, HC=256.5J/g
○ Dodecanol: M.P= 24℃, k=0.28W/m•K, HC=224.8J/g
○ Heptadecnae: M.P= 21℃, k=0.33W/m•K, HC=189.6/g</td></tr>
<tr><td>결과물</td><td>○ 최적의 상변화 온도를 가지는 파라핀계 상변화 물질 2가지 선정 : n-hexadecane, n-octadecane
○ 구체 축열 복사냉난방시스템 적용을 위한 상안정성 및 낮은 열전도율 개선의 필요성 확인
 
</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">연구성과</td><td>특허</td><td>비SCI논문</td><td>SCI논문</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

<table>
<tr><td colspan="2">구 분</td><td>SSPCM 제조를 위한 최적의 진공함침법 개발</td></tr>
<tr><td colspan="2">정의(설명)</td><td>진공함침법에 따른 SSPCM 제조 방법을 개발하고, 개발된 SSPCM의 함침율 특성을 파악함</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 표</td><td>- 진공함침법을 통해 제조된 SSPCM의 열적인 성능이 비 진공함침법을 통하여 제조된 SSPCM과 비교하여 우수한 축열성능을 가지는지 검증하고자 함</td></tr>
<tr><td rowspan="4">핵심 요소 기술</td><td>개념</td><td>- TGA (열중량 분석) 분석 및 DSC 분석을 통하여 PCM의 함침율과 축열 성능을 비교 및 평가함</td></tr>
<tr><td>방법</td><td>- TGA 분석은 상온에서 600℃까지 승온시켜 질량변화를 분석하는 것으로 산화되는 질량을 분석하여 SSPCM에 함침되어 있는 PCM의 함침율을 산정함
- 제조과정에서 진공건조 및 비 진공건조를 통해 제조된 SSPCM을 DSC 분석을 통하여 축열 피크 유무를 확인함</td></tr>
<tr><td>특징</td><td>○ TGA 분석 결과, 진공상태에서의 PCM 함침율은 50%에 이르는 것을 확인하였으며, 비진공상태에서는 30%에 그치는 것을 확인 축열성능 향상을 위하여 반드시 진공 조건에서 PCM을 함침해야 함.
○ DSC 분석결과 비 진공상태에서 SSPCM을 건조시킨 경우, 내부의 PCM이 모두 기화하여 함침에 의한 잠열축열 피크가 사라짐</td></tr>
<tr><td>결 과 물</td><td> 

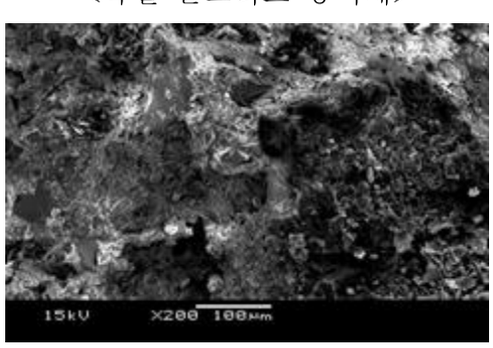
<진공유무에 따라 제조된 샘플의 TGA 분석 결과>
 

<진공건조 유무에 따라 제조된 샘플의 축열량 분석></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">연구성과</td><td>특허 | 비SCI논문 | SCI논문</td></tr>
<tr><td></td></tr>
</table>

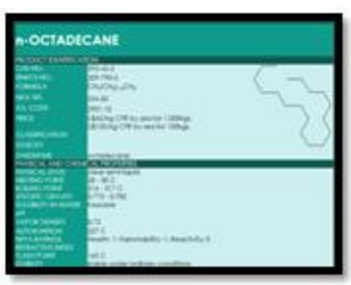
<table>
<tr><td colspan="2">구 분</td><td>축열성능이 향상된 SSPCM 모르타르 제조 및 성능 분석</td></tr>
<tr><td colspan="2">정의(설명)</td><td>- 구체 축열 콘크리트 개발을 위해 SSPCM을 혼합하여 축열 모르타르 개발
- SSPCM을 혼입한 모르터를 개발하고, 열적 특성 자료를 구축함</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 표</td><td>- 콘크리트 적용을 위하여 SSPCM 기반 축열 모르타르의 열적 성능을 분석 및 열원 공급과 표면온도를 측정함으로서 실질적으로 건축재료로 적용했을 때 열적 거동을 검증하고자 함</td></tr>
<tr><td rowspan="4">핵심 요소 기술</td><td>개념</td><td>- TCi (열전도율 분석장비)를 사용하여 축열 모르타르의 열전도율 분석 측정</td></tr>
<tr><td>방법</td><td>- SSPCM 모르타르의 축열성능을 시험하기 위하여 SSPCM 모르타르 20mm, 합판 15mm, 미네랄 울 단열재 100mm를 벽면에 구축하고, 태양복사에너지를 모사하기 위하여 250W 원적외선 램프를 사용하여 2000mm 거리에서 조사
- 측정시간은 최초 8시간 동안 적외선 램프를 통하여 열원을 공급해주고 이후 8시간 동안 열원공급을 중단하여 축열 모르타르의 표면온도를 측정함
- KS 표준에 따른 축열 모르타르 제조
KS L 5109 (수경성 시멘트 반죽 및 모르타르의 기계적 혼합방법), KS L ISO 679 (시멘트의 강도 시험방법) 표준 기반 SSPCM 모르타르 배합 실시</td></tr>
<tr><td>특징</td><td>○ SSPCM 함유량의 증가에 따른 축열 모르타르의 열전도율 향상을 확인
○ SSPCM 모르타르의 경우 SSPCM 함량이 10%일때 1.05W/mK, 20%일때 1.06W/mK, 30%일 때 1.08W/mK까지 열전도율이 향상됨을 확인 (SSPCM이 많이 혼합된 모르타르일수록, 원적외선 조사에 따른 표면온도 상승에 있어 2배의 지연효과가 있음
○ SSPCM이 30%가 들어간 모르타르의 경우 표면온도가 17.5℃가 되기까지 306분 소요 (일반 모르타르 149분 소요)
○ 적외선 램프 조사를 통한 SSPCM 모르타르의 표면 온도 상승 지연 효과를 확인 - 축열효과 확인</td></tr>
<tr><td>결과물</td><td> 

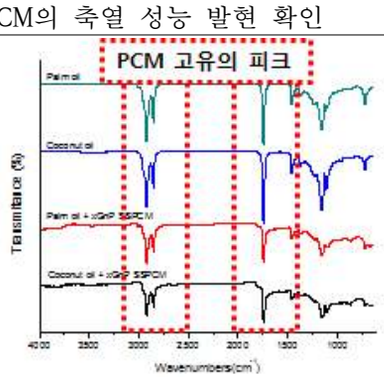
<파라핀계 PCM/xGnP 모르타르의 열적거동 분석결과></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">연구성과</td><td>특허 | 비SCI논문 | SCI논문</td></tr>
<tr><td></td></tr>
</table>

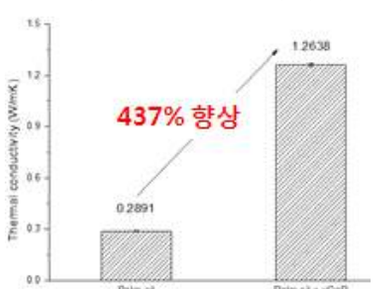
<table>
<tr><td colspan="2">구 분</td><td colspan="3">축열성능이 향상된 SSPCM 콘크리트 제조 및 성능 분석</td></tr>
<tr><td colspan="2">정의(설명)</td><td colspan="3">SSPCM을 혼입한 콘크리트를 배합비에 따라 제조하고, 물리적인 특성을 조사함</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 표</td><td colspan="3">- 구체 축열 복사냉난방시스템 적용을 위하여 SSPCM 기반 축열 콘크리트를 제조하고 이에 대한 성능을 검증하고자 함</td></tr>
<tr><td rowspan="4">핵심 요소 기술</td><td>개념</td><td colspan="3">- 30MPa의 목표 설계강도를 갖는 축열 콘크리트 제조
(SSPCM 함유량 : 0, 10, 20, 30wt%)</td></tr>
<tr><td>방법</td><td colspan="3">- KS L 3114 표준에 따른 밀도 측정 실시
- 온도 조건 22 ± 1℃, 습도 41 ± 1% R.H.
- SEM (미세구조 분석장비)을 통하여 콘크리트와 SSPCM의 결합단면 및 미세구조를 확인
- 호환성 확인</td></tr>
<tr><td>특징</td><td colspan="3">○ SSPCM 함유량이 많을수록 축열 콘크리트의 밀도는 감소함을 확인
○ SEM 분석결과 콘크리트 구조에 SSPCM이 잘 결합되어 있음을 확인</td></tr>
<tr><td>결과물</td><td colspan="3"> 

<축열 콘크리트 공시체>
 

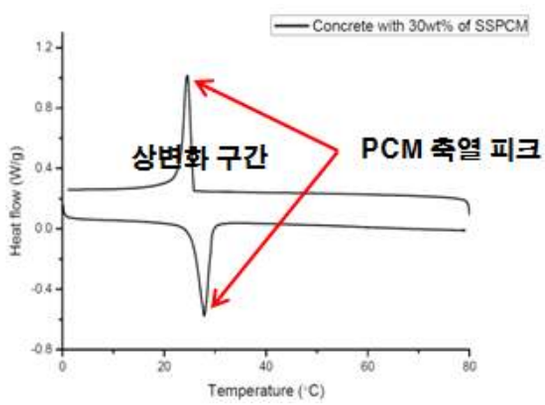
<축열 콘크리트 미세구조 (200배)></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">연구성과</td><td>특허</td><td>비SCI논문</td><td>SCI논문</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

