

19CTAP
-151980

보안 과제(), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개() 발간등록번호()
국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종보고서

R&D / 19CTAP-151980

냉방에너지 절감을 위한 하이브리드 천장복사냉방패널 시스템 개발

최종보고서

2020. 12. 31.

주관연구기관 / 부경대학교 산학협력단

2020

국토교통과학기술진흥원
국토교통부

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

냉방에너지 절감을 위한 하이브리드
천장복사냉방패널 시스템 개발 최종보고서

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘냉방에너지 절감을 위한 하이브리드 천장복사냉방패널 시스템 개발’ (연구개발 기간 : 2019.04.15 ~ 2020.12.31) 과제의 최종보고서를 제출합니다.

2021. 03. 03.

주관연구기관명 : 부경대학교 산학협력단 오 정 환 (인)



주관연구기관책임자: 이 규 남

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	19CTAP-C151980-01	해당 단계 연구 기간	2020.01.01.~ 2020.12.31	단계구분	2/2						
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업									
	세부사업명	기초원천									
연구과제명	대과제명										
	세부과제명	냉방에너지 절감을 위한 하이브리드 천장복사냉방패널 시스템 개발									
연구책임자	이 규 남	해당단계 참여연구원 수	총: 3명 내부: 3명 외부: 0명	해당단계 연구비	정부: 160,000천원 민간: 0천원 정부외: 0천원 상대국: 0천원 계: 160,000천원						
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 3명 내부: 3명 외부: 0명	총 연구비	정부: 280,000천원 민간: 0천원 정부외: 0천원 상대국: 0천원 계: 280,000천원						
연구기관명 및 소속 부서명	부경대학교 산학협력단			참여기업명							
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:							
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:							
※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음											
연구개발성과의 보안등급 및 사유	보안등급: 일반 / 건축환경설비 분야에 범용적으로 이용될 수 있는 기술에 대한 연구로서, 연구주관기관 자체 검토에 의해 일반 과제로 결정										
9대 성과 등록 · 기탁번호											
구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기 탁 번호											
국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설 · 장비 현황											
구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호			
요약 제로에너지 건축물의 공조 대안으로 검토되고 있는 복사냉방시스템의 성능을 개선하기 위한 연구로서, 기존의 복사냉방시스템이 다소 낮은 냉방용량과 높은 결로 위험으로 인해 적용에 한계가 있는 점을 감안하여, 냉방용량을 증대시킬 수 있는 하이브리드 천장복사냉방패널 (h-CRCP) 시스템을 제안하고 그 성능을 검증하였으며 주요 성과는 다음과 같음. - h-CRCP 시스템 성능평가 CFD 시뮬레이션 모델 개발 및 검증 - 기존 CRCP 시스템 대비 냉방용량 25% 증대 (92.5W/㎡→115.6W/㎡) - h-CRCP 시스템 적용 시 열쾌적성 PMV 0.19~0.38 확보 - 기존 CRCP 시스템 대비 냉방에너지 소비량 26.4% 절감 - h-CRCP 시스템 설계를 위한 기본 성능 데이터 및 가이드라인 도출 - SCI 논문 2편, KCI 논문 2편, 특허출원 1건, 학술발표 6편								보고서 면수 88			

요약문

연구의 목적 및 내용	본 연구는 제로에너지 건축물의 공조 대안으로 검토되고 있는 복사냉방시스템의 성능을 개선하기 위한 연구로서, 기존의 복사냉방시스템이 다소 낮은 냉방용량과 높은 결로 위험으로 인해 적용에 한계가 있는 점을 감안하여, 상대적으로 높은 온도의 냉수로도 냉방용량을 증대시킬 수 있는 하이브리드 천장복사냉방패널 (h-CRCP) 시스템을 제안하고 그 성능을 검증하는 것을 목표로 함 ○ h-CRCP 시스템 대안 개발 - 패시브형: 패널간 개구부를 통한 공기유동으로 냉방용량을 증대하는 방식 - 액티브형: 패널표면의 기류속도 증가를 통해 냉방용량을 증대하는 방식 ○ h-CRCP 시스템 성능 데이터 도출 - 시스템 대안 성능평가를 위한 Test-bed 구축 - 온열환경, 단위면적당 패널 냉방용량 및 에너지소비량 분석 ○ h-CRCP 시스템 설계 가이드라인 개발 - 여러 설계 조건에 대응한 h-CRCP 시스템 cooling curve 도출 - 천장패널, 기류확산 보조설비, 수배관 등 구성요소의 조합 방안				
연구개발성과	○ h-CRCP 시스템 성능평가 방법 구축 - h-CRCP 시스템의 온열환경 및 에너지 성능 평가 Test-bed - 다양한 설계조건에서 h-CRCP 시스템의 온열환경 및 냉방용량을 평가할 수 있는 CFD 모델 - 단일 CRCP 대상으로 기류속도의 냉방용량 영향 평가가 가능한 냉방용량 평가유닛 ○ h-CRCP 시스템의 성능 데이터 확보 - 기존 CRCP 시스템 대비 냉방용량 25% 증대 ($92.5\text{W}/\text{m}^2 \rightarrow 115.6\text{W}/\text{m}^2$) - h-CRCP 시스템 적용 시 열쾌적성 PMV 0.19~0.38 확보 - 기존 CRCP 시스템 대비 냉방에너지 소비량 26.4% 절감 ○ h-CRCP 시스템의 설계 가이드라인 도출 - 다양한 설계조건에서 냉방용량 선정을 위한 cooling curve 도출 - 시스템 설계시 고려사항 및 성능 개선 주안점 도출 ○ 정량적 성과 - SCI 논문 2편, KCI 논문 2편, 특허출원 1건, 학술발표 6편				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ 제로에너지 건축물의 에너지 절감을 위한 냉방시스템 대안 제시 - 냉방용량의 증가로 시스템 운전시간 감소를 통한 냉방에너지 절감 - 기존 시스템 대비 고온냉수 운전으로 열원효율 향상을 통한 에너지 절감 가능 ○ 복사냉방 시스템의 제어 성능 개선에 활용 - 기존 천장복사냉방패널 대비 높은 냉수온도로도 동일한 냉방성능 구현 가능 - 패널 표면에서의 결로방지 성능 향상 ○ 저비용 고효율의 냉방 설비대안으로 활용 - 패널 설치 면적 감소를 통한 초기투자비 저감효과 - 저비용으로 구입 및 설치 가능한 보조설비를 활용함으로써 저에너지 설비의 초기 투자 비용 저감 효과				
국문핵심어 (5개 이내)	천장복사냉방패널	개방형 설치	기류순환	냉방용량	냉방에너지
영문핵심어 (5개 이내)	Ceiling radiant cooling panel	Open-type installation	Air flow circulation	Cooling capacity	Cooling Energy

※ 국문으로 작성(영문 핵심어 제외)

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	1
2. 연구수행내용 및 성과	14
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	76
4. 연구개발성과의 활용 계획 등	82
붙임. 참고 문헌	86

<별첨> 주관연구기관의 자체 평가 의견서

1. 연구개발과제의 개요

가. 연구 개발의 개요

(1) 연구 개발 목표

- 복사냉방시스템은 기존의 전공기 공조방식에 비해 정숙성, 높은 쾌적성, 팬동력 및 냉방에너지 절감의 장점을 가져 제로 에너지 건축물 구현에 필수적인 요소로 주목받고 있으며, 그 중 천장에 설치되는 천장복사냉방패널(CRCP:Ceiling Radiant Cooling Panel) 시스템은 건축 디자인과의 통합, 모듈화 시공 등의 장점으로 다양한 상업건물에 적용되고 있음 ([그림 1] 참조)
- 이에 따라 국내에서도 LH공사 신사옥, 한전 신사옥 등 높은 수준의 에너지 절약 성능이 요구되는 공공기관 건물을 중심으로 천장복사냉방패널이 적용되고 있으나, 하절기의 고온 다습한 기후 특성으로 인해 결로 발생 위험이 상존하여 주로 냉수 온도 제어를 통해 결로 문제에 대응하고 있음
- 높은 온도의 냉수를 천장복사냉방패널에 공급할 경우, 결로 방지에는 효과적이거나 필연적으로 패널이 제거하는 열량, 즉 냉방용량이 감소하여 냉방부하를 효과적으로 처리하기에는 어려움이 있으므로 천장복사냉방패널 시스템의 확대 적용을 위해서는 패널의 냉방용량 증대 기술에 대한 연구 개발이 요구됨
- 따라서 본 연구에서는 기존의 복사냉방시스템이 다소 낮은 냉방용량과 높은 결로 위험으로 인해 적용에 한계가 있는 점을 감안하여, 패널표면의 기류속도 증가를 통해 냉방용량을 증대시킬 수 있는 하이브리드 천장복사냉방패널 시스템을 제안하고 그 성능을 검증하고자함([그림 2] 참조)



(a) 다양한 천장복사패널

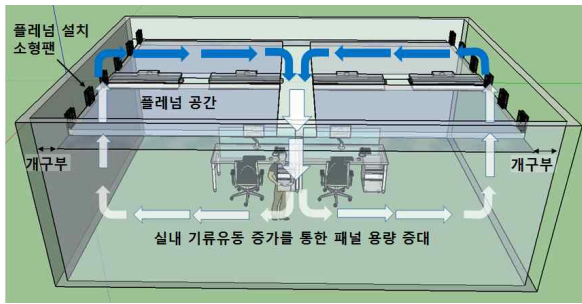


(b) 천장복사패널 설치

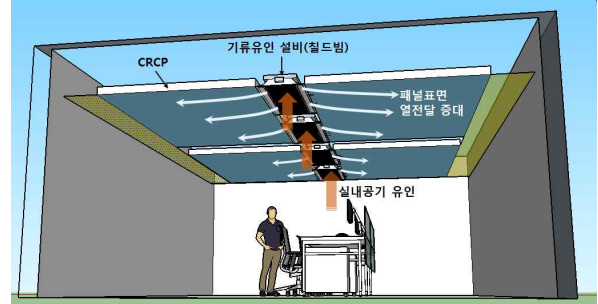


(c) 일반적인 설치유형

[그림 1] 천장복사냉방패널(CRCP)의 개념과 설치 형태



(a) 플레넘 팬 병용 CRCP



(b) 기류유인 보조설비 병용 CRCP

[그림 2] 제안하고자 하는 하이브리드 천장복사냉방패널 개념

□ 하이브리드 천장복사냉방패널 (h-CRCP) 시스템 개념 □

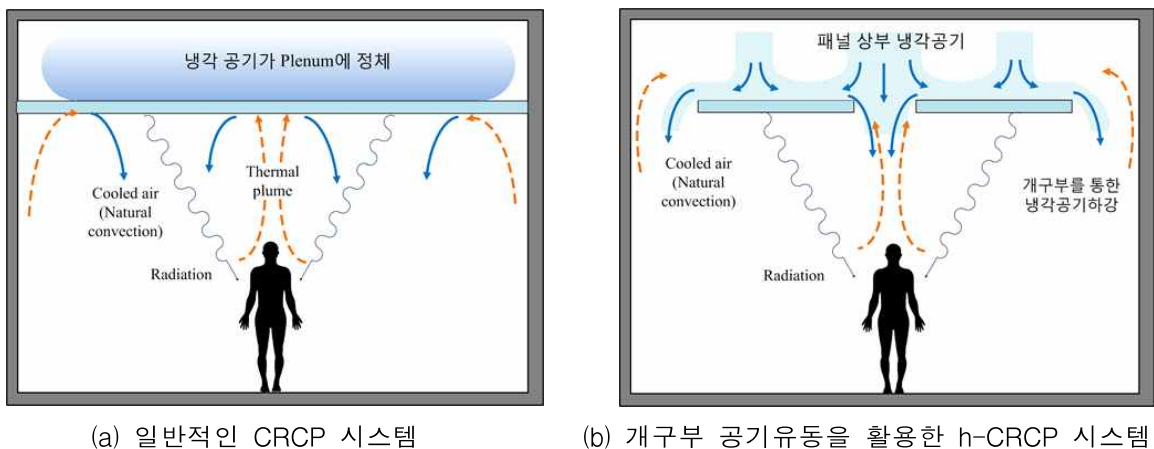
- 기존 CRCP (폐쇄형 CRCP)의 천장면 일부를 개구부로 치환하여, 개구부를 통한 플레넘 공기의 하강을 유도함으로써 거주역의 냉방을 촉진하되, 기류 유동을 활발하게 하기 위해 플레넘 공간에 소형팬을 설치하거나, 냉방패널 표면의 대류열전달을 촉진시키기 위해 실내기류순환장치(에어 서큘레이터) 또는 칠드빔 등의 기류유인 장치를 이용하는 복합적인 천장복사냉방패널 시스템을 의미.
- 기류 유동으로 인해 냉방용량이 증대되는 효과가 있어, 기존 CRCP 시스템에 비해 냉수 온도를 높게 유지할 수 있으므로 결로 방지 측면에서 시스템 운용의 폭이 늘어날 것으로 기대됨

<표 1> 연구 개발 목표

구분	내용 및 설정근거
최종 목표	복사냉방시스템의 냉방용량 증대와 에너지 절감을 위한 하이브리드 천장복사냉방패널 (h-CRCP) 시스템 제안 및 성능 검증
세부 목표	○ 하이브리드 천장복사냉방패널 시스템 대안 개발 - 패널간 개구부를 통한 자연적인 공기유동 또는 기류순환 장치를 활용한 기류 유도를 통해 냉방용량을 증대시키는 하이브리드 천장복사냉방패널 시스템 개발 ○ 하이브리드 천장복사냉방패널 시스템 성능 데이터 도출 - Test-bed 실증을 통한 온열 환경, 냉방용량 및 에너지소비량 데이터 ○ 하이브리드 천장복사냉방패널 시스템 설계 가이드라인 개발 - 냉방용량 확보를 위한 패널 면적, 배치 방안 및 시스템 구성요소 조합 방안

(2) 연구 개발 주요 내용

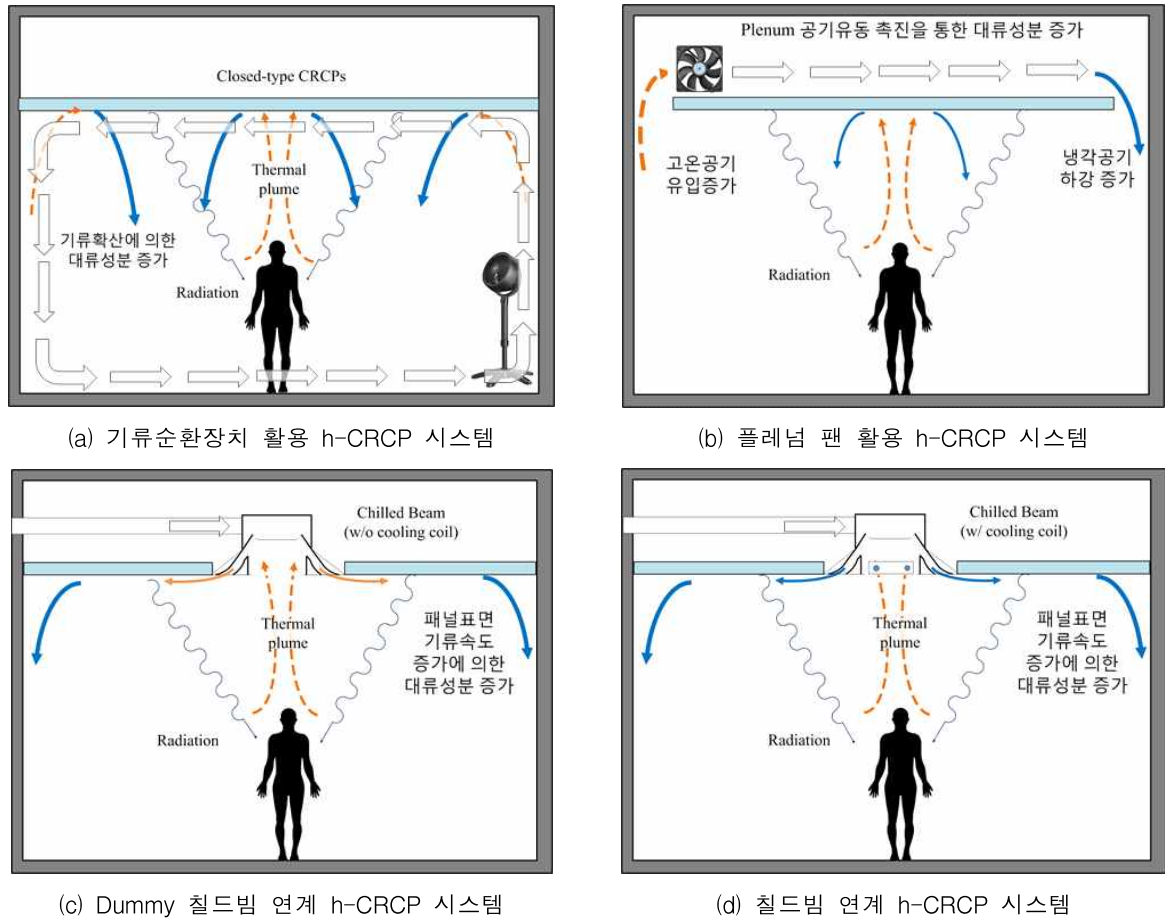
- 본 연구에서는 ‘하이브리드 천장복사냉방패널(Hybrid CRCP: 이하 h-CRCP) 시스템’의 대안 개발 및 성능 검증을 목표로 설정하였으며, 이의 달성을 위해 다음의 내용으로 연구 개발을 진행
- 하이브리드 천장복사냉방패널 시스템 대안 개발
 - 패시브형: 별도의 추가 설비 없이, CRCP 시스템을 구성하는 패널 사이의 개구부를 통한 공기유동으로 플레넘의 냉각공기를 거주역으로 하강시킴으로써 냉방용량을 증대하는 방식 ([그림 3] 참조)
 - 액티브형: CRCP 시스템이 설치된 공간의 기류순환을 촉진할 수 있는 별도의 설비(예: 실내에 설치되는 에어컨쿨레이터, 패널과 천장사이의 소형팬, 천장에 부착되는 기류유인장치)를 병용하여, 패널 표면에서의 대류열전달을 촉진시켜 냉방용량을 증대하는 방식 ([그림 4] 참조)



[그림 3] 기존 CRCP 시스템과 비교한 패시브형 h-CRCP 시스템 개념

- 하이브리드 천장복사냉방패널 시스템 설계 가이드라인 개발
 - 패시브형 h-CRCP의 경우, 패널 상부의 냉각 공기가 패널 간 개구부를 통해 하강하여 실내 발열을 흡수, 가열된 후 thermal plume의 형태로 다시 패널 간 개구부로 상승하여 일종의 순환기류를 이루면서 냉방부하를 제거하는 것이 기본 원리임
 - 실내공간 내의 부하 (재실자, 기기 등) 위치에 따라 thermal plume의 형성과 공기유동이 변화하므로, 내부 부하 특성을 고려한 패널과 개구부의 위치 선정 가이드라인 도출
 - 개구부 계획 시 공기유동이 증가하여 대류열전달량은 증가하나, 패널 표면적 감소로 복사열전달량은 감소할 수 있으므로, 총냉방용량을 최대화할 수 있는 패널 면적 산출 가이드라인 도출
 - 액티브형 h-CRCP의 경우, 별도의 기류순환용 설비를 활용하여 패널 상부 또는 하부 표면의 공기유동을 촉진, 대류열전달 성분을 증가시킴으로써 냉방용량을 증대시키는 것이 기본 원리임

- 이러한 용도의 설비로는 저가 고효율의 기류순환 장비로 널리 활용되고 있는 에어서큘레이터, 플레넘과 같이 협소한 공간에 설치될 수 있는 소형팬, 실내공기의 유인에 적합한 칠드빔을 들 수 있으며, CRCP와 결합할 경우 각 구성요소의 용량 결정이나 설치 위치 선정 가이드라인을 개발하고자 함



[그림 4] 액티브형 h-CRCP 시스템 개념

○ 하이브리드 천장복사패널 시스템 성능 데이터 도출

- 냉방부하를 재현할 수 있는 Test-bed를 구축하고, 실제 CRCP 대안을 설치하여 냉방 용량, 실내온열환경, 에너지 소비량을 측정
- 제안된 h-CRCP 시스템의 설계변수 (패널 및 개구부 면적, 기류순환 보조 설비 위치 및 풍량 등) 조절에 따른 기류 분포와 온열환경은 전산유체역학(CFD)으로 분석하되, CFD 모델의 타당성은 Test-bed의 측정결과와 비교하여 검증
- Test-bed 실험과 CFD 분석을 통해, h-CRCP 시스템의 패널 단위면적당 냉방용량, 온 열환경 수준, 에너지 소비량을 기존의 천장복사냉방패널 시스템과 비교한 데이터 제시

(3) 연구 개발 대상 용도 및 적용 분야

- 본 연구의 개발 대상은 상업건물, 특히 내부발열 부하가 큰 사무소 건물의 냉방 용도로 활용될 수 있음
- 최근 건축 의장적인 측면에서 천장면을 전부 덮지 않고, 슬래브 하부가 노출되도록 마감하는 개방형 천장이 설계에 반영되고 있음을 감안할 때, 건축 디자인과 조화된 설비대안으로서도 제시될 수 있음
- 기존 복사냉방시스템보다 상대적으로 높은 냉수온도로 냉방용량 확보가 가능하므로, 열원효율 증가, 신재생에너지 열원(지열히트펌프 등)과의 연계 가능성 등 장점이 있어 제로 에너지 건축물의 냉방시스템으로 적극 활용 가능함

나. 연구 개발 대상의 국내·외 현황

(1) 국내·외 기술 현황

○ 국내 복사냉방시스템 기술 현황

- 국내의 경우 주로 주거건물의 난방용도로 복사난방시스템이 널리 활용되어 오다가, 1990년대 후반부터 복사냉방에 대한 연구가 시작되어 기존의 복사난방과 통합된 복사냉난방시스템이 도입되었는데 이는 바닥에 매설된 온수온돌배관을 이용한 방식으로 볼 수 있음
- 최근 전세계적으로 복사냉난방 시스템이 에너지 절약적인 공조 대안으로 각광받고 있는 추세에 따라, 국내에서도 이화여대 ECC, 서울시 제로에너지하우스, 포스코건설 그린빌딩, 코오롱 글로벌 E+ 주택 홍보관, 진주 LH 신사옥, 나주 한전 신사옥에 복사냉방 시스템이 적용되는 등 점차 저변이 확장되고 있음
- 복사냉방 시스템은 주로 상업건물 위주로 적용되고 있으며, 복사열교환 및 냉방효율성을 극대화하기 위해 천장면을 복사면으로 활용하고, 일반적인 천장재인 흡음텍스로 마감할 경우 열교환 성능이 저하되는 것을 감안하여 금속재질의 천장복사패널(CRCP)을 주로 적용

○ 국내 연구 개발 현황

- 거의 모든 주거에 온돌난방이 적용되는 점을 감안하여, 바닥 표면 및 슬래브 구조체를 이용한 복사냉난방 시스템의 설계 및 제어, 쾌적성 및 에너지 성능평가에 대한 연구 개발이 폭넓게 수행됨
- 본 연구의 대상인 천장복사패널 시스템의 성능개선에 대한 연구 개발은 바닥복사냉방시스템에 비해 상대적으로 미비한 것으로 보여지나, 천장복사패널의 냉방용량 평가(유승호와 조수, 2005; 안민철 외 2013; 박상훈 외 2014), 천장복사냉방 공간의 온열쾌적성 평가(이주연 2008) 등의 연구를 통해 천장복사냉방시스템의 타당성이 입증된 바 있음

- 최근 천장복사냉방패널 사이에 개구부를 둘 경우, 즉 개방형 설치(open-type installation)의 경우 패널 상부 플레넘과 패널 하부 거주역과의 기류혼합으로 인해 냉방용량이 증대되는 것에 대한 연구(신미수 2016; Shin et al., 2019)가 수행되었으나, 자연대류의 영향 위주로 분석되었으며 냉방 에너지 측면의 분석은 이루어지지 않은 한계가 있음

○ 국외 복사냉방시스템 기술 현황

- 1970년 이후 북미와 유럽 중심으로 복사난방 뿐 아니라 복사냉방시스템이 적용되기 시작하여, 2000년 이후로는 중국, 일본 등의 아시아 지역에도 적용되기 시작하였으며 특히 고온 다습한 열대 지역(태국, 싱가포르, 인도)까지도 복사냉방 시스템이 확산됨 (Rhee and Kim, 2015)
- 유럽의 경우 구조체 자체를 냉각시키는 CCA(Concrete Core Activation) 또는 TABS(Thermally Activated Building System)이 업무시설, 전시시설, 교육시설 등에 다양하게 적용되고 있으며, 북미의 경우 금속재의 패널을 이용한 CRCP 시스템이 많이 적용되고 있음
- 또한 통상적으로 플레넘 공간에 설치되는 덕트, 배관 등의 공조설비를 그대로 노출시키는 건축 트렌드에 따라, CRCP를 천장면 일부에만 설치하거나 일종의 오브제 형태로 CRCP를 설치하는 경우도 증가하고 있어, 이러한 개방형 설치의 경우 CRCP의 냉방용량 평가 방법이나 설계 프로세스에 대한 정립이 요구되는 상황임

○ 국외 복사냉방시스템 연구 개발 현황

- 유럽의 REHVA, DTU(Technical University of Denmark), 북미의 ASHRAE 및 CBE(Center for the Built Environment) 연구소 중심으로 복사냉방 시스템의 여러 유형에 대한 수치해석, 열쾌적평가, 에너지 분석, 제로 에너지 건축물 적용 연구가 수행되고 있음
- 그 중 복사냉방시스템에 대한 연구는 해석 모델이나 쾌적성 이슈 이외에, 외기도입 및 잠열부하 처리를 위한 외기전담 공조(Jeong et al 2003; Dieckmann et al 2004), 치환환기와의 결합(Hao et al., 2007) 등 실제 건물 적용을 위한 고려사항에 대한 연구가 많이 수행됨
- 본 연구의 대상과 관련있는 천장복사냉방패널 시스템의 냉방용량 관련 연구로는, 기계환기와 결합을 통한 냉방용량 증가(Jeong and Mumma 2003), 배관 레이아웃 변경을 통한 냉방용량 증가(Okamoto et al., 2010), 노즐형 디퓨저와의 결합을 통한 냉방용량 증가(Noveselac et al., 2006) 패널표면의 공기층 적용에 의한 냉방용량 증가(Ning et al., 2016), 천장판 기류유도에 의한 냉방용량 증가(Karmann et al., 2017) 방안에 대한 연구가 수행된 바 있음
- CRCP 시스템의 용량증대에 대한 연구는 대부분 기류속도 증대를 통한 열전달 촉진을 중심으로 이루어졌으나, 어떠한 기류속도 증대 방식이 CRCP 시스템에 가장 적합한지는 규명된 바 없으며, 또한 실내 온열환경의 분포나 냉방 에너지 측면의 검토는 미비하다고 판단됨

- 따라서 본 연구에서는 CRCP 표면에서의 기류속도 증대가 가능한 여러 대안을 추출하고, 각 대안별로 냉방용량, 온열환경, 에너지 소비량을 비교 분석하여 건물의 조건에 가장 적합한 하이브리드형 CRCP 시스템을 제안하고자 함

(2) 국내·외 시장 현황

○ 시장 규모

- 2020년 기준 복사냉난방시장의 전세계적인 규모를 약 16조4,000억원으로 예측하고 있으며 (Frost & Sullivan Report 2010), 2014년 기준 465억달러였던 시장규모는 2015년부터 2020년까지 매년 평균 8.7% 성장할 것으로 전망
- 최근 전망에 의하면 2018-2022년 전세계 복사냉난방 시스템 시장은 연평균 7.14% 증가할 것으로 예상되며, 이 기간 중 USD 1.63 billion 만큼의 규모 확대가 있을 것으로 기대(Technavio 2018)
- 상기 전망치는 복사냉난방 시스템 전체를 대상으로 하므로 CRCP 시스템의 시장규모는 이보다 적을 것이나, 최근 구조경량화, 건축 디자인과의 조화 측면에서 CRCP 시스템의 적용이 증가하고 있는 추세를 고려하면, h-CRCP의 성공적인 개발로 인한 시장 파급효과는 매우 높을 것으로 예상



[그림 5] 복사냉난방시스템 시장 전망 (Technavio, 2018)

○ 주요 업체

- 전세계적으로 복사냉난방 시스템 시장의 규모가 지속적으로 증가함에 따라, Uponor, REHAU, TROX, Lindner, Zehnder, Velta사 등 많은 글로벌 기업이 새로운 유형의 CRCP 개발, 시스템 엔지니어링을 수행하고 있음
- 국내의 경우 Uponor, Lindner 와 같은 글로벌 기업의 지사가 설립되어 CRCP 솔루션을 보급 중에 있으며, 국내 기업 (에코에너지, 유창 등) 또한 국내 여건에 적합한 CRCP 시스템을 개발, 보급하고 있으나 시장은 성숙기 이전의 초기단계로 판단됨
- 복사냉난방 시스템의 특성 상 터미널인 패널 뿐 아니라, 센서, 제어기, 분배시스템, 열원 등을 통합 솔루션으로 제공하려는 움직임이 활발함

(3) 관련 지식재산권 및 표준화 현황

○ 관련 지식재산권 현황

- 복사냉방패널에 대한 특허 조사 결과, 대부분 천장면 전체를 패널로 덮는 폐쇄형 냉방패널에 대한 특허가 출원됨
- 복사냉방 시스템은 현열부하만 제거하므로, 잠열부하나 환기 목적의 설비와 복사패널을 결합한 특허도 출원된 바 있으나, 복사패널의 냉방용량 증대 방법을 초점으로 출원된 특허는 없는 것으로 사료됨

<표 2> 복사냉방패널 관련 특허 등록 현황

특허명	등록번호 (일자)	출원인	주요내용
냉난방용 복사패널	1015175890000 (2015.04.28)	서울대학교 산학협력단	천장설치 냉난방 패널 모듈
복사패널을 갖는 공기조화장치	1009805430000 (2010.08.31)	엘지전자	에어컨과 복사패널의 교번 운전
시트와 이격재가 구비된 냉난방 복사 패널	1013323800000 (2013.11.18)	서울대학교 산학협력단, 세라그린	복사냉난방패널 시공성 및 열전달 성능 향상
복사 냉난방 시스템 및 그 시공방법	1010786050000 (2011.10.26)	(주)샘시스템	천장/벽체복사패널, 열원, 제어기의 시공방법
하이브리드 방열패널	2004758930000 (2015.01.05)	경동나비엔	방열핀과 슬릿을 이용한 천장패널의 방열량 향상
국소복사냉방장치	1007002200000 (2007.03.20)	(주)삼화에이스	벽면에 설치되는 직팽식 냉방패널
디퓨저 일체형 천정복사장치	1013904500000 (2014.04.23)	윤인거	디퓨저-패널이 일체화된 복사냉방장치
직렬연결형 전수식 냉난방 시스템	1006922690000 (2007.03.02)	코오롱글로벌	FCU-복사시스템의 직렬연결을 통한 냉난방
복사 냉난방 기능 및 국부 배기 기능을 가진 경량 콘크리트 패널 및 이를 이용한 벽체구조	1010816690000 (2011.11.02)	대림산업	냉난방을 위한 경량콘크리트 패널과 환기용 벽체 구조

○ 표준화 현황

- EN 15377(현재는 ISO11855로 대체)을 모체로, EN 1240, ISO 11855 등 복사냉난방 시스템에 대한 설계, 제어, 용량시험 등의 국제기준이 제정되었으며, 최근에는 천장복사냉방패널의 용량시험에 대한 국제기준인 ISO 18566이 제정 중에 있음
- 복사냉방시스템의 적용확산을 위해 설계 및 제어 관련 기술을 포괄한 핸드북 (ASHRAE Handbook System and Equipment (ASHRAE 2016), REHVA Guidebook (Babiak et al., 2009)을 개발, 보급
- 국내의 경우 경량복사난방시스템에 대한 기준 (KS F 2912)이 제정된 바 있으나, 천장 복사냉방패널 시스템에 대한 자체적인 표준은 제정되지 않은 상태임. 다만 복사냉난

방 시스템에 대한 ISO 기준을 국내실정에 맞게 부합화하는 방향으로 표준화 제정이 이루어지고 있음

- 국내외 표준화 현황 조사 결과, 전통적인 폐쇄형 천장복사패널에 대한 국제 표준은 제정되어 있으나([그림 6] 참조), 개방형 CRCP 시스템 또는 기류확산 설비와 연계된 CRCP에 대한 표준은 제정되지 않은 상태로 판단됨

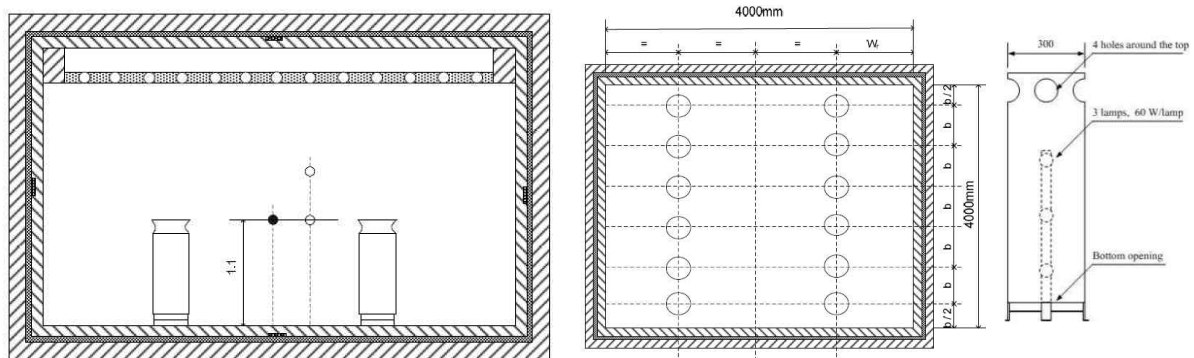
<표 3> 복사냉방시스템 관련 표준 현황

Standard	Title	Scope		
		ESS	TABS	PS
ISO 11855	Design, dimensioning, installation and control of embedded radiant heating and cooling systems	●	●	
EN 1264	Water based surface embedded heating and cooling systems	●		
EN 15377	Design of embedded water based surface heating and cooling systems	●		
EN 14240	Ventilation for buildings - Chilled ceilings - Testing and rating			●
ANSI/ASHRAE 138	Method of Testing for Rating Ceiling Panels for Sensible Heating and Cooling			●
ISO 18566	Design, test methods and control of hydronic radiant heating and cooling panel systems			●

ESS: Embedded Surface System

TABS: Thermally Activated Building System

PS: Panel system (e.g. CRCP)



(a) 패널 냉방용량 측정 개념

(b) 냉방부하 재현을 위한 Dummy

[그림 6] EN14240 천장복사냉방패널 냉방용량 측정 방법 (CEN, 2004)

