

(옆면)

(앞면)

18CTA
P-C116
268-03

보안 과제(), 일반 과제(√) / 공개(√), 비공개()발간등록번호()
국토교통기술촉진연구 사업 제3차 연도 최종보고서

R&D / 18CTAP-C116268-03

지중 다중이용시설 공기질 및 에너지성능 향상을 위한 제습증발냉각 기반 전외기
공조시스템 상용화 기술 개발

최종보고서

지중
다중이용시설
공기질 및
에너지성능
향상을 위한
제습증발냉각
기반 전외기
공조시스템
상용화 기술
개발

2019. 07. 02.

주관연구기관 / 한양대학교 산학협력단
공동연구기관 / (주) 삼화에이스

최
종
보
고
서

2019

국
토
교
통
과
학
기
술
진
흥
원

도
시
건
축
실

국 토 교 통 부

국토교통과학기술진흥원

제 출 문

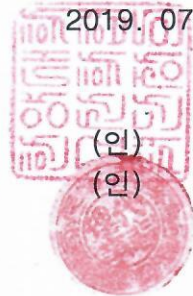
국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘지중 다중이용시설 공기질 및 에너지성능 향상을 위한 제습증발냉각 기반 전외기 공조시스템 상용화 기술 개발’(연구개발 기간 : 2016. 06. 27 ~ 2019. 04. 27) 과제의 최종보고서 2부를 제출합니다.

2019. 07. 02.

주관연구기관명 : 한양대학교 산학협력단
공동연구기관명 : (주) 삼화에이스

이 수 재
김 학 근



주관연구기관책임자: 정 재 원
협동연구기관책임자: 최 병 남

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	18CTAP-C116 268-03	해당 단계 연구 기간	2018.04.28 ~ 2019.04.27	단계구분	3/3
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명				
연구과제명	대과제명	지중 다중이용시설 공기질 및 에너지성능 향상을 위한 제습증발냉각 기반 전외기 공조시스템 상용화 기술 개발			
	세부과제명				
연구책임자	정 재 원	해당단계 참여연구원 수	총: 25명 내부: 15명 외부: 10명	해당단계 연구비	정부: 365,000천원 민간: 122,000천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 487,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 36명 내부: 26명 외부: 10명	총 연구비	정부: 880,000천원 민간: 302,000천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 1,182,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	한양대학교 산학협력단 / 건축공학과			(주) 삼화에이스 / 기술연구소	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반과제
-------------------------	------

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	29건	13(특) /4(발)	1			1					

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

요약(연구개발성과를 중심으로 개조식으로 작성하되, 500자 이내로 작성합니다)

보고서 면수: 185

요약문

연구의 목적 및 내용	지중 다중이용시설의 실내 공기질 및 쾌적도를 극대화 하면서도 기존 공조시스템 대비 에너지 절감 및 탄소배출 저감이 가능한 제습 증발냉각 기반 전외기 공조시스템의 실용화를 시스템 프로토타입 개발, 패키지 유닛 시제품 제작, 테스트베드 적용 및 목표성능 실증의 총 3단계 연구과정을 통해 완료하고 기술이전을 통한 상용화를 추진 (TRL 5-7 단계). - 액체식 제습시스템과 증발냉각 시스템이 결합된 지중 다중이용시설을 위한 차세대 공조시스템 프로토타입 개발. - 외기만을 이용하여 실내 환경을 제어하는 전외기 공조시스템 적용을 통해 지중 다중이용시설 내에서의 교차오염 해소 및 충분한 환기량 확보를 통한 실내공기질 부족문제 해소 실증. - 지중 다중이용시설 차세대 전외기 공조시스템 패키지 유닛 시제품 제작 및 인공 기후실험 챔버를 이용한 목표성능 실증. - 테스트베드 적용 및 장단기 운전을 통한 상용화 가능성 실증.				
연구개발성과	- 지중 다중이용시설 공조를 위한 차세대 전외기 공조시스템 프로토타입 도출. - 급기풍량 1000m³/h의 차세대 전외기 공조시스템 패키지 유닛 시제품 제작 및 공인 시험기관 목표성능 검증을 통한 공인시험성적서 확보. - 지중 다중이용시설 내 실간 교차오염 문제 90% 이상 해소. - 기존 공조시스템 대비 30% 이상 향상된 실내 공기질 및 쾌적도 달성과 30% 이상 향상된 1차 에너지 절감과 탄소배출 저감 달성. - 제습 및 증발냉각기술을 활용하여 기존 냉매사용량 절감을 50% 이상 달성				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	- 지중 다중이용시설에 적용 가능한 차세대 전외기 공조시스템 개발을 통해 공공분야에서 국내외 지하철역사 공조시스템 시장 선도. - 전 세계적으로 늘어나고 있는 도시재생 및 경제 활성화를 위한 도심지 지중공간의 시설 투자 및 개발에 맞추어 국내 관련 기업에 대한 기술이전 추진을 통해 지중 공간 공조시스템 시장 선점.				
국문핵심어 (5개 이내)	지중 다중이용시설	액체식 제습시스템	증발 냉각시스템	신재생 에너지시스템	실내공기질
영문핵심어 (5개 이내)					

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요	5
1.1 연구개발의 필요성	5
1.2 연구개발 대상의 국내외 현황	7
1.3 기술개발 성숙도	14
1.4 연구개발의 중요성	15
1.5 선행 연구 내용 및 결과	17
2. 연구수행내용 및 성과	21
2.1 연구개발의 목표 및 내용	21
2.2 연구개발의 추진전략·방법 및 추진체계	26
2.3 1차년도 연구 수행 내용	29
2.4 2차년도 연구 수행 내용	55
2.5 3차년도 연구 수행 내용	100
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	142
3.1 1차년도 연구개발 성과 평가	142
3.2 2차년도 연구개발 성과 평가	151
3.3 3차년도 연구개발 성과 평가	161
3.4 연차별 연구 성과 자체 평가	172
3.5 목표 미달성 시 원인 및 차후대책	174
4. 연구개발성과의 활용 계획	175
 붙임. 참고 문헌	 177

<별첨> 주관연구기관의 자체평가 의견서

1. 연구개발과제의 개요

1.1 연구개발의 필요성

가. 연구개발의 배경

- 2000년대 이후 지중공간을 활용한 대형할인점, 지하철역사, 쇼핑몰, 공연장, 체육 및 문화시설 등의 다중이용시설이 크게 늘어나고 국민들이 이러한 지중공간에서 보내는 시간도 증가하면서 국민건강과 쾌적한 실내환경, 깨끗한 공기질을 확보하면서 국가 탄소배출 저감목표 달성에 기여할 수 있는 새로운 저에너지 친환경 공조시스템의 개발이 요구되고 있음.
- 지중에 건설되는 다중이용시설은 폐쇄적인 지중공간의 특성상 기계적인 방법만을 통해 실내 쾌적 온습도 및 공기환경을 유지해야 함으로써 에너지소비가 많고, 다중이용시설 내에서 발생하는 공기오염원 뿐 아니라 지중에서 자연적으로 발생하는 유해한 미세먼지, 석면, 곰팡이, 미생물, 라돈 등의 유해 공기 오염물질이 지속적으로 실내 공기 중으로 확산되어 국민의 건강 및 안정상 심각한 위험요소로 자리 잡고 있음.
- 현재 국내 지중 다중이용시설에 적용되고 있는 기존의 공기조화 시스템은 냉난방 에너지 절감을 위해 오염된 공기의 70-80%가 실내로 재순환 되고 있으며, 설계단계에서 관련법규에서 요구하는 최소 필요의 기만을 재순환 공기와 혼합하여 공급하고 있음.
- 따라서, 기존의 공조시스템은 오염된 실내 공기의 대부분이 외부로 배출되지 않고 실내로 다시 공급됨으로써 재실자들이 유해한 오염물질에 노출되는 시간이 상대적으로 길며, 냉난방 및 환기를 위해 필수적으로 운전하는 공조기를 통해 지엽적으로 발생한 오염원이 오히려 전체 공간으로 빠르게 확산되는 치명적인 교차오염의 문제점이 발생하고 있어 기존 지중 다중이용시설 공조시스템의 문제점을 해결할 수 있는 새로운 기술적 대안이 필요함.
- 대표적인 지중 다중이용 시설인 지하철 역사의 공기질 및 환기 방안에 대한 연구가 스크린도어가 설치완료된 2010년 이후로도 지속적으로 수행되었는데, 공통적으로 최소 환기량 이상의 외기 공급을 통하여 실내 공기질을 개선하는 방향의 중요성을 언급하면서 친환경적이며 에너지 절약적인 지중공간을 위한 공조시스템 개발의 필요성 강조하고 있음. 그러나 실질적이고 혁신적인 대안을 제시하고 있지 못함.
- 기존 공조시스템에서 필연적으로 발생하고 있는 교차오염 문제는 밀폐된 지중 다중이용시설 내부에서 공기를 통한 신종 감염성 질병 확산 및 불특정 다수의 국민을 대상으로한 심각한 테러 위험 중 하나인 생화학 물질 살포에 매우 취약함.
- 기존 공조시스템은 지구온난화지수(Global Warming Potential)가 상대적으로 높은 냉매를 사용함으로써 정부차원의 지구온난화 방지를 위한 정책목표 달성에 큰 부담을 주고 있어 기존 냉매를 사용하지 않는 차세대 공조시스템 개발이 필요함.
- 최근 북미 및 유럽 선진국을 포함하여 국내에서도 기존 공조시스템 대비 높은 에너지 절감이 가능하고, 기존 냉매를 전혀 사용하지 않으며, 오염된 실내공기는 모두 외부로 배출하고 신선한 외기만을 도입하여 실내 냉난방 및 환기를 공급함으로써 실간 교차오염 문제를 원천적으로 차단할 수 있는 차세대 공조시스템 기술이 개발되어 실용화 직전 단계에 접어들고 있음.
- 미국의 경우 국립재생에너지연구소(National Renewable Energy Lab., NREL)에서 2010년부터 액체식 제습시스템과 고효율 간접식증발냉각 기술을 이용한 DEVap 시스템을 개발하고 있으나 본 시

시스템은 기존 공조시스템과 같이 오염된 실내공기의 일부를 급기측으로 재순환 시켜 시스템의 에너지 효율을 높이는 방법을 적용함으로써 실내 교차오염 문제에서 자유롭지 못한 단점을 가지고 있음.

- 기존 지중 다중이용시설 공조시스템의 문제점 해결을 위한 대안으로 차세대 친환경 공조시스템 기술인 제습 증발냉각 기술기반 전외기 공조시스템의 상용화가 필요하며, 선진국을 중심으로 기술개발이 진행되고 있으나 실제 상용화 제품은 아직 생산되고 있지 않아 관련 시장선점을 위한 기술 개발이 신속히 이루어질 필요가 있음.

나. 연구개발의 필요성

- 본 연구에서는 앞서 살펴본 기존 지중 다중이용시설에서 적용되고 있는 공조시스템에서 나타난 문제점들을 해결하기 위한 연구임. 본 시스템은 100% 외기만을 이용하여 실내 공기질 및 교차 오염의 문제를 해결하는 한편, 차세대 친환경 공조방식인 제습증발냉각기반 고효율 전외기 공조시스템을 이용하고, 지역열원 및 지중 미활용 열원을 이용하는 시스템임. 이를 통해 기존 공조시스템 대비 30%의 1차에너지 소비량 절감 및 탄소배출 저감이 가능한 지중 다중이용시설을 위한 차세대 제습증발냉각기반 전외기 공조시스템의 상용화 기술을 개발하고자 함.
- 일반 건물에 비해 많은 양의 외기공급이 필요한 지중 다중이용시설에 적용 될 경우 가장 높은 가시적인 개선 효과가 예상되는 차세대 공조시스템 적용기술 개발을 국가 주도로 신속하게 진행하여 민간에 이전할 경우, 전세계적으로 공통되게 대두되고 있는 지중 공간활용에 있어의 고질적인 문제점인 공기질 악화 및 냉난방 에너지 소비증가 문제를 획기적으로 개선할 수 있어 국내 관련 산업의 새로운 글로벌 성장 동력으로 활용될 수 있음.
- 현재 차세대 공조시스템을 구현하는 핵심 기술로는 물의 증발잠열을 이용하여 실내로 급기되는 공기를 냉각시켜 냉방 에너지 소비를 최소화 하는 고효율 증발냉각기술과 고체식 또는 액체식 제습시스템을 추가하여 증발냉각효과를 극대화 함으로써 기존 냉동기의 운전없이 실내에 냉방을 공급하는 Non-vapor compression 냉동기술에 기반하고 있음.
- 미국 에너지성(Dept. of Energy)의 2014년 보고서에 의하면 실용화 및 에너지 절감효과가 우수하여 차세대 Non-vapour compression 기반 공조시스템에 적용가능한 17개의 유망기술 중 액체식 제습 증발냉각(Evaporative liquid desiccant A/C)기술 및 증발냉각관련 기술이 상위를 차지하고 있음 (그림 1).

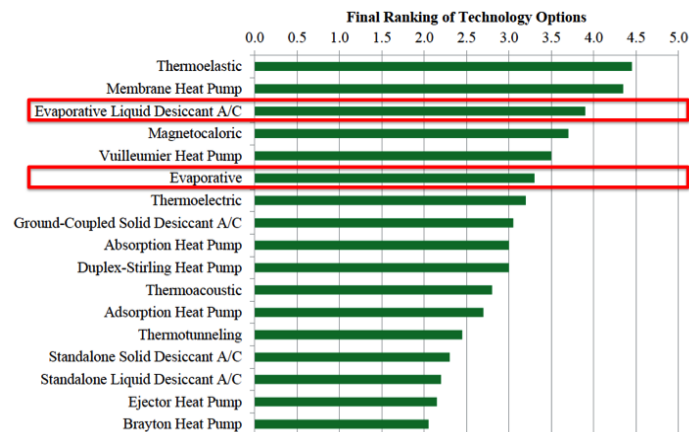


그림 1. 차세대 공조시스템에 적용가능한 17개의 유망기술 순위(미국 DOE, 2014)

- 국내에서도 2008년 이후 액체식 제습 및 증발냉각기반 전외기 공조시스템에 대한 연구가 활발하게 진행되어 핵심기술에 대한 국내 특허등록(그림 2)이 2015년 완료된 바 있어 차세대 공조시스템 개발 관련 핵심기술 확보와 함께 선진국과의 기술격차가 크지 않아 신속한 상용화 추진이 가능할 것으로 판단됨.



그림 2. 제습 증발냉각 기술 기반 전외기공조시스템 특허

- 이상의 선행연구를 통해 얻어진 특허들은 제습 증발냉각 기술 기반 전외기공조시스템의 개념 및 열역학적 프로세스, 제습제의 재생열원 및 제습용액의 냉각방식 등에 대한 특허들로서 실제 상용화를 위한 시스템 구성, 패키지 유닛 제작 기술 및 구성요소별 목표 성능 달성 등에 대한 후속 연구가 필요함.
- 제습 증발냉각 기반 전외기 공조시스템의 지중 다중이용시설 적용 및 상용화 제품 개발을 위해서는 시제품 개발 및 테스트 베드 적용을 통한 실증연구가 진행되어야 함.

1.2 연구개발 대상의 국내외 현황

가. 지중 다중이용시설 국내외 증가 추이

- 유엔 보고서(2013) 에 따르면 전 세계 인구는 2050년 약 100억 명에 가까워 질 것으로 예상하며, 이중 70%인 70억 명에 가까운 인구가 도심에 살게 될 것으로 예상하고 있음. 이에 따라서, 도심지 지중 공간 개발의 중요성이 대두되고 있으며, 국내 및 국외의 다수의 연구를 통해 지중 다중이용시설 개발 및 소요기술 개발 사업이 진행 중에 있음
- 2009년 통계청 자료 기준으로 우리나라 인구밀도는 490명/km² 으로 세계 3위의 높은 수준을 나타냄. 특히, 수도권 지역의 경우 세계 최상위권의 인구밀도로 인하여 지상공간의 부족으로 지중 다중이용시설에 대한 광범위한 개발이 필수적인 것으로 나타남.
- 2016년 서울시의 영동대로 ‘광역복합환승센터’ 조성사업 계획 발표에 따라서, 삼성동 일대를 중심으로 한 깊이 51m (지하 6), 건축 연면적 약 16만m²의 지중공간 개발 사업이 국내 최대 규모로 진행되는 것도 좋은 사례임.
- 국외의 경우 2000년대를 기점으로 지중 공간개발에 관한 다수의 연구가 진행 되고 있으며, 대도심을 중

심으로 한 지중 공간 개발과 관련된 다양한 연구가 진행되고 있음.

- Bobylev (2009)에 따르면, 도심지의 인구밀도가 높은 도시일수록 지중 공간 사용량이 많다는 것을 연구를 통해 확인 하였으며, 추후 인구 과밀에 따른 지중 다중이용시설 확장을 예상하였음. 이러한 연구를 통해 추후 지중공간 개발 확대에 따른 차세대 공조시스템이 적용 시장 규모의 확대를 충분히 예측할 수 있음.

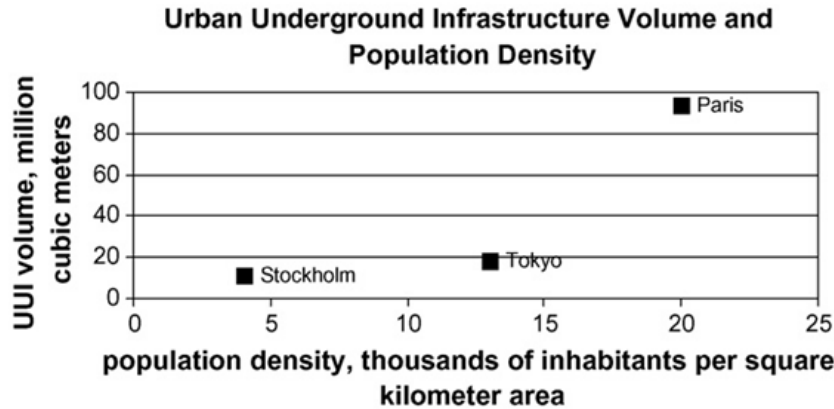


그림 3. 도심지 인구밀도와 지중공간 개발 현황에 대한 분석

- L. He (2012)등의 연구에 의하면 중국의 대표 도시인 상해의 경우 2000년을 기준으로 지중공간 개발이 본격화 되었으며, 실제 연면적 4천만 m^2 규모의 지중공간이 새로 구축 되어있으며 (2010년 3월 기준), 수도인 베이징의 경우도 지중 다중이용시설의 규모도 연면적 3천만 m^2 에서 9천만 m^2 로 증가할 것으로 예측함.
- 이처럼, 전 세계적인 지중공간 개발 사업이 지속적으로 진행 될 것으로 예상됨에 따라 본 연구를 통해 개발된 차세대 공조시스템의 잠재적인 시장 형성 및 지속적 성장이 예측되고, 현재 구축되어있는 지중공간 적용 및 향후 개발 될 지중공간에 필요한 핵심기술로서의 가치가 있을 것으로 판단됨.

나. 제습 증발냉각 시스템의 국내외 현황

- 미국은 주거용 및 상업용 건물이 2010년 기준으로 미국 전체 1차 에너지 소비량의 41%를 차지하여, 교통(28%), 산업(31%)에 비해 많은 1차 에너지를 사용하고 있으며, 미국전체 전기생산량의 74%, 천연가스 생산량의 34%를 소비하여, 미국 내 탄소배출량의 40%를 차지하고 있음(DOE, 2011). 이에 미국 에너지성(U.S. DOE)은 건물 분야에서의 에너지 절감을 위한 노력으로 2010년 말에 Building Technologies Program(BTP)이라는 새로운 범국가적인 기술개발 및 실용화계획을 마련하고, 2030년까지 2010년 건물수준 대비 50% 이상의 에너지 절감을 목표로 연구를 진행하고 있음.
- 이중 2010년 기준으로 건물 전체 1차 에너지 소비량의 41%를 차지하는 HVAC 시스템은 건물 에너지 절감에 있어서 가장 핵심이 되는 부분임. 특히, 약 13%의 1차 에너지 소비량을 차지하는 건물 냉방부분과 13%를 차지하는 환기부분에서의 에너지 절감은 건물 전체 에너지 절감의 가장 핵심되는 부분이며, 이에 BTP에서는 건물 냉난방 공조 및 환기 (HVAC)에서의 1차 에너지 절감 목표를 2020년까지 2010년 대비 24%로 설정하였음.
- 한편, 현재의 온실가스 배출 규제가 CO₂에만 주로 집중되어있는데 반해, 최근 미국, 캐나다, 멕

시코를 중심으로 CO₂보다 1,370~2,100배 많은 지구온난화지수(Global Warming Potential, GWP)를 가지는 CFCs와 HCFCs의 생산 및 소비를 규제할 것을 몬트리올 프로토콜에 추가하는 안을 제안하면서, 이에 대한 절감이 주요 이슈로 다시 떠오르고 있음. 현재, 전 세계적으로 건물 냉방의 99%와 난방의 11%를 냉매 압축식 시스템(vapor-compression equipment)이 담당하는데, 여기에 사용되는 플루오르카본 기반 냉매는 대기 중에 노출될 경우, 환경에 심각한 영향을 미치며, 이러한 노출이 설치, 이동, 수리 중에 빈번하게 발생하게 됨. 이에 따라, 미국, 캐나다, 멕시코에서는 2013년 4월 HFCs의 사용을 2016년에서부터 2033년까지 현재 사용량의 85%를 절감하는 목표를 설정하였으며, 또한, 유럽연합(EU)에서도 HFCs의 사용을 2030년까지 2014년 사용량 대비 2/3 수준으로 줄이는 목표를 설정하여 2015년 1월 1일부로 직접적인 판매 규제에 도입하였음(European Commission. 2013).

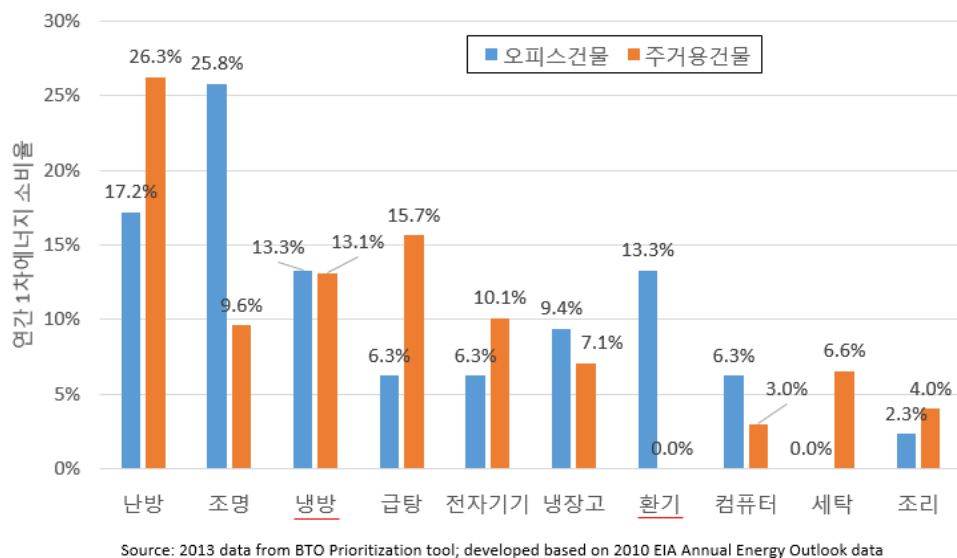


그림 4. 건물 1차 에너지 소비율

- 이에 대한 대응으로 EU에서는 낮은 GWP를 가지는 대체냉매 개발 및 히트펌프 효율 향상에 대한 연구들을 중심으로 진행 중임. 독일의 경우, 독일의 환경부 산하의 Green Cooling Initiative를 통해, 플루오르카본 냉매를 대체하거나, 사용하지 않는 냉동공조방법에 대한 전세계 네트워킹을 형성하여, 이러한 규제에 대응하고 있음. 하지만, 이러한 대체냉매의 개발과 히트펌프 효율 향상에 대한 연구의 경우, 결국 적은 양의 플루오르카본 기반의 냉매를 사용해야 한다는 문제점이 있음. 이에 최근 미국의 경우, 최근 미국 에너지성에서 1.5백만 달러 규모로 아래의 두 가지 기술 개발에 집중적인 연구투자를 시작하고 있음.

- Innovation: 무냉매 압축냉동 HVAC 기술(Non-vapor-compression HVAC technologies)
- Frontiers: 고효율 압축냉동 HVAC 기술(Advanced vapor-compression HVAC technologies)

- 이상의 기술들은 궁극적으로 상호 결합되어 건물에서 사용되는 에너지를 스스로 자급하는 에너지자립형 건물(Net-zero energy building, ZEB)을 실현하거나, 또는 건물이 방출하는 CO₂의 양만큼을 다양한 에너지 절약기술 적용을 통해 절감하는 탄소중립 건물(Carbon-neutral building)

을 구현하는데 필요한 핵심기술들임. 특히 고효율 HVAC 시스템 개발과 관련된 연구들은 건물의 환기 및 냉난방에 들어가는 에너지 소비를 최소화 하면서도 최상의 쾌적하고 건강한 실내 환경을 확보할 수 있는 차세대 HVAC 시스템 개발에 초점이 맞춰져 있음. 이것은 매우 높은 초기투자가 요구되는 신재생에너지 기술을 건물에 적용할 때 현실적인 수준의 경제성을 확보하기 위해서는 저에너지 고효율 HVAC 시스템의 개발이 무엇보다 필수적이기 때문임. 현재 우리나라에서는 친환경 고효율 HVAC 시스템과 관련하여 다음과 같은 연구들이 진행되었거나 현재 진행되고 있음.

- 저에너지친환경공동주택연구단: 바닥 복사냉난방시스템, 모세관 복사냉방시스템, 고효율 온수 분배기, 지능형 난방제어 시스템.
- 한국과학기술연구원(KIST) 열유동제어연구센터: 재생형증발식냉방기, 고효율 밀집형 액체 제습냉방 기술 개발
- 능동형녹색빌딩(Active Green Building)연구단: 저에너지환기기술, 열원다변화냉난방기술
- 이상의 연구들 중에서 제습냉방시스템과 관련된 연구는 제습로터 또는 전열교환기를 이용하여 여름철 급기에 포함된 잠열을 일정 수준까지 미리 제거함으로써(Roth et al. 2002; Zhang and Niu 2003; Jeong et al. 2003) 냉방시스템의 필요 용량을 줄임과 동시에 효율적인 운전을 통해 에너지 소비를 절감시키는 기술로써 현재 사무용 건물 및 초고층 주상복합 공동주택들을 중심으로 실용화 단계에 접어들어 있음 (김광현. 2008; 김옥 외 2007). 또한, 바닥복사패널 및 모세관을 이용한 복사냉방시스템에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있으며, 고성능 제어시스템을 통한 냉난방시스템의 적정 운전에 따른 에너지 절감을 위한 연구가 이루어지고 있음.
- 한편, 최근 북미 및 유럽의 여러 선진국들이 물의 증발잠열만을 이용하여 냉방을 공급하는 무공해 냉방시스템에 관한 연구들을 적극적으로 수행함에 따라 (Bowman et al. 2000; Costelloe et al. 2007, Dai et al. 2002; Glanville et al. 2011; Des Champs et al. 2011) 우리나라에서도 최근 증발냉각을 이용하여 친환경적이면서 에너지 절약을 동시에 추구하는 새로운 냉방시스템에 대한 관심이 고조되고 있음.
- 지난 2004년 한국과학기술연구원(KIST)에서는 소형 재생형증발식냉방기 기술을 개발하였으며 (최봉수 외, 2004), “물 에어컨”이라는 별칭으로 소개되면서 기존의 에어컨을 대체할 가능성이 있는 자연친화적 냉방기술로써 많은 관심을 받았다. 또한 최근에는 증발잠열을 이용한 현열교환 개별 환기시스템의 초고층 공동주택 적용에 대한 연구(정수연 외, 2008)도 수행되고 있음.
- 물의 증발잠열을 이용한 냉방시스템은 여름철 외기의 온도는 높으나 습도는 상대적으로 낮은 유럽지역, 또는 건조한 기후지역에서만 사용가능한 시스템으로 여겨져 왔음. 그러나 급기축 공기와 증발냉각을 위해 분사되는 물이 직접적으로 접촉하지 않는 간접증발냉각방식(indirect evaporative cooling)을 사용할 경우 우리나라와 같이 여름철 고온다습한 기후지역에서도 경제성 있는 냉방효과를 얻을 수 있다는 사실이 알려지면서 (Masheshwari et al. 2001; Gasparella and Longo 2003; 정용호, 2008) 증발냉각을 이용한 냉방시스템이 새롭게 주목 받고 있음.
- 또한, 제습로터 등을 추가로 결합시켜 사용할 경우 (Zhang and Niu, 2003; 장연수 외 이대영, 2004) 더욱 우수한 냉방효과와 함께 에너지소비 절감을 통한 탄소배출 감소, 그리고 기존 냉매

들과는 달리 환경파괴의 우려가 없는 물을 사용한다는 뛰어난 친환경적인 특성으로 인해 증발잠열을 이용한 냉방시스템에 대한 연구개발은 앞으로 더욱 힘을 얻게 될 전망이다.

- 그러나, 지금까지의 연구들을 통해 제안된 증발냉각시스템은 여름철 급기온도가 23~26°C 범위 내에서 결정되는 경우가 대부분이어서 급기량이 매우 크지 않고는 일반적인 건물에서 충분한 냉방효과를 기대하기 어렵다는 문제점이 있음(동아일보, 2004).
- 이러한 제약으로 인해 현재까지는 실내의 쾌적한 공기질을 유지하기 위해 필요한 최소 환기량을 실내온도에 가까운 중립온도(neutral temperature)로 공급하는 외조기, 또는 실내의 현열부하 발생량이 크지 않은 경우에 사용 가능한 소형 냉방기로 개발되고 있는 실정임.
- 한편, 실내 공기질 향상을 위해 100% 외기만으로 실내환경을 조절하는 전외기공조시스템(100% outdoor air system)에 대한 연구가 선진국들을 중심으로 활발히 진행되고 있는데, 이것은 기존의 공조시스템에서 에너지절약을 위해 오염된 실내 공기의 70% 이상을 실내로 재순환 시키면서 발생한 sick building syndrome이나 실간 교차오염(cross contamination)과 같은 공기질 관련 문제들이 매우 심각해졌기 때문임.
- 즉, 오염된 실내 공기는 모두 외부로 배기시키고 신선한 외기만으로 공조를 함으로써 쾌적하고 건강한 실내 공기질을 확보하는 기술이라는 점에서 전외기공조시스템에 대한 기대가 더욱 커져가고 있음. 그러나, 현재까지 제안된 증발냉각시스템들은 전외기공조시스템 개발에 대한 세계적인 흐름에서 다소 벗어나 여전히 기존 공조 시스템에서와 마찬가지로 실내 공기의 재순환에 기반을 두고 있어 실내 공기환경이 크게 개선되기를 기대하기 어렵다는 문제점이 있음.
- 이상의 증발냉각기반 공조시스템의 한계는 물의 증발냉각효과를 극대화 할 수 있는 기술이 접목되면 극복할 수 있을 것으로 판단되는데, 현재 가장 실현 가능성이 높은 대안은 기존의 고체 또는 액체 제습제를 적용하는 제습시스템(Desiccant-Based Dehumidification System)을 증발냉각시스템에 접목한 제습 증발냉각시스템의 개발을 통해 도출될 수 있을 것으로 판단됨.
- 최근까지 연구동향을 살펴보면 제습로터의 사용을 통하여 증발냉각효과를 증대시키는 연구가 가장 활발하게 이루어졌으나(이진교 외, 2010; 이재완 외, 2004), 제습제의 재생을 위해 로터의 일부를 가열하는 방식으로써 통과되는 공기의 제습 및 가열이 동시에 일어남에 에너지 소비 측면에서 비효율적이라는 문제가 제기되고 있음 (그림 5(a)). 이에 최근 들어서는 여러 가지 제습기술 중 제습 이후 통과공기의 건구온도변화가 크지 않은 액체 제습제를 활용하는 시스템(Liquid Desiccant-Based Dehumidification System)이 관심을 받고 있음 (최재영 외, 2010; 조성호 외, 2010; Zhen et al. 2010) (그림 5(b, c)).
- 본 제습시스템과 증발냉각시스템을 접목한 제습 증발냉각기반 전외기공조시스템 관련 연구(김민휘 외, 2010)에서는 액체식 제습시스템과 간접식 및 직접식 증발냉각 시스템을 함께 사용하여 기존의 냉각코일을 사용하지 않고 급기의 온습도 제어성능 향상과 함께 간접식 및 직접식 증발냉각기의 효율에 따라 기존 HVAC시스템 대비 21~51%의 연간 냉난방에너지 절감을 이룰 수 있음을 입증하였음.
- 하지만, 제습 증발냉각기반 전외기공조시스템의 경우도 우리나라의 고온다습한 여름철 조건하에서 기존 HVAC시스템 대비 30% 이상의 운전에너지 절감을 달성하기는 여전히 어려운 문제임.
- 이러한 문제점을 해결하고, 기존의 제습증발냉각기반 전외기 공조시스템의 효율을 향상하기 위해서는 최근 제안되어 고효율 증발냉각시스템으로 알려진 M-cycle(Maisotsenko cycle) 혹은 재

생식 증발냉각기를 이용하여 기존의 간접식 및 직접식 증발냉각기를 대체하는 방안도 고려해 볼 수 있을 것으로 판단됨. M-cycle 에서는 증발냉각과 현열교환을 바탕으로 급기를 1차적으로 냉각시키며, 이후 급기의 일부가 다시 2차측의 증발냉각부로 이동하면서 증발냉각과 동시에 추가적인 냉각을 일으킴. 이때, 급기의 노점온도에 가깝게 냉각시킬 수 있고, 추가적인 잠열의 증가 없어 기존의 간접식 증발냉각기에 비해 효과적으로 낮은 급기온도를 유지할 수 있음 (그림 6(a, b)).

- M-cycle 증발냉각기를 이용할 경우 실내의 배기를 이용하지 않고, 급기의 일부를 다시 2차측으로 급기되는 방식이므로, 실내의 배기가 버려지게 됨. 이때, 도입 외기측에 추가적인 전열교환기를 설치하여 비교적 건조한 실내의 공기와 도입 외기의 잠열교환을 통해 액체식 제습시스템의 제습부하를 효과적으로 줄이면서, 운전에너지 또한 절감되는 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단됨.

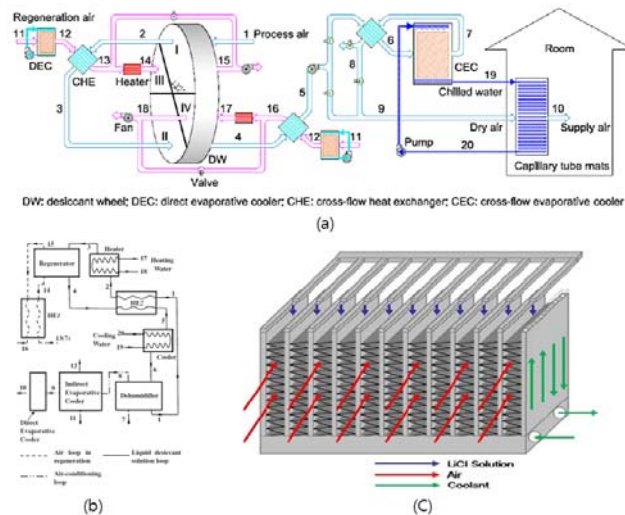


그림 5. 제습제를 이용한 증발냉각 시스템 (a) 제습로터 (Dong et al. 2010) (b) 액체식 제습제 증발냉각 시스템 개요도 (Min et al. 2009) (c) 액체식 제습시스템 (최재영 et al. 2010)

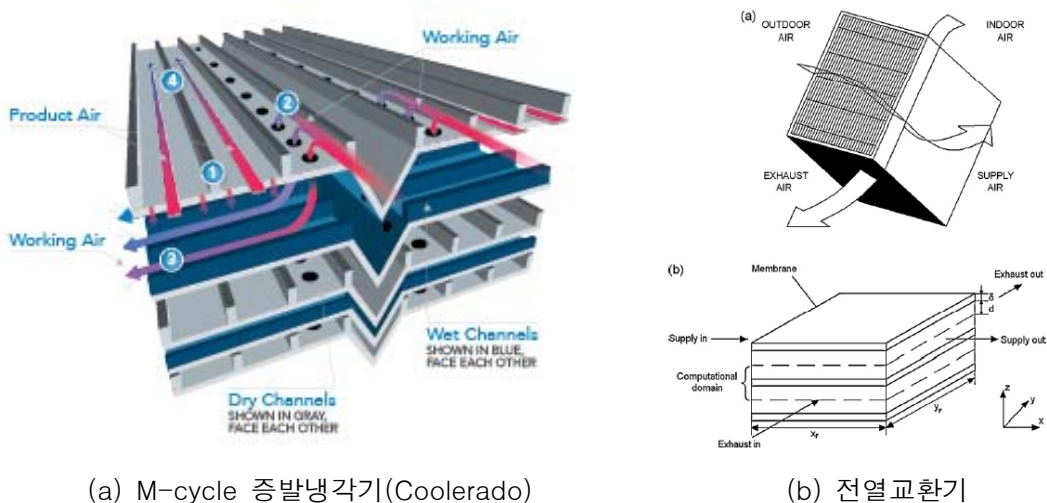


그림 6. M-cycle 증발냉각 및 전열교환기

다. 지중 공간 공기질 및 에너지 절감에 관한 국내외 현황

- 국내의 경우 90년대 말 부터 지하역사의 공기질 및 환기 방안에 대한 연구가 지속적으로 수행되어 왔음을 확인하였는데 (표 1), 공통적으로 적절한 환기량 공급을 통하여 실내 공기질을 개선하는 방향의 중요성을 언급하면서 친환경적이며 에너지 절약적인 시스템 개발의 필요성 강조하고 있음. 그러나 실질적이고 혁신적인 대안을 제시하고 있지는 못함.

표 1. 지중 공간 공기질 관련 국내 연구 사례

저자	연구 내용
김윤신 외 (1999)	서울시내 지하철 구간의 실내 공기질 실측을 통해 지하역사 실내 공기질을 개선할 수 있는 적절한 환기 시스템 및 오염물 제거 방안에 대한 필요성을 언급함.
손부순 (2001)	지하역사 승강장의 공기 오염물질 분석을 통해 오염물 발생원 및 발생량에 따르는 대처 방법 등에 대한 연구를 수행함.
김진경 외 (2004)	지하역사 내부의 오염물 농도측정에 대한 실측 연구를 통해 환승로, 승강장 및 대합실 등 위치별 오염물 농도 및 분포 특성에 대한 분석을 수행함.
박동욱 외 (2005)	외기의 오염물 농도 보다 지하역사 실내 및 객차에서 발생하는 오염물의 농도가 더 높다는 것을 확인 하였으며, 이에 대한 적절한 대처 및 해결 방안이 필요함을 언급함.
전재식 외 (2009)	지하역사 내 라돈 농도에 대한 실측연구를 통해 라돈 발생에 대한 적절한 대비가 필요함을 지적함.
김인원 외 (2010)	승강장 스크린 도어 설치를 통한 실내 공기질 개선 효과에 대한 연구를 수행함.
박종현 외 (2010)	지하철 역사 환기 시스템 최적 설계가 에너지 절약 및 실내 공기질 개선에 많은 영향을 준다는 것을 지적함.
김교봉 외 (2011)	서울시내 라돈 노출 우려가 높은 29개 역사의 승강장 스크린 도어 설치 이후 라돈농도 변화 연구를 통해 라돈 오염을 저감할 수 있는 해결방안에 대한 연구를 수행함.

- 국외의 경우 기존 지하철 지하역사 공조시스템의 공기질 개선 효과 및 에너지 효율향상에 대한 한계점을 인식하고 증발냉각 기술 등의 새로운 친환경 공조시스템 기술의 실용화 연구가 진행됨을 볼 수 있음 (표 2).

표 2. 지중 공간 공기질 관련 국외 연구 사례

저자	연구 내용
Yuan et al. (2007)	전산유체해석(CFD)을 통해 지하역사 승강장 환기 최적화 과정을 제안함.
Lin et al.(2008)	지하역사에서 발생하는 열차풍에 대한 해석을 통해 열차풍 배기 샤프트의 위치와 열차풍의 환기 효과와 관련된 연구를 실시함.
Park et al.(2008)	지하역사 승강장에서 미세먼지 발생 특성에 대한 연구를 수행하였으며, 실제 지하역사에서의 발생 특성을 분석하여 실내 공기질 오염에 대한 실측 연구를 수행함.
Hong et al.(2004)	승강장 운영 조건에 따른 공기조화 시스템 에너지 소비와 관련된 연구를 실시함.
Leung et al. (2013)	홍콩 지하철 지하역사의 에너지소비와 관련된 실측값을 바탕으로 역사 설계 조건에 따른 전기에너지 소비를 정량적으로 분석하여 실제 운영 단계에서의 에너지 절감이 가능한 설계 조건을 제안함.
Marzouka et al. (2014)	BIM 프로세스를 접목하여 승강장 열쾌적 조건에 대한 분석 과정이 설계 단계에서 적절히 반영되어야 한다고 지적함.
Lee et al. (2015)	지하역사에서 공조 시스템을 통한 환기 및 이를 통한 실내 공기질 개선과 관련된 분석을 실시하였으며, 기존 시스템을 대상으로 환기와 공기질을 적절히 고려한 시스템 제어를 제안함.
Huang et al. (2014)	기존의 지하역사 공조시스템을 대체할 수 있는 증발냉각 시스템을 적용하기 위한 Mock-up 테스트를 수행하였으며, 역사공간의 실내 공기 온도 습도 특성에 따른 증발냉각 시스템의 적용 가능성에 대한 연구를 수행함.

1.3 기술개발 성숙도

- 연구 착수단계인 **1차년도 연구의 최종성과물은 지중 다중이용시설 공조를 위한 차세대 전외기 공조 시스템의 프로토타입을 개발 단계에 있으며 시제품 개발 단계에 해당하는 TRL 5로 유사환경 시험 단계로 볼 수 있음.** 이는 현재 제습증발냉각 전외기 공조시스템에 대한 이론연구 및 기초실험 검증 단계에 해되는 **TRL 1~4단계의 기술개발이 실험실 수준에서 완료되어 국내 특허등록이 완료된 상태**이기 때문임. 또한, 시스템 설계 및 주요 구성요소의 제작기술이 선행연구를 통해 확보되어 프로토타입 설계 및 제작 관련 연구를 수행할 수 있는 수준임.
- **2차년도 연구의 최종성과물인 차세대 전외기 공조시스템의 목표성능을 실증하기 위한 패키지 유닛**

시제품 개발은 TRL 6의 유사환경 기술시범 단계임. 본 시제품은 프로토타입 개발 이후 목표성능 실증을 위해 실제 적용 가능한 수준인 1000m³/h 용량으로 제작되며, 다양한 지중 다중이용시설 내부 공간과 유사하게 모사할 수 있는 인공기후챔버를 이용하여 시제품의 성능을 테스트함으로써 제안된 시스템의 목표 성능 및 신뢰도 검증을 수행함.

- 3차년도 연구는 실제 지중 시설을 테스트베드로 하여 2차년도에서 개발된 차세대 전외기 공조시스템 시제품을 설치한 후 장단기 운전성능 모니터링을 통해 제안된 시스템의 실용화 가능성을 실증하는 TRL 7 단계의 연구로써 실제환경 시작품 데모 단계임. 장단기 운전을 통해 실제 운전 데이터를 분석하여 실용화를 위한 추가적인 개선점을 도출한 후 제안된 시스템을 수정 보완 하여 상용화를 위한 핵심 준비를 완료함. 참여기업 및 수요기업을 대상으로 기술이전을 완료하여, 본 연구의 종료 후 신속히 TRL 8-9 단계로 진행될 수 있는 기반을 마련함.

표 3. 연구단계별 기술개발 성숙도

구분		연구 착수	연구 종료	단계별 설명	
기초연구 단계	TRL 1	☐	☐	TRL 1	이론적 연구단계
	TRL 2	☐	☐	TRL 2	기술적 개념정립 단계
실험 단계	TRL 3	☐	☐	TRL 3	실험적 증명 단계
	TRL 4	☐	☐	TRL 4	실험실 성능평가 단계
시작품 단계	TRL 5	☒	☐	TRL 5	유사환경 시험 단계
	TRL 6	☐	☐	TRL 6	유사환경 기술시범 단계
실용화 단계	TRL 7	☐	☒	TRL 7	실제환경 시작품 데모 단계
	TRL 8	☐	☐	TRL 8	시제품 설치 및 성능시험 단계
사업화 단계	TRL 9	☐	☐	TRL 9	현장적용/사업화 단계

1.4 연구개발의 중요성

- 본 연구에서 실용화를 추진하고자 하는 지중 다중이용시설을 위한 차세대 공조시스템은 (그림 7)과 같이 도입 외기를 액체식 제습시스템(liquid desiccant dehumidifier)을 통해 제습한 후 고효율 간접식 증발냉각기(indirect evaporative cooler) 및 직접식 증발냉각기(direct evaporative cooler)를 이용하여 기존의 냉매 압축식(vapour compression) 냉각기술을 사용하지 않고 급기를 냉각시켜 실내로 공급함으로써 냉방을 공급하는 새로운 공조시스템이며, 국내의 경우도 관련 기본 기술을 보유하고 있음.

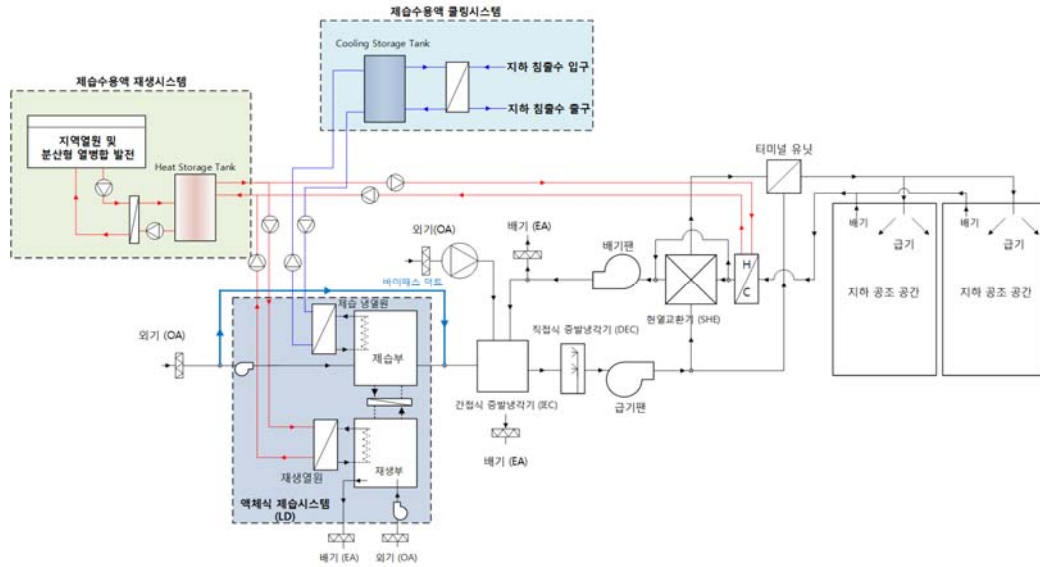


그림 7. 지중 다중이용시설 적용 차세대 전외기 공조시스템 개념도

- 본 연구에서 제안되는 공조시스템은 실내 냉난방 수요에 따라 급기 풍량을 제어하는 변풍량 공조방식을 적용하여 기존의 공조시스템과 풍량 제어 측면에서는 동일하면서도 100% 외기만을 급기함으로써 상시 충분한 환기량 확보가 가능하여 실내 공기질 향상을 가능하게 함. 또한 일반 건물에 적용할 경우 연간 운전에너지 소비 측면에서 기존 공조시스템 대비 30% 이상의 에너지절감 효과가 있음이 연구문헌¹⁾을 통해 확인됨.
- 100% 외기만을 사용하는 공조방식(once-through system)의 경우 재실자 수의 변화가 심하여 필요 환기량 상시 확보 여부가 불명확한 지중 다중이용시설에 적용될 경우 충분한 환기량 확보와 함께 실간 교차오염을 90% 이상 감소시킬 수 있음.
- 본 연구에서 제안하는 시스템의 여름철 운전에 사용되는 제습용액의 재생을 위해 필요한 열원으로 여름철에 수요를 높여야만 하는 지역열원을 사용하거나, 태양열 또는 폐열회수가 용이한 분산형 열병합 시스템을 이용할 경우 기존 시스템 대비 30% 이상의 탄소배출 저감을 실현 할 수 있을 것으로 판단됨.
- 기존 연구문헌²⁾에서 확인된 연료전지를 적용한 제습 증발냉각 공조시스템의 실증 연구에 의하면 화석 연료를 사용하는 기존 공조시스템 대비 높은 1차 에너지 절감 및 탄소배출 저감이 가능 한 것으로 확인됨.
- 본 차세대 공조시스템이 지중 다중이용시설에 적용될 경우 지중에 존재하지만 활용되지 못하고 버려지고 있었던 지중 침출수 등을 열원 및 증발냉각에 사용되는 공급수로 활용함으로써 추가적인 에너지 절감 및 탄소배출 저감 실현이 가능 할 것으로 판단됨.
- 본 연구를 통해 폐열 또는 신재생 열원을 활용하는 제습시스템과, 고효율 증발냉각시스템을 일체화한 제습 증발냉각 전외기 공조시스템의 지중 다중이용시설 적용이 실용화 될 경우 기존의 증기 압축식(vapour compression) 냉각기술이 필요한 부분이 대폭 줄어들어 공조 시스템에서 기존 냉매를 사용하는 시스템 구성요소를 50% 이하로 낮추는 것이 가능할 것으로 판단됨.
- 테스트베드 또는 Mock-up 적용을 위해 제작 예정인 차세대 공조시스템 패키지 유닛 시제품은 연구기간 및 예산을 고려할 때 실용화 연구를 위한 상용 시스템의 기본 용량으로 볼 수 있는 1000m³/h 급으로 설정하였음.

1.5 선행 연구 내용 및 결과

가. 선행연구 과제

표 4. 연구 책임자 선행연구 수행 과제

부처명	사업명	과제명	예산	비 고
한국연구재단	중견연구자지원 사업(핵심-개인)	Decoupled System 개념에 기반한 차세대 친환경 공조시스템 개발	3억	수행기간 (2009-2012)
한국연구재단	중견연구자지원 사업(도약연구-개인)	제습 증발냉각 기술기반 저에너지 친환경 전외기공조시스템 개발	8억4천	수행기간 (2011-2014)
미래창조과학부	스마트 건축물 융합연구단	Wireless Sensor Network 기반 스마트 벤틸레이션 제어시스템 개발-2세부	2억8천	수행기간 (2010-2014)

- 한국연구재단의 지원을 받아 2009년 5월부터 2012년 2월까지 진행된 “Decoupled System 개념에 기반한 차세대 친환경 공조시스템 개발”은 증발냉각 기술을 바탕으로 100% 외기만을 이용하여 실내 공조를 수행하는 전외기 공조시스템에 대한 개념을 정립한 과제임 (그림 8). 본 과제를 통해 대량의 외기를 도입하여 실내의 쾌적한 공기질을 유지하면서도 간접식 증발냉각기를 이용하여 도입 외기를 친환경적이고 경제적으로 전처리하는 간접식 증발냉각기반 전외기 공조시스템에 관한 개념을 정립하였음. 본 선행 과제에서는 증발냉각 기반 전외기 공조시스템의 에너지 절감 성능을 이론적으로 예측하고(TRL 1-2 수준), 실제 실험을 통해 기존 공조시스템 대비 에너지 절감효과를 검증하였음 (TRL 3-4 수준).

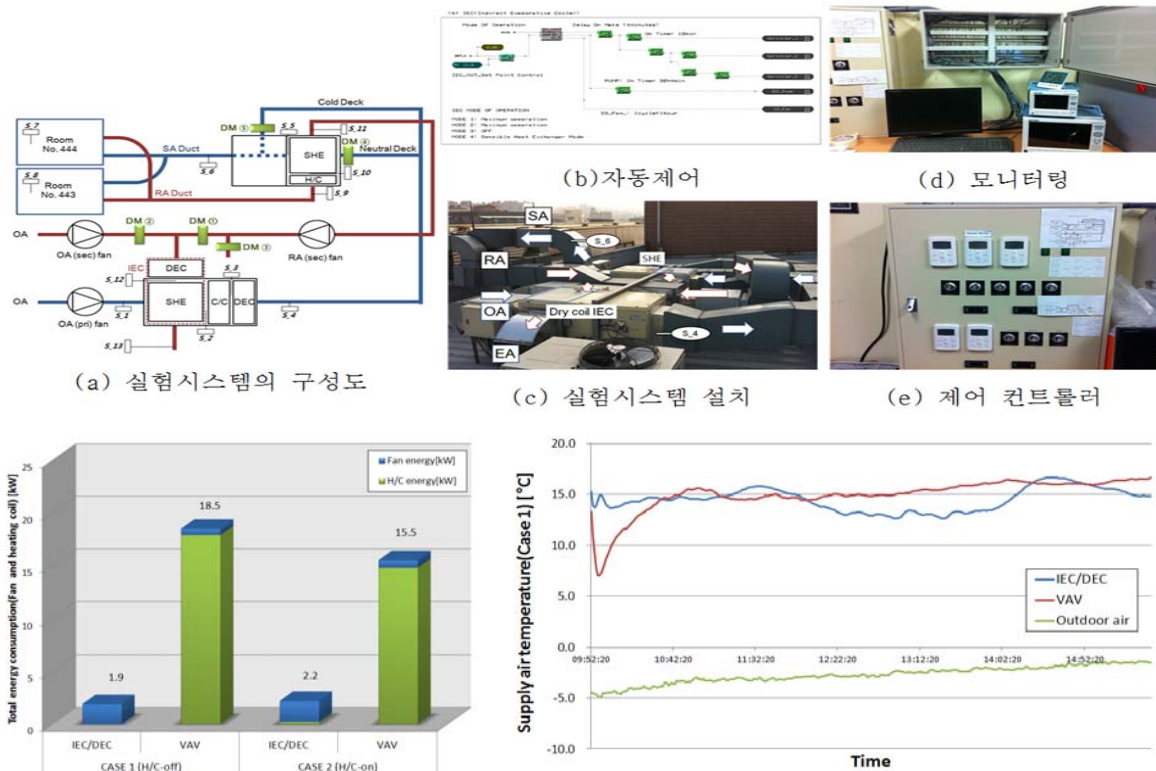


그림 8. Decoupled System 개념에 기반한 차세대 친환경 공조시스템 선행연구 결과

- 한국연구재단의 지원으로 2011년 5월부터 2014년 4월까지 진행된 “제습 증발냉각 기술기반 저에너지 친환경 전외기공조시스템 개발” 연구에서는 대량의 도입 외기를 증발냉각만으로 전처리할 경우, 여름철 냉방에너지 측면에서 기존 시스템에 비해 높은 절감율을 기대하기 어려운 문제점을 해결하기 위해 액체식 제습시스템을 증발냉각 시스템에 적용는 기초연구를 수행함. 본 선행 과제를 통해 간접식 및 직접식 증발냉각 효과를 극대화하기 위한 제습시스템의 적용방안을 이론적으로 검토(TRL 1-2)하고 기존 시스템 대비 여름철 및 연간 에너지 절감 수준을 실험적으로 검증함 (그림 9)(TRL 3-4). 제습증발냉각 전외기 공조 시스템의 실험용 파일럿 시스템을 제작하여 장단기 운전을 진행하였으며, 그 결과 제습시스템과 간접식 증발냉각시스템의 적용을 통해 고온다습한 국내에서도 효과적인 전외기 공조와 함께 기존 시스템 대비 높은 에너지 절감이 가능함을 입증함.
- 본 선행연구는 제습 증발냉각 기술이 적용된 전외기 공조시스템의 실현 가능성을 이론적 및 실험적으로 확인하기 위해 수행한 실험실 수준의 proof-of-concept 단계의 연구로써, 실제 상용화를 위해 필요한 구성요소별 컴팩트화 및 패키지 유닛 시제품 개발 연구를 수행하는 본 제안 연구와는 차이가 있음.