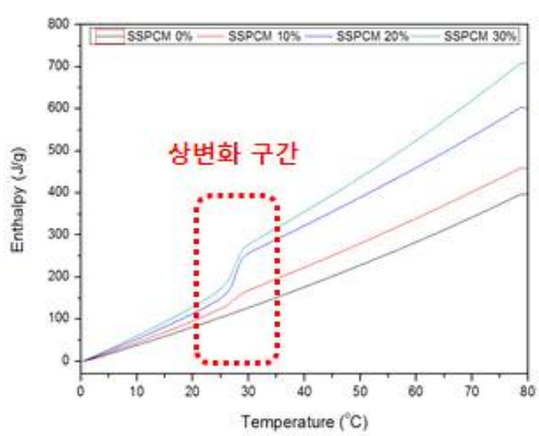
<table>
<tr><td colspan="2">구 분</td><td>친환경콘크리트 재료 적용을 위한 지방산 계열의 PCM 선정</td></tr>
<tr><td colspan="2">정의(설명)</td><td>활용가능한 국내외 PCM 종류 및 가격 정보 조사</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 표</td><td>- 건축재료 및 콘크리트 적용 시 PCM을 대량으로 적용할 것을 고려하여 경제적이며 최적의 열적 성능을 갖는 PCM을 선정하고자 함</td></tr>
<tr><td rowspan="4">핵심
요소
기술</td><td>개념</td><td>- 문헌고찰 및 PCM 국제 가격 동향 분석을 통하여 경제성 분석 실시</td></tr>
<tr><td>구성</td><td>파라핀 계열의 PCM
지방산 PCM</td></tr>
<tr><td>특징</td><td>○ 파라핀 계열의 PCM의 경우, 석유에서 추출된 성분을 기반으로 제조하기 때문에 단가가 높음
○ 지방산 PCM은 식물 추출의 오일 성분이 기반이므로 수급이 용이하며 경제적임
○ 지방산 PCM인 팜유와 코코넛 유가 기존에 연구된 n-hexadecane과 n-octadecane의 상변화 온도와 유사함을 확인
○ n-octadecane과 비교하여 지방산 PCM이 최소 35배 이상 경제적임을 확인</td></tr>
<tr><td>결
과
물</td><td>  
<지방산 PCM>
  
<파라핀계 PCM 및 지방산 PCM 가격 현황></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">연구성과</td><td>특허 | 비SCI논문 | SCI논문</td></tr>
<tr><td></td></tr>
</table>

<table>
<tr><td colspan="2">구 분</td><td>지방산 PCM 기반 SSPCM의 물리적 • 열적 특성 분석</td></tr>
<tr><td colspan="2">정의(설명)</td><td>지방산 계열의 PCM 재료를 활용한 SSPCM을 개발하고, 물리적, 열적 특성을 조사함</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 표</td><td>- 지방산 PCM 기반 SSPCM의 구체 축열시스템 적용 가능성 및 건축재료와의 호환성에 대한 평가를 목적으로 함</td></tr>
<tr><td rowspan="4">핵심 요소 기술</td><td>개념</td><td>- 지방산 계열의 PCM을 이용한 SSPCM을 진공함침법을 통해 개발하고, FTIR분석 및 TCi 분석, DSC 분석을 수행함</td></tr>
<tr><td>방법</td><td>- FTIR 분석(분자 결합구조 분석장비)을 통하여 SSPCM의 화학적 결합 유무를 확인하고 TCi (열전도율 분석장비)를 이용하여 열전도율을 분석함
- DSC (축열량 분석 장비)를 이용하여 지방산 PCM 기반 SSPC의 축열량 및 열적 특성 분석 실시 (승온 및 냉각 속도 : 5℃/min, 분석 온도 범위 : -20℃ - 50℃)</td></tr>
<tr><td>특징</td><td>○ 물리적 결합으로 인한 지방산 고유의 특성이 변하지 않음을 확인 - 축열 특성 지속 발현 확인
○ xGnP로 인하여 지방산 PCM의 낮은 열전도율이 팜유의 경우 437% 향상됨
○ 지방산 PCM 기반 SSPCM의 축열 성능 발현 확인</td></tr>
<tr><td>결과물</td><td> 

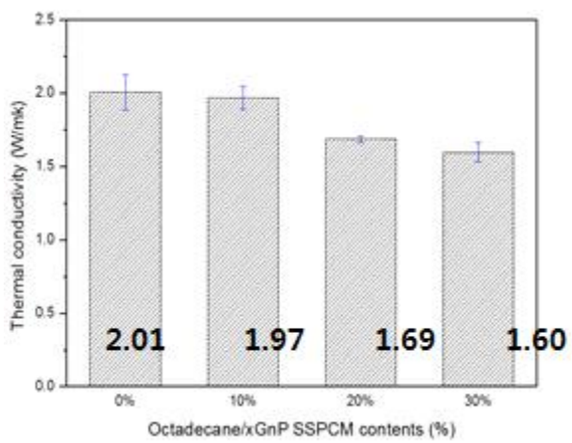
<지방산 PCM 기반 SSPCM 화학적 결합 분석>
 

<지방산 PCM 기반 SSPCM 열전도율 분석></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">연구성과</td><td>특허 | 비SCI논문 | SCI논문</td></tr>
<tr><td></td></tr>
</table>

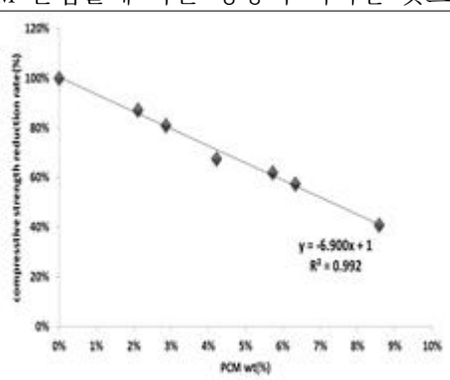
<table>
<tr><td colspan="2">구 분</td><td colspan="3">축열성능이 향상된 SSPCM 콘크리트의 축열량 분석</td></tr>
<tr><td colspan="2">정의(설명)</td><td colspan="3">SSPCM이 혼입된 콘크리트의 축열 특성을 이해하고, 에너지 효율 개선 효과를 파악함</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 표</td><td colspan="3">- SSPCM 콘크리트의 축열량 및 엔탈피 분석을 통한 구체 축열 복사냉난방시스템 적용 시 에너지 효율 향상 성능 파악하고자 함</td></tr>
<tr><td rowspan="4">핵심 요소 기술</td><td>개념</td><td colspan="3">- DSC 분석을 통해 PCM의 상변화 온도에 따른 축열량 특성을 파악함</td></tr>
<tr><td>방법</td><td colspan="3">- DSC (축열량 분석장비)분석과 엔탈피 계산(Universal analysis 프로그램)을 통하여 SSPCM 콘크리트의 축열량 산정</td></tr>
<tr><td>특징</td><td colspan="3">○ SSPCM 함량이 증가할수록 축열량 및 엔탈피 성능이 향상됨을 확인
○ 상변화 구간에서 엔탈피 상승율이 큼
○ 비 잠열구간(현열구간)에서도 SSPCM 함량이 높은 축열 콘크리트의 경우 엔탈피 상승율이 더 큼</td></tr>
<tr><td>결과물</td><td colspan="3"> 

<축열 콘크리트의 축열량 분석 결과>
 

<축열 콘크리트의 엔탈피 분석 결과></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">연구성과</td><td>특허</td><td>비SCI논문</td><td>SCI논문</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

<table>
<tr><td colspan="2">구 분</td><td colspan="3">축열 콘크리트의 열전도율 분석</td></tr>
<tr><td colspan="2">정의(설명)</td><td colspan="3">일반 콘크리트와 비교하여 축열 콘크리트의 열전도율 특성일 파악함</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 표</td><td colspan="3">- 일반 콘크리트와 열전도율 비교분석을 통하여 축열 콘크리트의 열적 성능 확인</td></tr>
<tr><td rowspan="4">핵심 요소 기술</td><td>개념</td><td colspan="3">- TCi 분석을 통해 축열 콘크리트의 열전도율 분석</td></tr>
<tr><td>방법</td><td colspan="3">- TCi 분석장비를 이용하여 축열 콘크리트의 열전도율 분석 (축열 콘크리트 공시체 이용)</td></tr>
<tr><td>특징</td><td colspan="3">○ 콘크리트의 열전도율 2.01W/mK (일반적인 콘크리트의 열전도율 : 1.2-1.6W/mK)
○ SSPCM 10%일 때 1.97W/mK, 20%일 때 1.69W/mK, 30%일 때 1.60W/mK를 보임
○ SSPCM 함유량이 증가할수록 축열 콘크리트의 열전도율은 감소. (SSPCM의 열전도율 : 1.363W/mK)
○ 일반적인 콘크리트와 비교하여 열전도율이 전반적으로 높음을 확인</td></tr>
<tr><td>결과물</td><td colspan="3"> 

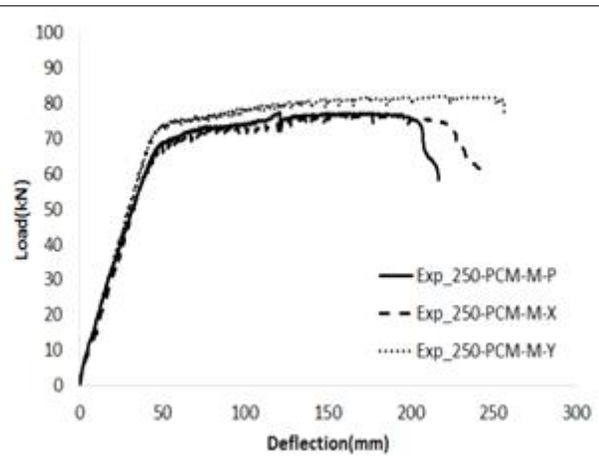
<축열 콘크리트의 열전도율 분석 결과></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">연구성과</td><td>특허</td><td>비SCI논문</td><td>SCI논문</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