(4) 기존 상용화 제품과의 차별성

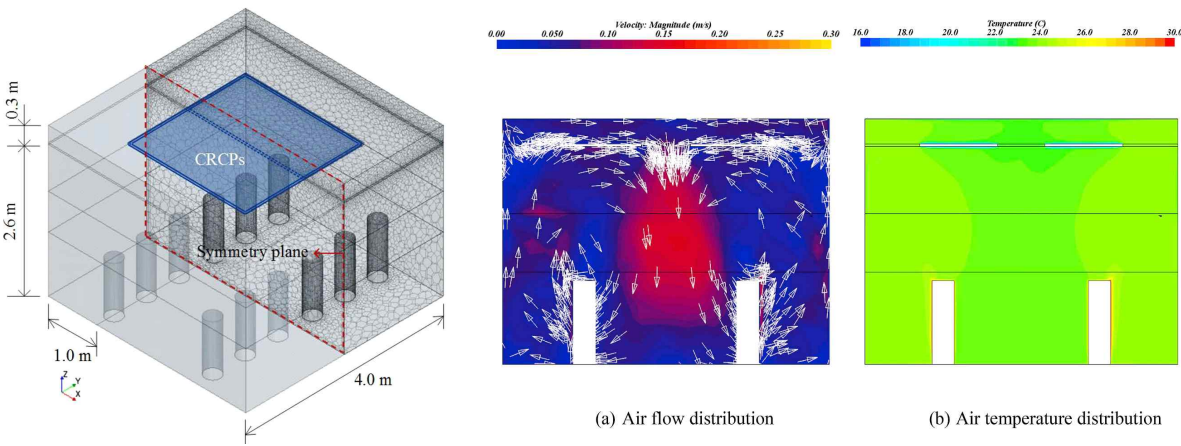
<표 4> 기존 상용화 제품과의 차별성

기존 상용화 제품		본 연구의 차별성
냉방패널을 천장 전체에 걸쳐 폐쇄형으로 설치함으로써, 플레넘 공기의 활용도 저하	▷	냉방패널로 덮인 천장면 일부를 개구부로 처리하여 플레넘 공기의 거주역으로의 하강 유도
냉방패널 단독으로 현열부하를 처리하기 위해, 낮은 냉수온도로 운전되어 결로 위험 증가	▷	냉방패널 고유의 냉각능력과 플레넘 공기의 냉각효과를 이용하여 냉방용량을 증대시킴으로, 다소 높은 냉수온도에서도 냉방용량이 확보되어 결로 방지에 유리
냉방패널과 Parallel 시스템과의 병용도 이루어지고 있으나, 대부분 환기 및 잠열부하 처리를 위한 DOAS(Dedicated Outdoor Air System)와의 결합 위주	▷	냉방패널의 냉방용량 증대 측면에서 Parallel 시스템의 효과를 분석하며, 칠드빔/기류순환 팬 등과 연계된 하이브리드 시스템 제안

(5) 기존 연구와의 차별성

○ Shin et al. (2019)

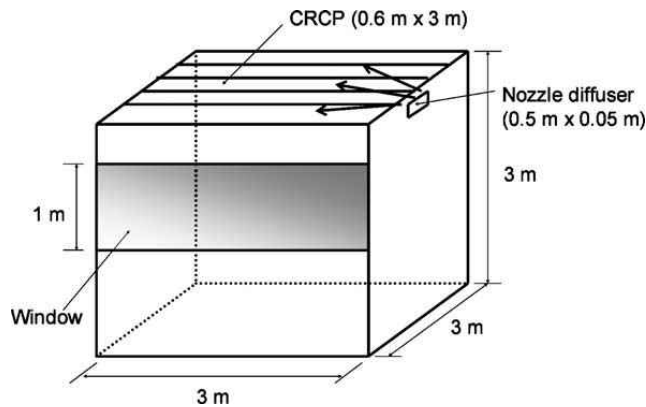
- 개방형 CRCP의 냉방용량은 개구부의 면적과 배치에 따라 폐쇄형 CRCP에 비해 54~80% 증대될 수 있음을 수치해석을 통해 규명
- 개구부를 통한 플레넘 공기의 자연적인 하강, 즉 자연대류 효과만을 이용하여 냉방용량 증대 가능성을 검증한 연구로 본 과제에서는 자연대류 외에 강제대류에 의한 냉방용량 증대효과도 검토



[그림 7] Shin et al.(2019)의 개방형 CRCP 해석 모델

○ Jeong and Mumma (2003)

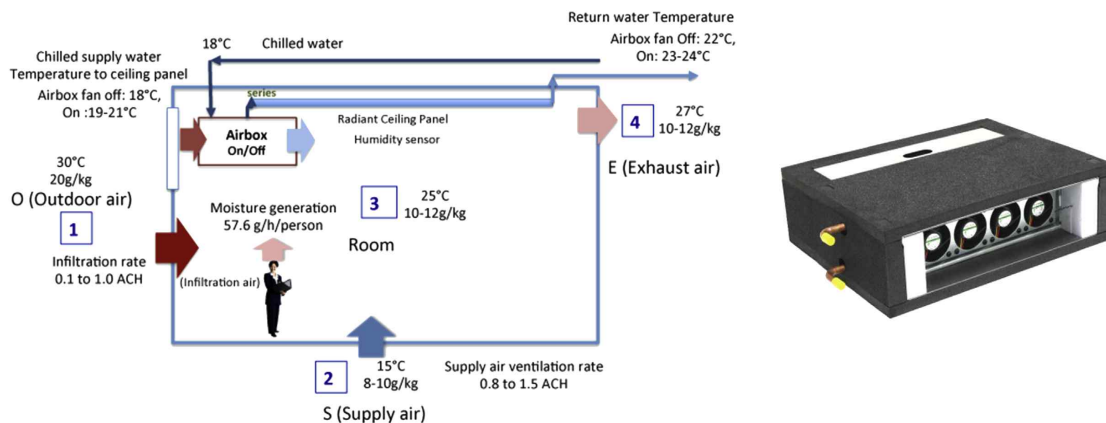
- CRCP에 기계환기 장치를 결합하여 자연대류와 강제대류의 효과를 모두 적용할 경우 냉방용량이 5~35% 증가함을 규명
- 기계환기 장치에서 패널표면으로 기류를 불어 넣어주기 위해 노즐 디퓨저를 사용하였으며, 본 과제에서는 별도의 HVAC 시스템 없이 저비용으로 패널 표면의 기류를 촉진시킬 수 있는 에어 서큘레이터와 소형 팬의 적용 효과도 검토



[그림 8] Jeong and Mumma의 CRCP 모델

○ Kim and Leibundgut (2014)

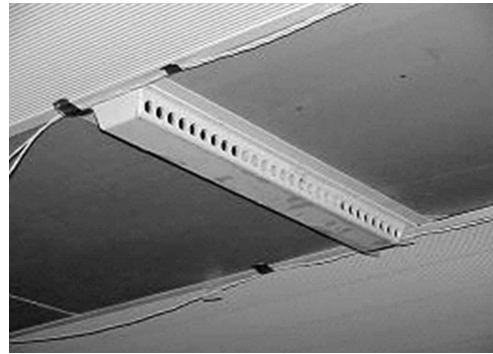
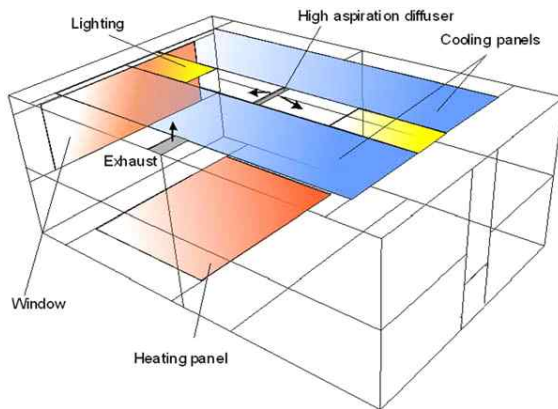
- CRCP 표면에 기류를 형성시키기 위해 자체 제작한 airbox convector를 이용하여, 실내 공기를 한번 냉각시킨 후 패널 표면으로 기류를 공급함으로써 냉방용량이 32% 증가함을 규명
- Airbox convector에서 취출되는 공기의 온도가 실내공기보다 낮게 되는 non-isothermal 기류를 활용한 연구로, 본 연구에서는 주로 실내공기의 재순환하여 실내공기와 같은 온도의 기류를 패널표면에서 형성하는 대안에 대해 검토하고자 함



[그림 9] Kim and Leibundgut의 CRCP 모델 및 airbox convector

○ Novoselac et al. (2006)

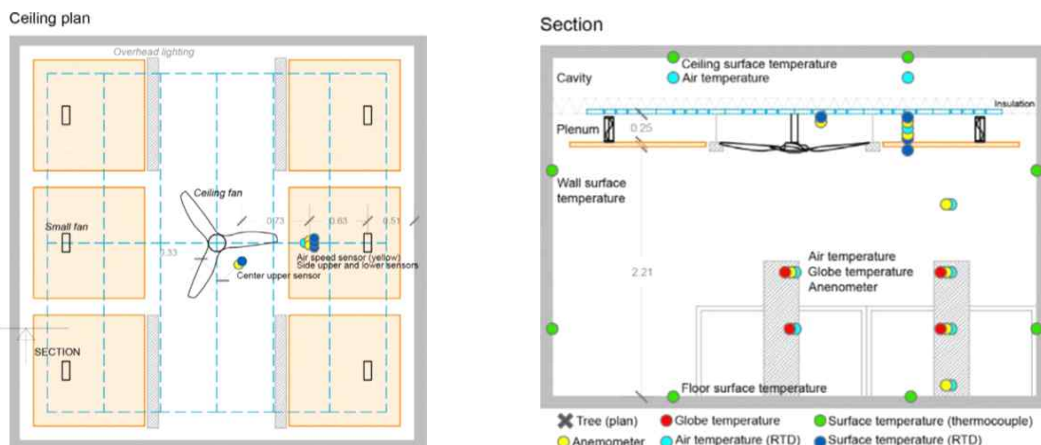
- 유인비가 높은 노즐 디퓨저로 CRCP 표면에 강한 기류를 형성시켜 패널 표면의 열전달계수가 4~17% 증가함을 규명
- 공조기에서 만들어진 공기를 패널표면에 가깝게 불어주기 위해 여러개의 작은 노즐이 뚫려있는 별도의 디퓨저를 제작하여 활용한 연구로, 본 과제에서는 별도의 HVAC 시스템 없이 저비용으로 패널 표면의 기류를 촉진시킬 수 있는 에어 서클레이터와 소형 팬의 적용 효과도 검토
- 또한 본 과제에서는 high-aspiration diffuser와 유사한 기능을 담당할 수 있는 설비형 칠드빔으로 패널 표면의 열전달계수를 증대시키고자 함



[그림 10] Novoselac et al. 의 CRCP 모델 및 high-aspiration diffuser

○ Karmann et al. (2018)

- 천장슬래브에 설치된 구체축열시스템(TABS:Thermally Activated Building System) 하부에 흡음패널을 설치하고, TABS와 흡음패널사이에 소형 DC 팬을, 흡음패널과 흡음패널 사이에 ceiling fan을 설치하여 TABS 표면의 열전달계수를 증가시키려고 하였으며 최대 26%까지 냉방용량이 증가함을 실험적으로 규명
- 이 연구는 CRCP가 아닌 슬래브 구조체 자체를 냉각시키는 TABS 대상의 연구로, 본 과제에서는 CRCP가 천장과 거주역을 분리하여 플레넘을 형성하는 공간을 대상으로 냉방성능을 검토하고자 함



[그림 11] Karmann et al.의 TABS 모델

○ 기존연구와의 비교 요약

- 개방형 CRCP에서 개구부를 통한 플레넘 공기의 하강(자연대류 효과)을 활용하는 passive적인 대안과 함께, 별도의 공조설비의 추가 없이 저비용의 에어 서클레이터와 플레넘 팬(강제대류 효과)을 이용하는 active적인 대안을 병용
- 또한 외기 도입이나 잠열부하 처리를 위해 air system이 필요할 경우를 감안하여, 1차 처리된 외기를 패널표면에 균일하게 공급하여 열전달을 촉진시키는 목적을 위해 설비형 칠드빔을 병용하는 active 대안도 추가적으로 검토

<표 5> 기존 연구와의 차별성 요약

냉방용량 증대 관련 연구	냉방용량 증대 원리	기류 특성
Shin et al. (2019)	Natural convection by opening area	Isothermal ⁽¹⁾
Jeong & Mumma (2003)	Forced convection by nozzle diffuser	Isothermal
Kim & Leibundgut (2014)	Forced convection by air convector	Non-isothermal ⁽²⁾
Novoselac et al. (2006)	Forced convection by nozzle diffuser	Isothermal
Karmann et al. (2018)	Forced convection by ceiling fan	Isothermal
Karmann et al. (2018)	Forced convection by small DC fans	Isothermal
본 과제	Natural convection by opening area	Isothermal
	Forced convection by air circulator, plenum fan, active chilled beam	Isothermal

(1) Isothermal: 패널표면에 흐르는 기류의 온도가 실내온도와 동일 (실내공기 재순환)

(2) Non-isothermal: 패널표면에 흐르는 기류의 온도가 실내온도보다 낮음 (실내공기를 별도로 냉각하여 공급)

2. 연구수행내용 및 성과

가. 연구수행 전략

(1) 연구수행 체계

연구개발과제		총 참여 연구원
과제명	냉방에너지 절감을 위한 하이브리드 천장복사냉방패널 시스템 개발	주관연구책임자 이규남 외 총 3명
기관별 참여 현황		
구분	연구기관수	참여연구원수
대학	1	3
주관연구기관명		
냉방에너지 절감을 위한 하이브리드 천장복사냉방패널 시스템 개발		
이규남 외 2명		
담당기술개발내용		
○ 하이브리드 천장복사냉방패널 (h-CRCP) 시스템 대안 개발 - 패시브형 h-CRCP (자연대류 이용 CRCP 시스템) - 액티브형 h-CRCP (기류확산 보조설비 병용 CRCP 시스템) ○ 하이브리드 천장복사패널 시스템 성능 데이터 도출 - h-CRCP 성능평가를 위한 Test-bed 구축 - 온열환경, 패널 냉방용량 및 에너지소비량 분석 ○ 하이브리드 천장복사냉방패널 시스템 설계 가이드라인 개발 - 천장복사냉방패널 설계를 위한 cooling curve 도출 - 천장패널 및 보조 설비 등 구성요소의 조합 방안 도출		

(2) 주요 내용 및 추진 일정

구분	년도	세부 연구목표	세부 연구개발 내용	평가목표 및 착안점	가중치 (연구비)	추진일정			
						1분기 (1/4)	2분기 (2/4)	3분기 (3/4)	4분기 (4/4)
1차 년도	2019	하이브리드 천장복사냉방 패널 (h-CRCP) 시스템의 개념 및 성능 평가 방법 정립	시스템 Matrix 도출	CRCP+보조설비 조합의 구현 가능성 검토	5%				
			성능평가Test-bed 구축	냉방부하제현, 패널제거열량 측정이 가능	10%				
			해석 모델 구축	CRCP 유형에 따른 기류확산,열쾌적평가가 가능	5%				
		패시브형 h-CRCP 시스템 성능 평가	기존 CRCP 성능평가	패널에 의한 제거열량 측정	10%				
			개방형 CRCP 성능평가	패널에 의한 제거열량 측정	15%				
2차 년도	2020	액티브형 h-CRCP 시스템 성능 평가	Test-bed 보완	패널제거열량, 설비에너지소비량 측정이 가능	10%				
			기류순환보조 설비 병용시 CRCP 성능평가	에어서큐레이터, 플레넘팬, 칠드빔 적용가능성	30%				
		h-CRCP 성능 데이터 구축 및 설계 가이드라인 도출	냉방성능 데이터 도출	EN14240 기반 cooling curve 도출	10%				
			설계고려사항 정리	h-CRCP 설계기본 프로세스,차별점 도출	5%				

(3) 주요 연구 개발 방법론

(가) CRCP 성능평가 Test-bed 구축

○ 냉방부하 재현

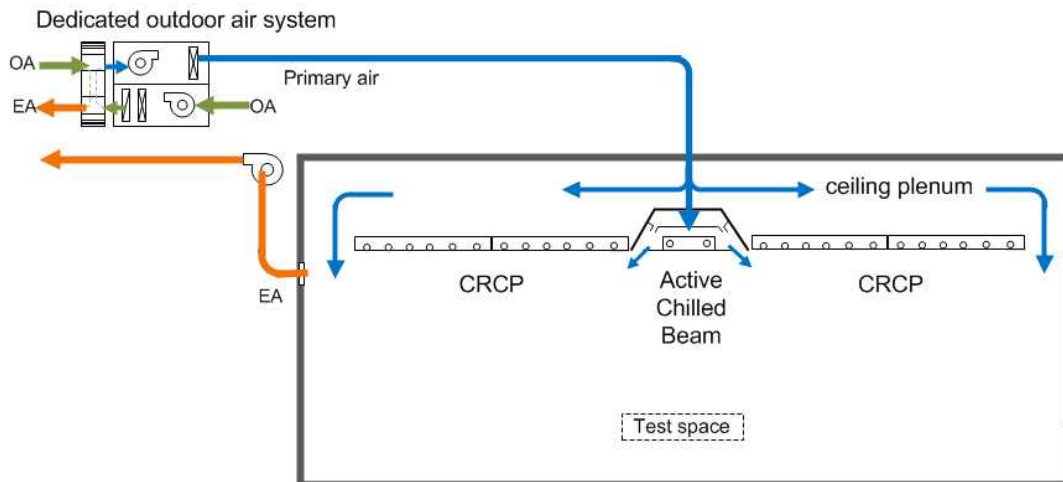
- 불확도 최소화를 위해 외부 부하요소는 제거(실내환경 챔버 외부로 일정온도로 유지)
- 내부부하 요소 재현을 위해 EN 14240의 cooling load simulator (발열체) 제작
- 냉방부하는 $150\text{W}/\text{m}^2$ 까지 재현하되, 발열체 활성화 개수 또는 투입 전력을 조절

○ CRCP 설치

- 폐쇄형, 개방형의 선택적 실험이 가능하도록 냉방패널 모듈 크기와 배치 조절
- Perimeter 부위는 Dummy 패널로 마감하고 개방형 실험시 탈거
- 칠드빔 설치가 가능하도록 주변부 또는 중심부 패널의 수배관은 별도로 계획

○ 기류확산 보조설비 설치

- 플레넘 팬: 소형 DC fan 적용
- 칠드빔: 냉각코일이 내장된 칠드빔을 설치하되, 냉수를 공급하지 않는 경우와 공급하는 경우로 나누어 실험이 가능하도록 함.



[그림 12] DOAS+칠드빔 연계형 패키지 시스템 개념

(나) 온열환경 평가

○ Test-bed 측정을 통한 평가

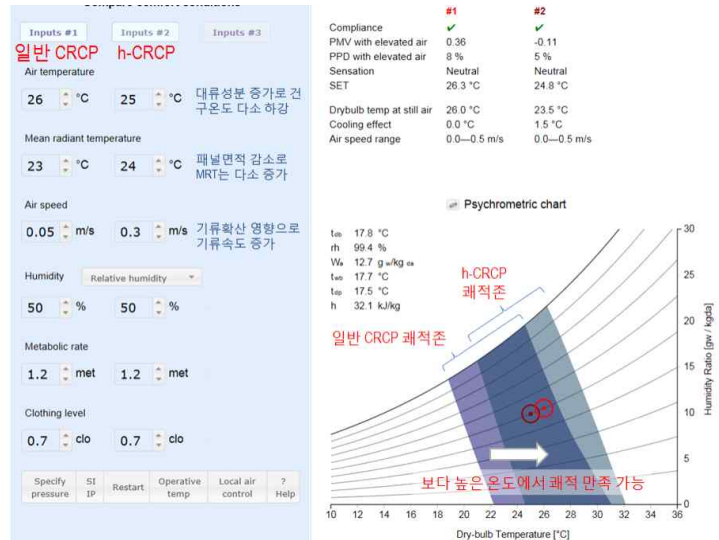
- PMV : 측정장비 (Testo 480) 이용 실내 대표 지점에서 측정
- ISO 7730의 PMV Category에 따라 쾌적 수준 평가

<표 6> ISO 7730 comfort criteria

Category	General comfort		Local discomfort			
	PPD[%]	PMV	DR[%]	PD [%]		
				수직온도차	바닥표면온도	불균등복사
A	<6	-0.2~+0.2	<10	<3	<10	<5
B	<10	-0.5~+0.5	<20	<5	<10	<5
C	<15	-0.7~+0.7	<30	<10	<15	<10

○ CFD 해석을 통한 평가

- PMV : CFD 해석결과로 산출된 건구온도, MRT, 기류속도 이용, 실 대표지점 대상으로 평가
- 기류속도 변화에 따른 comfort zone의 변화를 쾌적평가에 고려
- ASHRAE Standard 55 Graphical Method 및 이를 구현한 CBE Comfort Tool 활용



[그림 13] CBE comfort tool을 활용한 열쾌적 평가 일례

(다) 냉방용량 및 에너지 성능 평가

○ 냉방용량 평가

- EN 14240 기준 준용 실내온도, 냉수공급온도, 냉방부하 등 경계조건 설정
- $\Delta \theta$ (냉수평균온도와 실내작용온도차)에 따른 water-side 측 제거열량으로 냉방용량 산출
- 패널표면온도 및 실내온도에 따른 냉방용량을 산출하여 여러 설계조건에서 냉방용량 결정에 활용할 수 있는 Cooling curve 도출

○ 에너지 성능 평가

- 동일한 냉방부하 및 실내 작용온도 유지 조건하에서 시스템 대안별 냉방에너지 소비량 측정
- 냉방부하: Cooling load simulator 투입 전력량 측정
- 냉방에너지: CRCP 소비 에너지 (냉열원, 순환펌프 소비 전력), 기류확산 보조설비 소비 에너지 측정

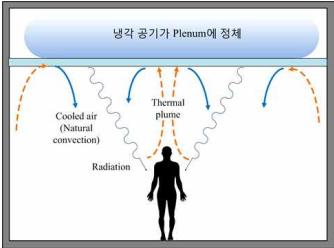
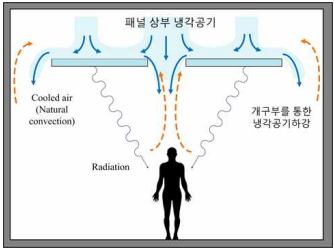
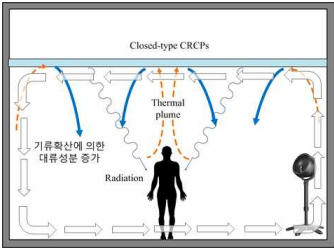
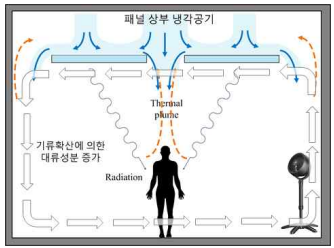
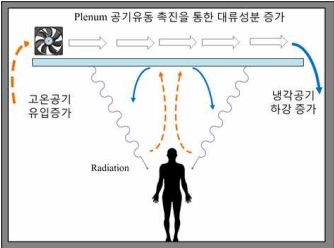
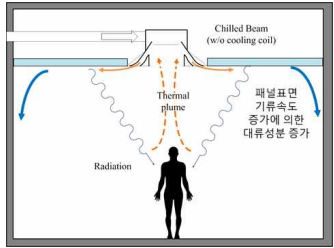
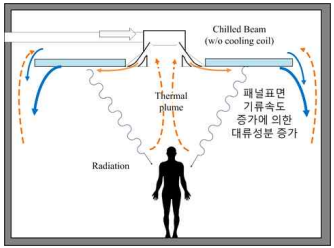
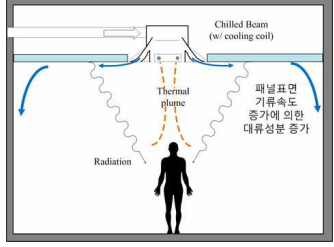
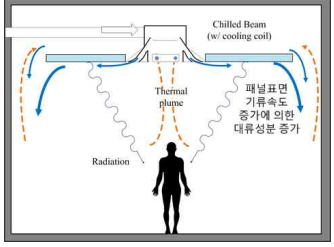
나. 주요 연구수행 내용

(1) 시스템 Matrix 도출

○ Matrix 도출 개념

- 개구부유무, 기류확산을 위한 보조설비 유형에 따라 시스템 대안 Matrix 작성
- 개구부와 기류확산 보조설비가 없는 유형을 Reference로 설정

<표 7> h-CRCP 시스템 Matrix

			개구부유무	
			개구부 없음 (폐쇄형 CRCP)	개구부 있음 (개방형 CRCP)
기 류 확 산 보 조 설 비 유 형	기류확산 보조설비 미적용			
	기 류 확 산 보 조 설 비 적 용	에어 서클레이터		
		플레넘 팬	N/A	
		설비형 칠드빔 (냉수코일 미가동)		
		설비형 칠드빔 (냉수코일 가동)		

○ Matrix 도출 착안점

- 폐쇄형 CRCP: Reference system
- 폐쇄형 CRCP+에어 서큘레이터: 강제대류 효과만 활용
→ 패널표면에서의 대류열전달을 증대시키는 효과 의도
- 개방형 CRCP : 자연대류 효과만 활용
→ 냉각된 플레넘 공기를 거주역으로 하강시켜 거주역 냉방에 활용하는 의도
- 개방형 CRCP+에어 서큘레이터 : 자연대류 및 강제대류 효과 병용
→ 냉각된 플레넘 공기 하강+패널표면에서의 대류열전달을 증대시키는 효과 의도
- 개방형 CRCP+플레넘 팬: 자연대류 및 강제대류 효과 병용
→ 냉각된 플레넘 공기 하강+플레넘 공기의 하강을 촉진하는 효과 의도
- 개방형 CRCP+설비형 칠드빔: 자연대류 및 강제대류 효과 병용 + 외기도입
→ 냉각된 플레넘 공기 하강+칠드빔 기류에 의한 패널표면 대류열전달 증대
+ 외기도입에 의한 환기 및 제습부하 처리, 현열부하 일부 처리 의도

<표 8> h-CRCP 시스템 Matrix 도출 과정

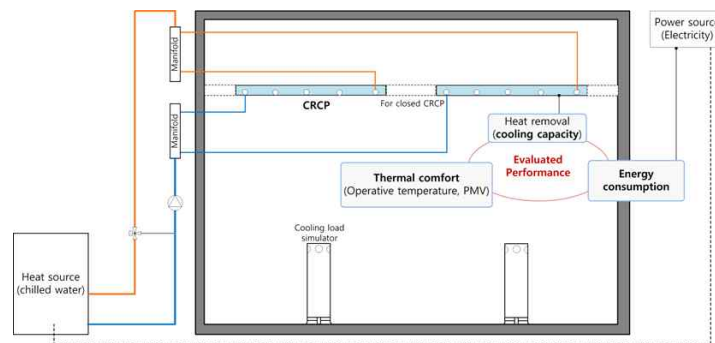
CRCP 대안	작동 원리		
	열전달 증대 메커니즘	주된 공기유동 위치	외기도입 여부
폐쇄형 CRCP	-	-	-
폐쇄형 CRCP+에어서큘레이터	강제대류	패널하부	실내공기 재순환
개방형 CRCP	자연대류	플레넘	실내공기 재순환
개방형 CRCP+에어서큘레이터	자연대류+강제대류	패널하부	실내공기 재순환
개방형 CRCP+플레넘 팬	자연대류+강제대류	플레넘	실내공기 재순환
개방형 CRCP+설비형 칠드빔	자연대류+강제대류	패널하부	외기도입

(2) 성능평가 Test-bed 구축

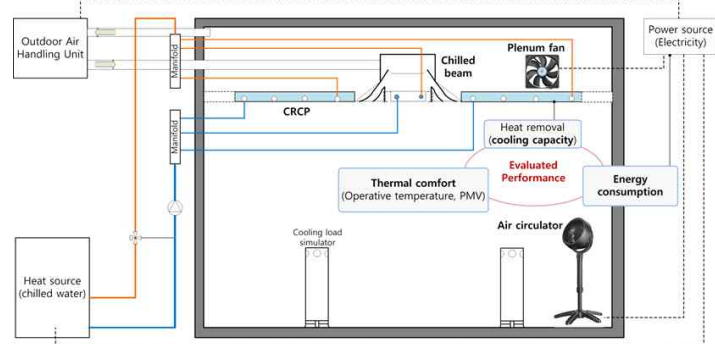
○ Test-bed 개요

- 주관기관 실험실 내부에 3.8m(W)×3.7m(L)×2.95m(H) 크기의 실내 챔버를 구축하고 CRCP 및 열원, 수배관 시스템 설치
- 기존 실험실 내부에 CRCP가 설치된 별도의 챔버를 구성하고, 챔버 외부는 별도의 냉난방기 (EHP)를 가동하여 일정온도를 유지시킴으로써 외부조건 변화에 의한 영향을 최소화
- 패시브 h-CRCP 시스템 성능평가를 위해 패널과 벽면 사이의 천장 마감을 개구부로 치환하는 것으로 개방형 CRCP 시스템 구현
- 액티브 h-CRCP 시스템 성능평가를 위해 에어서큘레이터, 플레넘 팬, 설비형 칠드빔 설치

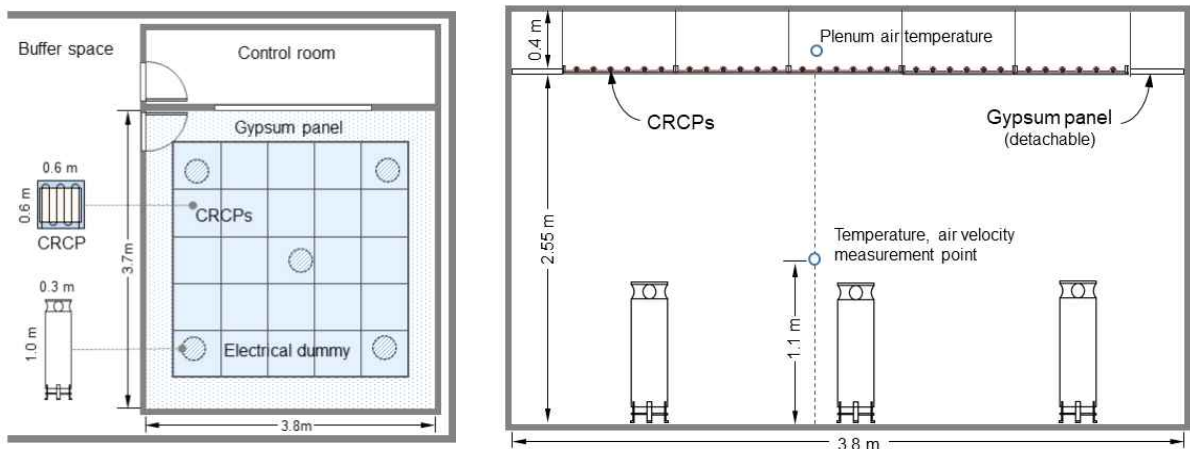
[Passive h-CRCP 구현 개념]



[Active h-CRCP 구현 개념]



[그림 14] h-CRCP 시스템 성능평가 구현 개념



[그림 15] h-CRCP 시스템 성능평가 Test-bed 개요

○ CRCP 레이아웃

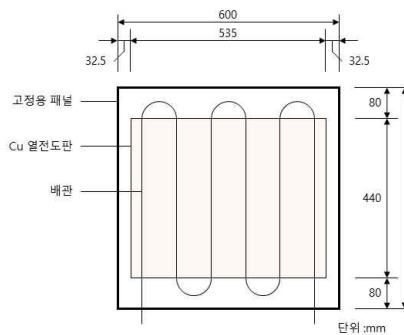
- CRCP 유형 중 상부 방냉도 가능한 부착형 중 접착형 CRCP 선정
- Test-bed 규모를 고려하여 600mm×600mm 크기의 CRCP 25EA 설치 (5EA×5EA)
- CRCP는 플라스틱 냉수배관(내경 7mm), Cu 재질 열전도판, Perforated 알루미늄 패널로 구성되어 있으며, 패널상부의 단열층이 없는 유형
- 기존 CRCP와 h-CRCP의 선택적 운전이 가능하도록 패널 배치 및 수배관 구성 계획

<표 9> CRCP 유형

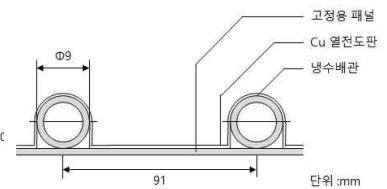
구분		형상	비고
부착형	알루미늄핀 부착형		핀 형상의 알루미늄 고정물위에 배관이 얹혀있는 형태
	접착형		배관을 패널에 접착시킨 형태
	매립형		별도의 고정물없이 배관을 패널에 압착하여 일체형으로 부착시킨 형태
삽입형	삽입보드형		단열 보드의 배관 가이드에 배관이 삽입된 형태
	금속 Lath형		금속 배관 가이드에 배관을 부착한 형태



(a) CRCP 외형

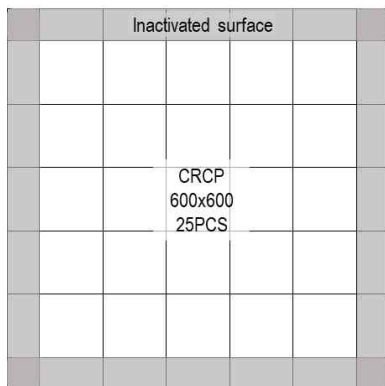


(b) CRCP 규격

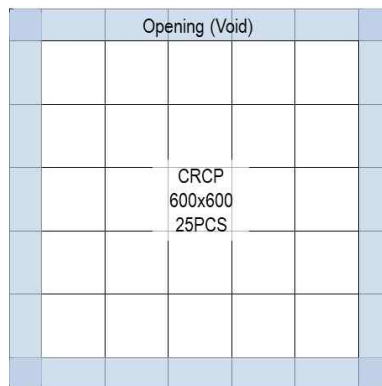


(c) CRCP 단면

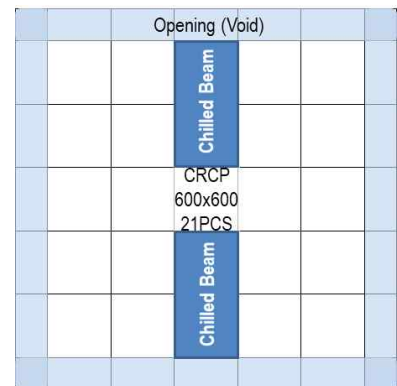
[그림 16] Test-bed 적용 CRCP 상세



(a) 기존 CRCP



(b) 패시브 h-CRCP

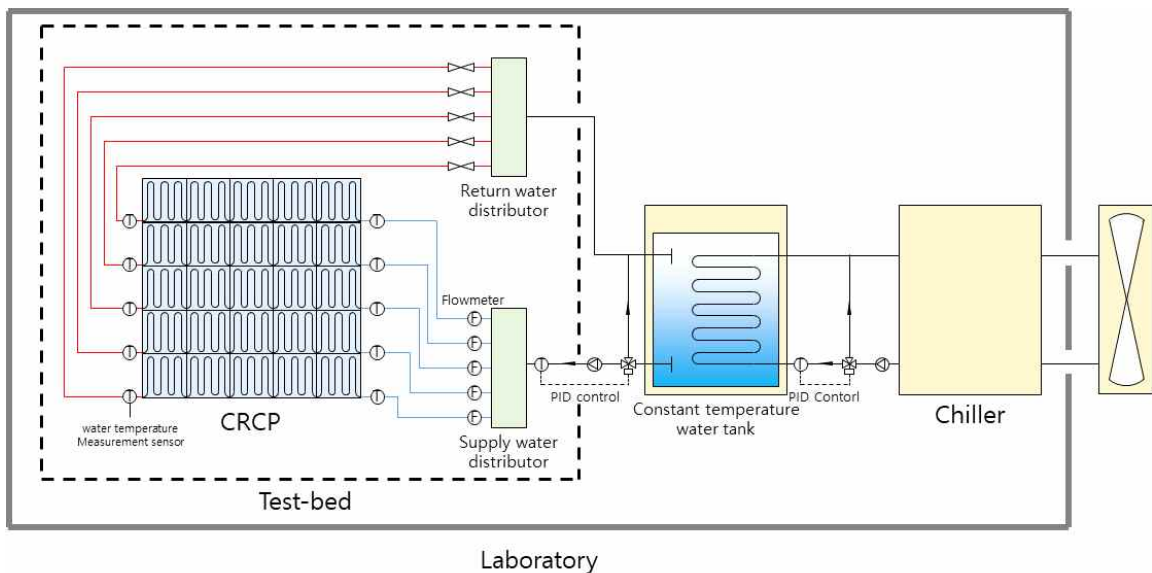


(c) 액티브 h-CRCP

[그림 17] CRCP 배치 대안

○ CRCP 냉수공급 시스템

- 냉수생산을 위한 냉동기 및 냉수온도의 안정적 제어를 위한 buffer tank와 3-way mixing 회로 구성
- CRCP 냉수공급 수배관은 5개의 병렬 회로로 구성하고, 하나의 회로가 5개의 패널에 냉수를 공급하도록 구성
- 5개의 회로는 챔버 내에 설치한 분배기를 통해 분기되며, 니들밸브(Needle valve)가 결합되어 있는 용적식 유량계로 각 지관별 유량 측정 및 유량 조절 수행
- 하나의 회로가 담당하는 5개의 패널에서 3번째 패널은 추후 설비형 칠드빔 설치를 위해 탈거될 수 있도록 하고, 해당 패널의 냉수배관이 bypass될 수 있도록 구성