(a) 제습 증발냉각시스템 Proof-of-concept 실험



(c) PEM 연료전지 적용

그림 9. 제습 증발냉각 기술기반 저에너지 친환경 전외기공조시스템 개발 선행연구 결과

- 미래창조과학부의 지원으로 2010년 7월부터 2014년 12월까지 진행된 “Wireless Sensor Network 기반 스마트 벤틸레이션 제어시스템 개발” 연구를 통해(그림 10), 지하주차장에서의 공기질 개선을 위한 새로운 환기시스템에 대한 기초연구를 통해, 지중공간에서의 공기질 개선 및 운전에너지 절감을 위한 이오나이저 적용방안 검토 및 수요기반 환기량 제어의 적용성을 실증함. 본 선행 연구는 지하공간에서의 공기질 개선에 관한 기초연구(TRL 1-2) 및 실험을 통한 검증(TRL 3-4)까지 진행됨.

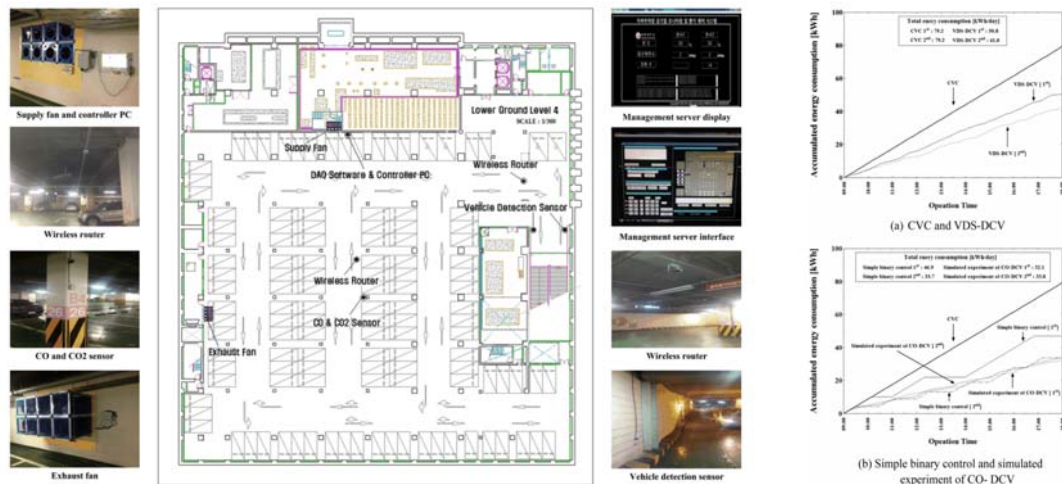


그림 10. Wireless Sensor Network 기반 스마트 벤틸레이션 제어시스템 개발 선행연구 결과

- 본 연구진은 이상의 선행연구를 통해 본 제안과제의 기반이 되는 TRL 1-4 단계의 기술적인 기초 연구 및 실험실 수준의 검증 단계를 착실히 수행하였음. 그러나, TRL 5-7단계의 연구수행 없이는 상용화 시스템을 개발하는 것은 불가함. 이에, 본 제안 과제에서 목표하는 TRL 5-7 수준의 지중 다중이용시설에 적용가능한 제습증발냉각 기반 전외기 공조시스템의 실용화 기술 개발 및 목표성능 실증 연구를 성공적으로 수행할 수 있을 것으로 판단됨.

나. 연구개발과제의 차별화 방안

- 본 연구진이 2009년부터 2014년까지 수행된 선행연구들을 통해 제습 증발냉각 기반 전외기 공조시스템이 기존 공조시스템 대비 냉방기에 32-53%, 난방기에 90% 이상의 운전에너지 절감 성능을 확인하였음. 또한, PEM 연료전지를 적용하여 탄소배출 저감 및 에너지 저감 실험 실증 결과 여름철 21%의 1차에너지 절감 성능을 도출할 수 있었음.
- 하지만, 본 선행연구들은 proof-of-concept 수준에서 새로운 시스템의 실현 가능성에 대한 이론적 해석, 분석 및 실험을 통한 개념 실증이 진행된 결과로 기술적 성숙도가 TRL 1-4의 수준의 연구들이 진행됨.
- 본 선행연구들이 성공적으로 수행됨에 따라, 본 연구에서 제안하는 기술적 성숙도 수준이 TRL 5-7 단계인 실용화 연구의 추진과 성공적인 연구개발 결과물 도출이 가능할 것으로 판단됨. 따라서, 선행연구에서는 proof-of-concept 단계의 성능 예측 및 시스템 구성 가능성 검토를 위해 각 주요 시스템 구성요소들을 개별적으로 제작 및 설치하여 실험실 수준의 실험이 진행되었다면, 본 제안 연구에서는 지중 다중이용시설에 적용하기 위한 시스템 프로토타입 도출 후, 실용화

를 위한 시제품을 제작함으로써 선행연구에서 진행되지 못한 패키지형 제습 증발냉각 기반 전외기 공조시스템의 시제품을 통한 성능 실증이 가능할 것으로 판단됨.

- 본 제안과제에서 개발되는 시제품의 성능에 대한 객관적인 검증을 위해, 공조시스템의 공인성능 인증기관을 통하여 본 시스템의 성능을 검증 및 인증하고, 실제 지중공간을 테스트베드로 하여 시제품을 설치하여 장단기 운전 실험을 통해 목표성능을 실증함으로써 상용화 가능한 단계까지 기술적 수준을 끌어올리는 것이 본 연구의 목표임.
- 아직까지 선진국에서도 대부분 기술개발 초기단계로 상용화 이전이며, 본 제습 증발냉각공조시스템의 패키지형 시스템과 경쟁이 예상되는 시스템이 실험실 수준의 실험단계인 것으로 보았을 때, 본 연구가 성공적으로 수행될 경우 차세대 친환경 공조시스템 시장 선점의 토대를 마련할 수 있을 것으로 판단됨. 이를 바탕으로 국내 친환경 공조시스템 산업의 활성화를 도모하고, 국제사회에서 기술 경쟁력 측면에서 유리한 위치를 선점할 수 있을 것으로 판단됨.

2. 연구수행내용 및 성과

2.1 연구개발의 목표 및 내용

가. 연구개발의 최종 목표

표 5. 연구개발 최종 목표 및 세부 목표

구분	내용
최종 목표	지중 다중이용시설의 실내 공기질 및 쾌적도를 극대화 할 수 있는 <u>저에너지 친환경 제습 증발냉각 기반 전외기 공조시스템의 실용화 기술</u> 개발
세부 목표	- <u>Non-vapour compression 냉각기술에 기반한 전외기 공조시스템의 지중 다중이용시설 적용을 위한 상용화 기술</u> 확보. - 외기만을 이용해 지중 다중이용시설에 공조 및 환기를 공급함으로써 <u>기존 대비 30% 이상 향상된 실내 공기질 및 쾌적도 달성</u>. - 전외기 공조시스템 적용을 통해 지중 다중이용시설 내에서의 <u>실간 교차오염 문제 90% 이상 해소</u>. - 지역열원 및 분산형 열병합시스템, 폐열회수, 지중열 및 지중 침출수 등을 활용한 <u>친환경 열원기술의 적용을 통해 기존 대비 30% 이상의 1차 에너지 절감과 탄소배출 저감 달성</u>. - 액체식 제습 및 증발냉각기술을 활용하여 냉방 시 <u>높은 GWP를 가진 기존 냉매 사용량 50% 절감 달성</u>.

나. 연차별 연구개발 목표 및 내용

- 본 연구는 총 3년(36개월)간 수행될 예정이며, 1차년도 지중 다중이용시설에 적용가능한 제습증발냉각 기반 전외기공조시스템 프로토타입 개발, 2차년도 패키지 유닛 시제품 제작 및 목표성능 검증, 3차년도 테스트베드 적용을 통한 실용화 가능성 실증 및 기술이전을 통한 상용화 추진을 수행함 (그림 11).

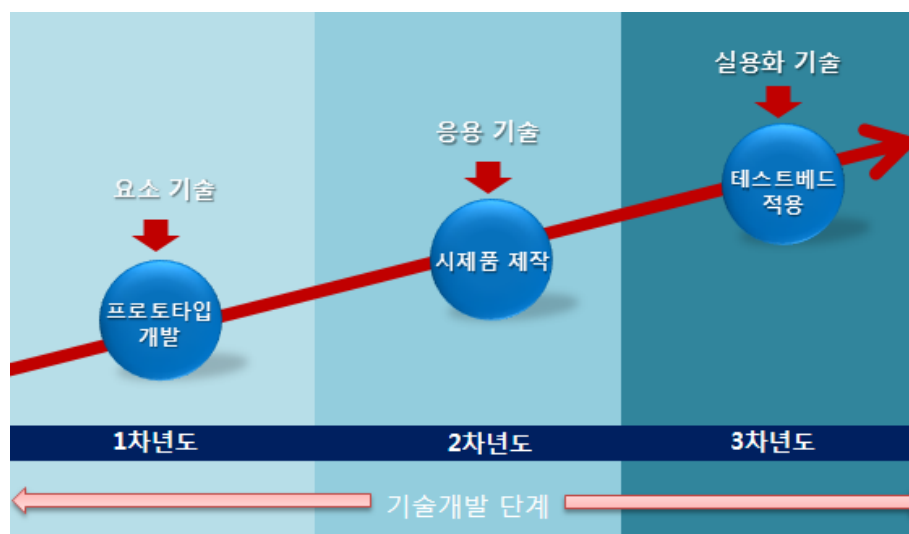


그림 11. 단계별 연구추진 계획

(1) 1차 연도(2016)

① 개발 목표

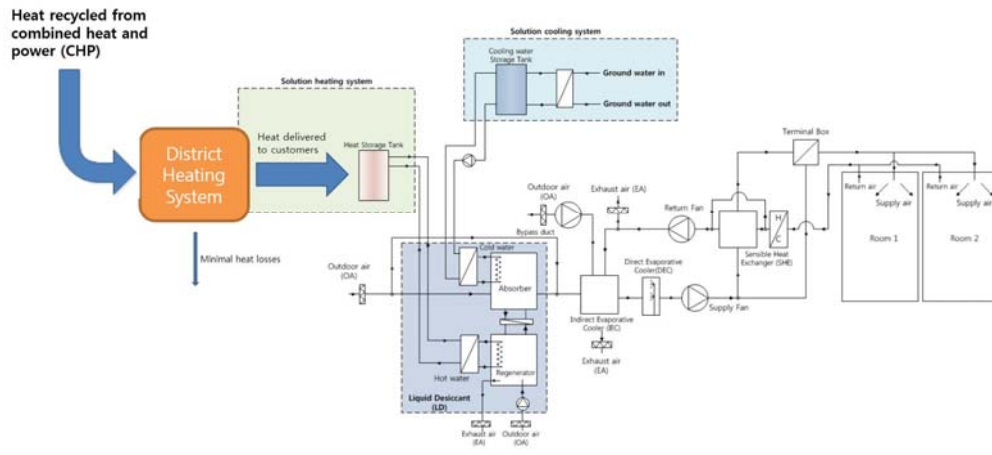
- 주관연구기관(한양대학교 산학협력단): 지중 다중이용시설에 적용가능한 제습증발냉각 기반 전외기공조시스템 프로토타입 도출.
- 공동연구기관((주) 삼화에이스): 제습증발냉각 기반 전외기공조시스템 프로토타입 구성요소 설계.

② 개발 내용 및 범위

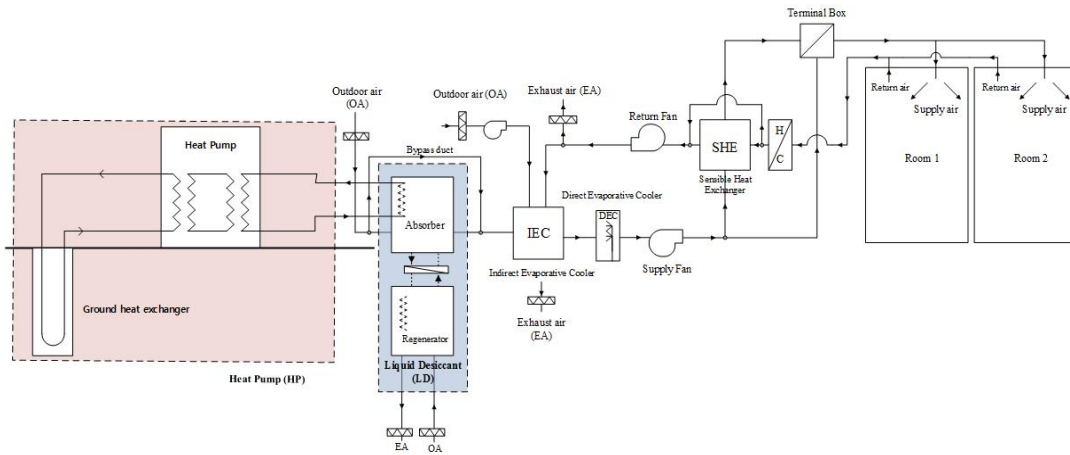
- 주관연구기관(한양대학교 산학협력단): 기존 지중 다중이용시설 공조시스템의 개선점을 도출하여, 차세대 지중 다중이용시설 공조시스템의 목표 성능을 설정함. 이를 바탕으로 차세대 지하 다중이용시설 공조시스템의 프로토타입 개발.
- 공동연구기관((주) 삼화에이스): 기존 지중 다중이용시설 공조시스템 현황 및 문제점 도출, 지중 다중이용시설 공조시스템 관한 수요기업 조사, 제습증발냉각 전외기 공조시스템 구성요소 설계 및 샘플 제작.

③ 상세 연구내용

- Task 1 (주관연구기관: 한양대학교 산학협력단): 차세대 지중 다중이용시설 공조시스템 목표 성능 설정.
 - 에너지절감 및 실내 공기질, 쾌적도 향상을 위한 차세대 공조시스템 구성 요소별 목표성능 도출.
 - 지역열원 및 지중 미활용 열원 적용성 분석 및 활용기술 개발.
- Task 2 (주관연구기관: 한양대학교 산학협력단): 차세대 지중 다중이용시설 공조시스템 프로토타입 개발.
 - 지중 다중이용시설 유형별로 최적화된 차세대 공조시스템 프로토타입 도출.
 - 최적 제어 및 운전 프로토콜 개발.
 - 시스템 설계를 위한 구성 요소별 용량산정 및 설계 프로세스 개발.
- Task 3 (공동연구기관: (주)삼화에이스): 기존 지중 다중이용시설 공조시스템 현황 및 개선점 도출.
 - 지중 다중이용시설 유형별 기존 공조시스템 설치현황 조사.
 - 시스템 운전, 에너지소비, 실내 공기질 및 쾌적도 현황 및 개선방향 도출.
 - 차세대 지중 다중이용시설 공조시스템의 핵심 구성요소인 직접식 및 간접식 증발냉각기와 액체식 제습시스템의 샘플 설계.



(a) 지역열원 적용 방안 예시



(b) 지중 미활용 열원 적용방안 예시

그림 12. 차세대 지중 다중이용시설 공조시스템의 지역열원 및 지중 미활용 열원 적용방안 예시

(2) 2차 연도(2017)

① 개발 목표

- 주관연구기관(한양대학교 산학협력단): 차세대 지중 다중이용시설 공조시스템 패키지 유닛 시제품 기본설계 및 목표성능 검증.
- 공동연구기관((주)삼화에이스): 차세대 지중 다중이용시설 공조시스템 패키지 유닛 시제품 실시설계 및 제작.

② 개발 내용 및 범위

- 주관연구기관(한양대학교 산학협력단): 1차년도에 개발된 차세대 지중 다중이용시설 공조시스템 프로토타입을 바탕으로 패키지 유닛 시제품의 기본설계 및 제작을 지원하고 본 연구진이 보유하고 있는 인공기후실험 챔버 이용하여 목표 성능 검증.
- 공동연구기관((주)삼화에이스): 차세대 지중 다중이용시설 공조시스템의 패키지 유닛 시제품의 실시설계 및 제작. 공인시험기관을 통한 공인성능시험 수행.

③ 상세 연구내용

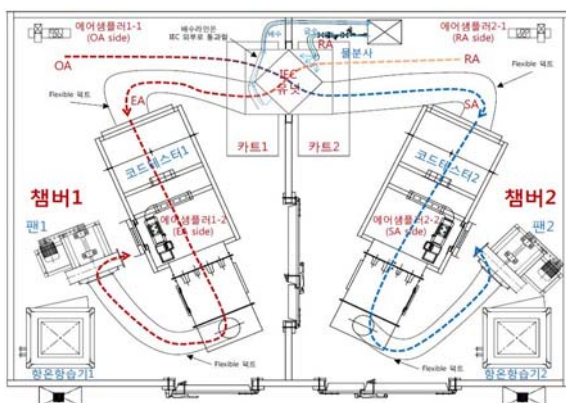
- Task 1 (주관연구기관: 한양대학교 산학협력단): 차세대 지중 다중이용시설 공조시스템 패키지 유닛 시제품 기본설계 및 인공기후실험 챔버를 이용한 시제품 목표성능 실증.
 - 프로토타입에 기반한 패키지 유닛 시제품 기본설계 수행.
 - 인공기후실험 챔버 내에서 패키지 유닛 시제품 운전을 통한 목표성능 실증.
 - 패키지 유닛 시제품 운전을 통한 문제점 분석 및 수정을 통한 시스템 최적화.
- Task 2 (주관연구기관: 한양대학교 산학협력단): 차세대 지중 다중이용시설 공조시스템 설계 프로세스 및 최적운전 방안 도출.
 - 설계단계에 활용할 수 있는 차세대 공조시스템 시뮬레이션 모델 개발.
 - 지중 다중이용시설에 대한 차세대 공조시스템 적용 및 설계 프로세스 도출.
 - 최적 제어 및 운전 프로토콜 개발.
- Task 3 (공동연구기관: (주)삼화에이스): 차세대 지중 다중이용시설 공조시스템 패키지 유닛 시제품 실시설계 및 제작.
 - 1차년도에서 도출된 프로토타입에 기반한 1000m³/h 급 패키지 유닛 시제품 제작.
 - 제작될 시제품 용량은 예산과 추후 적용대상 및 상용화 가능성을 고려하여 수정될 수 있음.
 - 공인시험기관의 성능시험을 통한 시제품에 대한 공인시험성적서 확보.



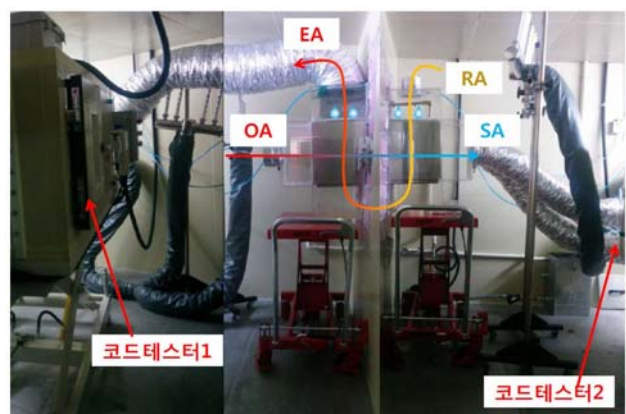
(a) 패키지 유닛 시제품 제작 예시



(b) 인공기후실험 챔버 전경



(c) 인공기후실험 챔버 개요도



(d) 패키지 유닛 시제품 설치시 실험 예시

그림 13. 패키지 유닛 시제품 제작 및 인공기후실험 챔버 (한양대 보유) 이용 실증 실험 예시

(3) 3차 연도(2018)

① 개발 목표

- 주관연구기관(한양대학교 산학협력단): 차세대 공조시스템 패키지 유닛 시제품의 테스트베드 적용을 통한 실용화 가능성 실증 및 기술이전 추진.
- 공동연구기관((주)삼화에이스): 차세대 공조시스템 패키지 유닛 시제품의 테스트베드 설치 및 모니터링 시스템 구현

② 개발 내용 및 범위

- 주관연구기관(한양대학교 산학협력단): 2차년도에 제작된 시제품을 테스트베드에 적용하여 장단기 운전성능을 모니터링하고, 상용화 가능성을 실증 및 기술이전 추진.
- 공동연구기관((주) 삼화에이스): 패키지 유닛 시제품 테스트베드 선정 및 설치, 자동제어 및 모니터링 시스템 설치.

③ 상세 연구내용

- Task 1 (주관연구기관: 한양대학교 산학협력단): 테스트베드 장단기 운전 성능 모니터링.
 - 실제 다중이용시설 또는 유사 지중공간을 테스트베드로 하여 시제품 설치 후 장단기 모니터링 수행.
 - 실제 운전데이터를 바탕으로 자동제어 및 운전 프로세스 최적화 방안 도출.
- Task 2 (주관연구기관: 한양대학교 산학협력단): 테스트베드 운전을 통한 상용화 가능성 실증 및 기술이전 추진
 - 테스트베드에 대한 장단기 운전성능 실측 데이터를 바탕으로 목표성능 실증.
 - 지중 및 지역열원 또는 분산형 열병합시스템의 적용 가능성 검증.
 - 참여기업 및 수요기업에 대한 기술이전 실시.
- Task 3 (공동연구기관: (주)삼화에이스): 테스트베드 설치 및 장단기 모니터링 시스템 구현.
 - 지중 다중이용시설과 유사한 환경을 가진 한양대학교 또는 (주)삼화에이스 보유 지중 공간을 테스트베드로 선정.
 - 테스트베드는 서로 다른 실내환경 조건을 가진 최소 2개소 이상을 선정.
 - 테스트베드에 대한 시제품 설치 및 성능 모니터링 시스템과 측정 데이터 DB 구축.



(a) 지중 공간 공조시스템 설치 예시



(b) 공조시스템 모니터링 시스템 예시



(c) 지중 공간 공조시스템 모니터링 시스템 구축 예시

그림 14. 실제 다중이용시설 테스트베드 설치 및 모니터링 예시

2.2 연구개발의 추진전략·방법 및 추진체계

가. 연구개발 추진전략·방법

- 본 연구는 산-학 연구를 통해 핵심요소기술과 패키지 유닛 시제품 제작을 위한 응용기술을 개발하고 공공 또는 민간 수요자를 대상으로 테스트베드를 선정하여 상용화를 위한 목표성능 실증연구를 수행함.
- 기존 건물에 적용된 사례가 없는 본 연구 결과물의 특성상 실제 수요자를 대상으로 테스트베드를 확보하기 어려울 경우 주관연구기관인 한양대학교 또는 공동연구기관인 ㈜삼화에이스가 보유하고 있는 지중 다중이용시설과 유사한 공간을 테스트베드로 이용할 수 있음.
- 주관연구기관인 한양대학교 산학협력단은 본 연구를 위한 핵심 요소기술과 관련 특허를 보유하고 있으며, 성공적인 선행연구 수행 경험을 가지고 있어 지중 다중이용시설 공조를 위한 차세대 전외기 공조시스템의 요소기술 개발 및 기본설계, 목표성능 검증, 기술이전을 담당함.
- 공동연구기관인 (주)삼화에이스는 직접식 및 간접식 증발냉각 시스템 제작 기술을 보유하고 있으며, 제습 로터 및 액체식 제습시스템 설치 및 운전 경험을 보유하고 있어, 본 연구에서 패키지 유닛 시제품 제작 및 성능인증을 수행함.
- 테스트베드 적용 및 목표성능 실증이 성공적으로 수행되어 상용화를 위한 기술개발이 완료된 후 참여기업을 포함한 다수의 수요기업을 발굴하고 이들을 대상으로 기술이전을 통한 상용화를 추진함 (그림 15).



그림 15. 연구추진 체계도

나. 연구개발 추진체계

연구개발과제	
과제명	지중 다중이용시설 공기질 및 에너지성능 향상을 위한 제습증발냉각 기반 전외기 공조시스템 상용화 기술 개발

기관별 참여 현황			
구 분	기관수	인원수	총인원 수
산업계	1	6	18
대학	1	12	
국공립(연)			
출연(연)			
기타			

주관연구기관
한양대학교 산학협력단

참여연구원
주관연구책임자 (정재원)외 11명

담당연구개발내용
1차년도 - 차세대 지중 다중이용시설 공조시스템 목표 성능 설정 - 차세대 지중 다중이용시설 공조시스템 프로토타입 개발 - 핵심 구성요소 샘플에 대한 성능 실험 - 지중 다중이용시설 유형별 최적 프로토타입 도출, 최적 운전 프로토콜 개발 및 시스템 설계 프로세스 개발 2차년도 - 지중 다중이용시설 차세대 공조시스템 패키지 유닛 시제품 기본설계 - 인공기후실험 챔버를 이용한 시제품 목표성능 실증 - 설계단계에 활용할 수 있는 차세대 공조시스템 시뮬레이션 모델 개발 3차년도 - 테스트베드 선정 및 장단기 운전 성능 모니터링 - 프로토타입 및 시제품 개선점 도출 및 반영 - 참여기업 및 수요기업 발굴과 기술이전

공동연구기관
(주)삼화에이스

참여연구원
공동연구책임자 (최병남)외 5명

담당연구개발내용
1차년도 - 기존 지중 다중이용시설 공조시스템 현황 조사 및 개선점 도출 - 시스템 운전, 에너지소비, 실내 공기질 및 쾌적도 현황 및 개선방향 도출 - 차세대 지중 다중이용시설 공조시스템의 핵심 구성요소인 간접식 증발냉각기와 액체식 제습시스템의 시험용 샘플 설계 및 제작 2차년도 - 지중 다중이용시설 차세대 공조시스템 패키지 유닛 시제품 실시설계 1차년도에서 도출된 프로토타입에 기반한 1000m³/h 급 패키지 유닛 시제품 제작 - 공인시험기관의 공인시험 의뢰 및 시제품에 대한 공인시험성적서 확보 3차년도 - 테스트베드 제공 및 시제품 설치 - 장단기 모니터링 시스템 및 자동제어 시스템 설치 - 프로토타입 및 시제품 보완 - 기술이전 계약 실시

다. 추진일정

표 6. 연구개발 추진 일정표

구분	연구과제명 (연구 수행기관)	관련 성과목표/지표			세부추진내용 (연구수행 Activity)	Activity별 산출물	소요 연구비 (백만원)	1차년도				2차년도				3차년도			
		핵심 성과	단위성 과	질적 성과지 표				1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4
총괄																			
주관	한양대 학교 산학협력단		1-1	1-1-①	차세대 공조시스템 프로토타입 개발	프로토타입 시스템													
				1-1-②	차세대 공조시스템의 외기조건에 따른 연간 운전 프로토콜 개발	운전 프로토콜													
				1-1-③	공조시스템의 용량 산정 및 설계 프로세스 개발	설계 프로세스													
			1-2	1-2-①	에너지 절감, 실내 공기질 및 쾌적도 목표치 설정	향상 목표치													
			1-3	1-3-①	지역열원 및 지중 미활용열원 적용방안 개발	적용방안 결과													
공동	㈜삼화에이 스	1	1-4	1-4-①	지중 다중이용시설 유형별 기존 공조시스템 설치현황 조사	현황표													
				1-4-②	기존 시스템 개선방향 도출	논문													
			1-5	1-5-①	프로토 타입 시스템 구성요소 개발	시제품													
주관	한양대 학교 산학협력단	2	2-1	2-1-①	인공기후챔버에서 시제품 성능 실증	시제품 시험 결과													
				2-1-②	챔버에서 실내 공기질 개선 여부 실증	실험 결과													
			2-2	2-2-①	공조시스템 설계 프로그램 개발	설계 프로그램													
공동	㈜삼화에이 스	2	2-3	2-3-①	차세대 공조시스템 시제품 제작	시제품													
			2-4	2-4-②	공인인증기관에서 시제품 성능 실증을 통한 공인시험 성적서 확보	공인시험성 적서													
주관	한양대 학교 산학협력단	3	3-1	3-1-①	테스트베드 선정 및 모니터링 시설 구축	테스트베드 선정 여부													
				3-1-②	테스트베드에서 장단기 모니터링 실시	실험 결과													
			3-2	3-2-①	상용화를 위한 목표성능 실증 여부	실험 결과													
				3-2-②	친환경 열원 적용 가능성 실증	친환경 열원 적용 시스템													
공동	㈜삼화에이 스	3	3-3	3-3-①	상용화를 위한 기술이전 계약여부	기술이전 계약여부													
			3-4	3-4-①	테스트베드 대상 선정 및 시공, 모니터링 시스템 설치	테스트베드 및 모니터링 시스템 시공여부													

2.3 1차년도 연구 수행 내용

가. 당해 연도 연구개발 목표 및 결과

표 7. 1차년도 연구개발 목표 및 수행내용

구분(연도)	세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
1차년도 (2016)	제습증발냉각 기반 전외기공조시스템 프로토타입 도출. (주관연구기관)	기존 지중 다중이용시설 공조시스템의 개선점 도출	지중 다중이용시설 공조시스템 문헌조사 및 사례조사 분석	<u>문헌 및 사례조사를 통한 현황 분석 완료</u>
		차세대 지중 다중이용시설 공조시스템의 목표 성능을 설정	에너지 성능분석 및 실내 공기질 개선효과 , 쾌적도 평가를 통한 목표 성능 도출	<u>시뮬레이션을 통한 에너지 성능 및 실내 쾌적도 분석 및 실증을 통한 실내 공기질 개선효과 검증</u>
		차세대 지중 다중이용시설 공조시스템의 프로토타입 개발	각 구성요소별 최적화를 통한 차세대 공조시스템 프로토타입 도출	<u>차세대 공조시스템 프로토타입 제어 및 운전 프로토콜 개발</u>
	프로토타입 구성요소 설계. (공동연구기관)	기존 지중 다중이용시설 공조시스템 현황 및 문제점 도출	지중 다중이용시설 공조시스템 문헌조사 및 사례조사를 통한 현행 문제점 도출	<u>문헌 및 사례조사를 통한 현황분석 및 개선방안 도출 완료</u>
		지중 다중이용시설 공조시스템 관한 수요기업 조사	지중 다중이용시설 유형별 공조시스템 설치현황 조사 및 수요 대상 및 수요기업 분석	<u>지중 다중이용시설 유형별 최적 공조시스템 도출</u>
		제습증발냉각 전외기 공조시스템 구성요소 설계 및 샘플 제작	차세대 공조시스템 프로토타입 도출안에 따른 시스템 유니트 제작	<u>차세대 공조시스템 프로토타입 제작 완료</u>

나. 연구 범위 및 연구 수행 방법

표 8. 1차년도 세부 연구 수행 내용

연구 범위	연구 수행 방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
기존 지중 다중이용시설 공조시스템의 개선점 도출	기존 선행 연구 분석 (<u>이론적 접근</u>)	- 기존 지중 다중이용시설 공조시스템과 관련 된 선행 연구 분석을 바탕으로 지중 공간의 특 성에 따른 외기 도입량 부족 문제와 관련된 다 수의 연구 결과를 확인함. - 이 문제를 본 연구과제를 통해 제안되는 전 외기 공조시스템 적용을 통해 개선 가능할 것으 로 판단함.

연구 범위	연구 수행 방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
차세대 지중 다중이용시설 공조시스템의 목표 성능을 설정	각 목표 성능 별 시뮬레이션 및 실험을 통한 성능 분석 (<u>이론 및 실험적 접근</u>)	- 차세대 공조시스템 파일럿 유닛 운영을 통해 기존 HVAC시스템이 설치된 실험동에서 각각의 공조시스템 운전에 따른 CO₂, 포름알데하이드(HCHO) 및 휘발성유기화합물(VOCs) 농도변화 특성을 실시간으로 모니터링하고 1:1 비교를 함으로써 제습증발냉각을 이용한 전외기공조시스템의 실내 공기질 개선효과를 정량적으로 검증함. - 차세대 공조시스템과 기존 HVAC시스템 운전에 따른 실내 온열환경 평가를 1:1 비교를 TRNSYS 프로그램을 적용하여 동적으로 평가함으로써 기존 시스템 대비 쾌적한 실내 온열환경 유지가 가능한 것으로 분석됨.
차세대 지중 다중이용시설 공조시스템의 프로토타입 개발	선행 연구 결과를 바탕으로 한 시스템 개발 (<u>이론 및 실험적 접근</u>)	-선행 연구를 통해 분석된 차세대 공조시스템 파일럿 유니트 설계안 및 구성요소별 Specification에 따라 지중 다중이용시설 공조시스템 프로토타입 유니트를 제작설치 완료함.
기존 지중 다중이용시설 공조시스템 현황 및 문제점 도출	기존 사례 분석 연구 (<u>이론적 접근</u>)	- 기존 지중 다중이용시설 공조시스템과 관련된 사례 분석을 통하여 기존 지중 공조시스템의 경우 에너지 절감을 위하여 일정량 실내 공기를 재순환하는 것으로 확인 되었으며, 이로 인한 에너지 절감은 가능하지만 실내 공기 오염 문제를 원천적으로 해결하지 못하는 것으로 확인. - 지중 다중이용시설 공조시스템에 적용 가능한 지열, 지역난방열원, 태양열 및 태양광 등의 재생에너지 시스템 적용을 통한 시스템 운전의 안정성 및 탄소 배출 저감효과 실현이 가능 할 것으로 판단함.
지중 다중이용시설 공조시스템 관한 수요기업 조사	기존 사례 분석 연구 (<u>이론적 접근</u>)	- 기존 지중 다중이용시설 공조시스템 적용 사례 분석을 통하여 관련 기술 분야의 수요기업을 조사하였으며, 이를 바탕으로 본 연구를 통해 개발 된 차세대 공조시스템 상용화 유니트의 시장 진입 가능성을 확인할 수 있을 것으로 판단됨.
제습증발냉각 전외기 공조시스템 구성요소 설계 및 샘플 제작	선행 연구 결과를 바탕으로 한 시스템 설계 및 구성요소 개발 (<u>이론 및 실험적 접근</u>)	- 선행 연구를 통해 분석된 차세대 공조시스템 구성요소별 특성에 따라서 공조시스템을 구성하고 있는 액체식 제습시스템, 간접식 및 직접식 증발냉각시스템을 설계하고 각 구성요소별 샘플 제작 완료.

다. 세부 연구 수행 내용

(1) 기존 지중 다중이용시설 공조시스템 현황 및 문제점 도출

- 2000년 이후 국내 지중 다중이용시설 공조시스템에 관한 문헌고찰 결과 기존 지중 다중이용시설 공조시스템은 에너지 절감을 위해 실내 배기를 대부분 재순환하는 전통적인 공조 방식이 적용되고 있는 것으로 확인 되었으며, 일반적인 정풍량 또는 병풍량 방식 공조 시스템이 이용되고 있음.
- 이와 같이 대부분의 실내 배기를 재순환 하는 공조시스템을 적용할 경우, 실내의 오염된 공기가 재순환됨에 따라 교차오염 발생 및 실내 공기질 악화의 문제점을 나타낼 수 있을 것으로 판단됨.

표 9. 국내 지중 다중이용시설 공조시스템 현황표

	국내 지중 다중이용시설 공조시스템 현황 연구
홍태훈 외 (1998)	국내 지중 사무공간에서의 자연환기도입 효과에 관련된 연구를 바탕으로 변풍량 공조시스템 적용 시 지중 특성상 요구되는 최소환기량 및 자연환기 도입에 따른 실내 공기 환경에 대한 연구 분석.
이흥철 외 (2000)	국내 지하도 상가 냉난방 공조시스템 분석을 통해 다수의 지하도 상가에서 에너지 절감을 위해 실내 배기 회수 방식을 적용한 정풍량 공조방식을 이용하고 있는 것을 분석함.
이흥철 외 (2006)	서울시 특정 지하도 상가의 형태를 분석하였으며, 중복도 방식의 지하도 상가에서 실내 오염원 발생원인 분석 및 내부 발열 제거를 위한 공조시스템 적용 측면에서 개별 냉난방 시스템이 아닌 중앙 공조시스템 운전이 필요함을 언급하였으며, 이에 대한 대안으로 변풍량 공조방식 채택을 통한 효과적인 실내 부하 제거 및 환기량 공급이 필요함을 언급함.
이진영 외 (2012)	이화여자대학교 캠퍼스복합단지(ECC)에 적용된 변풍량 공조시스템의 운전 특성을 분석하였으며, 실내 재실인원 변동에 따른 달라지는 최소 환기량 및 실내 부하를 적절히 대처할 수 있는 변풍량 공조시스템 운전방식에 대한 연구 수행.
박성환 외 (2013)	국내 대심도 지하철 역사에 적용된 공조시스템 분석을 통해 공조시스템을 통해 실내 환기량 도입 방식을 분석 하였으며, 공조기를 이용한 기계환기 방식에 대한 연구를 수행함.
조홍재 외 (2015)	국내 수도권 지역의 공공 지하역사 공조방식 분석을 통해 공조기 사용연한 분석 및 에너지 소비 특성 분석을 실시함. 또한, 지하 역사 환기 방식 분석을 통해 전급기-자연배기 방식의 정풍량 공조시스템이 적용되어있음을 언급하였으며, 효과적인 에너지 소비를 위해 변풍량 공조방식을 적용할 것을 제안함.
박봉태 외 (2015)	서울시 특정 지하역사 승강장 공조방식 분석을 통해 기존 정풍량 공조시스템 운전 특성을 분석 하였으며, 환기 및 배기 방식 분석을 통해 실내 요구되는 환기량 공급을 위한 효과적인 환기 시스템 적용이 필요함을 분석함.

- 국외 지중 다중이용시설 공조시스템에 관한 연구내용 분석 결과에 따르면 국내 사례와 유사한 공조 방식을 적용하고 있는 것으로 확인됨. 에너지 절감을 위해 대부분의 실내 배기를 재순환 방식으로 시스템이 운전되고 있으며, 이에 따른 공기질 관리의 어려움을 지적하고 있는 것으로 판

단됨.

- 국내 및 해외 기존 지중 다중이용시설 공조시스템 연구 분석을 통하여 기존 지중 공조시스템의 경우 에너지 절감 방안으로 일정량 실내 배기를 재순환하는 것으로 확인 되었으며, 이러한 운전 방식을 통해 공조 시스템 소비 에너지 절감은 가능하지만 실내 공기 오염 문제를 원천적으로 해결하지 못할 것으로 판단됨.
- 이에 따라서 본 연구를 통해 개발되는 차세대 공조시스템 적용을 통해 실내 배기 재순환에 따른 실내 공기질 오염 문제를 원천적으로 방지하며, 시스템 에너지 소비 절감을 통한 효과적인 공조 시스템 구현이 가능 할 것으로 판단됨.

표 10. 해외 지중 다중이용시설 공조시스템 현황표

	국외 지중 다중이용시설 공조시스템 현황 연구
Shih et al.(2004)	지하철 역사 실내 공기질과 관련된 연구를 통해 승강장 스크린 도어 설치에 따른 공기질 분석 및 공조시스템 에너지 소비 경향을 분석함. 스크린 도어 설치에 따른 정풍량 공조시스템의 운전 에너지 소비를 분석.
Deng et al.(2008)	지중 다중이용시설 공조시스템 적용 시 수요기반 환기 시스템 적용에 따른 에너지 절감 효과를 분석함. 기존 정풍량 및 변풍량 공조시스템 대비 수요기반 환기 시스템 적용에 따라 약 20%의 공조 에너지를 절감하는 것을 확인함.
Steen et al.(2008)	실제 공조시스템이 적용된 다중이용시설 (영화관, 공항터미널, 지하철역사)의 환기 방식 변화에 따른 실제 에너지 소비량을 분석함. 정풍량 및 변풍량 공조시스템 적용에 따른 에너지 소비 변화를 분석 하였으며, 에너지 절감의 일환으로 실내 배열 회수 방식(실내 배기 재순환)에 관하여 언급.
Deng et al.(2009)	지중 다중이용시설에서 수요기반 환기 시스템 적용에 따른 공조시스템 소비 에너지 절감을 분석함. 기존 지하 쇼핑몰 및 지하 역사에 적용된 공조시스템 운전에서 수요기반 환기량 공급 방식 적용에 따라 정풍량 공조시스템 대비 30%, 정풍량 공조시스템 대비 8%의 에너지 절감 가능성을 언급함.
Yand et al.(2014)	변풍량 공조시스템이 적용된 지중 다중이용 시설에서 실내 부하 변화에 따른 냉동기 에너지소비 절감을 위해 VRF가 적용된 냉동기 사용에 따른 공조시스템 에너지 절감을 분석함.
Casals et al.(2014)	지하역사 승강장의 냉방 부하 변동 특성을 분석 하였으며, 실내 재실인원 변화 및 실내 기기 발열에 따른 냉방 부하 변동을 언급함. 실내 부하 변화를 적절히 처리 하기 위한 변풍량 공조시스템 적용을 제안함.
Martins et al.(2015)	지하역사 심도가 다른 8개 역사의 공기질 오염도를 측정 및 분석 하였으며, 각기 다른 환기방식 적용에 따른 실내 공기질 오염도 개선효과를 실험적으로 분석함. 정풍량 공조시스템 운전에 따라서 일정량 실내 배기 재순환에 따른 실내 공기질 오염 문제에 관하여 언급.

(2) 차세대 지중 다중이용시설 공조시스템의 목표 성능 설정

- 지중공간에서 차세대 공조시스템의 적용가능성을 판단하기 위해 지중 다중이용시설을 대상으로 에너지 절감효과를 분석함.

- 차세대 공조시스템에 적용 가능한 적절한 신재생에너지를 확인하기 위해 열원으로 지열히트펌프, 지역난방, 태양열시스템을 적용하여 기존의 보일러 등의 열원 시스템 대비 에너지 절감효과를 확인함.
- 본 연구에서 제안한 차세대 공조시스템의 구성요소 중 하나인 액체식 제습시스템은 묶어진 수용액을 재생하는 과정에서 열이 공급되어야 함. 따라서, 적절한 신재생에너지 또는 폐열회수 열원 적용 시 차세대 공조시스템의 에너지 소비 및 탄소배출 저감이 가능할 것으로 판단.
- 지상건물과 지중건물에서의 에너지 소비 특징을 분석하기 위해 먼저, 동일한 차세대 공조시스템을 지상과 지중에 적용하여 지중에서의 에너지 절감효과 비교·분석함.
- 여름철 지상건물은 냉방이 주로 필요한 반면, 지중건물의 경우 냉방부하는 감소하나 과냉방의 가능성이 존재함. 따라서 지중건물에서 여름철 과냉방이 발생할 경우 급기온도를 중립온도로 공급함.
- 지중깊이에 따른 온도변화 분포는 일정 깊이 이상에서는 보통 외기온도와 관계없이 일정하게 유지됨. 지중온도 변화는 Florides et al. (2004)가 제안한 방정식을 통해 지중깊이에 따른 온도분포를 산출함 (그림 16). 지중 30m의 평균온도가 약 15℃로 지중 0~20m에 비해 온도의 변화폭이 연중 가장 작은 변화를 나타냄. 이에 따른 건물 실내 부하 변동 폭이 작고, 실내부의 열손실 및 열획득 변화량이 작을 것으로 판단되어 본 연구에서는 지중 30m에 대상 건물이 위치한다고 가정하고 연중 시뮬레이션을 진행함.

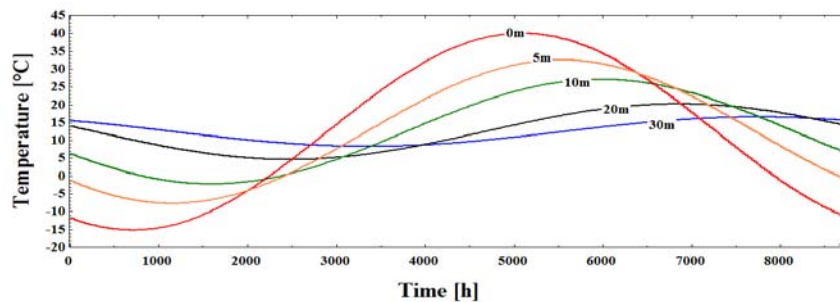


그림 16. 지중깊이에 따른 온도변화

- 지중 30m 깊이에 위치한 건물의 부하량을 산정한 결과, 지중건물의 현열부하는 지상건물과 비교하였을 때 지중의 온도 변화폭이 작기 때문에 변동이 크지 않은 것으로 나타남 (그림 17). 실내 잠열부하의 경우, 지상과 지중 모두 동일하게 내부 잠열부하만 고려하였으며 침기의 영향은 고려하지 않았기 때문에 동일한 부하 패턴을 나타냄. 이러한 지중 건물의 부하특성으로 인해 지상건물 대비 높은 에너지를 절감효과를 얻을 수 있을 것으로 판단됨.

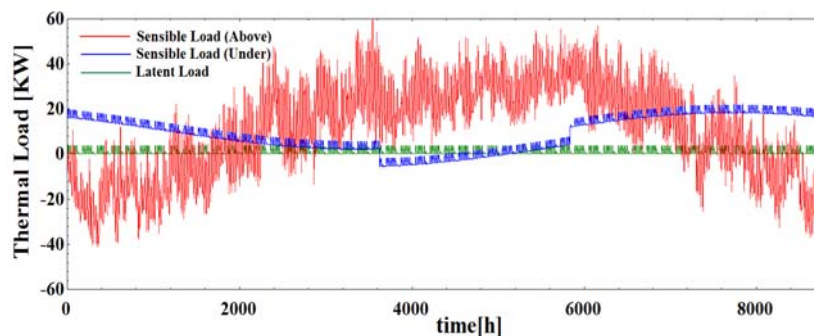


그림 17. 지상 및 지중 건물의 부하변화량

- 차세대 공조시스템의 간접식 증발냉각기 및 직접식 증발냉각기는 효율을 각각 70%, 90%로 가정하여 운전하였으며, 수용액 재생 및 가열코일의 열원으로 지역난방열원을 적용함 (그림 18).

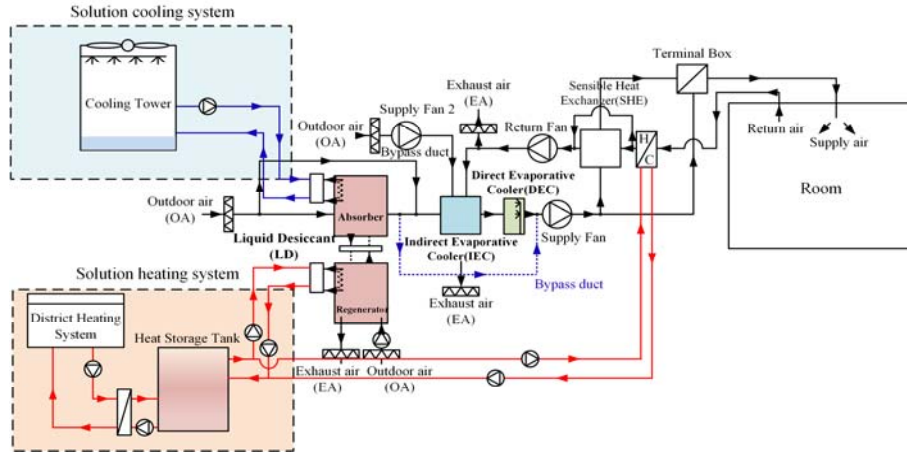


그림 18. 차세대 공조시스템 (재생열원: 지역난방)

- 차세대 지중 다중이용시설 공조시스템의 운전 에너지 소비를 지상건물과 비교하여 1차 에너지 소비량으로 나타냄. 1차 에너지 환산계수는 건축물 에너지 효율등급 인증제도 운영규정 (2013) 에서 규정하는 1차 에너지 환산계수를 적용. 그 결과, 차세대 지중 다중이용시설 공조시스템이 지상건물 대비 60%의 연간 1차 에너지를 절감하는 것으로 나타남 (그림 19). 결론적으로, 차세대 공조시스템은 지중건물에 적용성 매우 우수하며 높은 에너지 절감효과를 기대할 수 있을 것으로 예상됨.

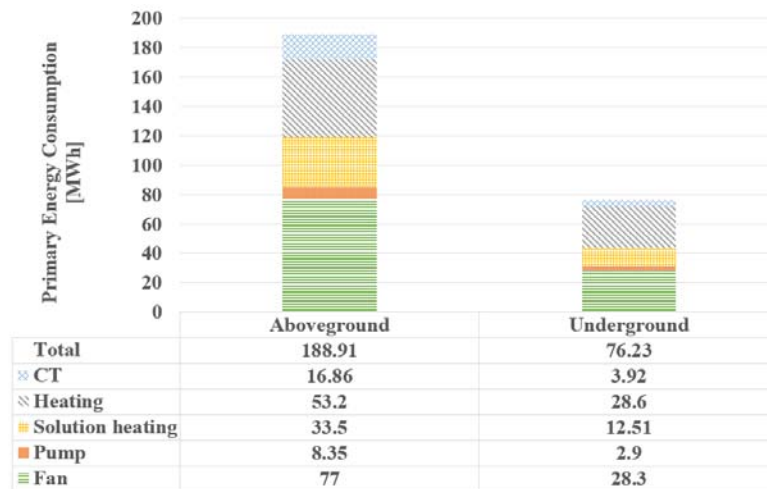


그림 19. 차세대 공조시스템의 연간 1차 에너지 소비

- 차세대 공조시스템의 지중에서의 다양한 열원에 대한 적용가능성을 확인해보고자 지중건물에서 비교적 쉽게 이용할 수 있는 지중열을 이용한 지중히트펌프를 적용하여 에너지 소비 분석을 실시함. 지중열 히트펌프는 TRNSYS 17에서 제공하는 수직형 U타입의 지중히트펌프를 적용하여 시뮬레이션을 실시함. 본 연구에서 적용한 히트펌프의 종류는 Type 1221의 water-to-water hea

t pump를 사용하였으며, 지중열교환기는 수직형 U-tube Type 557의 지중열교환기를 적용함 (그림 20).

- 운전 조건은 지역난방을 적용한 차세대 지중 다중이용시설 공조시스템과 동일하며, 지열히트펌프는 수용액 재생과 가열코일에 열을 공급하는데 사용하며, 수용액 냉각에는 지하수를 활용함. 시스템의 운전 시뮬레이션은 여름철 기간 동안 진행됨.

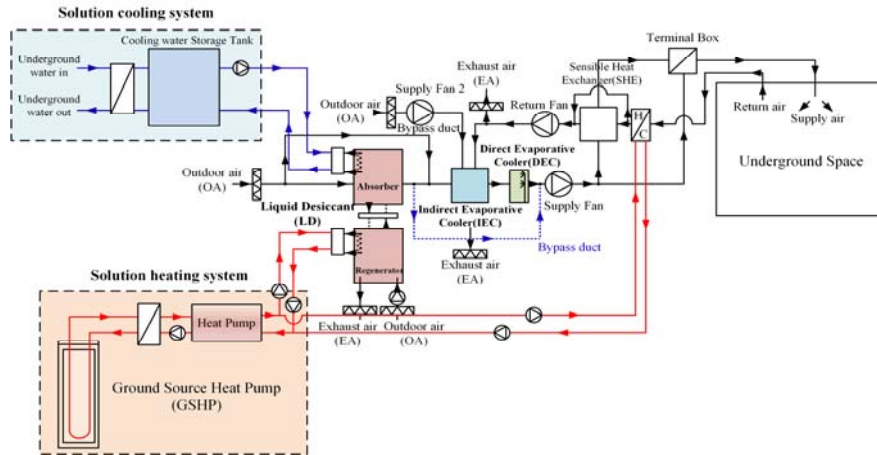


그림 20. 차세대 공조시스템(재생열원: 지열히트펌프)

- 차세대 지중 다중이용시설 공조시스템의 에너지 소비를 분석한 결과 여름철 에너지 소비량 중 가장 많은 양의 에너지를 차지하는 것은 실내의 과냉방지를 위한 재열과 제습수용액 재생을 위한 열에너지소비로 분석됨 (그림 21).

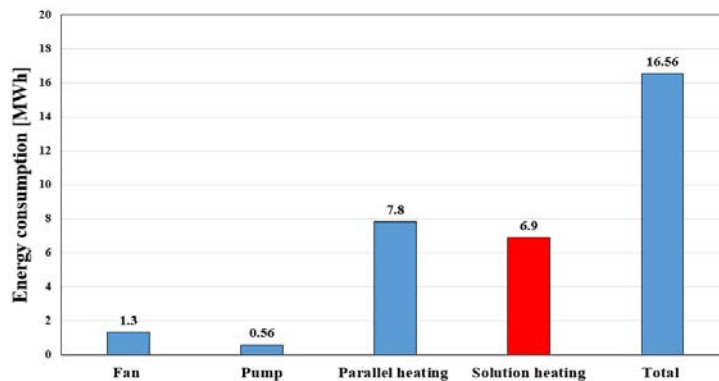


그림 21. 차세대 지중 다중이용시설 공조시스템의 여름철 에너지 소비

- 지열 히트펌프가 적용된 차세대 지중 다중이용시설 공조시스템의 에너지 절감량을 확인하기 위해 기존 가스보일러가 적용된 경우와 비교함 (그림 22). 1차 에너지 환산계수를 적용하여 1차 에너지로 환산한 결과, 지중히트펌프를 적용한 차세대 공조시스템이 보일러를 적용한 경우보다 20%의 1차 에너지를 절감하는 것으로 나타남. 이는 외부환경의 영향을 받지 않고 일정한 온도의 지열만을 이용하여 열을 가해주었기 때문인 것으로 판단됨. 결론적으로 지중 다중이용시설에서 차세대 공조시스템을 적용시 열원으로 기존 가스보일러를 사용하는 것보다 지열히트펌프를 적용할 때 향상된 에너지 절감효과가 있다고 판단됨.

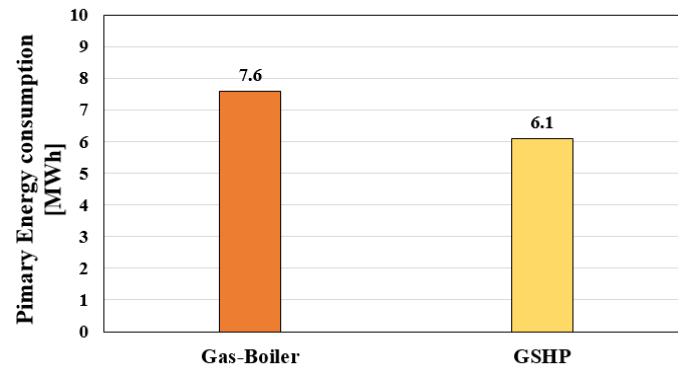
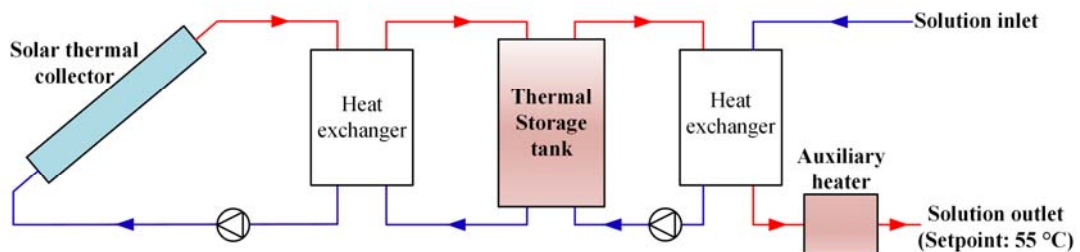
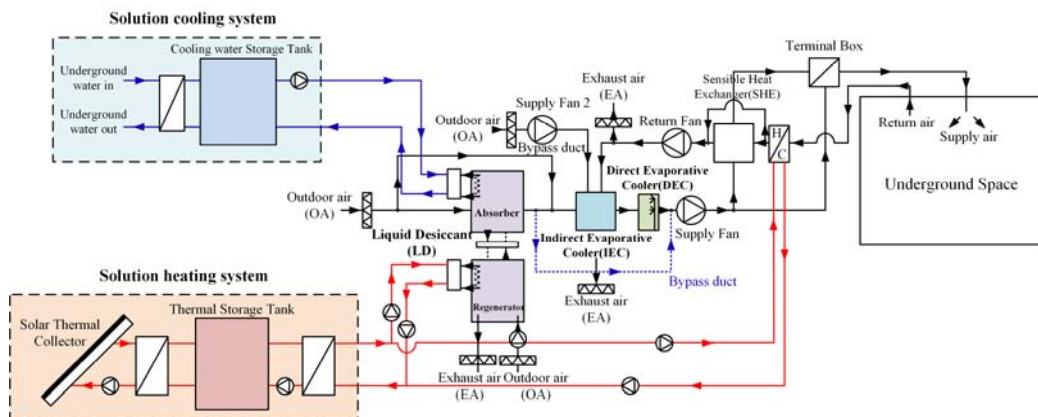


그림 22. 1차 에너지 소비 분석

- 차세대 지중 다중이용시설 공조시스템의 열원으로 태양열시스템을 적용하여 에너지 절감효과를 분석함. 비교 대상으로는 지중히트펌프와 마찬가지로 기존 가스보일러를 선정함. 시뮬레이션은 여름철 기간에 대해서만 진행됨.
- 태양열시스템은 태양열 집열판의 종류에 따라 집열량에 큰 영향을 주는데, 본 연구에서는 평판식 태양열 집열판(Flat plate collector)에 비해 집열효과가 높은 진공관식 집열판(Vacuum tube collector)를 사용. 본 연구에서 사용된 태양열 저장탱크는 Fully-mixed 타입의 탱크를 사용함. 태양열 시스템은 수용액 재생과 가열코일에 필요한 열을 공급하는데 사용되며, 수용액 냉각에는 지하수가 적용됨 (그림 23).