<table>
<tr><td colspan="2">구 분</td><td colspan="3">SSPCM을 혼입한 콘크리트의 28일 압축강도 및 인장강도 평가</td></tr>
<tr><td colspan="2">정의(설명)</td><td colspan="3">배합강도 40MPa 조건에서 설계된 콘크리트의 압축강도 및 인장강도를 평가함</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 표</td><td colspan="3">- 콘크리트 설계강도 40MPa의 배합량에 SSPCM을 혼입하여 28일 압축강도, 온도에 따른 압축강도 및 인장강도 변화를 평가</td></tr>
<tr><td rowspan="4">핵심 요소 기술</td><td>개념</td><td colspan="3">SSPCM의 혼입량에 따른 압축강도 인장강도 특성을 평가함</td></tr>
<tr><td>방법</td><td colspan="3">- SSPCM을 혼입하지 않은 35CONT 실험체와 콘크리트 질량 대비 2%, 4%, 6%의 SSPCM을 추가 혼입한 실험체를 제작하여 상온 20℃에서 압축강도 및 인장강도를 평가</td></tr>
<tr><td>특징</td><td colspan="3">○ 압축강도
- SSPCM 혼입률이 증가함에 따라 압축강도가 감소하는 경향성을 보임
○ 온도에 따른 압축강도
- 열을 가한 35PCM2H, 35PCM4H, 35PCM6H 실험체의 경우, 상온의 35CONT, 35PCM2R, 35PCM4R, 35PCM6R 실험체의 최대 압축강도를 기준으로 78～81%의 압축강도가 발현되는 것으로 분석됨
- 냉각한 35PCM2C, 35PCM4C, 35PCM6C 실험체의 경우, 상온의 35CONT, 35PCM2R, 35PCM4R, 35PCM6R 실험체와 유사한 98～100% 강도 발현률을 보였으며, SSPCM의 상 변화가 일어나는 35℃에서는 압축강도가 저감되었지만 SSPCM이 다시 고체로 변화하는 상온 20℃에서는 압축강도가 회복되는 것으로 분석됨
○ 탄성계수
- SSPCM 혼입률이 증가함에 따라 탄성계수가 감소하는 경향성을 보임
○ 인장강도
- 35CONT, 35PCM2R, 35PCM4R, 35PCM6R 실험체 모두 인장강도가 유사하게 나타나는 것을 보아 SSPCM 혼입률에 따른 영향이 미미한 것으로 나타남</td></tr>
<tr><td>결과물</td><td colspan="3"> 

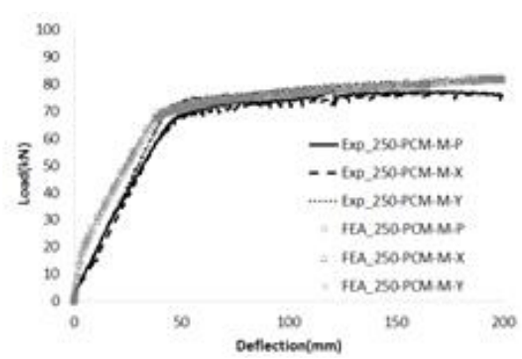
<SSPCM 혼입량에 따른 압축강도 저감율></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">연구성과</td><td>특허</td><td>비SCI논문</td><td>SCI논문</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

<table>
<tr><td colspan="2">구 분</td><td colspan="3">구조재료실험의 평가를 통한 설계강도에 따른 PCM 혼입 콘크리트 배합수식 매뉴얼</td></tr>
<tr><td colspan="2">정의(설명)</td><td colspan="3">콘크리트 배합수식을 제안하고, 이를 바탕으로 특허를 출원함</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 표</td><td colspan="3">- 콘크리트의 축열 성능을 극대화하면서 구조재료로써의 강도확보를 위해 상변화 물질 SSPCM의 적정 배합 방법에 관한 SSPCM 혼입 콘크리트 배합수식 매뉴얼 제안</td></tr>
<tr><td rowspan="4">핵심 요소 기술</td><td>개념</td><td colspan="3">- SSPCM을 혼입한 콘크리트의 28일 압축강도 및 인장강도 평가에 나타난 SSPCM 혼입률에 따른 압축강도 저감률을 토대로 콘크리트 배합 순서(콘크리트 표준시방서,2009)에 맞추어 SSPCM이 혼입된 콘크리트 제조방법에 관한 배합수식 매뉴얼을 작성함</td></tr>
<tr><td>방법</td><td colspan="3">SSPCM을 혼입한 콘크리트의 강도 특성을 고려하여 배합식을 제안하고, 이에 따른 제조 매뉴얼을 개발</td></tr>
<tr><td>특징</td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td>결과물</td><td colspan="3">○ 특허 출원 : 상변화물질이 혼입된 콘크리트 제조방법 (특허출원번호 10-2014-0075608)
열전도율 목표값(h)에 따른 SSPCM 혼입률(P) 산정 : $P(\%) = [\frac{1}{1.126} \times \left(1 - \frac{h}{100}\right)]^{-5.181}$
SSPCM 혼입률에 따른 배합강도(F_{cr}) 산정 : $F_{cr}=[(1+(0.069\times P))\times F_{ck}]+10$
배합강도에 따른 물/시멘트비(W/C) 산정 : $W/C(\%)=\frac{14.4}{(F_{cr}-2.2)}$
잔골재율(S/a)과 단위수량(W) 산정 : 굵은 골재의 치수에 따른 잔골재율과 단위수량 산정표를 따라 조립률과 슬럼프값을 비교하여 산정함.
단위 시멘트량(C) 산정 : $C = \frac{100}{W/C\ (\%)} \times W$
단위골재량의 절대용적(A) 산정 : $A=\frac{1000-[W+\frac{C}{\text{시멘트 밀도}}+(W+C)\times\left(\frac{P}{\text{SSPCM 밀도}}\right)+\text{공기량}]}{[1+S/a\times\text{잔골재 밀도}+(1-S/a)\times\text{굵은골재 밀도}\times\left(\frac{P}{\text{SSPCM 밀도}}\right)]}$
잔골재량(S)과 굵은골재량(G) 산정 : G=굵은골재 절대용적×굵은골재 밀도, S=잔골재 절대용적×잔골재 밀도</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">연구성과</td><td>특허</td><td>비SCI논문</td><td>SCI논문</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

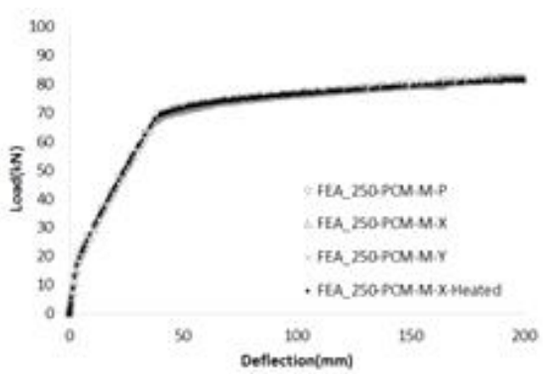
<table>
<tr><td colspan="2">구 분</td><td colspan="3">배합수식 매뉴얼에 따른 SSPCM 혼입 콘크리트의 휨-전단강도 평가</td></tr>
<tr><td colspan="2">정의(설명)</td><td colspan="3">SSPCM 혼입 콘크리트의 휨-전단강도 특성을 파악함</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 표</td><td colspan="3">- 배합수식 매뉴얼에 따른 SSPCM 혼입 콘크리트의 압축, 인장, 휨 전단강도 평가</td></tr>
<tr><td rowspan="4">핵심 요소 기술</td><td>개념</td><td colspan="3">- 선행 연구를 통해 축열성능이 출분히 발휘되고 SSPCM의 혼입률을 4%와 6%로 평가함에 따라 두 혼입률을 변수로 하는 실험체 추가 제작
- 목표 설계강도 30MPa을 설정하고 SSPCM 혼입 콘크리트 배합수식 매뉴얼에 따라 SSPCM 혼입률 4%와 SSPCM 혼입률 6%의 배합량을 산정하여 실험체 제작</td></tr>
<tr><td>방법</td><td colspan="3">- 28일 양생한 SSPCM 혼입 콘크리트에 3점 재하실험을 수행하고, 압축, 인장 실험 및 휨-전단강도를 평가
- 3점 재하 실험에서 힌지에 가해지는 속도는 1분당 0.3mm로 가력</td></tr>
<tr><td>특징</td><td colspan="3">○ 압축강도 : SSPCM 혼입률 4%와 6% 실험체는 29.41MPa, 29.56MPa로 유사한 압축강도를 나타냄
○ 인장강도 : SSPCM 혼입률 4%와 6% 실험체는 3.21MPa, 3.18MPa로 유사한 인장강도를 나타냄
○ 3점 재하 실험을 통한 전단강도 분석 : SSPCM 혼입률 4% 콘크리트 보는 설계식과 거의 유사한 전단강도 값을 가지지만, SSPCM 혼입률 6% 콘크리트 보는 설계기준에 의한 전단강도의 60% 정도가 발현되는 것으로 분석됨
○ 3점 재하 실험을 통한 휨 응력 분석 : 압축강도가 유사하더라도 휨 응력의 경우는 SSPCM 혼입률이 증가함에 따라 저하되는 경향성을 갖는 것으로 분석됨</td></tr>
<tr><td>결 과 물</td><td colspan="3">
<table>
<tr><th>시험체</th><th>설계기준에 의한 전단강도 (kN)
$\frac{1}{6}\times\sqrt{f_{ck}}\times b\times d$</th><th>실험에 의한 전단강도 (kN)</th></tr>
<tr><td>4%</td><td>20.86</td><td>21.23</td></tr>
<tr><td>6%</td><td>20.39</td><td>12.55</td></tr>
</table>
<설계기준 및 실험에 의한 전단강도 비교>
<table>
<tr><th>시험체</th><th>휨 응력 (MPa)
$\frac{3PL}{2BH^2}$</th></tr>
<tr><td>4%</td><td>5.19</td></tr>
<tr><td>6%</td><td>3.07</td></tr>
</table>
<휨응력>
</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">연구성과</td><td>특허</td><td>비SCI논문</td><td>SCI논문</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