[그림 18] h-CRCP 시스템 성능평가를 위한 냉수분배 시스템 구성



(a) 냉수생산용 냉동기

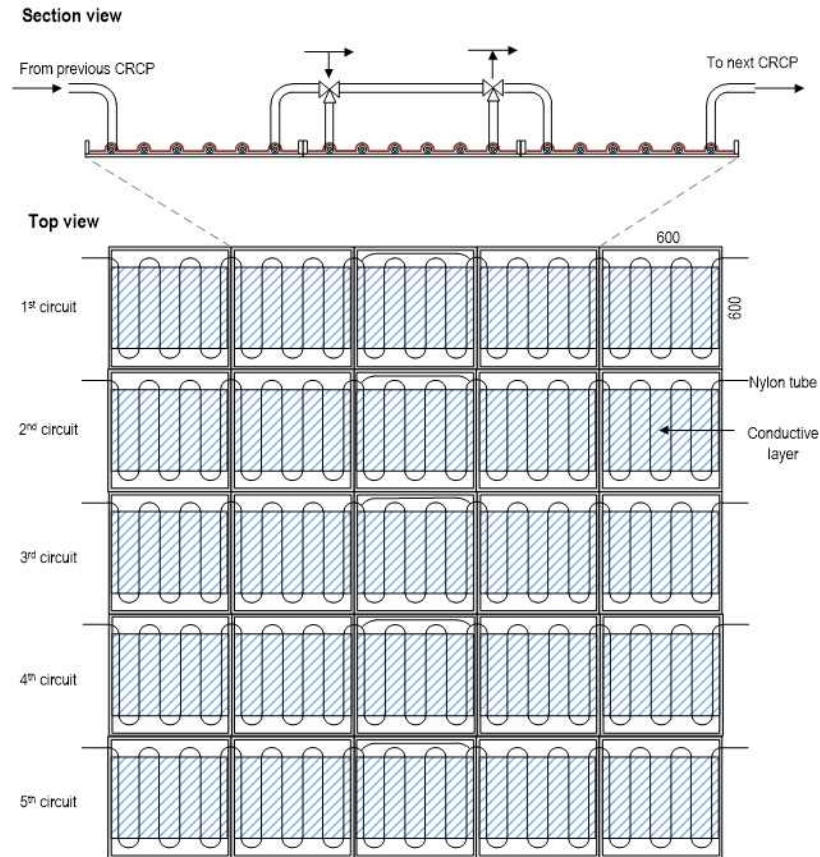


(b) Buffer tank 및 3-way 밸브



(c) 분배기 및 유량계

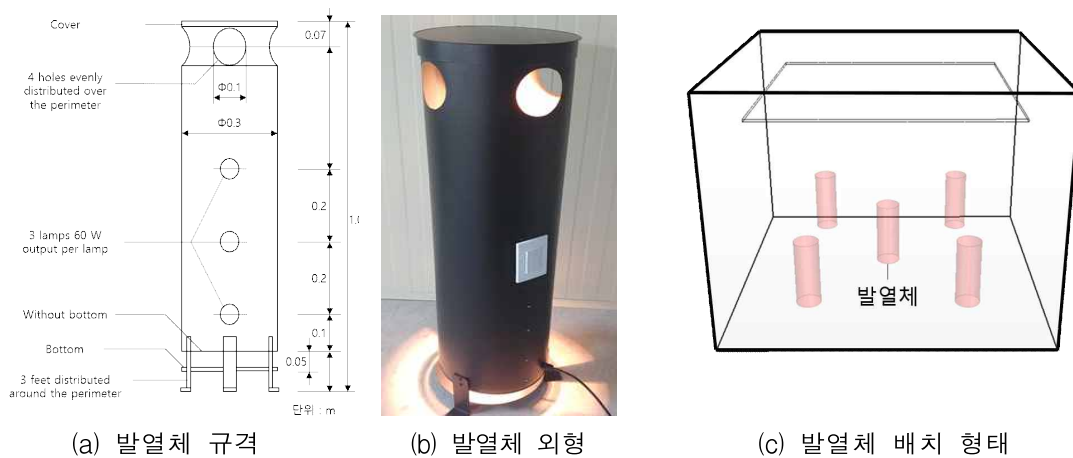
[그림 19] 냉수공급 시스템 구성



[그림 20] CRCP 수배관 구성

○ 냉방부하 재현

- 내부부하 요소 재현을 위해 EN 14240의 cooling load simulator (전기발열체) 제작
- 발열체 1개당 발열량은 180W로 Test-bed의 각 모서리와 중앙에 1개씩 총 5개 배치함
- 외부 기상조건 변화에 의한 불확도를 최소화하기 위해 일사 및 외기온 변화와 같은 외부 부하요소를 제거 (벽체 단열 및 창문 차폐를 통해 일정한 실내환경을 유지)

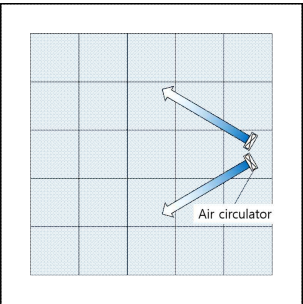
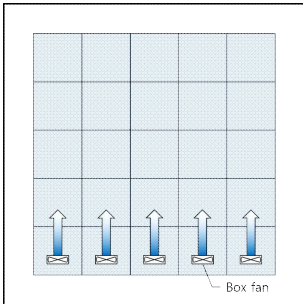
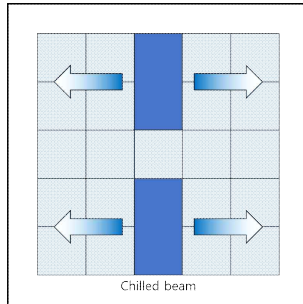


[그림 21] 냉방부하 재현용 발열체 규격 및 배치 형태

○ 기류확산 보조설비

- Air circulator: 천장의 한쪽 끝에서 다른 쪽 끝까지 방향성이 있는 강한 기류를 형성하여, 패널 표면에서의 기류속도 및 대류열전달을 증대시키는 목적의 기류확산 장치
- 플레넘 팬: 에어 서큘레이터와 같이 높은 방향성과 기류속도를 확보하는 목적보다는, 낮은 기류속도이더라도 패널 전체에 균일한 기류를 형성하는 목적의 기류확산 장치
- 설비형칠드빔: 칠드빔 내부의 노즐로부터 분사된 1차공기(외기)가 실내공기와 혼합되어 천장면을 따라 흐르는 현상에 착안하여, 외기도입 목적과 패널표면의 대류열전달을 증대시키는 목적을 모두 달성하기 위한 목적의 기류확산 장치
 - 에어 서큘레이터나 플레넘 팬은 실내공기의 재순환을 통한 기류확산 증대효과를 거두는 것으로, 복사냉방시스템 적용 시 고려해야 하는 외기도입, 환기부하처리, 잠열부하 처리 기능을 구현하기 어려움
 - 이에 따라 패널표면에서의 균일한 기류확산 기능을 구현하면서도, 외기처리 시스템과의 연계할 수 있는 설비형 칠드빔을 기류순환 장치로 선정
 - 칠드빔에 냉수를 공급할 경우 대류성분증가로 복사냉방의 장점이 희석되므로, 칠드빔 Water-side 가동을 최소화하여 운전하도록 함. 즉, 칠드빔 냉각코일에 냉수를 공급하지 않고 칠드빔이 기류확산 역할만 담당하도록 하거나, 칠드빔 냉각코일에 냉수를 공급하되 칠드빔이 처리하는 냉방부하가 너무 커지지 않도록 CRCP에 공급되는 냉수보다는 높은 온도의 냉수 공급
 - 칠드빔은 자체에 Moving part, 즉, 팬이 없어 추가되는 반송 동력이 없으나, 별도의

<표 10> 실험에 사용된 보조 기류 순환 설비

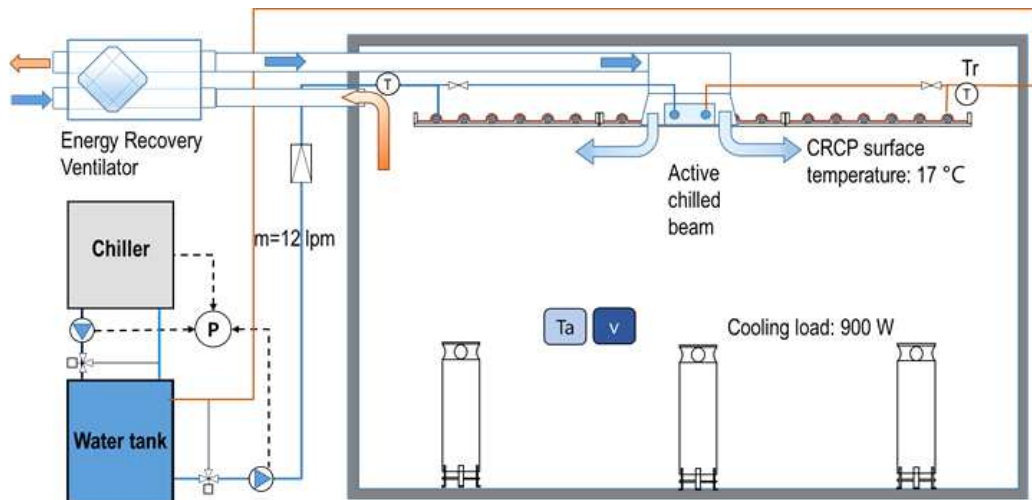
종류	서큘레이터	플레넘 팬	설비형칠드빔
모델명	Vornado 530	EC12025SL12SA-3P	DK-LIG/Z
풍량	284 CMH	52 CMH	66 CMH
규격 (WxLxH)	248mm×235mm×324mm	120mm×20mm×25mm	600mm×1200mm×300mm
외형			
설치위치	실내 거주역 (바닥으로부터 2.1m 높이)	플레넘 공간	천장매립
기류순환 개념			

<표11> Air circulator 세부 사양

Item	Performance Data		
	I	II	III
Fan step *			
Fan speed	1200 rpm	1700 rpm	2000 rpm
Air flow rate	212 m ³ /h	284 m ³ /h	357 m ³ /h
Maximum air velocity	7.5 m/s		
Air travel range	20 m		
Area covered	20 m ²		

공조장치에서 공기를 칠드빔 내부의 챔버에 불어넣어 가압을 해줘야 함. 그러나 본 연구에서 구축한 Test-bed의 크기에 적합한 풍량을 공급할 수 있는 적합한 상용 공조기가 없는 관계로, 전열교환기의 급기측을 칠드빔 챔버에 연결하여 가압할 수 있도록 시스템을 구성

• 통상적으로 칠드빔과 결합되는 외기처리 시스템으로 외기전담공조기(DOAS: Dedicated Outdoor Air System)가 이용되어 전외기공조의 형태로 시스템이 운전되나, 본 연구에서는 Test-bed의 협소한 플레넘을 감안하여 기본적인 전열교환기의 기능에 제습, 냉각 기능이 통합된 제습냉방 환기유니트를 적용



[그림 22] 설비형 칠드빔 적용시 Test-bed 시스템 구성

○ Test-bed 구축 현황



(a) 플레넘 형성 및 T-bar 설치



(b) CRCP 설치



(c) 표면온도센서 부착



(d) CRCP 상부 플레넘



(e) Test-bed 내부 전경



(f) 부하 시뮬레이터 배치



(g) 에어 서클레이터 적용 시



(h) 플레넘 팬 적용 시



(g) 칠드빔 1차공기 공급용 외기조화기



(h) CRCP+설비형칠드빔 조합

[그림 23] h-CRCP 시스템 성능평가 Test-bed 구축 과정

(3) h-CRCP 성능평가 방법

(가) Test-bed 실험을 통한 냉방용량 평가

○ h-CRCP 성능평가 지표 및 측정방법

- 냉방용량 : EN 14240 냉방용량 계산식 적용, 지관별 공급 및 환수온도차 및 유량으로 부터 제거열량 산정

$$P_a = c_p \cdot q_m \cdot (\theta_{w2} - \theta_{w1})$$

P_a : 천장 복사 패널의 제거열량 [W]

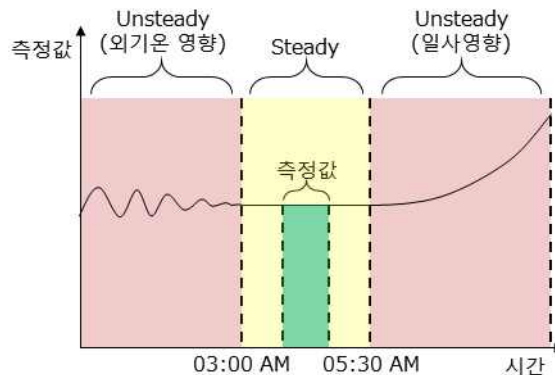
c_p : 냉수 비열 [kJ/kgK]

q_m : 냉수 유량 [kg/s]

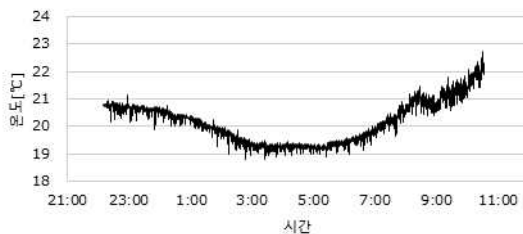
θ_{w1} : 냉수 공급 온도 [°C]

θ_{w2} : 냉수 환수 온도 [°C]

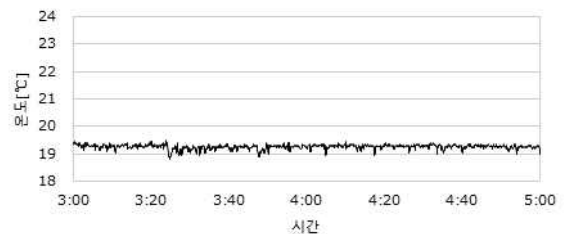
- 냉방용량 측정시 외부조건(일사 또는 외기온) 변화, 기기 특성에 의한 불확도를 최소화하기 위해, 하루 중 일사의 영향이 없고 외기온 변화가 가장 작은 구간(04:00~05:00)에서의 측정값을 활용
- 이러한 조건에서 냉방용량을 측정한 결과 EN 14240에서 제시된 정상상태 판별 조건 (측정기간 중 흑구온도 표준편차 0.05°C 이내, 표면온도 표준편차 0.5°C 이내, 평균수온 0.05°C 이내, 냉수유량 1% 이내)에 부합함을 확인



[그림 24] 측정 불확도 최소화 개념



(a) 측정기간 동안의 외기온 변동

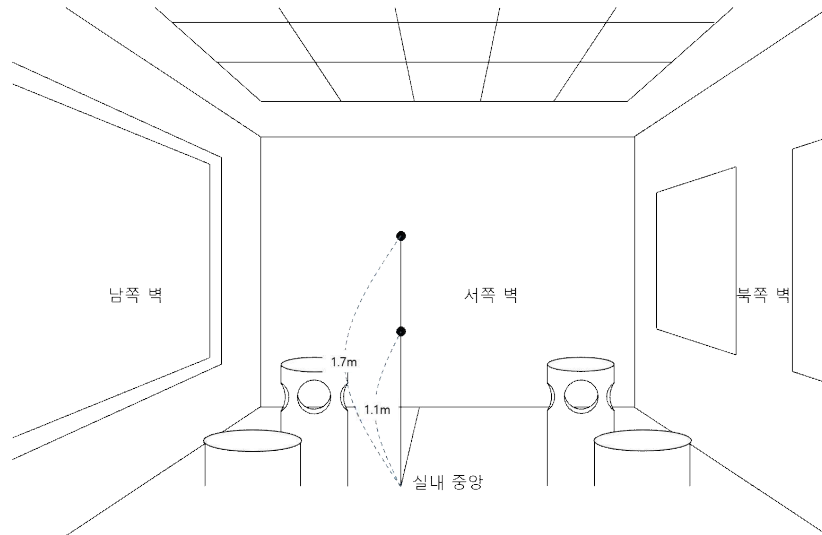


(b) 외기온 안정화 구간의 외기온 변동

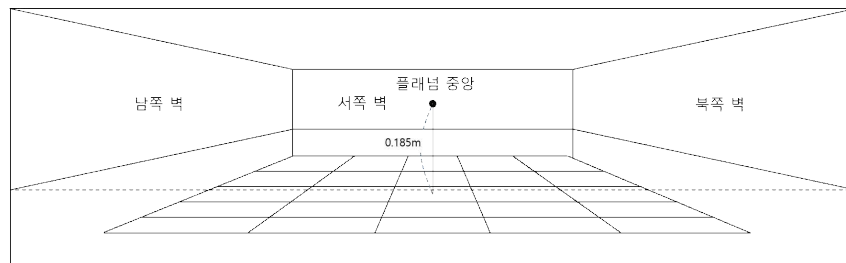
[그림 25] 측정 불확도 최소화를 위한 데이터 샘플링 기간

○ h-CRCP 시스템 운전 조건

- 냉수온도 : 5개 회로의 입구온도 평균 17℃로 유지
- 냉수유량 : 각 회로당 2.4 lpm (총 12 lpm) 공급
- 냉방부하 : 900W (180W 발열체 5개 가동)



[그림 26] Test-bed 거주역 측정점 위치

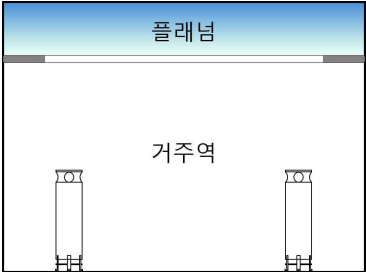
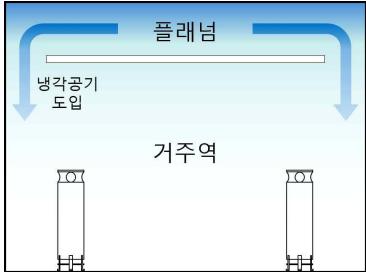
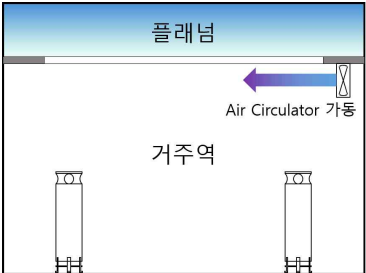
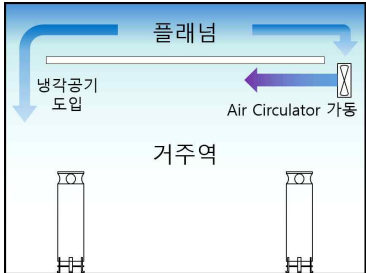
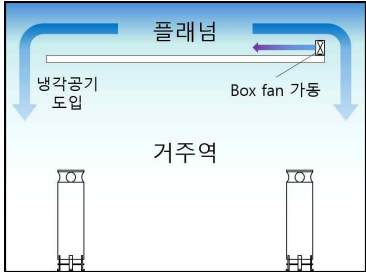
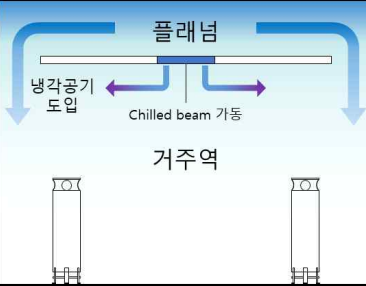


[그림 27] Test-bed 플레넘 측정점 위치

<표 12> 측정인자 및 센서 사양

Item	Type	Range	Accuracy
실내온도	NTC thermistor	-20 - +70 ° C	±0.2 ° C
플레넘 온도	T-type thermocouple	-250 - +350 ° C	±0.5 ° C
기류속도	Hot wire	0 - 5 m/s	±0.03 m/s
냉수온도	RTD PT100	-70 - +500 ° C	±0.3 ° C
냉수유량	Volumetric	0.2-42 l/min	2 %

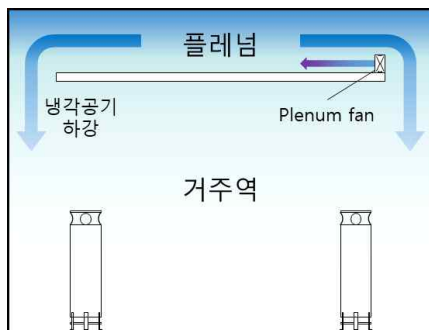
<표 13> h-CRCP 냉방용량 및 온열환경 평가 Case

기류 순환 장치	개구부 유무	
	폐쇄형(Closed-type)	개방형(Open-type)
없음		
Air circulator		
Plenum fan	-	
Active chilled beam	-	

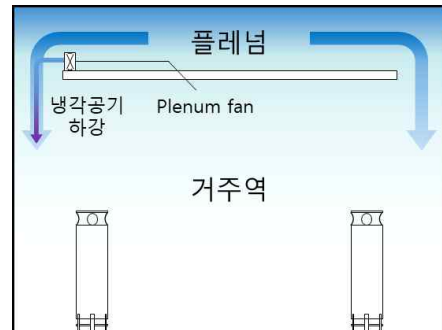
<표 14> h-CRCP 냉방용량 평가 Case 상세 설정

Case	Opening	기류 순환 설비				
		종류	배치	가동 방식	개수	풍속
Case 1	폐쇄형	없음	-	-	-	-
Case 2	개방형	없음	-	-	-	-
Case 3	폐쇄형	서큘레이터	패널 하부	-	2	4 m/s
Case 4	개방형	서큘레이터	패널 하부	-	2	4 m/s
Case 5	개방형	플레넘 팬	패널 상부	배기 ⁽¹⁾	5	1 m/s
Case 6	개방형	플레넘 팬	패널 상부	배기 ⁽¹⁾	10	1 m/s
Case 7	개방형	플레넘 팬	패널 상부	배기 ⁽¹⁾	15	1 m/s
Case 8	개방형	플레넘 팬	패널 상부	급기 ⁽²⁾	5	1 m/s
Case 9	개방형	플레넘 팬	패널 상부	급기 ⁽²⁾	10	1 m/s
Case 10	개방형	플레넘 팬	패널 상부	급기 ⁽²⁾	15	1 m/s
Case 11	개방형	플레넘 팬	패널 상부	급기, 배기 ⁽³⁾	20	1 m/s
Case 12	개방형	플레넘 팬	패널 상부	급기, 배기 ⁽³⁾	30	1 m/s
Case 13	개방형	칠드빔	패널 하부	-	2	0.24 m/s ⁽⁴⁾
Case 14	개방형	칠드빔	패널 하부	-	2	0.28 m/s ⁽⁴⁾

- (1) 플레넘 출구 부분에 설치하여 플레넘 공기를 흡입하는 형태 (Draw-through)
(2) 플레넘 입구 부분에 설치하여 플레넘 공기를 밀어내는 형태 (Blow-through)
(3) 플레넘 입출구 부분에 설치하여 플레넘 공기를 흡입/배출을 동시에 하는 형태
(4) 칠드빔에 1차공기를 공급하는 전열교환기의 풍량을 조절하여 풍속을 조절



(a) 급기형 가동 방식



(b) 배기형 가동 방식

[그림 28] Plenum fan 가동 형태



[그림 29] 제작된 Plenum fan 클러스터

(나) CFD 시뮬레이션을 통한 냉방용량 및 온열환경 평가

○ 수치해석(CFD) 모델 이용 평가 목적

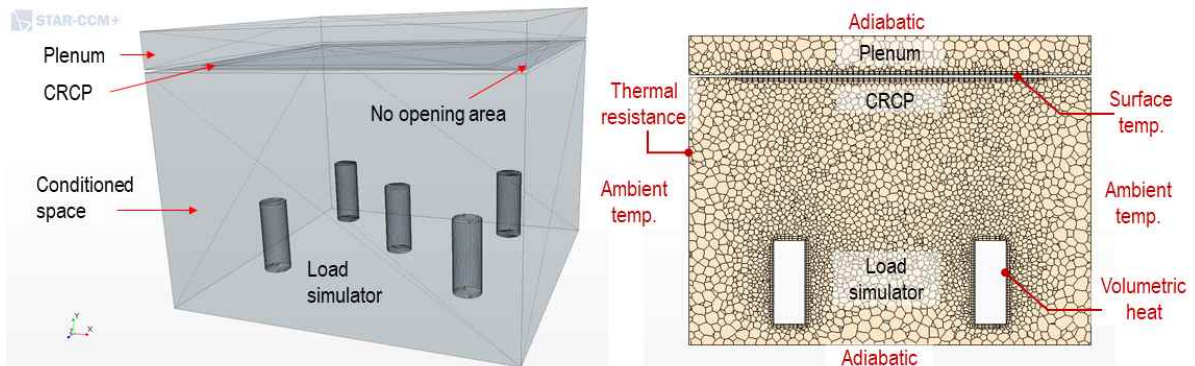
- Test-bed 실험의 경우 측정 센서 수의 제한으로 인해 공간전체에 걸친 온열환경 분포나 특정 부위의 온열환경을 면밀하게 분석하는데 한계가 있으므로 Test-bed 조건과 동일하게 수치해석 모델을 구현하여 평가
- Test-bed를 이용한 실험에서 h-CRCP 시스템의 특정 변수가 냉방용량이나 온열환경에 미치는 영향력을 분석할 때, 해당 변수만을 변경시키고 다른 변수를 엄밀하게 고정시키는데 한계가 있으므로, 수치해석 모델을 이용하여 다른 변수에 의한 불확도를 제거하기 위함

○ CFD 평가 항목

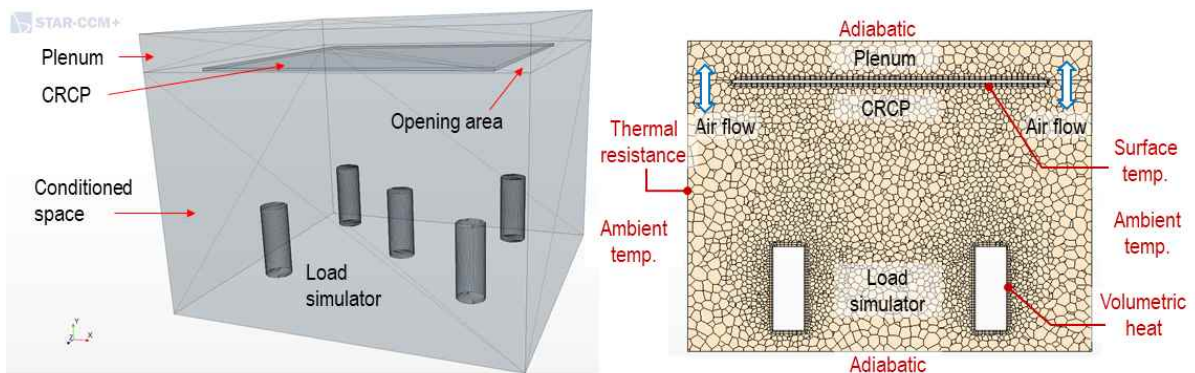
- 냉방용량 : CRCP 표면에서의 흡수열량으로부터 냉방용량 산정
- 온열환경 : 각 Case 별 실내 기류유동 및 온도 분포, PMV 분석

○ CFD 모델 구성 방법

- STAR-CCM+ 으로 h-CRCP 성능평가 Test-bed, CRCP, 기류순환 보조설비, 냉방부하 시뮬레이터 재현
- Test-bed 실험 데이터와의 비교 검증을 통해 Model validation 실시



(a) 기존 CRCP 시스템 (폐쇄형 CRCP)



(b) h-CRCP 시스템 (개방형 CRCP)

[그림 30] CFD 모델 형상 및 경계조건 설정

<표 15> h-CRCP 시스템 CFD 모델의 Physics 설정

구분	적용 모델	적용 근거
Material	Gas - Air	Fluid in the conditioned space is air (gas).
Time	Steady state	The simulation needs to be performed in accordance with the testing method, wherein the cooling capacity should be evaluated under steady-state conditions.
Space	Three-dimensional	The geometry of investigated room, CRCPs and load simulators is three-dimensional.
Flow	Incompressible, segregated flow	The air flow in the conditioned space is incompressible. The segregated solution is known as suitable for incompressible flows.
Equation of state	Ideal gas	The state of air can be explained by the ideal gas equation, wherein the air density varies with air temperature and pressure.
Viscous Regime	Turbulent	The air flow in the conditioned space is turbulent.
Turbulence	Realizable two-layer k-ε	This turbulence model combines realizable k-ε and two-layer model. The model is suitable for the analysis of open-type CRCPs because it can improve the capability of resolving through the boundary layer and can accurately predict forced, natural, and mixed convection for indoor air flow.
Radiation	Surface-to-surface/ Viewfactor calculate/ Gray thermal radiation	The radiation model was used to calculate the radiative heat exchange between the gray surfaces (wall, ceiling, and panel surface)

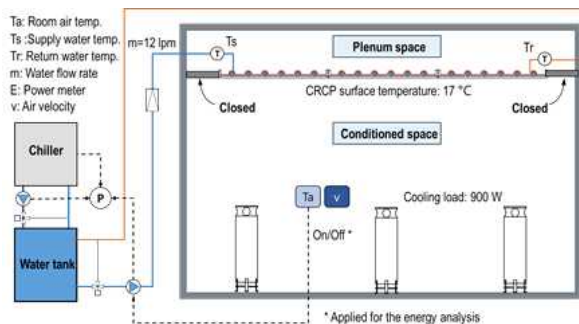
<표 16> CFD 시뮬레이션 경계 조건

Object	Boundary type		Unit	Value
발열체	Heat flux		W/m ²	201
바닥	Adiabatic		-	-
지붕	Adiabatic		-	-
동,서쪽 벽	Ambient	Heat transfer coeff.	W/m ² K	9.09
		Thermal resistance	m ² K/W	1.71
		Air temperature	℃	27.37
남쪽 벽		Heat transfer coeff.	W/m ² K	9.09
		Thermal resistance	m ² K/W	1.71
		Air temperature	℃	28.21
북쪽 벽		Heat transfer coeff.	W/m ² K	23.3
		Thermal resistance	m ² K/W	1.71
		Air temperature	℃	27.3
패널	Surface temperature	Fixed	℃	21.69
모든 표면	Emissivity		-	0.9

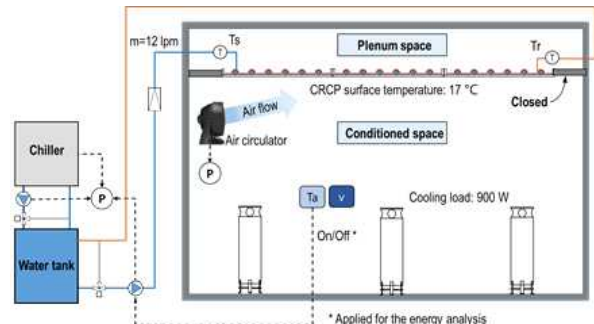
(다) 냉방에너지 소비량 및 온열환경 평가

○ 평가 방법

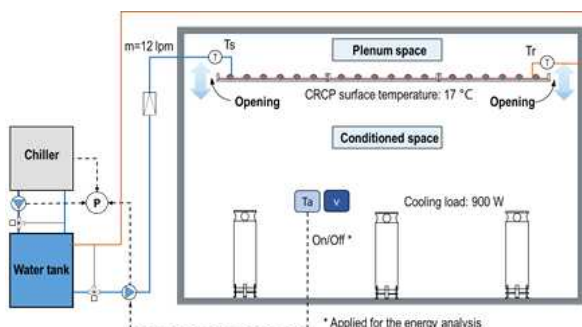
- Test-bed 또는 CFD를 이용한 냉방용량 및 온열환경 평가는 정상상태 하에서의 측정 또는 시뮬레이션 결과에 기반한 것으로, 실제 시스템이 운전되면서 소비되는 냉방 에너지를 평가하기 어려움
- h-CRCP 시스템은 기존 CRCP 시스템보다 냉방용량이 증대되어, 제어변수(냉수온도, 유량)를 동일하게 하여 운전할 경우 시스템 가동시간이 줄어들어 냉방에너지를 절감할 가능성이 있는데, 이를 평가하기 위해서는 실내 목표온도를 설정하고, 시스템을 운전하면서 실온의 변화에 따라 펌프나 냉동기의 on/off가 일어나는 동적 상황을 재현해야 함
- h-CRCP 시스템의 냉방에너지 평가를 위해 동일 실내온도를 유지하는 조건으로 각각의 시스템 대안을 운전할 경우 냉동기, 순환펌프, 기타보조설비의 전력소비량을 측정
- 기존의 폐쇄형 CRCP를 Reference로 설정하고, 폐쇄형 CRCP에 에어 서클레이터를 적용한 case, 개방형 CRCP를 적용한 case, 개방형 CRCP에 에어 서클레이터를 적용한 case를 비교 검토
- 각 Case별 10시간 가동 시 전력소비량 및 PMV 측정 비교



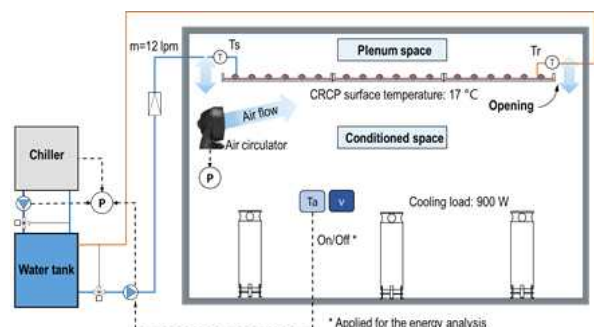
(a) Case A: 폐쇄형 CRCP



(b) Case B: 폐쇄형 CRCP+에어 서클레이터



(c) Case C: 개방형 CRCP



(b) Case D: 개방형 CRCP+에어 서클레이터

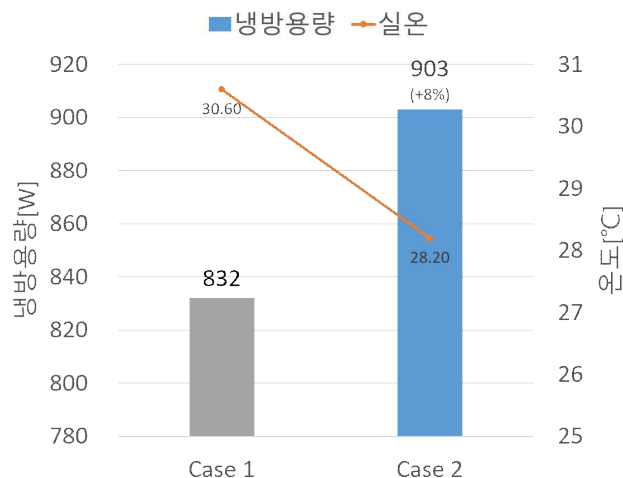
[그림 31] 냉방 에너지 및 온열환경 평가 Case

(4) h-CRCP 시스템 성능평가 결과

(가) Test-bed 실험을 통한 냉방용량 평가 결과

① 패시브 h-CRCP (개방형 CRCP) 시스템 평가 결과: Case 1 vs Case 2

- 폐쇄형 CRCP의 경우 플레넘 공기를 거주역 냉방에 활용하지 못해 실온이 매우 높게 유지 (30.6℃)
- 단순히 개구부만 형성시킨 가장 간단한 형태의 h-CRCP의 적용으로도 냉방용량이 8% 증가하며, 실온이 2.4℃ 하강
- h-CRCP 적용으로 플레넘 온도는 약 24.5℃에서 26.7℃로 상승했는데, 이는 개구부를 통한 공기유동으로 플레넘 공기와 거주역 공기의 혼합이 이루어져 결과적으로 플레넘-거주역 공기의 온도차가 감소한 결과로 판단됨
- 개구부를 통한 플레넘 공기의 하강이 거주역 냉방에 어느 정도 기여했다고 판단되나, 온열환경 측면에서 일반적인 하절기 적정온도인 26℃까지는 확보되지 못하여 추가적인 성능 개선이 필요함