(a) 태양열시스템 구성도



(b) 차세대 공조시스템 (재생열원: 태양열 시스템)

그림 23. 차세대 공조시스템에 적용된 태양열 시스템

- 차세대 지중 다중이용시설 공조시스템의 열원으로 태양열시스템을 적용하여 가스보일러가 적용된 경우와 비교하여 여름철 시뮬레이션 실시. 1차 에너지로 환산하여 계산한 결과, 열원으로 태양열시스템을 적용한 차세대 공조시스템이 가스보일러를 적용한 경우 대비 89%의 1차 에너지를 절감하는 것으로 나타남. 결론적으로 차세대 지중 다중이용시설 공조시스템에 태양열시스템이 적용된다면 기존 에너지 시스템보다 에너지 절감효과가 큰 것으로 판단됨.
- 차세대 공조시스템은 지상보다 지중에 적용될 경우 에너지 절감효과가 있으며, 이 지중 다중이용시설 공조시스템은 지역난방열원, 지열, 태양열 시스템 등 다양한 재생에너지 시스템에 대한 적용가능성이 높음을 본 연구를 통해 확인함. 재생에너지 시스템을 지중 다중이용시설 공조시스템과 함께 적용함으로써 에너지 절감효과 뿐만 아니라 탄소 배출 저감도 실현 가능할 것으로 판단됨.

(3) 차세대 공조시스템 공기질 개선효과 분석

- 차세대 공조시스템의 환기성과 시스템을 구성하는 액체식 제습시스템의 도입외기 개선 효과를 실험적으로 검증하여, 기존 시스템 대비 차세대 공조시스템의 환기성능 비교 평가 및 급기 측 공기질 개선효과를 분석함.
- 본 연구를 통해 개발되는 차세대 공조시스템은 100% 외기만을 급기로 이용하여 공급하기 때문에 오염된 외기에 의한 급기의 오염 문제가 대두될 수 있음. 따라서, 시스템을 전단에 위치한 액체식 제습시스템의 오염물질 제거 가능성에 대한 선행 연구 고찰을 바탕으로 실제 오염된 외기 도입 시스템 통과 후의 공기질 개선 효과를 실험적으로 분석함 (그림 24).
- 차세대 공조시스템 파일럿 유닛이 설치된 실험동에서 액체식 제습시스템 운전에 따른 외기에 포함된 포름알데하이드(HCHO) 및 휘발성유기화합물(VOCs) 농도변화 특성을 실시간으로 모니터링하고, 외기에 포함된 부유분진(미세먼지)의 입자 크기에 따른 제거 성능을 분석하였음. 또한, 미생물 오염물질(박테리아 및 곰팡이) 군집수(Colony fer unit (CFU)) 변화를 실험적으로 검증하여 액체식 제습시스템의 오염물 정화 효과를 도출.
- 또한, 차세대 공조시스템 파일럿 유닛과 기존 변풍량 공조시스템의 실험동 운전을 통해 실내 이산화탄소 변화를 모니터링 하여 실내 환기 성능을 1:1 비교함으로써 차세대 공조시스템의 환기 성능 및 실내 공기질 개선 효과를 정량적으로 검증함.

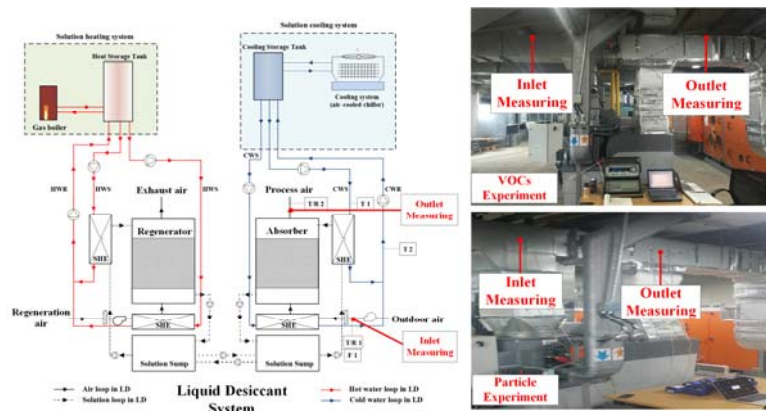


그림 24. 액체식 제습시스템 휘발성 유기화합물 제거 및 부유분진 제거 성능 실험

- 휘발성 유기화합물 제거 성능 실험 결과에 따르면, 측정 오염물질로 선정된 공기 중에 포함된 톨루엔과 포름알데히드 두 가지 휘발성 유기화합물 모두 액체식 제습시스템을 통과하는 급기에서 현저한 농도감소를 나타내는 것을 확인함.
- 실험 결과 분석에 따르면, 액체식 제습시스템을 통과하는 급기의 톨루엔 농도 변화는 약 36% 감소하는 것으로 나타났으며, 포름알데하이드 또한 약 29.6% 감소하는 것으로 나타남 (그림 25).
- 이와 같은 결과를 통해, 차세대 공조시스템 적용 시 시스템에 도입되어 통과하는 급기에 약 30%의 휘발성 유기화합물 농도 저감이 나타날 것으로 판단되며, 이는 액체식 제습시스템의 직접적인 제거 효과로 추가적인 필터 및 처리장치를 구축 할 경우 효과적인 휘발성 유기화합물 제거가 가능할 것으로 판단됨.

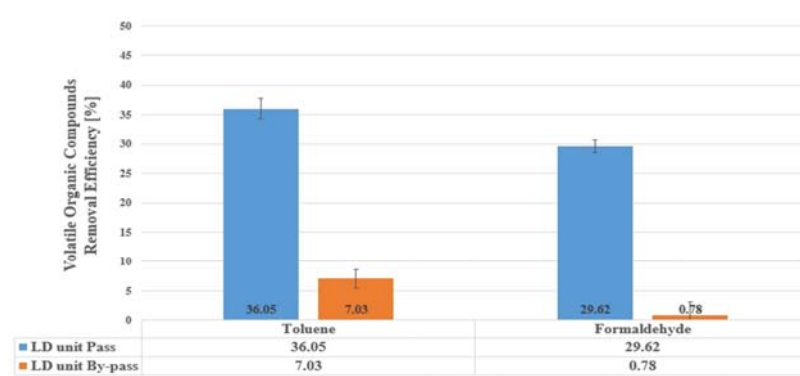


그림 25. 액체식 제습시스템 휘발성 유기화합물 제거 성능

- 액체식 제습시스템의 외기 중 포함된 부유분진 제거 성능을 평가하기 위해 부유분진 입자 크기에 따라서 2.5-5 μ m, 5-10 μ m, 및 10-25 μ m, 사이의 입자 제거 성능을 실험적으로 평가함. 실험 시 입자 크기에 따른 성능 분석은 각 입자별 제거 특성을 정량화하기 위해 실험 군을 설정하여 실험을 진행함 (그림 24).
- 실험 결과에 따르면, 각각의 입자 크기별 48.2%, 64.1% 84.9%의 제거 성능을 나타내는 것으로 평가됨. 결론적으로 액체식 제습시스템을 적용할 경우 다양한 크기의 공기 중 부유분진을 제거할 수 있는 결론을 도출함. 특히 부유분진의 입자 크기가 클수록 높은 제거효율을 나타내는 결과에 의하면 액체식 제습시스템 적용에 따라 일정의 필터 설치 효과와 동일한 제거 효과를 기대할 수 있을 것으로 예측됨 (그림 26).

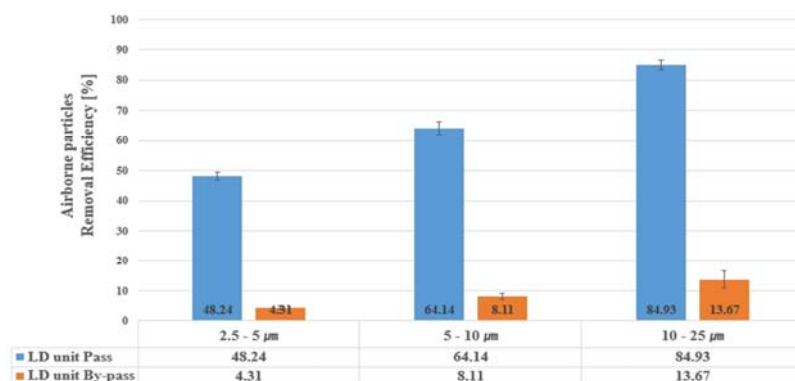


그림 26. 액체식 제습시스템 공기 중 부유분진 제거 성능

- 액체식 제습시스템이 적용된 차세대 공조시스템의 경우 실내 습도를 조절해 간접적으로 실내 곰팡이 및 박테리아 번식을 방지할 수 있으나, 동시에 시스템을 통과하는 급기에 포함된 미생물 오염물질을 직접적으로 제거할 수 있는 가능성에 대하여 선행 연구 고찰 및 실험을 통해 그 효과를 분석함 (그림 27).



그림 27. 액체식 제습시스템 미생물 오염물질 제거 성능 실험

- 액체식 제습시스템의 미생물 오염물질 제거 성능 실험은 시스템에 도입되는 외기를 각각 200L, 500L를 미생물 포집기를 이용하여 포집 및 배양하여 각 실험군 별 오염물 군집수를 평가함. 미생물의 경우 박테리아와 곰팡이의 군집수를 분석 함.
- 실험 결과에 따르면, 시스템을 통과하는 급기에 포함된 박테리아균의 경우 200L, 500L 공기 포집 결과에 따라서 각각 77.5% 81.3%가 제거되는 것을 확인함. 또한, 곰팡이 균의 경우도 유사하게 38.8%와 44.4%의 감소하는 것을 확인 (그림 28).

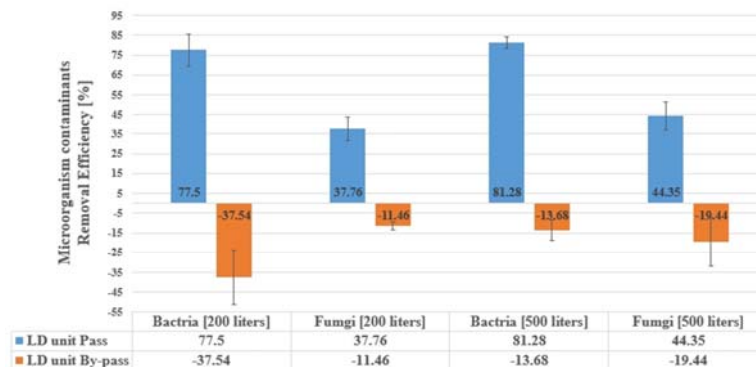


그림 28. 액체식 제습시스템 공기 중 미생물 오염물질 제거 성능

- 차세대 공조시스템을 구성하는 액체식 제습시스템의 직접적인 공기질 개선효과 검증 실험에 따라서 도입된 외기에 포함된 휘발성 유기화합물, 부유분진, 미생물 오염물질에 대한 일정 제거효과가 있는 것을 확인. 이를 통해 차세대 공조시스템이 적용 될 경우 시스템을 통과하는 급기의 공기질 개선효과가 유의미함을 도출함.

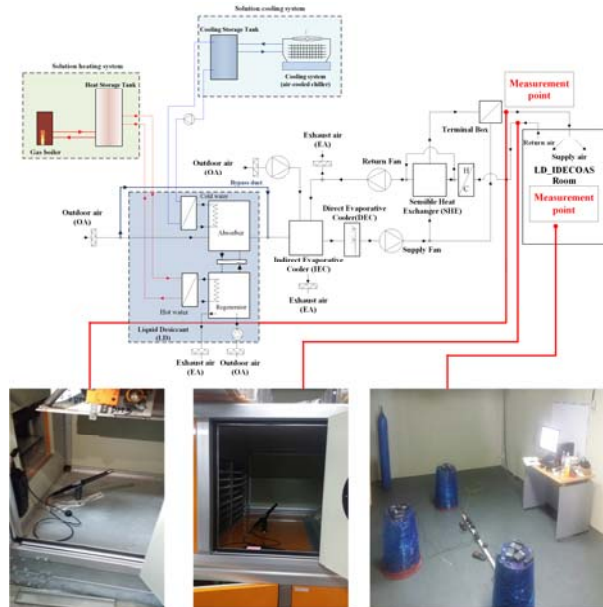


그림 29. 차세대 공조시스템 환기 성능 실험

- 차세대 공조시스템의 환기성능 평가를 위해 이산화탄소를 이용한 추적가스법을 적용하여 실내 이산화탄소 농도변화에 따른 시스템 환기 성능을 분석함. 실험동에서 동일한 급기 풍량으로 운전되는 기존 변풍량 공조시스템과의 환기 성능을 1:1 비교하여 차세대 공조시스템의 환기 성능을 정량적으로 검증함 (그림 29).
- 실험은 급기 풍량기준 $1500\text{m}^3/\text{h}$ 를 공급하는 차세대 공조시스템과 실내공기를 66% 재순환하는 변풍량 공조시스템과의 환기성능 비교를 실시하였으며, 이때 변풍량 공조시스템과 동일한 외기 도입량을 유지하는 차세대 공조시스템의 환기성능(급기풍량: $500\text{m}^3/\text{h}$)을 대조하여 환기 성능을 분석함.
- 실험 결과에 의하면, 차세대 공조시스템의 경우 기존 변풍량 공조시스템 대비 약 3배 이상의 환기 성능을 나타내는 것으로 확인. 실내 이산화탄소 농도 4000ppm 기준에서 농도 1000ppm까지 감소하는 시간을 바탕으로 환기 성능을 분석함 (그림 30).

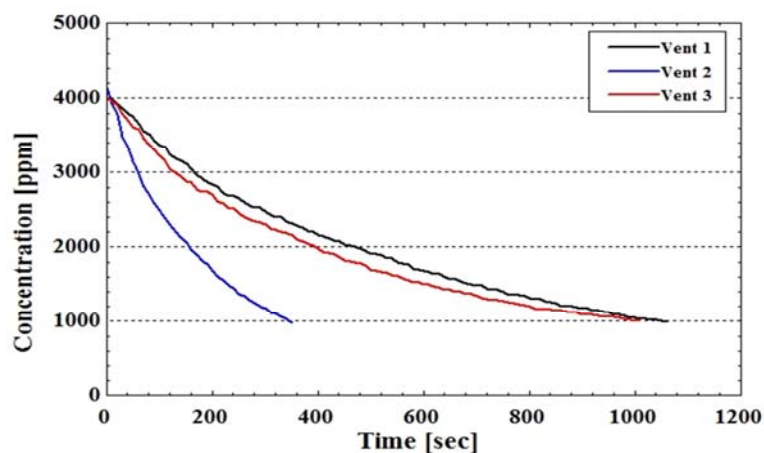


그림 30. 차세대 공조시스템 환기성능 성능 평가

- 실험 결과 및 이론적 해석 결과에 따르면, 차세대 공조시스템의 환기 성능은 기존 변풍량 공조시스템 대비 약 3배 이상 높은 환기 성능을 나타내는 것으로 확인됨. 실내 배기를 재순환 하지 않는 차세대 공조시스템의 급기 방식은 다량의 환기가 필요한 지중 환경에서 차세대 공조시스템 적용은 기존 공조시스템을 대체할 수 있는 기술적 대안으로 판단됨 (표 11).

표 11. 차세대 공조시스템 환기성능 성능 분석

	변풍량 공조시스템(Vent 1) 급기풍량: 1500m ³ /h	차세대 공조시스템(Vent 2) 급기풍량: 1500m ³ /h	차세대 공조시스템(Vent 3) 급기풍량: 500m ³ /h
공기 변화량 (실험)	6.06±0.11	18.65±0.35	6.31±0.12
공기 변화량 (이론)	6.17	18.49	6.17

(4) 차세대 공조시스템 실내 온열 환경 평가 및 목표 값 설정

- 지상의 공간적 제한으로 인하여 지하역사, 지중 쇼핑몰 등과 같은 지중 공간 시설이 출현하였으며 현재 더욱 더 활발히 개발되어 다양한 형태로 사용되고 있음.
- 지중 다중이용시설의 경우 실외로부터 폐쇄된 지중 공간의 특성으로 인해 기계 공조 방식만을 통해 실내 공기질 및 온열 환경을 제어하므로 실내 쾌적 온, 습도 값을 유지하는데 필요한 에너지 소비량이 증가함.
- 현재 국내 지중 공간 시설에서 적용되고 있는 기존 공조 시스템의 경우 약 70%의 공기를 회수하여 실내로 재순환 시키고 최소 필요외기만을 재순환 공기와 혼합하여 공급하고 있기 때문에, 지상으로부터 유입되는 오염물질 및 시설 내에서 발생하는 공기 오염원이 지중 공간 내에 지속적으로 축적되어 재실자의 건강상의 위험 요소로 인식됨.
- 따라서 기존의 지중 다중이용시설에서의 공조 시스템 적용 시 발생하는 문제점들을 해결하고자 오염된 실내 공기를 모두 배출하고 신선 외기만을 도입하여 냉난방 및 환기를 공급하는 전외기 공조 시스템을 사용하였으며 차세대 에너지 절약형 공조 시스템을 구현하는 핵심 기술인 증발 냉각 기술과 증발 냉각 효율을 극대화시키기 위한 액체식 제습 시스템을 추가로 설치한 액체식 제습 시스템 기반 전외기 증발 냉각 공조 시스템을 제안함.
- 연구 문헌에 의하면 액체식 제습 증발 냉각 전외기 공조시스템의 연간 운전 방식은 외기의 열역학적 상태에 의하여 3가지 방식으로 분류되는데, 여름철 덥고 습한 기후일 경우 외기 중의 잠열부하를 액체식 제습 시스템을 작동시켜 선 제습 처리 후 직접식 및 간접식 증발 냉각기를 거쳐 냉방 부하를 처리하고, 중간기에는 선 제습 처리 없이 증발 냉각기를 통해 건물 부하를 처리하며, 겨울철에는 간접식 증발 냉각기를 현열 교환기처럼 사용하여 배기로부터 현열을 회수하여 난방에너지 소비를 절감함. 이때, 여름철 운전 시 사용되는 제습용액의 재생을 위해 필요한 열원을 지열, 지열난방열원, 태양광 등의 재생에너지 시스템을 적용하면 에너지 저감 효과를 실현이 가능 할 것으로 판단됨.
- 계절 별 운전 방식에 근거하여 본 공조 시스템을 적용하였을 때 기존 HVAC 공조 시스템 대비 연간 에너지 소비량 68% 절감 효과를 얻는다는 결론을 얻었으며 이를 통해 에너지 절감 효과가 있음을 입증함.
- 본 공조 시스템은 실내 잠열 부하가 급증 할 경우 증발 냉각 시스템의 냉각 성능이 저하될 가능성이

있어 실내 목표 쾌적 온열 환경에 부합하는 추가적인 제어를 진행 하지 않을 경우 건물 재실자의 온열 불쾌감을 야기할 우려가 있음.

- 따라서 차세대 공조시스템인 액체식 증발 냉각 기반 전외기 공조 시스템과 기존 HVAC 시스템 운전 에 따른 실내 온열 평가를 동적 에너지 해석 시뮬레이션 프로그램인 TRNSYS 프로그램을 적용하여 1:1비교를 진행함으로써 기존 시스템 대비 온열 쾌적성 향상을 위한 목표 성능을 도출함.
- 본 연구에서는 예상 평균 온열감(Predicted mean vote, PMV) 방법을 적용하여 평가를 진행함. PM V 지표는 온열 쾌적성을 평가하는 지표 중 가장 대표적인 지표로서 표 1과 같이 7단계로 구분하여 ASHRAE Standard에서 제시한 실내 온열 환경 권장 기준 값을 참고하여 실내 온열 환경 평가를 진행함 (표 12).

표 12. 차세대 공조시스템 환기성능 성능 분석

예상 평균 온열감(Predicted mean vote, PMV) 7단계 척도						
cold	cool	slightly cool	neutral	slightly warm	warm	hot
-3	-2	-1	0	+1	+2	+3

- 또한, 공학용 계산 프로그램인 Engineering Equation Solver (EES) 프로그램을 활용하여 계절 별 본 공조 시스템의 운전 방식에 따른 시스템 구성 성분 별 제어 알고리즘을 작성하여 PMV 측정에 필요 로 하는 물리적 변수인 실내공기의 온도 및 상대 습도 값을 도출함.
- 첫 번째로, 대상 건물 모델의 건물 형태, 실내 설정 온, 습도 및 내부 발열 요소 등의 건물 정보와 건물 벽면의 구성 자재의 열 관류율 등의 재료 특성 데이터를 TRNSYS 프로그램에 기입하여 해당 모델 구축 후, 서울 시 표준 기상 데이터 값을 기입하여 해당 공간의 현열부하 및 잠열부하를 도출 함.
- 앞서 도출한 시간별 건물 부하를 EES에 반영함으로써 각 구성성분의 모델을 바탕으로 연간 시뮬레 이션을 진행하여 급기의 온도 및 상대 습도 값을 도출하고, 연간 급기 데이터를 다시 TRNSYS 프 로그램을 통해 대상 건물 모델에 도입하여 본 공조 시스템을 해당 건물 모델에 적용하였을 때의 실내 공기의 온도 및 상대 습도 값을 도출함.
- 대상 건물 모델에 PMV 지표를 결정하는 6가지 변수 중 입력 값에 해당하는 신진 대사율, 의복 열 저항, 상대 기류 속도 값을 ASHRAE Standard에 의거하여 설정함으로써 사무소 건물을 기준으로 하여 여름철 및 겨울철 실내 열적 온열 환경 조건을 부여한 후, 나머지 물리적 변수인 실내 공기 온 도 및 상대 습도, 평균 복사 온도 값을 해당 건물 모델에 기입하여 그림 1과 같이 TRNSYS 프로그 램을 통해 하절기(7월-8월) 및 동절기(1월-2월) 시간 별 PMV 지표 값을 도출하여 실내 온열 쾌적성 평가를 실시함 (그림 31).

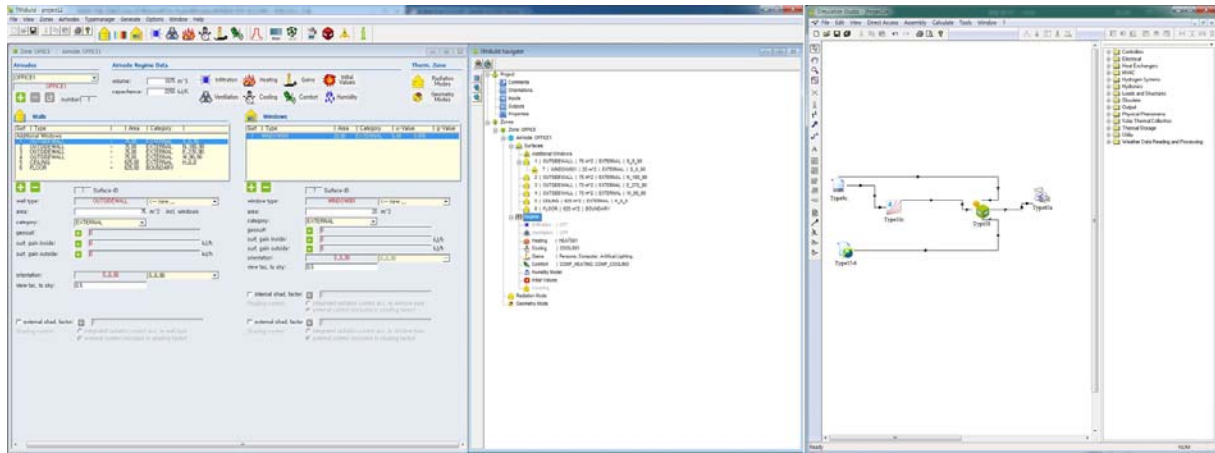


그림 31. TRNSYS 프로그램을 통한 건물 모델링 및 PMV 측정 과정

- 그림 32는 본 공조 시스템을 적용한 대상 건물 모델에 동절기(1-2월) 실내 조건을 건구 온도 20℃로 설정 하였을 때의 시간 별 PMV 측정값을 나타냄. 시간에 따라서 PMV 지표 값이 계속 변화 하지만 -0.6에서 +0.6 사이를 유지하고 있었고, ASHRAE Standard에서 제시한 실내 온열 환경 권장 기준 범위가 -0.5에서 +0.5 인 점을 고려한다면, 겨울 철 실내 온도를 20℃ 설정하였을 때 본 공조 시스템을 적용하였을 때 건물 재실자의 온열 쾌적감을 대체로 만족시킬 수 있다는 점을 알 수 있음.
- 그림 33은 본 공조 시스템을 적용한 대상 건물 모델에 하절기(7-8월) 실내 조건을 건구 온도 24℃, 상대 습도 55%로 설정 하였을 때의 시간 별 PMV 측정값을 나타냄. 동절기와 마찬가지로 일정한 값을 유지하지는 않지만 대체로 -0.3에서 +0.3 범위 내를 유지함으로써 실내 온열 환경 권장 기준에 부합하고 있다는 결과를 얻었으며 이를 통해 여름철 운전 시 액체식 제습 시스템을 적용하여 외기 중의 잠열부하를 처리함으로써 실내 온, 습도 조절이 원활히 진행되었음을 알 수 있음.

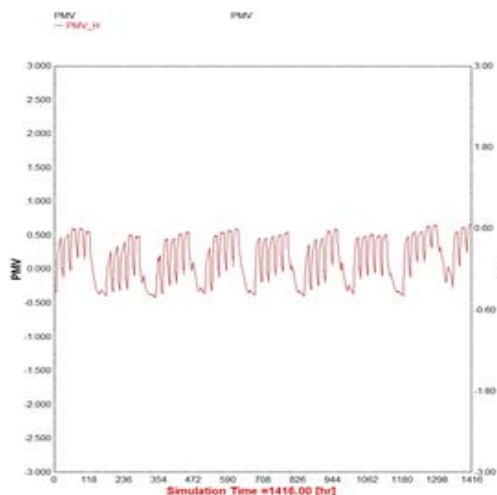


그림 32. 겨울철 운전 시 시간 별 PMV 지표 값

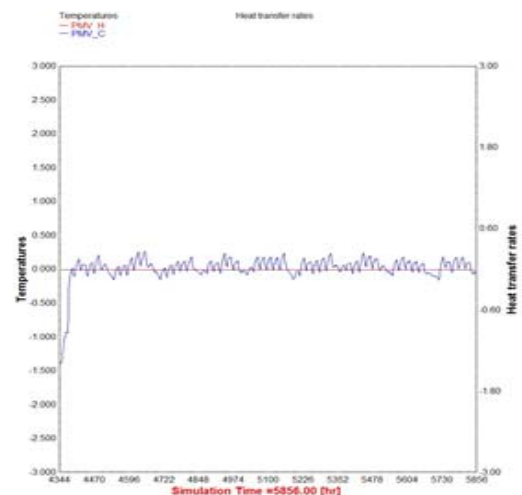


그림 33. 여름철 운전 시 시간 별 PMV 지표 값

(5) 차세대 지중 다중이용시설 공조시스템 프로토타입 개발

- 시스템 단순화 및 실제 공기조화 유닛으로 상용화 가능한 냉각 및 난방 모듈 개발 및 프로토타입 개발이 필수적임.

- 프로토타입 도출을 통해 시스템 전체 구성을 단순화 시키며 시스템 제어를 바탕으로 공조 유닛 내부 댐퍼 조절을 통해 외기 조건에 따른 급기 유로를 규정함.
- 추가적인 제습수용액 배관 및 순환수 배관을 효율적으로 설계 및 배치함으로 열손실을 최소화 하여 에너지 절약적인 운전이 가능하도록 개발할 필요가 있음. 차세대 공조시스템 패키지 유닛을 개발하기 위해 선행 연구에서 검증된 M-cycle 형태의 간접식 증발냉각 시스템과 기존 직교류형 간접식 증발냉각시스템을 적용한 방식으로 설계가 진행됨.
- 액체식 제습시스템 유닛의 경우 액체식 제습시스템과 도입 외기의 접촉 방식에 따라서 직교류 및 대향류형 접촉 방식에 기초한 초기 설계를 완료함 (그림 34-35).

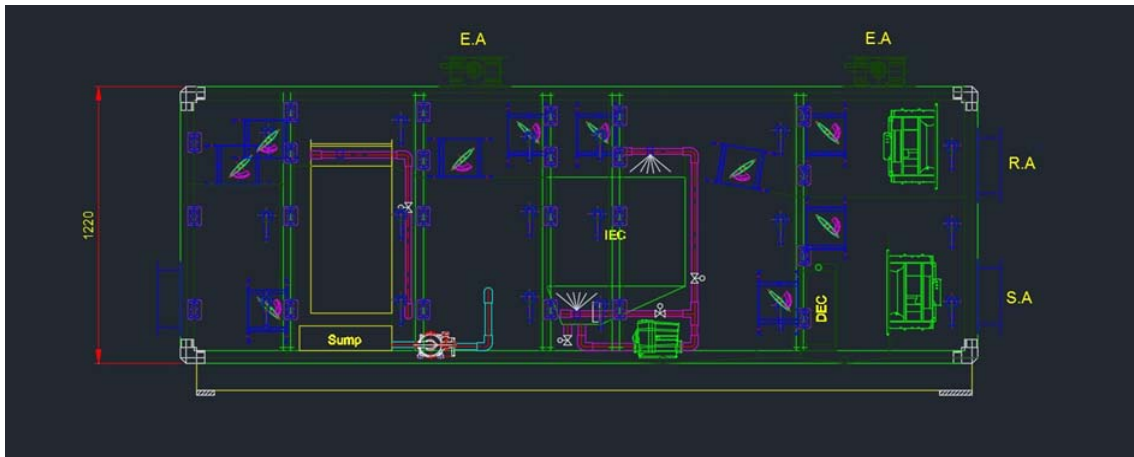


그림 34. 차세대 지중 다중이용시설 공조시스템 프로토타입 파일럿 유닛 (대향류형)

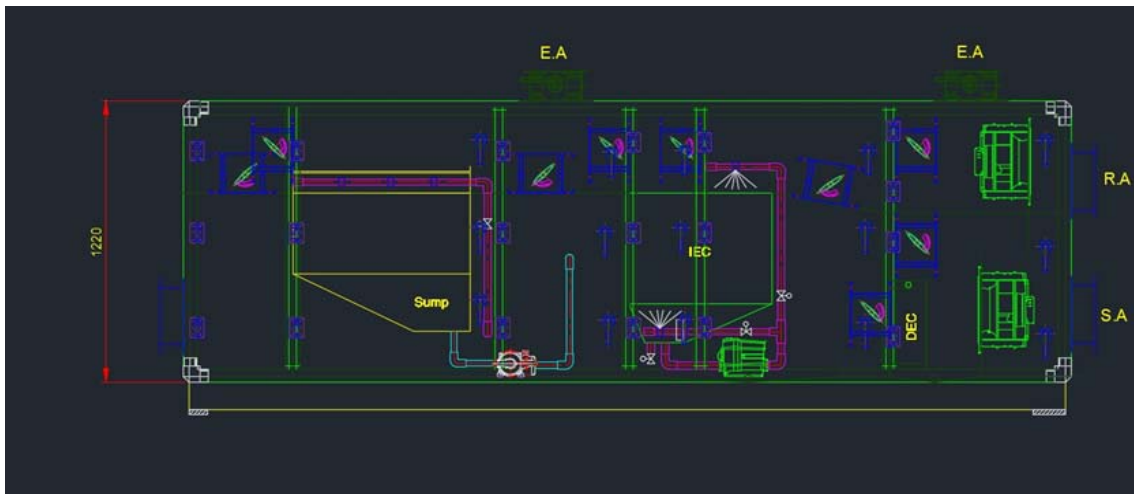


그림 35. 차세대 지중 다중이용시설 공조시스템 프로토타입 파일럿 유닛 (직교류형)

- 차세대 지중 다중이용시설 공조시스템 프로토타입 파일럿 유닛은 급기풍량 $500\text{m}^3/\text{h}$ 를 기준으로 설계됨. 액체식 제습시스템 유닛의 경우 액기비(liquid-to-gas ratio) 1을 기준으로 제습수용액과 도입외기의 비율을 적용 하였으며, 이를 통해 시스템을 구성하는 제습부와 재생부 펌프의 유량을 동일하게 적용함.
- 액체식 제습시스템 유닛의 제습부 및 재생부 내부를 구성하는 충전물은 미국의 Munters사에서 제

공하는 Celdek을 적용함.

- 또한, 액체식 제습유닛 내부의 제습수용액 공급을 위한 펌프는 Wilo사에서 제작하는 해수용 펌프 적용을 통해 제습수용액에 의한 부식을 방지할 수 있는 방안을 적용함. 냉방 시 액체식 제습수용액의 냉각 및 가열을 위한 열원 플랜트 해석을 통해 기존 Proof-of-concept 단계의 공급방식을 개선한 배관 설계 및 열교환기 설계를 통해 열손실을 최소화하였음.
- 열교환기 설계 시 수용액 부식을 방지할 수 있는 티타늄 소재의 Shell-and-tube 열교환기 적용을 통해 효과적인 열교환 및 부식 방지를 통한 시스템 운전 시 최대 성능을 도출할 수 있는 배관 모듈 및 열교환 모듈을 구성함.

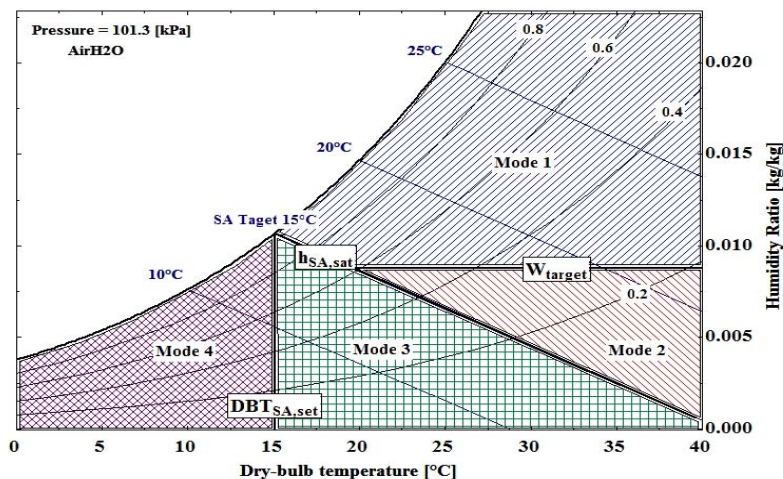


그림 36. 차세대 지중 다중이용시설 공조시스템 프로토타입 파일럿 유닛 계절별 운전 조건

- 차세대 공조시스템 프로토타입 파일럿 유닛의 운전모드는 그림 36에 도식된 외기 조건에 따라 결정됨. 냉방 시 설정된 급기 조건 (15°C)을 달성할 수 있도록 액체식 제습시스템, 간접식 및 직접식 증발냉각 시스템 모두 운전됨 (운전모드 1).
- 중간기 외기 조건에 따라 액체식 제습시스템을 통과 한 이후 급기 절대습도 기준에 따라서 온도가 높고 건조한 조건에서는 설정된 급기의 엔탈피 조건에 따라서 간접식 증발냉각기 운전을 제어하고, 직접식 증발냉각기 운전을 통해 설정된 급기 조건을 달성함 (운전모드 2).
- 외기의 엔탈피가 설정된 급기의 엔탈피보다 낮게 될 경우 직접식 증발냉각 시스템만을 이용하여 단열냉각 방식을 통해 설정된 급기 조건을 달성하도록 함 (운전모드 3).
- 외기의 건구온도가 15°C보다 낮을 경우 (운전모드 4), 액체식 제습시스템과 직접식 증발냉각의 운전을 정지시키며 유닛 내부에 설계된 By-pass 유로를 적용하여 간접식 증발냉각기를 현열교환기로 이용하여 배기와의 열교환을 통해 겨울철 급기 설정온도 (20°C)를 맞추도록 운전함.

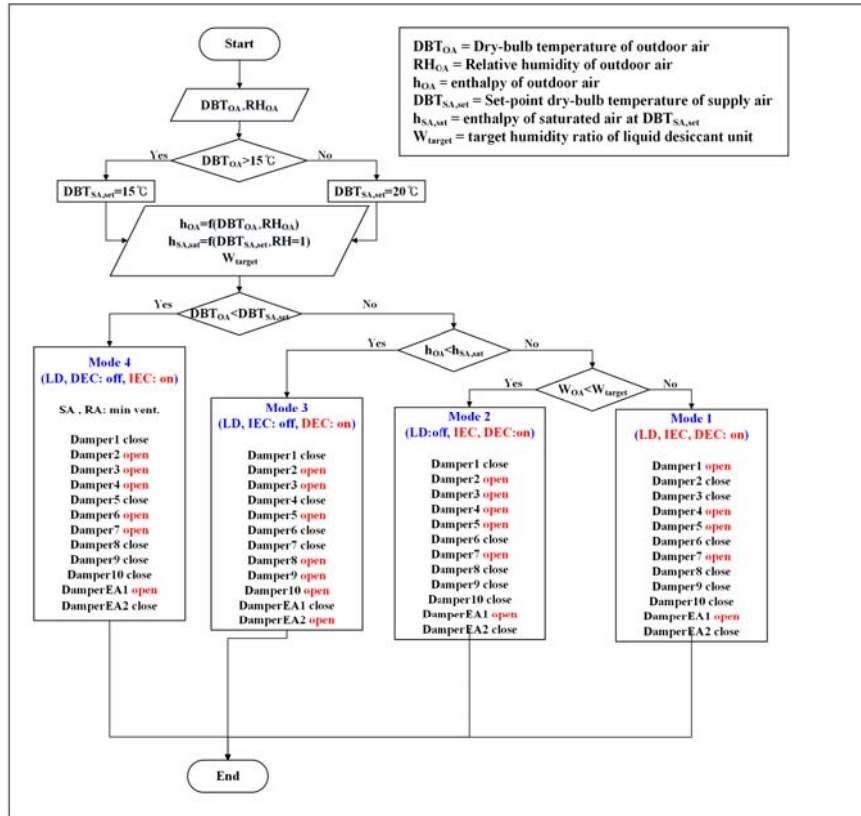


그림 37. 차세대 지중 다중이용시설 공조시스템 프로토타입 파일럿 유닛 운전 프로토콜 알고리즘

- 외기의 조건에 따른 차세대 공조시스템의 운전 프로토콜 알고리즘은 그림 37과 같음. 외기의 조건에 따라서 냉방모드와 난방모드를 결정하며, 냉방모드의 경우 급기 설정조건 (15°C)에 맞춰 외기를 처리하며, 난방모드의 경우 최소 외기도입량을 도입하여 간접식 증발냉각 시스템을 현열교환기로 이용하여 실내 온도와 유사한 급기 조건 (20°C)을 만족하도록 함.
- 각 계절별 외기 조건에 따른 차세대 공조시스템의 운전 프로토콜은 유닛 내부에 설계 되어있는 댐퍼 조절에 따른 공기 유로 변경을 통해서 설정된 급기 조건을 맞추도록 제어됨. 앞선 프로토콜 알고리즘을 바탕으로 외기 조건에 따라 냉난방 모드를 결정하며 총 4가지 운전 모드로 나뉘어 운전되도록 프로토콜을 정립함.
- 4가지의 모드는, 급기설정 온도 및 온도 조건에서 포화공기의 엔탈피, 그리고 설정 절대습도에 따라 나뉘게 되는데, 이때 설정된 절대습도 (W_{target})는 액체식 제습시스템을 통과한 급기의 절대습도를 뜻하며, 간접식 증발냉각기와 직접식 증발냉각기로 급기설정 온도를 만족할 수 있는 상태로 규정됨. 추가적으로 외기의 조건에 따라 각 운전모드 별 급기의 유로를 결정하기 위해 유닛 내부의 댐퍼를 조절하며, 댐퍼 조절을 통해 결정된 공기 유로를 바탕으로 각 시스템 구성 요소별 on/off를 결정함 (그림 38-41).

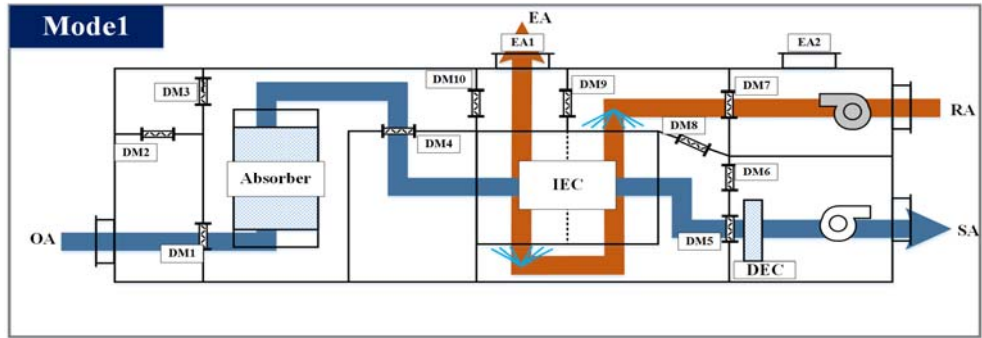


그림 38. 차세대 공조시스템 파일럿 유닛 운전 프로토콜 운전모드1 운전 개요도

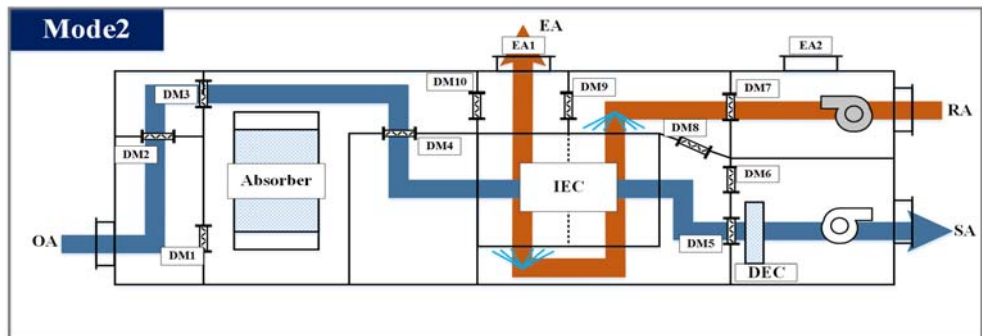


그림 39. 차세대 공조시스템 파일럿 유닛 운전 프로토콜 운전모드2 운전 개요도

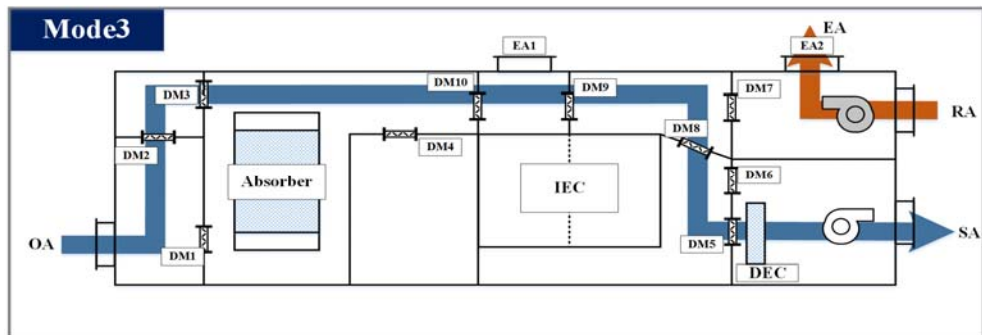


그림 40. 차세대 공조시스템 파일럿 유닛 운전 프로토콜 운전모드3 운전 개요도

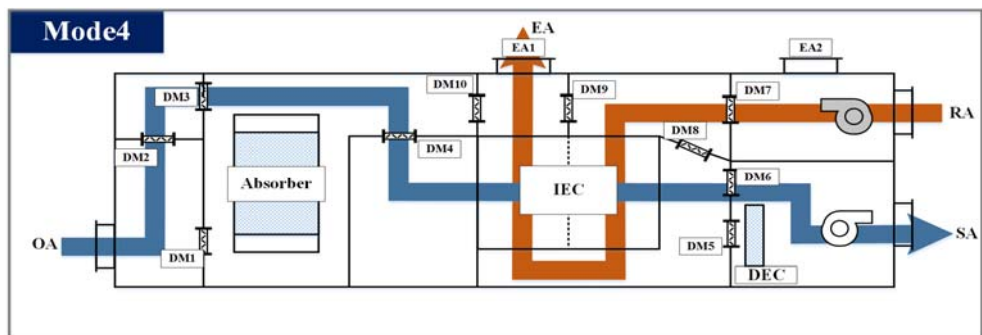


그림 41. 차세대 공조시스템 파일럿 유닛 운전 프로토콜 운전모드4 운전 개요도

- 외기의 건구온도가 급기 설정 온도보다 낮으면 ($DBT_{SA,set} > DBT_{OA}$) 겨울철 조건인 운전모드 4로 운전되며 간접식 증발냉각기(IEC)를 외기와 배기의 현열교환기로 사용 됨 (그림 41). 반면 외기의 건구온도가 급기 설정 온도보다 높을 경우 여름철 및 중간기 운전모드 1-3으로 운전되며, 이때 외기의 엔탈피가 급기설정온도 포화공기의 엔탈피보다 낮을 경우 ($DBT_{SA,set} > DBT_{OA}$ and $h_{SA,sat} > h_{OA}$), 운전모드 3으로 운전되며 이는 직접식 증발냉각기(DEC)만을 이용하여 급기설정 온도를 달성하도록 운전됨 (그림 40).
- 외기의 엔탈피가 급기설정온도 포화공기의 엔탈피보다 높고, 외기의 절대습도가 타겟 절대습도보다 낮은 경우($h_{SA,sat} < h_{OA}$ and $W_{target} > W_{OA}$), 운전모드 2로 운전되며 이때는 액체식 제습시스템을 by-pass하고 이후 간접식 증발냉각기와 직접식 증발냉각기 운전을 통해 급기설정 조건을 달성하도록 함 (그림 39).
- 마지막으로 외기의 엔탈피가 급기설정온도 포화공기의 엔탈피보다 높고, 외기의 절대습도가 타겟 절대습도보다 높은 경우($h_{SA,sat} < h_{OA}$ and $W_{target} < W_{OA}$)는 여름철 운전모드 1로 운전되며, 급기 설정온도를 맞추기 위해 액체식 제습시스템, 간접식 및 직접식 증발냉각 시스템을 모두 운전 (그림 38).

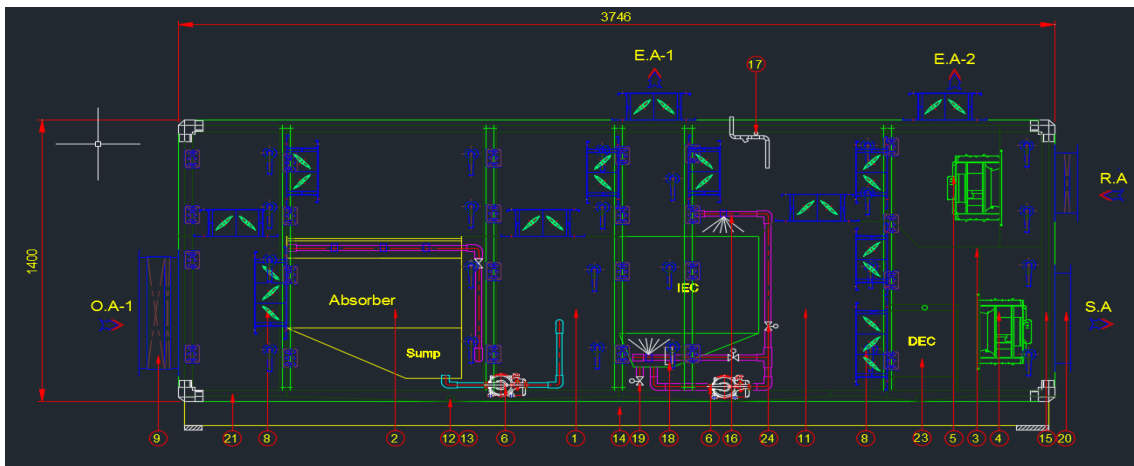


그림 42. 차세대 공조시스템 파일럿 유닛 제작 최종 설계안

- 차세대 공조시스템 각 시스템 특성 분석 및 운전 프로토콜 및 제어 전력을 구현하기 위해 최종적인 파일럿 유닛 제작 설계안을 도출함. 액체식 제습시스템 유닛 선정 과정에서 액체식 제습수용액의 비산 방지를 위한 대책으로 내부 흡수기 및 재생기 높이에 따른 파일럿 유닛의 높이 및 공기유로 변화가 최종 설계안에 반영됨 (그림 42).
- 액체식 제습수용액 비산 방지를 위해 기존 액체식 제습시스템 유닛을 제작하는 Adavatix사의 액체식 제습시스템 유닛에서 제안된 비산 방지법을 적용하여 급기로의 수용액 비산을 방지함. 또한, Munters사의 Celdek 제품의 특성 자료에 의하여 시스템 내부 면풍속을 2m/s 이하로 유지할 경우 비산을 방지할 수 있음을 확인하여 제습시스템 내부 여재 단면적을 결정함.
- 액체식 제습시스템의 제습부 공기와 제습수용액의 교차 방식은 기존 연구 고찰을 통해 도출함. 선행 연구 결과에 따라서 액체식 제습시스템을 구성하는 제습부 내부 충전재를 통과하는 공기의 진행방향 유로 길이가 전체적인 시스템 성능에 영향을 미친다는 연구 결과에 따라서 최종 설계안의 경우

직교류형 액체식 제습시스템 유닛을 적용하도록 설계함.

- 간접식 증발냉각 시스템 선정의 경우 기존 연구를 통해 제안된 고효율의 간접식 증발냉각시스템인 dew-point IEC와 M-Cycle IEC를 이용하는 방법이 고려 및 연구되었으나, 액체식 제습시스템 선정 과정에서 제안된 시스템 설계 단순화 작업을 위한 방식의 일환으로 기존 직교류 방식을 채택함.
- 간접식 증발냉각 내부 물질의 경우 1차측 공기 유로의 경우 열전달 성능이 우수한 플라스틱 재질의 열교환기 여재를 적용 하였으며 2차측 증발냉각부의 경우 가슴이 용이한 종이 재질의 가슴여재를 5mm 두께로 각각 고려함. 이는 선행 연구를 바탕으로 간접식 증발냉각 시스템의 최적 운전을 고려할 수 있는 시스템 형태 및 운전 방식 확인을 통하여 적용 하였으며, 이를 최종 설계안 도출 과정에 적용함으로 최적의 시스템 성능을 발휘할 수 있도록 설계.

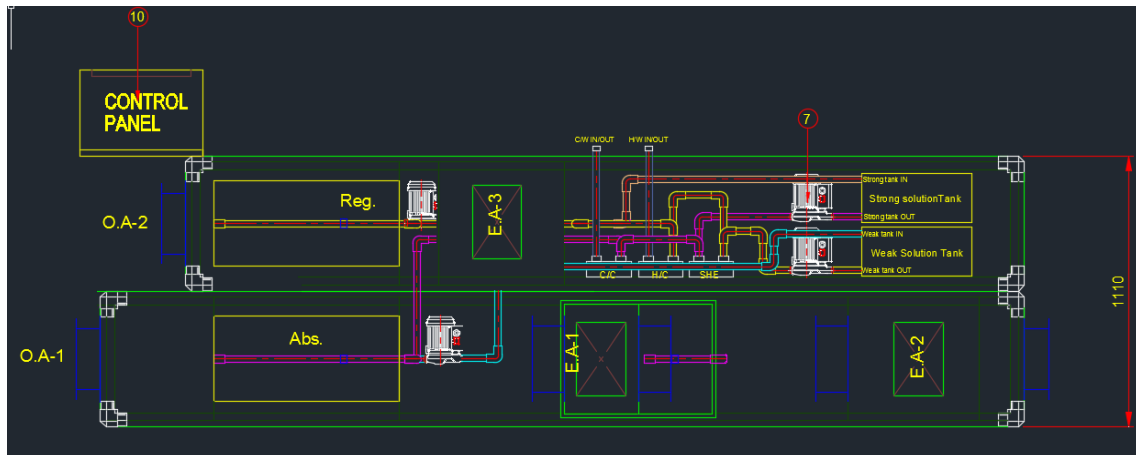


그림 43. 차세대 공조시스템 파일럿 유닛 수용액 공급라인 및 열교환기 배치도

- 차세대 공조시스템 파일럿 유닛 내부의 액체식 제습시스템 위치와 증발냉각 시스템 위치 구성에 따라서 액체식 제습시스템의 냉각과 가열을 위한 열교환기 및 수용액 공급 탱크의 배치 최적화함 (그림 43).
- 본 구성의 경우, 수용액 공급 배관의 배치를 최적화 하여 열손실을 최소화 하였으며, 수용액의 부식성으로 인한 배관 및 열교환기 손실을 방지하기 위한 재질의 배관 및 열교환기를 선정함. 또한, 본 파일럿 유닛의 경우 열원공급에 따른 시스템 성능 분석을 위해 다양한 열원 플랜트 적용을 위한 열원 설비를 구축함.

(6) 기존 지중 다중이용시설 공조시스템 현황 및 문제점 도출

표 13. 기존 지중 다중이용시설 공조시스템 현황

해당 지역 (연도)	적용시설	적용시스템	비고
대한민국 (1998)	서울 도심 지하(1-6층) 사무공간	변풍량 공조시스템	계절별, 환기방법별, 실내위치별 분석
대한민국 (2000)	지하도상가	정풍량 공조시스템	

대한민국 (2006)	서울시 특정 지하도상가	변풍량 공조시스템	
대한민국 (2012)	이화여자대학교 캠퍼스 복합단지(ECC)	변풍량 공조시스템	변풍량 공조방식 적용을 통한 시스템 에너지소비 절감.
대한민국 (2013)	대심도 지중 복합 역사 (서울 및 수도권 역사, 부산광역시 역 사)	기계환기 방식	대심도 지하역사 각 사례별 환기방식 검토.
대한민국 (2015)	서울 지하철 7호선(노원구)	정풍량 공조시스템	변풍량 공조방식 적용을 통한 시스템 에너지소비 절감.
대한민국 (2015)	서울 지하철 7호선 (수락산역사)	정풍량 공조시스템	추가적인 실외 환기 공급을 위한 환기 시스템 적용 필요.
대만 (2004)	타이페이 지하철 역사	정풍량 공조시스템	
중국 (2008)	하얼빈 지중 대형 쇼핑몰	수요기반 환기 공조시스템	DCV 적용을 통한 실내 환기량 만족.
덴마크 (2008)	지중 다중이용시설(영화관, 공항 터미널, 지하철, 지하철 역사)	정풍량 및 변풍량 공조시스템	
아일랜드 (2009)	아일랜드 지하철 역사	수요기반 환기 공조시스템	기존 공조시스템 운전시 DC V 적용을 통한 에너지소비 절감.
중국 (2014)	중국 선전 지하철 역사 (Shenzhen metro)	변풍량 공조시스템	
스페인 (2014)	스페인 바르셀로나 지하철 역사	변풍량 공조시스템	지하 역사 승강장 전기에너지 소비 분석을 통한 시스템 반송에너지 분석.
스페인 (2015)	스페인 바르셀로나 지하철 역사 (지중 심도에 따른 8개 지하철 역사)	정풍량 공조시스템	지중 심도에 따른 실내 공기질 분석에 따른 추가적인 환기시스템 필요.