<table>
<tr><td colspan="2">구 분</td><td colspan="3">하중재하실험을 통한 구체 축열용 온수배관을 포함하는 슬래브의 휨-전단 성능 평가</td></tr>
<tr><td colspan="2">정의(설명)</td><td colspan="3">온수배관의 배열에 따른 슬래브의 휨-전단 특성을 파악함</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 표</td><td colspan="3">- 구체축열용 온수 배관이 삽입된 중공 슬래브의 배관 방향에 따른 휨-전단 거동 평가</td></tr>
<tr><td rowspan="4">핵심 요소 기술</td><td>개념</td><td colspan="3">구체축열시스템에서 온수배관의 배치 특성에 따른 구조적 안정성을 파악함</td></tr>
<tr><td>방법</td><td colspan="3">- 온수배관에 따른 슬래브의 휨-전단 성능을 평가하기 위하여 중공체 아래로 지나는 온수배관의 유무와 그 방향을 실험 변수로 정하여 실험체를 제작
- 휨-전단 실험체는 제작 후, 30일간 상온에서 양생한 후에 4점 재하 실험을 수행
- 4점 재하의 형태로 500kN의 로드셀을 이용하여 0.25mm/min의 속도로 가력</td></tr>
<tr><td>특징</td><td colspan="3">○ 온수배관 방향에 따른 하중-처짐 곡선의 형태나 최대 하중이 온수배관의 설치 여부와 배관 방향에 관계없이 매우 유사하여, 온수배관이 포함되어도 휨과 전단 성능에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 확인됨
○ 휨 실험의 경우, 온수배관이 포함되지 않은 실험체의 최대 처짐이 상대적으로 작게 나타나며 온수배관이 있는 실험체에 연성이 확보되는 것으로 판단됨
○ 전단실험의 경우, 온수배관이 포함되지 않은 실험체의 최대 처짐이 작게 나타났으며, 최대하중의 차이는 크지 않음</td></tr>
<tr><td>결 과 물</td><td colspan="3"> 

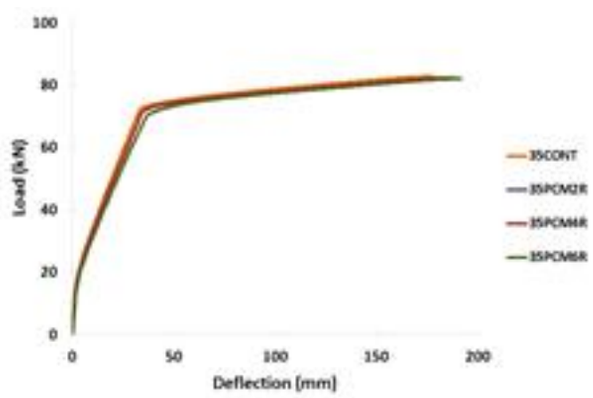
<휨 실험체의 하중-처짐 곡선></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">연구성과</td><td>특허</td><td>비SCI논문</td><td>SCI논문</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

<table>
<tr><td colspan="2">구 분</td><td colspan="3">유한요소해석을 통한 PCM 콘크리트 중공슬래브 구조적 거동에 대한 평가</td></tr>
<tr><td colspan="2">정의(설명)</td><td colspan="3">실험 결과를 바탕으로 구조해석 프로그램 모델링에 대한 검증을 수행함</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 표</td><td colspan="3">- 구체축열용 온수 배관이 삽입된 슬래브의 배관 방향에 따른 휨-전단 거동 평가 실험 검증을 위하여 유한요소 해석기법을 이용하여 구조거동 예측 및 평가</td></tr>
<tr><td rowspan="4">핵심 요소 기술</td><td>개념</td><td colspan="3">구조해석을 통해 슬래브 내 배관 배치에 따른 거동 특성을 파악하고, 이를 실험 결과와 비교 분석함</td></tr>
<tr><td>방법</td><td colspan="3">- 유한요소 해석모델은 구체축열용 온수 배관이 삽입된 슬래브의 배관 방향에 따른 휨-전단 거동을 위한 실제 실험체와 동일한 크기와 물성치를 갖도록 하였으며, ABAQUS 6.10-3을 이용하여 콘크리트와 철근의 비선형 물성치를 고려한 정적 비선형 기하 해석을 수행</td></tr>
<tr><td>특징</td><td colspan="3">○ 해석 결과 하중-처짐 곡선은 온수배관의 설치 여부와 배관 방향에 관계없이 유사하며, 실험결과와도 비교적 일치함</td></tr>
<tr><td>결과물</td><td colspan="3"> 

<휨 실험체의 해석과 실험의 하중-처짐 곡선></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">연구성과</td><td>특허</td><td>비SCI논문</td><td>SCI논문</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

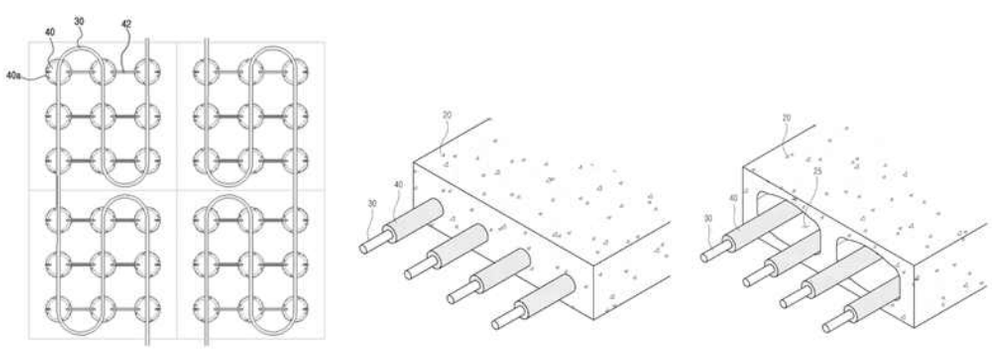
<table>
<tr><td colspan="2">구 분</td><td colspan="3">PCM 온도변화에 따른 중공슬래브의 유한요소해석을 통한 구조 거동 평가</td></tr>
<tr><td colspan="2">정의(설명)</td><td colspan="3">PCM 상변화 온도 조건에 따른 중공슬래브의 구조 안정성을 파악</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 표</td><td colspan="3">- 온수배관을 통해 슬래브 내부에 열이 도달했을 때 나타나는 구조거동의 변화를 예측</td></tr>
<tr><td rowspan="4">핵심
요소
기술</td><td>개념</td><td colspan="3">- 실험결과와의 비교 분석을 통하여 검증된 해석모델을 이용하여 열 및 구조해석을 진행함
- 온수배관의 유무와 배관의 방향에 따른 구조성능의 차이가 없으므로 열 전달해석은 장방향으로 배관이 배치된 해석모델에 대해서만 수행</td></tr>
<tr><td>방법</td><td colspan="3">ABAQUS 6.10-3을 이용하여 콘크리트와 철근의 비선형 물성치를 고려한 정적 비선형 기하 해석을 수행</td></tr>
<tr><td>특징</td><td colspan="3">○ 열 및 구조 해석 결과로부터 이방향 중공슬래브 모델의 하중-처짐 곡선을 구하여 열 전달을 고려하지 않은 해석 결과와 비교한 결과, 온수배관을 통해 전달되는 열은 구조거동에 큰 영향을 미치지 않음</td></tr>
<tr><td>결
과
물</td><td colspan="3"> 

<열전달 해석의 하중-처짐 곡선 비교></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">연구성과</td><td>특허</td><td>비SCI논문</td><td>SCI논문</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

<table>
<tr><td colspan="2">구 분</td><td colspan="3">SSPCM을 혼입한 중공슬래브의 구조적 거동 평가</td></tr>
<tr><td colspan="2">정의(설명)</td><td colspan="3">SSPCM을 혼입한 콘크리트 중공슬래브 구조체의 구조적 안정성을 파악함</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 표</td><td colspan="3">- SSPCM을 혼입한 콘크리트를 사용한 중공슬래브를 제작했을 때 나타나는 구조거동 예측</td></tr>
<tr><td rowspan="4">핵심 요소 기술</td><td>개념</td><td colspan="3">- SSPCM을 혼입한 콘크리트 중공슬래브는 3차원 사면체 요소, 철근은 3차원 트러스 요소로 모델링
- 4점 재하의 형태로 설계하중 적용하며, 철근과 콘크리트는 완벽히 일체화되어 있는 것으로 가정하여 해석 수행</td></tr>
<tr><td>방법</td><td colspan="3">ABAQUS 6.10-3을 이용하여 콘크리트와 철근의 비선형 물성치를 고려한 정적 비선형 기하 해석을 수행</td></tr>
<tr><td>특징</td><td colspan="3">○ SSPCM 혼입률에 따른 콘크리트 물성치의 차이가 있다고 하더라도 하중-처짐 곡선에서는 큰 차이가 나타나지 않았는데, 이는 슬래브의 휨 거동에 있어서 인장철근이 주 역할하기 때문인 것으로 분석됨</td></tr>
<tr><td>결과물</td><td colspan="3"> 

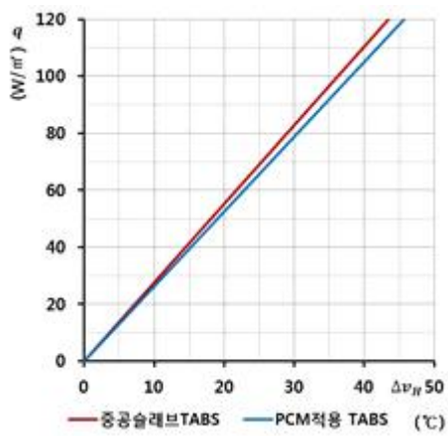
<하중-처짐 곡선></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">연구성과</td><td>특허</td><td>비SCI논문</td><td>SCI논문</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

<table>
<tr><th colspan="2">구 분</th><th colspan="3">구조 설계 지침</th></tr>
<tr><td colspan="2">정의(설명)</td><td colspan="3">SSPCM 혼입 콘크리트를 이용하여 중공슬래브 구조시스템을 개발하기 위한 구조설계 지침을 도출함</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 표</td><td colspan="3">- 재료•구조 실험 및 유한요소 해석 결과에 기반한 SSPCM 혼입 콘크리트 중공슬래브 구조 설계 지침을 제안</td></tr>
<tr><td rowspan="4">핵심 요소 기술</td><td>개념</td><td colspan="3">기존 철근콘크리트 설계 기준을 바탕으로 SSPCM 혼입 콘크리트의 설계식을 도출함</td></tr>
<tr><td>방법</td><td colspan="3">- 재료강도의 변화가 휨 및 전단 구조 거동에 미치는 영향을 파악하여 기존 설계식에서 보완해야 할 부분을 파악</td></tr>
<tr><td>특징</td><td colspan="3">○ 휨 거동의 측면
- 기존 철근 콘크리트 휨 부재 설계(KCI 2012)를 따르고자 함
○ 전단 거동의 측면
- SSPCM 혼입률이 4%인 경우에는 기존 설계식의 콘크리트 공칭전단강도를 만족함
- SSPCM 혼입률이 6%인 경우에는 기존 설계식의 콘크리트 공칭 전단강도의 60% 정도가 발현됨
- 이에, 공칭전단강도를 계산함에 있어 혼입률 4%를 초과하는 경우, 강도 저감계수를 고려해야 함</td></tr>
<tr><td>결과물</td><td colspan="3">$$V_c=\frac{1}{6}\times\sqrt{f_{ck}}\times b\times d$$
<현행 기준의 전단강도 설계식>
$$V_c=0.1\times\sqrt{f_{ck}}\times b\times d$$
<SSPCM 혼입률 6% 전단강도 설계식 제안></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">연구성과</td><td>특허</td><td>비SCI논문</td><td>SCI논문</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