[그림 32] 패시브 h-CRCP 적용 효과

<표 17> 패시브 h-CRCP 적용 시 냉방용량 변화

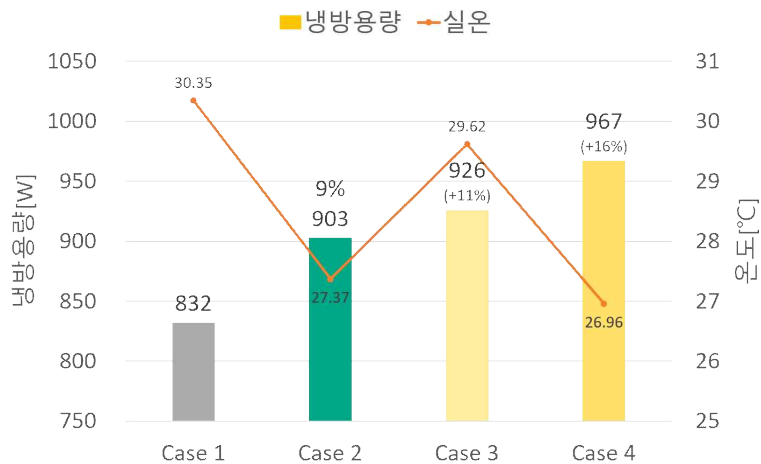
Case	냉방용량		실온				평균복사온도	
			높이 1.7 m		높이 1.1 m			
	값[W]	차[%]	값[℃]	차[℃]	값[℃]	차[℃]	값[℃]	차[℃]
Case 1	832	-	30.35	-	30.60	-	30.56	-
Case 2	903	+8	27.37	-2.98	28.20	-2.40	28.10	-2.45

<표 18> 패시브 h-CRCP 적용시 플레넘 온도 및 기류속도

Case	플레넘온도		기류속도	
	값[°C]	차[°C]	값[m/s]	차[m/s]
Case 1	24.51	-	0.06	-
Case 2	26.69	+2.18	0.07	+0.01

② 액티브 h-CRCP (에어 서큘레이터 적용) 시스템 평가 결과: Case 1~ Case 4

- 폐쇄형 CRCP에 에어 서큘레이터를 병용한 경우(Case 3), 패널 표면에서의 대류열전달 증가로 냉방용량은 Case 1에 비해 11% 증가하나, 실온은 여전히 높게 유지 (29.6℃)
- 폐쇄형 CRCP에 에어 서큘레이터를 적용해도 가장 간단한 형태의 h-CRCP (Case 2)보다 냉방능력이 떨어지는 것으로 나타남
- 패시브 h-CRCP 시스템인 Case 2에 에어 서큘레이터를 적용한 액티브 h-CRCP (Case 4)의 경우, 기존 CRCP 시스템에 비해 냉방용량이 16% 증가하고, 실온도 약 3.2℃ 하강하여 온열환경도 개선되었음
- Case 4의 경우 여전히 실온이 26℃ 보다 높으나, 기류속도가 증가함으로써 다소 높은 온도 조건에서도 쾌적조건을 어느 정도 만족시킬 수 있을 것으로 판단됨. 그럼에도 CRCP 운전조건을 동일하게 유지하면서도 실온을 좀더 낮출 수 있는 대안이 요구됨



[그림 33] 액티브 h-CRCP (에어 서큘레이터 적용) 효과

<표 19> 개구부 및 에어 서큘레이터 적용 시 냉방용량 변화

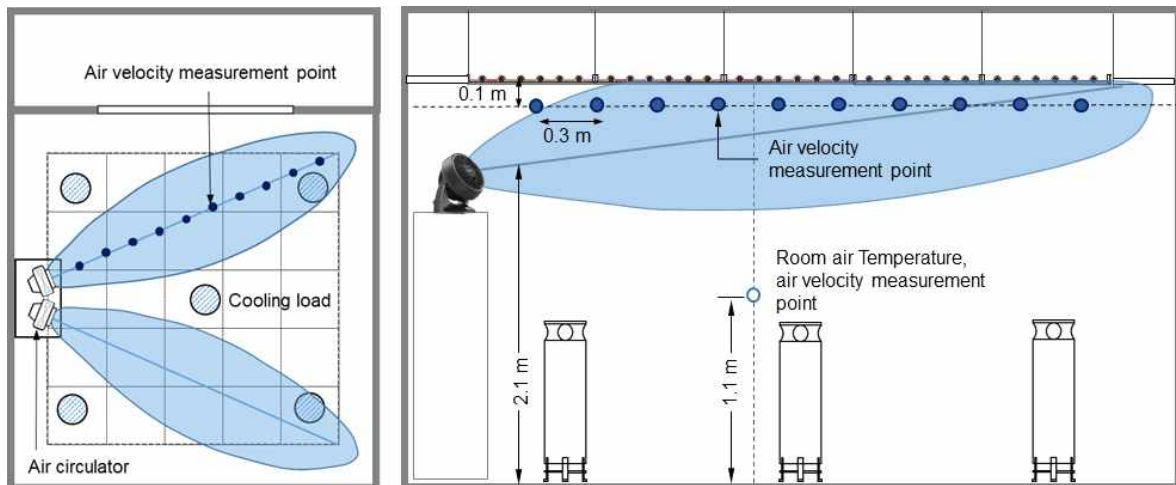
Case	냉방용량			실온				평균복사온도	
				높이 1.7 m		높이 1.1 m			
	W	W/m ²	차[%]	℃	차[℃]	℃	차[℃]	℃	차[℃]
Case 1	832	92.5	-	30.35	-	30.60	-	30.56	-
Case 2	903	100.3	+8	27.37	-2.98	28.20	-2.40	28.10	-2.45
Case 3	926	102.9	+11	29.62	-0.73	29.58	-1.02	29.64	-0.92
Case 4	967	107.5	+16	26.96	-3.39	27.20	-3.39	27.33	-3.23

<표 20> 개구부와 에어 서큘레이터 적용에 따른 플레넘 온도 및 기류속도

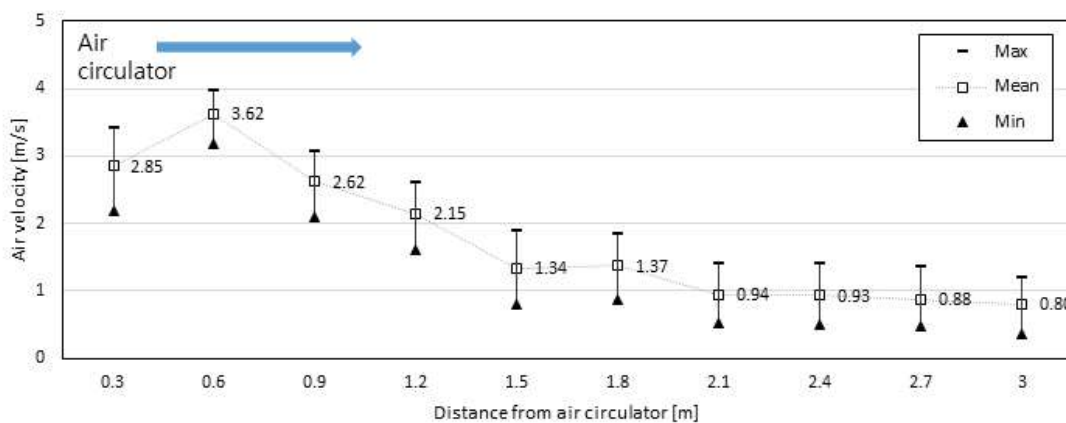
Case	플레넘 온도		기류속도	
	값[℃]	차[℃]	값[m/s]	차[m/s]
Case 1	24.51	-	0.06	-
Case 2	26.69	+2.18	0.07	+0.01
Case 3	24.98	+0.47	0.27	+0.21
Case 4	25.26	-0.75	0.21	+0.15

○ 에어 서큘레이터 가동시 패널표면 기류 속도 측정 결과

- 패널표면의 열전달 계수는 표면 근처의 기류속도에 많은 영향을 받으므로, 에어 서큘레이터 가동 시 패널표면에서의 기류속도를 측정
- 멀티채널 풍속계 (Kanomax Multi-Channel Anemomaster (Model 1560))으로 패널표면 하부 10cm 위치에서 기류방향으로 30cm 간격으로 10지점의 기류속도를 1시간 측정하여 각 지점의 평균풍속 분석
- 에어 서큘레이터의 토출속도는 4.5m/s 였으며, 에어 서큘레이터에서 멀리 떨어질수록 기류속도가 감소하였으나, 가장 먼 지점에서도 일반적인 실내 기류속도인 0.2m/s보다 높은 기류속도를 나타냄.
- 에어 서큘레이터는 방향성 있는 기류를 생성하므로 가장 먼 지점에서의 기류속도를 증가시킬 수 있으나, 지점별 기류속도의 편차가 크고 천장면 전체를 커버하지 못하고 일부 지역에서는 기류속도가 증가하지 않는 음영 부분을 만들어낼 수 있음.
- 기류속도를 대폭 증가시키지 않더라도, 천장면 전체에 걸쳐 기류속도를 증가시킬 수 있는 대안도 필요하며 이를 위해서는 풍량이 작더라도 기류 확산에 유리한 장치가 필요하다고 판단됨.



[그림 34] 패널표면 기류속도 측정 지점

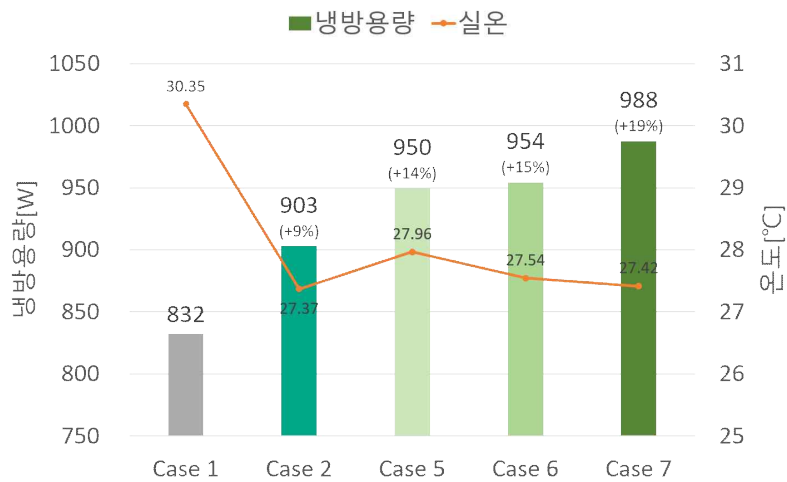


[그림 35] 에어 서큘레이터 가동 시 패널표면 기류속도 분포

③ 액티브 h-CRCP (플레넘 팬 병용) 시스템 평가 결과: Case 5~Case 12

○ 플레넘 팬 배기형 배치 (Case 5~Case 7)

- 플레넘 팬을 배기형으로 배치한 경우 (Case 5~7), 플레넘 공기의 하강이 촉진되어 냉방용량이 Case 1에 비해 14~19% 증가하며, 실온도 28℃ 이하로 떨어짐
- 플레넘 팬을 설치하지 않고 개구부만 확보한 가장 간단한 형태의 h-CRCP (Case 2) 보다 냉방용량이 증대되었으나, 실온은 Case 2보다 더 내려가지 않아 온열환경 측면에서는 개선이 필요한 대안으로 사료됨.
- 플레넘 온도를 비교하면 Case 1에 비해 온도가 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이는 플레넘 내부에 있던 냉각된 공기가 거주역으로 하강하고, 거주역의 공기가 플레넘으로 유입되었기 때문으로 판단됨.



[그림 36] 액티브 h-CRCP (플레넘 팬 배기형 가동) 적용 효과

<표 21> 액티브 h-CRCP (플레넘 팬 배기형 가동) 적용 시 냉방용량 변화

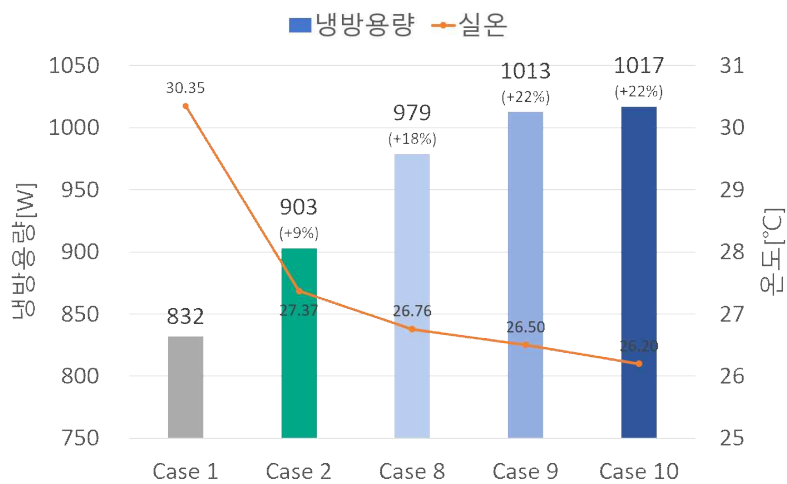
Case	냉방용량			실온				평균복사온도	
				높이 1.7 m		높이 1.1 m			
	W	W/m ²	차[%]	℃	차[℃]	℃	차[℃]	℃	차[℃]
Case 1	832	92.5	-	30.35	-	30.60	-	30.56	-
Case 5	950	105.5	14%	27.96	-2.38	28.60	-1.99	28.50	-2.06
Case 6	954	106.0	15%	27.54	-2.80	28.23	-2.37	28.40	-2.16
Case 7	988	109.7	19%	27.42	-2.93	28.29	-2.30	28.40	-2.16

<표 22> 플레넘 팬 배기형 적용에 따른 플레넘 온도 및 기류속도

Case	플레넘 온도		기류속도	
	값[℃]	차[℃]	값[m/s]	차[m/s]
Case 1	24.51	-	0.06	-
Case 5	27.74	+3.23	0.06	-
Case 6	27.34	+2.83	0.06	-
Case 7	27.20	+2.69	0.08	+0.02

○ 플레넘 팬 급기형 배치 (Case 8~Case 10)

- 플레넘 팬을 급기형으로 배치한 경우 (Case 8~10), 플레넘 공기의 하강이 촉진되어 냉방용량이 Case 1에 비해 18~22% 증가하며, 실온도 27℃ 이하로 떨어짐
- 플레넘 팬을 배기형으로 배치한 경우에 비해 플레넘 공기의 하강이 더욱 촉진된 것으로 보이며, 이는 배기형으로 설치할 경우 플레넘 팬에 의해 토출된 기류가 바로 벽면에 부딪혀 저항을 받기 때문으로 사료됨.
- 또한 팬의 수를 5개(Case 8)→10개(Case 9)→15개(Case 10)으로 늘려갈 때, 5개에서 10개로 늘릴 경우 냉방용량 증대가 나타나지만 10개에서 15개로 늘릴 경우 냉방용량의 유의미한 증대는 나타나지 않으므로, 플레넘 팬은 10개(패널당 2개) 설치하는 것이 합리적이라고 판단됨.



[그림 37] 액티브 h-CRCP (플레넘 팬 급기형 가동) 적용 효과

<표 23> 액티브 h-CRCP (플레넘 팬 급기형 가동) 적용 시 냉방용량 변화

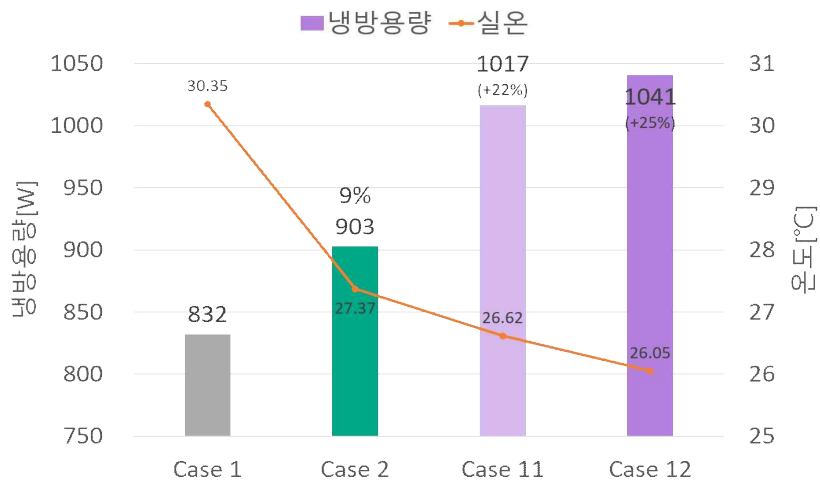
Case	냉방용량			실온				평균복사온도	
				높이 1.7 m		높이 1.1 m			
	W	W/m ²	차[%]	℃	차[℃]	℃	차[℃]	℃	차[℃]
Case 1	832	92.5	-	30.35	-	30.60	-	30.56	-
Case 8	979	108.8	+18	26.76	-3.59	27.57	-3.03	27.58	-2.98
Case 9	1013	112.5	+22	26.50	-3.84	27.44	-3.16	27.50	-3.06
Case 10	1017	113.0	+22	26.20	-4.15	27.20	-3.39	27.11	-3.44

<표 24> 플레넘 팬 급기형 적용에 따른 플레넘 온도 및 기류속도

Case	플레넘 온도		기류속도	
	값[℃]	차[℃]	값[m/s]	차[m/s]
Case 1	24.51	-	0.06	-
Case 8	26.76	+2.25	0.12	+0.06
Case 9	26.18	+1.67	0.15	+0.09
Case 10	25.98	+1.47	0.11	+0.05

○ 플레넘 팬 급배기형 배치 (Case 11~Case 12)

- 플레넘 팬을 플레넘 입구와 출구측에 모두 설치한 급배기형 설치의 경우, 냉방용량은 22~25% 증가하며, 실온도 26℃에 가깝게 유지됨.
- 그러나 급기형 또는 배기형의 경우보다 플레넘 팬을 두 배 더 많이 설치했음을 고려하면, 냉방용량 증대 효과는 그렇게 크지 않으므로 추가된 팬의 개수에 비해 얻을 수 있는 실익은 많지 않다고 판단됨. 또한 플레넘 팬 자체가 공기유동에 저항이 될 수 있고, 다수 팬의 작동에 의한 소음 문제도 유발될 수 있음
- 그러므로 플레넘 팬을 기류확산 보조 설비로 적용할 경우, 급기형 배치로 설치하고, 플레넘 팬의 개수는 패널당 2개 (Case 9)로 하는 것이 적합하다고 판단됨.



[그림 38] 액티브 h-CRCP (플레넘 팬 급배기형 가동) 적용 효과

<표 25> 액티브 h-CRCP (플레넘 팬 급배기형 가동) 적용 시 냉방용량 변화

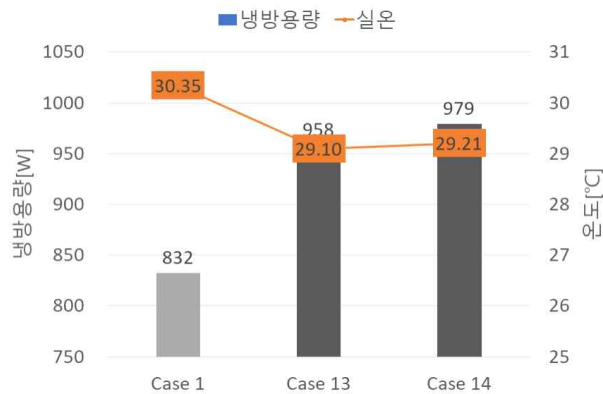
Case	냉방용량			실온				평균복사온도	
				높이 1.7 m		높이 1.1 m			
	W	W/m ²	차[%]	℃	차[℃]	℃	차[℃]	℃	차[℃]
Case 1	832	92.5	-	30.35	-	30.60	-	30.56	-
Case 11	1017	113.0	+22	26.62	-3.73	27.47	-3.13	27.57	-2.98
Case 12	1041	115.6	+25	26.05	-4.29	27.14	-3.46	27.19	-3.37

<표 26> 플레넘 팬 급배기형 적용에 따른 플레넘 온도 및 기류속도

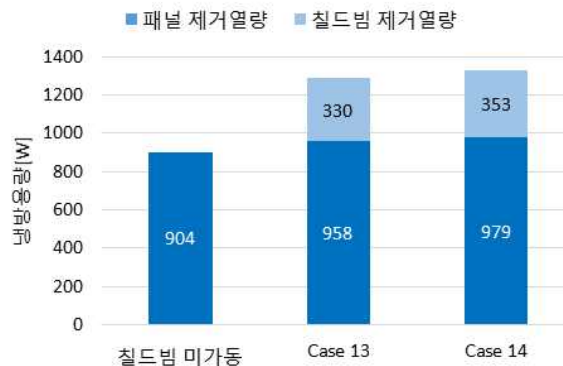
Case	플레넘 온도		기류속도	
	값[℃]	차[℃]	값[m/s]	차[m/s]
Case 1	24.51	-	0.06	-
Case 11	26.40	+1.89	0.12	+0.06
Case 12	25.14	+1.63	0.15	+0.09

④ **액티브 h-CRCP (설비형 칠드빔 병용) 시스템 평가 결과: Case 13~14**

- Case 13은 설비형 칠드빔에 1차공기를 공급하는 전열교환기의 풍량을 저풍량 (245CMH, 개당 122.5CMH), Case 14는 고풍량(455CMH, 개당 227.5CMH)으로 설정
- 설비형 칠드빔에서 취출되는 공기가 CRCP 패널표면에서의 열전달을 촉진시키는 효과를 거두어, 냉방용량이 폐쇄형 CRCP 시스템에 비해 15~18% 증가하였음.
- 칠드빔이 설치된 면적만큼 CRCP의 수량(4개)이 줄어들었음에도, CRCP에 의한 제거열량은 증가함에 따라 **패널면적당 냉방용량은 92.5 W/m² (폐쇄형 CRCP)에서 129 W/m² 까지 증가**하였음.
- 또한 칠드빔 취출 공기를 isothermal flow로 만들기 위해, 즉 실온과 같은 온도의 기류를 취출하기 위해 칠드빔에 24℃의 냉수를 공급함에 따라 칠드빔 자체의 냉방용량 또한 발생하였음.
- 냉방용량의 증대에도 불구하고 실온이 높게 나타난 이유는, 설비형 칠드빔의 냉방용량이 CRCP 시스템보다 더 커져 복사냉방의 특성(복사열전달 비율 50% 이상)이 희석되지 않도록, 설비형 칠드빔에 공급되는 냉수의 온도를 24℃로 다소 높게 설정하였기 때문임.
- 그러므로 설비형 칠드빔을 기류확산 보조설비로 활용할 경우, 냉방용량의 증대와 적정 실온 확보를 위해서는 칠드빔 Air-side의 가동만으로는 부족하며, Water-side의 가동을 병행해야 함. Water-side 가동 시 냉수온도를 CRCP에 공급되는 냉수의 온도만큼 낮출 경우에는 CRCP가 담당하는 부하비율이 낮아질 수 있으므로, CRCP 냉수공급 온도 보다 높고 실온보다는 낮은 냉수온도를 칠드빔 냉각코일에 공급할 필요가 있음.



[그림 39] 액티브 h-CRCP (칠드빔 병용) 효과



[그림 40] 설비형 칠드빔에 의한 냉방용량 증대

(나) CFD 시뮬레이션을 통한 냉방용량 및 온열환경 평가 결과

① Test-bed 실험데이터와 CFD 모델 비교 검증

- 실제 실험에서 관측하기 어려운 실내 기류유동 등을 검토하기 위해 구현된 Test-bed를 CFD 시뮬레이션(Star-CCM+)으로 재현하여 정상상태 해석 수행
- 해석오차는 냉방용량 -2.72%, 평균복사온도 -0.36℃, 건구온도 0.19℃, PMV -0.03으로 본 연구에서 설정한 목표 오차 허용치(냉방용량 $\pm 5\%$, PMV 0.1 이내)를 만족함



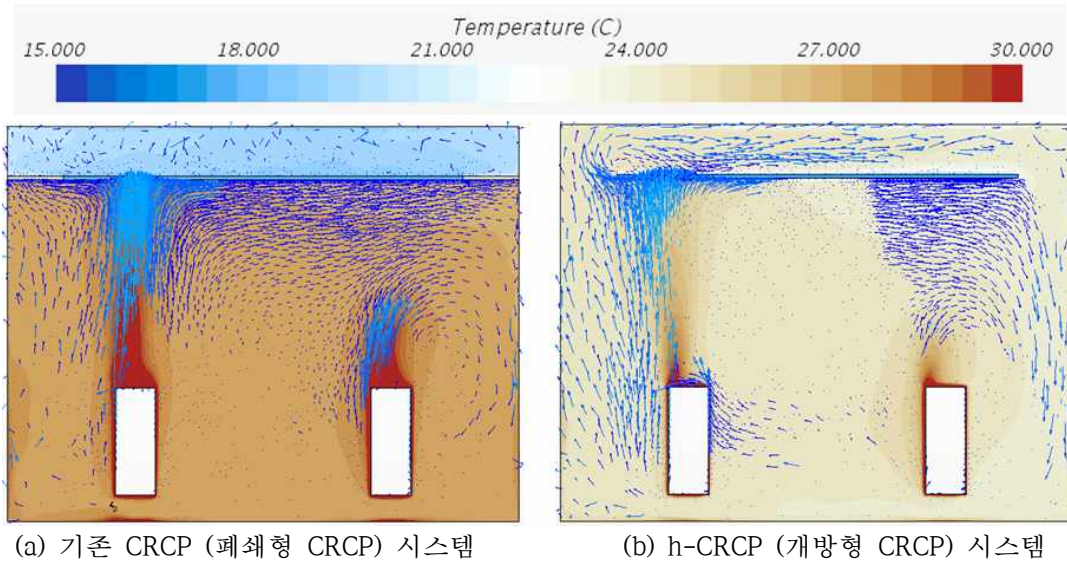
[그림 41] CFD 모델 검증 개념

<표 27> CFD 시뮬레이션 모델 검증 결과

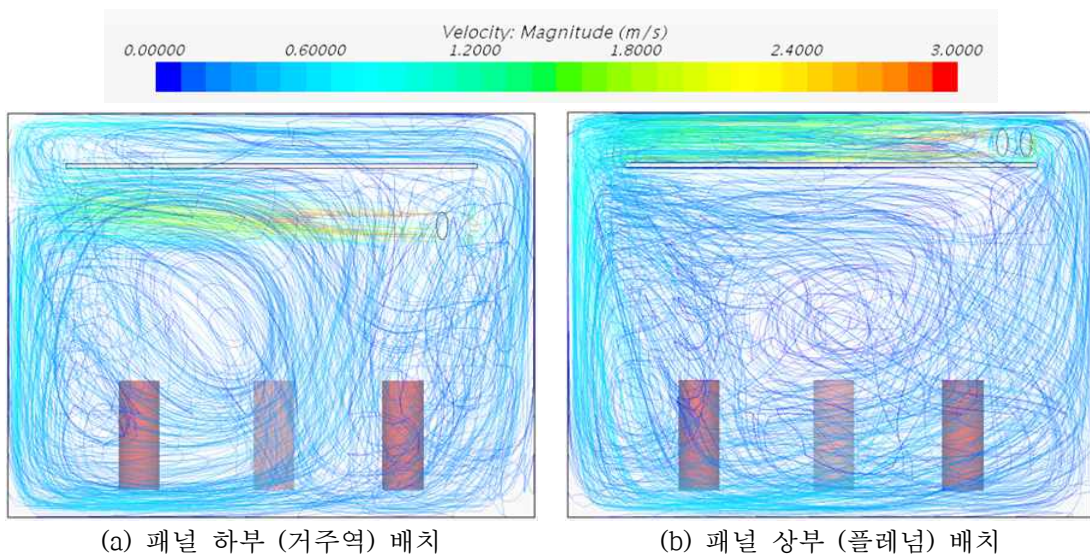
Output parameter	Measured	Simulated	Discrepancy
냉방용량	883 W	859 W	-24 W (-2.72%)
평균복사온도	28.4 ℃	28.04 ℃	-0.36 ℃
건구온도	28.4 ℃	28.21 ℃	-0.19 ℃
기류속도	0.09 m/s	0.02 m/s	-0.07 m/s
PMV	1.03	1.00	-0.03

② h-CRCP 시스템의 메커니즘 규명

- CFD 해석 모델 분석을 통해 실험으로 정량화하지 못했던 h-CRCP 시스템의 주요 메커니즘의 특징을 규명하였음.
- 기존 CRCP와 비교하여, h-CRCP 시스템 (개방형 CRCP)에서 냉각된 플레넘 공기가 거주역 냉방에 유효하게 활용되어, 거주역-플레넘 공기의 온도편차가 감소되는 것을 규명하였음.
- 기류순환 보조설비를 패널하부에 설치하는 경우와 패널 상부에 설치하는 경우의 수직 온도분포를 분석한 결과, 패널 상부에 배치된 경우가 하부에 배치된 경우보다 실내 기류순환에 유리한 것으로 나타남.
- 패널 하부에서 에어 서큘레이터로 기류를 형성하는 경우보다 패널 상부, 즉 플레넘 공간에서 기류를 형성하는 것이 냉방용량 증대 측면에서 유리한데, 에어 서큘레이터를 플레넘 공간에 설치하는 것은 공간의 제약으로 인해 불가능하므로 소형 플레넘 팬을 설치하는 것이 적합할 것으로 판단됨.

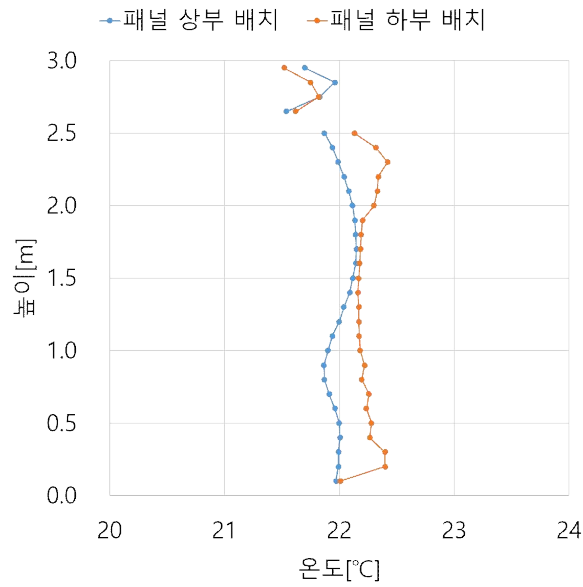


[그림 42] h-CRCP 시스템에서 플레넘 공기의 거주역 냉방 활용 결과

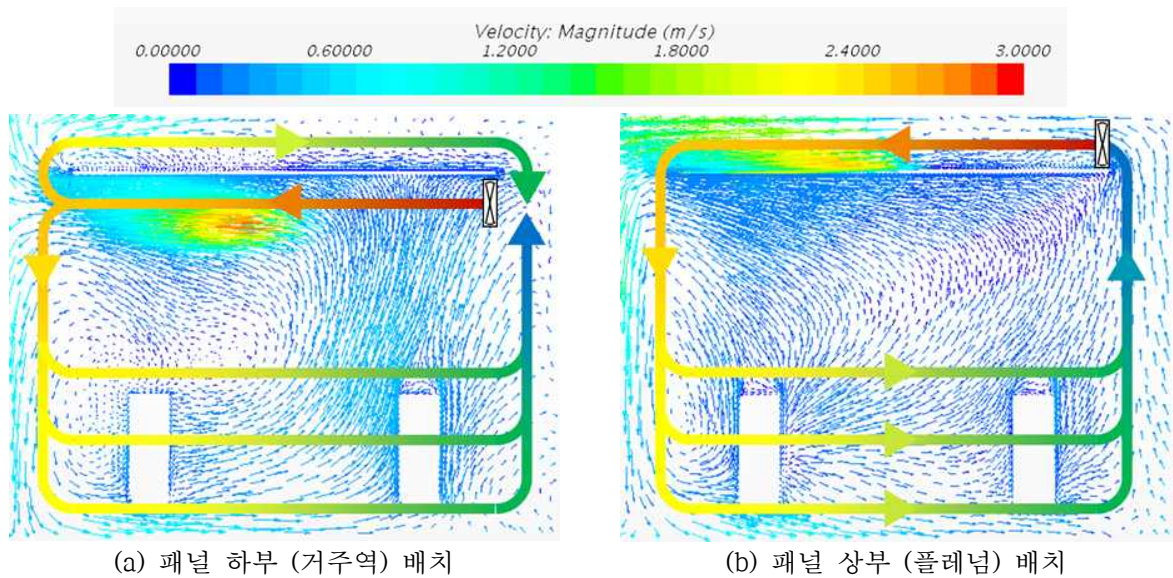


[그림 43] 기류순환 보조설비의 설치 위치에 따른 기류 이동 양상

- 패널 상부(플레넘 공간)의 기류속도를 증가시킬 경우, 플레넘 공기 온도는 소폭 상승하고, 패널 하부 즉 거주역 실내온도는 유의미하게 감소하였음. 이는 패널 상부에 기류순환 보조 설비를 설치할 경우, 플레넘 공기와 거주역 공기의 혼합이 촉진되어 온도차가 줄어들기 때문으로 판단됨.



[그림 44] 기류순환설비 위치에 따른 수직온도 구배



(a) 패널 하부 (거주역) 배치

(b) 패널 상부 (플레넘) 배치

[그림 45] 기류순환 보조설비의 설치 위치에 따른 기류속도 분포

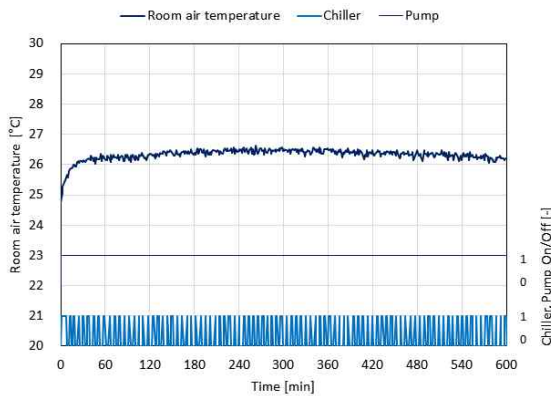
<표 28> 기류순환 보조설비의 설치 위치 및 기류속도에 실온 및 냉방용량

에어 서클레이터 배치 위치	기류속도	냉방 용량	실온	평균 복사온도
패널 하부 (거주역)	3m/s	898W	22.87℃	22.12℃
패널 하부 (거주역)	4m/s	932W	22.40℃	21.91℃
패널 하부 (거주역)	5m/s	941W	22.39℃	21.68℃
패널 상부 (플레넘)	3m/s	909W	22.43℃	21.92℃
패널 상부 (플레넘)	4m/s	928W	22.09℃	21.65℃
패널 상부 (플레넘)	5m/s	947W	21.72℃	21.41℃

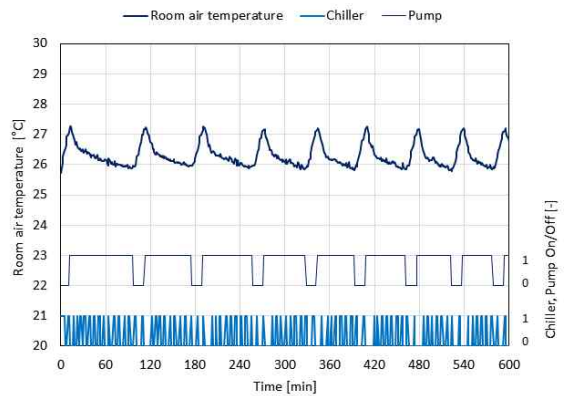
(다) 냉방에너지 소비량 및 온열환경 평가

○ 냉방에너지 평가 결과

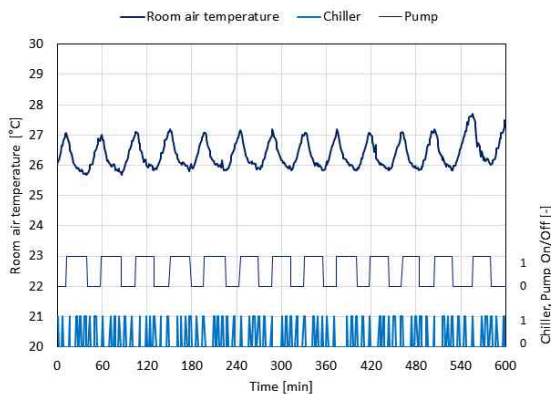
- h-CRCP 시스템은 기존 CRCP 시스템보다 냉방용량이 증대되므로, 실온 하강 속도가 더 빨라 설정 실온까지 도달하는 시간이 단축될 수 있음.
- 그에 따라 설정실온이 만족될 경우 냉수순환 펌프의 작동이 중단되며, 이 때 더 이상 방냉이 이루어지지 않으므로 실온은 다시 상승하게 되면 시스템 가동이 재개됨.
- 이러한 일련의 과정에서 각 시스템 대안별로 on/off 시점에 차이가 나게 되며, 냉방용량이 상대적으로 큰 h-CRCP 시스템의 경우 운전시간이 단축되어 냉방에너지 절감효과를 거둘 수 있음
- 아래 그림에서 기존 CRCP 시스템은 상대적으로 낮은 냉방용량으로 인해 시스템이 계속 가동되는 반면, h-CRCP 시스템은 증대된 냉방용량으로 인해 시스템의 on/off가 발생하며 그에 따른 시스템 운전시간 및 냉방에너지 감소효과를 얻을 수 있음.
- h-CRCP 시스템 적용으로 펌프 운전시간과 냉동기 운전시간은 각각 50.6%, 19.5% 감소하며, 이 때 냉방 에너지는 26.4%까지 절감되었음.