- 국내 및 국외 지중 다중이용시설 공조시스템 현황 분석 결과, 대다수의 공조시스템이 기존 정풍량 및 변풍량 공조방식 운전을 통한 공조시스템 소비 에너지 절감을 목적으로 적용되고 있음. 하지만, 기존 공조방식의 경우 실내 배기에 포함된 열에너지 회수를 목적으로 배기를 재순환하는데 이는 지중 공간과 같이 환기의 중요성이 높은 공간에서는 적절한 대안이 될 수 없음.
- 몇몇 사례 분석 결과, 실내 공기질 오염과 관련되어 추가적인 외기 도입의 필요성이 대두되고 있는 것으로 확인 되었으며, 이러한 결과는 본 연구를 통해 개발되는 차세대 공조시스템의 100% 전외기 공급 방식의 이점이 지중 공간 공조방식에 새로운 대안이 될 수 있을 것으로 판단됨.
- 차세대 공조시스템의 경우 기존 변풍량 공조시스템 대비 연중 시스템 에너지소비가 감소되는 것을 확인 하였으며, 100% 외기 공급을 통한 최소 환기량 이상의 외기를 급기 하는 이점으로 지중 다중 이용시설 적용 시 기존 시스템 대비 에너지소비 절감 및 실내 공기질 개선의 효과가 나타날 것으로 기대됨.

(7) 지중 다중이용시설 공조시스템 관한 수요기업 조사

표 14. 지중 다중이용시설 공조시스템 수요기업 현황

기업명	연도	수행 프로젝트	특징
한일MEC	2012	코엑스몰 리모델링	규모: B4F, 1F 연면적: 151,800 (㎡) 특징: CM(MEC, ELEC, FIRE),TAB
	2005	이화삼성캠퍼스센터(ECC)	규모: B6F 연면적: 69,630 (㎡) 특징: 지열 에너지 활용 및 각종 행정기관부터 문화 편의시설까지 갖춘 지중 캠퍼스 구축 사업. 전외기 공조시스템(DOAS) 적용된 지중 공간 구축. 히트펌프 배열회수->재열코일에 활용 공조기 배기열 회수->냉각탑 열원으로 활용
선진설비	2006	고려대학교 하나스퀘어	규모: B3F, 1F 연면적: 640,377 (㎡) 특징: 온도상승을 자동으로 감지하여 스스로 개폐 되도록 설계된 배열 창호를 통해, 온도가 일정이상 상승할 경우에는 스스로 온도조절을 할 수 있는 환기시스템 도입
우원M&E	2003	고양시 일산 문화센터	규모: B2F, 4F 연면적: 54,249.4 (㎡) 특징: 지중 공간에 지중 다중이용시설이 구축 되어 있으며, 지중 공간에 공통적으로 정풍량 시스템 단일 덕트 방식을 적용하였음. ※극장: 층고가 낮은 점을 고려하여 “상부급기+상부환기” 방식을 적용하되 가변형 디퓨저를 적용하여 계절별 층분 기류 도달거리 확보함. ※오케스트라 PIT, 제작실: 투습에 의한 결로 발생을 방지하기 위해 온수코일 적용함. ※전시실: 수장물 보호를 위한 항온항습 시스템을 24시간 가동함.
	2015	수락산역 승강장 리모델링	특징: 기존의 정풍량 공조 방식을 적용하였던 수락산역사 내의 에너지 소비량 절감 및 역사 내 실내 공기질 향상을 위해 인버터제어에 의한 변풍량 방식의 블로워 교체를 검토함.
삼신설계	2007	서울시 동남권 유통단지 신축공사	규모: B5F, 11F 연면적: 423,841.56 (㎡) 특징: 지열 시스템 및 태양열 시스템을 적용하였으며, 지중 공간에 대규모 다중이용시설을 구축함. ※전문 상가: 전공기 방식을 채택하였으며, 건물 부하 변동에 대응하기 위해 멀티플러그 fan형 공조기를 적용함 ※전문 식당: 내부주에는 정풍량 시스템 적용, 외부부는 천장형 팬코일 적용함.(주방 취기의 외부 유출 방지 및 오염물질 재순환 방지)

- 표 14에 언급된 국내 지중 다중이용시설 공조시스템 수요 대상기업 외에 귀뚜라미범양 냉방 및 (주)

삼화에이스는 공조 설비 제작업체 수요기업으로 분류되며, 두 업체 뿐 만 아니라 대부분의 설비 업체들은 현재 지중다중이용시설에 기존 정풍량 및 변풍량 공조방식의 시스템을 적용 및 설계함. 따라서 차세대 공조시스템 개발 시 수요기업이 될 수 있음을 기대함.

- 현재 국내 사정 상 적용되고 있는 기존 공조 시스템의 경우 약 70%의 공기를 재순환하여 사용함으로써 지상으로부터 유입되는 오염물질 및 시설 내에서 발생하는 공기 오염원이 지중 공간 내에 지속적으로 축적되어 재실자의 건강상 위험요소로 인식됨. 따라서 100% 신선 공기를 사용하는 차세대 친환경 공조 시스템이 향후 기술적 대안이 될 것을 기대함.

(8) 제습증발냉각 전외기 공조시스템 구성요소 설계 및 샘플 제작

- 공동연구기관 ((주)삼화에이스)에서 제습증발냉각 전외기 공조시스템 구성요소 설계를 위해 실험을 통한 간접식 증발냉각시스템의 공기유로 최적화 및 냉각기 구성요소에 대한 최적의 설계안을 도출. 이를 바탕으로 간접식 증발냉각기 설계 및 최종 차세대 공조시스템 파일럿 유니트 샘플 제작과정에 적용.
- 간접식 증발 냉각기(Indirect Evaporative cooler, IEC)는 일반적인 열교환기의 형태를 가지고 있고 2개의 채널로 이루어짐. 2차측(습채널)에는 재순환된 공기가 통과하며 직접적인 증발이 일어나게 되고, 1차측(건채널)을 통과하는 진행 공기는 2차측 공기와 열교환을 통해 냉각.
- 간접식 증발 냉각기의 냉각 성능은 진행공기의 건구온도와 2차측 작용 공기의 습구온도의 차이에 가장 큰 영향을 받음.
- 일반적인 직교류형 간접식 증발 냉각기(IEC 1)와 외기의 일부를 재순환 시키는 재생형 간접식 증발 냉각기(IEC 2), 실내 공기의 일부를 재순환 시키는 재생형 간접식 증발 냉각기(IEC 3)의 3가지 다른 종류의 간접식 증발 냉각기의 성능을 비교.

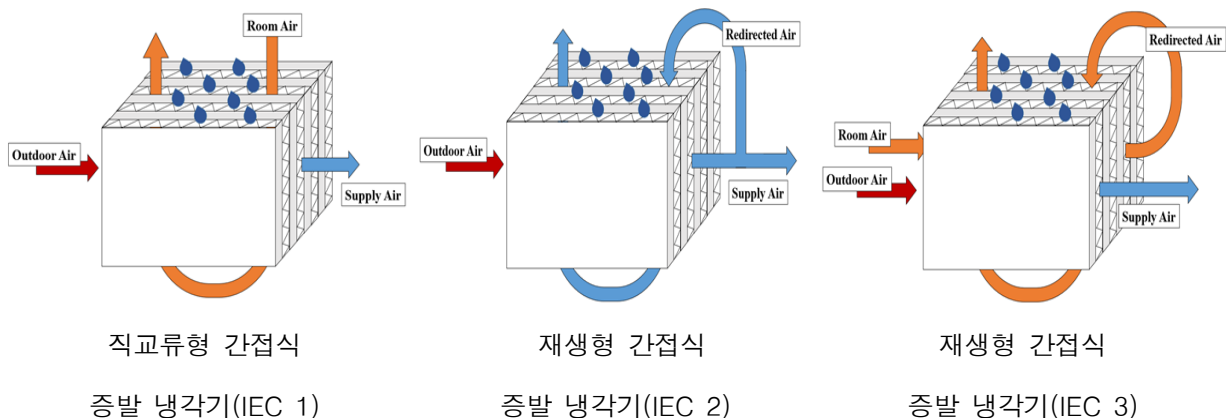


그림 44. 간접식 증발냉각기의 급기 공기 유로 변화에 따른 성능 비교 개요도

- IEC 1은 2차측 공기가 U자 형의 습채널을 통과하는 직교류형 간접식 증발 냉각기로, 일반적인 직교류형 간접식 증발 냉각기 2개를 직렬로 결합한 형태. 습채널 공기는 실내 공기 사용. 간접식 증발 냉각기의 반에 해당하는 습채널을 한 번 통과한 2차측 공기는 나머지 반 쪽의 습채널을 다시 지나감으로써 증발 냉각 효과를 한 번 더 얻을 수 있음. 기존의 직교류형 간접식 증발냉각기보다 더 낮은 출구 온도 얻을 수 있음.

- IEC 2는 진행 공기의 일부를 습채널로 재순환시켜 1차측 공기가 외기보다 낮은 습구온도를 가지고 있는 2차측 공기와 현열 교환함. 기존 연구에 따르면 30%의 공기를 재순환시키는 것이 가장 높은 냉각 효과를 얻을 수 있음.
- IEC 3은 IEC 2와 같은 형태지만 건채널이 진행공기로서 외기가 들어와 급기되는 채널과 재순환시킬 공기로서 실내 공기를 들여오는 채널 두 부분으로 나누어져 있음. IEC 3에서 공기를 재순환시키는 비율은 30%에서 50% 사이로 조절했기 때문에 IEC 3으로 들어가는 외기와 실내 공기의 비율 또한 30%에서 50% 범위에서 조절. 외기와 실내 공기는 서로 섞이지 않기 때문에 교차 오염(Cross-contamination)의 위험이 없음. 외기의 습구온도보다 실내의 습구온도가 낮은 조건에서는 IEC 2보다 IEC 3의 증발 냉각 효과가 더 높을 것으로 기대. 여름철을 기준으로 보면, 실내 온습도 조건은 설정조건으로 일정하게 유지되기 때문에 외기를 재순환시키는 것보다 실내 공기를 재순환시키는 것이 작용 공기로서 더 유리.
- 3가지 간접식 증발 냉각기의 성능 실험은 2개의 분리된 챔버(외기 챔버, 실내 챔버)로 이루어진 실험 항온항습실 내에서 이루어짐. 제시된 간접식 증발 냉각기는 폭 390mm, 너비 390mm, 780mm의 길이를 가지고 있음. 물은 초당 0.02kg씩 분사되어 여재를 지속적으로 적셔주게 됨.

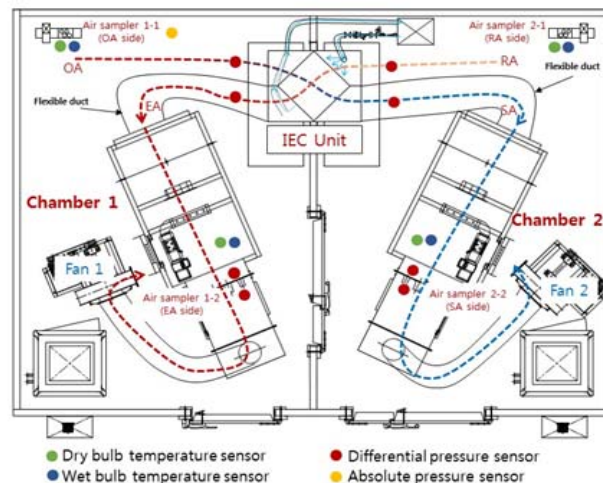
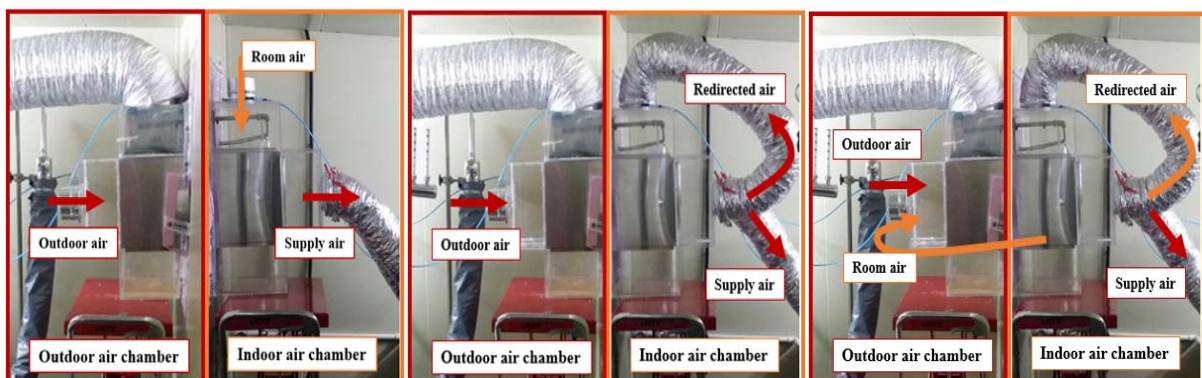


그림 45. 챔버 내의 센서의 종류와 위치



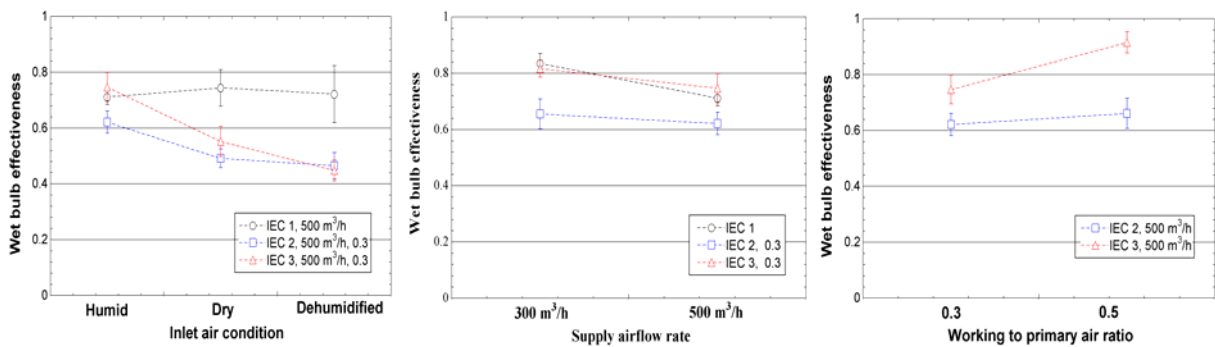
IEC 1 실험 사진

IEC 2 실험 사진

IEC 3 실험 사진

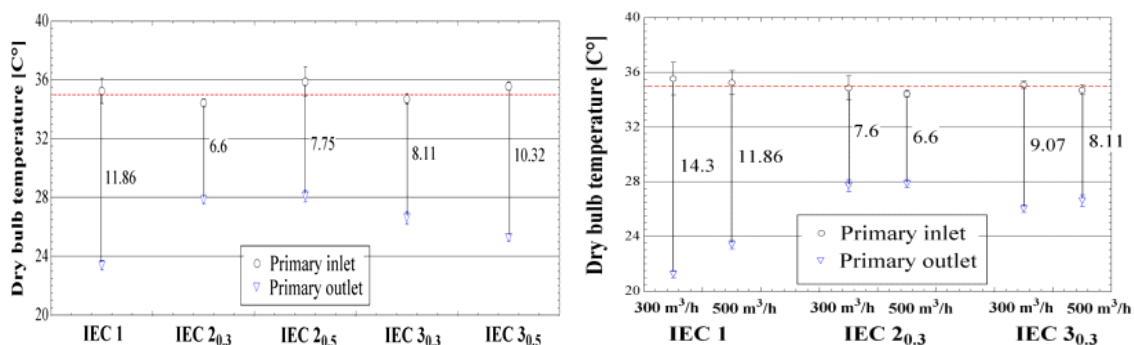
그림 46. 간접식 증발냉각기 종류에 따른 챔버 성능테스트 사진

- 습구효율은 진행 공기의 건구 온도가 이론적인 냉각 한계점인 2차측 작용 공기의 습구온도에 얼마만큼 근접하게 냉각되었는가를 나타내는 지표. 일반적인 직교류형 간접식 증발 냉각기(IEC 1)는 외기의 온, 습도 조건에 큰 영향을 받지 않고 비교적 일정한 습구효율(0.71~0.74)을 보임. 재생형 간접식 증발 냉각기(IEC 2, 3)에서는, 습구효율이 도입된 외기의 조건에 따라 크게 영향을 받는 것으로 나타남. 도입 외기 조건이 습윤조건일 때, 제시한 3가지 간접식 증발 냉각기에서 비슷한 습구효율을 보임. 그러나, 외기 조건이 건조 또는 제습조건으로 바뀌었을 때, 재생형 간접식 증발 냉각기에서는 습구효율 또한 점차 감소하는 경향을 나타냄. 급기 풍량이 300m³/h에서 500m³/h로 증가할 때, 습구효율은 3가지 간접식 증발 냉각기 모두에서 감소하는 경향을 보임. 재생형 간접식 증발 냉각기(IEC 2, 3)에서 재순환 비율이 0.3에서 0.5로 증가할 때 습구효율 증가함 (그림 47).



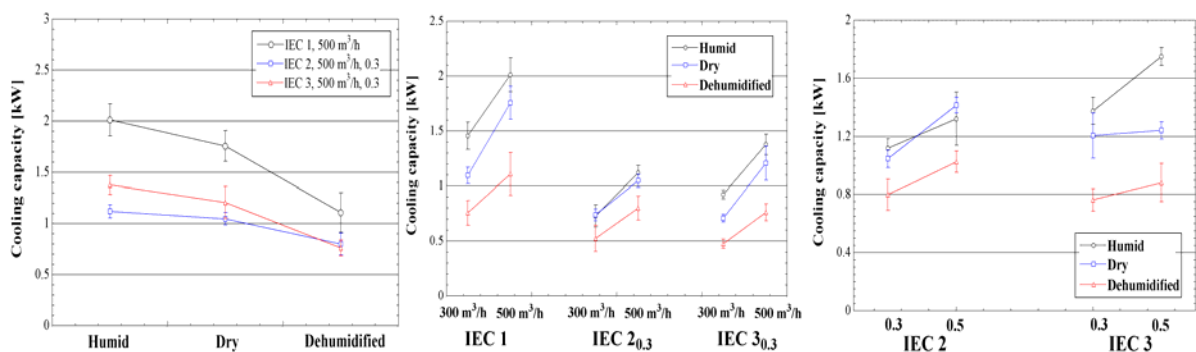
도입 외기에 따른 습구효율 급기 풍량에 따른 습구효율 재순환 비율에 따른 습구효율
그림 47. 간접식 증발냉각기 종류별 습구효율 비교

- 각각의 간접식 증발 냉각기의 급기 풍량이 500m³/h이고 외기 조건이 습윤조건일 때, IEC 1 출구 온도는 23℃까지 냉각되었고 그에 따른 온도 변화량은 11.8℃. 재생형 간접식 증발 냉각기의 경우에는, IEC 2보다 IEC 3에서 진행 공기의 온도가 더 크게 변하였고, 재순환 비율이 클 때 온도 변화 또한 커지는 경향을 보임. 재생형 간접식 증발 냉각기(IEC 2, 3)에서 나타난 온도 변화량은 직교류형 간접식 증발 냉각기(IEC 1)에서 나타난 온도 변화량보다 더 낮은 값을 보임. 온도 변화량과 급기 풍량의 관계를 보면, 다른 변수들을 일정하게 유지했을 때 낮은 급기 풍량에서 더 높은 온도 변화량을 보임 (그림 48).



습윤조건에서의 진행 공기의 온도 변화량 급기 풍량에 따른 온도 변화량
그림 48. 급기 온도 및 온도 변화량

- 간접식 증발 냉각기의 통과할 때, 진행 공기로부터 얼마나 많은 양의 현열을 제거하였는가는 간접식 증발 냉각기의 성능을 평가하는데 중요한 지표로 사용할 수 있으며 이는 간접식 증발 냉각기의 냉각 열량을 나타냄. 급기 풍량이 500m³/h로 일정할 때, 고려한 3가지 외기 조건 모두에서 IEC 1이 다른 2가지 재생형 간접식 증발 냉각기보다 더 많은 양의 현열을 제거할 수 있음. 그림 35에서 나타난 재생형 간접식 증발 냉각기의 냉각열량을 비교하면, 습윤조건과 건조조건에서 IEC 3이 IEC 2보다 더 높은 냉각열량을 보임. 하지만 제습조건에서는 IEC 2의 냉각열량이 IEC 3보다 더 높은 것을 확인할 수 있음. 냉각열량의 경우 급기 풍량이 증가할 때 함께 증가하는 것을 확인. 실험에 사용된 두 가지 재생형 간접식 증발 냉각기 모두에서 재순환 비율이 높아질 때 냉각열량도 증가하는 결과가 나타남 (그림 49).



외기 조건에 따른 냉각열량 급기 풍량에 따른 냉각열량 재순환 비율에 따른 냉각열량

그림 49. 간접식 증발 냉각기의 종류별 냉각열량 비교

- 실험을 통해 3가지 간접식 증발냉각기의 성능을 비교한 결과, 고려한 3가지 간접식 증발냉각기 중, 일반형 간접식 증발냉각기(IEC 1)이 다양한 외기 조건에서 가장 높은 냉각량을 보임. 2차측 공기를 선 냉각시키는 재생형 증발냉각기는 열교환 하는 유체간의 열용량 불균형으로 일반형에 비해 더 낮은 냉각량을 보이고 출구 공기의 온도 또한 더 높게 나타남. 결론적으로, 일반형 간접식 증발냉각기가 가장 높은 습구 효율, 냉각량을 나타내며 공조 시스템에 적용하기에 가장 적합한 특징을 보임.
- 이러한 간접식 증발냉각 시스템의 시스템 유형별 냉각 성능 비교에 따라서, 본 연구과제를 통해 개발되는 차세대 공조시스템의 패키지 유니트 제작 시 일반형 간접식 증발냉각 시스템 적용을 통해 증발냉각 유니트의 최대 성능을 구현할 수 있도록 적용할 예정임.

2.4 2차년도 연구 수행 내용

가. 당해 연도 연구개발 목표 및 결과

표 15. 2차년도 연구개발 목표 및 수행내용

구분(연도)	세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
2차년도 (2017)	지중 다중이용시설 차세대 공조시스템	패키지 유니트 시제품의 기본설계 및 제작 지원	프로토타입 패키지 유니트 시운전을 통한 시제품 기본설계	<u>프로토타입 패키지 유니트 운전을 통한 문제점 및 개선안 도출 완료</u>

패키지 유닛 시제품 기본설계 및 목표성능 검증. (주관연구기관)	인공기후실험 챔버를 이용하여 목표성능 검증	각 구성요소별 목표성능 실증을 위한 실험 및 분석	<u>인공기후실험 챔버 테스트를 통한 목표성능 실증 완료</u>
지중 다중이용시설 차세대 공조시스템 패키지 유닛 시제품 실시설계 및 제작. (공동연구기관)	패키지 유닛 시제품의 실시설계 및 제작	시제품 기본 설계안을 바탕으로 실시설계 및 시스템 제작	<u>프로토 타입 문제점 및 개선안 도출에 따른 시제품 실시설계 및 제작 완료</u>
	공인시험기관을 통한 공인성능시험 수행	패키지 유닛 시제품 계절별 운전모드에 따른 공인성능시험 실시	<u>시제품 운전에 따른 공인성능시험 분석 수행</u>

나. 연구 범위 및 연구 수행 방법

표 16. 2차년도 세부 연구 수행 내용

연구 범위	연구 수행 방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
패키지 유닛 시제품의 기본설계 및 제작 지원	프로토타입 패키지 유닛 운전을 통한 문제점 및 개선안 도출 <u>(이론 및 실험적 접근)</u>	- 1차 연도 선행연구에서 수행된 프로토타입 패키지 유닛 제작 및 운전을 통한 시스템 문제점 및 개선안 도출을 완료함. - 액체식 제습시스템의 제습수용액 냉각 및 가열열원의 효과적인 공급을 위한 히트펌프 시스템 적용 가능성을 분석 완료 하였으며, 이를 시제품 설계시 반영하여 히트펌프 일체형 시제품 유닛을 설계함. - 액체식 제습시스템 및 증발냉각 시스템의 운전 및 유지관리 부분에서의 문제점 및 개선안을 분석 완료 하였으며, 시제품 적용을 통해 개선 가능할 것으로 판단함.
인공기후실험 챔버를 이용하여 목표성능 검증	각 구성요소별 테스트를 통한 목표성능 분석 <u>(실험적 접근)</u>	- 실험동에 구축된 프로토타입 패키지 유닛 운전에 따른 공기질 개선효과를 실시간으로 모니터링 하고 공기질 개선 효과를 정량적으로 검증함. - 액체식 제습시스템의 공기 및 수용액 접촉 방식에 따른 시스템 성능을 인공기후실험 챔버 실험을 통해 분석 완료 하였으며, 시제품 적용을 위한 액체식 제습시스템의 형태 및 운전 방식을 도출함. - 인공기후실험 챔버를 이용하여 직접식 증발냉각 시스템 운전에 따른 공기 중 미생물 농도 변화를 모니터링 하고 자외선 수 처리기 적용을 통한 직접식 증발냉각 시스템 공기질 성능 향상과 관련된 성능을 정량적으로 분석함.

패키지 유닛 시제품의 실시설계 및 제작	시제품 기본 설계안을 바탕으로 시스템 설계 및 시제품 제작 (이론 및 실험적 접근)	- 제습증발냉각 전외기 공조시스템 설계단계에 활용할 수 있는 시뮬레이션 모델을 개발하고, 시제품 실시 설계에 반영할 수 있는 프로그램 도출 완료. - 시제품 기본설계안을 바탕으로 프로토타입 유닛의 문제점 및 개선안이 적용된 시스템 실시설계를 완료하고, 이를 실험동에 적용하여 시스템 구축 완료함 (급기설계풍량 1000m³/h).
공인시험기관을 통한 공인성능시험 수행	시제품 운전을 통한 공인성능시험 분석 (실험적 접근)	- 계절별 시스템 운전조건(겨울철)에 따른 간접식 증발냉각 시스템 운전을 실제 공인시험기관의 공인성능시험을 완료 하였으며, 이를 통한 시험성적서 확보 완료.

다. 세부 연구 수행 내용

(1) 패키지 유닛 시제품의 기본설계 및 제작 지원

- 1차 연도 선행연구를 통해 도출된 프로토타입 패키지 유닛의 제작 및 시운전에 따른 시스템 문제점 및 개선안에 대한 수정이 필요한 것으로 확인됨. 프로토타입 패키지 유닛 시운전을 통해 전체 시스템을 구성하고 있는 액체식 제습시스템, 간접식 증발냉각기, 직접식 증발냉각기의 문제점을 파악하고 분석하여 시제품 제작 시 개선안을 반영할 수 있도록 조치함 (그림 50-52).
- 또한, 액체식 제습시스템의 제습수용액 냉각 및 가열을 위한 열원 공급설비의 단순화 및 전체 시스템 에너지 성능 향상을 위한 냉각 및 가열열원이 동시 공급 가능한 히트펌프 시스템 적용 가능성 분석 및 시스템 설계, 제작을 통한 패키지 유닛 시제품에 적용함.
- 프로토타입 패키지 유닛의 각 구성요소별 제작상태, 시스템 유지 관리 측면에서 나타난 문제점을 토대로 패키지 유닛 시제품 기본설계안을 도출 하였으며, 프로토타입 유닛에서 도출된 각각의 구성 요소별 문제점을 다음과 같이 분석함.

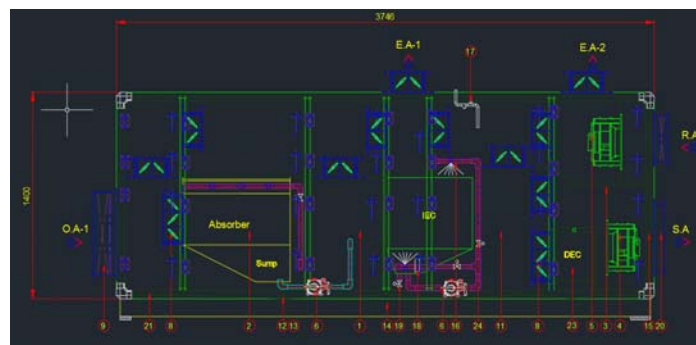


그림 50. 프로토타입 패키지 유닛 급기측 제작도면

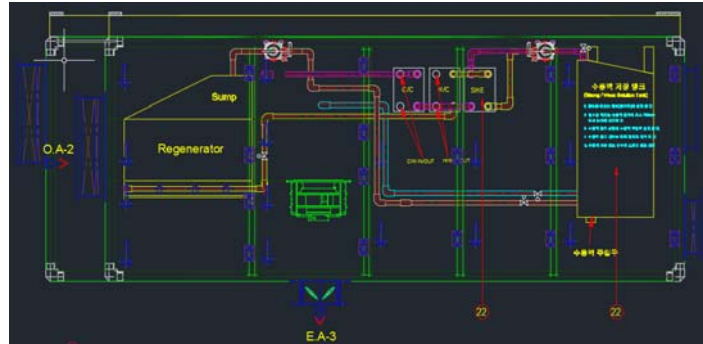


그림 51. 프로토타입 패키지 유닛 재생부 제작도면

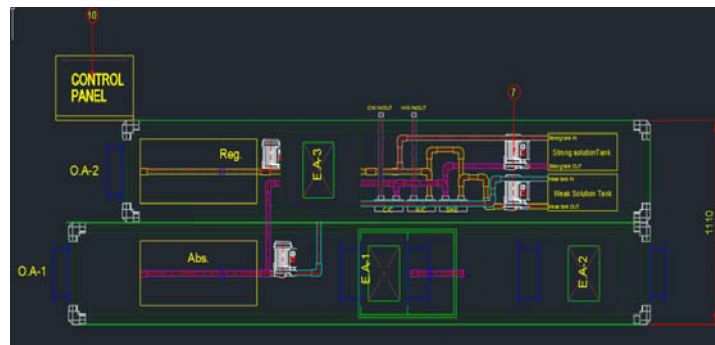


그림 52. 프로토타입 패키지 수용액 배관 제작도면

- 프로토타입 패키지 유닛은 직교류형 액체식 제습시스템을 적용하여 시스템에 도입된 외기를 제습하여 후단에 설치되어 있는 간접식 및 직접식 증발냉각 시스템에 급기 하도록 설계 및 제작되었음. 또한, 제습수용액 재생을 위해 동일한 사이즈 및 형태의 재생기가 재생부에 설치되었으며, 시스템 운전 시 급기 도입부 및 토출부 수용액 유출 문제 및 시스템 제습 및 재생부 여재 케이싱(스테인리스 스틸)의 부식 문제가 확인되어 개선이 필요할 것으로 판단됨.
- 프로토타입 패키지 유닛의 액체식 제습시스템 제습 및 재생을 위해 Munter사에서 제작되는 Celdek 여재를 각각의 제습부 및 재생부에 적용하여 급기의 원활한 제습과 제습수용액의 재생을 수행할 수 있도록 함. 하지만 Celdek 여재의 특성으로 인해 시스템 운전 시 급기의 입구측 및 출구측에서 수용액 유출이 발생하는 문제를 확인함. 이러한 문제로 인해 수용액 손실 및 제습 및 재생부 외부 케이스에 부식이 발생하는 것으로 확인 되었으며, 이를 해결할 수 있는 대안이 필요함.

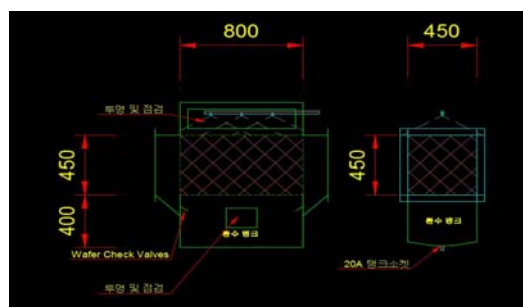


그림 53. 제습 및 재생기 수용액 유출 방지를 위한 시스템 개선안 도출

- 제습수용액 손실 방지 및 급기측 입구 및 출구측 수용액 유출을 방지하기 위해 패키지 유닛 시제품 기본 설계 단계에서 개선안을 도출 하였으며, 이를 적용한 시스템 기본 설계안을 도출 완료 함. 급기 입구측 및 출구측에 수용액 유출 시 중력에 의해 자연스럽게 수용액 탱크에 저장되도록 조치하였으며, 수용액 탱크 입구측에 역류 방지를 위한 역류 방지 장치를 적용함 (그림 53).
- 또한, 제습부와 재생부 외부 케이싱에 적용된 스테인리스 스틸은 프로토타입 패키지 유닛 제작 과정에서 실리콘을 이용한 접합방식을 적용하였음. 하지만, 실리콘 접합 방식의 경우 미세한 수용액 누출을 방지하기에 제한적인 것으로 확인 되었으며, 미세한 수용액 누출에 따라 외부 케이싱의 부식 문제가 발생하는 것으로 확인됨 (그림 54).



그림 54. 제습 및 재생기 수용액 누출에 따른 케이싱 부식

- 따라서, 패키지 유닛 시제품 기본 설계 단계에서는 액체식 제습시스템의 제습부 및 재생부 외부 케이싱 방식을 변경함. 스테인리스 스틸을 적용하였던 프로토타입 패키지 유닛의 액체식 제습시스템 제습부 및 재생부의 외부 케이싱을 강화 플라스틱 재질로 변경 하였으며, 실리콘 접합 방식을 플라스틱 열 용접 방식으로 변경하여 수용액 누출을 방지할 수 있는 대책을 강구함.
- 프로토타입 패키지 유닛의 액체식 제습시스템 후단에 위치한 간접식 증발냉각기는 1차 측과 2차 측의 효과적인 열교환을 위해 폴리에틸렌 필름(1차측), 기화식 가습여재(2차측)를 적용하였으나, 1차측과 2차측 접합 방식에 문제가 있음이 확인됨.
- 시스템 운전 시 간접식 증발냉각기의 1차 측과 2차 측의 급기가 완벽하게 분리되지 않은 문제로 인해 2차 측에 분무된 미세 물 입자가 1차 측 급기에 영향을 주는 것으로 확인됨 (그림 55). 따라서 간접식 증발냉각기의 1차 측과 2차 측의 접합 문제를 적절히 해결하고 100% 분리를 위해 금속재질의 열교환기를 적용하고 2차 측 친수코팅을 통해 증발냉각 효과가 최대화 될 수 있도록 적용함.
- 프로토타입 패키지 유닛에서 확인된 간접식 증발냉각기의 문제를 열교환기 변경을 통하여 해결 할 수 있도록 개선안을 도출 하였으며, 이를 패키지 유닛 시제품 기본 설계에 반영함.



그림 55. 간접식 증발냉각기 열교환기 변경

- 프로토타입 패키지 유닛에 적용된 직접식 증발냉각기는 간접식 증발냉각기에 적용된 기화식 가습여재를 이용하여 급수를 통한 직접식 증발냉각을 구현할 수 있도록 제작되었음. 하지만, 기화식 가습여재의 증발냉각 성능이 시스템 설계 시 고려된 증발냉각 성능 (효율 90% 이상)을 만족하지 못하는 것으로 확인됨.
- 따라서 직접식 증발냉각기 가습여재를 변경하고, 적절한 물 공급량을 유지할 수 있도록 솔레노이드 밸브를 적용하여 패키지 유닛 시제품 기본 설계안에 반영함 (그림 56).



그림 56. 직접식 증발냉각기 기화식 가습여재 변경

- 프로토타입 패키지 유닛의 각 구성요소별 문제점 및 개선점 분석을 바탕으로 패키지 유닛 시제품에 적용될 액체식 제습시스템, 간접식 증발냉각기, 직접식 증발냉각기의 기본적인 형태 및 목표성능을 도출함. 도출된 각 구성 요소별 적용 방안에 따라서 시제품 유닛 기본설계에 반영을 완

료함.

- 또한, 프로토타입 패키지 유닛의 액체식 제습시스템의 수용액 공급 배관과 열원 공급 방식과 관련된 문제점을 도출함. 프로토타입에 적용된 수용액 공급방식 및 배관은 추가적인 수용액 탱크 적용을 통해 3개의 판형 열교환기와 4개의 펌프가 적용됨.
- 위의 공급방식은 효과적인 열교환 및 수용액 공급라인의 명확한 분리가 가능한 장점을 지니고 있으나, 시스템 배관라인의 복잡함과 반송동력 증가의 단점을 지니고 있으며, 수용액 탱크로 인한 장비 전체 사이즈가 시스템 용량 대비 증가하는 문제를 지님 (그림 57).



그림 57. 프로토타입 패키지 유닛 제습수용액 배관 및 탱크

- 따라서 패키지 유닛 시제품 기본 설계 시 액체식 제습시스템의 제습부 및 재생부와 수용액 탱크를 일체화 하였으며, 이에 따라서 펌프개소 감소 및 열교환기 개수 감소에 따른 반송동력 절감 및 전체 시스템 사이즈를 최소화할 수 있도록 설계에 반영함.
- 프로토타입 패키지 유닛은 제습수용액 냉각 및 가열을 위해 냉각탑과 가스보일러를 각각 적용하여 공급하도록 제작됨. 하지만 패키지 유닛 시제품 설계 및 제작 단계에서는 프로토타입 시스템의 에너지 성능을 향상시키기 위해 liquid-to-liquid 방식의 히트펌프 적용을 통한 수용액 냉각 및 가열열원을 동시에 공급하여 에너지 성능을 향상시킬 수 있도록 적용가능성을 분석함.
- 히트펌프의 적용가능성 분석을 위해 기존 액체식 제습시스템의 냉각 및 가열원 공급방식인 공랭식 냉동기와 가스보일러가 적용된 시스템과 히트펌프가 적용된 액체식 제습시스템의 에너지 소비를 시뮬레이션을 통해 분석함.
- 액체식 제습시스템의 제습 수용액은 염화리튬이 적용하였으며, 히트펌프 내부 냉매는 R-134a를 적용함. 또한 히트펌프의 증발기와 응축기가 액체식 제습시스템의 현열교환기 직후의 냉각 코일과 가열코일과 각각 연결되어 냉각 및 가열열원을 동시에 공급하도록 하여 분석을 실시함 (그림 58).

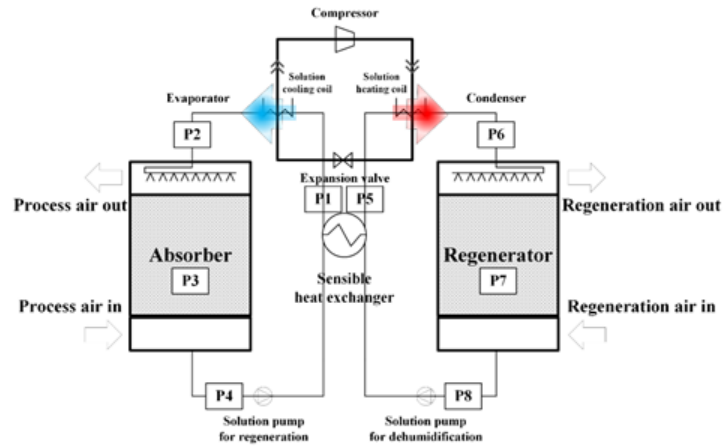


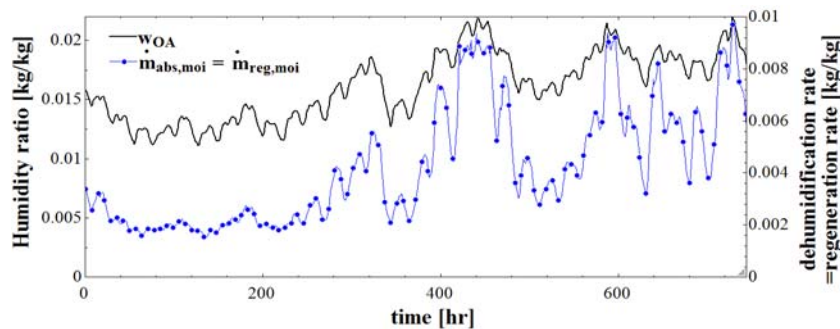
그림 58. 히트펌프가 적용된 액체식 제습시스템 개요도

- 기존 액체식 제습시스템과 히트펌프가 적용된 액체식 제습시스템의 제습기와 재생기에 들어가는 수용액 온도를 각각 25℃와 60℃로 유지시키기 위해 필요한 에너지 소비량을 비교 분석함. 기존 액체식 제습시스템은 공랭식 냉동기와 가스보일러가 각각 냉각 및 가열 열원을 공급하며, 히트펌프가 적용된 액체식 제습시스템은 히트펌프의 증발기와 응축기 담당하도록 설정함.
- 시뮬레이션의 기본 가정 사항들은 기존의 액체식 제습 시스템에 대한 선행 연구를 바탕으로 설정하였으며 표 17과 같이 설정함. 제습기와 재생기를 통과하는 공기 풍량은 2000m³/h와 4000m³/h의 정풍량으로 설정하고, 제습기에 유입되는 제습 수용액의 질량유량과 공기의 질량유량의 비(liquid to gas ratio)는 1로 설정함.
- 또한 제습기와 재생기에 유입되는 제습 수용액의 온도는 25℃와 60℃로 일정하게 유지되는 것으로 가정하였으며, 제습기에 유입되는 고농도 수용액의 농도는 38%로 순환될 수 있도록 제어하였음.

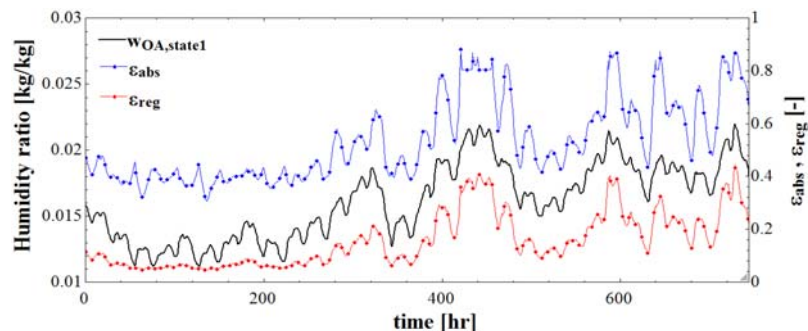
표 17. 히트펌프 액체식 제습시스템 분석 시뮬레이션 조건

	제습기	재생기
Liquid to gas ratio (LG ratio)	1	2
풍량	2000 m ³ /h	4000 m ³ /h
수용액 입구측 온도	25℃	60℃
현열교환기 효율	80 %	
프로그램	EES	
기상 데이터	TMY2 weather data 서울시 8월 외기 데이터	
제습기 효율 모델	Park (2015)	
히트펌프 모델	Jin (2003) implented in Energy Plus	
공랭식 냉동기	Energy Plus	
가스 보일러	Energy Plus	

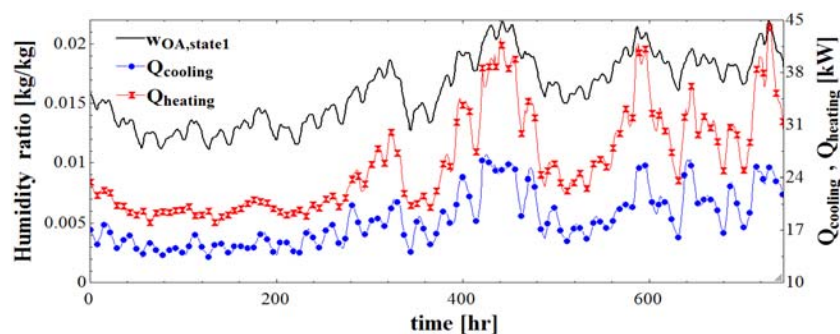
- 액체식 제습 시스템의 성능에 영향을 미치는 인자는 시스템에 유입되는 수용액의 상태와 공기의 상태이며, 이 중 수용액은 동일한 조건(온도, 농도, 유량)으로 운전되도록 설정함. 따라서 공기의 상태(온도, 절대습도, 유량)에 따라 시스템 성능이 변하게 되었는데, 그 중 절대 습도에 따른 영향이 매우 큰 것을 확인됨.
- 그림 59는 각각 외기의 절대습도에 따른 제습량 및 재생량, 제습효율 및 재생효율, 그리고 냉각 및 가열부하를 나타내며, 각 그래프에서 나타난 액체식 제습시스템의 성능은 모두 절대습도의 변화와 동일한 경향을 보임을 확인함.



외기 절대습도 변화에 따른 제습 및 재생량



외기 절대습도 변화에 따른 제습 및 재생 효율



외기 절대습도 변화에 따른 제습수용액 냉각 및 가열 열원 부하

그림 59. 외기 절대습도에 따른 액체식 제습시스템 성능 분석

- 제습부를 통과한 후 공기와 제습수용액 상태는 제습부에 유입되는 공기와 제습수용액 간의 열전달 및 물질전달과 제습과정에서 발생하는 열(발열과정)에 의해 결정되는 것으로 확인됨.

본 해석에서는 제습부에 유입되는 수용액(25℃)의 온도가 유입되는 공기의 온도(평균 33.85℃)에 비해 상대적으로 낮게 설정되어 공기와의 현열 교환 및 제습과정에서의 발열을 흡수함으로써 온도가 상승하는 경향을 확인함.

- 또한 제습후 용액의 순환 유량을 정유량으로 유지하여 제습과정이 끝난 후에 제습량 만큼 유량이 증가됨을 확인 하였으며, 이로 인한 질량 및 에너지 보존에 따라 수용액은 각각 평균 34.99℃와 45.93℃로 냉각 및 가열 코일에 유입되는 것으로 확인됨.
- 따라서 냉각 코일 및 가열코일에서 처리해줘야 하는 온도차는 각각 평균 9.99℃와 14.07℃이며, 이 온도차 및 제습과 재생과정으로부터 나는 수용액의 질량 차이로 인해 제습수용액의 가열부하가 냉각부하보다 큰 것을 확인함.
- 히트펌프가 적용된 액체식 제습시스템의 에너지 소비를 분석하기 위해 기존 냉동기 및 가스보일러가 적용된 액체식 제습시스템과의 동일한 조건에서 에너지 소비량을 1차 에너지로 환산하여 비교를 실시함 (환산계수: 전기에너지 2.75, 가스보일러 사용에너지 1.1).
- 전기에너지는 냉동기 및 가스보일러가 적용된 액체식 제습시스템과 히트펌프가 적용된 액체식 제습시스템에서 각각 공랭식 냉동기와 히트펌프를 구동시키는데 사용되었으며, 기존 공급방식 대비 히트펌프 적용 시 26%의 전기에너지 절감 효과를 나타내는 것으로 확인함.
- 히트펌프가 적용된 액체식 제습시스템의 에너지 절감 효과는 가스에너지 소비에서 나타나며, 기존 공급방식에서는 가열 부하를 가스보일러로 담당하였지만, 히트펌프가 적용 될 경우 히트펌프의 응축기에서 얻을 수 있는 가열열원 공급을 통해 에너지 절감이 가능한 것으로 확인.
- 따라서 히트펌프를 적용해 냉각 및 가열열원을 동시에 공급할 경우 기존 공급방식 대비 84%의 가스 에너지 절감 효과를 나타내며, 결과적으로 전체 1차 에너지로 환산하였을 경우 68%의 1차 에너지를 절감하는 것으로 확인함 (그림 60).

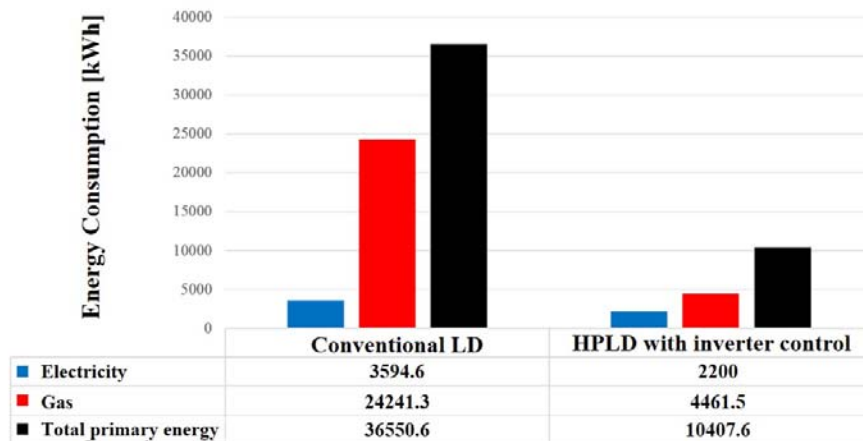


그림 60. 히트펌프 적용 액체식 제습시스템의 에너지 절감

- 프로토타입 패키지 유닛에 적용된 냉각탑 및 가스보일러 적용 방식을 히트펌프로 변경할 경우 에너지 소비 절감이 가능할 것으로 판단됨. 따라서 이러한 개선안을 기본설계안에 반영하여 패키지 유닛 시제품 기본설계에 적용함.
- 프로토타입 패키지 유닛 수용액 배관 및 열교환 라인 단순화 작업 및 수용액 탱크 일체화 개념을 기본 설계안에 적용 하였으며, 수용액 냉각 및 가열에 요구되는 열원 시스템을 히트펌프

가 적용될 수 있도록 개선함 (그림 61-62).

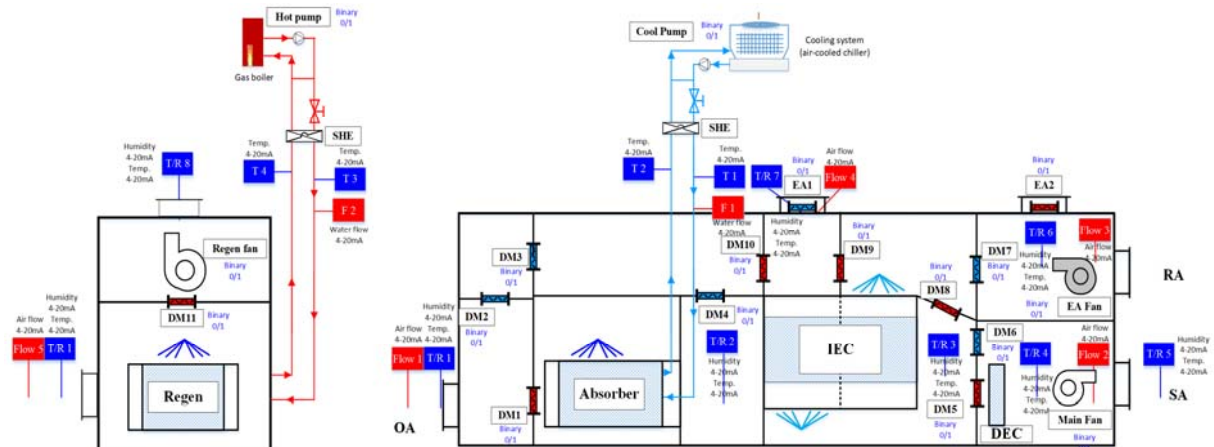
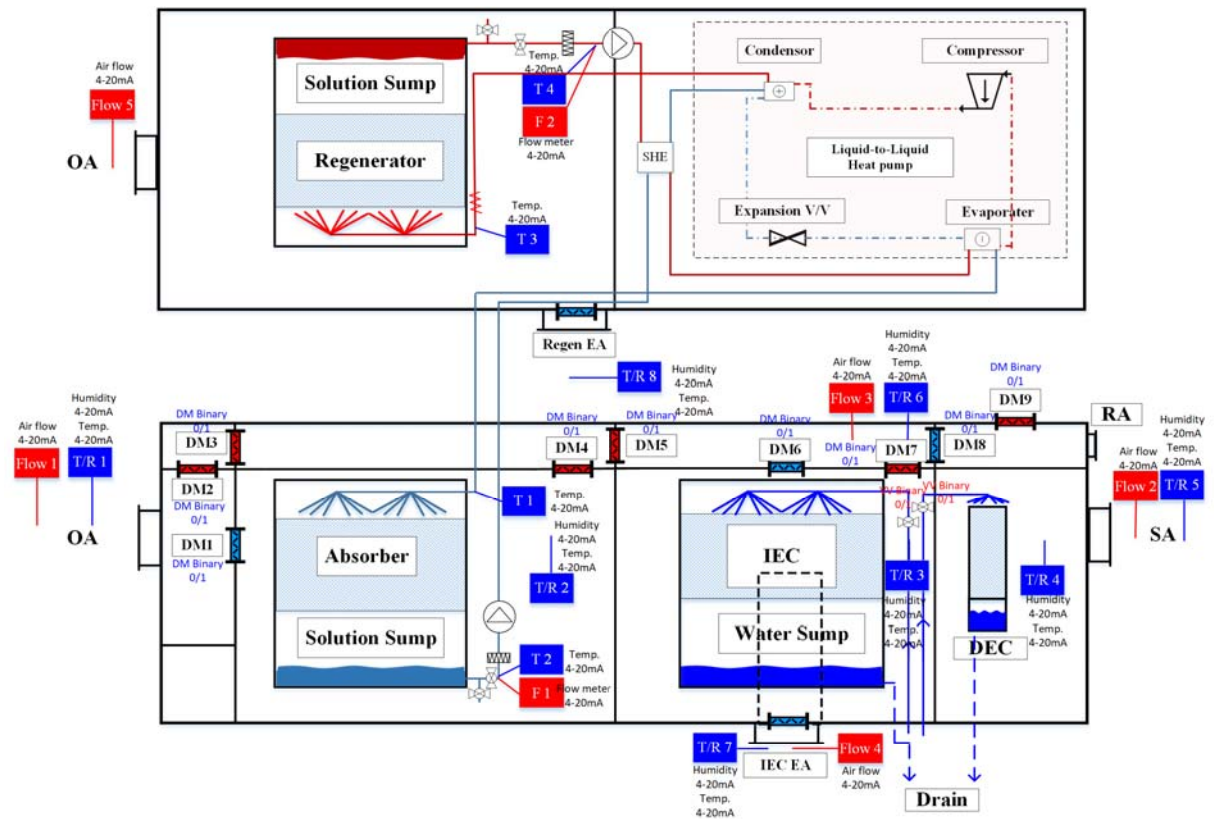


그림 61. 프로토타입 패키지 유닛 개요도



LD-IDECOAS P&ID

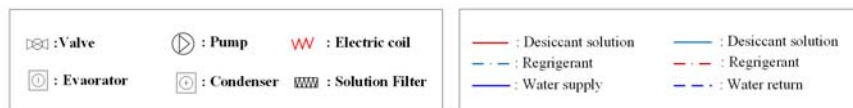


그림 62. 패키지 유닛 시제품 개요도

- 프로토타입 패키지 유닛 운전을 통해 분석된 문제점 및 개선안을 바탕으로 패키지 유닛 시제품

기본설계를 구현함. 시스템을 구성하는 구성요소들은 앞서 언급된 내용들을 바탕으로 개선되었으며, 수용액 탱크 일체화 및 수용액 배관라인과 열교환 설비의 단순화를 통한 시스템 공간 확보를 통한 히트펌프 일체화 패키지 유닛 시제품 구상을 완료함.

- 패키지 유닛 시제품은 기존의 프로토타입 제작을 바탕으로 개선안을 적용하여 전체 시스템 성능 향상 및 안정성 확보를 위한 기본설계를 완성함. 시제품 유닛은 급기풍량 $1000\text{m}^3/\text{h}$ 를 기준으로 설계됨. 액체식 제습시스템은 액기비(liquid-to-gas ratio) 1을 기준으로 제습수용액과 도입외기의 비율을 적용 하였으며, 이를 통해 시스템을 구성하는 제습부와 재생부 펌프의 유량을 동일하게 적용함.
- 액체식 제습시스템 유닛의 제습부 및 재생부 내부를 구성하는 충전물은 프로토타입에 적용된 충전재와 동일한 미국의 Munters사에서 제공하는 Celdek을 적용함.
- 또한, 액체식 제습유닛 내부의 제습수용액 공급을 위한 펌프는 Wilo사에서 제작하는 펌프 적용을 통해 제습수용액에 의한 부식을 방지할 수 있는 방안을 적용함. 냉방 시 액체식 제습수용액의 냉각 및 가열을 위한 열원 플랜트는 기존 히트펌프 적용 가능성 분석 연구 결과에 따라서 히트펌프를 적용함.
- 열교환기 설계 시 수용액 부식을 방지할 수 있는 티타늄 소재의 판형 열교환기 적용을 통해 효과적인 열교환 및 부식 방지를 적용 하였으며, 수용액 탱크를 제습부 및 재생부에 일체화 시켜 배관라인 단순화 및 반송동력 절감이 가능한 열교환 모듈을 구성함.