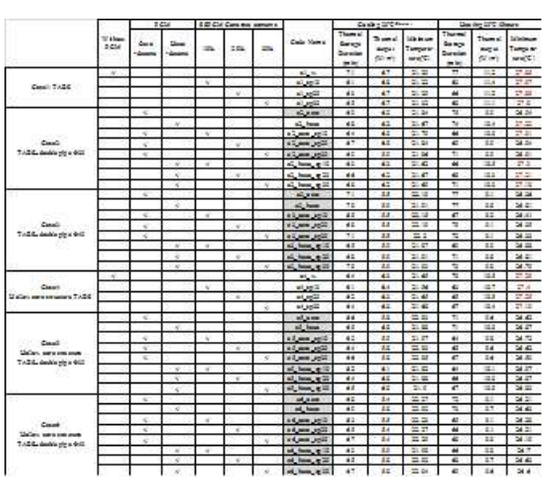
<table>
<tr><td colspan="2">구 분</td><td colspan="3">복사냉난방시스템 사례 조사 및 중공슬래브 적용 프로토타입 선정</td></tr>
<tr><td colspan="2">정의(설명)</td><td colspan="3">구체축열 복사냉난방시스템의 사례를 조사하고, 이를 바탕으로 중공슬래브를 적용한 구체축열 복사냉난방시스템의 구성 방안을 도출함</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 표</td><td colspan="3">- 복사냉난방시스템 사례 조사를 통하여 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템 적용 프로토타입 선정하고자 함</td></tr>
<tr><td rowspan="4">핵심
요소
기술</td><td>개념</td><td colspan="3">국내외 사례 및 연구동향 조사를 통해 2방향 중공슬래브를 적용한 구체축열 복사냉난방시스템 구성 방안을 제안하고, 특허 출원함</td></tr>
<tr><td>방법</td><td colspan="3">- rehva(2007)의 Low temperature heating and high temperature cooling 문헌조사
- 구체축열 복사냉난방시스템의 기존 연구동향 분석
- 중공슬래브 제작을 위한 현장답사
- 중공슬래브를 이용한 구체축열시스템 모형 제작</td></tr>
<tr><td>특징</td><td colspan="3">○ 중공슬래브 구체축열시스템에 PCM을 적용하는 것을 프로토타입으로 선정
○ 이에 프로토타입으로 선정가능한 특허 출원</td></tr>
<tr><td>결
과
물</td><td colspan="3"> 
<특허출원안></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">연구성과</td><td>특허</td><td>비SCI논문</td><td>SCI논문</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

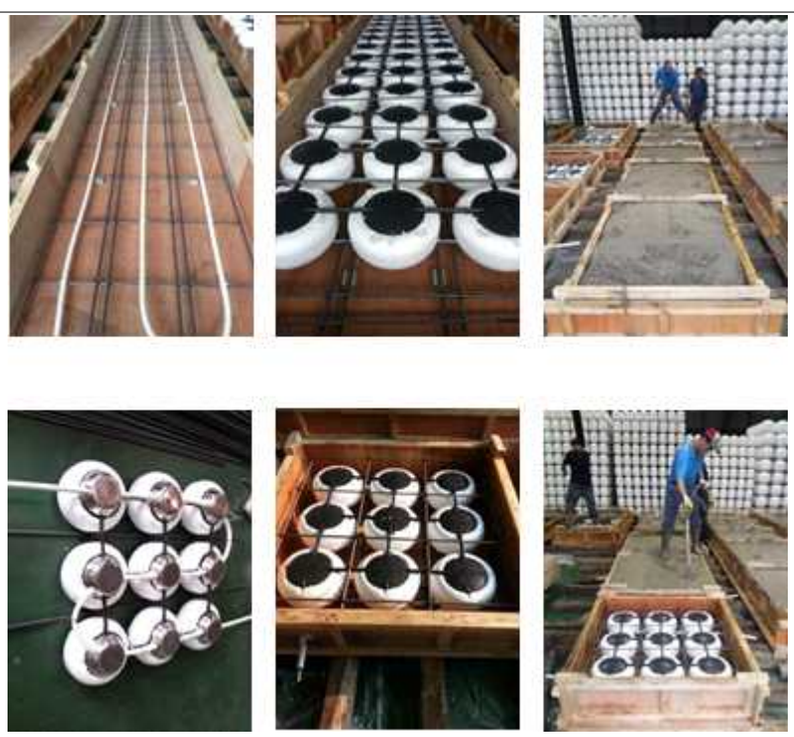
<table>
<tr><td colspan="2">구 분</td><td colspan="3">동・하계 PCM적용에 따른 구체축열시스템 에너지 소비량 분석</td></tr>
<tr><td colspan="2">정의(설명)</td><td colspan="3">동계 및 하계에 PCM을 적용함에 따라 건물의 냉난방부하 특성을 파악함으로써 건물에서의 에너지 절감 가능성을 제시함</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 표</td><td colspan="3">- PCM을 활용하여 구체축열 복사냉난방시스템(TABS)의 축열성능을 보완할 경우, 건축물의 에너지 효율을 향상시킬 수 있음
- 건물에서 냉난방에너지 소비량을 저감할 수 있을 것으로 판단됨</td></tr>
<tr><td rowspan="4">핵심
요소
기술</td><td>개념</td><td colspan="3">- 본 연구에서는 이를 검증하기 위해 동적 에너지해석 프로그램을 이용하여 기존 오피스 건물을 대상으로 에너지 절감 특성을 분석함</td></tr>
<tr><td>방법</td><td colspan="3">- TABS 비교 대안 : PCM이 적용되지 않은 중공슬라브 TABS, 상변화온도가 상이한 2개의 PCM을 적용한 중공슬라브 TABS
- EnergyPlus 해석을 수행하여 대안별 냉난방에너지 소비량을 도출함</td></tr>
<tr><td>특징</td><td colspan="3">○ 오피스 건물에 중공슬래브에 PCM의 함량이 약 5%인 TABS를 적용한 경우, 냉방피크부하는 1.1%, 냉방에너지소비량은 0.9% 가량 저감되는 것으로 나타남 (Hexadecane PCM을 적용한 대안).
○ PCM의 함량이 증가할 경우 (구조 안전성이 보장하는 수준의) 냉방부하는 더 저감되는 것으로 나타남</td></tr>
<tr><td>결
과
물</td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">연구성과</td><td>특허</td><td>비SCI논문</td><td>SCI논문</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

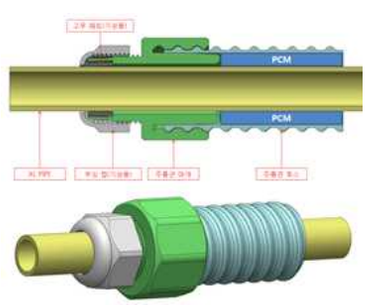
<table>
<tr><td colspan="2">구 분</td><td colspan="3">구체축열시스템과 상변화물질을 적용한 건축물의 에너지절감 효과 및 실내 열적 쾌적성 비교</td></tr>
<tr><td colspan="2">정의(설명)</td><td colspan="3">PCM을 적용한 구체축열시스템을 냉난방에 적용함으로써 건물의 에너지 절감 효과 및 온열 쾌적 특성을 파악함</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 표</td><td colspan="3">- PCM을 활용하여 구체축열 복사냉난방시스템(TABS)의 축열성능을 보완할 경우, 건축물의 에너지 효율을 향상시킬 수 있음
- 건물에서 냉난방에너지 소비량을 저감할 수 있을 것으로 판단됨
- 본 연구에서는 이를 검증하기 위해 동적 에너지해석 프로그램을 이용하여 기존 오피스 건물을 대상으로 에너지 절감 특성을 분석함</td></tr>
<tr><td rowspan="4">핵심 요소 기술</td><td>개념</td><td colspan="3">PCM의 상변화 온도 특성을 고려한 에너지 절감 특성을 파악함</td></tr>
<tr><td>방법</td><td colspan="3">- TABS 비교 대안 : PCM이 적용되지 않은 중공슬라브 TABS, 상변화온도가 상이한 2개의 PCM을 적용한 중공슬라브 TABS, SSPCM 콘크리트 적용된 중공슬래브 TABS
- EnergyPlus 해석을 수행하여 대안별 냉난방에너지 소비량을 도출함</td></tr>
<tr><td>특징</td><td colspan="3">○ 난방 기간에 해당하는 11월부터 3월까지의 연간 총 난방부하는 기준모델을 적용한 경우 16,099kWh, 콘크리트에 SSPCM을 30% 섞은 모델의 경우 12,287kWh로 최대 24%까지 절감
○ 냉방 기간에 해당하는 4월부터 10월까지의 연간 총 냉방 부하는 기준모델을 적용한 경우 25,038kWh, SSPCM 30%가 적용된 모델의 경우 16,547kWh로 최대 약 34%까지 감소
○ 최대 냉방 부하(피크 부하)는 기준모델을 적용한 경우 30,684kWh, SSPCM이 30% 적용된 모델의 경우 22,450kWh로 약 27% 감소
○ SSPCM 30%가 적용된 모델이 기준모델과 PMV 값이 최대 약 ±1.5까지 차이 나면서 효과적으로 -0.5 ～+0.5 사이 범위를 유지</td></tr>
<tr><td>결과물</td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">연구성과</td><td>특허</td><td>비SCI논문</td><td>SCI논문</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