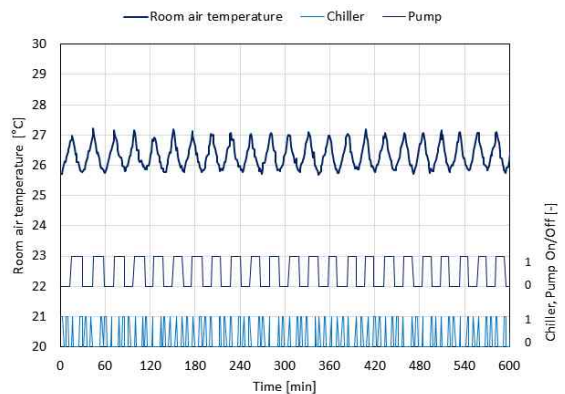
(a) 폐쇄형 CRCP 시스템



(b) 폐쇄형 CRCP 시스템 + 에어 서큐레이터

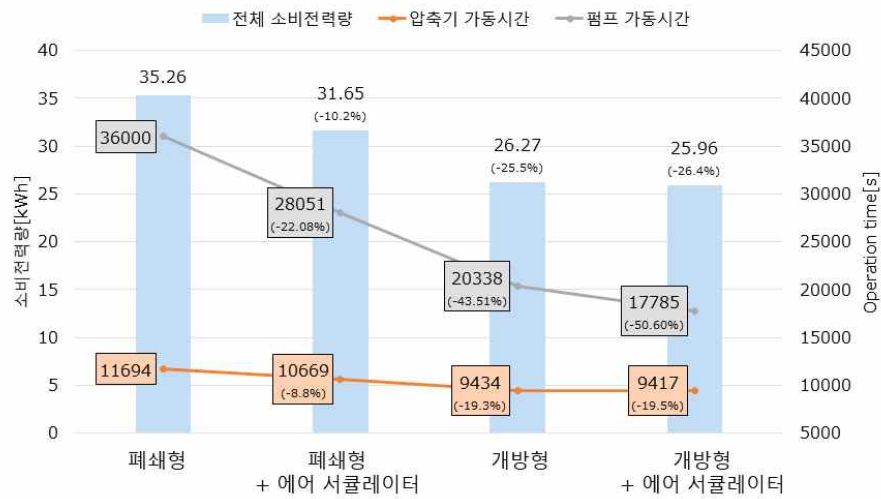


(c) 개방형 CRCP 시스템

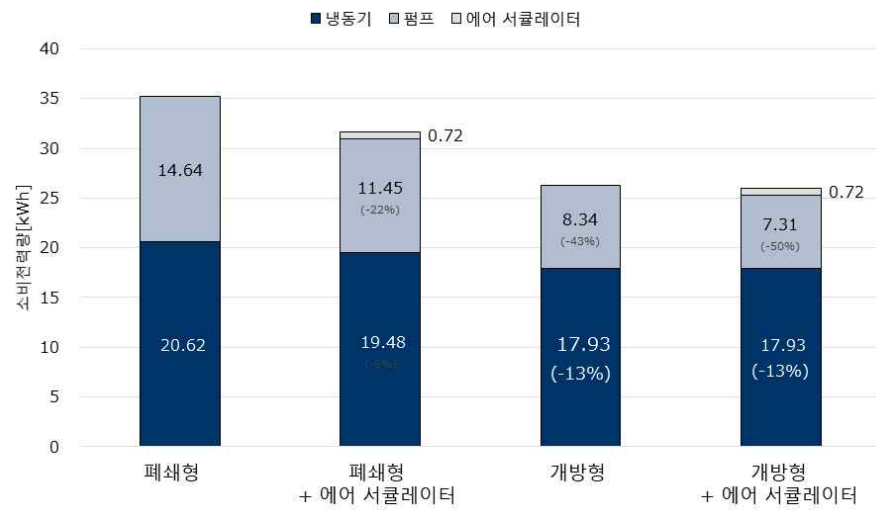


(d) 개방형 CRCP 시스템 + 에어 서큐레이터

[그림 46] h-CRCP 시스템 적용에 따른 실온변동 및 펌프와 냉동기 운전 특성



[그림 47] h-CRCP 시스템 적용 시 시스템 가동시간 및 냉방에너지



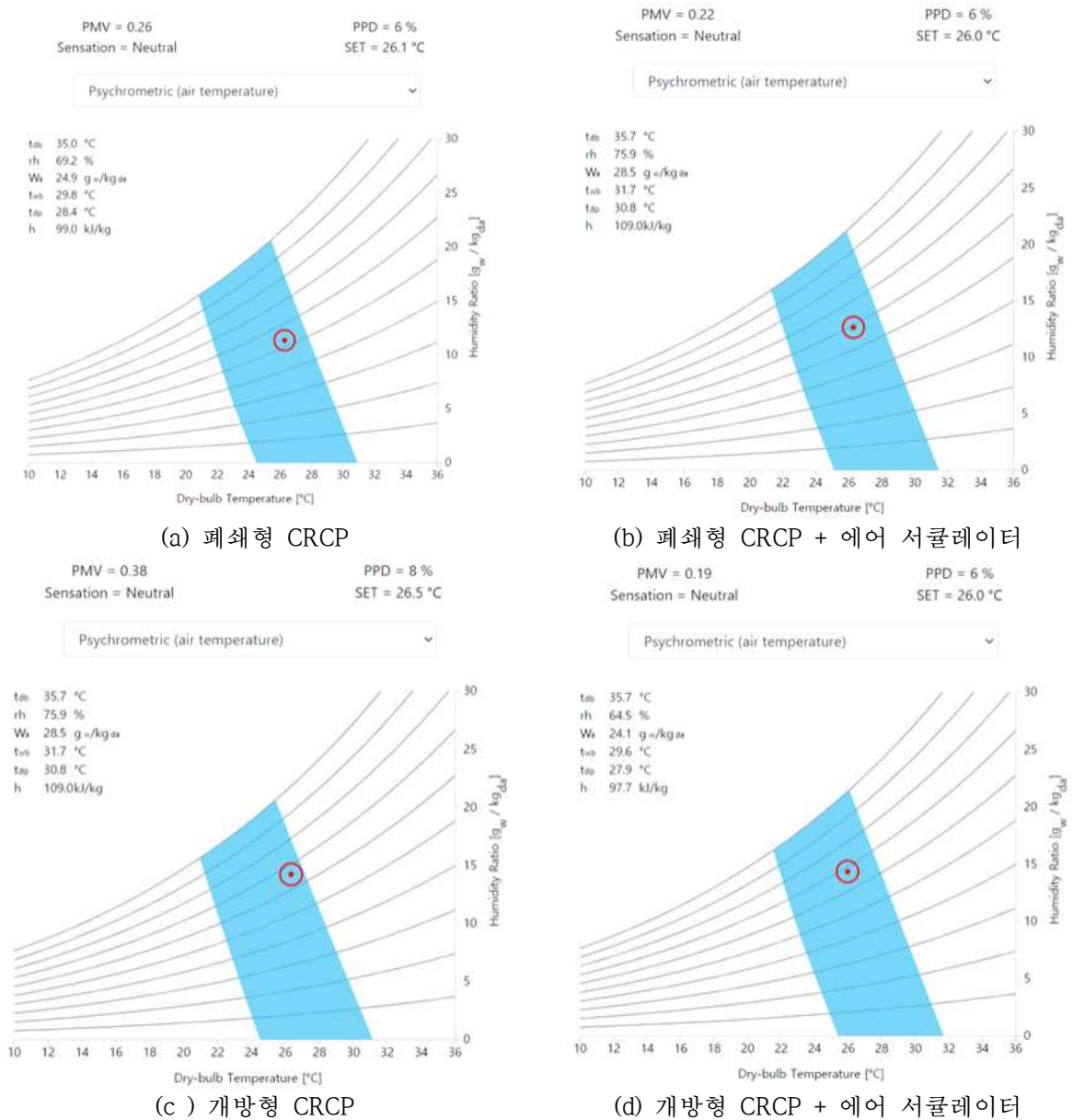
[그림 48] h-CRCP 시스템 적용 시 냉방에너지 break down

<표 29> 시스템 운전시간 및 전력소비량

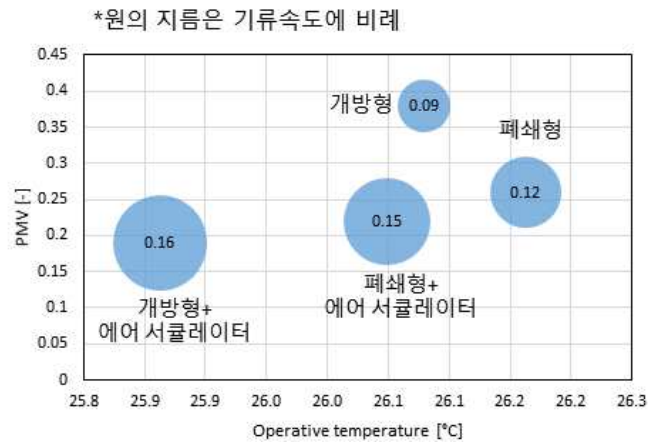
Case	운전시간				전력소비량				
	냉동기		펌프		냉동기 kWh	펌프 kWh	에어서클레이터 kWh	합계	
	h	차[%]	h	차[%]				kWh	차[%]
Case A	3.2	0	10.0	0	20.62	14.64	-	35.26	
Case B	3.0	-9	7.8	-22	19.48	11.45	0.72	31.65	-10.2
Case C	2.6	-19	5.6	-44	17.93	8.34	-	26.27	-25.5
Case D	2.6	-19	4.9	-51	17.93	7.31	0.72	25.96	-26.4

○ 온열환경 평가 결과

- 기존 CRCP 시스템(폐쇄형 CRCP)에서 h-CRCP 시스템으로 변경시, 개구부와 에어 서큘레이터의 영향으로 실내온도 (작용온도)가 점차 하강하며, 에어 서큘레이터의 영향으로 기류속도가 증가함으로써 PMV는 0.26에서 0.19까지 감소하였음.
- PMV 0.19는 ISO 7730 Category A (PMV -0.2~0.2)를 만족하는 수치로서, h-CRCP 시스템 적용을 통해 본 과제에서 설정한 온열환경 쾌적 목표를 달성할 수 있는 것으로 판단됨.

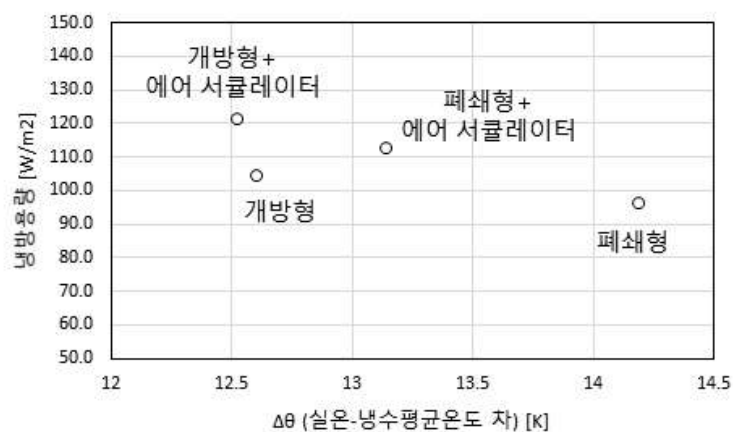


[그림 49] h-CRCP 시스템 적용 시 온열환경 평가 결과



[그림 50] h-CRCP 시스템 적용 시 온열환경 변화

- 한편 CRCP 시스템에서는 실온과 냉수평균온도(공급수온도와 환수온도의 평균)의 차이를 $\Delta \theta$ 라 하여 중요한 성능 지표로 고려하는데, $\Delta \theta$ 가 작을수록 실온과 냉수온도의 차이가 작다는 뜻이며, 이는 냉수온도를 실온과 가까운 수준으로 유지할 수 있다는 의미임.
- 통상적으로 냉동기의 효율은 냉수온도가 높을수록 향상되는 특성이 있으므로, 고온수 냉방을 할 경우 열원 효율 향상을 통해 냉방에너지 절감이 가능한데, $\Delta \theta$ 가 작을수록 고온수 냉방의 가능성이 높다고 할 수 있음.
- h-CRCP 시스템 적용 시, $\Delta \theta$ 가 감소함에도 불구하고 냉방용량은 커지는 경향을 나타내었으며, 이는 기존 CRCP 운전에 필요한 냉수온도보다 더 높은 온도로 h-CRCP 시스템을 운전할 수 있는 가능성을 내포하므로, 냉방에너지 절감 및 결로 방지 성능의 향상 효과 또한 얻을 수 있을 것으로 판단됨.



[그림 51] h-CRCP 시스템 적용 시 $\Delta \theta$ 및 냉방용량 관계

(나) h-CRCP 시스템 경제성 분석

○ 경제성 분석 개요

- h-CRCP 시스템의 적용 타당성 검토를 위해, 기존 시스템(폐쇄형 CRCP 시스템) 대비 추가되는 초기투자비, 유지관리비를 산정하고, h-CRCP 시스템에 의한 에너지 비용 절감액을 산출하여 단순회수기간법(Simple payback period method)으로 ROI를 산출
- Test-bed에서 수행된 냉방에너지 평가 Case를 대상으로 경제성을 분석
- 즉, 폐쇄형 CRCP 시스템을 기준 Case로 설정하고, 개방형 설치와 에어컨쿨레이터의 유무에 따라 추가되는 비용(초기투자비, 유지관리비)과 절감되는 비용(운전비)를 산출하여 ROI를 산출
 - Case 1: 폐쇄형 CRCP 시스템
 - Case 2: 폐쇄형 CRCP + 에어컨쿨레이터
 - Case 3: 개방형 CRCP
 - Case 4: 개방형 CRCP + 에어컨쿨레이터

① 초기투자비 증가 비용

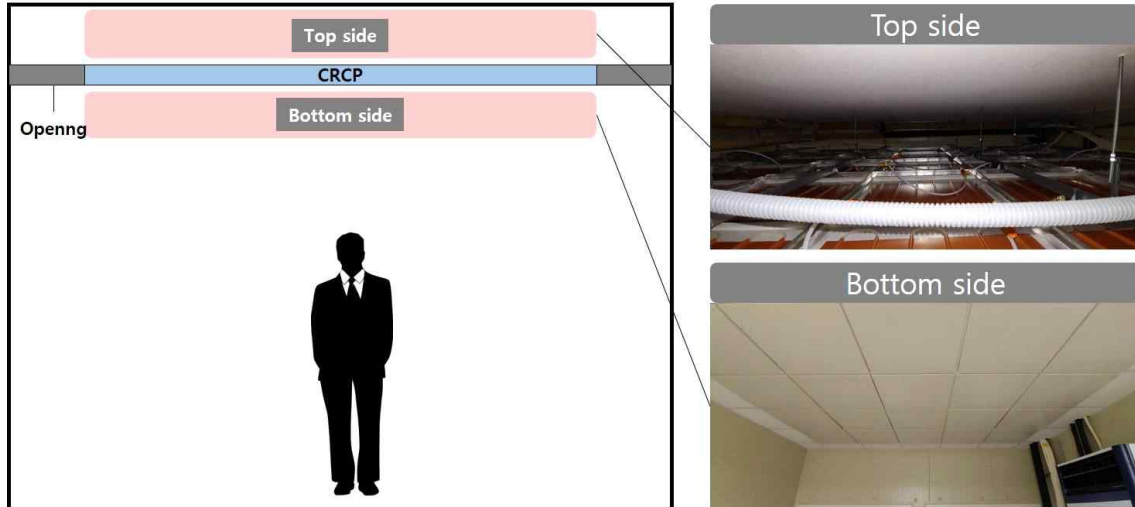
- 모든 Case에서 공통되는 패널, 열원 및 반송계통의 설비는 초기투자비를 별도로 증가시키지 않으므로 분석에서 제외
- 초기투자비가 증가되는 것은 에어컨쿨레이터(Vornado 530 모델)를 설치한 Case 2, 4이며, 에어컨쿨레이터의 단가(43,700원)에 에어컨쿨레이터 설치개수(2개)를 곱하여 산출(87,400원)

② 유지관리비용 산정

- h-CRCP 시스템 적용 시, 개방형 설치에 의해 패널 표면에 먼지가 부착되거나, 플레넘 공간의 먼지가 거주역으로 비산될 우려가 있으므로 먼지 제거와 관련된 유지관리비용 및 원활한 냉수순환을 위해 필요한 배관 내 스케일, 녹 제거 기준 비용 산정

○ 패널 표면 먼지 제거

- 천장 복사 냉방패널이 설치된 1개 실을 대상으로 유지보수 비용 산정
- 하절기 냉방패널 가동 시기(6월-8월)의 첫 가동 시, 하절기 마감에 따른 가동 종료 시 총 2회 실시하며 청소 시간은 과제 수행 중 실제 청소 시간을 반영하여 4시간으로 산정
- 통계청의 경제활동 인구조사(2020년 8월) 기준 근로자의 평균 임금은 264만 3천원이며, 하루 8시간씩 월 20일 근로하는 경우를 가정하여 시급 약 1만 7천 적용

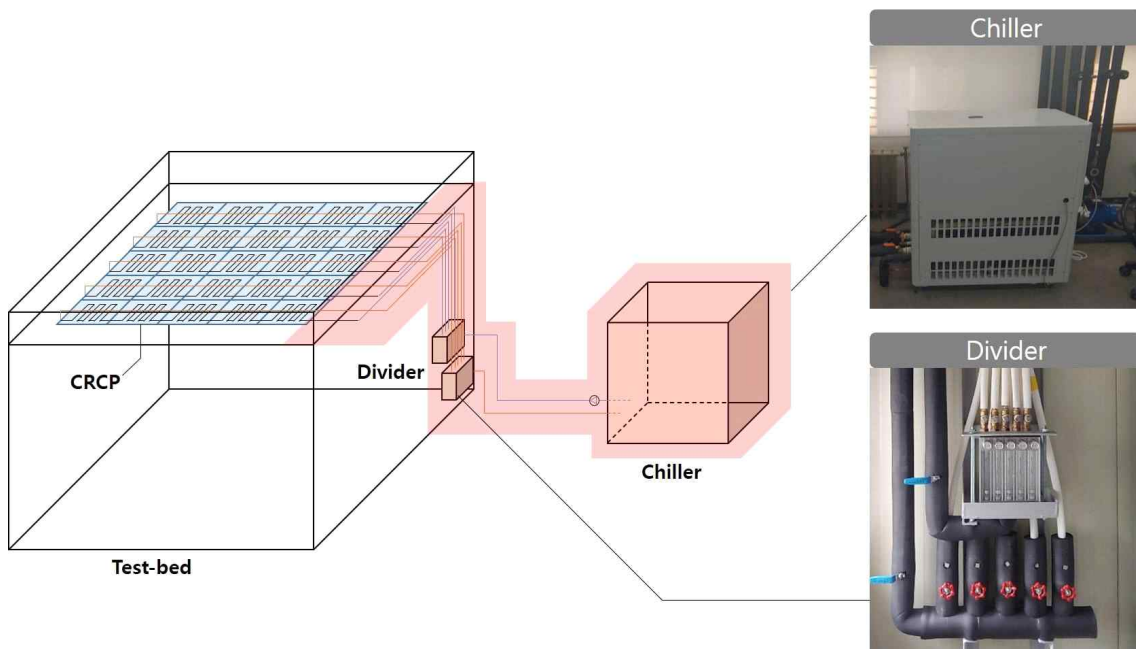


[그림 52] 먼지 제거 부위

<표 30> 2020년 8월 근로형태별 평균 임금

	임금 근로자	정규직	비정규직	한시적	기간제		시간제	비전형
					기간제	비기간제		
' 19. 6 ~ 8월 평균	264.3	316.5	172.9	186.0	180.6	207.0	92.7	185.8
' 20. 6 ~ 8월 평균	268.1	323.4	171.1	185.7	187.7	174.1	90.3	185.4
전월 대비	증감	3.8	6.9	-1.8	-0.3	7.1	-32.9	-2.4
대비	증감률	1.4	2.2	-1.0	-0.2	3.9	-15.9	-0.2

○ 냉동기 및 펌프 배관 청소



[그림 53] 배관 내부청소 부위

- 하절기 냉방패널 가동 시기(6월-8월)의 첫 가동 시, 하절기 마감에 따른 가동 종료 시 총 2회 실시 가정
- 청소 비용은 관련 업종 보일러 배관 청소 비용 평균가인 140,800원 적용

<표 31> 유지보수 비용 산정 기준

종류	유지보수 내용	유지보수 주기	비용[원]
냉동기 및 펌프	내부 스케일 및 녹 제거	연 2회	281,600
냉방 패널 및 플레넘 공간	패널 표면 먼지 제거	연 2회	136,000

③ 에너지 절감 비용 산정

- 기존 CRCP 시스템 대비 소비전력량의 감소분을 전기요금으로 환산하여 산정
- 전기 요금은 한국전력공사가 제공하는 요금표(적용일자 2021년 1년 1일 기준) 중 일반용 전력 I 형(갑) 저압전력 기준을 적용
- 일일 가동 시간 10시간, 가동 기간은 6월~9월로 산정
- 계약전력(기본요금)은 5kW를 적용
- 패널의 폐쇄형/개방형 배치를 위한 천장마감 설치/제거비용은 천장 복사 냉방패널 도입 시기에 따라 다르므로 없는 것으로 가정

<표 32> 한국전력공사 전기요금표

구분		기본요금 [원/kW]	전력량 요금 [원/kWh]		
			여름철(6~8월)	봄·가을철(3~5,9~10월)	겨울철(11~2월)
저압전력		6,160	100.7	60.2	87.3
고압A	선택 I	7,170	110.9	66.9	98.6
	선택 II	8,230	106.9	62.6	93.3
고압B	선택 I	7,170	108.8	65.8	95.6
	선택 II	8,230	103.5	60.5	90.3

○ 에너지 절감 비용 및 ROI 산정 결과

- 기존 시스템(Case 1)에 에어서큘레이터를 추가한 Case 2의 경우 초기투자비 증가액은 87,400원, 에너지 절감액은 38,838원으로 단순 회수기간으로 산출한 ROI는 2.25년
- 기존 시스템(Case 1)에 개방형 설치만 적용한 Case 3의 경우 초기투자비 증가액은 없으나 개방형 설치에 의한 패널 상부 유지관리비용이 136,000원 증가하므로, 단순회수기간으로 산출한 ROI는 1.39년
- 기존 시스템(Case 1)에 에어서큘레이터와 개방형 설치를 모두 적용한 Case 4의 경우 에어서큘레이터에 의한 초기투자비 증가액 87,400원, 개방형 설치에 의한 패널 상부 유지관리비용 증가액 136,000원이 발생하므로, ROI는 2.23년으로 산출

- h-CRCP 시스템은 3년 이내의 투자회수 기간을 나타내어 충분히 경제성이 있다고 판단되나, 이 결과는 1개 실을 대상으로 산출된 것이므로, 건물 단위에서 h-CRCP 시스템을 적용하였을 경우 경제성 분석에 대한 추가 연구가 필요함.

<표 33> h-CRCP 시스템 대안별 소비전력량

Case	내용	패널시스템 소비전력량 [Wh]	기류순환설비 소비전력량 [Wh]
Case 1	폐쇄형 CRCP	34,001	0
Case 2	폐쇄형 CRCP + 에어서쿨레이터	29,772	720
Case 3	개방형 CRCP	25,190	0
Case 4	개방형 CRCP + 에어서쿨레이터	24,216	720

<표 34> h-CRCP 시스템 ROI 산출 결과

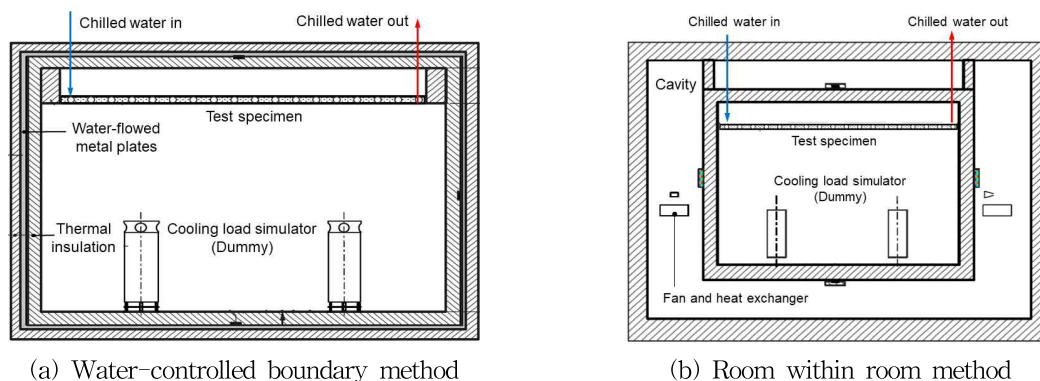
Case	초기투자비 증가분 [원] (A)	유지관리비 추가분 ^(*) [원] (B)	운전비 [원] (C)	폐쇄형 배치 대비 운전비 차액 [원] (D)	폐쇄형 배치 대비 ROI [년] (E=(A+B)/D)
Case 1	-	-	407,202	-	-
Case 2	87,400	-	368,354	38,848	2.25
Case 3	-	136,000	309,660	97,543	1.39
Case 4	87,400	136,000	306,857	100,346	2.23

(*) 개방형 설치에 따른 패널상부 청소 관련 유지관리비용만 추가

(5) 단일 패널대상 냉방용량 평가 유닛 개발

○ 냉방용량 평가 유닛 개발 필요성

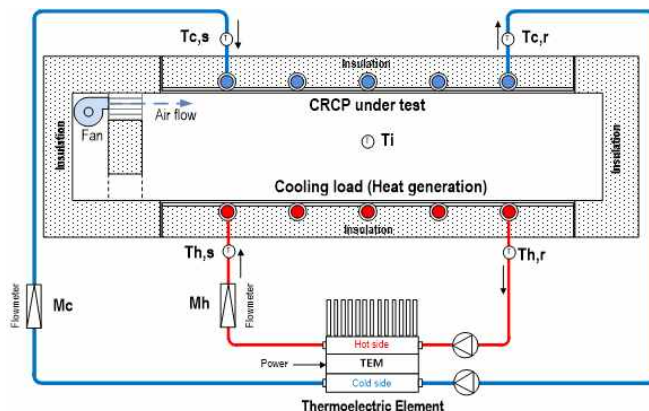
- CRCP 시스템 적용 시 중요한 것은, 냉방패널이 실내로부터 얼마만큼의 열량을 제거할 수 있느냐, 즉 얼마만큼의 냉방용량을 확보할 수 있느냐 하는 것으로, 이러한 냉방용량을 평가하는 기준인 EN 14240(CEN, 2004), ASHRAE Standard 138(ASHRAE, 2013)에서는 실험실에서의 측정을 통한 평가방법을 제시하고 있음.
- 이러한 기준들에서는 벽체 온도가 일정하게 제어되는 챔버 안에 CRCP를 설치하거나, 챔버 내외부 온도가 제어되는 실험 챔버 안에 CRCP를 설치한 후, 전기 발열체로 냉방부하를 가했을 때 CRCP가 흡수한 열량을 측정함으로써 냉방용량을 산정하도록 되어 있음.
- 실험실 기반의 냉방용량 평가방법은 매우 정밀한 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있으나, 실험 챔버 구축에 따른 시간과 비용의 부담, 챔버 표면온도 또는 챔버 안팎의 온도 제어에 대한 어려움이 있을 뿐 아니라, 단일 CRCP에 대한 냉방용량 평가가 쉽지 않은 단점이 존재
- CRCP의 냉방용량을 증대시키기 위해 패널 표면의 기류속도를 증가시키는 대안이 제안되고 있는데(Shin et al., 2019; Shin and Rhee, 2019; Kim et al., 2018), 앞에서 언급한 기술 기준은 실험실 전체 공간을 대상으로 CRCP의 냉방용량을 평가하게 되어 있으므로 패널 표면의 기류속도를 직접적으로 제어하면서 냉방용량의 변화를 분석할 수 있는 평가방법은 마련되어 있지 않은 실정
- 또한 천장면에 기류를 공급할 때 급기장치에서 멀어짐에 따라 패널 표면에서의 기류속도가 감소하므로, 여러 장의 CRCP에 동일한 기류속도를 유지하면서 냉방용량을 측정하는 것은 현실적인 어려움이 있음.
- 이러한 한계점을 보완하기 위해 본 과제에서는 실험실 기반의 냉방용량 평가방법과 달리, 소형의 실험 챔버로 단일 CRCP의 냉방용량을 간략하게 평가할 수 있으며, 패널 표면의 기류속도를 직접 변화시키면서 냉방용량의 변화를 분석할 수 있는 냉방용량 평가 유닛을 개발



[그림 54] 실험실 기반의 CRCP 냉방용량 평가 개념

○ 냉방용량 평가 유닛 개념

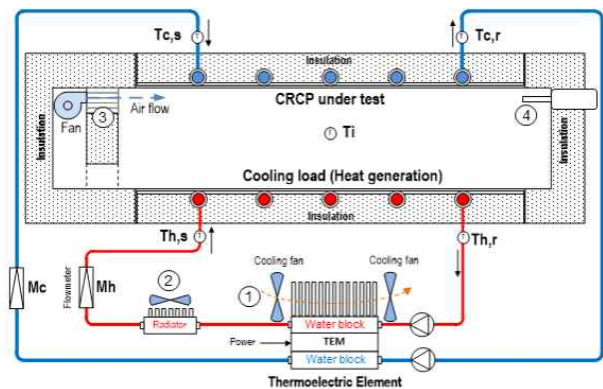
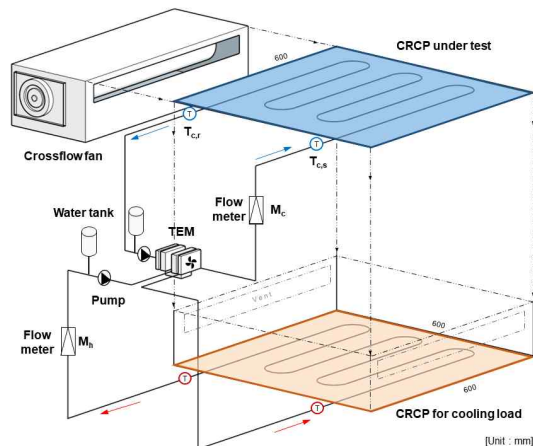
- 단일 CRCP 대상의 소규모 냉방용량 평가 유닛 개발을 목적으로 설정하였으므로, 실험실 기반의 평가방법에서 이용되는 전기 발열체가 아닌 CRCP를 냉방부하 재현 용도의 방열장치로 활용.
- 단열재로 구획된 소형 챔버의 상부에는 평가대상 CRCP를 설치하여 냉수를 공급하고, 하부에는 별도의 CRCP를 설치하되 온수를 공급하여 면발열의 형태로 냉방부하를 재현하였음.
- 단일 CRCP에 대한 냉방용량 평가를 위해서는 소용량의 컴팩트한 열원 구성으로 냉온수를 동시에 공급하는 것이 필요하므로, 흡열 및 방열이 동시에 일어나는 열전소자를 냉수 및 온수 제조를 위한 열원으로 활용
- 열전소자의 흡열부측 Water block에 물을 통과시켜 CRCP 운전에 필요한 냉수를 생산하고, 방열부측 Water block에 물을 통과시켜 냉방부하 재현을 위한 온수를 생산하도록 계획
- 또한 CRCP 표면에서의 기류속도에 따른 냉방용량 평가를 위해, CRCP 표면에 넓은 폭의 기류를 형성시킬 수 있도록 횡류팬을 설치하고, 팬 공급전압을 변화시켜 패널 표면에서의 기류속도를 조절하도록 계획



[그림 55] CRCP 냉방용량 평가 유닛 개념

○ 냉방용량 평가 유닛 구현

- 평가 대상 CRCP는 $0.6\text{m} \times 0.6\text{m}$ 크기로, 이를 수용하기 위해 안목치수 $0.76\text{m(L)} \times 0.6\text{m(W)} \times 0.3\text{m(H)}$ 크기의 챔버를 제작하고, CRCP 상부와 측면에서의 열손실/열획득을 최소화하기 위해 패널 상부와 측면을 30mm 두께의 단열재(비드법2종)로 마감
- 챔버 상부에는 평가대상 CRCP, 하부에는 냉방부하 모사용 CRCP를 설치하고 각 CRCP의 배관 입출구를 연장하여 열전소자 모듈(TEM)의 흡열측 및 방열부측 Water block에 각각 연결
- 각 CRCP의 냉온수 순환을 위해 순환펌프를 설치하고, CRCP 배관 입출구에 T-type 열전대를, 배관의 수직부에 용적식 유량계를 설치하여 냉방용량 산출에 활용



[그림 56] CRCP 냉방용량 평가유닛 구현

- 열전소자는 Hot side에서의 방열이 잘 일어나지 않을 경우 Cold side에서의 냉각효과도 떨어져 원하는 만큼의 냉수온도를 얻을 수 없을 뿐 아니라, 냉방부하 모사용 CRCP에 공급되는 온수의 온도 또한 과도하게 상승하여 냉방용량 평가가 어려워지게 되므로 CRCP 냉방용량 평가에 적합한 냉온수 온도를 얻기 위해, Hot side 측에 방열을 촉진하기 위한 냉각팬을 설치하였으며, 추가적인 방열이 필요할 경우 온수측에 별도의 Radiator를 설치하여 냉온수 온도를 조절할 수 있도록 함.
- CRCP 표면에서의 기류속도에 따른 냉방용량 변화를 분석하기 위해, CRCP의 측면에서 넓은 폭의 기류를 공급할 수 있는 횡류팬을 설치하되, 빨대 다발로 구성된 저항체를 팬 후단에 설치함으로써 풍속이 2.0m/s를 초과하지 않도록 하였음. 이 장치는 간단한 구조이나 기류속도를 효과적으로 저감시키는 한편, 기류가 패널 표면을 따라 흐트러지지 않고 흐르도록 하기 위해 설치함.

- CRCP 표면에서의 기류속도에 따른 냉방용량 변화를 분석하기 위해, CRCP의 측면에서 넓은 폭의 기류를 공급할 수 있는 횡류팬을 설치하되, 빨대 다발로 구성된 저항체를 팬 후단에 설치함으로써 풍속이 2.0m/s를 초과하지 않도록 하였음. 이 장치는 간단한 구조이나 기류속도를 효과적으로 저감시키는 한편, 기류가 패널 표면을 따라 흐트러지지 않고 흐르도록 하기 위해 설치함.