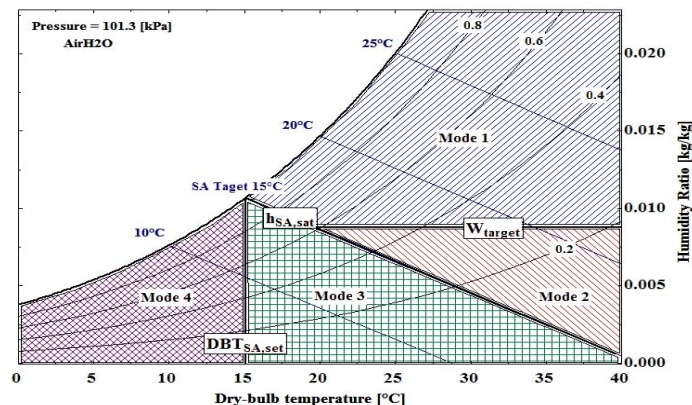


그림 63. 차세대 지중 다중이용시설 공조시스템 시제품 유닛 계절별 운전 조건

- 차세대 공조시스템 시제품 유닛의 운전모드는 프로토타입에 적용된 조건과 동일하게 그림 63에 도식된 외기 조건에 따라 결정됨. 냉방 시 설정 된 급기 조건 (15°C)을 달성할 수 있도록 액체식 제습 시스템, 간접식 및 직접식 증발냉각 시스템 모두 운전되며, 이때 제습수용액 냉각 및 가열열원 공급을 위해 히트펌프 시스템이 운전됨 (운전모드 1).
- 중간기 외기 조건에 따라 액체식 제습시스템을 통과 한 이후 급기 절대습도 기준에 따라서 온도가 높고 건조한 조건에서는 설정 된 급기의 엔탈피 조건에 따라서 간접식 증발냉각기 운전을 제어하고, 직접식 증발냉각기 운전을 통해 설정된 급기 조건을 달성함 (운전모드 2).
- 외기의 엔탈피가 설정 된 급기의 엔탈피보다 낮게 될 경우 직접식 증발냉각 시스템만을 이용하여 단열냉각 방식을 통해 설정된 급기 조건을 달성하도록 함 (운전모드 3).

- 외기의 건구온도가 15℃ 보다 낮을 경우 (운전모드 4), 액체식 제습시스템과 직접식 증발냉각의 운전을 정지시키며 유닛 내부에 설계된 By-pass 유로를 적용하여 간접식 증발냉각기를 현열교환기로 이용하여 배기와의 열교환을 통해 겨울철 급기 설정온도 (20℃)를 맞추도록 운전함.

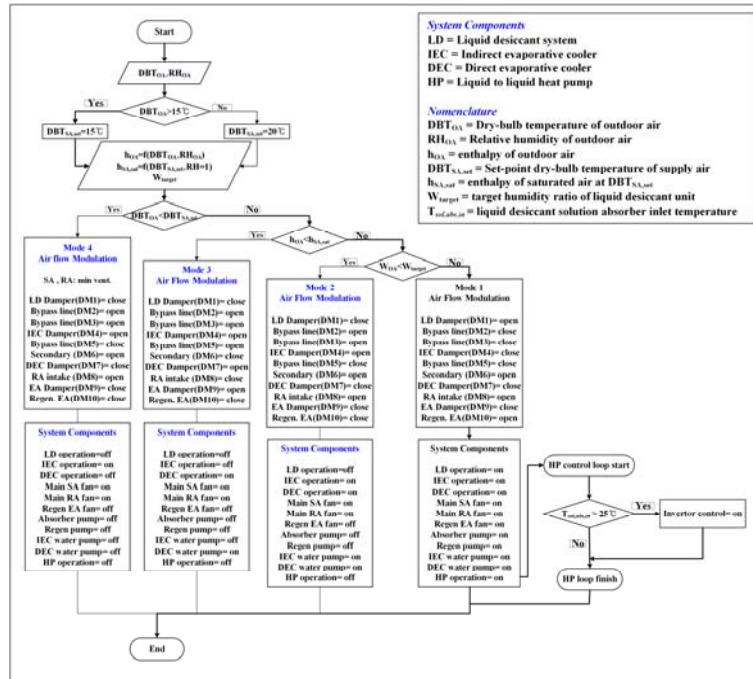


그림 64. 차세대 지중 다중이용시설 공조시스템 시제품 유닛 운전 프로토콜 알고리즘

- 외기의 조건에 따른 차세대 공조시스템 시제품 유닛의 운전 프로토콜 알고리즘은 그림 64와 같음. 외기의 조건에 따라서 냉방모드와 난방모드를 결정하며, 냉방모드의 경우 급기 설정조건 (15℃)에 맞춰 외기를 처리하며, 난방모드의 경우 최소 외기도입량을 도입하여 간접식 증발냉각 시스템을 현열교환기로 이용하여 실내 온도와 유사한 급기 조건 (20℃)을 만족하도록 함.
- 각 계절별 외기 조건에 따른 차세대 공조시스템의 운전 프로토콜은 유닛 내부에 설계 되어있는 댐퍼 조절에 따른 공기 유로 변경을 통해서 설정된 급기 조건을 맞추도록 제어됨. 앞선 프로토콜 알고리즘을 바탕으로 외기 조건에 따라 냉난방 모드를 결정하며 총 4가지 운전 모드로 나뉘어 운전되도록 프로토콜을 정립함.
- 4가지의 모드는, 급기설정 온도 및 온도 조건에서 포화공기의 엔탈피, 그리고 설정 절대습도에 따라 나뉘게 되는데, 이때 설정된 절대습도 (W_{target})는 액체식 제습시스템을 통과한 급기의 절대습도를 뜻하며, 간접식 증발냉각기와 직접식 증발냉각기로 급기설정 온도를 만족할 수 있는 상태로 규정됨. 추가적으로 외기의 조건에 따라 각 운전모드 별 급기의 유로를 결정하기 위해 유닛 내부의 댐퍼를 조절하며, 댐퍼 조절을 통해 결정된 공기 유로를 바탕으로 각 시스템 구성 요소별 on/off를 결정함 (그림 65~68).

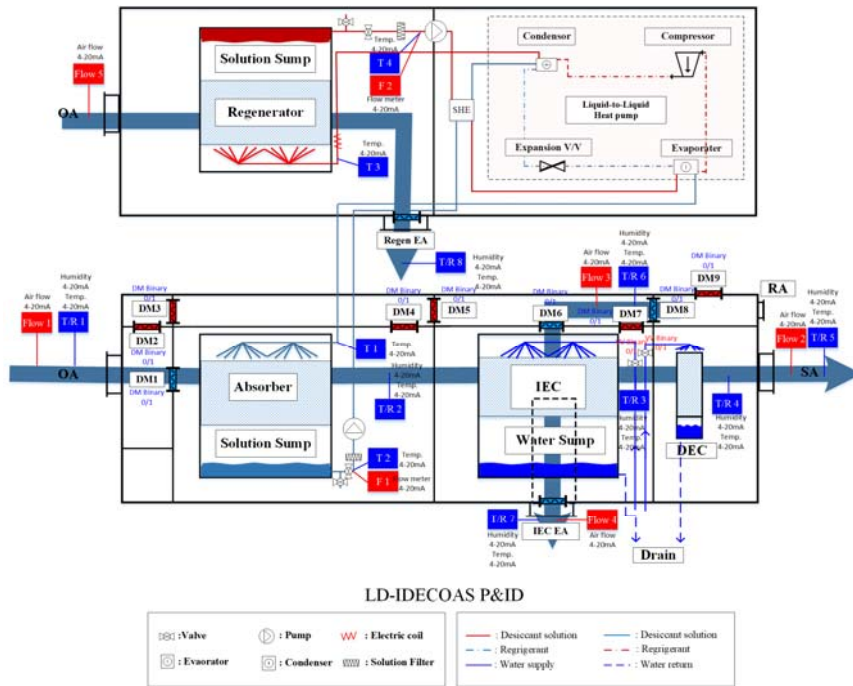


그림 65. 차세대 지중 다중이용시설 공조시스템 시제품 유닛 운전모드 1

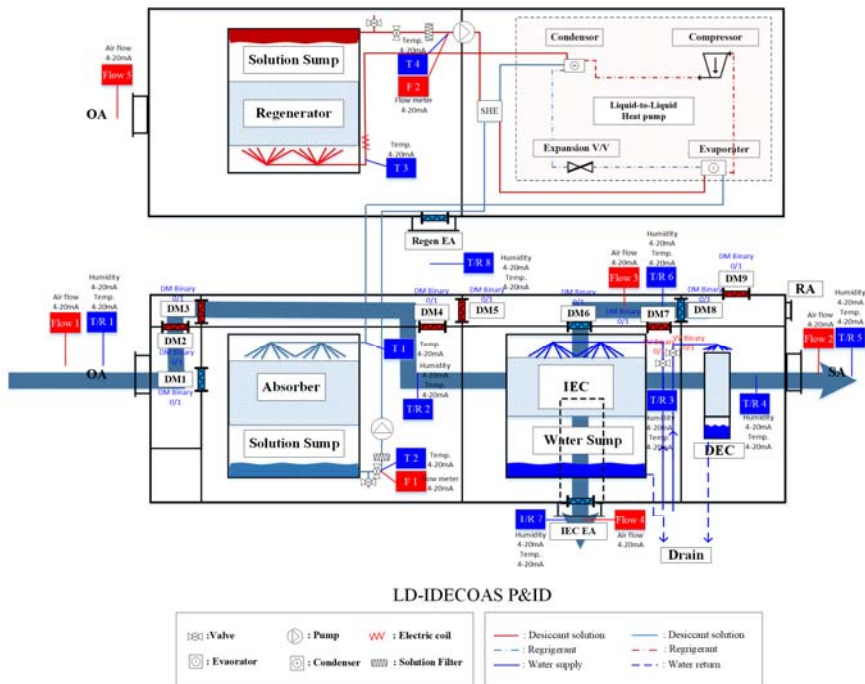


그림 66. 차세대 지중 다중이용시설 공조시스템 시제품 유닛 운전모드 2

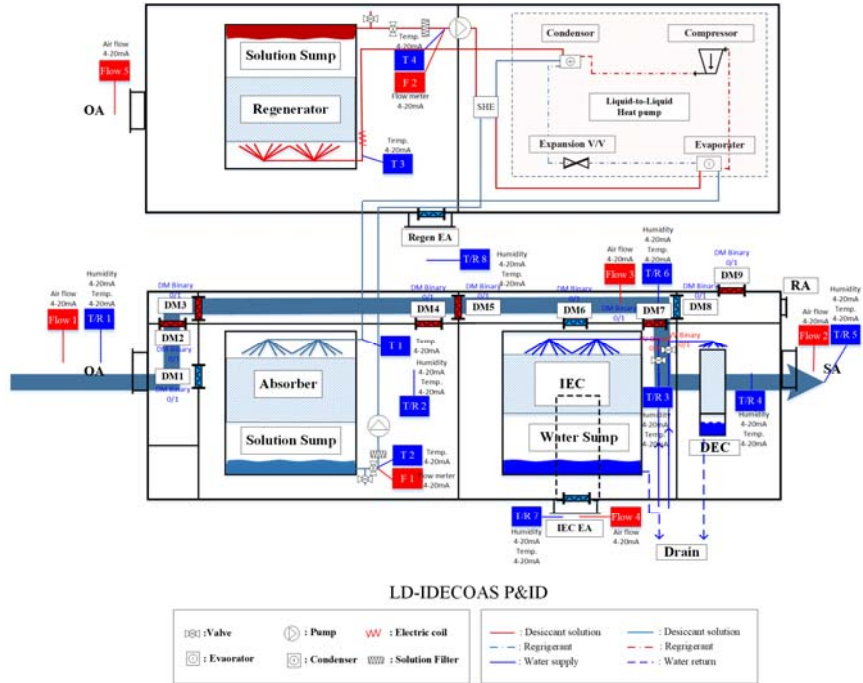


그림 67. 차세대 지중 다중이용시설 공조시스템 시제품 유닛 운전모드 3

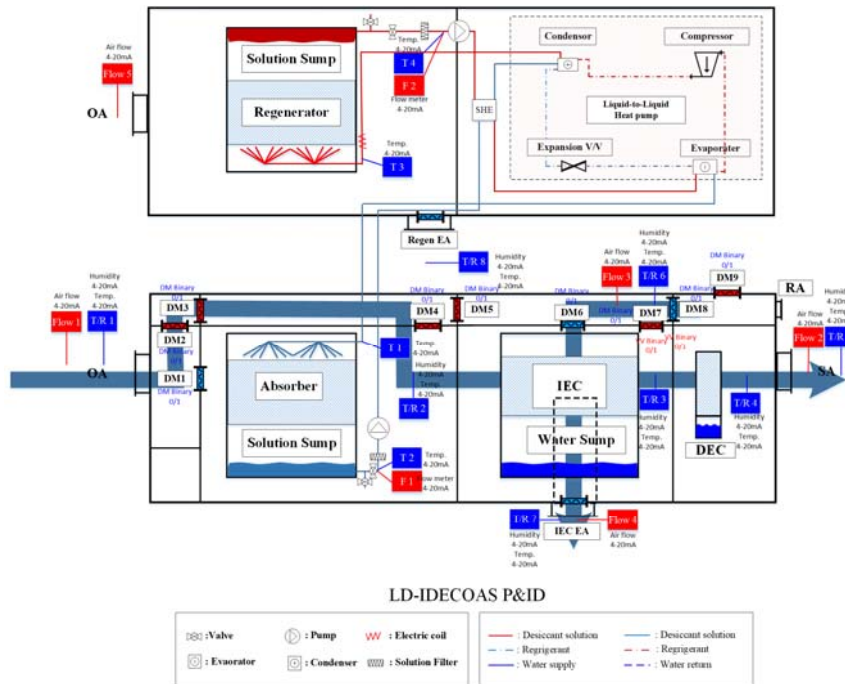


그림 68. 차세대 지중 다중이용시설 공조시스템 시제품 유닛 운전모드 4

- 외기의 건구온도가 급기 설정 온도보다 낮으면 ($DBT_{SA, set} > DBT_{OA}$) 겨울철 조건인 운전모드 4로 운전되며 간접식 증발냉각기(IEC)를 외기와 배기의 현열교환기로 사용 됨 (그림 68). 반면 외기의 건구온도가 급기 설정 온도보다 높을 경우 여름철 및 중간기 운전모드 1-3으로 운전되며, 이때 외

기의 엔탈피가 급기설정온도 포화공기의 엔탈피보다 낮을 경우 ($DBT_{SA,set} > DBT_{OA}$ and $h_{SA,sat} > h_{OA}$), 운전모드 3으로 운전되며 이는 직접식 증발냉각기(DEC)만을 이용하여 급기설정온도를 달성하도록 운전됨 (그림 67).

- 외기의 엔탈피가 급기설정온도 포화공기의 엔탈피보다 높고, 외기의 절대습도가 타겟 절대습도보다 낮은 경우($h_{SA,sat} < h_{OA}$ and $W_{target} > W_{OA}$), 운전모드 2로 운전되며 이때는 액체식 제습시스템을 by-pass하고 이후 간접식 증발냉각기와 직접식 증발냉각기 운전을 통해 급기설정 조건을 달성하도록 함 (그림 66).
- 마지막으로 외기의 엔탈피가 급기설정온도 포화공기의 엔탈피보다 높고, 외기의 절대습도가 타겟 절대습도보다 높은 경우($h_{SA,sat} < h_{OA}$ and $W_{target} < W_{OA}$)는 여름철 운전모드 1로 운전되며, 급기 설정온도를 맞추기 위해 액체식 제습시스템, 간접식 및 직접식 증발냉각 시스템을 모두 운전되며 제습수용액 냉각 및 가열원 공급을 위한 히트펌프 시스템이 동시 운전됨 (그림 65).
- 프로토타입 패키지 유닛 운전을 통한 문제점 및 개선안 분석에 따라서 패키지 유닛 시제품 기본설계를 위한 시스템 형태 및 운전 프로토콜 및 최적 제어알고리즘을 도출함. 본 연구를 통해 시제품 실시설계 및 제작 과정에서 발생할 수 있는 문제점들을 기본설계 단계에서 해결 가능 할 것으로 예측되며, 1차 연도 연구 결과를 바탕으로 시제품 실시 설계 및 제작을 위한 지원 연구를 수행함.

(2) 인공기후실험 챔버를 이용하여 목표성능 실증

- 본 연구에서는 제습증발냉각 기반 전외기 공조시스템의 프로토타입 유닛 운전에 따른 공기질 개선 효과를 확인하기 위해 실험을 실시함. 프로토타입 유닛의 공기질 개선 효과는 실험동에 구축된 프로토타입 유닛의 입구측 외기(Outdoor air, OA)와 출구측 급기(Supply air, SA)의 미생물 농도를 측정함으로써 확인함.
- 차세대 공조시스템 프로토타입 유닛은 모든 장치가 운전되는 Mode 1 (그림 63)에 해당하는 외기 조건에서 실험을 진행함.
- 공기의 풍량은 프로토타입 유닛의 설계 급기풍량에 해당하는 $500\text{m}^3/\text{h}$ 로 공급하였고, 제습 수용액은 약 36%의 농도로 공급됨. 간접식 증발냉각기의 경우 2차측에 뿌려지는 물은 순환수를 사용하고, 직접식 증발냉각기의 경우 지속적으로 시수가 공급됨.
- 현재 제작된 프로토타입 유닛에서는 필터가 설치되어 있지 않은 조건에서 측정 되었으며, 미생물 오염도를 확인하기 위해 사용된 미생물은 곰팡이와 세균으로 이들을 검출하는 배지로 PDA와 TSA를 각각 사용함. 실험 동안 공급된 외기 온도의 범위와 시스템 운전에 따라 공급되는 급기의 온도는 표 18과 같음.

표 18. 외기 및 급기의 온도 조건

구분	공기 위치	온도 범위
곰팡이	외기	23–25℃
	급기	20℃
세균	외기	25–27℃
	급기	25℃

- 프로토타입 유닛의 미생물 오염 개선 효과를 확인하기 위해 전체 시스템을 통과하기 전과 통과한 후, 즉 외기와 급기측의 미생물을 채취함. 그림 69는 외기와 급기의 샘플링 위치를 나타냄. 외기는 패키지 유닛 내의 액체식 제습 시스템을 통과하기 전 시스템 내부에서 샘플링을 하였고, 급기측은 공조 공간(실내)의 디퓨저 입구에서 샘플링이 진행됨.
- 미생물 채취를 위해 충돌식 에어 샘플러(Bio-contaminants sampler)를 사용하였으며, 사용한 에어 샘플러에 대한 세부사항은 표 19와 같음. 사용한 에어 샘플러 규격에 맞게 90mm 크기의 패트리 배지에 PDA 및 TSA를 담아 공기를 샘플링 실시함.
- 배지에 따른 샘플링 횟수는 표 20과 같으며, ISO16000-17(2008)에 따라 실험 결과가 유효하기 위해서는 적어도 두 종류의 흡입 유량에 대해서 각각 2번 이상 샘플링을 해야 하기 때문에 본 연구에서는 배지 종류에 따라 실험을 한 날짜는 다르고 하루 동안에 시간차를 두고 2번(set)을 측정을 진행함.
- 배지 종류와 상관없이 1번 측정시마다 3가지 흡입 유량에 대하여 2번씩 측정하였으며 에어 샘플러는 1분당 100 L를 샘플링 하기 때문에 예를 들어 500 L의 경우 5분 측정한 것과 같음. 결과적으로, PDA와 TSA 배지 모두 각각 28개가 사용됨.

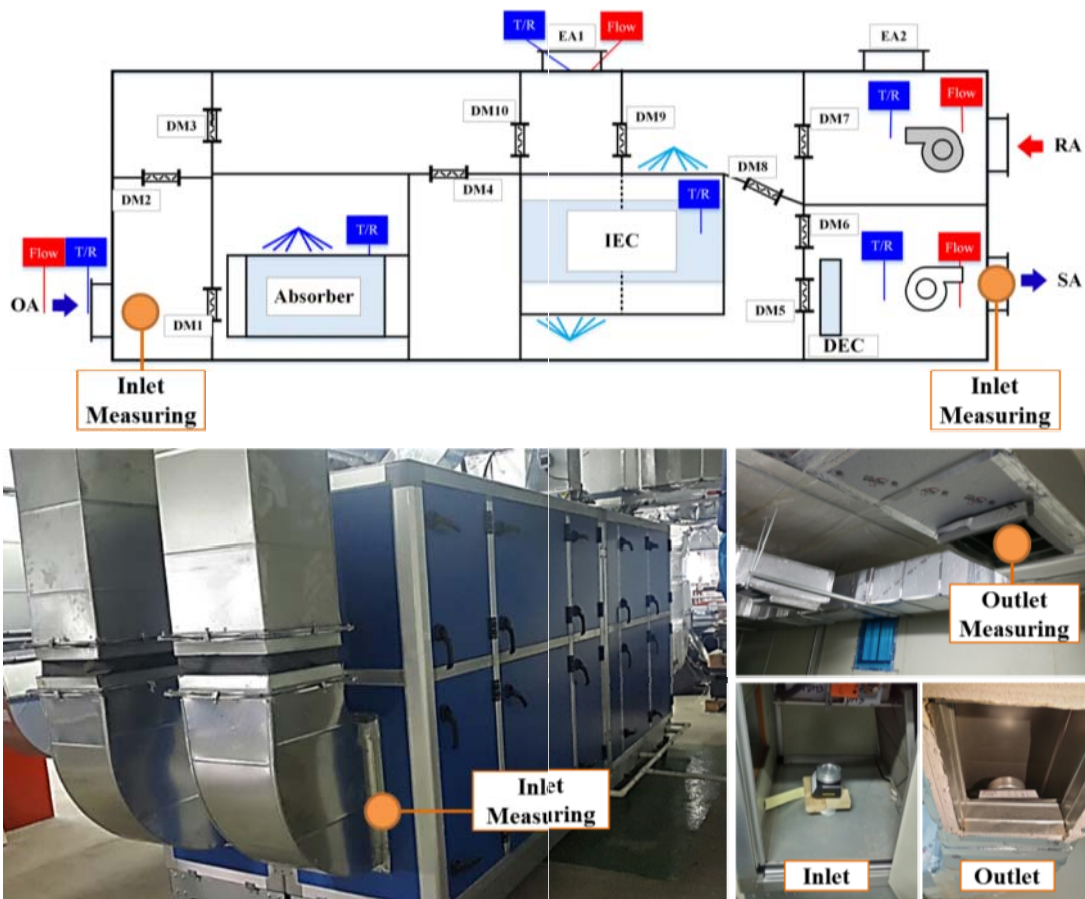


그림 69. 차세대 공조시스템 프로토타입 유닛의 구성도 및 측정 위치

- 실험을 시작하기 전 각 측정시마다 동일한 실험조건을 조성하고 오염을 방지하기 위해 샘플링 구역 주변과 에어 샘플러, 라텍스 장갑 등에 농도 70%의 알코올로 소독을 실시함. 에어 샘플러를 이용하여 각 세트를 샘플링 하기 전에는 샘플링 하는 곳 주변의 오염도를 확인하기 위하여 에어 샘플러를

사용하지 않고 패트리 접시를 5초간 열어 배양함(base).

- 샘플링 한 후 추가적인 오염을 방지하기 위해 패트리 접시는 파라필름으로 밀봉하였으며, 채취된 샘플들은 배양기에 넣기 전까지 샘플의 변형을 막기 위해 25°C 이하로 보관해야 하기 때문에 샘플링 지역에서 배양기가 있는 곳까지 이동하는 동안 아이스박스에 넣어 보관함.

표 19. 에어샘플러 세부사양

기기	타입	특징	
Bio-contaminant s sampler	충돌식 타입	흡입 유량	30 - 120 L/min
		측정 배지 크기	90 mm agar plate
		오차율	± 5% of set point
		홀 개수 (홀 크기)	380 (1 mm diameter)

표 20. 미생물별 샘플링 방법

구분 (배지)	운전기간	샘플링 횟수	흡입 유량 별 채취 횟수
곰팡이 (PDA)	1 day	2 Times	100 L: 2 회
			200 L: 2 회
			500 L: 2 회
세균 (TSA)	1 day	2 Times	100 L: 2 회
			200 L: 2 회
			500 L: 2 회

표 21. 미생물 배지별 배양 조건

미생물 구분	시료종류	샘플링 방법	배지 종류	배양온도	배양기간
곰팡이	공기	Impactor air sampler	PDA	25°C	5 Days (120hr)
세균	공기	Impactor air sampler	TSA	32°C	3 Days (72hr)

- 각 샘플링 별 미생물 군집수를 육안으로 센 후, ISO16000-17(2008)에서 제공하고 있는 충돌식(impaction) 에어 샘플러에서의 미생물 농도식이 식 1을 이용하여 외기와 급기에서의 곰팡이와 세균 농도(CFU/m³)를 계산함. Base 케이스의 경우 모든 경우에서 미생물 군집수가 0으로 나왔음.

$$C = \frac{\sum N_{cfu}}{\sum V} \quad (\text{식 1})$$

- 표 22와 23은 외기와 급기에서의 곰팡이 오염도를 보여줌. 첫 번째 세트의 경우 전반적으로 외기 대비 급기의 곰팡이 군집수가 감소하는 경향을 확인할 수 있었음.
- 두 번째 세트의 경우 노란색의 포자형태의 곰팡이가 배지 전반적으로 퍼져있어 명확한 개수를 확인할 수 없었지만, 포자 형태가 아닌 개체로 셀 수 있는 곰팡이만 개수를 확인하였을 경우 첫 번째 세트와 마찬가지로 곰팡이 군집수가 감소하거나 유사한 경향을 보임.
- 배양 이후 각각의 군집 수 개수 확인 단계에서 세균과 효소로 추정되는 미생물도 발견되었지만 세균과 효소는 제외하고 개수 확인을 실시함.

표 22. PDA first set

Measuring time	1st sample		2nd sample	
Measurement number	OA	SA	OA	SA
Base				
Number of colony [CFU]	0	0		
Number of colony [CFU]				
200 L	7	11	12	11
500 L				
Number of colony [CFU]	28	23	31	16
5 min				
Number of colony [CFU]	50	54	49	48
C [CFU/m ³]	OA		SA	
	110.6		101.9	

표 23. PDA second set

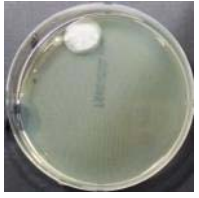
Measuring time	1st sample		2nd sample	
Measurement number	OA	SA	OA	SA
base				
Number of colony [CFU]	0	0		
100 L				
Number of colony [CFU]	19	27	42	23
200 L				
Number of colony [CFU]	36	52	28	25
500 L				
Number of colony [CFU]	54	44	38	30
C [CFU/m ³]	OA		SA	
	135.6		125.6	

- 표 24와 25는 외기와 급기에서의 세균의 오염도를 나타냄. 세균은 곰팡이와 다르게 두 세트 모두 육안으로 군집수를 확인하였을 때 확연하게 외기 대비 급기의 세균 군집수가 감소하는 것을 확인할 수 있었음.
- 배양 이후 군집 수 개수 과정에서 곰팡이와 효소로 추정되는 미생물도 발견되었지만 곰팡이와 효소는 제외하고 개수 확인을 실시함.

표 24. TSA first set

Measuring time	1st sample		2nd sample	
Measurement number	OA	SA	OA	SA
base				
Number of colony [CFU]	0	0		
100 L				
Number of colony [CFU]	5	5	7	3
200 L				
Number of colony [CFU]	18	3	15	6
500 L				
Number of colony [CFU]	16	10	36	10
C [CFU/m ³]	OA		SA	
	60.6		23.1	

표 25. TSA second set

Sampling volume	1st sample		2nd sample	
Measurement number	OA	SA	OA	SA
base				
Number of colony [CFU]	0	0		
100 L				
Number of colony [CFU]	13	3	15	3
200 L				
Number of colony [CFU]	24	0	14	1
500 L				
Number of colony [CFU]	15	6	18	4
C [CFU/m ³]	OA		SA	
	61.9		10.6	

- 패키지형 제습증발냉각 기반 전외기 공조시스템의 곰팡이 및 세균 제거효율을 계산해보았을 때, 곰팡이는 첫 번째 세트와 두 번째 세트에서 각각 외기 대비 8.0%와 7.4%의 제거효율을 나타냈으며, 세균의 경우 첫 번째 세트와 두 번째 세트에서 각각 외기 대비 61.9%와 82.8%의 제거효율을 보임.
- 간접식 증발냉각기는 이론적으로 외기가 지나가는 1차측 유로와 2차측이 완전히 분리되어 있기 때문에 간접식 증발냉각기에서 순환수를 쓰더라도 물에 의한 오염은 없을 것으로 예측됨.
- 또한 현재 제작된 패키지 유닛은 필터가 설치되어 있지 않기 때문에 필터에 의한 절감효과는 없었고, 제거 효율만 봤을 때 가장 미생물 오염에 영향을 끼칠 것이라 예상되는 직접식 증발냉각기보다 액체식 제습 시스템에서의 미생물 제거 효과가 더욱 커서 결과적으로 급기측에서 공기질 개선 효과가 있었던 것으로 판단됨.

- PDA와 TSA 배지의 미생물 군집수를 봤을 때 상대적으로 공기나 직접식 증발냉각기에 뿌려주는 물에 곰팡이 보유수가 세균보다 많았던 것으로 판단됨. 또한 미생물별로 시간차는 있지만 동일한 날에 유사한 외기조건에서 실험을 진행하였지만 두 번째 세트에서 곰팡이 포자가 전반적으로 퍼진 것을 봐서 주변 소독이 확실하게 되지 않았거나 주변 환경이 예기치 못한 상황에 의해 변했을 가능성이 존재함.
- 하지만 실험결과를 확인하였을 때 패키지형 제습증발냉각 기반 전외기 공조시스템은 곰팡이나 세균과 같은 미생물의 오염을 개선하는 효과가 있는 것으로 판단됨.
- 급기공기의 측정을 외기와 같이 패키지 유닛 내부에서 하지 않고 급기덕트를 어느 정도 지나 실내로 토출되는 지점에서 하여 덕트에 의한 오염여부도 있을 수 있으나, 공기가 정체되어 있지 않고 계속 하여 유동이 일어나고 있는 상황이고 공조기를 처음 켜 후 일정시간이 지난 후 실험 측정을 수행하였기 때문에 덕트 내부의 오염물질은 어느 정도 제거가 됐다고 판단이 되어, 급기를 실내 측에서 측정하여도 덕트에 의한 오염영향은 크게 없을 것으로 판단됨.
- 본 연구에서는 차세대 공조시스템 프로토타입 유닛에서 곰팡이와 세균과 같은 미생물의 오염을 개선하는 효과에 대하여 실험을 하여 분석함. 패키지형 제습증발냉각 기반 전외기 공조시스템의 액체식 제습 시스템, 간접식 및 직접식 증발냉각기가 모두 운전되는 차세대 공조시스템의 여름철 일반적인 운전조건하에서 실험을 실시함.
- 곰팡이는 PDA 배지에서, 세균은 TSA 배지에서 배양을 하였음. 그 결과, 곰팡이 오염의 경우 급기에서 외기 대비 평균적으로 7.7%를 감소하는 것을 확인할 수 있었고, 세균 오염은 평균 72.4% 제거 효과가 있는 것을 확인함. 또한 제거 효율을 통해 차세대 공조시스템 프로토타입 유닛은 곰팡이보다 세균에 대한 절감효과가 큰 것을 알 수 있었음.
- 프로토타입 유닛의 각 장치에 따른 영향을 정확히 알아보기 위해서는 각 장치별 출구 측에서의 측정도 필요하다고 판단됨. 또한 필터나 Ultraviolet 램프를 설치하면 제거효율이 더욱 상승할 것으로 예상되며, 공기질 오염에 가장 큰 영향을 줄 것으로 알려진 직접식 증발냉각기를 운전한 상태에서 실험을 진행하였기 때문에, 직접식 증발냉각기가 필요 없는 나머지 운전조건에서는 더욱더 공기질 개선효과가 있을 것으로 예측됨.
- 패키지 유닛 시제품 적용을 위한 액체식 제습 시스템의 공기 및 수용액 접촉 방식에 따른 시스템 성능 분석 및 비교를 위하여 인공기후챔버를 통해 실시하였으며, 시제품 적용을 위한 최적의 액체식 제습 시스템 형태 및 접촉 방식을 도출함.
- 본 실험 연구에서는 보편적으로 많이 사용되는 대향류형 및 직교류형 액체식 제습 시스템을 적용하였으며, 선행 연구로부터 진행된 제습 성능에 대한 매개변수 연구에 의하면 수용액의 온도 변화에 따라 제습 효율 및 습기 제거량이 큰 영향을 받는 것을 알 수 있음. 따라서 본 연구에서는 인공기후챔버를 통해 동일한 공기 조건을 조성하였고, 동일 운전 조건 하에 수용액 온도 변화에 따른 대향류형 및 직교류형 액체식 제습 시스템의 제습 성능 분석 및 비교를 실시하였음 (그림 70).

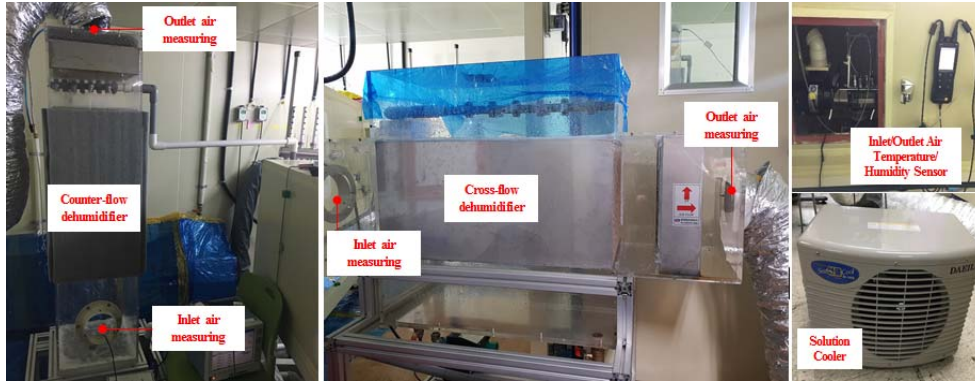
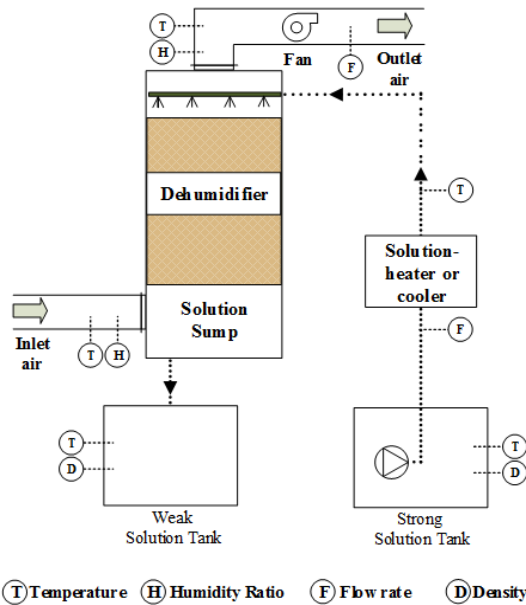
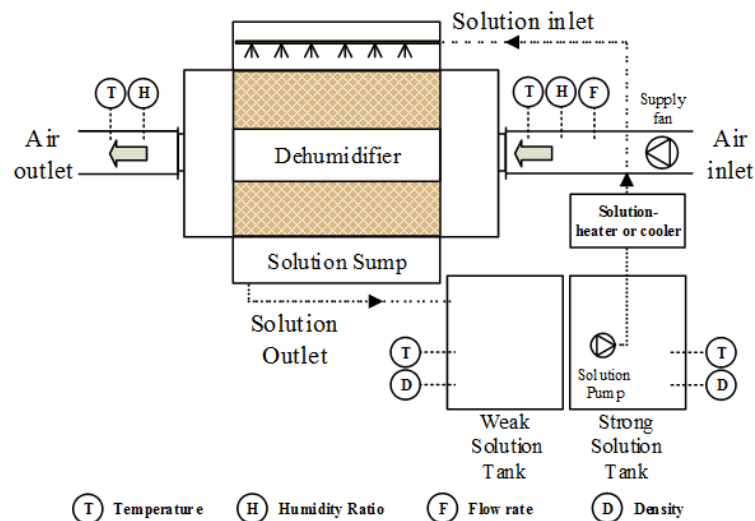


그림 70. 액체식 제습 시스템의 공기 및 수용액의 접촉 방식에 따른 시스템 성능 실험

- 본 실험 연구에서는 공통적으로 염화 리튬 수용액을 제습 수용액으로 사용하였으며, 증발 효율이 높고 압력강하가 낮은 셀룰로오스 섬유 구조의 CELdek 여재를 사용하였음. 이때, 두 시스템의 비 표면적 값은 각각 $229.4 \text{ m}^2\text{m}^{-3}$, $290.1\text{m}^2\text{m}^{-3}$ 과 같음.
- 대향류형 및 직교류형 제습기는 정유량의 수용액 펌프와 변유량의 공기 팬 및 수용액 냉각기 및 가열기 (solution cooler/heater)로 구성되어있음 (그림 70).



(a) 대향류형 액체식 제습 시스템의 실험 구성도



(b) 직교류형 액체식 제습 시스템의 실험 구성도

그림 71. 대향류형 및 직교류형 액체식 제습 시스템의 실험 구성도

- 수용액의 온도는 15℃에서 30℃까지 5℃ 간격으로 하여 총 4번의 실험을 수행하기 위해 수용액 냉각기와 가열기를 통해 설정온도를 유지하도록 함.
- 도입 공기는 인공 기후챔버를 통해 조성되었으며 액체식 제습 시스템은 보통 여름철에 가동된다는 점을 고려하여 여름철 서울 평균 외기 온·습도 조건 하에 실험을 진행하였음.
- 외기 조건으로 조성된 공기가 제습기를 통과할 때, 고농도의 수용액은 고농도 수용액 탱크에 위치한 수용액 펌프를 통해 제습기 상단으로 공급됨.
- 이때, 냉각/가열장치를 통해 설정 온도로 조성된 수용액은 상단에서부터 분사되면서 제습 과정이 발생하며, 분사된 수용액은 제습기 sump를 거쳐 저농도 수용액 탱크에 저장됨.
- 실험 측정 변수는 공기 입·출구 측 온도 및 상대 습도, 수용액 입·출구 측 온도 및 밀도, 공기 유량으로 구성되어있으며 측정 포인트는 그림 71과 같음.
- 본 실험 연구에서는 액체식 제습 시스템이 일반적으로 여름철에 사용된다는 점을 고려하여 여름철 서울 평균 외기 온·습도 조건 하에 실시하였으며, 도입 공기 조건, 공기 및 수용액 유량 및 수용액 농도값이 일정한 조건 하에 제습 수용액의 온도 변화에 따른 대향류형 및 직교류형 액체식 제습 시스템의 제습 성능을 1:1 비교 분석함 (표 26).

표 26. 실험 조건

측정 변수		평균값	범위
입구측 공기	온도 [℃]	28.5	26.9 - 30.9
	절대습도 [g/kg]	18.34	17.70 - 18.95
공기 유량 [kg/s]		0.0651	0.0649 - 0.0653
수용액 유량 [kg/s]		0.142	0.117 - 0.176
수용액 농도 [%]		35.68	35.04 - 36.32

- 대향류형 및 직교류형 액체식 제습 시스템의 제습 성능 평가를 위해 제습 효율 및 습기 제거량 산정식을 적용하여 수용액 농도 변화에 따른 두 시스템의 제습 성능을 정량적으로 비교 분석함.
- 습공기 선도 상의 공기 입·출구 측 공기 조건에 대한 실험 데이터에 의하면, 직교류형 제습기를 통과한 공기의 절대 습도가 대향류형 제습기를 통과한 공기의 절대 습도보다 평균적으로 0.101g/kg 높으며, 대체로 수용액의 온도가 낮을수록 직교류형 제습기의 출구 측 공기의 절대 습도와 대향류형 제습기의 출구 측 공기의 절대 습도 간의 차이가 크다는 점을 알 수 있음 (그림 72).

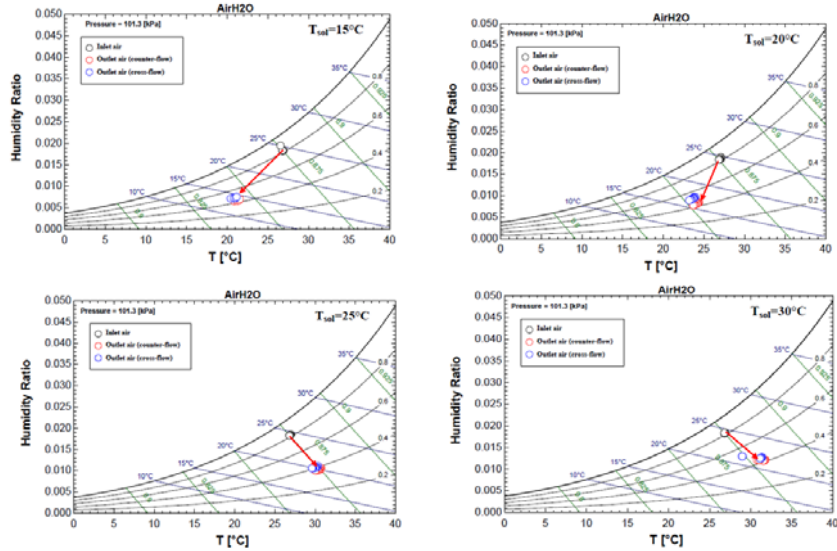
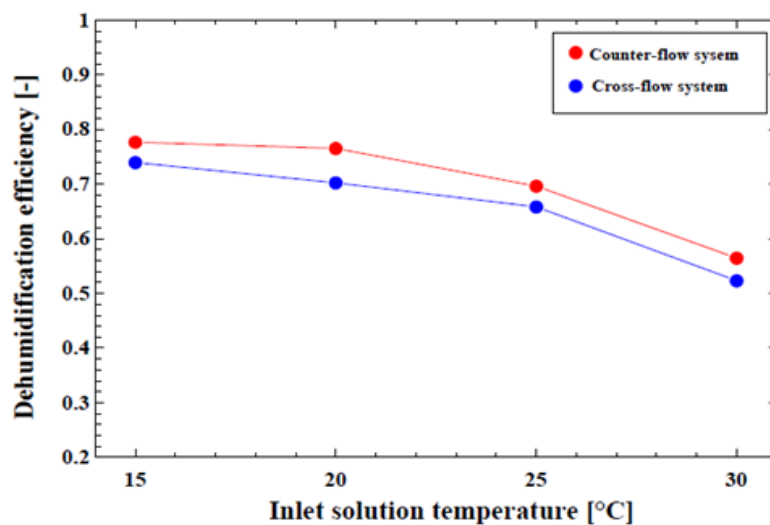
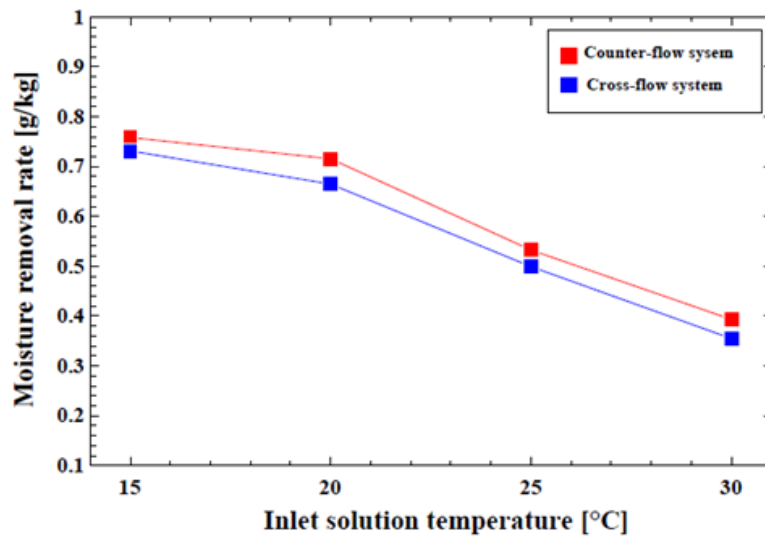


그림 72. 습공기선도상의 도입 공기 입·출구 측 공기 조건에 대한 실험 데이터

- 실험 결과에 따르면, 수용액의 온도가 15°C, 20°C, 25°C 및 30°C 일때의 대향류형 액체식 제습 시스템의 평균 제습 효율 및 습기 제거량 값은 각각 77.7%/7.6g/kg, 76.6%/7.2g/kg, 69.1%/5.3g/kg, 56.5%/3.9g/kg이며, 직교류형 액체식 제습 시스템의 경우 74.0%/7.3g/kg, 70.2%/6.6g/kg, 65.8%/5.0g/kg, 52.3%/3.5g/kg임을 알 수 있음 (그림 73).



(a) 대향류형 및 직교류형 액체식 제습 시스템의 제습 효율 비교



(b) 대향류형 및 직교류형 액체식 제습 시스템의 습기 제거량 비교

그림 73. 시스템 형태에 따른 액체식 제습시스템 제습효율 및 습기 제거량

표 26. 수용액 온도 변화에 따른 대향류형 및 직교류형 제습기의 평균 습기 제거량 및 제습 효율

수용액 온도 [°C]	대향류형 액체식 제습 시스템				직교류형 액체식 제습 시스템			
	습기 제거량 [g/kg]		제습 효율 [%]		습기 제거량 [g/kg]		제습 효율 [%]	
	범위	평균값	범위	평균값	범위	평균값	범위	평균값
15	0.75-0.81	0.76	77.4-78.2	77.7	0.71-0.77	0.73	73.6-74.4	74.0
20	0.68-0.76	0.72	74.3-77.3	76.6	0.62-0.72	0.67	68.7-71.7	70.2
25	0.52-0.54	0.53	68.4-70.4	69.6	0.48-0.51	0.50	63.6-65.5	65.8
30	0.37-0.42	0.39	54.6-58.4	56.5	0.32-0.40	0.36	49.6-55.0	52.3

- 결과적으로, 여름철 평균 외기 온·습도 조건 하에 수용액 온도 변화에 따라서 대향류형 및 직교류형 액체식 제습 시스템을 운전 하였을 때 제습 효율 범위는 각각 56.5-77.7%, 52.3-74%임을 확인하였으며, 이는 동일 조건 하에 시스템이 운전 될 경우 공기 및 수용액 접촉 방식이 제습 성능에 큰 영향을 주지 않는다는 점을 확인함.
- 따라서 본 시스템의 제습 성능 뿐 만 아니라 설치 및 유지관리 용이성을 고려하였을 때, 직교류형 액체식 제습 시스템이 패키지 유닛 시제품에 적용할 경우 더 유리한 것으로 판단됨.
- 추가적으로 패키지 유닛의 시제품 구성요소 중 하나인 직접식 증발냉각 시스템 운전에 따른 공기 중 미생물 농도변화를 모니터링하고 자외선 수 처리기 적용을 통한 직접식 증발냉각 시스템의 공기질 성능 향상여부를 분석함.
- 실험을 위한 시스템은 향온·향습 챔버, 직접식 증발냉각기, 순환펌프, 섀프, 자외선 반응기로 구성

되며, 그림 74와 같음.

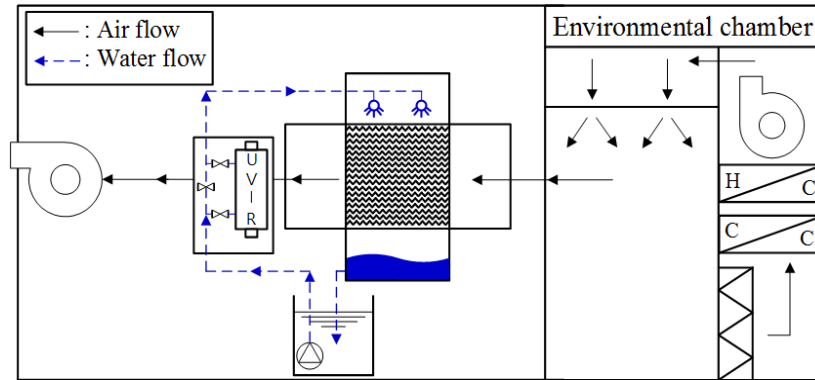


그림 74. 직접식 증발냉각기 실험 개요도

- 직접식 증발냉각기의 유입공기는 인공기후실험 챔버에서 프리필터에 의해 여과된 후 시스템에 공급됨. 공급공기의 온도 조건은 ASHRAE Standard 133-2008에서 제시된 직접식 증발냉각기 실험 권장 범위에 맞게 건구온도 30°C, 습구온도 20°C로 설정함.
- 증발냉각 패드(Celdek)는 셀룰로오스 재료의 주름진 구조를 나타내고 있음. 증발냉각 패드의 크기는 300mm x 400mm x 500mm이며 직접식 증발냉각 패드의 물 공급 방법은 분사각이 120°인 스프레이 4개로 분사됨. 순환수를 담은 섬프의 크기는 운전하는 하루 동안 물을 보충하지 않을 정도의 크기(40L)로 선정함.
- 적용된 자외선 반응기는 상업용 자외선 살균 시스템(Min-3)이며, 자외선 반응기 안에 있는 자외선 램프가 흐르는 물을 조사하여 소독하는 시스템임. Min-3은 운전 중 30,000 $\mu\text{Sec}/\text{cm}^2$ 를 초과하는 자외선을 공급함. 레지오넬라 뉴모필라 및 Bacillus subtilis 포자의 99% 비활성화를 위한 자외선 조사량은 각각 12,300, 22,000 $\mu\text{Sec}/\text{cm}^2$ 임을 감안할 때, 직접식 증발냉각기의 수처리 용으로 사용하기 충분하다고 판단됨.
- 실험을 위해 자외선 반응기의 배관은 두가지 방법으로 구성되었으며 밸브는 반응기를 지나가지 않고 바이패스하는 파이프로 구성되었음. 그림 75는 이 실험을 위해 설치된 자외선 반응기의 배관과 밸브의 그림과 사진을 나타냄.

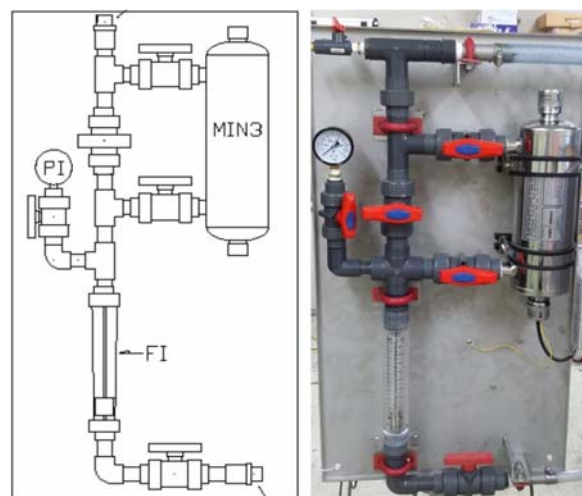


그림 75. 직접식 증발냉각기 실험 개요도

- 그림 76은 UV 반응기와 결합된 직접 증발냉각기와 배관 구성을 확인할 수 있음. 자외선 반응기의 세부사양은 표 27에 제시되어 있음.



그림 76. 직접식 증발냉각기에 연결된 자외선 반응기

표 27. 자외선 반응기 세부사양

MIN-3			
최대 유량	3 Gallon per minutes	아크 길이	225 mm
반응기 직경	191 mm	슬리브 재질	Quartz
반응기 길이	41.28 mm / 10.8 mm	슬리브 직경	15 mm
자외선 램프 모델	Atlantic UV 05-1366	전력 소비량	14 W
자외선 파장	253.7 nm	자외선 출력	3.7 W
램프 공칭 길이	287 mm	사용가능 시간	10,000 hrs

- 직접식 증발냉각기가 정상적으로 작동하는지 확인하기 위해 순환수의 온도와 흡입·토출 공기 온도를 측정했음. 그림 77은 직접식 증발냉각기 온도 및 습도 센서의 위치를 보여줌.

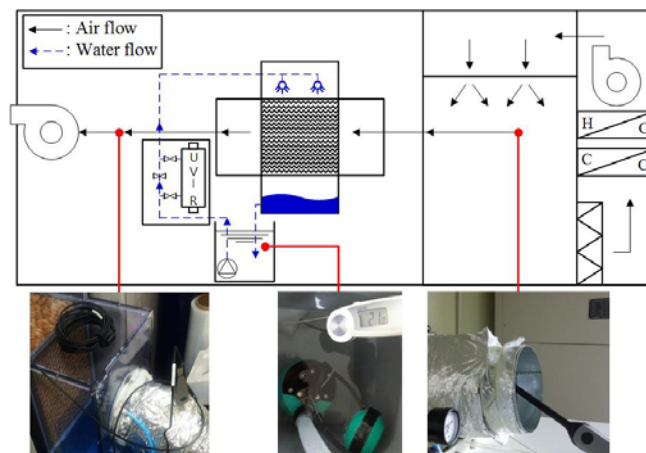


그림 77. 직접식 증발냉각기의 온도 및 습도 측정 위치

- 직접식 증발냉각기 운전은 ASHRAE Standard 90.1 (ASHRAE 90.1, 2013)에서 제시하는 거주자 일정에 따라 주중 09:00부터 18:00까지 운전됨. ASHRAE 가이드 라인에서 권장하는 바와 같이, 직접식 증발냉각기에 사용 된 물은 하루 운전이 종료된 후에 배수하고 다음날 새로운 물을 사용하였음. 직접식 증발냉각 패드의 미생물 성장을 줄이려면 직접식 증발냉각기가 운전하지 않는 동안 패드를 건조한 상태로 유지해야 하기 때문에 운전 종료 30분 후, 순환펌프를 끄고 30분 동안 팬만 켜서 패드를 건조시킴.
- 실험은 대조군(자외선 반응기를 사용하지 않은 실험, Case 1)과 실험군(자외선 반응기를 사용한 경우, Case 2)로 나누어 진행하였음. 표 28은 Case 1과 Case 2에서 직접식 증발냉각기의 구간별 미생물 샘플링 횟수와 운전기간을 나타냄.

표 28. 케이스별 직접식 증발냉각기의 미생물 샘플링 횟수

구분	운전기간	샘플링 횟수	샘플 종류별 채취 횟수
Case 1. 자외선 반응기 미사용	4 Weeks	2 Times / Week	물: 1 회
			표면: 4 회
			공기: 2 회
Case 2. 자외선 반응기 사용	4 Weeks	2 Times / Week	물: 2 회
			표면: 4 회
			공기: 2 회

- Case 1과 Case 2 둘 다 4주 동안 공기, 물 및 표면을 일주일에 두 번씩 샘플링을 실시하였으며. 샘플 종류에 따른 샘플링 위치를 그림 78에 나타냄.

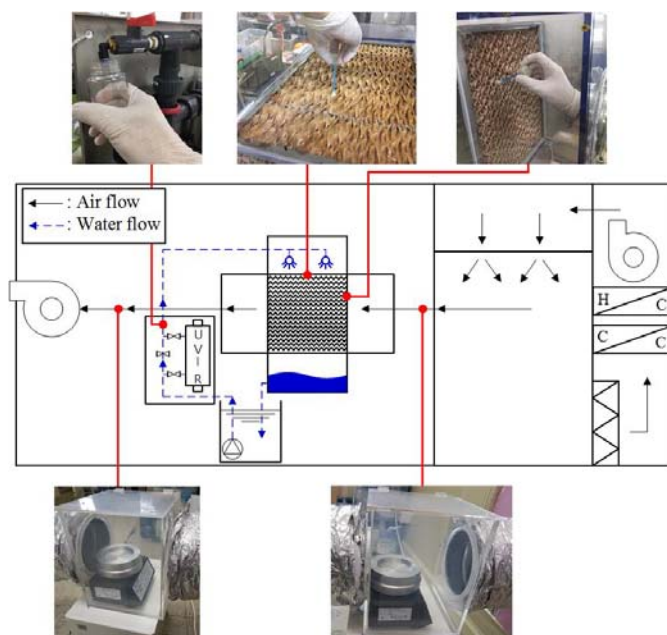


그림 78. 직접식 증발냉각기에서 물, 표면, 공기의 샘플링 위치 및 방법

- 실험을 하기 전, Case 1과 Case 2의 동일한 실험조건을 조성하기 위해 증발냉각 패드, 노즐,

그리고 파이프를 과산화수소수로 소독한 후 2일 뒤에 실험을 실시함.