<table>
<tr><td colspan="2">구 분</td><td colspan="3">EN1264 기준에 따른 설계 기준안 검증</td></tr>
<tr><td colspan="2">정의(설명)</td><td colspan="3">EN 1264 실험방법에 따라 구체축열시스템의 방열량 특성을 파악함</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 표</td><td colspan="3">표준적인 방열량 측정 실험방법을 제시하고, 이에 따른 방열량 특성을 파악함</td></tr>
<tr><td rowspan="4">핵심
요소
기술</td><td>개념</td><td colspan="3">중공슬래브 축소 모델을 제작하고, EN 1264 실험 방법에 따른 방열량 측정 실험을 진행함</td></tr>
<tr><td>구성</td><td colspan="3">- 배관을 둘러싸는 축열체를 위한 가장 기본이 되는 2가지 모델 제작 : 중공슬라브 TABS, 중공슬라브 TABS에 PCM을 담은 용기 사이로 배관이 지나가는 축열체를 제작함
- EN1264 공급온수 조건에 따른 방열성능곡선을 이용하여 성능 수준에 만족하는 것을 평가할 수 있으며, 본 연구의 특허안을 바탕으로 제작된 시작품(배관을 둘러싼 축열체)에 대한 성능 검증을 수행함</td></tr>
<tr><td>특징</td><td colspan="3">○ PCM을 중공슬래브에 적용한 TABS의 경우, 기존 중공슬래브 TABS만을 적용한 경우에 비해 방열량이 다소 낮게 나타났음. 이는 PCM재료의 축열효과에 기인한 것으로 판단됨</td></tr>
<tr><td>결
과
물</td><td colspan="3"> 

<방열성능곡선></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">연구성과</td><td>특허</td><td>비SCI논문</td><td>SCI논문</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

<table>
<tr><td colspan="2">구 분</td><td>PCM을 적용한 구체축열 냉난방시스템의 열적성능 설계기준</td></tr>
<tr><td colspan="2">정의(설명)</td><td>PCM을 적용한 구체축열 복사냉난방시스템의 방열량 설계 기준을 제시함</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 표</td><td>- PCM을 적용한 구체축열 냉난방시스템 설계방안에 따라서 방열(냉)량 및 축열지속시간에 대한 설계기준 제시</td></tr>
<tr><td rowspan="4">핵심
요소
기술</td><td>개념</td><td>전열해석을 통해 PCM을 적용한 구체축열 복사냉난방시스템의 방열량 특성을 파악하고, 다양한 설계 조건에 따른 방열량 설계 기준을 제시함</td></tr>
<tr><td>방법</td><td>- Physibel BISTRA3.1w 프로그램을 이용하여 2차원 비정상상태 전열해석프로그램을 이용하여 방열량 및 축열지속시간 산정
- 구체축열시스템의 기준모델은 너비 1.1m, 높이 0.21m의 콘크리트 슬래브 내에 배관을 매설한 것이고 PCM을 적용하는 모델의 경우 Octadecane과 Hexadecane 두 종류의 PCM이 적용되며 이중배관의 직경을 30mm와 40mm로 구분. SSPCM 콘크리트는 SSPCM의 함량을 10%, 20%, 30%로 구분
- 시뮬레이션 수행 시 시간에 따른 방열(냉)량, 최고온도, 평균온도를 결과 값으로 설정하여 각 변수들의 데이터를 적용한 뒤 분석.
- 이중배관의 직경, PCM의 종류, SSPCM의 함량, 유량 운전 스케줄을 변수 설정</td></tr>
<tr><td>특징</td><td>○ 이중배관 직경 ϕ40mm의 모든 케이스들이 ϕ30mm보다 축열시간이 다소 긴 것으로 나타남
○ 이중배관 속 Octadecane PCM의 모든 케이스가 Hexadecane PCM보다 축열시간이 긴 것으로 나타남
○ 30% SSPCM 콘크리트로 교체한 모든 케이스에서 20%, 10%에 비교하여 축열시간이 긴 것으로 나타남
○ 이중배관 속에 Hexadecane이 포함되며 30% SSPCM 콘크리트 케이스가 방열(냉)량이 다른 혼합안들과 비교하여 더 높은 것으로 나타남</td></tr>
<tr><td>결
과
물</td><td> 
<열성능 기준></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">연구성과</td><td>특허 | 비SCI논문 | SCI논문</td></tr>
<tr><td></td></tr>
</table>

<table>
<tr><td colspan="2">구 분</td><td colspan="3">축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템의 실험용 시작품 제작 (2차년도)</td></tr>
<tr><td colspan="2">정의(설명)</td><td colspan="3">PCM을 적용한 구체축열 복사냉난방시스템의 설계안을 도출하고, 실제 실험용 시작품을 제작함으로써 시공상의 문제점을 파악함</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 표</td><td colspan="3">○ 특허출원시 고안한 개념도 및 설계안에 따라 시작품 제작 수행</td></tr>
<tr><td rowspan="4">핵심 요소 기술</td><td>개념</td><td colspan="3">PCM을 적용한 구체축열 복사냉난방시스템의 실제 실험용 시작품을 제작함으로써 시공상의 문제점을 파악함</td></tr>
<tr><td>방법</td><td colspan="3">○ 시작품 제작과 병행하여 PCM을 활용한 구체축열 복사냉난방시스템의 시공 프로세스를 검토하고 시공상의 문제점 파악 및 분석</td></tr>
<tr><td>특징</td><td colspan="3">○ 시작품의 시공성 분석을 바탕으로 시공관리사항 등을 포함한 TVS PCM 특기시방서 작성</td></tr>
<tr><td>결과물</td><td colspan="3"> 
<실험용 시제품 제작></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">연구성과</td><td>특허</td><td>비SCI논문</td><td>SCI논문</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

<table>
<tr><td colspan="2">구 분</td><td colspan="3">축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템의 실용화 시작품 제작 (3차년도)</td></tr>
<tr><td colspan="2">정의(설명)</td><td colspan="3">축열성능 향상을 위해 2중배관 형태의 구체축열 중공슬래브를 고안하여 실용화를 위한 시작품을 제작함</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 표</td><td colspan="3">○ 2차년도 “배관을 둘러싸는 축열체” 특허출원에 기반하여, 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템의 실용화 시작품 제작
○ 열유체가 통과하는 배관을 감싸는 이중관 형태의 주름관에 PCM를 채우고, 양단에서 새지 않도록 고안된 주름관 마개 적용
○ PCM 구체축열 이중배관은 3차년도 연구실적으로 특허출원. 금형제작 및 시험생산을 통해 현장 적용시 활용함</td></tr>
<tr><td rowspan="4">핵심
요소
기술</td><td>개념</td><td colspan="3">이중관 형태의 PCM 용기를 제작하고, 실용화 및 현장 적용을 고려하여 시작품을 제작함</td></tr>
<tr><td>구성</td><td colspan="3">중공체, 이중관 형태의 PCM 용기, 이중관 연결부재</td></tr>
<tr><td>특징</td><td colspan="3">○ 복사냉난방 시스템의 실용화 시작품 제작
○ 이중관 형태의 주름관에 PCM를 채우고, 양단에서 새지 않도록 고안된 주름관 마개 적용
○ 특허출원. 금형제작 및 시험생산을 통해 현장 적용시 활용</td></tr>
<tr><td>결
과
물</td><td colspan="3"> 
<이중배관 제작 단면도 및 형상도></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">연구성과</td><td>특허</td><td>비SCI논문</td><td>SCI논문</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

<table>
<tr><td colspan="2">구 분</td><td>축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템의 현장 적용</td></tr>
<tr><td colspan="2">정의(설명)</td><td>개발된 시작품의 현장 적용성능을 파악하고자 실험실 규모에서 시범 시공함</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 표</td><td>○ 1,2차년도의 연구결과를 바탕으로 본 연구에서 개발한 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템의 실용화 시작품을 실제 프로젝트 적용 및 실용화 가능성 검토를 위하여 현장 적용
○ 대상 현장 : 공동연구기관인 포스코건설이 2014년 충주에 건설한 기술연구소 실험동</td></tr>
<tr><td rowspan="4">핵심요소기술</td><td>개념</td><td>연구결과를 종합적으로 반영하여 개발된 시작품의 현장적용성능을 파악하기 위한 구체축열 복사냉난방시스템의 현장 적용을 진행함</td></tr>
<tr><td>구성</td><td>○ 성능 비교실험을 위하여 실험동 내부 3개 Mock-Up Cell의 천정슬래브에 3가지 Type의 시스템을 설계하여 반영</td></tr>
<tr><td>특징</td><td>○ 실제 프로젝트 적용 및 실용화 가능성 검토를 위하여 현장 적용
○ 대상 현장 : 포스코건설 충주기술연구소 실험동
○ 3개 Mock-Up Cell의 천정슬래브에 3가지 Type의 시스템을 설계 반영</td></tr>
<tr><td>결과물</td><td> 
 
<포스코건설 충주기술연구소 실험동></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">연구성과</td><td>특허</td><td>비SCI논문</td><td>SCI논문</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

3절 현장 적용 실적

본 연구를 수행함에 있어서 현장 적용을 위해 프로토타입을 개발하여 SSPCM 재료 개발 및 구조안정성 해석 및 냉난방 성능평가를 단계적으로 수행하였으며, 최종 3차년도에 다음과 같이 공동연구기관(포스코건설)과 함께 실험동 건물에 시범 적용하였다.