<표 35> CRCP 냉방용량 평가유닛 주요 구성요소

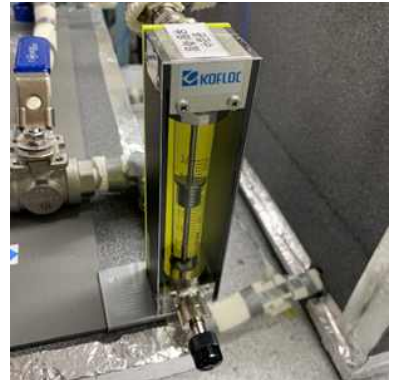
	CRCP	TEM	Cooling fan	Pump	Flowmeter	Fan controller
Type	Metal panel+ conductive plate	12V Peltier module	DC 12V box fan	Micro Diaphragm	Volumetric, H ₂ O	Triac phase control
Size	0.6m×0.6m	0.04m×0.04m	0.09m×0.09m	6.5mm	6.5mm	0.035m×0.047m
Spec.	–	$\Delta T_{\max}$ =55K	1700 rpm	3.0 lpm	0.3~3.0 lpm	50~220V
Photo						



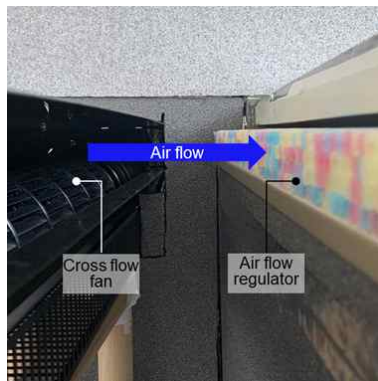
(a) 열전소자



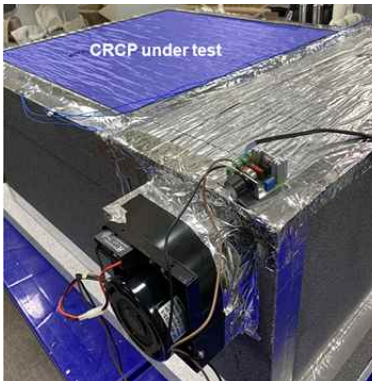
(b) 수배관 구성



(c) 유량계



(d) 횡류팬 및 기류감쇠 장치



(e) 횡류팬 및 풍량조절기



(f) 유닛 외형

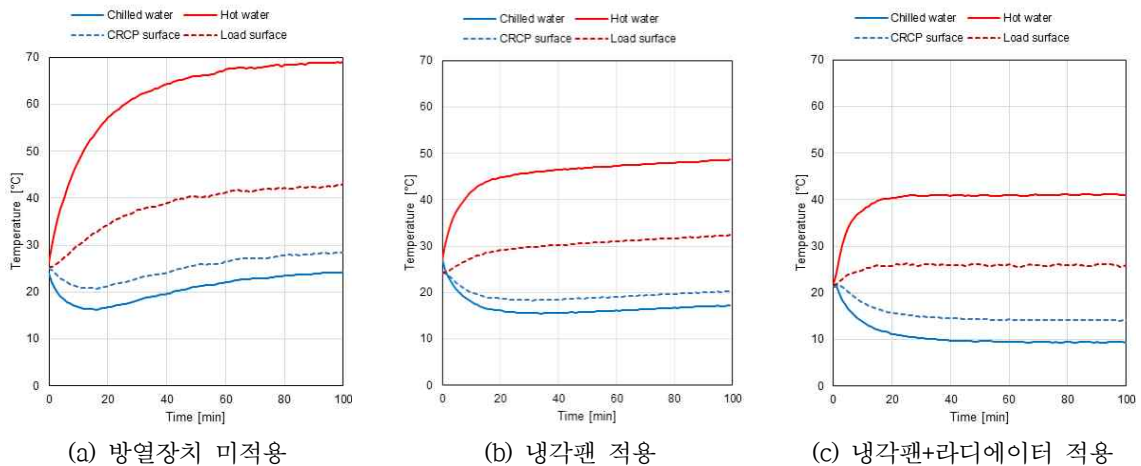
[그림 57] CRCP 냉방용량 평가유닛 구현 결과

○ 냉방용량 평가 유닛 예비 성능평가

- 냉방용량 평가에 적합한 온도의 냉온수를 열전소자로 생산할 수 있는지를 검토하기 위한 예비 성능평가 수행
- 열전소자에 어떠한 방열장치를 적용하지 않은 경우, 열전소자의 Hot side에서 방열이 충분히 이루어지지 않아 측정시작 후 약 100분이 지났을 때 온수온도가 70° C까지 과도하게 상승하고, 그에 따라 냉수온도 또한 25℃까지 지속적으로 상승하였으며, 그 이상 측정을 진행할 경우 통상적인 CRCP 운전 범위를 벗어날 뿐 아니라, 과열로 인해 열전소자의 고장 우려가 있으므로 열전소자 Hot side에서의 방열을 더욱 촉진시킬 필요가 있음.
- 열전소자의 Hot side에 두 개의 냉각팬을 설치한 경우, 냉온수온도와 CRCP 표면온도가 대폭 낮아졌으나, 각각의 온도가 평형상태에 이르지 못하고 지속적으로 상승하는 것으로 나타나 이 역시 냉방용량 평가에는 부적합하였음.
- 열전소자의 Hot side에 부착한 냉각팬만으로는 방열이 충분하지 않으므로, 온수측 배관에 Radiator를 추가로 설치한 경우에는 측정시작 후 30분 가량 경과된 후 냉수온도는 약 10° C, 온수온도는 약 41° C에서 안정적으로 유지되며, 평가대상 CRCP의 표면온도 또한 약 14.2° C로 유지되었는데, 이는 공기온도 25℃, 50%에서의 노점온도인 13.8° C 보다는 높은 수준으로 CRCP의 운전조건에도 적합하였음.
- 열전소자의 Hot side의 냉각팬과 온수 배관측의 Radiator를 병용하여 CRCP 냉방용량

을 평가하는 것이 타당하다고 판단되며, 일반적으로 열전소자는 흡열량과 투입전력의 합한 열량만큼을 방열해야 냉각성능을 유지할 수 있으므로, 열전소자 Hot-side 및 온수배관 계통에서 충분한 방열이 이루어지도록 시스템을 설계할 필요가 있다고 사료됨.

- 다만 열전소자의 흡방열 특성, 냉각팬 및 Radiator의 개수 및 풍량, 냉온수 순환수량에 따라 흡방열량이 달라질 수 있으므로, 냉온수 온도를 특정 설정값으로 제어하기 위해서는 열전소자의 흡방열에 관여하는 인자들의 상관 관계에 대한 추가 연구가 필요함.



[그림 58] CRCP 냉방용량 평가유닛 예비 성능평가 결과

○ Full-scale 실험과의 비교 검증

- 냉방용량 평가 유닛을 활용하여, 패널 표면에 별도의 기류를 형성하지 않는 기본 조건에서 단일 CRCP의 냉방용량을 측정
- 냉방부하 26W (56.5 W/m^2), 패널 표면온도 14.2°C , 실내온도 20.8°C , 냉수유량 2.15 lpm의 조건으로 냉방용량을 측정한 결과 103.3 W/m^2 의 냉방용량이 도출되었음.
- 평가 유닛에 적용된 것과 동일한 CRCP 25장을 Full-scale 실험실에 설치하여, CRCP 냉방용량 평가 유닛과의 비교 검증 실험을 진행하였음.
- 비교 실험을 위해 패널표면온도, 실내온도, 냉수유량을 CRCP 평가 유닛의 운전 조건과 최대한 동일하게 유지하되, 냉방부하의 경우 EN 14240에서 규정한 전기 발열체를 이용하여 900W (56.3W/m^2)로 재현
- Full-scale 실험과의 비교 결과, 냉방용량 평가유닛에 의한 냉방용량은 Full-scale 실험 결과에 비해 4.8W/m^2 더 크게 측정되었는데, 이는 평가 유닛의 경우 Full-scale 실험실에 비해 패널과 인접표면 간의 거리 및 공기의 체적이 더 작아, 냉방 패널의 부하 제거 효과가 더 크게 나타날 수 있으므로 냉방용량이 상대적으로 더 크게 평가된 것으로 사료됨.
- 냉방용량의 오차 비율은 4.4%로, 비교적 간단한 실험체 구성과 측정 방법으로도 실제 냉방용량과 유사한 결과를 얻을 수 있어 본 과제에서 제안한 평가 방법을 복사냉방 패널 냉방용량 평가에 충분히 활용할 수 있을 것으로 판단됨.

<표 36> CRCP 냉방용량 평가유닛 검증 실험 결과

Test result	Panel surface temperature	Room air temperature	Cooling capacity
Full-scale 실험	13.8° C	21.9° C	98.5 W/m ²
평가유닛 실험	14.2° C	20.8° C	103.3 W/m ²
차이	+0.4° C (+3%)	-1.1° C (-5%)	+4.8 W/m ² (+4.4%)

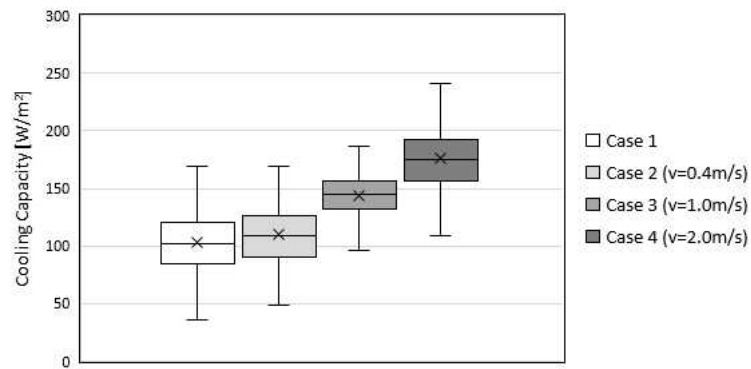
- 그러나 냉방용량 오차를 최소화하기 위해서는 Full-scale 실험에서와 동일한 열전달 재현 방안이 필요하며, 이를 위해서는 냉방부하 모사용 패널의 표면온도, 평가 유닛 내부의 표면온도 조정, 패널표면 기류속도의 조정 등 경계조건 설정에 대한 추가 연구가 수행될 필요가 있음.

○ 기류속도에 의한 냉방용량 증대효과 분석

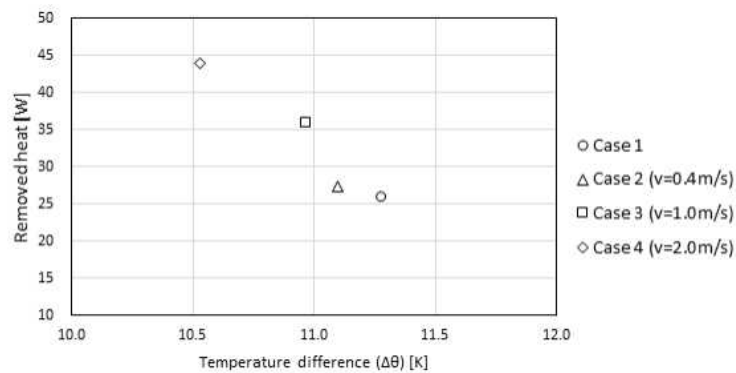
- 패널 표면의 기류속도 변화에 따른 냉방용량 변화를 평가하기 위해, 아무런 기류를 발생시키지 않은 경우를 Case 1로 하고, 패널 표면의 기류속도를 0.4m/s, 1.0m/s, 2.0m/s로 변화시킨 경우를 각각 Case 2, 3, 4로 설정
- 각 Case는 동일한 유량 조건(냉수 2.15 lpm, 온수 1.6 lpm) 에서 1시간 30분 이상 측정을 진행하였으며, 냉온수 온도 및 CRCP 표면온도가 정상상태에 이르기 전의 초기 30분 데이터는 제외하고 냉방용량을 산출하였음.
- 기류를 발생시키지 않은 Case 1의 냉방용량은 평균 103.3 W/m²로 측정되었으며, Case 2~4에서와 같이 패널 표면에 기류를 발생시킬 경우, 대류열전달계수의 증가로 표면열 전달이 촉진되어 패널이 흡수하는 열량이 증가함에 따라 냉수온도차가 커지는 경향이 확인되었음.
- 기류속도가 2.0m/s까지 증가할 경우 기준 Case (Case 1)와 비교하여 약 70%의 냉방용량 증대효과를 얻을 수 있는 것으로 나타나, 개발된 냉방용량 평가유닛을 활용하여 h-CRCP 시스템의 냉방용량 증대 가능성을 확인하였음.

<표 37> 기류속도에 의한 냉방용량 증대효과 평가 결과

	Case 1 (Baseline)	Case 2	Case 3	Case 4
Air velocity	0.05 m/s	0.4 m/s	1.0 m/s	2.0 m/s
Chilled water flow rate	2.15 lpm	2.15 lpm	2.15 lpm	2.15 lpm
Chilled water ΔT(Min)	0.03 °C	0.06 °C	0.08 °C	0.17 °C
Chilled water ΔT(Max)	0.30 °C	0.30 °C	0.34 °C	0.43 °C
Chilled water ΔT(Mean)	0.17 °C	0.18 °C	0.24 °C	0.29 °C
Removed heat (Mean)	26.0 W	27.6 W	36.2 W	44.4 W
Cooling Capacity (Mean)	103.3 W/m ²	109.5 W/m ²	143.8 W/m ²	176.0 W/m ²
Increase ratio	-	6.0 %	39.2 %	70.4 %



[그림 59] 기류속도에 따른 냉방용량 변화



[그림 60] 기류속도에 따른 $\Delta\theta$ -제거열량 관계

- 각 Case의 냉수평균온도-실내온도차 ($\Delta\theta$)와 제거열량 간의 관계를 분석한 결과, 기류속도가 클수록 (즉 Case 1에서 4로 갈수록) 작은 $\Delta\theta$ 로 더 많은 열량이 제거되는 것으로 나타남.
- 이는 기류속도가 증가할수록 CRCP 표면과 실내공기와의 열교환이 촉진되어, 냉수온도와 실내온도 간의 차이가 줄어들었기 때문으로 해석할 수 있으며, 만약 동일한 제거열량을 확보하는 조건이라면, 패널 표면의 기류속도를 증가시킴으로써 $\Delta\theta$ 를 더욱 낮출 수 있을 것으로 예상됨.
- 결국 패널표면의 기류속도를 증가시킬 경우 좀 더 실온과 가까운, 즉 높은 온도의 냉수로 필요한 냉방용량을 확보할 수 있음을 의미하므로, CRCP 시스템 운전 시에 유발될 수 있는 결로를 방지하는 데에도 효과적일 것으로 예상됨.

(5) h-CRCP 시스템 설계 가이드라인 도출

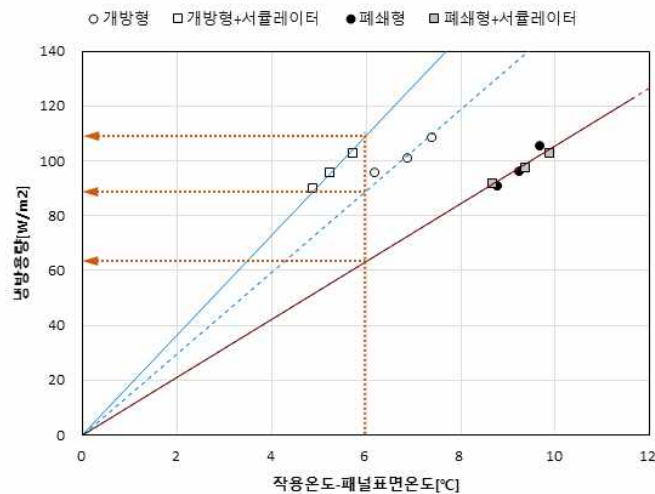
○ 설계 가이드라인 필요성

- 본 과제에서는 Test-bed 실험, CFD 시뮬레이션, 냉방용량 평가유닛 실험을 통해 h-CRCP 시스템의 냉방용량, 열쾌적성, 냉방 에너지 소비량 등의 기본 성능 데이터를 도출하였으며, 기존의 CRCP 시스템과 비교하여 적은 에너지로 동등 이상의 냉방성능을 확보할 수 있는 것으로 분석되었음.
- 위와 같은 기본 성능 데이터는 특정 조건에서 도출된 것으로, 실제 건물에 적용 시 설계조건이 바뀔 경우 냉방용량이나 에너지 성능 또한 본 과제의 결과와 달라질 수 있음.
- 예를 들어 실내설정 온도가 달라지거나, CRCP 시스템에 공급되는 냉수온도 조건이 변경되어 패널표면 온도가 달라질 경우 패널의 제거열량이 변화함으로써 냉방용량에 영향을 미칠 수 있음.
- 또한 본 과제에서는 공간에 냉방부하가 균일하게 가해지는 조건에서 냉방성능을 평가하였으나, 실제 건물에서 냉방부하가 불균등하게 가해질 경우, 예를 들어 외주부에 일사에너지가 증가하여 외주부-내주부 부하에 차이가 발생할 경우에는 h-CRCP 시스템의 냉방용량이나 열쾌적성에 부정적인 영향을 미칠 수 있음.
- 그러므로 h-CRCP 시스템의 실제 적용 시 Test-bed 실험이나 시뮬레이션과 다른 조건에서 시스템의 성능을 확보하기 위한 방안이 요구되며, 이를 설계 가이드라인의 형태로 제공하고자 하였음.

○ h-CRCP 시스템 cooling curve

- 본 과제의 Test-bed 실험에서 도출된 냉방용량은 특정 운전조건에서 측정된 패널의 제거열량을 통해 도출된 것으로, CRCP 시스템의 설계조건이 변경될 경우 냉방용량 또한 달라질 수 있음.
- EN 14240 기준을 준용하여, 설계조건의 변경을 실내온도(작용온도)와 패널표면온도의 함수로 반영하여, 작용온도-패널표면온도 차이에 따른 냉방용량을 CFD 시뮬레이션으로 해석하여 Cooling curve를 산출하였음.
- Cooling curve는 기존 CRCP 시스템(폐쇄형 CRCP), 폐쇄형 CRCP+에어 서큘레이터, 개방형 CRCP, 개방형 CRCP+에어 서큘레이터의 네 가지 대안에 대하여 패널표면온도를 16℃, 19℃, 22℃로 설정할 경우 실내 작용온도와 냉방용량을 분석하여 도출하였음.
- 폐쇄형 CRCP 시스템의 경우에는 운전조건 변화에 따른 냉방용량의 변화가 뚜렷하게 나타나지 않았으며, 개방형 CRCP 시스템의 경우 동일 운전조건에서 폐쇄형 CRCP 시스템에 비해 냉방용량의 증대 양상이 확연히 나타났음.
- 예를 들어 작용온도-패널표면온도 차이가 6K인 경우, 폐쇄형 CRCP 시스템의 냉방용량은 약 62 W/m²이나, 개방형 CRCP 시스템의 냉방용량은 88 W/m²로 증가하며, 개방형 CRCP 시스템에 에어서큘레이터를 추가할 경우 냉방용량은 약 110 W/m²까지 증가하는 것을 Cooling curve로 파악할 수 있음.

- 또는 Cooling curve를 활용하여, 특정 냉방용량을 확보하기 위해서 각 시스템 대안의 작용온도-패널표면온도 차이를 어떻게 설정해야 하는지를 파악할 수 있음.
- 또한 동일 냉방용량 조건에서는 h-CRCP 시스템의 작용온도-패널표면온도 차이가 작은 것을 볼 수 있는데, 이는 실내온도와 가까운 온도로 패널표면을 유지하면서도 냉방용량을 확보할 수 있다는 의미이므로, h-CRCP 시스템이 결로방지 측면에 있어서도 상당히 유리함을 확인할 수 있음.
- 다만 플레넘 팬이나 설비형 칠드빔을 병용한 h-CRCP 시스템의 Cooling curve는 해석 모델의 미비로 도출되지 못하였으며, 추가적인 분석을 통해 본 과제에서 제안한 h-CRCP 시스템에 대한 Cooling curve set를 도출할 계획임.

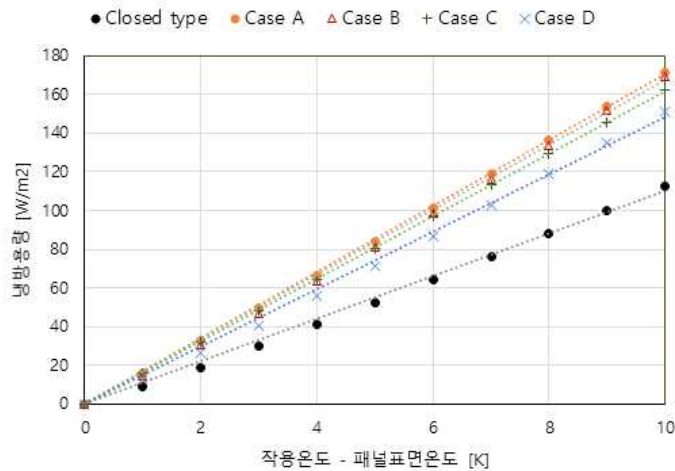


[그림 61] h-CRCP 시스템 Cooling curve 일례

- 또한 개방형 CRCP 시스템에 있어서 개구부의 면적이나 패널의 배치에 따른 냉방용량을 CFD 시뮬레이션으로 분석하여 cooling curve를 도출하였음. 즉 아래 표와 같은 조건의 패시브 h-CRCP 시스템에 대하여, 작용온도-패널표면온도 차이에 따른 냉방용량을 분석한 결과는 [그림 62]와 같음.

<표 38> 개구부 면적과 패널 배치에 따른 h-CRCP 검토 안

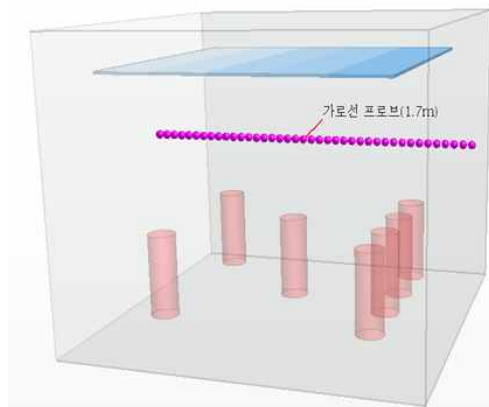
Case A	Case B	Case C	Case D
CRCPs (1.8 m × 1.8 m), 2 × 2	CRCPs (1.25 m × 1.6 m), 2 × 2	CRCPs (1.2 m × 1.35 m × 0.03 m), 2 × 2	CRCPs (1.0 m × 1.0 m), 2 × 2



[그림 62] 개구부 면적-패널 배치에 따른 Cooling curve

○ 부하불균등 조건에서 h-CRCP 시스템 설계 방안

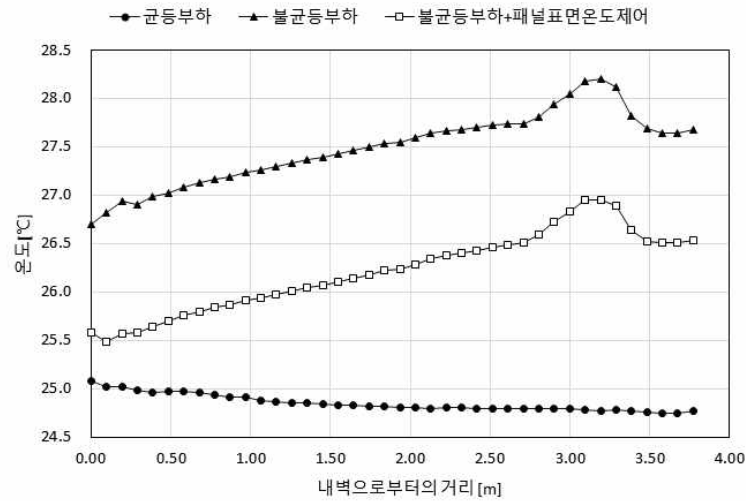
- 커튼월 외피로 구성된 사무소 건물에서는 통상적으로 외주부는 일사 에너지 유입이나 관류열획득으로 인해 내주부에 비해 냉방용량이 증가하게 되며, 이러한 부하불균등 조건에서는 공간에 따른 열쾌적도의 편차가 발생할 수 있음.
- CFD 시뮬레이션으로 부하불균등 조건을 재현하였을 경우 공간 내에서 온열환경 차이가 발생하는지 검토하였음



[그림 63] 부하 불균등 재현 모델

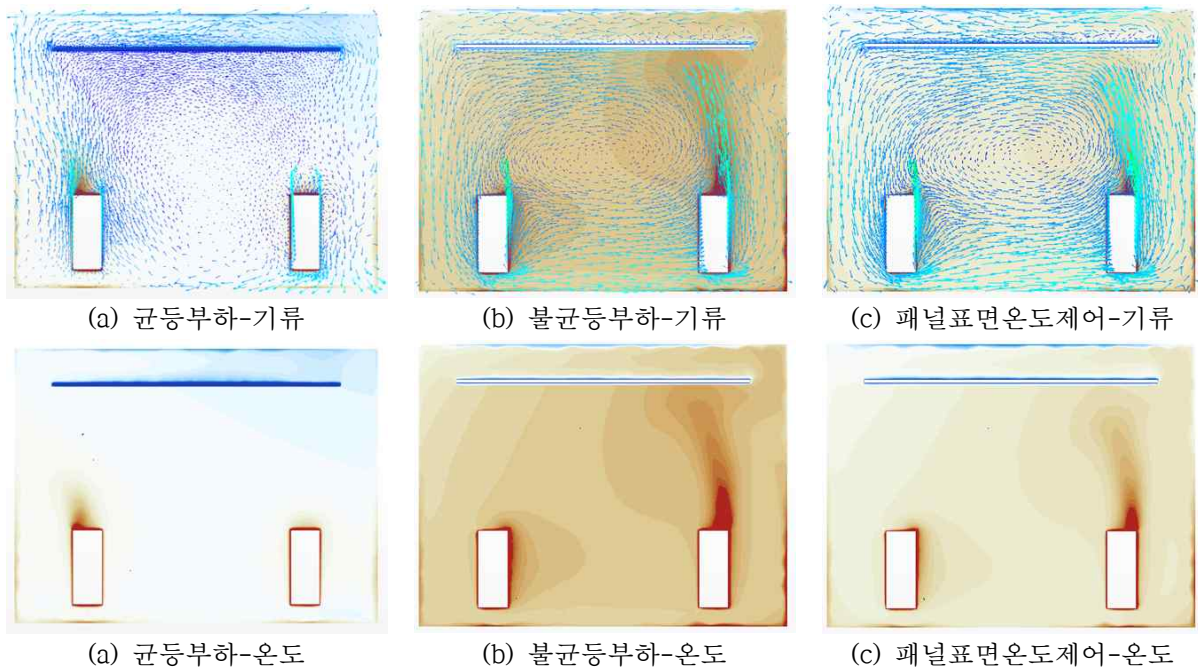
- 균등부하 조건(180W 발열체×5개)에서 h-CRCP 시스템의 패널표면온도를 모두 동일하게 18℃로 운전하였을 경우, 실내온도는 평균 24.9℃로 쾌적범위 이내에서 안정적으로 유지되었음.
- 불균등부하 조건(기존 부하에 외주부측으로 180W 발열체 2개 추가)에서 h-CRCP 시스템의 패널표면온도를 모두 동일하게 18℃로 운전하였을 경우, 실내온도는 평균 27.5℃로 쾌적범위를 초과하여 다소 높게 형성되었고, 공간별 편차도 크게 나타났음.
- 이러한 문제를 해소하기 위해, CRCP를 내주부에서 외주부까지 5개의 섹션으로 구분하고, 패널표면온도를 내주부에서부터 18℃, 17.2℃, 16.4℃, 15.6℃, 14.8℃로 점차 낮

아지는 조건으로 해석한 결과 실내온도는 평균 26.2℃로 쾌적범위에 근접하는 것으로 나타남.

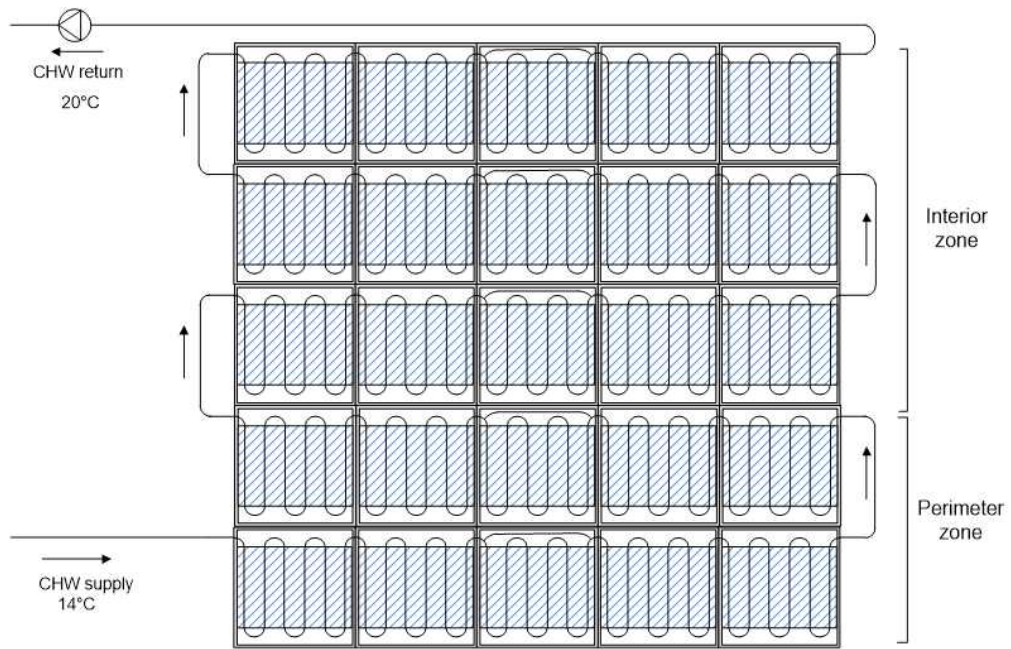


[그림 64] 균등부하 및 불균등부하 조건에서 실온 분포

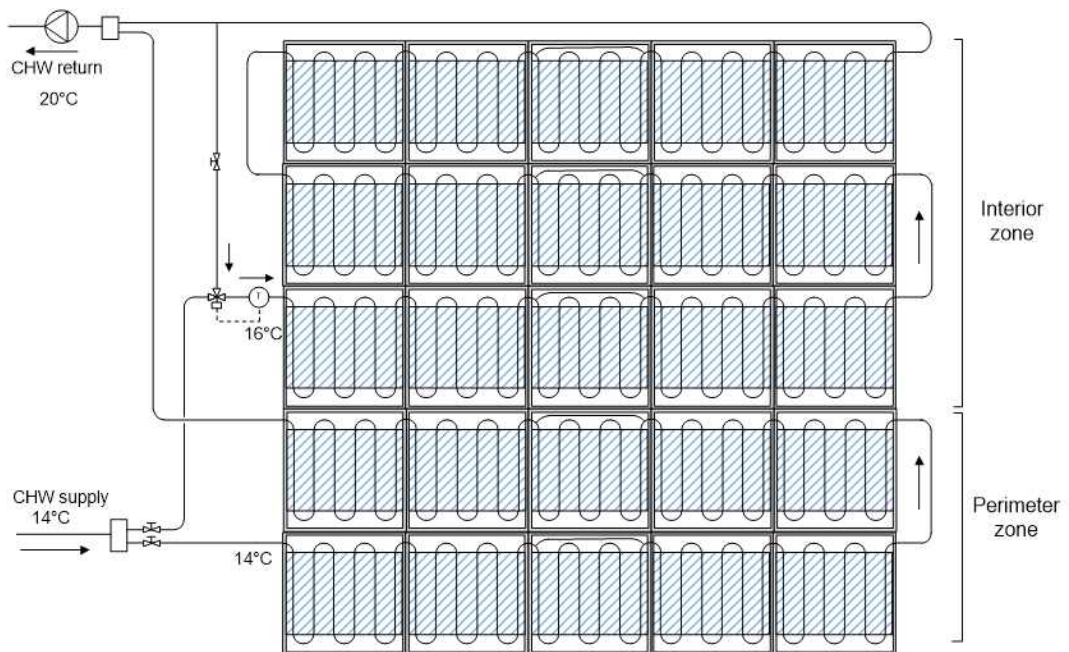
- 따라서 부하불균등으로 인한 문제를 완화하기 위해서는 외주부와 내주부를 담당하는 CRCP 표면온도를 다르게 제어하는 것이 필요하며, 이를 위해서는 냉수온도의 zone별 제어가 이상적이라고 하겠으나 하나의 열원으로 다른 온도의 냉수를 공급하는 것은 다소 까다로운 측면이 있음.
- 그러므로 외주부와 내주부를 구분하여 각 존별 3-way mixing 회로를 통해 냉수온도를 제어하거나, 외주부-내주부 패널의 수배관을 직렬로 연결하여 외주부 패널에 먼저 냉수를 공급하는 방안, 또는 CRCP로 구성된 zone을 외피와 직각 방향으로 설계하여 냉수가 외주부에서 공급되어 내주부에서 리턴되도록 하는 방안을 고려할 수 있음.



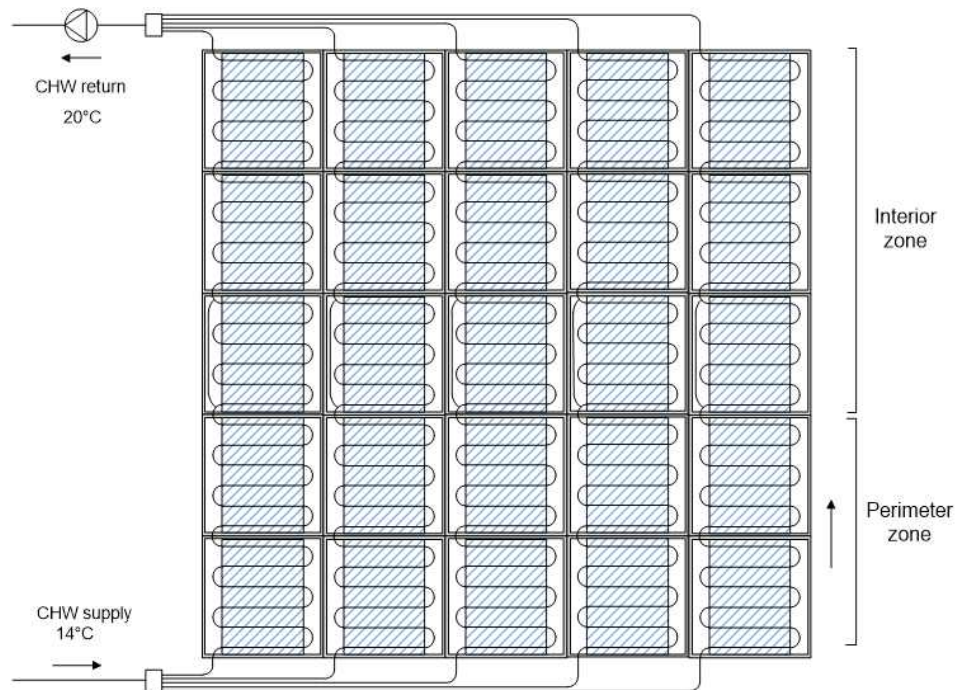
[그림 65] 균등부하 및 불균등부하 조건에서 CFD 해석 결과



[그림 66] 외주부-내주부 수배관 직렬연결



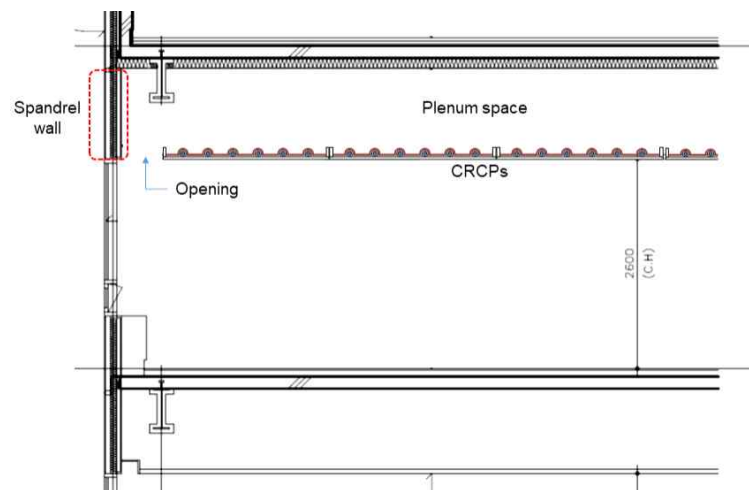
[그림 67] 외주부-내주부 냉수온도 존별 제어



[그림 68] CRCP zone을 외피에 직각으로 배치하는 방안

○ h-CRCP 시스템 적용을 위한 플레넘 조건

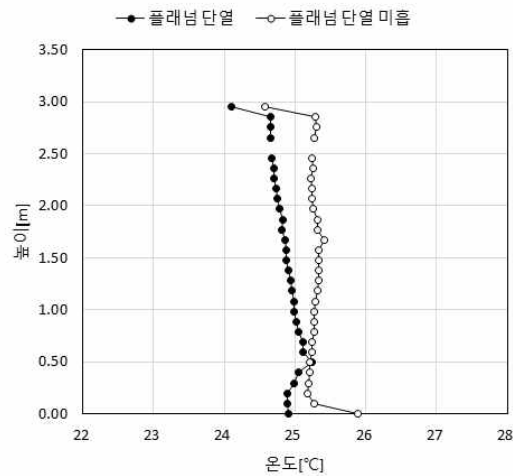
- h-CRCP 시스템의 주요 메커니즘은 냉각된 플레넘 공기를 거주역 냉방에 활용하는 것이므로, 냉방운전 시 플레넘 공기의 상태가 중요한 요소 중의 하나임.
- 플레넘 공간을 둘러싸고 있는 측면 벽체(Spandrel wall)의 단열이나 기밀성이 확보되지 않을 경우, 플레넘 공기의 온도가 상승하여 h-CRCP 시스템이 플레넘 공기를 거주역 냉방에 활용하기 어려워질 뿐 아니라 냉방부하를 증가시키는 역효과를 불러올 수 있음.