- 순환수 샘플링의 경우 직접식 증발냉각기에서 순환하는 물을 채취하기 위해 샘플콕이 설치됨. 샘플콕에서 순환수를 채취할 때, 교차오염을 방지하기 위해 알코올 소독을 미리 실시하였음. 또한 순환수 채취시 샘플콕을 열고 1리터 정도 배수한 후에 무균채수병으로 채취를 실시함. Case 2에서 자외선 반응기로 처리된 물과 바이패스 된 물은 밸브제어에 의해 구분되어 채취됨.
- 표면 미생물 샘플링의 경우 표면 미생물을 수집하는 방법은 Rodac plate 방법, Tape lift 방법, Swab 방법 등 여러 방법 등이 있음. 하지만, Rodac plate 방법과 Tape lift 방법은 주름진 구조의 증발냉각패드에서 미생물을 샘플링하기에 적합하지 않기 때문에 이 실험에서는 주름진 구멍에 면봉을 삽입하여 패드 내부 미생물을 샘플링 하였음. 샘플링 위치는 증발냉각 패드 상부 2부분, 입구 측 1부분, 출구 측 1부분, 총 4개 부분임. 입구 측과 출구 측은 증발냉각 패드에서 바닥으로부터 35cm 높은 위치에서 측정됨.
- 공기 샘플링의 경우 직접식 증발냉각기에 흡입되는 공기가 직접식 증발냉각기를 통과 한 후, 미생물 오염이 진행 여부를 확인하기 위해 충돌식 에어 샘플러(즉, BUCK BioCulture Model B30120)가 사용됨. 에어 샘플러의 사양은 표 29에 요약되어 있음.

표 29. 에어샘플러 세부사양

기기	타입	특징	
Bio-contaminants sampler	충돌식 타입	흡입 유량	30 - 120 L/min
		측정 배지 크기	90 mm agar plate
		오차율	± 5% of set point
		홀 개수 (홀 크기)	380 (1 mm diameter)

- 샘플링을 하는 동안, 샘플링 되는 공기는 흡입공기 이외에 다른 공기에 의해 영향을 받으면 안 되기 때문에 실험에서는 아크릴 챔버가 직접식 증발냉각기의 입구측과 토출구측의 플렉시블 덕트 사이에 설치되었음. 에어 샘플링은 설치된 아크릴 챔버에서 측정되어 다른 공기의 영향을 받지 않도록 하였음.
- 아크릴 챔버의 크기는 20cm x 20cm x 25cm임. 샘플링을 하기 전에는 농도 70%의 알코올을 사용하여 샘플러와 아크릴 챔버를 소독을 실시하였으며. 1회 샘플 시 두 종류의 시간으로 2개씩, 총 4개의 한천배지가 사용됨. 공기 중 곰팡이와 세균을 각각 샘플링 함. 에어 샘플러의 운전 시간은 세균의 경우 1분과 2분이며, 곰팡이의 경우 1분, 2분 및 5분 동안 샘플링을 실시함.
- 채취된 샘플들(한천 배지, 순환수, Swab)은 배양기에 넣기 전 까지 25°C 이하로 보관해야 하기 때문에 배양기로 이동하는 동안 채취된 샘플들은 냉장용기에 보관하여 이동하였음. 표 30은 공기, 물 및 표면에서 세균과 곰팡이의 샘플링 및 배양을 보여줌.

표 30. 자외선 반응기 세부사항

미생물 구분	시료종류	샘플링 방법	배지 종류	배양온도	배양기간
Bacteria	물	Sterile sample bottle	AC Film	32°C	3 Days (72hr)
	표면	Swab method	AC Film		
	공기	Impactor air sampler	TSA		
Fungi	표면	Swab method	YM Film	25°C	5 Days (120hr)
	공기	Impactor air sampler	PDA		

- 직접식 증발냉각기는 Case 1과 Case 2에서 각각 4주 동안 표 31의 조건에서 운전하였음.

표 31. 직접식 증발냉각기 운전 세부사항

공조장치	직접식 증발냉각기	
운전시간	09:00 - 18:00	ASHRAE Standard 90.1
급기 유량	300 - 370 m ³ /h	ASHRAE Standard 133-2008
면풍속	0.75 - 0.88 m/s	
흡입공기 건구온도	28 - 32°C	
흡입공기 습구온도	19 - 22°C	
토출공기 건구온도	19 - 22°C	
단열냉각 효율	95 - 98%	
순환수 온도	21 - 26°C	
순환수 유량	5 - 6 L/min	

- 순환수의 세균오염을 확인하기 위해 총 3가지의 시료들로 구분함. 첫 번째 물 샘플은 Case 1의 경우 중 선프에서 수집되며, 두 번째 샘플은 Case 2의 경우 중 증발 냉각 패드를 통과하는 물을 나타냄. 세 번째 샘플은 Case 2의 경우 중 증발냉각 패드를 통과하기 전 물이며 첫 번째, 두 번째 및 세 번째 시료에서 순환되는 물의 세균 오염은 매우 상이함.
- 첫 번째와 두 번째 물은 오염이 매우 높아, 희석용액을 4배 희석한 후 배양되었음. 자외선 반응기를 통과한 직후 채취된 세 번째 시료의 경우 오염도가 상대적으로 낮아, 희석용액을 2배 희석한 후 배양함. 그림 79는 직접식 증발냉각기 운전 중 세 가지 유형의 시료에 대한 세균 오염도를 보여줌.

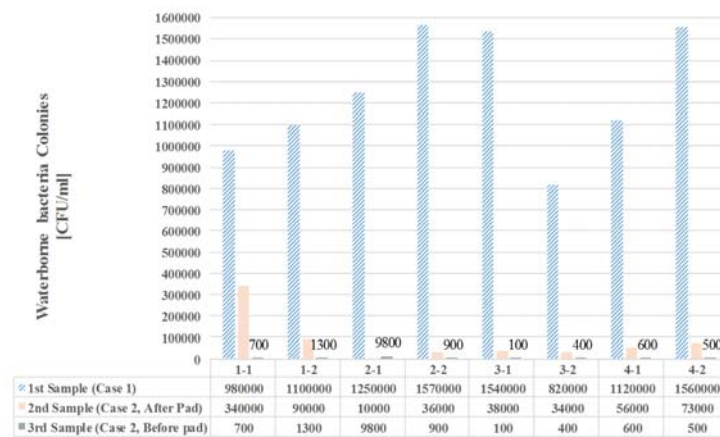


그림 79. Case 1과 Case 2에서 순환수의 세균 오염도

- 그림 79에서 볼 수 있듯이, 첫 번째 물 시료의 1ml 당 세균 군집수는 두 번째 시료의 경우보다 약 3-43 배 정도, 두 번째 시료는 세 번째 시료보다 1.1-480 배 가량 더 높았음.
- Case 1과 Case 2에서는 직접식 증발냉각기 운전 중 증발냉각 패드의 표면 미생물 오염이 확인되었음. 그림 80과 81은 증발냉각 패드의 4개 위치에서 4주 동안 샘플링을 실시한 세균 및 진균의 평균 군집수를 나타낸 그래프임.

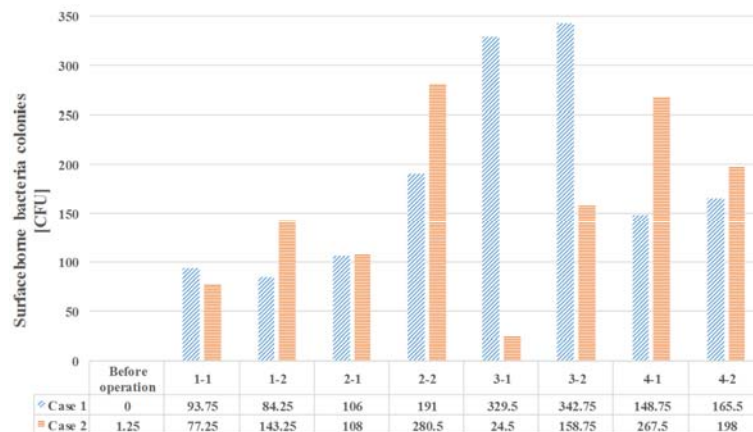


그림 80. Case 1과 Case 2에서 직접식 증발냉각기의 표면 세균 오염도

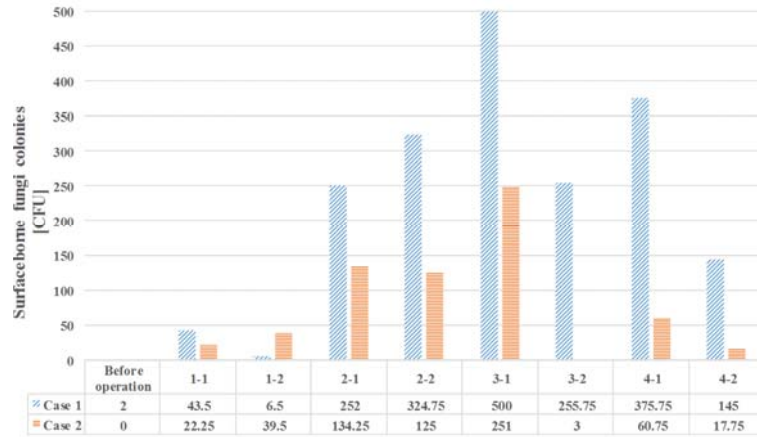


그림 81. Case 1과 Case 2에서 직접식 증발냉각기의 표면 진균 오염도

- Case 1과 Case 2의 표면 미생물 오염도를 바탕으로, 자외선 수처리와 표면미생물 간 상관관계를 t검정으로 검증함. 세균의 경우, Case 1의 평균 오염은 182.7이었고, Case 2의 평균오염은 157.2였음. Case 1은 Case 2보다 25.5 높았지만, 통계적으로 유의하지 않았다 (p 값=0.602). 그러나 진균의 경우 Case 1의 평균 오염은 237.9이었고 Case 2의 평균 오염은 81.7이었음. Case 1은 Case 2보다 156.2 높았으며 통계적으로 유의한 값을 나타냄 (p 값 = 0.033). 이는 수질 개선으로 인한 표면 미생물 오염 정도는 진균이 세균보다 더 민감하다는 것을 나타냄.
- 직접식 증발냉각기에서 자외선 반응기의 공기질 개선 효과를 확인하기 위해 직접식 증발냉각기의 입구 측과 출구 측에서 세균과 진균을 샘플링을 실시함. 이때 세균은 TSA배지를, 진균은 PDA배지를 사용하였음. 직접식 증발냉각기의 유입 공기와 토출 공기의 오염 정도를 비교하기 위해 4 개의 한천 배지에서 추출한 미생물 군집수를 식 2에 의해 단위 시간당 CFU로 환산하였음.

$$F = \frac{\sum N}{\sum T} \quad (\text{식 2})$$

- 직접식 증발냉각기는 자외선 반응기가 없는 Case 1에서 순환수의 세균 농도는 AC 필름을 통해 측정된 결과, 상대적으로 높은 농도(820000 - 1570000 CFU/ml)를 나타냈음. 자외선 반응기가 적용된 직접식 증발냉각기에서 순환수 소독 직후 물의 미생물 오염도는 상대적으로 낮은 오염 수준(100-700 CFU/ml)을 나타냈음.
- 하지만 소독된 순환수가 증발 냉각 패드를 통과 한 후 미생물 오염이 증가한 것으로 확인됨 (1000-340000 CFU/ml). 이것은 증발 냉각 패드 및 파이프에 축적 된 박테리아가 재순환 수의 오염을 증가 시킨다는 것을 의미함.
- Case 1과 Case 2 모두, 직접식 증발냉각기의 운전시간과 증발냉각패드 표면 미생물의 오염도 사이의 상관관계는 발견되지 않았지만, 진균은 세균과 비교하여 자외선 반응기에 더 민감하다는 것이 확인됨. Case 1과 Case 2에서 직접식 증발냉각 패드 표면의 세균 및 곰팡이 오염은 4개 위치 중 토출부 측면에서 더욱 심하게 나타났음. 토출측이 흡입측보다 온도가 더 낮음에도 불구하고

하고 미생물 오염이 심한 것을 통해 공급공기의 흐름이 증발냉각 패드에서 미생물을 유동시키는 것으로 예측됨.

- 직접식 증발냉각기의 토출공기의 미생물 오염도는 시스템 작동시간에 비례하여 증가하였으며, Case 1보다 Case 2에서 박테리아와 곰팡이가 현저히 감소하였음. 이를 통해 순환수의 오염 정도가 직접식 증발냉각기 토출공기의 공기질에 영향을 미치는 것이 확인할 수 있었음.
- Case 2에서, 자외선 수처리가 된 순환수가 직접식 증발냉각 패드를 통과 한 후에 세균 농도가 증가하였으며 이는 순환수가 증발냉각 패드 및 파이프 등의 표면 미생물에 의해 오염되었음을 나타냄.
- 증발냉각 패드 표면의 세균 및 곰팡이 오염 정도는 직접식 증발냉각기 작동 기간 또는 미생물 유형과 상관관계를 찾기가 어려웠지만 세균 및 곰팡이 오염은 모든 운전 기간에서 입구 측보다 항상 출구 측에서 더 크다는 것이 확인됨.
- Case 1과 Case 2의 미생물 측면 공기질을 비교하면 자외선 반응기로 수처리를 할 경우, 공기 중의 부유 세균과 곰팡이가 감소하는 것을 확인할 수 있었으며. 직접식 증발냉각기에서 미생물 측면으로 순환수를 개선하면 직접식 증발냉각기 토출공기의 공기질이 향상되었음. 따라서 직접식 증발냉각기에서 순환수의 오염은 토출공기에 영향을 미치며, 자외선 반응기는 직접식 증발냉각기의 지속적인 수질 및 공기질 개선에 효과가 있다는 것을 알 수 있음. 실험에서 PDA는 부유 미생물 중 진균을 측정하는데 사용되었지만 많은 세균이 검출되었음. 세균 간섭으로 인해 진균이 정확하게 측정되지 않았기 때문에 본 실험에서 부유 곰팡이의 오염도를 정확하게 측정하기 위해서는 세균이 배양되지 않는, 항생제가 첨가 된 PDA배지를 사용하면 보다 정확한 진균 오염도를 확인할 수 있을 것으로 판단됨.
- 인공기후실험 챔버 테스트를 통해 확인된 직접식 증발냉각기 적용을 통한 순환수의 수질과 토출공기의 공기질을 미생물 측면으로 개선 가능성과 한계점을 확인하였음. 향후 연구에서는 직접식 증발냉각기 토출공기의 공기질을 더 개선시키기 위해 덕트 내부에 적용된 UVGI 시스템을 고려해야 할 것으로 판단됨.

(3) 패키지 유닛 시제품의 실시설계 및 제작

- 패키지 유닛 시제품 실시설계에 적용 가능한 설계 프로그램을 개발하기 위해 차세대 제습증발냉각 전외기 공조시스템을 구성하는 구성요소별 시뮬레이션 모델을 통해 엑셀(Excel) 기반 시스템 설계 프로그램을 개발함.
- 그림 82와 같이 프로그램 첫 번째 탭에서는 프로그램에 대한 전반적인 내용 및 간단한 사용법을 명시하고 있음. 데이터 입력은 흰색 항목(표시된 부분)에서만 가능함. 사용자가 입력할 수 있는 공간과 사용자가 출력하는 공간이 따로 구분되어 있으며 표준적으로 제공하는 6개 지역 외에도 사용자가 직접 기후 데이터를 입력/관리 할 수 있음.
- ‘기후 및 부하’ 탭에서는 지역선택이 가능하며 이 탭에서 설정한 지역이 다른 모든 탭에도 영향을 주므로 지역변경 시에는 첫번째 ‘기후 및 부하’ 탭에서 변경해야 함. ‘시스템 데이터’ 탭에서는 시스템에 관한 설계 조건을 입력해야 함.
- ‘시스템 에너지’ 및 ‘공기상태 변화’ 탭은 출력 값 탭이므로 사용자가 임의로 변경할 수 없음. 또한 ‘결과출력’ 탭에서는 사용자가 원하는 결과요약을 PDF 파일로 출력 할 수 있음.

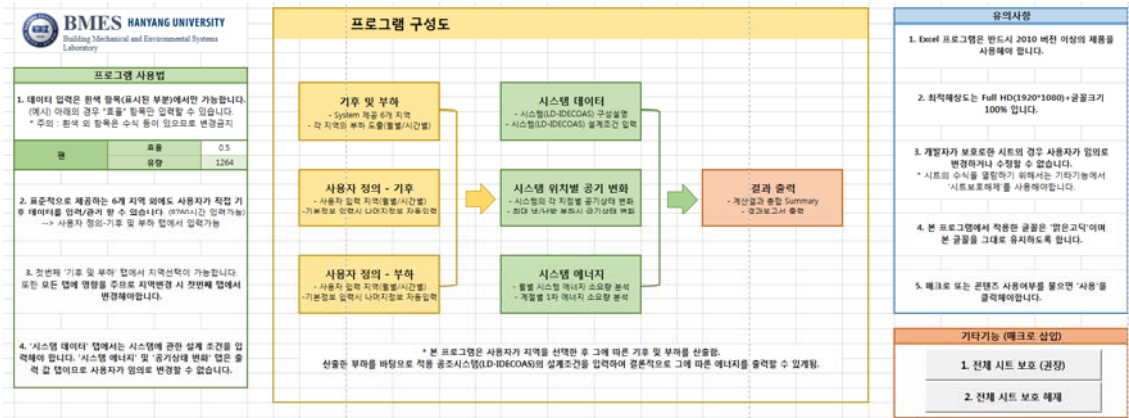


그림 82. 프로그램 전체적인 소개 배너

- 본 프로그램은 Excel 기반 프로그램으로 본 프로그램에서의 최적 해상도는 Full HD(1920*1080) + 글꼴크기 100% 임. 다음에서 설정한바와 같이 하여야 사용자가 프로그램을 사용하는 데 있어서 무리가 없음.
- 프로그램 내부 보호시트는 사용자가 임의로 변경하거나 수정할 수 없도록 설정 되어있지만 사용자가 불가피하게 시트의 수식을 열람하기 위해서는 '소개' 탭의 기타기능에서 '시트보호해제'를 클릭하여 시트보호를 해제한 뒤 열람할 수 있음.
- 또한 프로그램 사용 단계에서 매크로 또는 콘텐츠 사용여부를 묻으면 '사용'을 클릭해야함. 그렇지 않은 경우 프로그램에서 적용한 매크로의 기능이 제대로 작동하지 않게 되므로 '사용' 버튼을 클릭하여 프로그램을 원활하게 사용할 수 있도록 함.
- 본 프로그램은 사용자가 지역을 선택한 후 그에 따른 기후 및 건물 부하를 산출하는데 이용되며 산출한 부하를 바탕으로 적용 차세대 공조시스템의 설계조건을 입력하여 결론적으로 사용자는 그에 따른 에너지를 출력할 수 있게 됨.
- 초기 기후 및 부하를 선정해야 하며 프로그램 내부에서 6개 지역(서울, 인천, 강릉, 광주, 목포, 울산) 기후조건이 제공되고 각 지역별 기후데이터(외기온도, 상대습도, 절대습도, 이슬점, 풍속, 대기압, 일사량, 지중온도)가 월별/시간별로 표시가 되며 (그림 83), 프로그램에서 제공되지 않은 지역은 사용자 정의를 통해 사용자가 직접 기후를 입력할 수 있도록 설정함(그림 84).
- 사용자가 직접 입력해야하는 기후데이터는 8760시간의 외기온도, 상대습도, 절대습도, 이슬점 데이터를 입력해야함. 기본적으로 입력해야하는 4가지의 기후데이터를 입력하면 나머지 정보는 자동적으로 입력이 됨. 마찬가지로 부하도 사용자 정의에 의해 사용자가 직접 입력할 수 있음(그림 85).

1. 기후조건 선택		지역선택	서울	위도[°]	37.56	경도[°]	126.96	고도[m]	86
구 분	외기온도 [°C]	상대습도 [%]	절대습도	이슬점 [°C]	풍속 [m/s]	대기압 [kPa]	일사량 [kWh/m²]	지중온도 [°C]	
1월	-3.27	64.17	0.002	-9.3	2.49	101.3	298.64	15.48	
2월	-1.3	66.21	0.002	-7.14	2.69	101.3	298.64	14.73	
3월	4.5	64.34	0.003	-1.94	2.88	101.3	554.36	16.58	
4월	11.7	63.15	0.005	4.57	3	101.3	687.48	16.47	
5월	17.4	66.26	0.008	10.73	2.58	101.3	691.04	16.57	
6월	21.1	74.09	0.011	16.06	2.3	101.3	687.43	16.4	
7월	24.6	80.16	0.015	20.77	2.3	101.3	543.61	16.54	
8월	25.4	78.5	0.016	21.23	2.2	101.3	532.75	16.3	
9월	20.3	75.02	0.011	15.49	2.02	101.3	607.43	15.84	
10월	14.3	68.3	0.006	8.23	2	101.3	449.99	16.19	
11월	6.6	67.14	0.004	0.64	2.4	101.3	316.63	15.67	
12월	-0.3	66.57	0.002	-6.05	2.4	101.3	251.51	16.06	
평 균	13.11	69.49	0.007	6.1	2.43	101.3	504.65	16.06	

* 다음프로그램에서 제공되는 6개 지역(서울, 인천, 강릉, 광주, 목포, 울산)의 기상데이터는 TRNSYS 17의 TMY2 데이터를 바탕으로 작성됨. (설정 지중깊이: 30m)

그림 83. 기후조건 선택 및 지역에 따른 월별 기후데이터

1. 사용자 설정 시간별 기후정보(주간 세 곳에 대해 시간별 데이터 입력/관리)			
지역명	위도[°]	경도[°]	고도[m]
시간별 기후 데이터			
시간 [hr]	외기온도 [°C]	상대습도 [%]	이슬점 [°C]
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			
28			

그림 84. 사용자 설정 시간별 (8760시간) 기후데이터 입력란

1. 사용자 설정 시간별 부하정보(주간 세 곳에 대해 시간별 데이터 입력/관리)			
지역명	위도[°]	경도[°]	고도[m]
시간별 부하 데이터			
시간 [hr]	냉방부하 [kW/h]	난방부하 [kW/h]	전력부하 [kW/h]
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			
28			

그림 85. 사용자 설정 시간별 (8760시간) 부하데이터 입력란

- 또한 앞에서 설정한 것과 같이 월별로 나온 기후데이터를 사용자가 한눈에 알아보기 쉽게 그래

프화 시켜서 확인할 수 있으며(그림 86), 이는 사용자가 선택하는 기후데이터에 의해서 변할 수 있고 그래프를 통해 사용자가 선택한 지역의 연중 월평균 기후데이터가 어떻게 변화하는지 확인할 수 있도록 프로그램을 구성함.

1.1 지역별 기상정보

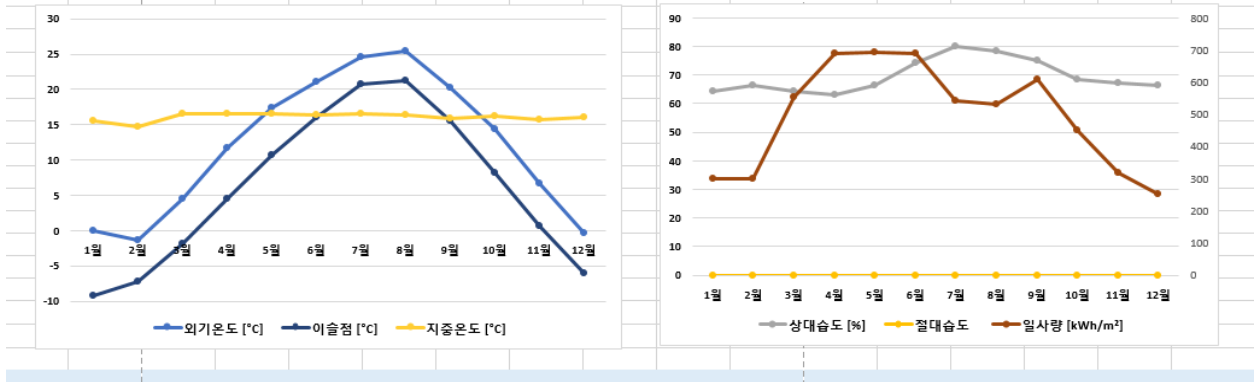


그림 86. 지역에 따른 월별 기후데이터 그래프

- 사용자가 앞에서 설정한 지역선택에 따라서 프로그램에서 기준으로 한 건물의 존(Zone)에 대한 부하량이 최종적으로 나오게 되며 (그림 87), 이때 실내 현열부하와 잠열부하로 나뉘어 확인할 수 있도록 구축함.
- 화면 왼쪽의 월별 존 부하량은 월평균을 계산하여 나타낸 것이며 오른쪽 시간별 존의 부하량은 8760시간 연간 데이터를 바탕으로 하였으며 모든 실내 현열부하 및 잠열부하는 Kw 단위로 나타내었음.

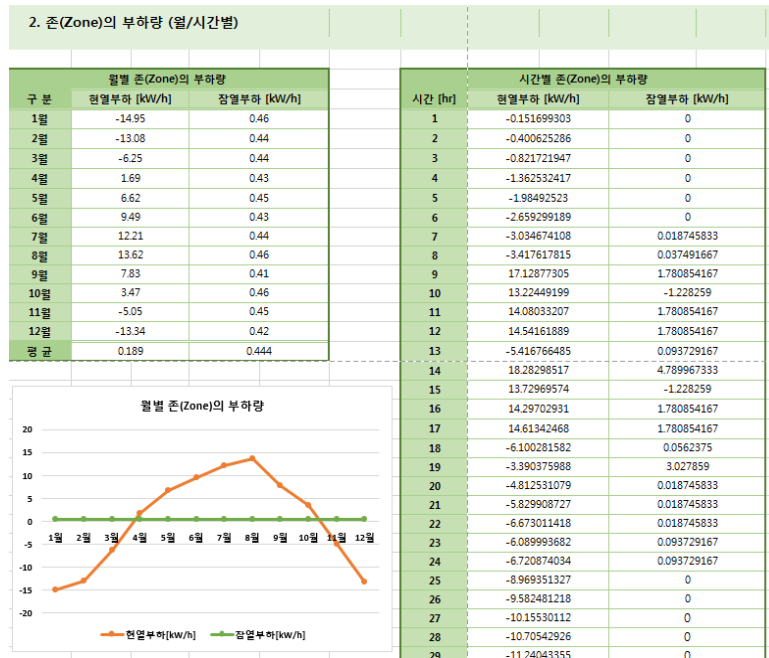


그림 87. 프로그램에서 설정한 존 (Zone)의 월/시간별 부하량

- 또한, 차세대 공조시스템 시제품 유닛의 각 구성요소에 대한 기본 정보 및 설계조건 입력해야

핵심 제습 증발 냉각기 전치기 공조시스템 (L.D-IDECOAS) 설계도면

구분	부호	설명
1	Regas	제습 증발 냉각기
2	Absorber	흡수기
3	Desiccant	제습 증발 냉각기
4	Regas	제습 증발 냉각기
5	Absorber	흡수기
6	Desiccant	제습 증발 냉각기

- 사용자가 선택한 지역에 따른 기후 및 부하를 산출함에 따라 차세대 공조시스템 패키지 유닛 시제품을 적용하기 전 차세대 공조시스템 패키지 유닛 시제품을 간단히 보여주는 그림과 함께 시스템 각 구성요소의 설명에 대해 간략하게 설명함.
- 또한 사용자가 입력해야하는 란은 색깔을 표시하지 않았으며 입력에 따른 결과 값을 보여주는 란은 색깔로 표시하여 사용자가 어느 부분을 입력해야하는지 구분을 하였으며, 사용자가 입력해야하는 부분인데 값을 입력하지 않을 경우에는 기본 설정값 (그림 89)으로 입력이 되어 계산되도록 함.

시스템 기본정보 및 설계조건			
기본 정보			
건물위치	서울	냉방온도[°C]	24
고도 [m]	86	난방온도[°C]	20
시스템 설계조건			
액체식 제습시스템 (LD)	액체식 제습시스템 (LD)	액체식 제습시스템 효율	0.7
		제습수용액 온도[°C]	25
		제습수용액 농도	0.4
간접식 및 직접식 증발냉각기 (IEC, DEC)	간접식 증발냉각기 (IEC)	간접식 증발냉각기 효율	0.7
	직접식 증발냉각기 (DEC)	직접식 증발냉각기 효율	0.95
열교환기	열교환기 (SHE)	열교환기 효율	0.7

- 그림 90은 프로그램에 적용된 차세대 공조시스템 패키지 유닛 시제품의 부수적 시스템의 설계조건으로 앞에 설정과는 다른 개념을 나타냄. 이는 시제품 유닛을 구성하는데 있어서 부수적인 시스템으로 팬, 펌프, 제습수용액 가열코일, 냉각코일로 이루어짐.
- 다음 표에서 사용자가 입력해야하는 부분은 흰색으로 표시된 부분이며 음영으로 칠해진 부분은 사용자가 임의로 변경할 수 없는 값으로 음영으로 표현된 부분은 사용자가 입력한 데이터에 의해서 출력력이 되는 값이므로 사용자가 시각적으로 참고하기 위한 값임을 명시함.

부수적 시스템 설계조건			
팬, 펌프	팬 (Fan)	Pressure drop [pa]	1200
		효율	0.5
		유량 [m³/h]	13472.8
	펌프 (Pump)	Head Length [m]	20
		효율	0.6
가열 및 냉각코일	제습수용액 가열 코일 (Solution Heating Coil)	유량 [kg/s]	4.49
		입구 수용액 온도 [°C]	55
		수용액 비열 [cal/g°C]	2.7
		출구 수용액 온도 [°C]	47.93
	냉각 코일 (Cooling Coil)	입구 수용액 온도 [°C]	25
		수용액 비열 [cal/g°C]	2.7
		유량 [kg/s]	3.74
		출구 수용액 온도 [°C]	38.82

그림 90. 차세대 공조시스템 패키지 유닛 시제품 부수적 시스템 구성요소 설계조건

- 시스템 별 조건을 입력하고 나면 시제품 내부 위치별 공기상태에 대한 계산이 진행되며, 이때 나타내는 각 지점별 공기 상태변화는 최대 냉/난방 부하 시의 급기상태변화를 도식화도로 구현하였음.
- 그림 91은 차세대 공조시스템 시제품 유닛의 각 지점별 공기변화를 나타낸 시트로 다음 탭은 제안된 공조시스템에 지나가는 공기의 상태를 보여주기 위한 용도로서 사용자가 입력해야 하는 부분은 없는 탭으로, 사용자의 열람을 목적으로 개발한 탭임.
- 대표적으로 나타낸 공기상태는 온도, 상대습도, 엔탈피, 습구온도 및 유량을 나타내며, 사용자가 앞에서 설정한 시스템의 설계조건들을 바탕으로 계산된 출력 값이고 최종적으로 건물에 공급되는 급기의 상태를 시스템 위치별로 볼 수 있음.
- 그림 91의 패키지 유닛의 구성도 밑에 나와 있는 표와 그래프는 최대 냉/난방 부하 시 외기와 급기의 상태를 보여주며 표에는 대상 공조시스템의 각 지점별 공기의 상태를 나타내고 있고 그래프는 외기와 급기의 상태를 사용자가 이해하기 쉽게 표현함.
- 이를 통해 사용자는 외기의 상태가 본 프로그램에서 제안하는 공조시스템을 통해 급기될 경우 어떠한 상태로 급기가 되는지에 대해 알 수 있으며 프로그램을 이용하여 시스템을 해석한 경우, 사용자가 참고하여야 하는 부분은 급기의 조건이며, 이를 통해 본 프로그램에서 시제품 유닛의 설계 단계에서 급기의 상태를 판단할 수 있음.

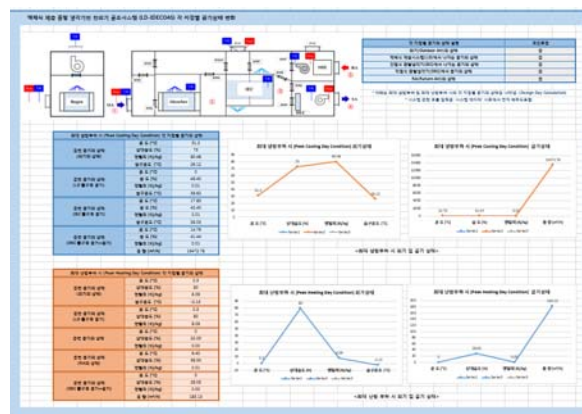


그림 91. 차세대 공조시스템 패키지 유닛 시제품 각 지점별 공기변화 시트

- 공기 위치별 상태가 계산 되면 최종적으로 시스템별 에너지 소비량과 차세대 공조시스템 시제품 유닛의 전체 에너지 소비량을 도출할 수 있음. 그림 92는 제안된 공조시스템의 에너지 소요량을 나타낸 시트로 이 시트에서는 사용자가 출력하고자하는 시스템 성능 변수는 월별, 계절별, 연간별, 시스템별로 에너지를 출력할 수 있음.
- 또한 사용자가 원하고자 하는 에너지 종류로 선택하여 결과를 볼 수 있음. 본 프로그램에서 결과로 출력할 수 있는 1차 에너지 종류는 가스, 전기, 지역난방으로 각 시스템별로 어떤 에너지를 적용할지에 대해서 결과 값을 도출해낼 수 있으며, 이를 통해 월별, 시스템별로 제안된 시스템 에너지를 소비량을 예측할 수 있음. 또한 이 결과 값들은 다음 탭에서 사용자가 출력 가능할 수 있도록 함.

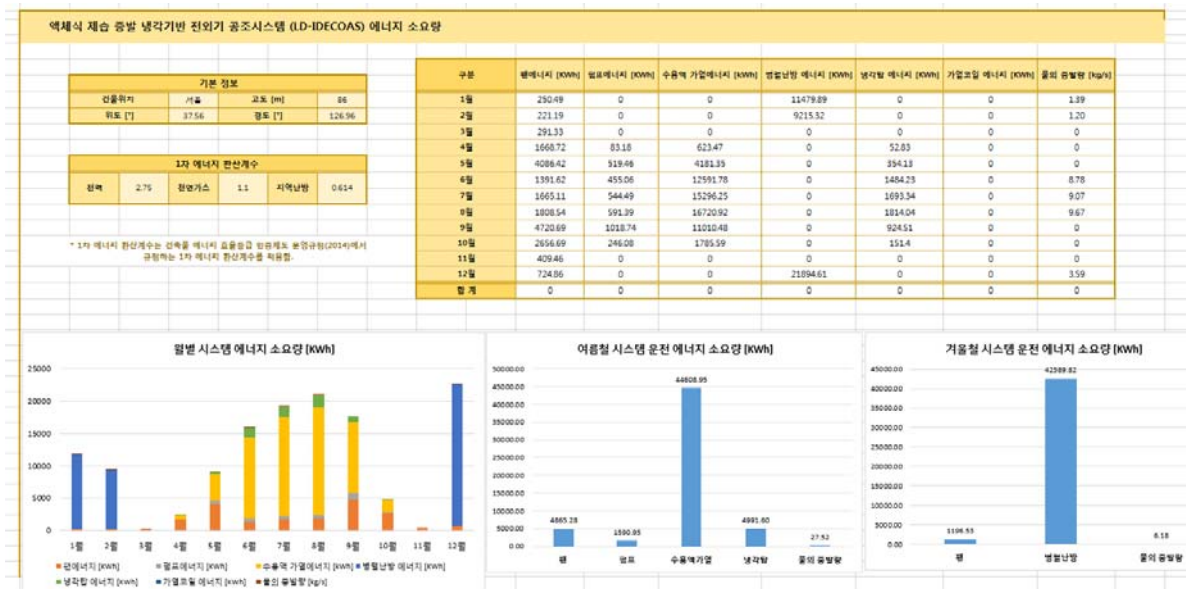
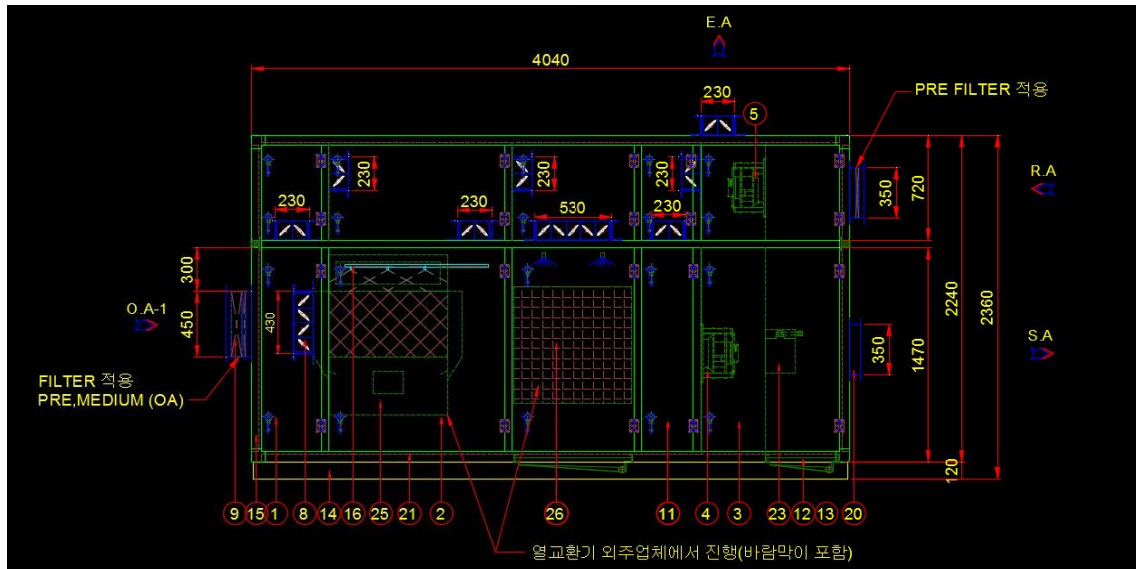


그림 92. 차세대 공조시스템 패키지 유닛 시제품 에너지 소요량 시트

- 최종적으로 프로그램 사용자가 필요로 하는 데이터를 요약적으로 확인 가능하도록 본 프로그램에 적용된 건물의 기본정보에 대해서 정리하였으며, 앞서 설정한 기후정보에 대해서도 도식화 함.
- 또한 시스템 에너지 계산 결과에 대해서도 간략하게 확인 가능하도록 설정 하였으며, 이 탭을 통해 사용자가 출력하고자 하는 결과를 PDF 문서화 하여 요약적으로 출력 할 수 있도록 하였음.
- 차세대 공조시스템 패키지 유닛 시제품 설계 프로그램 개발을 통해 설계 단계에서 시스템 성능 및 에너지 소비량이 분석 가능하며, 이를 통한 시스템 사이즈 및 기후별 최적 시스템 설계가 가능할 것으로 판단됨. 본 프로그램을 적용하여 실시 설계 단계에서 시스템 성능을 예측하였으며, 이를 최종 실시 설계에 반영하여 설계를 완료함.
- 주관연구기관의 차세대 공조시스템 패키지 유닛 시제품 기본 설계안에 따라서 각 시스템 특성 분석 및 운전 프로토콜 및 제어 전력을 구현하기 위해 최종적인 시제품 유닛 제작 설계안을 도출함. 액체식 제습시스템 선정 과정에서 연구 분석된 직교류 형태의 액체식 제습시스템을 적용함.
- 또한, 액체식 제습수용액의 누출 방지 및 비산 방지를 위한 대책으로 시스템 급기 입구측 및 출구측

에 구배 형성을 통해 중력에 따른 수용액 탱크로 순환되도록 설계 하였으며, 내부 제습부 및 재생부 높이에 따른 파일럿 유니트의 높이 및 공기유로 변화가 최종 설계안에 반영됨 (그림 93).

- 액체식 제습수용액 비산 방지를 위해 기존 액체식 제습시스템 유니트를 제작하는 Adavatix사의 액체식 제습시스템 유니트에서 제안된 비산 방지법을 적용하여 급기로의 수용액 비산을 방지함. 또한, Munters사의 Celdek 제품의 특성 자료에 의하여 시스템 내부 면풍속을 2m/s 이하로 유지할 경우 비산을 방지할 수 있음을 확인하여 제습시스템 내부 여재 단면적을 결정함.



급기측 실시 설계안



재생부측 실시 설계안

그림 93. 차세대 공조시스템 패키지 유닛 시제품 최종 실세 설계도

- 차세대 공조시스템 패키지 유닛 시제품 내부의 액체식 제습시스템 위치와 증발냉각 시스템 위치 구성에 따라서 액체식 제습시스템의 냉각과 가열을 위한 히트펌프 시스템은 재생부측 후단에 위치시켜 단순한 열교환 배관을 구성 하였으며, 이를 통한 최적의 열교환 모듈을 구축함 (그림 93).
- 간접식 증발냉각 내부 기화식 열교환기는 프로토타입 패키지 유닛에서 확인된 문제점을 개선하기

위해 금속재질의 열교환 모듈로 적용 되었으며 (그림 94), 집적식 증발냉각기 가습 여재는 Munter사 Celdek 제품을 적용하여 설계 시 고려된 직접식 가습효율 90%를 달성할 수 있도록 설계됨. 이를 최종 설계안 도출 과정에 적용함으로 최적의 시스템 성능을 발휘할 수 있도록 설계.

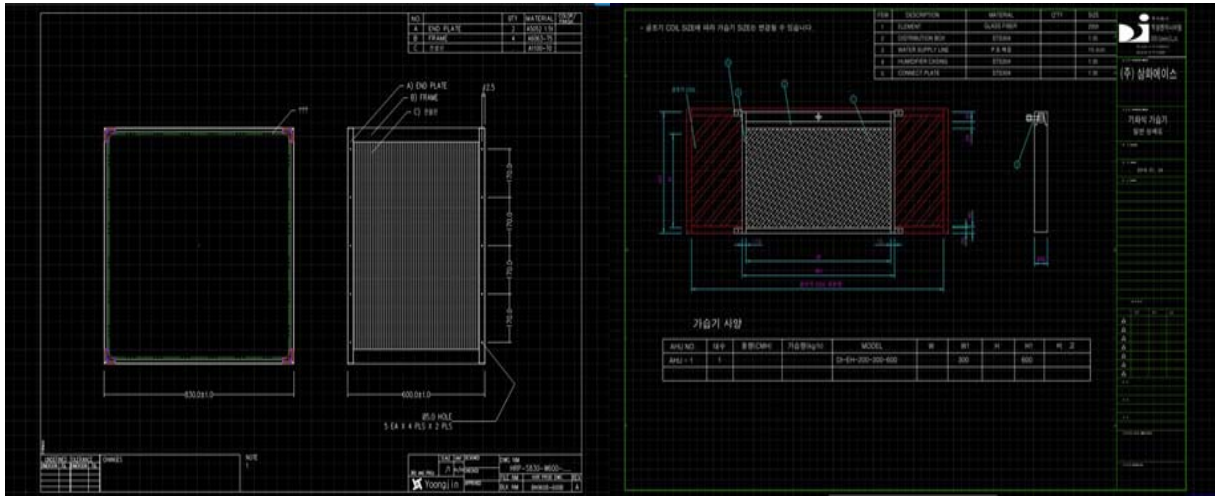


그림94. 패키지 유닛 시제품 간접식 증발냉각기 및 직접식 증발냉각기 최종 제작도

- 공동연구기관((주)삼화에이스)에서 수행한 패키지 유닛 시제품 실시 설계안에 따라서 시제품 유닛 제작 및 공동연구기관((주)삼화에이스)에 위치한 실험동에 시제품 설치를 완료함.
- 급기 풍량 1000m³/h를 설계풍량으로 설계 되었으며, 실내 부하에 맞게 최대 풍량 1500m³/h까지 조절 가능하도록 설계함. 또한 기본설계에서 제안된 시스템 개선안을 적용한 실제 시제품 유닛의 구축을 완료함 (그림 95.).



그림 95. 차세대 공조시스템 패키지 유닛 시제품 구축 완료

- 시제품에 적용된 액체식 제습시스템은 기본설계에서 제안된 방식을 적용 하였으며, 제습수용액의 급기 입구측 및 출구측 유출을 방지하기 위한 설비를 구축 하였으며, 수용액 탱크를 일체화 하여 시스템에 소요되는 펌프 개소 및 반송동력을 절감할 수 있도록 구축되었음 (그림 96).



그림 96. 패키지 유닛 시제품 액체식 제습시스템 제작 사진

- 액체식 제습시스템의 제습부 및 재생부는 동일한 형태로 구축 되었으며, 시스템 유지 관리를 위한 점검부 및 제습수용액의 순환을 확인할 수 있는 점검부가 설치되어 제습시스템 운전 상태를 실시간으로 확인 할 수 있도록 제작함.
- 액체식 제습시스템 케이싱은 강화 플라스틱을 적용하였으며, 열용접 방식을 이용해 제습수용액 누출 방지 및 누출에 따른 시스템 부식 방지를 적용하여 제작함.
- 간접식 증발냉각기는 금속재질의 열교환기로 교체 적용하였으며, 1차 측과 2차 측 공기 유로 분리 및 2차측 친수코팅을 통해 원활한 증발냉각이 구현될 수 있도록 제작 완료함. 2차 측 물 공급을 위해 0.5l/m 유량이 공급 가능한 미세 노즐을 설치하였으며, 솔레노이드 밸브를 적용하여 물 사용량을 조절할 수 있는 제어가 가능하도록 구축함 (그림 97).



그림 97. 패키지 유닛 시제품 간접식 증발냉각기 열교환기 및 솔레노이드 밸브 적용 사진

- 직접식 증발냉각기 또한 간접식 증발냉각기와 동일한 방식으로 솔레노이드 밸브 적용을 통한 물

공급량을 제어할 수 있도록 구축 하였으며, 설계 시 직접식 증발냉각 효율 90%를 달성하기 위하여 급기 유로 방향의 증발냉각기 길이를 증가 시켰으며, Munter사의 직접식 증발냉각 여재를 적용하여 구축을 완료함. (그림 98).

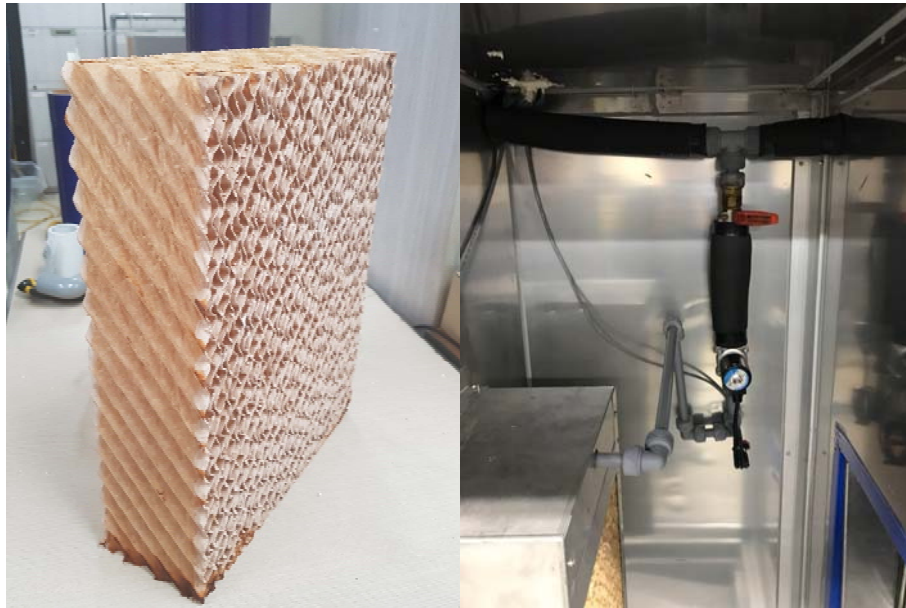


그림 98. 패키지 유닛 시제품 직접식 증발냉각기 가습여재 및 솔레노이드 밸브 적용 사진

- 또한 기본설계 단계에서 액체식 제습수용액 냉각 및 가열 열원을 공급하기 위한 히트펌프 적용을 위해 Liquid-to-liquid 형태의 5마력 용량의 히트펌프를 설계 및 제작하여 시스템에 설치 함.
- 수용액 탱크 일체화 작업 및 열교환 라인의 단순화 작업을 통해 시제품 유닛 안에 히트펌프를 Built-in 할 수 있었으며, 이를 통해 유닛 내부에 모든 열원 설비가 배치 되도록 시스템 제작을 완료함 (그림 99).



그림 99. Liquid-to-liquid 형태 히트펌프 및 히트펌프 적용 사진

(4) 공인인증시험기관을 통한 공인성능시험 수행

- 차세대 공조시스템 패키지 유닛 시제품 구축이 완료됨에 따라서 공인인증시험기관을 통한 공인성능시험을 수행하고 공인시험 성적서를 획득 예정임.
- 현재 외기 조건에 따라서 시스템 운전 상태는 운전모드 4인 겨울철 운전모드 (그림 100) 및 운전모드 3인 중간기 운전모드로 운전 될 예정이며, 시제품 운전 조건에 따라서 시스템이 운전 될 예정이며 이에 따른 겨울철 운전 시험 성적서를 획득할 예정임.
- 2차 연도 연구개발 기간 종료 이전 최종 시험성적서 획득.

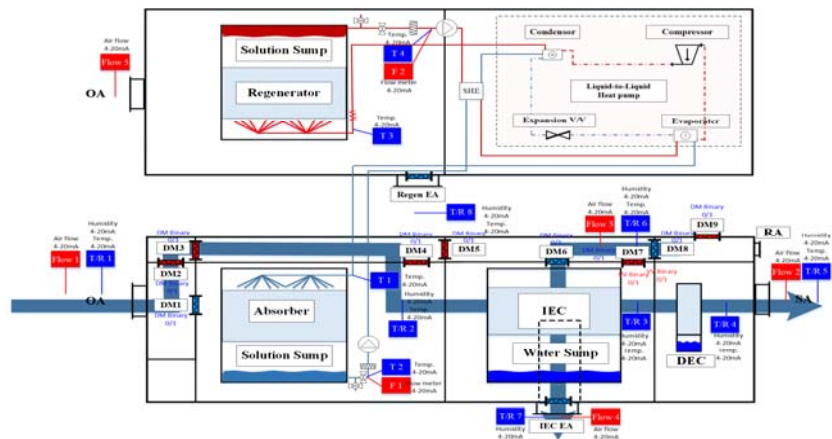


그림 100. 차세대 공조시스템 패키지 유닛 시제품 공인성능시험 운전모드 개요도

2.5 3차년도 연구 수행 내용

가. 당해 연도 연구개발 목표 및 결과

표 32. 3차년도 연구개발 목표 및 수행내용

구분(연도)	세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
3차년도 (2018)	테스트베드 적용을 통한 실용화 가능성 실증 및 기술이전 추진. (주관연구기관)	시제품 테스트베드 적용을 통한 장단기 운전성능 모니터링	시제품 운전을 통한 4계절 운전 성능 실증	<u>시제품 운전을 통한 운전 성능 실증 완료</u>
		상용화 가능성 실증 및 기술이전 추진	운전 성능 실증을 바탕으로 한 요소 기술 기술이전 추진	<u>공인성적시험 분석을 통한 상용화 가능성 실증 및 기술이전 완료</u>
	테스트베드 설치 및 모니터링 시스템 구현. (공동연구기관)	테스트베드 선정 및 시제품 설치	지중 공간 선정 및 시제품 유닛 테스트베드 구축	<u>지중 공간 테스트베드 구축 완료</u>
		자동제어 및 모니터링 시스템 설치	시제품 자동제어 및 모니터링 시스템 구현	<u>시제품 자동제어 및 모니터링 시스템 구축 완료</u>

나. 연구 범위 및 연구 수행 방법

표 33. 3차년도 세부 연구 수행 내용

연구 범위	연구 수행 방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
시제품 테스트베드 적용을 통한 장단기 운전성능 모니터링	시제품 운전을 통한 4계절 운전 성능 실증 (<u>이론 및 실험적 접근</u>)	- 2차년도 선행연구를 통해 도출된 시스템 설계안을 바탕으로 구축된 시제품 유닛의 실제 운전을 통한 시스템 성능 실증을 완료함. - 시스템 운전에 따른 운전 특성을 도출하고 추가적인 에너지 절감 방안 도출. - 제습수용액 공급온도 제어를 통한 제습 시스템 에너지 소비 절감을 통한 에너지 소비 절감 가능성 확인.
상용화 가능성 실증 및 기술이전 추진	운전 성능 실증을 바탕으로 한 기술이전 추진 (<u>이론 및 실험적 접근</u>)	- 테스트베드에 구축된 시제품유닛의 성능 실증을 바탕으로 공인시험성적 분석에 따른 상용화 가능성 분석 완료. - 해당 기술의 기술적 보호를 위한 특허 출원 및 등록 완료 및 해당 기술 국제 특허 해당국 진입 완료. - 연구 개발을 통해 제안된 본 시스템의 요소 기술 및 기술적 근거들을 바탕으로 한 기술이전 완료.
테스트베드 선정 및 시제품 설치	지중 공간 선정 및 시제품 유닛 테스트베드 구축 (<u>실험적 접근</u>)	- 지중 대상 공간 선정을 통한 테스트베드 구축 완료. - 2차년도 시제품 실시설계안을 바탕으로 지중 공간에 시제품 유닛을 제작 및 설치하여 상용화 단계의 시스템 구축 완료함 (급기 설계풍량 1000m³/h).
자동제어 및 모니터링 시스템 설치 수행	시제품 자동제어 및 모니터링 시스템 구현 (<u>실험적 접근</u>)	- 2차년도 선행연구를 통해 도출된 시스템 자동제어 방안 및 운전 프로토콜 구축 완료함. - 모니터링 시스템 구축을 통한 시스템 상태 확인 및 운전 성능 데이터 확보 완료.

다. 세부 연구 수행 내용

(1) 시제품 테스트베드 적용을 통한 장단기 운전성능 모니터링

- 차세대 공조시스템 패키지 유닛 시제품 장단기 운전을 통한 계절별 운전 특성 분석 및 시스템 성능 분석을 통한 실제 시스템 특성 파악. 제안된 시제품 유닛의 계절별 운전 모드에 따라 운전된 시스템 성능 데이터를 분석하고 각 계절별 운전 모드에 따른 시스템 성능 파악.
- 계절별 운전 모드에 따라서 운전되는 시스템 운전에 따라 실제 테스트 베드에서 시스템에 도입된 외기 조건에 따라 설정된 급기 조건을 달성 여부를 파악하고 이때 시스템 에너지 소비 및 운

전 특성을 분석함.