1단계 : 축열성능 향상된 슬래브를 이용한 복사냉난방시스템 프로토타입 개발
2단계 : 프로토타입의 구조안정성 해석, 냉난방 성능 평가 수행 및 SSPCM 콘크리트 개발
3단계 : 특허 출원 및 현장적용

- 1-2차년도의 연구결과를 바탕으로 본 연구에서 개발한 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템의 실용화 시작품을 실제 프로젝트 적용 및 실용화 가능성 검토를 위하여 현장 적용
- 대상 현장 : 포스코건설 기술연구소 실험동
- 성능 비교실험을 위하여 실험동 내부 3개 Mock-Up Cell의 천정슬래브에 3가지 Type의 시스템을 설계하여 반영



04

연구목표 달성 및 효과

제1절 연구개발 목표 달성도
제2절 연구개발 성과의 활용방안 및 기대효과



최 종 보 고 서

04 연구목표 달성 및 효과

1절 연구개발 목표 달성도

성과점검기준표(1차년도)

	과제명		성과목표		성과지표		성과검증 기준				가중치	달성평점 (평점1~5)
							목표수준		측정방법	검증방법		
							목표치	달성치				
성과 질적 목표 점검	1	축열성능이 향상된 슬래브를 이용한 저에너지 복사냉난방시스템 개발	1-1	에너지 효율 향상 (에너지 절감)	①	PC 슬래브 방열량	30W/m²	30W/m²	공급온수 조건에 따른 방열량 시뮬레이션	시뮬레이션	50%	5
			1-2	SSPCM 재료 개발	①	PCM 재료 함침율	40%	40%	PCM 및 재료의 열·물성 분석을 통한 검증	실험, 전문가 자문	50%	5
	종합점수 = ∑ (성과목표별 달성평점 ×가중치)										100%	5

		목표	목표 건수	달성 건수	증빙	인정 건수	달성율 (%)	가중치	달성평점
양적 지표 점검	사업연계지표	국내외 학술지 논문게재 건수	3건	3	제출 논문	3	100	20%	5
		국내외 학술발표대회 논문발표 건수	4건	6	제출논문	6	150	20%	5
		특허 출원 건수(국내)	1건	1	특허명세서	1	100	20%	5
		설계도면 및 사양서 개발	1건	1	증빙자료	1	100	10%	5
		수치해석 건수	1건	1	보고서	1	100	10%	5
		시작품 출시 건수	1건	1	시작품	1	100	20%	5
	종합점수 = ∑ (성과별달성율×가중치)							110%	5

성과점검기준표(2차년도)

	과제명		성과목표		성과지표		성과검증 기준				가중치	달성평점 (평점1~5)
							목표수준		측정방법	검증방법		
							목표치	달성치				
성과 질적 목표 점검	1	축열성능이 향상된 슬래브를 이용한 저에너지 복사냉난방시스템 개발	1-1	*에너지 효율 향상 (에너지 절감)*	①	PC 슬래브 방열량	30W/m²	30W/m²	공급온수 조건에 따른 방열량 시뮬레이션	시뮬레이션	50%	5
			1-2	PCM 혼합 콘크리트 재료 개발	①	압축강도	24MPa	24MPa	재료, 강도실험	실험, 전문가 자문	50%	5
	종합점수 = ∑ (성과목표별 달성평점 ×가중치)										100%	4.5

		목표	목표 건수	달성 건수	증빙	인정 건수	달성율 (%)	가중치	달성평점
양적 지표 점검	사업연계지표	국내외 학술지 논문게재 건수	5건	4	제출논문	4	80	20%	4
		국내외 학술발표대회 논문발표 건수	4건	7	제출논문	7	175	20%	5
		특허 출원 건수(국내)	1건	1	특허명세서	1	100	30%	5
		설계도면 및 사양서 개발	1건	1	증빙자료	1	100	10%	5
		시작품 출시 건수	1건	1	시작품	1	100	20%	5
	종합점수 = ∑ (성과별달성율×가중치)							127%	4.8

성과점검기준표(3차년도)

	과제명		성과목표		성과지표		성과검증 기준				가중치	달성평점 (평점1~5)
							목표수준		측정방법	검증방법		
							목표치	달성치				
성과 질적 목표 점검	1 축열성능이 향상된 슬래브를 이용한 저에너지 복사냉난방시스템 개발	1-1	에너지 효율 향상 (에너지 절감)	①	PC 슬래브 방열량	30W/m²	30W/m²	공급온수 조건에 따른 방열량 시뮬레이션	시뮬레이션	50%	5
		1-2	PCM 혼합 콘크리트 재료 개발	①	압축 강도	24MPa	24MPa	재료 강도 실험	실험, 전문가 자문	50%	5
	종합점수 = ∑ (성과목표별 달성평점 ×가중치)											

		목표	목표 건수	달성 건수	증빙	인정 건수	달성율 (%)	가중치	달성평점
양적 지표 점검	사업연계지표	국내외 학술지 논문게재 건수	5건	3	제출 논문	3	60	20%	3
		국내외 학술발표대회 논문발표 건수	4건	10	제출논문	10	250	20%	5
		특허 등록 및 출원 건수(국내)	1건	3	특허명세서	3	300	30%	5
		설계도면 및 사양서 개발	1건	1	증빙자료	1	100	10%	5
		시작품 출시 건수	1건	2	시작품	2	200	20%	5
	종합점수 = ∑ (성과별달성율×가중치)							194%	4.2

2절 연구개발 성과의 활용방안 및 기대효과

1. 활용방안

본 연구개발을 통해 개발된 기술은 관공서나 학교, 군시설 등 공공시설은 물론, 오피스, 상가 등 민간의 비주거건물에 폭넓게 활용될 수 있다. 실용화를 위해 연구단계에서 시제품을 개발하고, 기술이전을 통해 제품화를 추진할 것이다. PCM 소재 및 구체축열시스템의 설계 기술을 확보함으로써 실제 건물에서의 설계에 반영될 수 있도록 기술적인 후속 연구를 지속적으로 추진할 것이다. 본 연구는 3차년도로 계획되었으며, 1차년도에는 PCM 재료 개발 및 구체축열 복사냉난방시스템 설계, 2차년도에는 PCM 혼합 축열 콘크리트 재료 개발 및 구체축열 복사냉난방시스템의 냉난방 운전기술 개발, 3차년도에는 PCM 활용 구체축열 중공 슬래브 개발과 설계, 운영 매뉴얼 개발로 진행되었다. 본 연구의 1차년도에는 구체축열 복사냉난방시스템 적용을 위한 프로토타입 설계를 위해 설계사무소를 참여기업으로 기술개발이 진행되었으며, 2차년도에는 건설사와 중공 슬래브 회사에서 시제품을 제작하여 구조 성능 및 냉난방 성능을 평가하였다. 이를 바탕으로 3차년도에는 PCM을 활용한 구체축열 복사냉난방시스템을 제작하여 현장 적용하기 위해, 건설회사를 참여기관으로 하여 실제 현장적용방안을 도출하였다. 개발된 기술의 실용화, 제품화를 위해 연구개발 기간동안 국내 특허를 등록하였으며, 이를 바탕으로 향후 참여기업에 기술이전을 추진할 계획이다. PCM 재료 개발의 경우, 본 연구를 통해 축열 성능을 확보한 콘크리트 재료 개발과 관련된 원천기술을 확보함으로써 향후 다양한 분야로의 활용방안을 도출해 낼 계획이다.

R&D 성과물을 구성하는 단위기술로서, 본 연구에서 달성한 기술이전이나 활용의 대상이 되는 요소기술(단위 성과물)은 다음과 같이 PCM을 활용한 구체축열용 중공 슬래브 구조체를 들 수 있다.

해당 기관명	핵심연구성과	요소기술*
주관 : 이화여자대학교 산학협력단	축열성능이 향상된 슬래브를 이용한 저에너지 복사냉난방시스템 개발	PCM을 활용한 구체축열용 중공 슬래브 구조체

요소기술명	PCM을 활용한 구체축열용 중공 슬래브 구조체
기술개요	축열성능이 향상된 SSPCM 콘크리트 재료 PCM 재료 및 PCM과 콘크리트 혼합 배합 방법 PCM을 활용한 중공 슬래브 구조체의 구조 설계 방법 PCM을 활용한 구체축열시스템의 시작품 축열성능이 향상된 슬래브의 구조성능 평가 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템 설계 및 운영 기술 축열성능이 향상된 복사냉난방 시스템 현장 적용
관련 키워드	복사냉난방시스템, 구체축열시스템, 중공슬래브
결과물 유형*	■ 공법/기법 □장비/장치 □재료/자재 □SW □시스템 □기준/지침 □기타
기술수명주기**	□기술도입기 ■ 기술성장기 □기술성숙기 □기술쇠퇴기

본 연구결과를 바탕으로 향후 참여기업(포스코건설)을 통해 연구개발결과의 시험 및 검증을 진행하고, 전문 엔지니어링 회사(반석 TVS)를 대상으로 기술이전 등의 과정을 거쳐 사업화를 위한 후속 연구를 진행하고자 한다. 본 연구개발을 통해 개발된 기술은 관공서나 학교, 군시설 등 공공시설은 물론, 오피스, 상가 등 민간의 비주거건물에 폭넓게 활용될 수 있다. 이에 실용화를 위해 연구단계에서 시제품을 개발하고, 기술이전을 통해 제품화를 추진할 계획이다. 또한 PCM 소재 및 구체축열시스템의 설계 기술을 확보함으로써 실제 건물에서의 설계에 반영될 수 있도록 기술적인 후속 연구를 지속적으로 추진할 계획이다. 향후 참여기업에 기술이전을 추진하고, SSPCM개발의 경우, 본 연구를 통해 축열 성능을 확보한 콘크리트 재료 개발과 관련된 원천기술을 확보함으로써 향후 다양한 분야로의 활용방안을 도출하고자 한다.

2. 기대효과

구체축열 복사냉난방시스템을 건축물에 적용하는 경우, 신재생에너지의 적용 효과를 높일 수 있으며, 건물에서의 에너지 효율화가 가능하다. 또한 구체축열을 통해 냉난방 수요 급증으로 인한 전력 피크치를 낮출 수 있으며, 공조설비의 덕트 스페이스와 슬래브 두께를 줄여 초기 사업 투자 효율을 높일 수 있다. 향후 기술 보급을 통해 건축물에서의 냉난방에너지 소비량을 줄임으로써 온실가스 배출을 줄일 수 있을 것이다. PCM 소재기술은 향후 관련 건축자재로 기술파급이 예상되며, 건축자재에서 다양한 형태의 축열용 건자재 제품으로 사업화가 가능할 것이다.