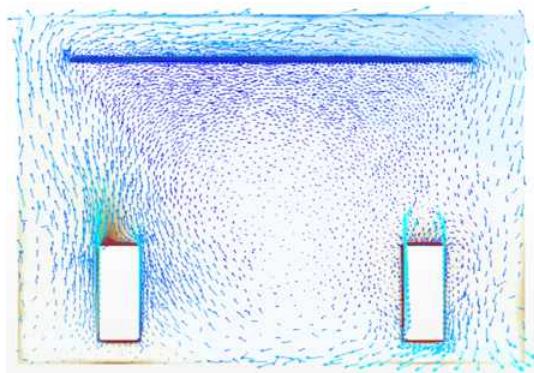
[그림 69] Spandrel wall과 플레넘 단면

- CFD 시뮬레이션을 통해 Spandrel wall의 열저항을 $1.71 \text{ m}^2\text{K/W}$ 에서 $0.86 \text{ m}^2\text{K/W}$ 으로 낮추어 단열성능이 저하된 경우를 해석한 결과, 플레넘 공기온도는 24.5°C 에서 25.1°C 로, 실내온도는 24.9°C 에서 25.3°C 로 상승하였음.

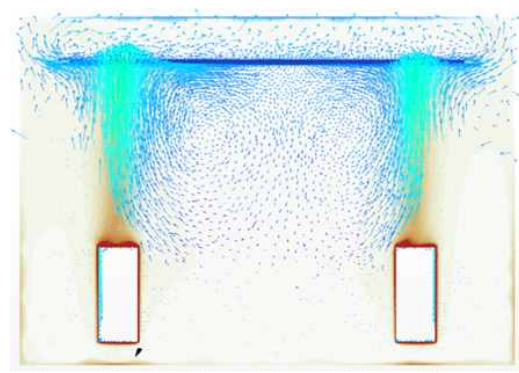
- CFD를 통한 온도 및 기류해석 결과를 볼 때 플레넘 단열이 미흡할 경우, 플레넘 공기가 거주역 냉방에 활용되지 못하고 실온이 상대적으로 높게 형성되는 경향을 볼 수 있음.
- 만약 Spandrel wall을 통해 일사 열에너지가 흡수되거나, 기밀성이 떨어지는 부위를 통해 외기가 유입된다면 플레넘 공기의 온도는 더욱 상승할 수 있으므로, h-CRCP 시스템의 냉방효과를 확보하기 위해서는 플레넘 공간을 둘러싼 외벽의 단열 및 기밀 성능 확보에 유의해야 함.



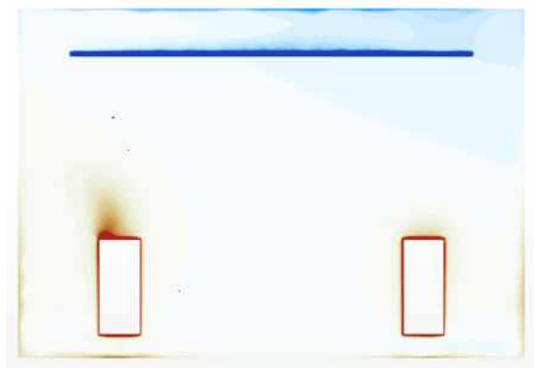
[그림 70] 플레넘 단열정도에 따른 수직온도



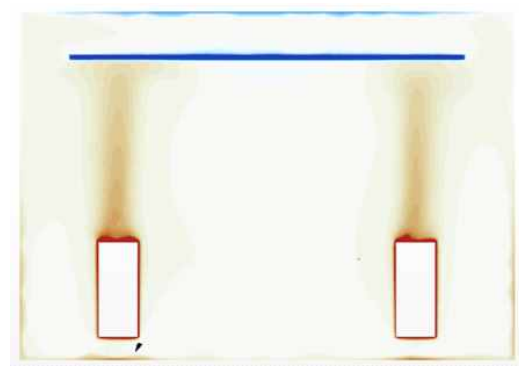
(a) 기류 분포 (플레넘 정상 단열 시)



(b) 기류 분포 (플레넘 단열 미흡 시)



(c) 온도 분포 (플레넘 정상 단열 시)

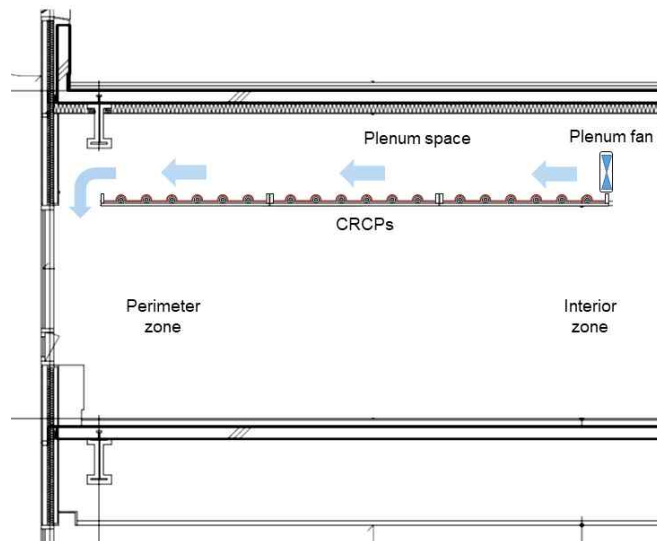


(d) 온도 분포 (플레넘 단열 미흡 시)

[그림 71] 플레넘 단열정도에 따른 실내 기류 및 온도분포

○ 플레넘 팬의 적정 수량 및 배치 방안

- Test-bed 실험 결과, 개당 풍량 52CMH인 플레넘 팬을 10개 설치하였을 경우 냉방용량 증대효과가 컸으며, 팬 수량을 그 이상로 늘렸을 경우의 냉방용량 증가 효과는 크지 않았음.
- CRCP의 면적당 플레넘 팬의 급기풍량은 약 58 CMH/m^2 으로, 냉방용량 증대를 위해 플레넘 팬을 적용할 경우 팬 수량을 이 수준에 맞추어 선정하면 될 것으로 사료됨.
- 그러나 플레넘 공간의 형상 (천장면의 면적, 중횡비, 플레넘 공간의 높이)에 따라 플레넘 팬에 의한 기류 이동 양상이 변화할 수 있으므로, 다양한 플레넘 조건에서 적정 풍량 선정에 대한 추가 연구가 필요함.
- 또한 플레넘 공간으로 공기를 밀어넣어주는 급기형 배치가 플레넘 공기-거주역 공기의 혼합에 더 유리하므로, 플레넘 팬의 배치 시 팬의 후류 부분을 플레넘 공간 방향으로 설정하는 것을 권장함.
- 외주부 측의 개구부를 통해 냉각된 플레넘 공기를 하강시키면 외피부하의 일부를 경감시키는 효과가 있을 것이므로, 플레넘 팬에 의한 기류가 내주부→외주부 방향으로 이동하도록 팬을 배치하는 방안 고려
- 또한 천장면 면적이 넓어 플레넘 공간에서 기류 이동 경로가 너무 길어질 경우 공기 유동 자체가 불가능해질 수 있으므로, 팬풍량과 기류 이동거리를 고려하여 중계역할을 하는 팬을 설치할 필요도 있으며, 중계 팬의 수량 및 배치 대안에 대한 추가 연구가 필요함.



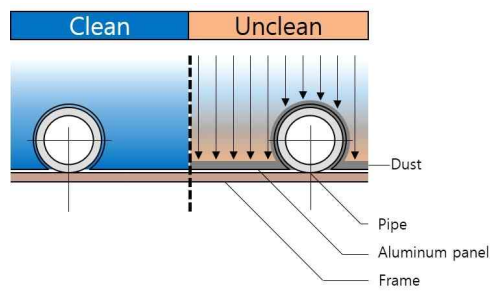
[그림 72] 플레넘 팬에 의한 외주부하 경감 개념

○ 플레넘 먼지 비산 대응 방안

- h-CRCP 시스템 적용 시, 개방형 설치에 의해 패널 표면에 먼지가 부착되거나, 플레넘 공간의 먼지가 거주역으로 비산될 우려가 있으므로 플레넘 공간 또는 패널표면의 먼지를 최소화할 필요성이 있음
- 주기적인 유지보수를 통한 플레넘 공간 또는 패널표면에 부착된 먼지 제거 필요
- 본 과제에 냉방패널은 천장에 설치된 고정용 틀에 개별 패널을 거치하는 형태로 개별 패널의 탈부착이 가능하며, 상부 단열층이 없는 노출형 패널로 별도의 조치 없이 청소 가능
- 플레넘 공간의 먼지 비산을 최소화하기 위해 기류를 CRCP 하부표면에 형성시키거나, 플레넘 팬을 이용하더라도 기류를 유동시킬 정도의 저풍량으로 운전하는 방안 고려



(a) 패널 상부 표면



(b) 상부 표면 먼지 부착 가능성

[그림 73] CRCP 상부 표면 먼지 부착

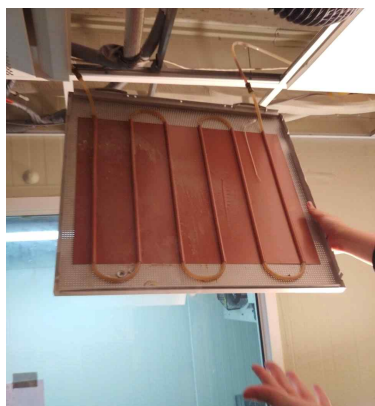


(a) 설치 그리드

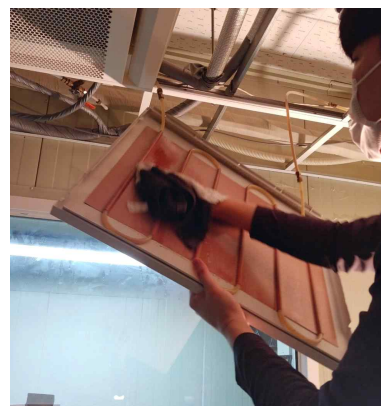


(b) CRCP 탈거

[그림 74] CRCP 설치 및 탈거 형태



(a) CRCP 탈거

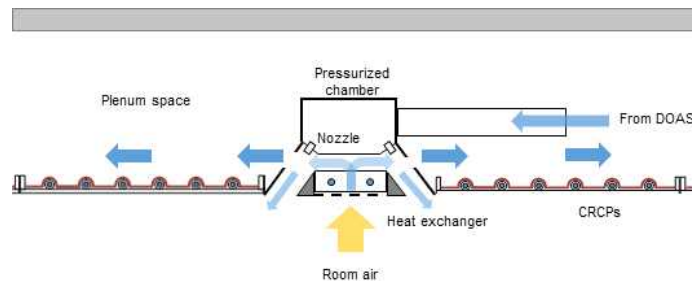


(b) CRCP 표면 먼지 제거

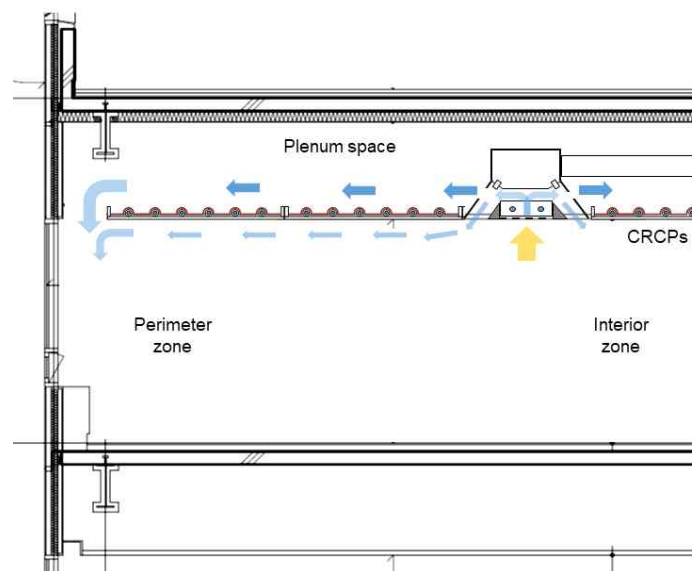
[그림 75] CRCP 유지관리 방안

○ 칠드빔 적용 대안 개선

- Test-bed 실험 결과, 설비형 칠드빔을 병용한 h-CRCP 시스템의 냉방용량 증대효과는 확인되었으나, 거주역의 쾌적 조건 유지 측면에서는 다소 한계가 있었음.
- 이는 설비형 칠드빔의 냉각코일에 공급되는 냉수의 온도를 너무 높게 설정(24℃)하였기 때문이며, 그에 따라 칠드빔에서 취출된 공기의 온도가 높아 CRCP의 냉각효과가 실내온도의 냉각이 아닌 칠드빔 취출공기의 냉각에 더 많이 쓰였기 때문으로 판단됨.
- 따라서 칠드빔에서 취출되는 공기를 실내온도보다 낮게 해줄 필요가 있으며, 이를 위해서는 칠드빔에 공급되는 냉수의 온도를 24℃ 이하로 설정해야 함.
- 칠드빔 냉수온도를 CRCP에 공급되는 냉수온도와 같게 설정할 경우 칠드빔이 대부분의 냉방용량을 차지하므로, CRCP용 냉수온도 보다는 높고 24℃ 보다는 낮은 냉수를 칠드빔에 공급해야 할 것으로 보여지며, CRCP 냉방용량을 최대화할 수 있는 칠드빔의 적정 냉수온도 선정 및 수배관 구성방안에 대한 추가 연구가 필요하다고 판단됨.
- 또한 칠드빔 취출기류는 천장면을 따라 흐르게 되어 있는데, 만약 플레넘 공간으로도 기류를 취출할 수 있게 한다면 플레넘 공기의 거주역 냉각효과를 증가시켜 h-CRCP 시스템 냉방용량을 더 증대시킬 수 있을 것으로 예상됨.
- 이와 함께 칠드빔의 설치 방향은 칠드빔 취출기류가 외주부에 직각을 이루도록 하면 외주부하 경감에 유효하게 이용될 수 있을 것임.



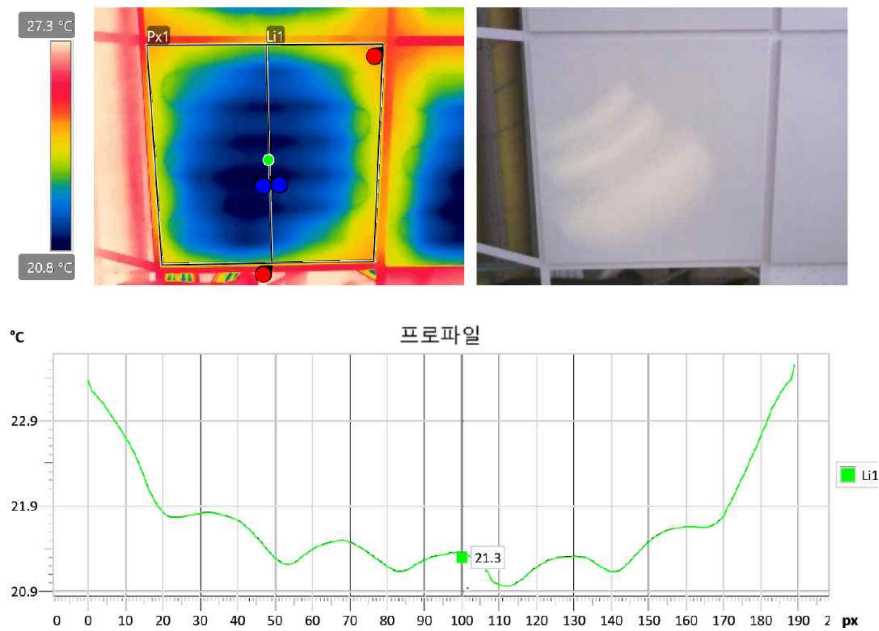
[그림 76] 칠드빔 취출 기류의 플레넘 공기 냉각 개념



[그림 77] 칠드빔 병용 h-CRCP 시스템 적용개념

○ CRCP 표면온도 균일도 개선

- CRCP 시스템 운전시 패널 표면을 열화상 이미지로 촬영한 결과, 동일한 패널 내에서도 2℃ 이상의 온도편차가 발생하였으며, 이렇게 균일하지 않은 표면온도는 냉방용량의 저하 요인이 되므로 (Ning et al., 2016), 패널 표면온도 균일도 개선이 필요함.
- 냉수배관과 패널을 밀착시키는 역할을 하는 열전도판은 시간이 흐름에 따라 패널과의 접촉이 느슨해지는 경우가 있으므로, thermal bond로 패널표면과 더 밀착시켜 부착하여야 하며, 패널 자체의 강성을 보완하여 패널의 처짐이 발생하지 않도록 하는 것이 필요함.



[그림 78] CRCP 표면온도 분포

다. 주요 성과

(1) 연구개발 성과

(가) 연구개발 성과 요약

○ 국내외 논문 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCI 여부	게재일
1	Optimal heating start and stop control based on the inferred occupancy schedule in a household with radiant floor heating system.	Energy and Buildings	K.N. Rhee	209	네덜란드	Elsevier	SCI	20.02.15
2	Cooling Capacity and Energy Performance of Open-Type Ceiling Radiant Cooling Panel System with Air Circulators.	Energies	K.N. Rhee	14(1)	스위스	MDPI	SCI	20.12.22
3	개방형 천장복사냉방패널 시스템의 개구부 면적에 따른 냉방 성능 평가	한국건축친환경설비학회 논문집	이규남	13(5)	대한민국	한국건축친환경설비학회	비SCI	19.10.28
4	기류속도의 영향을 고려한 천장복사냉방패널의 냉방용량 평가 유닛 개발	한국건축친환경설비학회 논문집	이규남	14(6)	대한민국	한국건축친환경설비학회	비SCI	20.12.31

○ 국내 및 국제학술발표

번호	회의 명칭	논문명	발표자	발표일시	장소	국명
1	대한건축학회 춘계학술발표대회	에너지 시뮬레이션을 이용한 개방형 천장복사냉방패널 시스템의 실온 제어 및 에너지 성능 평가	신미수, 이규남	19.10.24	대전 충남대	대한민국
2	한국건축친환경설비학회 추계학술발표대회	천장 복사 냉방패널 시스템의 냉방용량 증대 방안에 대한 실험적 연구	이규남, 최지수, 장형문	19.11.15	서울 한양대	대한민국
3	대한건축학회 부산울산경남지회 추계학술발표대회	하이브리드 천장복사냉방패널 시스템 성능평가 모델 구축	최지수, 이규남, 정근주	19.11.29	부산 동아대	대한민국
4	대한설비공학회 하계학술발표대회	천장복사냉방패널 적용 공간의 기류순환에 따른 냉방용량 및 실내환경 평가	최지수, 이규남	20.06.18	비대면	대한민국
5	한국건축친환경설비학회 추계학술발표대회	천장복사냉방패널의 개방형 설치 및 기류순환 장치 적용에 따른 에너지 소비량 평가	최지수, 이규남	20.11.20	비대면	대한민국
6	대한건축학회 부산울산경남지회 추계학술발표대회	패널표면 기류속도의 영향을 고려한 천장복사냉방패널 냉방용량 평가 유닛 개발	김상엽, 이규남, 정근주	20.11.27	비대면	대한민국

○ 지식재산권 (특허)

번호	지식재산권 명칭	국명	출원				기여율
			출원인	출원일	출원번호	등록 번호*	
1	천장 복사냉방 패널의 냉방용량 평가장치	대한민국	이규남	20.09.22	10-2020-0122561		100 %

(나) 연구개발 성과 상세

- **SCI 논문 1:** Shin, M. S., Rhee, K. N., Jung, G. J. (2020). Optimal heating start and stop control based on the inferred occupancy schedule in a household with radiant floor heating system. *Energy and Buildings*, 209, 109737.
- 재실자 쾌적과 에너지 절감을 위한 HVAC system의 Pre-start 시각을 결정하는 알고리즘의 원리 및 적용 결과를 수록
- 본 연구과제에서 개발 중인 h-CRCP 시스템은 하절기 결로방지를 위해 재실 시작 전에 시스템을 미리 가동하여 잠열부하를 제거할 필요가 있는데, 본 논문에서는 외기온에 따른 Pre-start 시각을 결정하는 알고리즘과 그 효과를 검증하였음
- 또한 Pre-start 시각에 따른 실내 쾌적과 에너지소비량을 해석하고, 불쾌적 시간과 에너지 소비량을 최소화하는 최적의 Pre-start 시각을 결정하는 내용을 수록



Contents lists available at ScienceDirect

Energy & Buildings

journal homepage: www.elsevier.com/locate/enbuild



Optimal heating start and stop control based on the inferred occupancy schedule in a household with radiant floor heating system

Mi-Su Shin^a, Kyu-Nam Rhee^{b,*}, Gun-Joo Jung^b

^aDepartment of Architecture, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea
^bDepartment of Architectural Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:
Received 3 June 2019
Revised 23 December 2019
Accepted 25 December 2019
Available online 25 December 2019

Keywords:
Occupancy inference
CO₂ concentration
Passive infrared (PIR)
Optimal start
Optimal stop
Radiant floor heating
Residential building

ABSTRACT

Occupancy-based heating control is important for not only achieving thermal comfort but also reducing the heating energy consumption of residential buildings. In this study, an occupancy inference method was developed for the optimal start and stop control of radiant floor heating systems. The basic concept of the inference is to combine the occupancy probabilities based on the indoor CO₂ concentration and passive infrared (PIR) signals. The probability is estimated by applying different probability reduction ratios depending on the derivative of the CO₂ concentration and aggregated PIR signals. In a validation experiment, the results showed that the developed algorithm can predict the occupancy with an accuracy of 83.5%–98.9%. The inferred occupancy data were used to determine the optimal heating start and stop control to improve energy saving performance and thermal comfort. Parametric simulations were conducted with JEPPlus to find the optimal start and stop times. This optimal start and stop control was found to reduce the heating energy consumption by up to 3.1% and thermal discomfort times from 62.5 h to 8.3 h.

© 2019 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

In residential buildings, the heating energy consumption is generally reduced by stopping the hot water supply or decreasing the set-point temperature. Even though various smart thermostats have been introduced [1], reducing the energy consumption in many residential buildings often depends on manual control by the occupants, such as turning off the thermostat or closing isolation valves [2]. Set-back control during unoccupied periods also often depends on the occupants adjusting the set-point temperature when they leave home. Occupants need to readjust the set-point temperature from the set-back temperature when they come back home.

Such manual control is quite simple and effective; however, it can be inconvenient and cause discomfort to occupants because it requires repetitive adjustment. Furthermore, the radiant heating system needs to be stopped slightly before the occupants depart because it utilizes the thermal storage effect during an unoccupied period, while it should start slightly earlier than when occupants return home to provide thermal comfort [3]. It is quite difficult for occupants to determine the stop and start time of the heating

system because the optimal start and stop time is dependent on the building parameters such as U-value, infiltration rate, thermal mass and boiler capacity [4–6]. These parameters can be identified by grey-box model such as inverse modeling [7,8] or co-heating test [9,10]. These data-driven models can be used to develop a model predictive model [11,12]. Once the parameters are identified, it would be convenient to predict the optimal start and stop time to minimize heating energy and thermal discomfort. Another way to implement the predictive control is to apply a black-box model (e.g. Artificial neuron network [4–6,13]) to estimate the optimal start and stop time. Rule-based predictive control, which is simpler than above-mentioned methods, can also be used for the optimal start and stop control. It is known that expected occupancy patterns may be used to take preventative actions according to a pre-determined set of rules, which provides a simple way to use predictive control [14]. If the average occupancy schedule based on inference results can be combined with the estimated start and stop time, the energy saving potential can be enhanced while the occupants' inconvenience and thermal discomfort are minimized [15].

The occupancy can be inferred with the direct/indirect detection of human presence in residential buildings. The collected inference results can be used to predict the occupancy, or the timing of departure and arrival time, which can be applied to determine the pre-start or pre-stop time of heating systems. Candanedo et al. [16] suggested a simple methodology to predict

* Corresponding author.
E-mail address: knrhee@pknu.ac.kr (K.-N. Rhee).

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109737>
0378-7788/© 2019 Elsevier B.V. All rights reserved.

○ **SCI 논문 2:** Shin, M. S., Choi, J. S., Rhee, K. N. (2020). Cooling Capacity and Energy Performance of Open-Type Ceiling Radiant Cooling Panel System with Air Circulators. *Energies*, 14(1), 1-1.

- CRCP 설치유형(폐쇄형, 개방형) 및 기류순환장치(에어 서큘레이터) 적용에 따른 CRCP 시스템의 냉방용량과 에너지 소비량 분석 결과 수록
- h-CRCP의 대안으로 CRCP를 개방형으로 설치할 경우 기존 CRCP 시스템의 냉방용량 ($96.1\text{W}/\text{m}^2$) 대비 8.5% 증가($104.3\text{W}/\text{m}^2$), 냉방에너지 25.5% 감소
- 기존시스템에 에어 서큘레이터를 적용할 경우 냉방용량 17% 증가 ($112.5\text{W}/\text{m}^2$), 냉방 에너지 10.2% 감소
- 기존시스템에 개방형설치와 에어 서큘레이터를 모두 적용할 경우 냉방용량 26.2% 증가 ($121.2\text{W}/\text{m}^2$), 냉방에너지 26.4% 감소



energies



Article

Cooling Capacity and Energy Performance of Open-Type Ceiling Radiant Cooling Panel System with Air Circulators

Mi-Su Shin ¹, Ji-Su Choi ² and Kyu-Nam Rhee ^{1,*}

¹ Department of Architectural Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea; altn58@pknu.ac.kr

² Division of Architectural and Fire Protection Engineering, Graduate School, Pukyong National University, Busan 48513, Korea; sdh6148@naver.com

* Correspondence: knrhee@pknu.ac.kr; Tel.: +82-51-629-6090

Abstract: Ceiling radiant cooling panel (CRCP) systems are being increasingly applied to commercial buildings due to their high thermal comfort level and energy efficiency. It is recommended that CRCP systems should be operated at a relatively high chilled water temperature to prevent condensation and save energy. However, even though a high chilled water temperature is effective for achieving condensation-free operation and high chiller efficiency, it can lead to insufficient cooling capacity. In this study, a method of enhancing the cooling capacity of CRCP systems was investigated through mock-up chamber tests. The open-type installation of CRCPs and the combination of air circulators were used to enhance the cooling capacity and energy performance of CRCP systems. Experimental results showed that compared to a conventional CRCP system, the cooling capacity of an open-type CRCP system with air circulators increased by up to 26.2%, and its cooling energy consumption decreased by up to 26.4%. Additionally, the open-type CRCP system with air circulators reduced the difference between the room air temperature and mean chilled water temperature. Thus, the proposed system can operate at a relatively high chilled water temperature, which is effective for reducing condensation risk and cooling energy consumption.

Keywords: ceiling radiant cooling panel; cooling capacity; open-type installation; air circulators; cooling energy consumption



Citation: Shin, M.; Choi, J.; Rhee, K. Cooling Capacity and Energy Performance of Open-Type Ceiling Radiant Cooling Panel System with Air Circulators. *Energies* **2021**, *14*, 5. <https://doi.org/>

Received: 29 November 2020

Accepted: 17 December 2020

Published: 22 December 2020

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright © 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Ceiling radiant cooling panel (CRCP) systems have been widely applied to space cooling due to their high thermal comfort level, energy-saving potential, and harmonization with architectural design [1,2]. Closed-type CRCPs are generally installed, where an entire ceiling surface is covered with CRCPs. As closed-type CRCP systems separate a plenum and an occupied space, it is difficult to utilize cooled plenum air to cool the occupied space. This separation does not lead to problems for the top-insulated panels that minimize the heat transfer at the upper surface of CRCPs [3,4]. However, metal ceiling panels without top insulation, which are commonly installed in office buildings, can absorb heat from the plenum space [5,6]. If metal ceiling panels are installed with closed-type CRCPs, the occupied space is cooled by only the lower surface of the CRCPs only. This might lead to insufficient cooling capacity and a consequent increase in cooling energy. In contrast, in open-type CRCPs, openings can be created between two adjacent CRCPs or between CRCPs and walls. Cooled plenum air can move down to the occupied space through these openings. This movement of plenum air can enhance not only the air mixture in the occupied space but also the heat transfer rate at the CRCP surface [2].

Shin et al. reported that the cooling capacity of CRCP systems can be enhanced by promoting the movement of plenum air through the openings in open-type CRCPs [7]. However, the limitation of the study was that results were obtained using only a numerical method. In the follow-up study, the numerical model of open-type CRCPs was verified

- **KCI 논문 1:** 신미수, 이규남. (2019). 개방형 천장복사냉방패널 시스템의 개구부 면적에 따른 냉방 성능 평가. 한국건축친환경설비학회 논문집, 13(5), 358-369.
- 개방형 CRCP는 폐쇄형 CRCP에 비해 패널 표면의 열전달 계수가 크므로, 시간당 제거열량 (Cooling rate) 또한 크며 그에 따라 냉방시 설정실온에 도달하는 시간이 단축되어 실온제어 성능이 향상될 수 있음.
 - 개방형 CRCP의 시간당 제거열량은 폐쇄형에 비해 평균적으로 1%~23%까지 증가하며, 개구부 면적이 증가할 경우 패널표면 열전달계수는 증가하나, 패널 면적이 감소하므로 개방형 CRCP 시스템의 냉방용량 증대 효과는 제한적일 수 있음.
 - 개방형 CRCP는 폐쇄형에 비해 냉수온도차가 증가하여 열원 효율 향상 효과를 기대할 수 있으며, 동일한 냉수온도 조건에서도 폐쇄형에 비해 더 높은 제거열량을 확보할 수 있는 것으로 분석됨. 따라서 폐쇄형에 비해 냉수온도를 더 높일 수 있어, 결로 방지 성능 개선 및 고온수 냉방에 의한 열원효율 향상 효과를 기대할 수 있음.



개방형 천장복사냉방패널 시스템의 개구부 면적에 따른 냉방 성능 평가

신미수¹ · 이규남^{2*}

¹Independent scholar, ²부경대학교 건축공학과

Cooling Performance Evaluation of Open-type Ceiling Radiant Cooling Panel System depending on Opening Area

Shin, Mi-Su¹ · Rhee, Kyu-Nam^{2*}

¹Independent scholar, Busan, Korea

²Department of Architectural Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

*Corresponding author: Rhee, Kyu-Nam, Tel: +82-51-629-6090, E-mail: krrhee@pknu.ac.kr

ABSTRACT

The present study was conducted to evaluate the cooling performance of open-type cooling radiant ceiling panel (CRCP) system, which is gaining popularity due to good integration with architectural design. Using the cooling capacity data from the previous study, the cooling performance of open-type CRCP system was investigated in terms of room temperature control and energy performances. The CRCP system was represented with the chilled ceiling module provided by TRNSYS 18, wherein the heat transfer coefficient and panel area of the open-type CRCP system were inputted as parameters of chilled ceiling module. The results showed that the room temperature control performance can be improved by open-type CRCP system because it can reduce the cooling time by utilizing higher cooling rate than closed-type CRCP. It was found that the open-type CRCP can increase the cooling rate by 1%~23% and can reduce the operating hour by 5%~19%. It was also found that the open-type CRCP can increase chilled water temperature difference and can provide the higher cooling rate with relatively higher chilled water temperature, which can contribute to the improvement of the chiller efficiency.

주요어 : 천장복사냉방패널 (CRCP), 개방형, 개구부면적, 실온제어, 제거열량, 냉방시간

Keywords: Ceiling radiant cooling panel (CRCP), Open-type, Opening area, Room temperature control, Heat removal, Operating hour

서론

복사냉방시스템은 우수한 열배적성과 장수명, 에너지 절감 성능과 함께 건축 디자인과의 통합도 가능하므로 최근 저에너지 건축물의 냉방 시스템으로 널리 활용되고 있다 (Rhee and Kim, 2015). 복사냉방시스템 중 금속재의 패널에 냉수 배관을 부착한 천장복사냉방패널

OPEN ACCESS

Journal of KIAEBS 2019 October, 13(5): 358-369
https://doi.org/10.22696/jkiebs.20190031

p-ISSN : 1976-6483
e-ISSN : 2586-0666

Received: September 3, 2019
Revised: October 7, 2019
Accepted: October 7, 2019

© 2019 Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems.



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

- **KCI 논문 2:** 이규남, 김상엽, 최지수 (2020). 기류속도의 영향을 고려한 천장복사냉방패널의 냉방용량 평가 유닛 개발. 한국건축친환경설비학회 논문집, 14(6), 639-650.
- 단일 CRCP에 대한 냉방용량 평가를 위해서 흡열 및 방열이 동시에 일어나는 열전소자를 냉수 및 온수 제조를 위한 열원으로 활용하였음. 열전소자의 흡열부측 Water block에 물을 통과시켜 CRCP 운전에 필요한 냉수를 생산하고, 방열부측 Water block에 물을 통과시켜 냉방부하 재현을 위한 온수를 생산하도록 계획
 - CRCP 표면에서의 기류속도에 따른 냉방용량 평가를 위해, CRCP 표면에 넓은 폭의 기류를 형성시킬 수 있도록 횡류팬을 설치하고, 팬 공급전압을 변화시켜 패널 표면에서의 기류속도를 조절하도록 계획
 - 개발된 평가 유닛으로 CRCP 냉방용량을 평가한 결과, 기류 영향이 없는 경우 냉방용량은 103.3 W/m^2 으로 측정되었고, 기류속도를 2.0 m/s 까지 증가시킬 경우 냉방용량은 176.0 W/m^2 으로 기류 영향이 없을 경우에 비해 약 70% 증가하는 것으로 나타남.

Journal of KIAEBS Vol. 14, No. 6, December pp. 639-650

RESEARCH ARTICLE



기류속도의 영향을 고려한 천장복사냉방패널의 냉방용량 평가 유닛 개발

이규남^{1*} · 김상엽² · 최지수³

¹부경대학교 건축공학과 부교수, ²부경대학교 건축공학과 학부과정,

³부경대학교 대학원 건축·소방공학 학부 석사과정

Development of Cooling Capacity Evaluation Unit for a Ceiling Radiant Cooling Panel considering the Effect of Air Velocity

Rhee, Kyu-Nam^{1*} · Kim, Sang-Yeop² · Choi, Ji-Su³

¹Associate Professor, Department of Architectural Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

²Undergraduate Student, Department of Architectural Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

³Master Student, Division of Architectural and Fire Protection Engineering, Graduate School, Pukyong National University, Busan, Korea

*Corresponding author: Rhee, Kyu-Nam, Tel: +82-51-629-6090, E-mail: knrhee@pknu.ac.kr

ABSTRACT

In this study, an evaluation unit was proposed to analyze the cooling capacity of ceiling radiant cooling panel (CRCP) system. The aim of this study was to develop a low-cost and simple testing device by which the cooling capacity of a single CRCP can be evaluated and the impact of air velocity on the cooling capacity can be analyzed. For this purpose, a thermoelectric element module (TEM) was adopted to produce the hot water for the cooling load as well as the chilled water for the CRCP. The configuration of TEM, cooling fans, and radiator was studied to achieve the proper temperature of hot and chilled water. In addition, a cross flow fan and fan speed controller were deployed to represent the air flow at panel surface. The test results showed that the cooling capacity of the evaluated CRCP was 103.3 W/m^2 , without the air flow at panel surface. It was also found that the cooling capacity can be enhanced up to 176.0 W/m^2 when the air velocity increases up to 2.0 m/s . The enhanced cooling capacity led to the increased temperature difference between room air and chilled water, which implies the possible mitigation of condensation risks.