- 여름철 운전모드에서 제습시스템의 수용액 냉각 및 가열 열원 공급을 위해 설치된 히트펌프 시스템의 운전 특성을 파악하고 전체 시스템 에너지 소비량과 냉각량 측정을 통한 시스템 성적계수 (COP) 분석을 실시.
- 중간기 운전모드에서 간접식 및 직접식 증발냉각기 운전에 따른 시스템 냉각 성능을 평가하고 이때 시스템 운전에서 소비되는 에너지 소비량을 바탕으로 냉방 COP 분석을 통한 시스템 운전 성능을 파악함.
- 겨울철 시스템 운전 시 발생하는 냉방 요구에 따라 간접식 증발냉각기의 현열냉각기 운전을 통해 실내에서 배출되는 환기와의 배열회수 성능을 평가하고 이때 난방 COP 분석을 통한 시스템 성능을 분석함.

$$\text{제습효율} = \frac{\text{입구측 절대습도} - \text{출구측 절대습도}}{\text{입구측 절대습도} - \text{수용액 평형 절대습도}} \quad (\text{식 } 3)$$

$$\text{평형 절대습도} = 0.622 \times \frac{\text{수용액 분압}}{\text{대기압} - \text{수용액 분압}} \quad (\text{식 } 4)$$

- 여름철 액체식 제습시스템의 제습성능을 평가하기 위해 식 3과 4를 통해 운전 조건에서의 시스템 제습효율을 평가함. 시스템 운전 조건에서 액체식 제습시스템의 제습효율은 측정 이후 계측된 공기의 변화 및 수용액 조건에 따라 운전 시 시스템 성능을 평가함.

$$\epsilon_{IEC} = \frac{T_{\in} - T_{out}}{T_{\in} - T_{wb,sec}} \times 100 \quad (\text{식 } 5)$$

ϵ_{IEC} : 간접식 증발냉각기 증발냉각 효율 [%]

$T_{wb,sec}$: 2차측 공기 습구온도 [°C]

- 냉각시 간접식 증발냉각기의 간접식 증발냉각 효율은 식 5을 통해 평가함. 이때 간접식 증발냉각기의 간접식 증발냉각 효율은 간접식 증발냉각기 2차 측에 공급되는 공기의 습구온도와 1차측 도입된 공기의 온도차의 비율로 평가함.

$$\epsilon_{DEC} = \frac{T_{oa} - T_{sa}}{T_{oa} - T_{wb,oa}} \times 100 \quad (\text{식 } 6)$$

ϵ_{DEC} : 직접식 증발냉각기 증발냉각 효율 [%]

$T_{wb,oa}$: 외기 습구온도 [°C]

- 직접식 증발냉각기의 증발냉각 효율은 식 6을 통해 평가함. 이때 직접식 증발냉각기의 증발냉각 효율은 직접식 증발냉각기에 도입된 공기의 건구온도 및 습구온도 온도차의 비율과 급기의 건구온도 변화의 비율로 평가함.

$$C = \dot{m}_{oa} \times C_{p,oa} \times (T_{oa} - T_{sa}) \quad (\text{식 7})$$

C : 시스템 냉각 성능 [kW]

$\dot{m}_{oa}$: 급기 풍량 [kg/s]

$C_{p,oa}$: 비열 [kJ/kg℃]

T_{oa}, T_{sa} : 외기 건구온도, 급기 건구온도 [℃]

- 앞서 언급된 액체식 제습시스템 및 간접식, 직접식 증발냉각 운전에 따른 시스템 효율평가와 동시에 시스템 운전에 따른 전체 시스템 냉각성능 (냉각량)은 식 7을 통해 평가함. 각 운전 조건에 따른 시스템 운전 시 각 실험 데이터 별 시스템 냉각량을 산정 하였으며, 산정된 냉각량은 추가적인 시스템 냉방 COP 계산에 이용함.

$$COP = \frac{C}{E} = \frac{\dot{m}_{oa} \times C_{p,oa} \times (T_{oa} - T_{sa})}{\Sigma E_{Heat\ pump} + \Sigma E_{fan} + \Sigma E_{pump}} \quad (\text{식 8})$$

- 냉방시 냉방 COP는 시스템 운전에 따라 도출된 냉각량을 바탕으로 이때 소비된 시스템 전체 에너지 소비량의 합의 비율로 평가함. 시스템 냉방 COP는 시스템 운전 성능 지표로서 시스템 운전의 안정성과 성능평가의 변수로 적용함.

$$H = \dot{m}_{oa} \times C_{p,oa} \times (T_{oa} - T_{sa}) \quad (\text{식 9})$$

H : 시스템 냉각 성능 [kW]

$\dot{m}_{oa}$: 급기 풍량 [kg/s]

$C_{p,oa}$: 비열 [kJ/kg℃]

T_{oa}, T_{sa} : 외기 건구온도, 급기 건구온도 [℃]

- 난방 운전시 시스템 운전모드 4에 따라서 시스템이 운전될 경우 배열회수를 통한 시스템 난방 성능은 운전 시 급기 온도변화에 따른 난방량을 도출함. 이때 도출된 난방량에 따라서 난방 운전

시 COP를 평가함으로써 시스템 운전 성능을 분석하였으며, 동시에 배열회수 효율을 평가함을 통해 간접식 증발냉각기의 겨울철 현열교환기 운전 시 시스템 성능을 평가함.

$$\epsilon_{Temp.} = \frac{T_{sa} - T_{oa}}{T_{ra} - T_{oa}} \times 100 \quad (\text{식 } 10)$$

$\epsilon_{Temp.}$: 시스템 겨울철 열교환 효율 [%]

T_{ra} : 실내 환기 건구온도 [°C]

$$COP_{heating} = \frac{H}{E} = \frac{\dot{m}_{oa} \times C_{p,oa} \times (T_{oa} - T_{sa})}{\Sigma E_{fan}} \quad (\text{식 } 11)$$

- 시스템 난방 COP는 배열회수를 통한 급기의 난방량과 그때 소비된 팬에너지 소비량을 바탕으로 평가하였으며, 실제 겨울철 운전 시 시제품 유닛의 운전성능을 평가하는 지표로 겨울철 운전 성능 변수로 고려함.
- 다음 표 34는 시제품 유닛의 계절별 외기 변화에 따른 운전모드 작동 시 유의미한 운전데이터를 확보한 값들의 평균을 나타냄. 여름철, 중간기, 그리고 겨울철 외기 조건에 따른 시스템 운전 결과에 따른 성능 데이터를 확보 하였으며 각가의 외기 범위와 이때 시스템 운전 시의 급기 풍량을 나타내고 있음.

표 34. 시제품 유닛 운전데이터 평균

비 고	운전시간 [분]	Outdoor air		Air flow	
		Temperature [°C]	Humidity ratio [g/kg]	SA flow [m³/h]	RA flow [g/kg]
여름철	1445	29.69	18.48	558.8	549.7
중간기 I	152	24.50	8.43	503.3	501.6
중간기 II	540	22.12	4.98	496.7	-
겨울철	541	10.69	2.85	302.4	317.1

- 여름철 시제품 유닛의 냉방 성능을 평가하기 위해 테스트 베드에 구축된 시제품 유닛의 여름철 외기 조건에서의 운전 성능을 평가함. 이때 시스템에 도입된 외기의 온도 및 습도, 액체식 제습 시스템에 공급되는 수용액의 온도 및 농도, 공기와 수용액의 질량유량을 계측 하였으며, 위 운전 조건들을 바탕으로 시스템 구성 요소들에 대한 평가 및 급기성능, 냉각량 및 COP분석을 실시함.

- 일반적인 외기 상태의 운전조건에서 실제 제습수용액의 물리적 특성을 변화시키는 실험 조건과 공기와 수용액의 질량유량비를 변화시키는 운전 조건을 설정하여 시스템 운전 변수 변화에 따른 시스템 성능 변화를 평가함. 다음의 표 35는 설정된 실험 조건에 따른 시스템 운전 변수 변화를 나타냄.

표 35. 여름철 성능 평가 실험 변수 설정 값

비고	측정 번호	운전시간 [분]	Outdoor air		Desiccant solution		Air flow	Solution flow
			온도 [°C]	절대습도 [g/kg]	온도 [°C]	농도 [-]	[kg/s]	[kg/s]
수용액 온도 변화	1	120	30.34	18.41	15.75	0.38	0.25	0.24
	2	122	30.50	18.30	18.11	0.38	0.25	0.24
	3	120	30.54	17.00	20.17	0.38	0.25	0.24
	4	108	29.68	17.03	22.12	0.382	0.25	0.24
	5	118	29.54	17.70	24.11	0.381	0.25	0.24
	6	120	29.75	17.64	26.12	0.381	0.25	0.24
공기 및 수용액 질량 유량 비	7	122	29.09	19.74	18.16	0.38	0.30	0.15
	8	120	28.48	18.78	18.21	0.381	0.15	0.15
	9	120	29.20	18.73	18.16	0.38	0.10	0.15
	10	120	29.85	18.42	18.19	0.381	0.07	0.15
	11	120	30.01	18.30	18.17	0.38	0.06	0.15
	12	120	29.14	18.80	18.21	0.38	0.05	0.15

- 표 35에 따라 설정된 운전 조건에 따라서 냉방기 시스템 성능을 평가함. 이때 시스템 성능 평가는 시스템 운전 케이스에 따른 시스템 급기성능 즉, 목표 급기온도인 15℃를 달성할 수 있는지 여부를 평가하고 각 시스템 구성요소를 통과한 급기의 온습도 평가를 통해 시스템 운전 조건에 따른 시스템 성능 변화를 모니터링 함.
- 또한, 시스템 냉각량을 식 7을 통해 분석하고 각 실험 케이스 별 시스템 구성 요소들의 전기에너지 소비를 분석하고 시제품 유닛의 에너지 소비 특성을 파악함. 최종적으로 시스템 냉각량과 전

체 에너지 소비량을 바탕으로 한 시스템 COP 분석을 통해 시제품 유닛의 여름철 운전 시 냉각 성능을 평가함.

- 그림 101과 102는 각 실험에 따른 급기 성능을 습공기 선도에 도식하고 있음. 액체식 제습수용액의 급기 온도를 일정범위 (16~26℃)로 조절한 실험과 시스템에 도입된 공기 질량유량과 액체식 제습시스템의 제습수용액 공급 질량 유량 비 (액기비)를 조절한 실험에 따른 시스템 급기 변화를 나타내고 있음.
- 측정 결과에 따르면 액체식 제습수용액의 공급온도를 변화한 케이스에서 일정한 급기 온도 변화를 확인함. 제습 수용액 온도 변화에 따라 급기 온도는 약 17.1~19.9℃에서 일정하게 변하는 것을 확인하였으며, 시스템 액기비를 일정 수준 (0.5~3)으로 증가시키고 동시에 제습수용액의 공급 온도를 18℃로 일정하게 유지시킨 결과에서는 급기 온도가 18.5~18.8℃로 일정 조건으로 수렴하는 것을 확인함.
- 이런 결과를 통해 시제품 유닛의 급기 성능은 제습수용액의 공급 온도에 따라 일정 수준의 변화를 나타내는 것을 확인하였으며, 이러한 현상은 선행 연구에서 분석된 결과와 같이 제습수용액 공급 온도 변화가 제습성능 변화에 가장 큰 영향이 있음을 나타내는 것에 기인한 것으로 판단됨 (Ge et al. 2011, Jain et al. 2011).

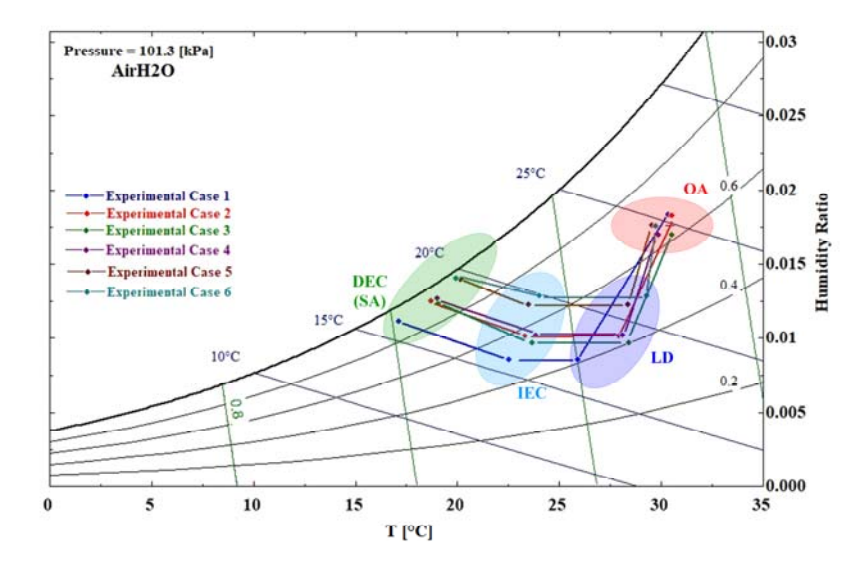


그림 101. 차세대 공조시스템 시제품 제습수용액 온도 변화에 따른 급기성능

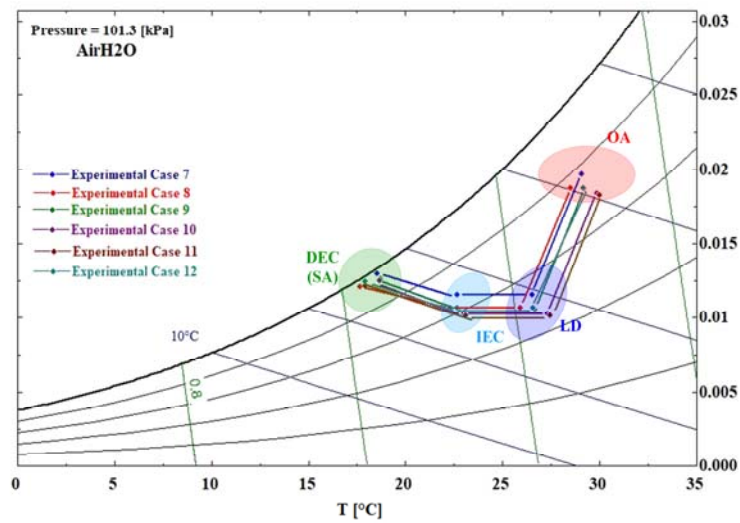


그림 102. 차세대 공조시스템 시제품 시스템 액기비 변화에 따른 급기성능

- 냉방기 실험 조건에 따른 시제품 유닛의 각 시스템 구성요소 (액체식 제습시스템, 간접식 및 직접식 증발냉각기)를 통과하는 급기의 온도 및 습도 조건을 살펴보면 다음 그림 103과 104와 같음. 공기 온도변화 및 습도변화를 살펴보면 제습수용액 공급 온도를 조절한 실험 케이스에서 제습부를 통과한 공기의 온도 및 습도변화가 수용액 온도에 따라 변화되는 것을 확인 할 수 있으며, 급기 온도 또한 제습성능 변화에 따라 일정 수준 변화하는 것을 확인함.
- 반면, 액기비 조절을 한 실험 케이스에서는 급기 온도 및 습도 변화가 일정 수준을 유지하는 것으로 확인되어 시제품 유닛의 급기 성능에 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단됨.

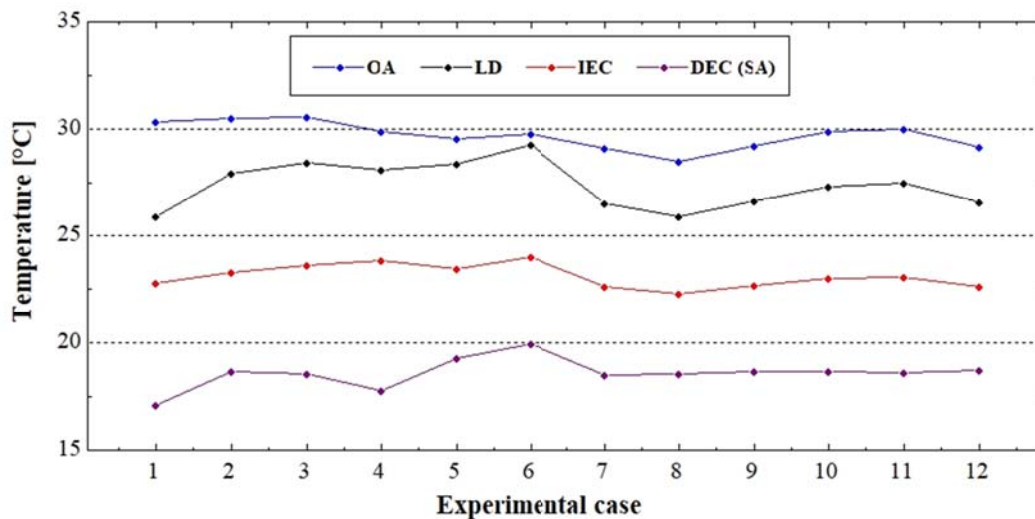


그림 103. 차세대 공조시스템 시제품 시스템 구성요소 별 공기 토출 온도변화

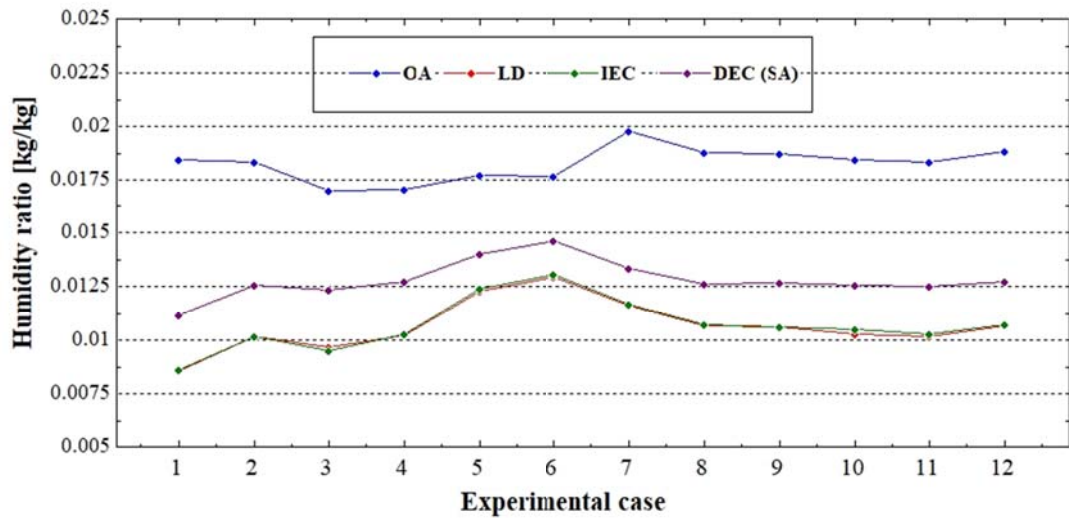


그림 104. 차세대 공조시스템 시제품 시스템 구성요소 별 공기 토출 절대습도변화

- 시제품 유닛의 여름철 운전에 따른 급기성능 분석에서 도출된 급기 온도변화에 따라 각 실험 케이스 별 시스템 냉각량을 분석함. 시스템 냉각량 분석은 식 7을 이용해 계산하였으며, 시제품 유닛의 여름철 운전에 따른 실험 케이스별 급기 풍량 및 급기 온도변화를 통해 계산하였음.

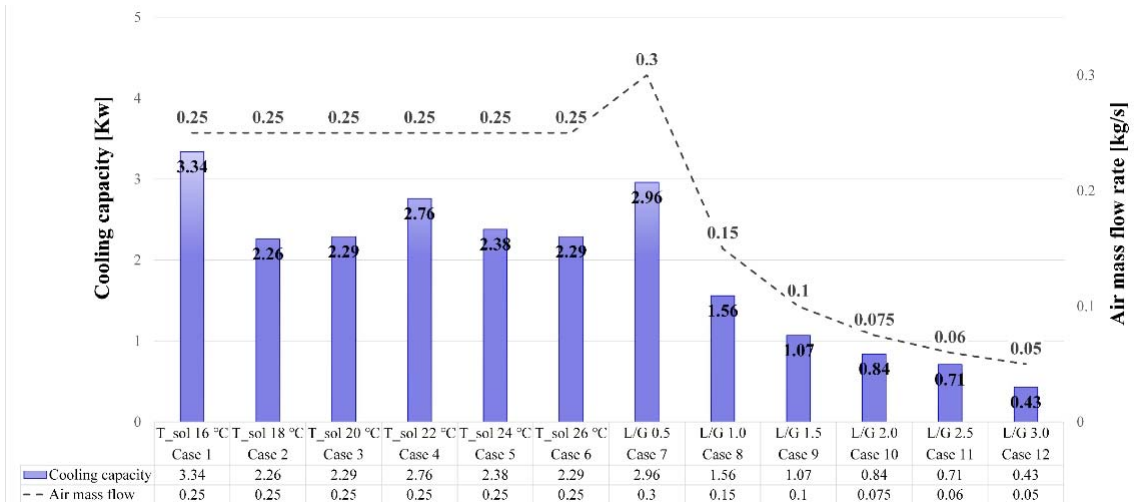


그림 105. 차세대 공조시스템 시제품 실험 케이스 별 시스템 냉각량 분석

- 그림 105와 같이 시스템 냉각량은 시스템에 도입된 급기 풍량의 영향을 받는 것으로 확인. 또한, 제습수용액 공급 온도 변화에 따른 시스템 급기성능 변화의 경우 전체 냉각량에 큰 영향을 주지 않는 것으로 확인되었으나, 액기비 조절을 통한 실험 케이스에서는 급기 풍량 변화에 따른 시스템 냉각량 변화가 크게 나타나는 것을 확인함.
- 본 시제품 유닛은 여름철 운전에 따라서 최대 3.34kW의 냉각량을 발휘하는 것을 확인 하였으며, 제습수용액 온도 변화에 따라 시스템 급기 성능 향상 및 일정 수준 이상의 급기성능 확보를 통해 액기비 조절한 실험 케이스 대비 높은 시스템 냉각량을 확보할 수 있는 것으로 판단됨.

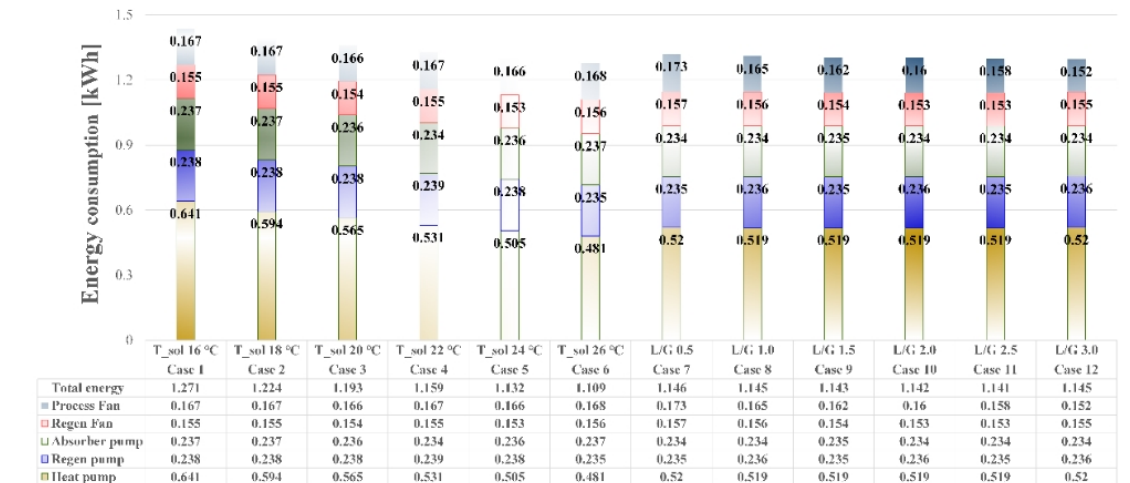


그림 106. 차세대 공조시스템 시제품 실험 케이스 별 시스템 구성 요소별 에너지 소비량

- 시제품 유닛의 여름철 운전에 따른 각 시스템 구성요소별 에너지 소비량은 그림 106과 같음. 시제품 유닛의 여름철 운전 특성 분석을 위해 설정된 실험 조건에 따른 시스템 성능 파악 및 각 조건에서의 운전에 따른 에너지 소비량을 분석한 결과 제습수용액 공급 온도를 조절하기 위한 히트펌프 시스템에서 소비되는 에너지가 가장 높게 나타나는 것을 확인.
- 실험 케이스별 에너지 소비량을 분석해 보면, 액체식 제습수용액 공급온도를 조절하는 케이스에서는 제습수용액 공급 온도가 낮을수록 히트펌프에서 소비되는 에너지가 높게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 반대로 공급 온도가 높을 경우 히트펌프 에너지 소비량이 일정수준 감소하는 것을 확인.
- 이와 동시에 액기비 조절에 따른 시스템 에너지 소비량은 수용액 공급온도를 일정하게 유지한 결과 히트펌프에서 소비되는 에너지 소비량을 일정하게 유지하는 것을 확인할 수 있으며, 급기 풍량 변화를 위해 조절된 팬 에너지는 급기 풍량 감소에 따라서 동일하게 감소하는 것을 확인할 수 있으나 전체 에너지소비량에서 차지하는 부분이 작은 것으로 전체 시스템 에너지 소비에는 큰 영향을 주지 않는 것을 확인함.
- 시제품 유닛의 여름철 운전에 따른 에너지소비 특성은 액체식 제습시스템 운전을 위해 소비되는 에너지 소비량이 전체 에너지 소비량에 약 85%이상을 차지하는 것으로 나타나 액체식 제습시스템 운전에서 소비되는 에너지 소비량을 절감하는 것이 필수적으로 판단됨.
- 또한 액체식 제습시스템의 운전에서 소비되는 에너지 소비 중 히트펌프가 차지하는 에너지 소비 비율이 전체 시스템 에너지 소비 비율에 40%를 차지하는 것을 확인. 이는 제습 수용액 공급온도 변화에 따라 일정한 증감을 나타내는 것을 확인하여 제습수용액 조절에 따른 시스템 제습성능 제어를 성공적으로 이끌어 낼 경우 시제품 유닛의 추가적인 에너지 소비 절감이 가능할 것으로 판단됨.

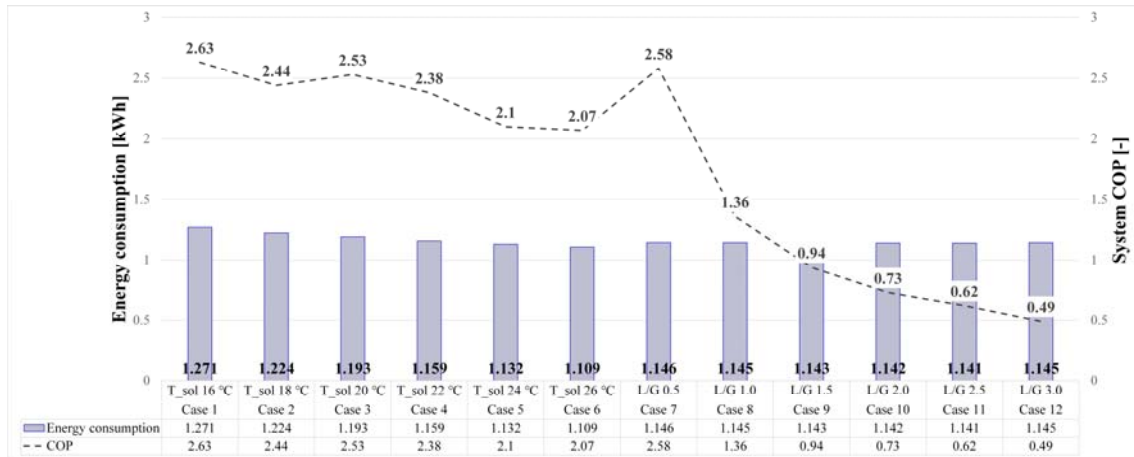


그림 107. 차세대 공조시스템 시제품 실험 케이스 별 에너지 소비 및 시스템 COP분석

- 앞서 분석된 시제품 유닛의 여름철 냉각성능 및 에너지소비량을 바탕으로 시스템 COP 분석 결과는 그림 107과 같음. 각 실험 케이스에 따르면 시스템 냉방 COP는 시스템의 냉각량에 큰 영향을 받는 것으로 확인.
- 즉, 액기비를 조절한 실험 결과에서 급기 풍량 감소에 따른 냉각량 감소가 전체 시스템 냉방 COP에 영향을 주는 것을 확인. 이는 시스템 냉각량을 일정 수준으로 유지해야 하며 동시에 효율적인 시스템 운전을 필수적으로 하는 시제품 유닛의 운전 목적에 따라 적절한 운전 방법이 아닌 것으로 판단됨.
- 반면에 액체식 제습수용액의 공급온도를 변화시킨 실험 케이스에서는 급기성능의 일정수준 변화는 나타나는 반면 시스템 급기 풍량이 일정수준 이상을 유지함에 따라서 전체적인 시스템 냉각량 변화는 낮게 나타남.
- 이러한 원인에 따라 전체 시스템 냉방 COP는 액체식 제습수용액의 공급온도를 변화시킨 케이스에서 2.07~2.63 수준의 시스템 냉방 COP를 나타내는 것을 확인함. 본 시제품 유닛의 시스템 냉방 COP는 기존 선행연구에서 제안된 액체식 제습 기반 전외기 공조시스템 기초연구 단계에서 제안된 TRL 1~4단계의 시스템 냉방 COP (0.3~0.6) 대비 높은 수준의 시스템 성능을 나타내는 것을 확인함.
- 중간기 외기 조건에서의 시제품 유닛의 성능을 분석하기 위해 앞서 제안된 중간기 운전모드 I 과 II 조건에서의 시스템 성능을 파악함. 표 34에 언급된 실제 유의미한 운전 데이터를 모니터링 하여 적정 외기 조건에서의 시스템 특성 파악을 수행하였으며, 각 운전 모드에서의 시제품 유닛의 급기성능, 시스템 효율, 및 냉방 COP 분석을 실시함.
- 그림 108은 중간기 시제품 중간기 운전모드 I 조건에서 시제품 운전에 따른 시스템 급기 성능을 나타냄. 중간기 운전모드 I 에서 시제품 유닛은 시스템에 도입된 외기를 냉각하기 위해 액체식 제습시스템을 바이패스하고 간접식 및 직접식 증발냉각기 운전을 통해 설정된 냉방 시 급기 온도 (15℃)를 달성할 수 있도록 운전됨.
- 중간기 운전모드 I 운전에 따라서 시스템에 도입된 외기는 건구온도 기준으로 약 7.4~9.9℃의 온도 변화를 나타내며 이때 간접식 증발냉각기의 2차 측으로 공급되는 실내 배기의 건구온도 및

습구온도는 각각 19.8℃와 12.2℃를 유지함.

- 운전모드 I 에서 식 7에 따라 계산된 시스템 냉각량은 1.28~1.77kW를 나타내며, 이때 시스템 냉방 COP는 5.5~7.67로 매우 높은 냉방 성능을 나타내는 것을 확인함 (그림 109). 또한, 시스템 운전 시 간접식 증발냉각기의 증발냉각 효율은 64~74% (식 5)로 선행연구를 통해 개선된 간접식 증발냉각기의 성능이 개선안을 통해 충분한 증발냉각 성능을 확보할 수 있는 적절한 시스템 설계 및 구축이 완료된 것으로 판단됨.

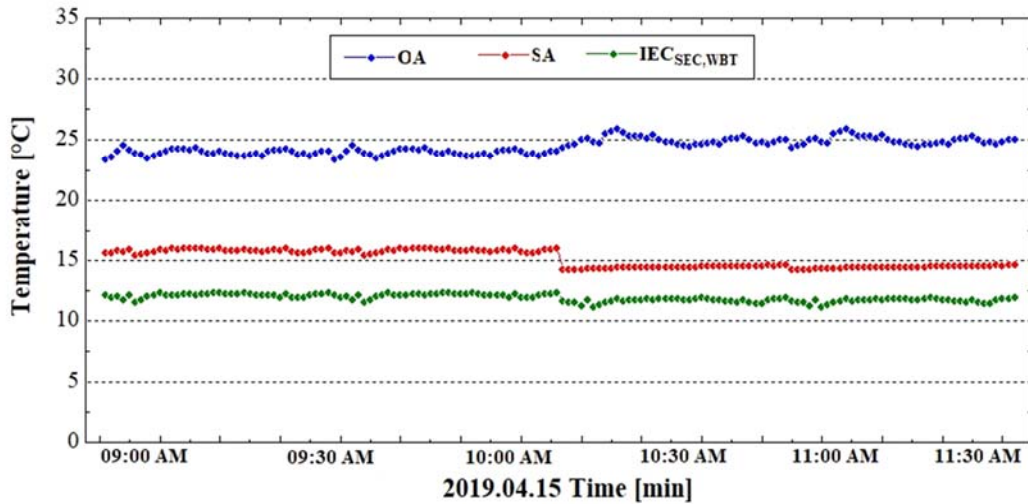


그림 108. 차세대 공조시스템 시제품 중간기 운전모드 I 운전에 따른 급기 변화

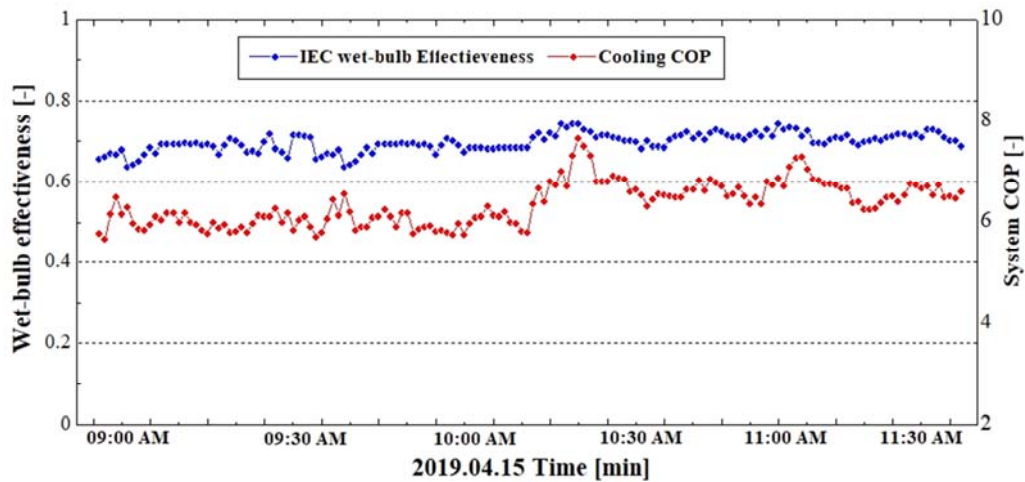


그림 109. 차세대 공조시스템 시제품 중간기 운전모드 I 간접식 증발냉각 효율 및 냉방 COP

- 앞서 제안된 중간기 운전모드 II 조건에서의 시스템 성능을 파악함. 표 34에 언급된 실제 유의미한 운전 데이터를 모니터링 하여 적정 외기 조건에서의 시스템 특성 파악을 수행하였으며, 각 운전 모드에서의 시제품 유닛의 급기성능, 시스템 효율, 및 냉방 COP 분석을 실시함.
- 그림 110은 중간기 시제품 중간기 운전모드 II 조건에서 시제품 운전에 따른 시스템 급기 성능을

나타냄. 중간기 운전모드 II에서 시제품 유닛은 시스템에 도입된 외기를 냉각하기 위해 액체식 제습시스템과 간접식 증발냉각기를 바이패스하고 직접식 증발냉각기의 단열냉각 운전을 통해 설정된 냉방 시 급기 온도 (15°C)를 달성할 수 있도록 운전됨.

- 중간기 운전모드 II 운전에 따라서 시스템에 도입된 외기는 건구온도 기준으로 약 $7.6\text{--}9.4^{\circ}\text{C}$ 의 온도 변화를 나타내며 이때 간접식 증발냉각기의 2차 측으로 공급되는 실내 배기의 건구온도 및 습구온도는 각각 22.12°C 와 12.4°C 를 유지함.
- 운전모드 II에서 식 7에 따라 계산된 시스템 냉각량은 $1.3\text{--}1.59\text{kW}$ 를 나타내며, 이때 시스템 냉방 COP는 $5.6\text{--}6.9$ 로 매우 높은 냉방 성능을 나타내는 것을 확인함 (그림 111). 또한, 시스템 운전 시 직접식 증발냉각기의 증발냉각 효율은 $76\text{--}92\%$ 로 시스템 설계 시 제안된 목표 설계 효율 90% 를 달성할 수 있는 것을 확인함.

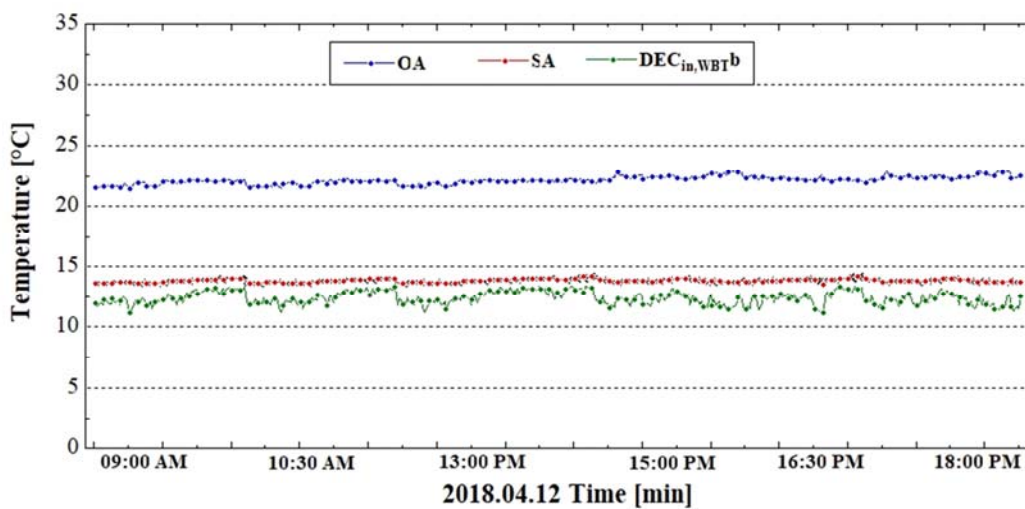


그림 110. 차세대 공조시스템 시제품 중간기 운전모드 II 운전에 따른 급기 변화

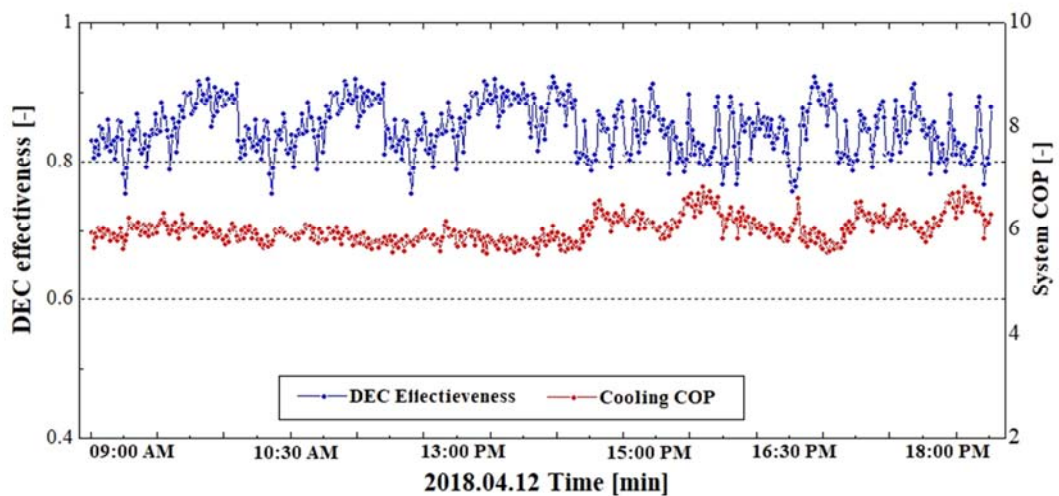


그림 111. 차세대 공조시스템 시제품 중간기 운전모드 II 직접식 증발냉각 효율 및 냉방 COP

- 시제품 유닛의 겨울철 난방운전 조건에서의 시스템 성능을 파악함. 표 34에 언급된 실제 유의미한 운전 데이터를 모니터링 하여 적정 외기 조건에서의 시스템 난방 특성 파악을 수행하였으며, 각 운전 모드에서의 시제품 유닛의 급기성능, 시스템 효율, 및 냉방 COP 분석을 실시함.
- 난방모드 운전 시 시제품 유닛은 간접식 증발냉각기 2차 측의 급수를 중단하고 현열 냉각기와 같이 운전되어 간접식 증발냉각기 2차 측으로 공급되는 실내 배기에 포함된 배열을 회수하여 실내 설정 조건 (20℃)와 가까운 중립온도 조건을 달성할 수 있도록 운전됨.
- 그림 112는 난방기 시제품 중간기 운전모드에서 시제품 운전에 따른 시스템 급기 성능을 나타냄. 시제품 유닛은 시스템에 도입된 외기를 실내에서 배출되는 배기와 열 교환하기 위해 액체식 제습시스템을 바이패스하고 간접식 증발냉각기에서 배열을 회수한 이후 실내로 공급될 수 있도록 운전하였음.
- 난방기 운전에 따라서 시스템에 도입된 외기는 건구온도 기준으로 약 6.3~7.7℃의 온도 상승을 나타내며 이때 간접식 증발냉각기의 2차 측으로 공급되는 실내 배기의 건구온도는 각각 20.45℃를 유지함.
- 난방기 운전에서 식 9에 따라 계산된 시스템 난방량은 0.63~0.81kW를 나타내며, 이때 시스템 난방 COP는 2.9~3.8로 매우 높은 배열회수 성능을 나타내는 것을 확인함 (그림 113). 또한, 시스템 운전 시 간접식 증발냉각기의 실내배열 회수 효율은 66~82%로 겨울철 배열회수 운전에서도 안정적인 시스템 성능을 확보한 것을 확인함.

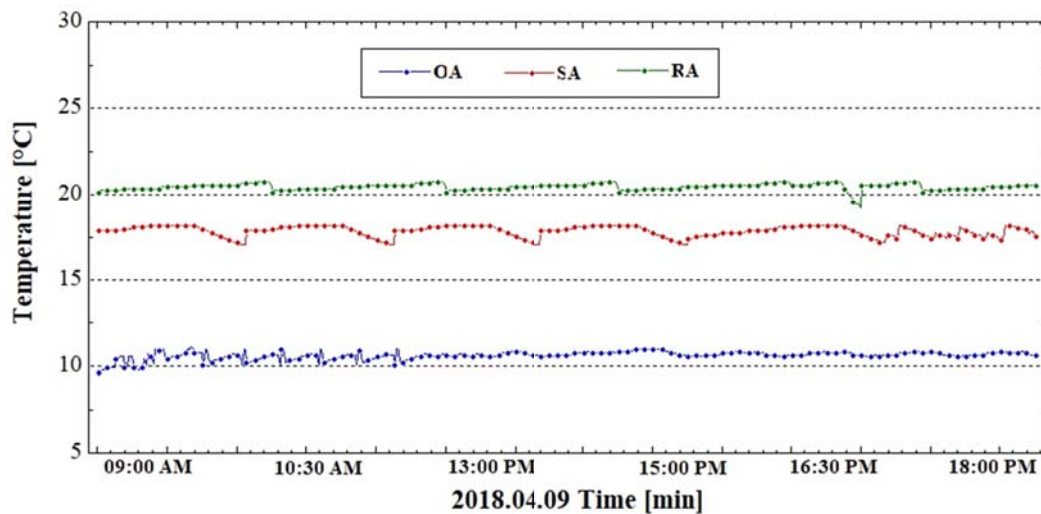


그림 112. 차세대 공조시스템 시제품 난방기 운전에 따른 급기 변화

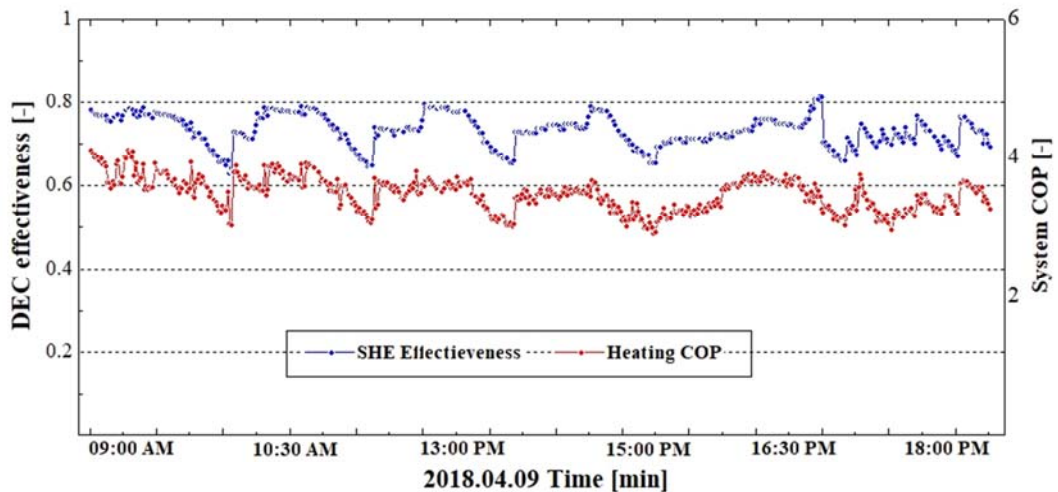


그림 113. 차세대 공조시스템 시제품 난방기 간접식 증발냉각기 배열회수 효율 및 난방 COP

- 본 연구를 통해 개발된 제습증발냉각 기반 전외기 공조시스템 상용화 시제품 유닛의 계절별 시스템 성능을 분석한 결과 각 단계별 연구 목표에 맞는 초기 시스템 디자인 및 설계, 제작등의 과정을 통해 우수한 성능의 시제품 유닛을 개발 완료함.
- 기존 액체식 제습기반 공조시스템들의 에너지 소비 경향 파악에 따른 제습 수용액의 냉각 및 가열 열원을 동시에 공급할 수 있는 히트펌프 시스템 적용을 통한 여름철 냉방 운전 시 시스템 에너지 성능 향상 및 난방 COP 향상을 통해 본 연구개발을 통해 목표했던 30% 이상의 에너지 절감을 달성할 수 있는 것으로 판단됨.
- 또한, 시제품 유닛의 실질적인 냉방 에너지 소비를 면밀하게 분석한 실험 결과들을 바탕으로 실제 시스템에서 소비되는 에너지 소비 비율을 정량적으로 평가 하였으며, 냉방 운전 시 액체식 제습시스템의 제습성능 제어에 따른 시스템 에너지소비 절감이 추가적으로 가능할 것을 실험적으로 분석함.
- 여름철 시스템 냉방 운전 시 전체 시스템 에너지 소비 대비 시스템 구성요소 별 에너지 소비 비율을 분석한 결과 액체식 제습시스템 운전을 위해 소비되는 에너지가 전체 시스템 에너지 소비의 85% 이상을 차지하는 것으로 본 시스템의 에너지 소비 성능 개선을 위한 추가적인 시스템 제어 방안이 필요할 것으로 예측됨.
- 그림 114에 도식된 값과 같이 시스템 전체 에너지 소비에서 액체식 제습시스템 운전을 위해 소비되는 에너지는 매우 높은 비율을 나타내는 것을 확인할 수 있으며, 이때 실험을 통해 검증된 에너지 절감 가능성이 있는 에너지 소비원인 히트펌프 에너지 소비 절감을 이끌어 낼 경우 시제품 유닛의 추가적인 에너지 소비 절감이 가능한 것이 실증됨.
- 따라서 시스템 자동제어 구축 시 추가적인 에너지 소비 절감이 가능한 제어 방안을 도출하고 이에 따른 시스템 운전이 가능한 자동제어 알고리즘에 대한 분석이 필요한 것으로 판단됨.
- 여름철 시스템 운전 특성 분석 결과에 따라 본 연구에서는 액체식 제습시스템의 에너지 소비 절감을 위해 시스템에서 요구되는 외기의 절대습도 변화량 즉 제습성능을 액체식 제습수용액의 공급온도 제어를 통해 일정 수준으로 유지하여 이때 소비되는 히트펌프 에너지를 제습 부하에 맞

게 소비하는 방안을 통해 추가적인 에너지 절감 방안을 도출할 예정임.

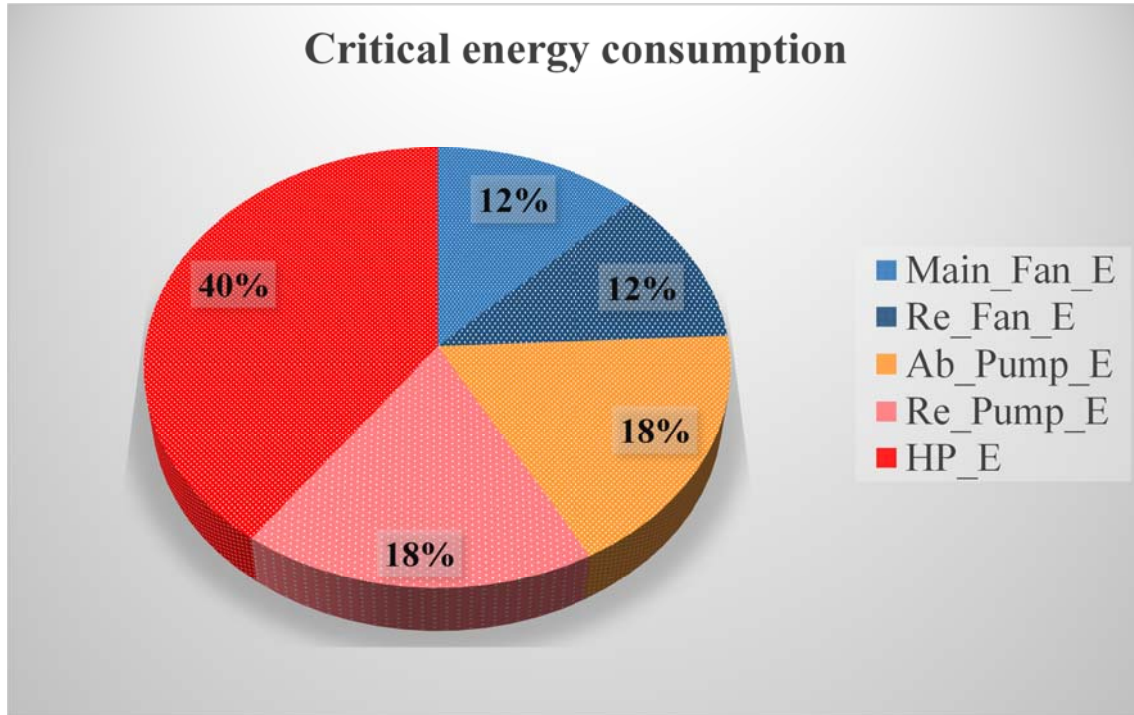


그림 114. 차세대 공조시스템 시제품 여름철 냉방 운전 시 전체 시스템 에너지 소비 비율

(2) 시제품 상용화 가능성 실증 및 기술이전 추진

- 본 연구를 통해 개발된 제습증발냉각 기반 전외기 공조시스템 상용화 시제품의 상용화 가능성을 분석하기 위해 공인성적시험 분석을 이용해 실제 시스템 성능을 검증함. 각 계절별 운전모드를 기반으로 목표된 급기성능 및 시스템 성능을 검증하기 위해 (사)한국냉동공조인증센터 요구하는 실험 방법에 따른 시스템 성능을 평가하여 시스템 성능을 기반으로 한 상용화 가능성 분석을 완료함.
- 시험 성적 과정은 본 연구개발의 연구책임자인 한양대학교 산학협력단의 정재원 교수 연구팀에서 개발한 제습증발냉각 기반 전외기 공조시스템 상용화 시제품의 온도 및 풍량을 측정하고 이에 따른 급기 성능을 공인성적시험 절차를 바탕으로 시험의뢰를 진행함.
- 실험 측정은 각 계절별 시스템 운전모드 조건에서 5분간 총 7회, 즉 35분 동안의 시스템 운전 상태를 측정 하였으며, 외기 및 급기의 변화가 안정화 된 상태 이후의 측정 데이터를 분석함. 측정 결과는 온습도 측정 이전에 계측된 풍량 측정을 진행 하였으며, 이후 동일한 풍량 조건에서 온도 및 습도 측정을 실시함.
- 또한 실험 결과는 검교정이 완료된 온습도 센서를 이용하여 계측하였으며, 계절별 급기의 온도 변화를 측정하기 위해 시스템 입구 및 출구측에 시험방법에 맞게 설치하여 계측을 진행.
- 성적시험 진행 시 각 위치별 풍량 또한 검교정이 완료된 풍속 측정 센서를 계측장비에 연결하여 각 위치별 풍속을 측정 하였으며, 덕트 단면 내부 9개의 측정 포인트를 설정하여 각 위치별 풍속을 측정하여 풍량을 계산함.
- 냉방기 시스템 성능 측정에 앞서 외기 도입 풍량과 급기 풍량을 측정 한 결과는 다음과 같음. 외기 도입 풍량 $515\text{m}^3/\text{h}$, 급기 풍량 $502.7\text{m}^3/\text{h}$ 를 나타내며 이는 시스템 성능 평가를 위해 목표했

중간기 운전모드 I 성능 평가 시 급기 풍량은 외기 도입 풍량 515m³/h, 급기 풍량 508m³/h, 환기 풍량 508m³/h, 배기 풍량 490m³/h를 나타내며 이는 시스템 성능 평가를 위해 목표했던 500m³/h를 유사하게 유지 하고, 중간기 운전모드 II 평가 시 급기 풍량은 외기 도입 풍량 538.6m³/h, 급기 풍량 517.9m³/h를 나타내며 이는 시스템 성능 평가를 위해 목표했던 500m³/h를 유사하게 유지 하는 것을 확인하여 측정을 진행함.

겨울철 운전모드 시스템 성능 측정에 앞서 각 위치별 풍량을 측정 한 결과는 다음과 같음. 외기 도입 풍량 292m³/h, 급기 풍량 310m³/h, 환기 풍량 291.6m³/h, 배기 풍량 295.2m³/h를 나타내며 이는 시스템 성능 평가를 위해 목표했던 300m³/h를 유사하게 유지 하는 것을 확인함.

본 성적시험 조건에 따른 시스템 성능 평가 결과는 여름철 및 중간기, 겨울철 시스템 운전모드 조건에 따른 시스템 성능을 공인 하였으며, 각각의 측정 결과는 다음과 같음.