본 연구에서 개발되는 구체축열 복사냉난방시스템은 현재 국내 친환경 저에너지 건축물에 적용되는 요소기술로서 활용이 가능하며, 해외 기술 도입이 아닌 국내 자체 개발 기술을 바탕으로 현장 기술 지도 및 보급 활성화가 가능할 것이다. 이를 통해 전기 피크 부하를 줄이고, 신재생에너지의 활용을 확대함으로써 건물에너지 효율을 향상시켜 나갈 수 있다. 뿐만 아니라, PCM 분야의 전문 인력 및 복사냉난방시스템 분야의 전문 인력을 양성함으로써 국내 관련 산업의 활성화에 크게 기여할 수 있을 것이다.

가. 기술적 효과

○ PCM 혼입 콘크리트를 위한 SSPCM 기술 확보
○ PCM 혼입 콘크리트 배합 기술 확보
○ 구체축열 중공 슬래브의 최적 구조설계 기술 및 냉난방 설계 기술 확보
○ 중공 슬래브를 활용한 구체축열시스템의 시공 기술 확보
○ 국내 특허 4건 출원
○ SCI(E)급 논문 4편 포함하여 총 10편의 국내외 논문집 게재
○ 23편의 국내외 학술발표대회 논문집 게재
○ 국내외 학술발표를 통해 다수의 우수논문발표상 수상
- 2013년 한국태양에너지학회 추계학술발표대회 우수논문상, 김석환 외
- 2013년 5월, 바로셀로나, 초청세미나 참석, 김석환
- 2014년 대한건축학회 추계학술발표대회 우수발표논문상, 이현화 외
- 2014 여대학(원)생 공학연구팀제 사업 우수상 수상, 이현화 외

나. 경제적 효과

○ 건물에너지 소비량을 저감함으로써 에너지 비용 절감이 가능

○ 건물의 축열성능 개선함으로써 냉난방 최대부하를 저감함으로써 열원설비 등 제반 설비 투자비용 절약 가능

○ 구체축열 복사냉난방시스템 적용을 통한 덕트 스페이스 최소화로 건물의 층고 저감이 가능하여 사업성을 개선

다. 정책적 효과

○ 건물의 냉난방설비의 효율적 운전을 통한 전기수요 관리의 효율화

○ 신재생에너지 보급과 연계한 기술 적용 확대

○ 건물에너지 소비량 절감을 통한 건물분야 온실가스 배출량 저감에 기여

05

추가연구의 필요성



최 종 보 고 서

05 추가연구의 필요성

국내의 패시브 제로에너지 건축물 구현을 위해서는 구체축열 복사냉난방시스템을 국내 친환경 저에너지 건축물에 적용되는 요소기술로서 활용이 가능하며, 특히 해외 기술 도입이 아닌 국내 자체 개발 기술이라는 점에서 의의가 있다. 본 기술은 기존의 습식 슬래브가 아닌 PCM 물질이 혼입된 중공 슬래브 형태로서 기술의 차별화가 가능하다. 정부는 전문 기술인력 양성을 위한 교육 지원 등을 통해 본 기술의 원활한 시장 적용 및 활성화를 도모할 수 있고, 건물 에너지절약, 신재생에너지 보급 활성화를 위해서는 본 기술의 지속적인 성능평가 및 검증에 대한 후속 연구지원이 필요하다. 후속 연구 개발로 PCM 소재 및 구체축열시스템의 설계 기술을 확보하고, 실제 건물에 적용할 수 있도록 기술적인 연구를 지속적으로 수행할 것이며, PCM 재료 개발의 경우, 본 연구에서는 축열 성능을 확보한 혼화재료를 제작하여 이에 대한 원천 기술을 확보할 수 있으며, 추후 슬래브 외 벽 패널, 천정재 등 다양한 분야로의 활용방안에 대한 후속 연구 필요하다. 구체축열 복사냉난방시스템의 경우, 본 연구에서는 시제품을 제작하여 실제 현장에의 적용방안에 대한 기술력을 확보하였으며, 추후 본 시스템의 최적 제어방안, 성능 검증 등에 대한 후속 연구를 수행함으로서 시스템의 성능 향상을 도모할 수 있을 것으로 사료된다. 참여기업과 공동으로 실용화 및 사업화를 위한 후속 연구과제를 제안함으로써 향후 기술사업화를 위한 발판을 만들어 나가고자 한다.

참고문헌

1. 김수민 (2012), 한국그린빌딩협의회지, PCM을 이용한 에너지절약형 건축재료
2. 대한주택공사 (2008), 건축물에서의 축열 건자재의 개발 및 실용화
3. 안상민 (2011), 냉난방 에너지저감을 위한 상변화물질을 함유한 건축자재의 적용방법에 관한 연구, 연세대학교 석사학위논문
4. 오정익·이종성 (2009), Huri Focus, 기후변화대응 축열건자재의 개발동향
5. 윤재호·김종하 (2009), Machinery Industry, 상변화물질을 이용한 동파방지밸브 개발
6. 이화여자대학교산학협력단 (2013), "축열성능이 향상된 슬래브를 이용한 저에너지 복사냉난방시스템 개발" 연차보고서 - 국토교통부 국토교통과학기술진흥원 첨단도시개발사업
7. 임병찬 (2010), 건축환경설비, PCM의 건축물 적용 및 활용방안
8. 전명석 (2006), 한국태양에너지학회지, 상변화물질을 이용한 잠열축열기술
9. 정수관·전지수·서정기·김수민 (2011), 한국건축친환경설비학회논문집, 건축물에너지 저감을 위한 Phase change material(PCM) 적용에 대한 고찰
10. 한국건설기술연구원 (2011), 탄소저감형건설재료기술개발 기획보고서
11. 강지연, 김영근 (2011). 저탄소 중공슬래브 구조시스템 개발, SH공사 도시연구소 연구보고서.
12. 김범기, 석성준, 이웅균, 안성훈, 강경인 (2005). 초고층 주상복합 프리캐스트 구조물의 경제성 분석에 관한 연구, 한국건축시공학회 논문집 제 5권 1호, pp 89-96.
13. 송인환 (2009). 이방향 중공슬래브(Two-way void slab)시스템 소개, 롯데건설 기술 연구원 주간연구 보고서, pp 7-8.
14. 김상연, 윤영호, 이범식, 박광열 (2008). 국내외 프리캐스트 (PC) 주차장의 유형고찰과 표준설계모듈 제안, 대한주택공사 주택도시연구 논문집 HURI Focus 제 29호, pp 1-24.
15. 윤두환, 최봉수, 홍희기 (2006). PCM을 이용한 온돌패널의 실험 및 특성연구, 대한설비공학회 학술발표대회, pp. 122-125.
16. 조수, 손장열 (1992). 축열재이용온수난방의 난방공간 실내온도분포에 관한 연구, 대한건축학회 논문집 8권 4호, pp. 81-88.
17. 조수, 유제인, 정헌생 (1990). 잠열저장재를 이용한 온돌판넬의 축열 및 방열특성에 관한 연구, 태양에너지, 10권 2호, pp. 38-43.
18. 최주환 외(2000). 잠열재로 이용되는 PCM의 잠열과 비열측정법에 대한 고찰, 공기조화냉동공학회 학술발표대회 논문집, pp. 277-281.
19. 특허정보 검색 서비스 KIPRIS, www.kipris.or.kr, 특허청
20. 한국건설기술연구원(2011). 탄소저감형 건설재료 기술 기획보고서. 국토해양부 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신사업 .
21. BASF (2009), Micronal® PCM Intelligent Temperature Management for Buildings
22. Isabel Cerón, Javier Neila, Mohamed Khayet (2011), Energy and Buildings, Experimental tile with phase change materials (PCM) for building use
23. K. Roth (2007) ASHRAE Journal, PCM Technology for Building Materials
24. Celilia Castellon et al., Effect of microencapsulated phase change material in sandwich panels. Renewable Energy 35 (2010) pp. 2370-2374.
25. De Carli, M., Olesen, B.W. (2002). Field measurements of operative temperatures in

buildings heated or cooled by embedded water-based radiant systems, ASHRAE Transactions 108 PART 2, pp. 714-725.

26. Hunger, M., Entrop, A.G., Mandilaras, I., Brouwers, H.J.H., Founti, M.(2009). The behaviour of self-compacting concrete containing micro-encapsulated phase change material, 31, Cement and Concrete Composites, pp. 731-743.
27. Kuznik, F., Virgone, J.(2009). Experimental investigation of wallboard containing phase change material: data for validation of numerical modeling, 41 (5), Energy and Buildings, pp. 561-570.
28. Kuznik, F., Virgone, J.(2009). Experimental assessment of phase change material for wall building use , 86 (10), Applied Energy, pp. 2038-2046.
29. Lehmann, B., Dorer, V., Koschenz, M.(2007). Application range of thermally activated building systems tabs, 39 (5), Energy and Buildings, pp. 593-598.
30. Meierhans, R., Olesen, B.W.(2002). Art museum in Bregenz - soft HVAC for strong architecture, ASHRAE Transactions 108 PART 2, pp. 708-713.
31. Michal Pomianowiski, Per Heiselberg, Rasmus Lund Jensen(2011). Initial development of a combined PCM and TABS solutions for heat storage and cooling, Vol 1, pp. 483-490.
32. Schossig, P., Henning, H.-M., Gschwander, S., Haussmann, T.(2005). Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials, 89 (2-3), Solar Energy Materials and Solar Cells, pp. 297-306.
33. 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) pp. 136-142.
34. Tamon Ueda and Boonchai Stitmannaithum (1991). Shear Strength of Precast Prestressed Hollow Slabs with Concrete Topping, ACI Structural Journal, Vol. 88(4), pp. 402-410.
35. V.V. Tyagi et al., Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: A review. Renewable and Sustainable Energy Review 15 (2011) pp. 1373-1391.
36. Yibing Cai et al., Preparation, thermal and flammability properties of a novel form-stable phase change materials based on high density polyethylene/poly (ethylene-co-vinyl acetate)/organophilic montmorillonite nanocomposites/paraffin compounds. Energy Conversion and Management 49 (2008) pp. 2055 - 2062.
37. Y.P. Zhang et al. (2006), Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings. Energy and Buildings 38 pp. 1262-1269.