주요어: 천장복사냉방패널, 냉방용량, 평가 유닛, 열전소자, 기류속도

Keywords: Ceiling radiant cooling panel, Cooling capacity, Thermoelectric element, Air velocity

OPEN ACCESS

Journal of KIAEBS 2020 December, 14(6): 639-650
https://doi.org/10.22969/jkiebs.20.2000.54

pISSN : 1976-6483
eISSN : 2586-0666

Received: October 14, 2020

Revised: November 3, 2020

Accepted: November 3, 2020

© 2020 Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

복사냉방 시스템은 쾌적하고 에너지 절약적인 친환경 냉방 시스템으로 주목받고 있으며, 그 중 천장복사냉방패널(Ceiling Radiant Cooling Panel, 이하 CRCP) 시스템은 건축 디자인과 의 조화, 높은 냉방효율, 시공의 편의성 등으로 인해 복미 및 유럽 지역의 사무소 건물, 교육용 건물, 상업 건물 등에 널리 적용되어 왔다(Rhee and Kim, 2015). 국내의 경우 CRCP 시스템은

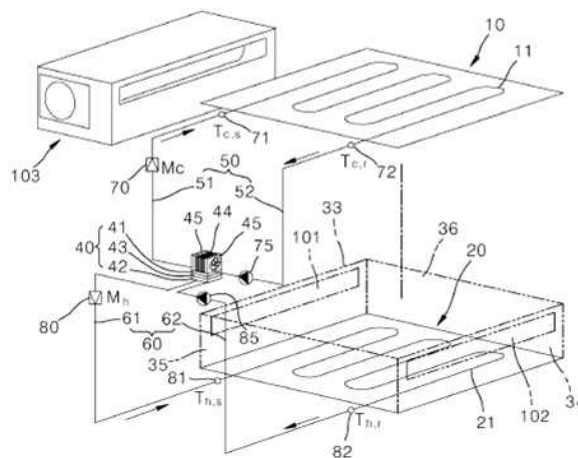
○ 특허성과

- 출원연도: 2020년
- 특허명: 천장 복사냉방 패널의 냉방용량 평가장치
- 출원인: 이규남, 김상엽, 김노옥, 공동건.
- 출원국: 대한민국
- 출원번호: 10-2020-0122561
- 출원 요약문: 본 발명에 따른 천장 복사냉방 패널의 냉방용량 평가장치는, 하나의 열전모듈을 사용하여, 열전모듈의 방열부를 이용해 냉방 부하를 구현하고, 열전모듈의 흡열부를 이용해 복사냉방 패널의 냉수를 생산함으로써, 구조가 간단하고 비용이 절감되면서도 복사냉방 패널의 냉방 용량을 평가할 수 있으므로, 복사냉방 패널의 성능 개선과 최적 설계가 용이해질 수 있다. 또한, 기류 생성팬을 이용하여 기류의 속도를 변화시킬 수 있도록 구성됨으로써, 기류의 속도 변화에 따라 달라지는 냉방용량을 평가할 수 있다.

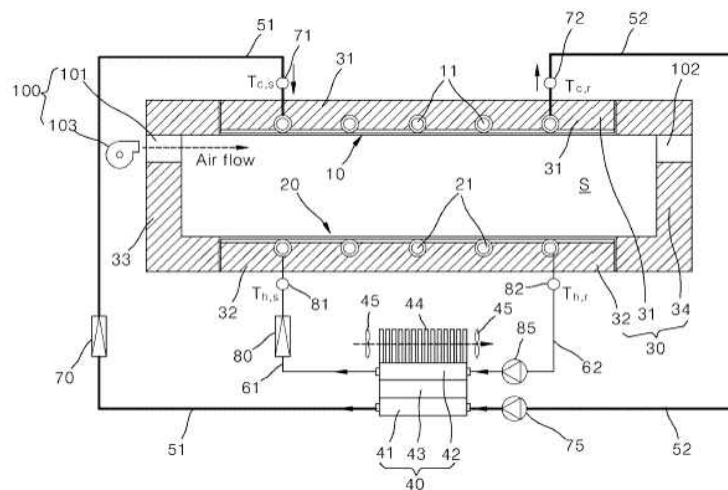
2020-09-22

【도면】

【도 1】



【도 2】



(2) 연구개발 결과

(가) 1차연도 개발 결과

구분(연도/단계))	세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
1차 연도 (2019)	냉방에너지 절감을 위한 하이브리드 천장복사냉방 패널 시스템 개발	하이브리드 천장복사냉방 패널 (h-CRCP) 시스템의 개념 및 성능 평가 방법 정립	시스템 Matrix 도출	개구부유무, 보조설비 고도화에 따라 h-CRCP 시스템 대안의 Matrix 작성
			성능평가 Test-bed 구축	- 기존 CRCP 및 h-CRCP의 선택적 운용이 가능한 Test-bed 구축 완료 [추가] 기류속도에 따른 CRCP 냉방 용량 평가 유닛 개념 설계
			해석 모델 구축	- CRCP 냉방용량 및 열쾌적성 평가가 가능한 CFD 시뮬레이션 모델 작성 - Test-bed 측정데이터와 검증 - 냉방용량 오차: -3% - 열쾌적성(PMV) 오차: +0.45
		패시브형 h-CRCP 시스템 성능 평가	기존 CRCP 성능평가	- Test-bed 이용 성능평가 - 냉방용량: 96.1 W/m² - 열쾌적성(PMV): +0.17
			h-CRCP 성능평가	- Test-bed 이용 성능평가 - 냉방용량: 104.5~121.2 W/m² (기존 대비 9~26 % 향상) - 열쾌적성(PMV): -0.42~-0.09 (ISO 7730 Category B 기준 만족)

(나) 2차연도 개발 결과

구분(연도/단계))	세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
2차 연도 (2020)	냉방에너지 절감을 위한 하이브리드 천장복사냉방 패널 시스템 개발	하이브리드 천장복사냉방 패널 (h-CRCP) 시스템의 개념 및 성능 평가 방법 정립	성능평가 Test-bed 구축	[추가] 기류속도에 따른 CRCP 냉방 용량 평가 유닛 개발 완료
			해석 모델 구축	- Test-bed 측정데이터와 검증 - 냉방용량 오차: -2.7% - 열쾌적성(PMV) 오차: -0.03
		액티브형 h-CRCP 시스템 성능 평가	h-CRCP 성능평가	- 냉방용량 - 기존 92.5 W/m²에서 최대 115.6 W/m² 까지 증가 (플레넘 팬 병용 시) - 기존 대비 25% 증대 - 열쾌적성 - PMV: 0.19~0.38 (ISO 7730 Category A~B 기준 만족) - 냉방 에너지 소비량 - 기존 CRCP 대비 26.4% 절감
			h-CRCP 성능 데이터 구축 및 설계 가이드라인 도출	- Cooling curve 도출 - 개방형 CRCP/ 에어컨쿨레이터 적용 CRCP 시스템 대상 - h-CRCP 시스템 설계가이드라인 - 시스템 설계 시 고려사항 및 성능 개선 주안점 도출

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 목표 달성 여부

(1) 차년도별 성과목표 달성여부

○ 1차연도

핵심 성과물 (level 1)	단위 성과물 (level 2)	성과점검기준					양적성과 현황
		질적목표(측정방법)	목표치/ 달성치	검증 방법	가중치 (%)	달성도 (%)	목표치/달성치
하이브리드 천장복사냉방 패널(h-CRCP) 시스템 성능평가 방법	h-CRCP 시스템 온열환경 평가 방법	PMV 해석 모델 오차 10% 이내	10%/ +0.45	Test-bed 측정치와 비교	20	100	논문(비SCI) : <u>1 / 1 건</u>
	h-CRCP 시스템 냉방용량 평가 방법	냉방용량 해석 모델 오차 10% 이내	10%/ 3%	Test-bed 측정치와 비교	20	100	
하이브리드 천장복사냉방 패널(h-CRCP) 시스템 성능 데이터	h-CRCP 시스템 기본성능 데이터	기존 CRCP 대비 냉방용량 10% 증대	10%/ 9~26%	EN14240기 반	30	100	
		h-CRCP 적용시 열쾌적 기준(PMV) 만족	-0.5~+0.5/ -0.42~-0.09	ISO 7730 기반	10	100	
		기존 CRCP 대비 냉방에너지 5% 절감	5%/ -	ASHRAE Guide 14 기반	20	50	
계					100	90	논문(비SCI) : <u>1 / 1 건</u>

○ 2차연도

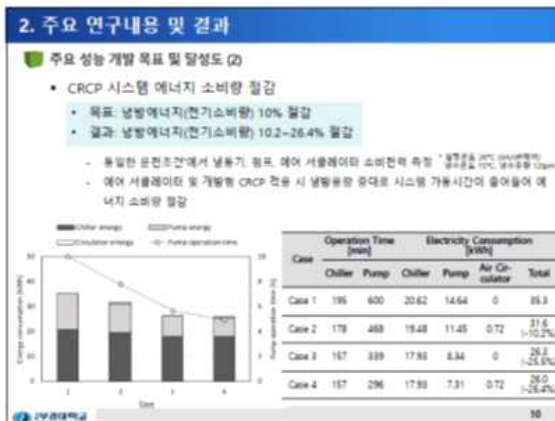
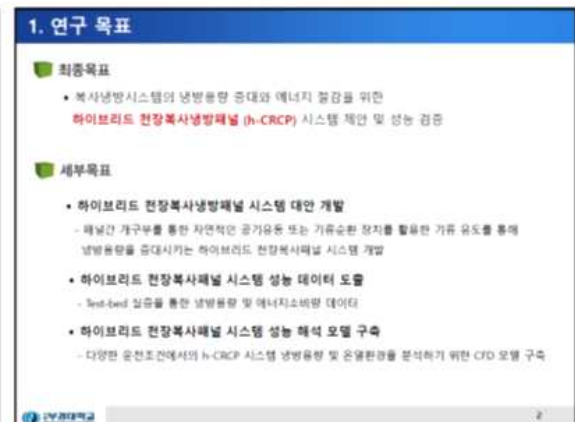
핵심 성과물 (level 1)	단위 성과물 (level 2)	당해단계 성과목표					양적성과 현황
		질적목표(측정방법)	목표치/ 달성치	검증 방법	가중치 (%)	달성도 (%)	목표치/달성치
하이브리드 천장복사냉방 패널(h-CRCP) 시스템 성능평가 방법	h-CRCP 시스템 온열환경 평가 방법	PMV 해석 모델 오차 MAD 0.1 이내	0.1 / 0.03	Test-bed 측정치와 비교	10	90	
	h-CRCP 시스템 냉방용량 평가 방법	냉방용량 해석 모델 오차 5% 이내	5% / 2.7%	Test-bed 측정치와 비교	10	100	
하이브리드 천장복사냉방 패널(h-CRCP) 시스템 성능 데이터	h-CRCP 시스템 기본성능 데이터	기존 CRCP 대비 냉방용량 15% 증대	15% / 25%	EN14240 기반	30	100	특허: 출원 1 / 1 건 논문(SCI) : 1 / 1 건
		h-CRCP 적용시 열쾌적 기준(PMV) 만족	-0.3~+0.3/ 0.19-0.38	ISO 7730 기반	20	95	논문(SCI) : 1 / 1 건
		기존 CRCP 대비 냉방에너지 10% 절감	10%/ 26.4%	ASHRAE Guide 14 기반	30	100	논문(BSCI) : 1 / 1 건
계					9	98	특허: 출원 1 / 1 건 논문(SCI) : 2 / 2 건 논문(BSCI) : 1 / 1 건

(2) 성과목표 달성여부 종합

○ 정성적 목표

	항목	성과목표	성과	달성여부
1	h-CRCP 시스템 성능평가	냉방용량 오차 5% 이내	2.7%	달성
	방법(CFD해석 모델) 정확도	PMV 오차 0.1 이내	-0.03	달성
2	냉방용량 증대	기존 CRCP 대비 15% 증대	25%	달성
3	열쾌적 기준 만족	PMV -0.3~+0.3	0.19~0.38	부분 달성
4	냉방에너지 절감	기존 CRCP 대비 10% 절감	26.4%	달성

- 성과목표의 달성여부는 대한설비공학회 복사냉난방 전문위원회 전문가 (6인) 평가 과정을 통해 결정
- 부분달성 성과 목표의 경우 Test-bed의 보완과 후속연구를 통해 지속적으로 보완할 예정이며, 달성된 성과 목표의 경우에도 다양한 부하 조건이나 실제 건물에서의 검증 을 통해 실증 데이터를 보완할 필요가 있음.



[그림 74] 전문가 평가 의뢰 자료 (일부 발췌)

전문가 활용내역서

전문가 활용내역	
개인정보 삭제	
내 용	1. CRCP 시스템 냉방용량 증대 (설명자료 p.9) • CRCP에서의 냉방용량을 증대시키기 위해 에어 서클레이터를 활용함으로써 26%가량의 개선 효과를 보임. 연구목표에 적합한 결과를 도출함. 2. CRCP 시스템 에너지소비량 절감 (설명자료 p.10) • 냉방에너지를 최대 26%까지 절감할 수 있는 것으로 나타나 연구성과를 달성하였음. 특히 에어 서클레이터의 전기소비량에 비해 펌프의 반송동력을 감소함으로써, 에너지성능 개선 효과가 우수한 것으로 보임. • 향후 대상 건물을 구체화함으로써 사업화 실증 모델에 대한 연구로 확장해 나갈 필요가 있을 것으로 보임. 3. CRCP 시스템 쾌적도 달성 (설명자료 p.11) • 기존 공조 방식에 비해 CRCP를 적용함으로써 실내 쾌적도가 개선되었음. • 추후 연구에서는 실내에서 기류 속도 분포가 기준에 부합하는지에 대한 평가도 함께 이뤄질 필요가 있음. Case 4의 경우, 제어 방식을 보완함으로써 에너지절감 효과를 개선할 수 있을 것임. 4. 해설모델 정확도 확보 (설명자료 p.12) • STAR-CCM+을 이용한 해석 모델의 검증에 있어서 냉방용량이 27%의 오차를 보임으로써 정확성을 확인할 수 있었음. • 지속적인 연구에서 검증된 해석모델을 활용함으로써 실험결과를 보완하고, 다양한 운영 조건에 대한 평가가 이뤄질 수 있을 것임. ■ 기타 자문 의견 • 여러 가지 유형의 건물에서 적용하기 위해서는 설비형 칠드빔과 같이 환기 등을 종합적으로 고려한 공조설비시스템 구성이 필요할 것으로 보이며, 기존 설비설계방법에 대한 개선(안)도 제안될 필요가 있을 것임.

[그림 75] 전문가 평가 결과 (일부 발췌)

○ 정량적 목표

	항목	성과목표	성과	달성여부
1	SCI 논문	2편	2편(IF 4.867, 2.702) +1편 심사중	달성
2	KCI 논문	2편	2편	달성
3	특허출원	1건	1건	달성
4	학술대회 논문발표	-	6건	초과달성

나. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등)

(1) 목표 미달성 원인

○ 온열 쾌적성 일부 미충족

- h-CRCP 시스템 운전시 PMV는 설정온도 26℃를 기준으로 시스템을 운전하는 조건에서 측정되었는데, 시스템 on/off에 따른 실온의 fluctuation이 발생하여 실온이 상승하는 구간이 발생하였음.
- 그에 따라 에어 서큘레이터를 적용하지 않은 개방형 CRCP의 경우 PMV가 0.38로 측정되었는데, 이는 연구 목표로 설정한 PMV -0.2~+0.2를 약간 초과한 결과임.
- 물론 PMV 0.38도 ISO 7730 기준의 Category B를 만족하는 높은 수준이나, 쾌적도를 좀더 향상시키기 위해서는 h-CRCP 시스템의 on/off에 따른 실온 fluctuation을 감소시킬 수 있는 방안이 요구됨.

○ CFD 해석 모델의 정확도

- 본 과제에서 개방형 CRCP 시스템의 해석 모델의 정확도는 냉방용량 오차 -2.72%, PMV -0.03으로 목표수준을 만족하였음
- 그러나 상기 결과는 자연대류에 의존하는 패시브 h-CRCP 시스템에 대한 해석 결과이며, 기류확산 보조설비가 적용된 액티브 h-CRCP 시스템의 해석 모델의 정확도는 아직 확보되지 않은 상태임.
- 기류확산 보조설비의 physics나 경계조건 (취출공기의 온도나 풍량조건)을 실제와 근접하게 설정하는 데 한계가 있어 액티브 h-CRCP 시스템의 CFD 해석 모델에 대한 추가 연구가 필요함.

○ 에너지 성능 평가의 제한성

- h-CRCP 시스템으로 기존 CRCP 시스템 대비 26.4%의 냉방에너지가 절감되는 것을 검증하여 연구 목표인 냉방에너지 10% 절감 목표를 달성하였으나, 이는 개방형 설치와 에어 서큘레이터의 영향만 고려된 에너지 성능 평가 결과임
- 플레넘 팬, 설비형 칠드빔 병용 시의 액티브 h-CRCP 시스템의 냉방 에너지 소비량은 실험 기간의 한계(2차연도 하절기 기간의 제한)로 분석이 미비하였으며, 본 과제에서 구축된 Test-bed를 활용하여 하절기 추가 실험을 통해 에너지 성능 데이터를 보완할 예정임

○ 설비형 칠드빔 병용 대안의 성능 검토 미비

- 본 과제에서는 설비형 칠드빔이 보조 냉방 기능 없이 기류확산 기능만 담당하도록 계획하였으나, 칠드빔에서 취출되는 공기의 온도가 덕트나 팬에 의한 열취득으로 인해 실온보다 다소 높게 형성되어 결과적으로 냉방성능의 저하가 초래되었음.
- 따라서 설비형 칠드빔을 기류확산 용도로만 활용하는 것은 h-CRCP 시스템 대안으로 적합하지 않으며, 설비형 칠드빔의 water-side를 활성화시켜 일부 냉각 기능을 부여하는 것이 필요함.

(2) 데이터 활용 시 제한 조건 및 가정 사항

- 본 연구는 하이브리드 천장 복사 냉방패널 시스템을 개발에 대한 기초연구로 기존의 복사 냉방패널 및 전공기 냉방 방식에 대한 대체 시스템으로서 그 성능을 검증하는 것이 목적이며 차후 관련 연구의 기초 자료 제공 및 방향을 제시
- 후속 연구 진행에 따라 본 연구 데이터 활용 시 유의 사항을 중점으로 서술함

○ 성능평가 Test-bed 규모의 제한

- h-CRCP 시스템의 냉방성능을 향상시키는 핵심요인은 패널 표면, 개구부, 플레넘에서의 기류유동 촉진으로 인한 대류성분 증가로 볼 수 있음
- 본 연구에서는 소규모 Test-bed에서 h-CRCP 시스템의 대류성분 증가 효과만 검토된 관계로, Open plan 사무실과 같은 큰 공간에서의 대류성분 증가에 의한 냉방성능 증대 효과를 추가적으로 분석할 필요가 있음

○ 일사열획득의 배제

- 본 연구에서는 일사 및 건물 내 축열을 외부 부하요소로 간주하여 이의 효과를 배제하기 위해 창문을 차폐하고 일사가 없는 새벽 시간대에 실험을 수행하였음
- 일사열 획득에 의한 외주부 온도 상승, 기류 변화 등 일사열 획득에 인한 실내환경 변화가 검토되지 않은 한계가 있으므로, 건물 외주부에 h-CRCP 시스템 적용을 위한 추가 연구가 필요함

○ 잠열부하의 배제

- 본 과제의 h-CRCP 시스템은 외부공기 또는 실내부하요소 중 잠열부하의 영향은 고려하지 않고, 현열부하 제거 성능에 대해서만 검토됨
- 표면 및 실 전체에서의 기류 순환을 통해 냉방성능을 증대시켜 패널 표면의 온도를 낮추는 방식이 검토되었으나 근본적 원인인 한국 기후 특성상 높은 실내 습도를 해결하기 위해서는 외기도입, 자연환기, 설비를 통한 제습 등 잠열성분을 고려한 실험이 진행될 필요가 있음

(3) 차후 대책

○ 연구보완 방향

- 연구팀 자체 평가 및 전문가 평가를 통해 연구 보완 및 추후 연구 진행 방향을 도출
- 열쾌적 향상을 위한 h-CRCP 시스템 제어방안, 기류확산 보조설비의 물리적 특성을 모두 반영할 수 있는 CFD 모델의 개발, 플레넘 팬이나 설비형 칠드빔 병용 시의 에너지 성능 평가, CRCP 시스템과 설비형 칠드빔의 부하분담 방안에 대한 연구 보완이 필요한 것으로 판단됨.

○ 후속연구 제안

- 대상건물의 구체화를 통한 사업화 실증 모델에 대한 연구

- 환기 및 잠열부하 처리 설비와 CRCP 시스템을 통합한 공조설비 시스템 구성에 대한 연구
- 동적인 부하 변동 상황에서 h-CRCP 시스템의 열적 거동 및 냉방 에너지 소비 특성에 대한 연구
- 초기비용 및 LCC 관점에서 기존 시스템과 h-CRCP 시스템의 비교 검토 연구
- h-CRCP 시스템의 단순 on/off가 아닌 비례 제어나 PID 제어를 적용하여 열쾌적 및 냉방 에너지 성능을 최적화하기 위한 연구
- CRCP의 존별 제어, 설비형 칠드빔과 병용시 수배관 구성 등 서로 다른 냉수온도를 공급하기 위한 수배관 구성 및 제어에 대한 연구
- 조명, 소방설비(스프링클러 헤드, 소방배관), 방송설비, 전기설비 등 천장 및 플레넘에 설치되는 기타 설비와의 조합을 고려한 CRCP 시스템 프로토타입 개발 및 성능평가에 대한 연구

4. 연구개발성과의 활용 계획 등

가. 연구 개발 성과의 활용 방안

(1) 개발성과의 활용 가능 대상

① 고성능 제로 에너지 건축물

○ 제로 에너지 건축물의 에너지 절약적 공조 대안으로 활용

- 제로 에너지 건축물 달성을 위해서는 패시브 기술을 이용한 부하절감이 우선시 되어야 하는데, 외피부하 지배형인 주거 건물은 난방부하 비중이 높아 단열/기밀성 강화 등의 패시브 기술 향상으로 제로 에너지 건축물에 근접할 수 있음
- 내부부하 지배형으로 냉방부하 비중이 높은 상업건물의 경우 패시브 기술에 못지 않게 액티브 기술의 효율을 높이는 것이 중요하며, 에너지 소비량 중 많은 비중을 차지하는 냉방 에너지 절감이 매우 중요
- 본 연구에서 제안한 하이브리드 CRCP 시스템은 에너지 절감성능이 가장 높은 것으로 알려진 복사냉방시스템의 효율을 개선한 것으로, 상업건물의 냉방에너지 절약과 제로 에너지 건축물 구현에 큰 효과가 있을 것으로 예상됨

○ 신재생 에너지와 결합된 공조 대안

- 복사냉방 시스템은 일명 High-temperature cooling system으로도 통용되는데, 이는 기존 공조시스템의 냉수온도 (7℃)에 비해 상대적으로 높은 온도의 냉수로 냉방이 가능하다는 의미임
- 본 연구에서 제안한 하이브리드 CRCP 시스템은 기존 CRCP 시스템보다 동일 조건에서 증대된 냉방용량을 확보할 수 있으며, 달리 말하면 **보다 높은 온도의 냉수로 동등 수준의 냉방용량을 확보**할 수 있을 것으로 기대됨
- 그러므로 Low-lift chiller를 열원으로 활용할 수 있으며, 더 나아가 고온 냉수 생산에 적합한 지열 시스템 등 신재생 에너지의 결합도 가능할 것으로 기대됨

② 기존 건축물의 성능 개선

○ 그린 리모델링, 공조 설비 Retrofit에 활용

- 경량의 CRCP 모듈을 조합하여 냉방시스템을 구성하므로, 기존 골조를 유지한 채 설비 시스템을 개수하는데 적합함
- 수방식의 공조설비로 전공기 방식에 비해 요구되는 덕트 스페이스가 적으므로, 통상적으로 리모델링에서 문제가 될 수 있는 천장고의 한계를 극복하는 데 유리함
- 모듈화된 패널 디자인으로 건축적 의장을 해치지 않으면서 공조설비 이외의 조명, 소방, 방송 설비와의 조화를 이룰 수 있을 것으로 기대됨

○ 재실자 쾌적성 향상

- 상대적으로 높은 온도의 냉수로 운전될 수 있으므로, 하절기 고온 다습한 조건에서 결로 발생 위험을 저감할 수 있음
- 기존 복사냉방 시스템 고유의 복사열교환과 함께, 기류확산에 따른 기류속도 증대 효과로 인해 쾌적 조건의 영역을 확장할 수 있음

(2) 실용화-제품화 방안

① 기류확산설비 결합형 CRCP 시스템

○ 플레넘 팬 결합형 CRCP 시스템

- 천장복사패널의 측면에 플레넘 팬을 결합하여 h-CRCP 시스템의 설치 및 운전을 보다 간편하게 하기 위한 대안
- 해당 패널은 천장면의 끝단에 설치하여, 플레넘으로의 공기유입/유출을 활성화하며, 경우에 따라 외주부에 플레넘 냉각공기를 공급하는 역할을 하여 외주부하 경감의 기능도 담당할 수 있음.
- 플레넘 팬과 패널의 연결부위는 힌지로 처리하여, 필요에 따라 플레넘 팬의 설치각도를 조절할 수 있도록 함.

○ 칠드빔 결합형 CRCP 시스템

- 천장복사패널과 설비형 칠드빔 터미널 유닛을 결합하여 복사냉방시스템의 냉방용량 확보 및 환기부하 처리 기능을 동시에 수행하도록 함.
- 설비형 칠드빔의 경우 통상적으로 천장면을 따라 기류를 취출시키나, 상부단열이 없는 CRCP와 결합될 경우에는 플레넘 공간으로도 기류를 취출시켜 냉방용량을 증대시키는 방안도 고려

② DOAS 연계형 패키지 시스템

○ 환기 및 잠열부하 처리 시스템과 연계

- 본 연구에서 제안하는 h-CRCP 자체는 현열부하 처리 능력 향상을 위한 것이므로, 환기와 잠열부하 처리를 위해서는 DOAS등 외기처리 공조기와 연계된 패키지 시스템 도입 필요
- 패시브형 h-CRCP 시스템의 경우, 플레넘 공간에 1차로 처리된 외기를 공급하여 환기 및 잠열 부하처리 + CRCP 냉방용량 증대 유도

○ 멀티존 냉방을 위한 Parallel 시스템과 연계

- 멀티존 냉방시 과냉이 되는 존이 발생하므로, DOAS에서 최대부하 존을 기준으로 1차공기를 공급하되 터미널에 재열+기류유인 기능을 갖춘 칠드빔을 설치
- 또는 DOAS에서 외기를 최소한도로 처리한 후 각 존에서 칠드빔 냉수유량/온도 제어를 통해 필요한 냉방용량을 확보

나. 기대효과

(가) 기술적 측면

(1) 건축환경/설비 분야 미래 원천 기술 확보

① 시스템 성능평가 방법 제공

○ Test-bed 기반 성능 평가 방법

- 기존 천장복사냉방패널 시스템과는 구별되는 개방형 천장복사냉방패널, 또는 기류확산 보조설비 연계형 천장복사냉방 패널의 냉방용량 및 온열환경 평가 방법의 기본 토대 제공
- 축소모형(냉방용량 평가유닛)을 이용한 단일 냉방패널의 냉방용량 평가 방법

○ CFD 및 에너지 시뮬레이션 기반 성능 평가 방법

- 기존 천장복사냉방패널의 냉방성능을 보정한 데이터를 제공함으로써, 공기유동이 개입된 천장복사냉방패널 시스템의 에너지 성능 평가를 가능하게 함
- 연간 에너지 해석 시뮬레이션에 탑재될 수 있는 하이브리드 천장복사냉방 패널 모델에 대한 후속 연구 필요

② 복사냉방 시스템 성능 개선 방안 제공

○ 저비용 보조설비를 통한 효율 향상

- 에어 서큘레이터, 플레넘 팬 등과 같이 저비용으로 구입 및 설치가 가능한 보조설비를 활용함으로써 저에너지 설비의 초기투자 비용을 낮추는 효과
- 공조 설비분야에서 적정 기술(Appropriate Technology)을 통한 에너지 효율 개선 방안 제공 가능

○ 복사냉방 시스템 제어성능 개선

- 냉방패널 가동 이전에 기류확산 보조설비를 선행 가동하여 결로 위험을 완화하는 등, 복사냉방시스템 제어 전략을 보완
- 복사냉방 시스템에서 상대적으로 낮게 나타나는 기류속도를 증가시켜, 동일 실내 온도 조건에서도 쾌적성을 좀더 향상시킬 수 있음.

(2) 복사냉방 시스템 표준화에 기여

① 기존 표준 보완 시 기초 자료 제공

- 현재 통상적인 폐쇄형 복사냉방패널 시스템을 대상으로 제정 중인 표준 (ISO 18566:Building environment design-Design, test methods and control of hydronic radiant heating and cooling panel systems)의 추후 보완 시 개방형 천장복사냉방패널에 대한 기술 기준 제공
- 일반적으로 복사냉방 시스템은 환기를 위한 Air system과 parallel하게 가동되어 Air system이 발생시키는 기류의 속도가 냉방용량에 영향을 미칠 수 있으나, 현재 CRCP 시스템 냉방용량 평가기준은 기류속도의 영향을 고려하지 않고 있음. 따라서 본 과제에서 분석한 기류속도가 냉방용량 증대에 미치는 영향을 감안하여 Air system 병

행시의 CRCP 냉방용량 평가방법을 보완할 필요가 있음.

(나) 경제 산업적 측면

(1) 국가 에너지 절약 정책에 부응

- 본 연구의 성과물 활용 시 고온 냉수냉방이 가능해지므로, 천장복사냉방 시스템을 적용할 수 있는 건물이나 지역이 확대될 수 있으며 제로 에너지 건축물 보급 확산에 기여
- 고온 냉수 생산 시 열원에서 소비되는 전기에너지를 절감할 수 있고, 신재생 에너지 원과의 결합이 용이하므로 에너지 수요 관리에 기여

(2) 제로 에너지 건축물의 경제적 효과 증대

- 열원 효율 향상, 냉방 에너지 추가 절감을 통해 운영비용 절감에 기여
- 열적 쾌적존이 확장될 수 있어 동일한 에너지 소비량으로 재실자 만족도가 향상될 수 있으므로 생산성 증대를 통한 운영비용 절감이 가능할 것으로 기대됨

(3) 공조 설비 산업 고도화

- 하이브리드 천장복사냉방패널 시스템을 구성하는 개별 컴포넌트(패널, 수배관, 기류 확산 보조설비, 외기조화기 등)의 성능 향상 및 시스템 통합 솔루션 개발 유도
- 칠드빔과 복사냉방시스템의 결합 등 새로운 개념의 공조 대안 제시로 공조 시스템 다변화 유도

붙임. 참고문헌

1. 안민철. (2012). EN 14240에 따른 천장 복사 냉방 패널 시스템의 열성능 평가. 대한건축학회 학술발표대회 논문집 32(1), 243-244
2. 박상훈, 김동우, 여명석, 김광우. (2014). 천장 복사 패널시스템의 방냉량 평가 실험. 대한건축학회 논문집-계획계, 30(2), 267-276.
3. 유승호, 조수. (2005). 소규모 실험실을 이용한 천장복사냉방패널의 열적 성능평가. 대한건축학회 논문집-계획계, 21(9), 213-219.
4. 이주연. (2008). 천장복사냉방의 온열쾌적성 평가에 관한 연구. 설비공학논문집, 20(4), 287-293.
5. 신미수. (2016). 천장 복사 냉방 패널의 개방형 설치를 위한 냉방 용량 산정 및 설계 프로세스 (Doctoral dissertation, 서울대학교 대학원).
6. ASHRAE, (2016). Systems and equipment. ASHRAE, Atlanta, GA.
7. ASHRAE. (2013). ANSI/ASHRAE Standard 138: Method of Testing for Rated Ceiling Panels for Sensible Heating and Cooling. Atlanta, US: ASHRAE.
8. Babiak, J., Olesen, B. W., Petras, D. (2009). Low temperature heating and high temperature cooling: embedded water based surface heating and cooling systems. Rehva.
9. CEN. (2004). EN 14240: Ventilation for Buildings-Chilled Ceilings-Testing and Rating. Brussels, Belgium: CEN.
10. Dieckmann, J., Roth, K. W., Brodrick, J. (2004). Radiant ceiling cooling. ASHRAE journal, 46, 42-42.
11. Hao X, Zhang G, Chen Y, Zou S, Moschandreas DJ. (2007). A combined system of chilled ceiling, displacement ventilation and desiccant dehumidification. Build Environ 42:3298-308.
12. Jeong, J., Mumma, S., Bahnfleth, W. (2003). Energy conservation benefits of a dedicated outdoor air system with parallel sensible cooling by ceiling radiant panels. ASHRAE Transactions, 109, 627.
13. Jeong, J. Mumma, S. (2003). Ceiling radiant cooling panel capacity enhanced by mixed convection in mechanically ventilated spaces, Applied Thermal Engineering. 23(18): 2293-2306.
14. Jeong, J.. Mumma, S. (2007). Practical cooling capacity estimation model for a suspended metal ceiling radiant cooling panel. Build. Environ. 42, 3176-3185.
15. Karmann, C., Bauman, F., Raftery, P., Schiavon, S., Koupriyanov, M. (2018). Effect of acoustical clouds coverage and air movement on radiant chilled ceiling cooling capacity. Energy Build. 158, 939-949.
16. Kim, M., Leibundgut, H. (2014). A case study on feasible performance of a system combining an airbox convector with a radiant panel for tropical climates. Build. Environ. 82, 687-692.

17. Kim, M. K., Liu, J., Cao, S. J. (2018). Energy Analysis of a Hybrid Radiant Cooling System under Hot and Humid Climates: A Case Study at Shanghai in China, *Building and Environment*, 137, 208-214.
18. Korean Standard (2008). KS F 2912, 건식 온수온돌판의 방열량 계산 및 시험 방법
19. Ning, B., Chen, Y., Liu, H., Zhang, S. (2016). Cooling capacity improvement for a radiant ceiling panel with uniform surface temperature distribution. *Building and Environment*, 102, 64-72.
20. Novoselac, A., Burley, B.J., Srebric, J. (2006). New convection correlations for cooled ceiling panels in room with mixed and stratified airflow. *HVAC&R Res.* 12, 279-294.
21. Okamoto, S., Kitora, H., Yamaguchi, H., Oka, T. (2010). A simplified calculation method for estimating heat flux from ceiling radiant panels. *Energy and Buildings*. 42: 29-33
22. Rhee, K. N., Kim, K. W. (2015). A 50 year review of basic and applied research in radiant heating and cooling systems for the built environment. *Building and Environment*, 91, 166-190.
23. Shin, M.S., Rhee, K.N., Park, S.H., Yeo, M.S., Kim, K.W. (2019). Enhancement of cooling capacity through open-type installation of cooling radiant ceiling panel systems. *Build. Environ.* 148, 417-432.
24. Shin, M. S., Rhee, K. N. (2019). Cooling Performance Evaluation of Open-type Ceiling Radiant Cooling Panel System depending on Opening Area. *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*. 13(5), 358-369.
25. Technavio. (2018). Global Radiant Heating and Cooling Systems Market 2018-2022 available at: <https://www.technavio.com/report/global-radiant-heating-and-cooling-systems-market-analysis-share-2018>

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.