날짜/시간	-495 (°C) OA(외기)	-495 (%RH -495 (2))	-495 (kJ/kg)	-519 (°C) SA(급기)	-519 (%RH -519 (2))	-519 (kJ/kg)	냉각성능[kW]		
2019-4-20 16:13	26.5	67.2	21.9	63.9	16.8	90.6	15.82	44.28	1.70
2019-4-20 16:14	26.5	67.2	21.9	63.9	16.6	91.1	15.68	43.88	1.73
2019-4-20 16:15	26.4	67.3	21.8	63.6	16.4	91.8	15.56	43.53	1.76
2019-4-20 16:16	26.4	67.4	21.8	63.7	16.3	90.5	15.32	42.87	1.77
2019-4-20 16:17	26.3	67.4	21.8	63.4	16.2	91.3	15.31	42.83	1.78
2019-4-20 16:18	26.3	67.2	21.7	63.3	16.1	91.7	15.25	42.67	1.80
2019-4-20 16:19	26.3	67.6	21.8	63.5	15.9	91.8	15.07	42.16	1.82
2019-4-20 16:20	26.3	67.5	21.8	63.4	15.7	91.4	14.83	41.5	1.86
2019-4-20 16:21	26.3	57.8	20.2	58.0	15.6	91.9	14.79	41.37	1.88
2019-4-20 16:22	26.4	67.7	21.9	63.9	15.5	91.3	14.63	40.93	1.91
2019-4-20 16:23	26.3	67.7	21.8	63.5	15.4	91.8	14.58	40.8	1.91
2019-4-20 16:24	26.3	67.7	21.8	63.5	15.3	92.2	14.52	40.65	1.93
2019-4-20 16:25	26.3	68.3	21.9	63.9	15.2	92.8	14.49	40.55	1.95
2019-4-20 16:26	26.3	68.1	21.9	63.8	15.1	91.9	14.3	40.03	1.97
2019-4-20 16:27	26.3	67.8	21.8	63.6	15.1	91.5	14.26	39.92	1.97
2019-4-20 16:28	26.2	67.7	21.7	63.2	14.9	91.8	14.09	39.48	1.98
2019-4-20 16:29	26.1	67.8	21.6	62.9	14.9	92.0	14.11	39.53	1.97
2019-4-20 16:30	26.1	67.0	21.5	62.5	14.8	90.6	13.88	38.89	1.97
2019-4-20 16:31	26.0	67.1	21.4	62.2	14.8	90.3	13.85	38.81	1.96
2019-4-20 16:32	26.0	67.5	21.5	62.5	14.8	90.2	13.84	38.79	1.96
2019-4-20 16:33	26.0	68.3	21.6	62.9	15.2	90.2	14.22	39.83	1.90
2019-4-20 16:34	26.0	68.5	21.7	63.0	15.5	90.6	14.56	40.73	1.85
2019-4-20 16:35	26.1	68.6	21.8	63.4	15.4	91.1	14.51	40.61	1.88
2019-4-20 16:36	26.1	68.3	21.7	63.2	15.3	91.8	14.48	40.54	1.90
2019-4-20 16:37	26.1	68.5	21.7	63.3	15.2	91.5	14.36	40.19	1.93
2019-4-20 16:38	26.2	68.6	21.8	63.7	15.1	91.3	14.24	39.87	1.95
2019-4-20 16:39	26.2	67.3	21.6	63.0	15.1	91.7	14.28	39.98	1.96
2019-4-20 16:40	26.2	67.4	21.7	63.0	14.9	91.8	14.09	39.48	1.98
2019-4-20 16:41	26.2	67.8	21.7	63.3	14.9	91.8	14.09	39.48	1.97
2019-4-20 16:42	26.2	68.2	21.8	63.5	14.8	91.9	14.01	39.24	2.00
2019-4-20 16:43	26.2	68.7	21.9	63.8	14.8	91.3	13.95	39.08	2.00
2019-4-20 16:44	26.2	68.4	21.8	63.6	14.8	91.7	13.99	39.19	2.00
2019-4-20 16:45	26.2	68.0	21.8	63.4	15.2	91.3	14.34	40.13	1.94
2019-4-20 16:46	26.3	68.4	21.9	63.9	15.5	91.9	14.69	41.1	1.89
2019-4-20 16:47	26.3	68.8	22.0	64.2	15.4	91.2	14.52	40.64	1.91
2019-4-20 16:48	26.5	68.3	22.1	64.5	15.3	91.5	14.45	40.45	1.97
2019-4-20 16:49	26.5	68.2	22.1	64.5	15.2	91.8	14.39	40.27	1.98
2019-4-20 16:50	26.4	69.7	22.2	65.0	15.1	92.0	14.31	40.06	1.99
	26.2	67.7	21.7	63.3	15.4	91.4	14.5	40.6	1.9
시스템 냉각 성능=				1.91	[kW]		급기용량 515 CMH, 밀도: 1.2, 비열: 1.023		

표 36. 차세대 공조시스템 시제품 여름철 냉방 운전 시 공인성적시험 측정 결과표

측정위치	풍량 (m3/h)	온도 (℃)	습도 (%)	습구온도 (℃)	엔탈피 (kJ/kg)
외기	515	26.5	67.5	21.9	64.1
급기	502.7	15.2	91.1	14.3	40.2

[illegible]

표 37. 차세대 공조시스템 시제품 중간기 운전모드 I 냉방 운전 시 공인성적시험 측정 결과표

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
날짜/시간		-519 (°C)	-519 (%RH)	-519 (2) (°)	-519 (kJ/kg)		-495 (°C)	-495 (%RH)	-495 (2) (°)	-495 (kJ/kg)		
		OA(외기)					SA(급기)					
3	2018-4-12 12:23	21.8	29.9	12.1	34.3		14.3	73.5	11.6	33.1		
4	2018-4-12 12:24	21.9	28.1	11.8	33.6		14.3	74	11.7	33.3		
5	2018-4-12 12:25	21.9	28.3	11.9	33.8		14.3	73.5	11.6	33.2		
6	2018-4-12 12:26	22	30	12.2	34.6		14.3	73.5	11.7	33.3		
7	2018-4-12 12:27	22.1	30.8	12.4	35.2		14.4	73.7	11.8	33.5		
8	2018-4-12 12:28	22.2	30.6	12.5	35.3		14.4	73.9	11.8	33.6		
9	2018-4-12 12:29	22.2	30.3	12.4	35.2		14.4	73.7	11.8	33.5		
10	2018-4-12 12:30	22.2	32.1	12.7	35.9		14.4	74.7	11.9	33.8		
11	2018-4-12 12:31	22.2	32.3	12.8	36		14.4	75.1	11.9	33.9		
12	2018-4-12 12:32	22.2	30.7	12.5	35.3		14.5	75.1	12	34		
13	2018-4-12 12:33	22.2	31.6	12.6	35.6		14.5	74.6	11.9	33.9		
14	2018-4-12 12:34	22.1	28.3	12	34.1		14.5	74.1	11.9	33.8		
15	2018-4-12 12:35	22	28.8	12	34.1		14.5	72.8	11.7	33.5		
16	2018-4-12 12:36	22.1	31	12.5	35.3		14.5	73.4	11.8	33.6		
17	2018-4-12 12:37	22.2	31.2	12.6	35.5		14.5	74.5	11.9	33.9		
18	2018-4-12 12:38	22.2	29.6	12.3	34.8		14.5	74.6	11.9	33.9		
19	2018-4-12 12:39	22.1	29.6	12.2	34.6		14.5	74.1	11.9	33.8		
20	2018-4-12 12:40	22.1	31.5	12.5	35.5		14.5	74.4	11.9	33.8		
21	2018-4-12 12:41	22.2	30.5	12.4	35.2		14.5	75.1	12	34.1		
22	2018-4-12 12:42	22.3	31.6	12.7	35.9		14.5	75.4	12	34.2		
23	2018-4-12 12:43	22.3	33.4	13	36.7		14.5	75.6	12.1	34.3		
24	2018-4-12 12:44	22.4	32.4	12.9	36.3		14.5	76.4	12.2	34.5		
25	2018-4-12 12:45	22.3	33.5	13	36.6		14.5	76.3	12.1	34.5		
26	2018-4-12 12:46	22.3	33.4	13	36.6		14.6	76.8	12.2	34.7		
27	2018-4-12 12:47	22.4	33.4	13	36.7		14.6	76.8	12.3	34.8		
28	2018-4-12 12:48	22.3	33.3	13	36.5		14.6	76.1	12.2	34.6		
29	2018-4-12 12:49	22.3	33.9	13	36.7		14.6	76.4	12.2	34.7		
30	2018-4-12 12:50	22.2	32.3	12.7	35.9		14.6	76.5	12.2	34.7		
31	2018-4-12 12:51	22.2	34.5	13.1	36.8		14.6	76.5	12.2	34.6		
32	2018-4-12 12:52	22.3	34.8	13.2	37.2		14.6	77.5	12.3	34.9		
33	2018-4-12 12:53	22.3	35.2	13.3	37.4		14.6	77.5	12.3	35		
34	2018-4-12 12:54	22.3	33.9	13	36.7		14.6	77.2	12.3	35		
35	2018-4-12 12:55	22.2	34.2	13	36.7		14.6	77.3	12.3	35		
36	2018-4-12 12:56	22.2	34.3	13.1	36.8		14.6	77.2	12.3	35		
37	2018-4-12 12:57	22.2	34.5	13	36.8		14.7	76.8	12.3	34.9		
38	2018-4-12 12:58	22.2	34.2	13	36.7		14.6	77.3	12.4	35		
39	2018-4-12 12:59	22.3	34.6	13.1	37		14.7	77.1	12.3	35		
40	2018-4-12 13:00	22.2	33.7	12.9	36.5		14.7	76.6	12.3	34.9		
41												
42												
43		22.18	31.82	12.64	35.72		14.50	75.27	12.01	34.14		
44												
45												
46												
47					시스템 냉각 성능		1.40		kW			
48					직접식 증발냉각 효율		0.81		%			
49												
50												

그림 117. 차세대 공조시스템 시제품 중간기 운전모드Ⅱ 냉방 운전 시 공인성적시험 측정 결과

표 38. 차세대 공조시스템 시제품 중간기 운전모드Ⅱ 냉방 운전 시 공인성적시험 측정 결과표

측정위치	풍량 (m3/h)	온도 (°C)	습도 (%)	습구온도 (°C)	엔탈피 (kJ/kg)
외기	538.6	22.18	31.8	12.6	35.72
급기	517.9	14.5	75.27	12.01	34.14

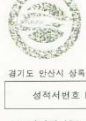
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
날짜/시간		-519 (°C)	-519 (%RH)		-495 (°C)	-495 (%RH)		-493 (°C)	-493 (%RH)		-515 (°C)	-515 (%RH)		
		OA(외기)			SA(급기)			RA(환기)			EA(배기)			
3	18-4-9 14:32	11.5	36.5		17.5	29.1		20.4	29.2		14.5	42		
4	18-4-9 14:33	11.5	38.2		17.6	29		20.4	28.8		14.6	41.3		
5	18-4-9 14:34	11.5	36.3		17.6	29.2		20.4	29.1		14.7	41.4		
6	18-4-9 14:35	11.4	35.1		17.6	28.7		20.4	29.2		14.7	41.4		
7	18-4-9 14:36	11.4	35.4		17.7	28.2		20.5	29.1		14.7	41.1		
8	18-4-9 14:37	11.3	36		17.7	28.1		20.5	29.1		14.8	41.1		
9	18-4-9 14:38	11.3	36.4		17.7	28.2		20.5	29		14.8	40.9		
10	18-4-9 14:39	11.3	34.7		17.8	28.4		20.5	28.9		14.8	40.7		
11	18-4-9 14:40	11.3	36		17.8	28.1		20.5	28.9		14.9	40.6		
12	18-4-9 14:41	11.3	36.5		17.8	28.1		20.5	28.9		14.9	40.5		
13	18-4-9 14:42	11.4	36.9		17.8	28.2		20.5	28.9		15	40.3		
14	18-4-9 14:43	11.3	35.4		17.9	28.1		20.5	28.9		15	40.3		
15	18-4-9 14:44	11.3	35.2		17.9	27.8		20.5	28.9		15	40.2		
16	18-4-9 14:45	11.3	34.8		17.9	27.5		20.5	28.8		15	40.1		
17	18-4-9 14:46	11.3	35.2		17.9	27.5		20.5	28.7		15	40		
18	18-4-9 14:47	11.3	35.5		17.9	27.7		20.5	28.8		15	40		
19	18-4-9 14:48	11.4	37.5		18	27.8		20.5	28.8		15	40.1		
20	18-4-9 14:49	11.4	36.6		18	28.2		20.5	28.8		15	40		
21	18-4-9 14:50	11.4	35.7		18	28		20.5	28.7		15.1	39.9		
22	18-4-9 14:51	11.4	36.4		18	27.9		20.5	28.7		15	39.8		
23	18-4-9 14:52	11.4	37.3		18	28.2		20.5	28.7		15	39.9		
24	18-4-9 14:53	11.4	36.4		18	28.4		20.5	28.7		15	40		
25	18-4-9 14:54	11.4	36.6		18	28.2		20.6	28.6		15	39.9		
26	18-4-9 14:55	11.4	36.9		18	28		20.6	28.6		15	39.9		
27	18-4-9 14:56	11.5	37.9		18	28.2		20.6	28.8		15	40.1		
28	18-4-9 14:57	11.5	37.5		18.1	28.4		20.6	28.8		15.1	40.1		
29	18-4-9 14:58	11.5	36.3		18.1	28.4		20.6	28.8		15.1	40.1		
30	18-4-9 14:59	11.5	36.3		18.1	28.2		20.6	28.7		15.1	40		
31	18-4-9 15:00	11.5	36.9		18.1	28.2		20.6	28.6		15.1	39.8		
32	18-4-9 15:01	11.5	36.7		18.1	28.3		20.6	28.6		15.1	39.7		
33	18-4-9 15:02	11.6	35.1		18.1	28.2		20.6	28.6		15.1	39.7		
34	18-4-9 15:03	11.6	34.9		18.1	27.9		20.6	28.6		15.1	39.6		
35	18-4-9 15:04	11.6	34.4		18.1	27.5		20.6	28.5		15.2	39.5		
36	18-4-9 15:05	11.5	33.9		18.1	27.2		20.6	28.5		15.1	39.5		
37	18-4-9 15:06	11.4	34		18.1	26.8		20.6	28.2		15.1	39.1		
38	18-4-9 15:07	11.4	35.1		18.1	26.7		20.6	28.5		15.1	39.5		
39	18-4-9 15:08	11.4	35.5		18.1	27.1		20.6	28.5		15.1	39.6		
40	18-4-9 15:09	11.5	35.8		18.2	27.2		20.6	28.5		15.1	39.7		
41	18-4-9 15:10	11.5	35.8		18.2	27.4		20.6	28.4		15.1	39.6		
42														
43														
44		11.42	36.04		17.92	28.11		20.53	28.79		14.96	40.25		
45														
46														
47					급기측 온도변화 =			6.50		0.93				
48					배기측 온도 변화 =			5.57						
49					열교환 효율 [%]			71.36						
50														

그림 118. 차세대 공조시스템 시제품 난방기 난방 운전 시 공인성적시험 측정 결과

표 39. 차세대 공조시스템 시제품 난방기 난방 운전 시 공인성적시험 측정 결과표

측정위치	풍량 (m3/h)	온도(°C)	습도(%)
환기	291.6	20.53	28.79
외기	292	11.42	36.04
급기	310	17.92	28.11
배기	295.2	14.96	40.25

- 공인성적시험 조건에 따른 시스템 성능 평가 결과 제습증발냉각 기반 전외기 공조시스템 상용화 시제품은 설계 단계에서 목표한 급기 성능 및 시스템 성능을 달성하는 것을 공인함. 각 계절별 운전 결과에 따른 시스템 성능이 공인됨에 따라서 실제 상용화 단계에 적용 시 시스템 성능을 보장할 수 있으며 본 성적시험을 바탕으로 본 연구를 통해 개발된 시스템의 공인시험성적서를 획득함.



시험 성적서

TEST REPORT

연구개발용
 용도의 사용금지

경기도 안산시 상록구 역안로 705 경기테크노파크 기공그로타워 113호 TEL 031-500-3820 FAX 031-500-3825

성적서번호 Report No.	KRAAC-AR-19-118	(1)4/pages
------------------	-----------------	------------

1. 의뢰자 (Client)

기관명	한양대학교 산학협력단
주 소	서울특별시 성동구 왕십리로 222 과학기술관 604-1
2. 시료 (Sample Description)

종 류	연외기 공조기	형 태	개발물
설비모델명	LD-IDECOAS	제조번호	2018-001
3. 시험기간 (Date of Test) : 2019년 4월 15일 ~ 20일
4. 시험방법 (Test method used) : 의뢰자 제시 방법
5. 시험결과 (Test Results) : 시험결과와 참조
6. 기타사항 (Remarks)
 - 시험성적서 용도 : 과제제출용 (과제제출, 과제변경, 제출기공)
 - 지출 다용이용시실시 공기질 및 에너지성능 향상을 위한 제습증발냉각 기반 연외기 공조시스템
사용할 기술 개발, 18CTAP-C116268-03, 국토교통과학기술진흥원
 - 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시험방법으로 시험한 결과만을 전체적으로 대한 효용성을 보증하지는 않습니다.
 - 이 성적서는 환경영향평가센터의 사전 서면검사와 외관, 성능, 안전 및 소음측정으로 사용할 수 있으며, 온도 외적인 사용을 금합니다.
 - 이 성적서는 일부만 사용할 수 있으며, 사본은 무효입니다.
 - 이 성적서의 진위확인이 필요한 경우 상기 연락처로 연락주시기 바랍니다.

학 인	작성자 (Tested by) 성 명 : 최 연성 	기술부책임자 (Deputy Technical Manager) 성 명 : 김 희정 
-----	---	---

2019년 4월 26일



한국냉동공조연중센터 이사장

KOREA REFRIGERATION & AIR-CONDITIONING ASSOCIATION PRESIDENT

경기도 안산시 상록구 역안로 705 경기테크노파크 기공그로타워 113호
TEL 031-500-3820 FAX 031-500-3825 www.kraac.or.kr

KRAAC-Tp-5101-01(12)

KRAAC

시험결과 TEST RESULT

생제서번호 Report No.

KRAAC-AR-19-118

(2/4)pages

1. 열병시험

1.1 한양대학교 신학림학관 제출 증발냉각기방 전기의 공기시스템의 연구개발 시험을 의뢰함.

표 1. 제품 사양

모 델 명	LD-IDECOAS	외형크기(W×H×L)(mm)	4,040 × 2,240 × 1,930	
제 조 사	한양히에이스	전 원	3φ 380V 60Hz	
열교환기	크기 (mm)	830 × 600 × 830	크기 (mm)	300 × 600 × 200
	모듈명	IEC	모듈명	DEC
	재질	알루미늄	재질	실리콘스
	최대용량(m³/h)	1,000	증발냉각기 최대용량(kg/h)	3.0

2. 시험 방법

2.1 시험은 의뢰자가 지정한 설치 방법과 시험 조건으로 운전하여 시험함.

2.2 시험조건이 정렬상태로 유지한 후 5분의 평균을 7회 측정하여 35분 동안의 데이터 평균값을 산출함.

2.3 시험결과와 간접식 증발냉각효율은 ASHRAE Handbook HVAC Systems and Equipment (2016) Chapter 41 Evaporative air-conditioning Equipment 규격을 적용하여 산출하고, 시스템 열교환률은 KS B 6879 : 2017 규격을 적용하여 산출함.

2.4 측량은 의뢰자가 제시한 조건으로 시험함.

그림 1. 시스템 개략도

KRAAC-TP-5101-02(05)

시험결과 TEST RESULT

실험서번호 Report No.	KRAAC-AR-19-118	3(3)/4(pages)
------------------	-----------------	---------------

3. 시험 조건

표 2. 시험조건

시험 항목	통량 (m ³ /h)	습기속 (SA)		유효속 (OA)	
		건구온도 (℃)	습구온도 (℃)	건구온도 (℃)	습구온도 (℃)
냉 방 기	500 ± 25	15.0 ± 1.0	14.0 ± 0.5	27.0 ± 1.0	22.0 ± 0.5
송 간 기	500 ± 25	16.0 ± 1.0	13.0 ± 0.5	24.0 ± 1.0	16.0 ± 0.5

4. 시험 결과

표 3. 시험 결과

시험 항목	함기속 (RA)		유효속 (OA)		습기속 (SA)		
	통량 (m ³ /h)	건구온도 (℃)	통량 (m ³ /h)	건구온도 (℃)	통량 (m ³ /h)	건구온도 (℃)	
냉 방 기	-	-	-	26.75	22.15	515	15.09
송 간 기	-	19.63	12.18	-	23.98	16.07	515

• 냉방기는 습기를 하지 않음.

표 4. 계산 결과

시험 항목	열교환효율 ¹⁾ (%)	유효성능 ²⁾ (kW)
냉 방 기	-	2.06
송 간 기	66.43	1.42

• 공기속 물성치는 EES 프로그램을 이용하여 획득함.
 ※ 열교환기에서의 누기율은 고려하지 않음.
 ※ 열교환효율은 아래식을 적용하여 산출함.

$$\eta = \frac{m_{OA} \cdot (t_{OA} - t_{RA})}{m_{SA} \cdot (t_{SA} - t_{RA})} \times 100$$

여기서 η : 열교환율 (%)
 m_{OA} : 유효 건구온도 (℃)
 m_{SA} : 습기 건구온도 (℃)
 m_{RA} : 습기 송구온도 (℃)
 m_{SA} : 유효 습구온도 (℃)

※ 유효성능은 아래식을 적용하여 산출함.

$$Q_c = m_{OA} \cdot C_{pOA} \cdot (t_{OA} - t_{SA})$$

여기서 Q_c : 냉각성능 (kW)
 m_{OA} : 통량 (kg/h)
 C_{pOA} : 비열 (kJ/kg℃)
 t_{OA} : 유효 건구온도 (℃)
 t_{SA} : 유효 습구온도 (℃)

KRAAC-TP-5101-02(05)

시험 결과 TEST RESULT

KRAAC

검역서번호 Report No.	KRAAC-AR-19-118	(41/41)pages
5. 시험 사진  그림 2. 시험시료 사진  그림 3. 제어 시스템 사진  그림 4. 온도의 측정  그림 5. 풍량의 측정		

- 끝 -

KRAAC-TP-5101-02(05)

그림 119. 본 연구개발 시제품 공인기관 성적시험서 (여름철 및 중간기 1 조건)



시험 성적서 TEST REPORT

연구개발용
용도 외 사용금지

광기도 안전성 상륙구 제1호 705 경기도테크노파크 기술고도화동 113호 TEL. 031-500-3820 FAX. 031-500-3825

성적서번호 Report No.	KRAAC-AR-18-067	(1)/(5)pages
------------------	-----------------	--------------

1. 의뢰자 (Client)

기관명	한양대학교 산학협력단		
주 소	서울특별시 성동구 왕십리로 222 과학기술관 604-1		

2. 시료 (Sample Description)

종 류	전기용 공조기	형 태	개발품
실비모델명	LD-IDECCAS	제조번호	2018-001

3. 시험기간 (Date of Test) : 2018년 4월 18일 ~ 24일

4. 시험방법 (Test method used) : 회회자 제시 방법

5. 시험결과 (Test Results) : 시험결과 참조

6. 기타사항 (Remarks)

- 시험성적서 용도 : 과제제출용 (과제제출, 과제완료, 제출기관)
- 지출 다중이용시설 공기질 및 에너지성능 향상을 위한 제습증발냉각 기반 전기용 공조시스템 상용화 기술 개발, 17CTAP-C16268-02, 국토교통과학기술진흥원
- * 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 자료에 의거하여 시험한 결과로써, 완벽하게 다른 품질을 보증하지는 않습니다.
- * 이 성적서는 한국냉동공조인증센터의 시험관서로써, 원본, 사본, 복사, 전사, 공표, 등 사용용으로 사용할 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.
- * 이 성적서는 유효기간이 정해진 경우 장기 보관으로 인한 오차가 발생할 수 있습니다.

확 인	적성자 (Tested by)	기술무책임자 (Deputy Technical Manager)
성 명	최 인 성	성 명 : 강 희 정

2018년 4월 25일



한국냉동공조인증센터 이사장
KOREA REFRIGERATION & AIR-CONDITIONING ASSOCIATION CENTER

광기도 안전성 상륙구 제1호 705 경기도테크노파크 기술고도화동 113호
TEL. 031-500-3820 FAX. 031-500-3825 www.kraac.or.kr

KRAAC-TP-5101-01(12)



시험 결과 TEST RESULT

성적서번호 Report No.	KRAAC-AR-18-067	(2)/(5)pages
------------------	-----------------	--------------

1. 일반사항

1.1 한양대학교 산학협력단은 제습 증발냉각기반 전기용 공조시스템의 연구개발 시험을 폐쇄함.

표 1. 제품 사양

모델명	LD-IDECCAS	외형크기 (mm) (W × H × L)	4 040 × 2 240 × 1 930
제 조 사	주식회사에이스	전 령	3상 220V 60Hz
외관크기	크기 (mm) 모델명 IEC	크기 (mm) 직접식 증발냉각기	300 × 600 × 200 모델명 DEC
제 품	제 품	제 품	제 품
최대풍량 (m³/h)	1 000	증발냉각기 최대용량 (kg/h)	3.0

2. 시험 방법

2.1 시험은 제습기가 지칭하는 설치 방법과 시험 조건으로 운영하여 시험함.

2.2 시험조건이 평형상태로 유지한 후 5분의 평균을 7회 측정하여 35분 동안의 데이터 평균값을 산출함.

2.3 시험결과와 직접식 증발냉각효율은 ASHRAE Handbook HVAC Systems and Equipment (2016) Chapter 41 Evaporative air-conditioning Equipment 규격을 적용하여 산출하고, 온도교란효율은 KS B 6879 : 2017 규격을 적용하여 산출함.

2.4 용량은 제습기가 제시한 조건으로 시험함.

2.5 시수를 직접식 증발냉각기에 공급함.

KRAAC-TP-5101-02(05)



시험 결과 TEST RESULT

성적서번호 Report No.	KRAAC-AR-18-067	(3)/(5)pages
------------------	-----------------	--------------

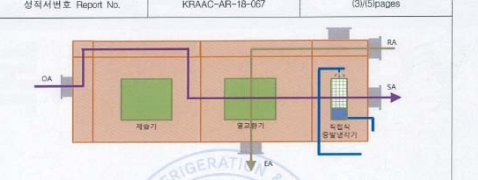


그림 1. 시스템 개략도 (냉각)

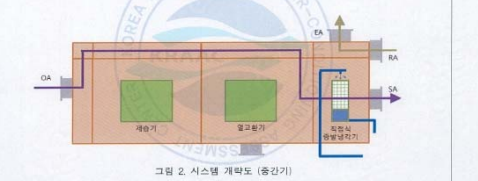


그림 2. 시스템 개략도 (난방)

3. 시험 조건

표 2. 시험 조건

시험항목	풍량 (m³/h)	실내측		실외측	
		건구온도 (°C)	습구온도 (°C)	건구온도 (°C)	습구온도 (°C)
겨울철	300 ± 15	20.0 ± 1.0	11.0 ± 0.5	11.5 ± 1.0	5.0 ± 0.5
중간기	520 ± 26	14.5 ± 1.0	12.0 ± 0.5	22.0 ± 1.0	12.5 ± 0.5

KRAAC-TP-5101-02(05)



시험 결과 TEST RESULT

성적서번호 Report No.	KRAAC-AR-18-067	(4)/(5)pages
------------------	-----------------	--------------

4. 시험 결과

표 3. 시험 결과

시험항목	RA			OA			SA		
	풍량 (m³/h)	건구온도 (°C)	습구온도 (°C)	풍량 (m³/h)	건구온도 (°C)	습구온도 (°C)	풍량 (m³/h)	건구온도 (°C)	습구온도 (°C)
겨울철	291.6	20.53	11.04	292.0	11.42	5.26	310.0	17.92	28.11
중간기	-	-	-	538.6	22.18	12.60	517.9	14.50	12.01

표 4. 계산 결과

시험 항목	직접식 증발 냉각효율 ¹⁾ (%)	온도교란효율 ²⁾ (%)	냉각성능 ³⁾ (kW)	시수 온도 (°C)
겨울철	-	71.36	-	14.4
중간기	80.05	-	1.40	14.5

* 공기측 물성치는 EES 프로그램을 이용하여 획득함.

** 열교환기에서의 누기율은 고려하지 않음.

¹⁾ 직접식 증발냉각효율은 아래식을 적용하여 산출함.

$$\epsilon = \frac{t_{OA} - t_{O2}}{t_{OA} - t_{O1}}$$

여기서, ϵ : 간접 증발 효율 (%)
 t_{O1} : OA 건구온도 (°C)
 t_{O2} : SA 건구온도 (°C)
 t_{O3} : OA 습구온도 (°C)

²⁾ 온도교란효율은 아래식을 적용하여 산출함.

$$\eta = \frac{t_{OA} - t_{SA}}{t_{OA} - t_{RA}} \times 100$$

여기서 η : 온도교란효율 (%)
 t_{OA} : 외기 건구온도 (°C)
 t_{SA} : 습기 건구온도 (°C)
 t_{RA} : 환기 건구온도 (°C)

- 계속 -

KRAAC-TP-5101-02(05)

그림 120. 본 연구개발 시제품 공인기관 성적시험서 (중간기 II 및 겨울철 조건)

- 본 공인성적시험 성적서를 바탕으로 본 연구를 통해 개발된 시제품 유닛의 상용화를 위한 시스템 성능 검증을 통해 본 개발품의 상용화 가능성이 분석 완료됨. 본 연구팀은 본 개발 시스템의

급기 성능 및 시스템 효율 등의 연구 결과들을 바탕으로 제습증발냉각 기반 전외기 공조시스템의 상용화 기술에 대한 기술이전 단계를 진행함.

- 본 연구개발을 통해 도출된 제습증발냉각 기반 전외기 공조시스템 상용화 기술에 대한 기술이전 내용은 다음과 같음. 기술이전은 연구개발을 통해 도출된 연구결과 및 시스템 설계방안, 제작 기술 등의 노하우를 이전하는 기술이전 계약을 실시함.
- 해당 기술이전은 본 연구과제에 공동으로 참여한 (주)삼화에이스에 본 기술에 대한 기술 이익 발생 시 경상기술료를 납부하는 형태의 노하우 판권 이전에 대한 기술이전 계약을 체결함.
- 기술이전의 목표는 본 연구개발을 통해 도출된 액체식 제습시스템(Liquid desiccant)과 간접식(Indirect evaporative cooler) 및 직접식(Direct evaporative cooler) 증발냉각 시스템을 이용하여 100% 외기를 도입해 공조 공간을 공조하는 시스템의 설계 및 제작 기술에 대한 노하우기술 이전.
- 기술이전은 본 과제를 통해 제안된 제습증발냉각 기반 전외기 공조시스템 상용화 유닛의 설계 및 제어기술에 관한 노하우기술 이전 및 기술지도를 하는 방향으로 기술이전에 대한 방법 및 내용은 아래와 같음.

(1) 액체식 제습시스템과 간접식 및 직접식 증발냉각기를 이용한 시스템 유로 설계 기술 및 계절별 제어기술에 대한 기술이전 및 지도:

제습증발냉각 전외기 공조시스템은 액체식 제습시스템, 간접식 및 직접식 증발냉각기를 급기측에 설치하여 외기의 온도 조건에 따라 설정 된 급기 온도를 달성할 수 있도록 운전됨. 본 시스템은 냉방 및 난방 시 급기 조건을 달리 설정 해 실내로 공급할 수 있도록 시스템이 운전되며 100% 전외기를 급기로 공급하는 방식으로 실내 환기량 개선 및 공기질 향상에 이점이 있는 시스템이며, 본 시스템을 구축하기 위해 다음과 같은 기술을 제공함.

액체식 제습시스템의 성능을 확보하기 위한 제습부 타워 설계 기술 및 간접식 및 직접식 증발냉각기 성능 확보를 위한 설계 기술

계절별 기 설정된 급기 조건을 달성하기 위한 시스템 내부 급기유로 형성 및 내부 댐퍼 조절을 통한 급기 유로 확보에 대한 설계 기술 제공

(2) 제습증발냉각 전외기 공조시스템 상용화 유닛 개선안 도출에 따른 최종 시제품 유닛 개발 기술 및 설계 기술에 대한 기술이전 및 지도:

제습증발냉각 전외기 공조시스템 최종 설계안은 기존 선행 시스템 도출안에서 확인된 개선안을 토대로 내부 급기유로 형성에 적용된 댐퍼 모듈을 제외하고 시스템을 일체화 시켜 급기 유로를 단순화 하며 동시에 시스템 운전 모드에 대한 효율성을 확보함. 또한 간접식 증발냉각기의 성능 향상을 위한 2차측 급기 선택을 위한 덕트 모듈을 개발하여 적용한 시스템을 도출하고, 본 시스템을 구축하기 위해 다음과 같은 기술을 제공함.

급기 유로를 단순화 한 액체식 제습시스템 및 간접식 및 직접식 증발냉각기 일체화 유닛 설계 기술 제공

간접식 증발냉각기 성능 향상을 위한 2차측 공기 선택을 위한 덕트 모듈 개발에 대한 기술 지도

- 본 연구를 통해 개발된 제습증발냉각 기반 전외기 공조시스템 상용화 유닛 시제품은 상용화를 위한 시스템 성능을 공인 하였으며, 이와 관련된 기술들에 대한 기술이전을 실시함에 따라 본 연구를 통해 도달하고자 했던 ‘저에너지 친환경 제습 증발냉각 기반 전외기 공조시스템의 실용화 기술 개발’을 성공적으로 완료함.
- 다음 그림 121은 본 연구를 통해 제안된 상용화 시제품의 기술이전에 관한 자료들을 나타내며, 제안된 시스템의 요소 기술 및 기술적 근거들을 바탕으로 한 기술이전 완료.

기술실시계약 보고서

사업명	국토교통기술혁신연구사업		
총괄과제명	지중 다중이용시설 공기질 및 에너지성은 향상을 위한 제습증발냉각 기반 전외기 공조시스템 상용화 기술 개발		
주관연구기관명	한양대학교 산학협력단	주관연구책임자	정재원
총 연구개발비 (단위: 천원)	2016.06.27~2019.04.27 (34개월)	참여기업명	(주)상화에이스
총 연구개발비 (단위: 천원)	정부출연금 880,000	기업부담금	302,000
실시계약 대상과제명	지중 다중이용시설 공기질 및 에너지성은 향상을 위한 제습증발냉각 기반 전외기 공조시스템 상용화 기술 개발		
실시계약 대상과제 총 연구개발비 (단위: 천원)	정부출연금 880,000	기업부담금	302,000
연구개발기간	한양대학교 산학협력단	연구책임자	정재원
실시계약 대상과제 연구기간	2016.06.27~2019.04.27 (34개월)	참여기업명	(주)상화에이스
연구개발결과물 소유기관	기관유형	비영리(), 영리 (), 중견기업(), 중소기업()	
	기관명	한양대학교 산학협력단	사업자등록번호 206-82-07306
	주소	(04763)서울시 성동구 왕십리로 222 한양대학교 산학협력단	
	부서명	산학협력단	담당자 박재원
	전화번호(한국대)	02-2220-2155	e-mail wofud89@hanyang.ac.kr
실시기업	기업명	(주)상화에이스	주소 서울특별시 서초구 반포대로22길 53
	사업자등록번호	139-81-12662	전화번호 070-4329-4599
기술실시계약명	지중 다중이용시설 공기질 및 에너지성은 향상을 위한 제습증발냉각 기반 전외기 공조시스템 상용화 기술에 관한 기술이전		
기술실시계약 체결일	2019.02.20	일시기간	2019.02.20. ~
기술실시계약형태	고정기술료(), 경쟁기술료(), 통합기술료()		
기술료징수방법	호정상기술료 "계약재원"에 대한 매출액의 3%		
기술료 총액(천원)	기술료 총액		
기술료 계획 (단위: 원)	구분	일차	금액
	1 차	20	20
	2 차	20	20
	3 차	20	20
	4 차	20	20
	5 차	20	20
관련 성과물	호노하우 판권 (중방자료 별첨)		
기타 특이사항			
국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제43조에 의거 불임과 같이 기술실시계약을 체결하여 보고합니다.			
발행: 1. 기술실시계약서 부 2. 실시기업 사업자등록증 1부			
2019년 04월 15일			
(한양대학교 산학협력단)			(직인)

기술이전 계약서

■ 계약 명칭 : “ 지중 다중이용시설 공기질 및 에너지성능 향상을 위한 제습증발냉각 기반 전외기 공조시스템 상용화 기술 ”에 관한 기술이전

2019년 2월 20일

계약당사자

“한”

주소: 서울시 성동구 왕십리로 222

기관: 한양대학교 산학협력단

대표: 단장 정 태 현

연구개발자: 건축공학부 정재원 교수

담당자: 산학협력팀

연락처: (02) 2220-2219

“을”

주소: 서울특별시 서초구 반포대로22길 53

상호: 위삼화에이스

대표: 대표이사 김 학 근

담당자: 연구개발팀

연락처: 070-4329-4599

그림 121. 본 연구 결과를 통해 도출된 상용화 기술에 대한 기술이전 자료

(3) 테스트베드 선정 및 시제품 설치

- 선행연구를 통해 개발된 시제품 유닛의 테스트베드 선정을 위해 지중 공간을 대표할 수 있는 적절한 조건의 테스트베드를 선정하고 지중 조건에서 시스템 운전이 가능한 시스템 설치 및 테스트 베드 구축을 수행함.
- 본 시제품 유닛은 주관연구기관인 한양대학교 산학협력단의 연구동 지하 공간을 테스트베드로 선정하고 선행연구를 통해 개발된 시제품유닛을 설치 적용하여 시스템 실증을 위한 테스트베드 구축을 완료함.
- 그림 122와 같이 시제품 유닛은 지하 3층 깊이의 공간에 설치되었으며, 선정된 테스트 베드는 지중 공간의 공기 특성 및 환경 특성을 대표할 수 있는 깊이를 고려하여 선정 하였으며, 지중 깊이는 지상으로부터 10.8m 지중 공간에 위치하고 있음.



그림 122. 시제품 설치 대상 테스트베드 지하 평면도 (한양대학교 연구동)

- 1차년도 연구 결과에 따라 지중 공간은 지상대비 공기의 상태 및 공기질의 변화를 뚜렷하게 대표할 수 있는 공간으로 선정된 테스트 베드는 여름철 및 겨울철 지상층 외기 대비 뚜렷한 온도 차이를 나타내는 것을 확인하여 적절한 테스트베드 선정이 된 것으로 판단됨.
- 또한, 건축 환경 및 재료 연구동으로 이용되고 있는 실내 조건에 따라 일정 조건의 공기질 오염원이 항시 발생하며, 동시에 실내 제습부하가 일정하게 유지되어 제습증발냉각 기반 전외기 공조시스템의 공기질 개선 성능 평가와 제습성능 평가에 적절한 테스트 베드로 판단됨.
- 지중 공간에 위치한 테스트베드 특성으로 인해 시스템에 도입되는 외기는 일반적인 지중공간과 동일하게 지하층으로 연결된 공기 풍로를 이용하여 시스템에 외기를 도입함.
- 테스트베드 선정 이후 최종 상용화 단계의 시제품은 2차년도 실험 중에 설치되어 성능 분석 및 운전 특성이 파악된 파일럿 시스템을 개선할 수 있는 몇 가지 성능 개선안들이 적용되어 설계 및 제작 구축하였음.
- 그림 123은 최종 단계의 상용화 시제품의 개요도를 나타냄. 2차년도 파일럿에 적용된 자동제어 알고리즘 적용을 위한 제어방안의 간략화를 위한 시스템 단순화 및 시스템 전체 사이즈를 감소시키기 위한 시스템 컴팩트화를 수행함.
- 액체식 제습시스템의 제습수용액 공급 유량을 제어할 수 있는 전자식 비례제어 밸브를 추가적으로 설치하여 요구에 맞는 수용액 공급 유량을 제어할 수 있도록 적용 하였으며, 비례제어 밸브 적용을 통해 액체식 제습시스템의 제습부 및 재생부에 공급되는 수용액의 질량유량 비율을 일정 수준으로 유지시켜 각각의 수용액 탱크 수위를 제어할 수 있도록 함 (그림 124).

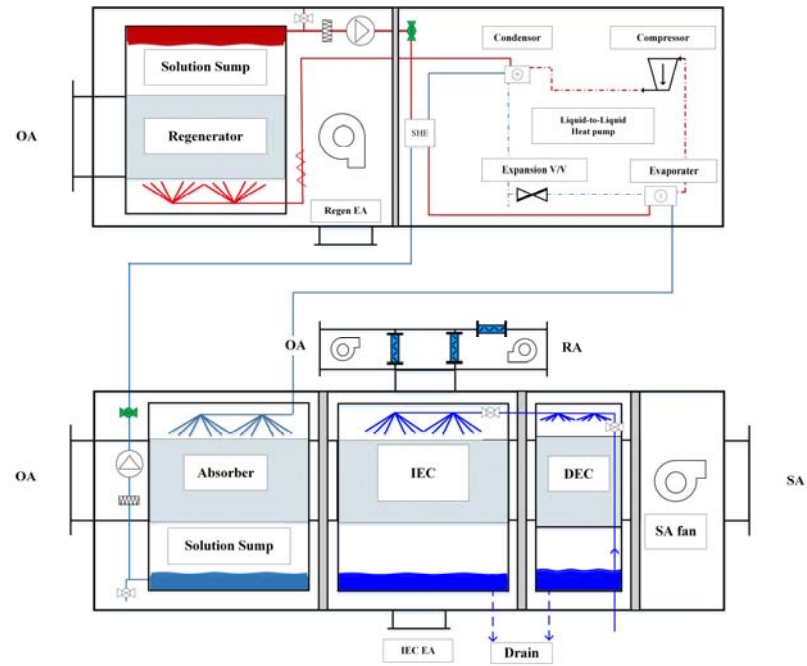


그림 123. 지중 공간 테스트베드 및 시제품 설치 구축 완료



그림 124. 제습수용액 공급 유량 제어를 위한 전자식 비례제어 밸브 구축 사례

- 또한, 시스템 성능 개선안의 일환으로 간접식 증발냉각기의 2차측 공기를 선택할 수 있는 덕트 모듈을 구현 하였으며, 실내 배기와 외기의 습구온도를 비교하여 낮은 습구온도를 나타내는 공기를 공급함을 통해 간접식 증발냉각기의 간접식 증발냉각 성능을 향상시킴.

- 2차년도 시제품에는 간접식 증발냉각기 2차측으로 공급되는 공기를 선택할 수 없이 실내의 배기만을 공급하도록 설계 및 구축 되었으나, 해당 시제품이 적용될 지중 공간의 여름철 환경 특성에 따라서 보다 낮은 습구 온도 값을 갖는 외기와외의 비교를 통해 조금 더 낮은 습구 온도를 지니는 공기를 공급해야하는 필요성을 확인함.
- 이에 따라서 외기 및 실내 공기의 습구 온도를 계측하여 낮은 습구 온도를 나타내는 공기를 간접식 증발냉각기 2차측으로 공급할 수 있도록 설계 변경을 실시함. 그림 125는 간접식 증발냉각기 성능을 향상시키기 위한 공기 선택 과정을 나타냄.

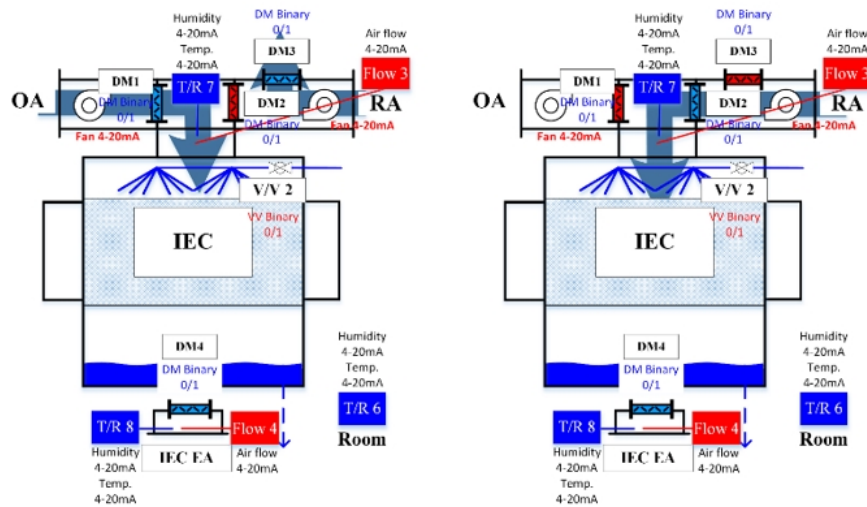


그림 125. 간접식 증발냉각기 성능 향상을 위한 급기 공급 방안 개요도

- 이에 따라서 외기 및 실내 공기의 습구 온도를 계측하여 낮은 습구 온도를 나타내는 공기를 간접식 증발냉각기 2차측으로 공급할 수 있도록 설계 변경을 실시함. 그림 125는 간접식 증발냉각기 성능을 향상시키기 위한 공기 선택 과정을 나타냄.
- 따라서 간접식 증발냉각기 성능 향상을 위한 덕트 모듈을 구축하기 위해 추가적인 모듈 디자인을 수행하고 그림 125와 같은 외기 및 실내 공기의 습구 온도 비교에 따른 2차 측 공기 급기 방안을 수립함. 수립된 급기 공급 방안에 따라서 이를 최종 단계의 시제품 실시 설계에 반영 하였으며, 그림 126과 같음.

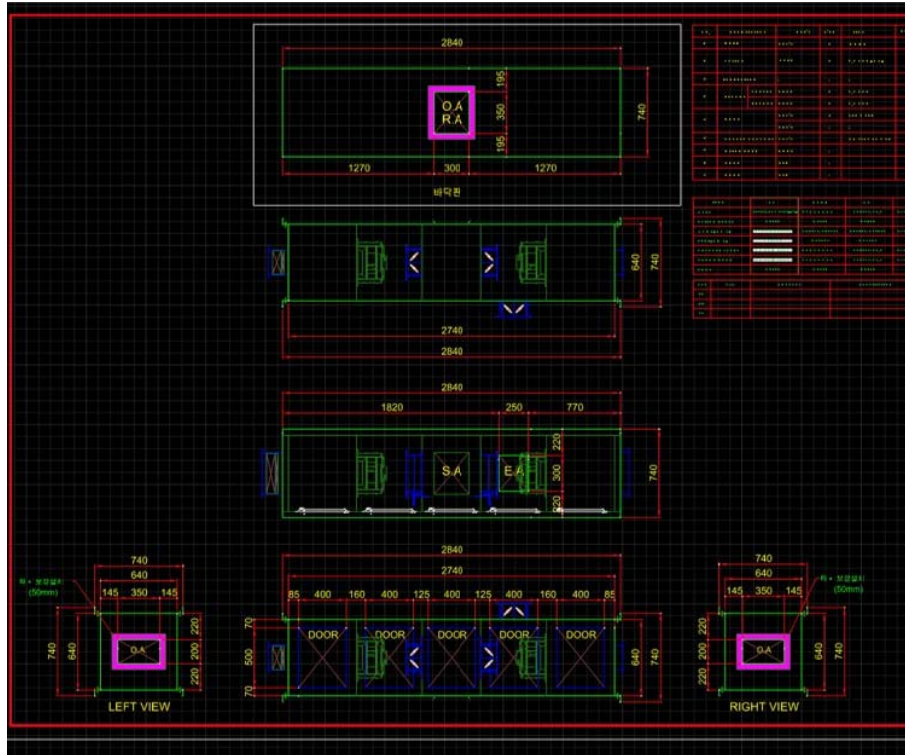


그림 126. 간접식 증발냉각기 성능 향상을 위한 2차 측 덕트 모듈 실시 설계안

- 여름철 및 중간기 간접식 증발냉각기의 성능 향상을 위한 2차 측 덕트 모듈 도출 및 설계 변경을 통한 최종 시제품 유닛에 적용. 본 시스템은 시제품 유닛 상부에 별도로 설치되어 간접식 증발냉각기 운전 시 외기와 실내 공기의 습구 온도 비교를 통해 낮은 습구 온도를 지니는 공기를 공급할 수 있도록 시스템 운전이 가능하게 구축됨.
- 그림 127은 최종 시제품 유닛에 적용된 간접식 증발냉각기 2차 측 덕트 모듈 실제 구축 사례를 나타냄. 본 덕트 모듈 적용을 통해 간접식 증발냉각기 운전 시 2차 측 공기의 습구 온도가 낮아지는 효과를 통해 간접식 증발냉각기 성능 향상이 가능 할 것으로 판단됨.



그림 127. 간접식 증발냉각기 성능 향상을 위한 2차 측 덕트 모듈

- 또한 프로토타입 운전을 통해 분석된 개선안 중 하나로 액체식 제습시스템 운전 시 제습수용액의 비산을 방지할 수 있는 비산방지 대책을 최종 단계의 시제품 유닛에 적용함. 그림 128은 최종 단계의 시제품 유닛의 실시 설계안을 나타내며, 이때 적용된 액체식 제습시스템은 추가적인 수용액 비산방지 대책안이 적용된 설계를 반영함.

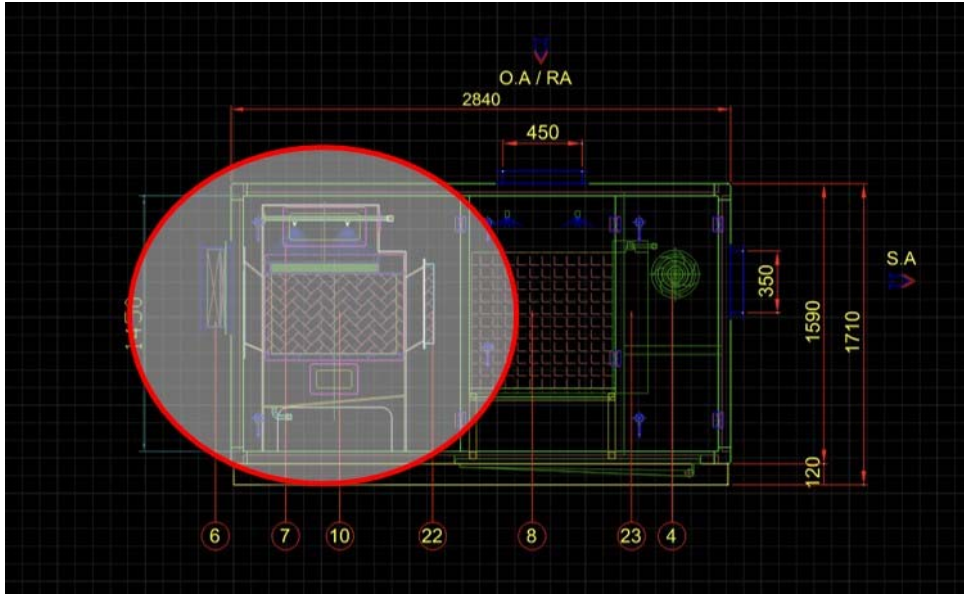


그림 128. 연구개발 최종 단계의 시제품 유닛 실시 설계 및 제습부 설계

- 액체식 제습수용액의 비산을 방지하기 위해 수용액 분사 부분을 전체 면적에서 일정 부분만을 분사하고 나머지 면적은 수용액이 직접적으로 닿지 않도록 분사 구역을 수정함. 또한 수용액 분사 부분에 분재 여재 및 분리막을 설치하여 분사 면적을 정확히 구분하여 분사 구역에 포함된 제습 여재만 수용액이 분사될 수 있도록 설계 변경함.

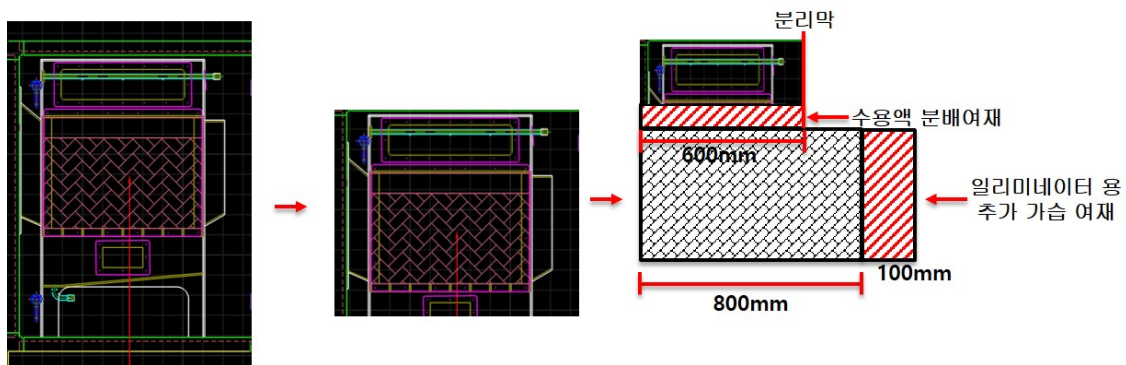


그림 129. 제습수용액 분사 구역 선정 및 비산 방지를 위한 대책

- 그림 129와 같이 기존 수용액 분사 구간을 최종적으로 분배구역 선정 및 분리막 설치를 통해 제습수용액이 공급되는 구역을 분리하고, 수용액 분배구역 제습여재 상부에 추가적인 수용액 분배 여재를 설치하여 제한된 영역만을 수용액이 공급될 수 있도록 구축함.
- 또한 제습부를 통과하는 급기측에 추가적인 비산 방지용 가습여재를 설치하여 만일에 발생할 수

있는 수용액 비산을 방지할 수 있도록 구현함.

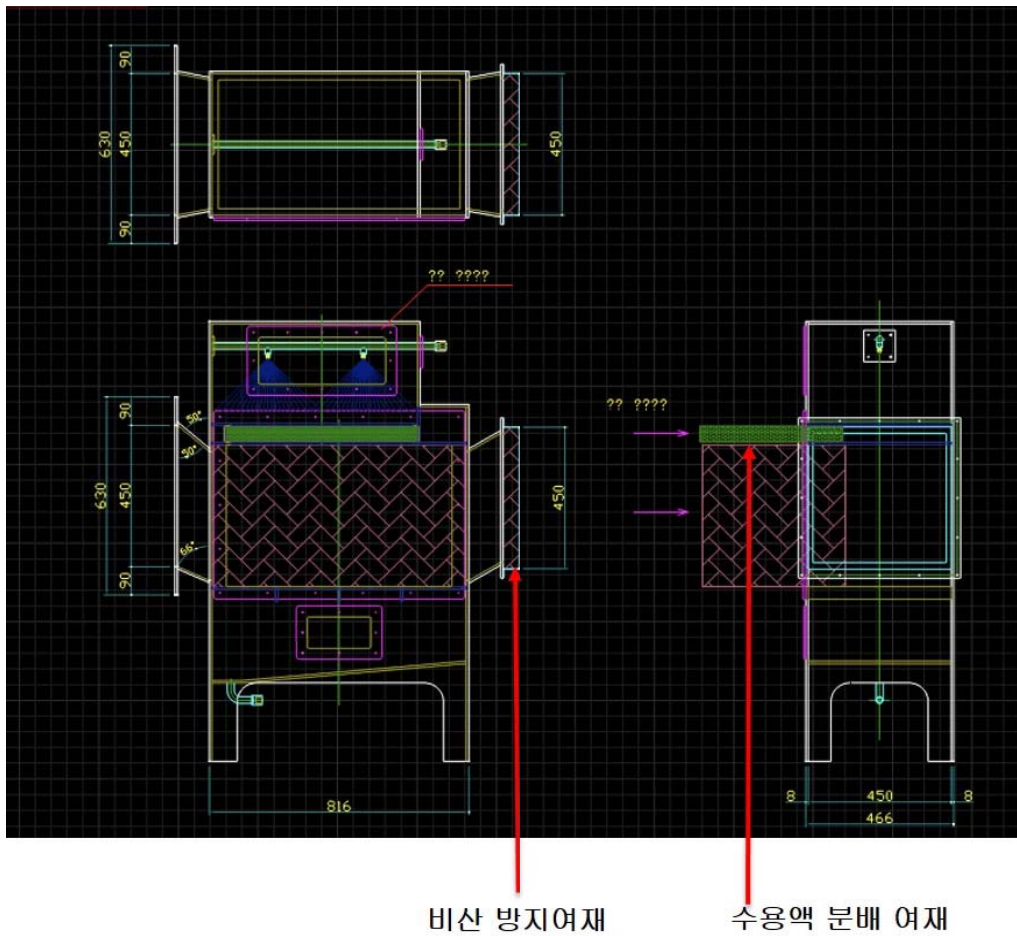


그림 130. 제습수용액 비산 방지를 위한 대책 실시 설계

- 그림 130과 같이 수용액 비산 방지대책이 적용된 설계 변경을 통해 시스템 내부 제습수용액 비산을 방지하고 급기측에 포함될 수 있는 수용액 미세 액적을 제거할 수 있는 비산방지대책을 실시 설계에 반영하고 이를 토대로 최종 단계의 시제품 유닛을 구축함.

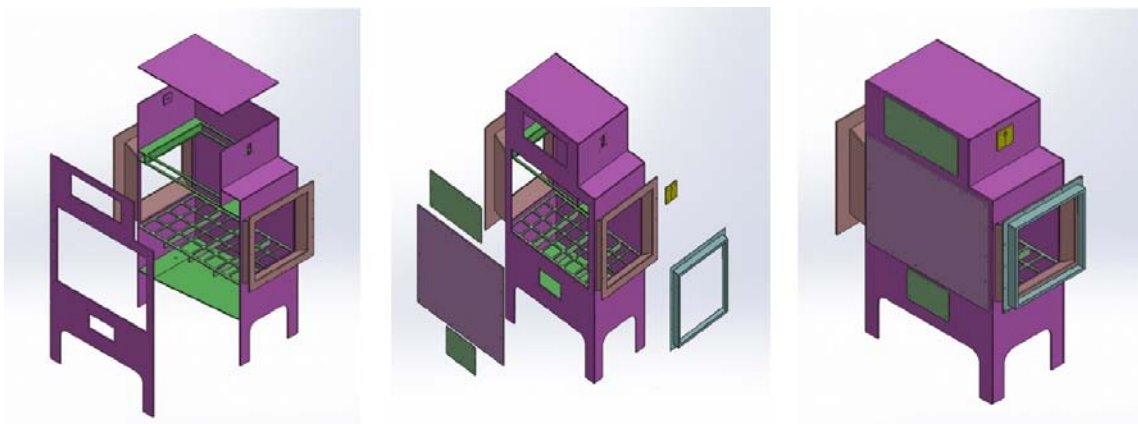


그림 131. 제습부 및 재생부 3D 조립도

- 또한 2차년도 평가에서 발생한 제습부 및 재생부 접합 관련된 문제점을 해결하기 위해 제습부

및 재생부를 구성할 수 있는 모든 구성 요소들을 각각 제작하고 이를 3D 조립도를 작성하여 시스템 안정성 및 내구성 향상을 도모함 (그림 131).

- 위와 같은 제습부 및 재생부 개선안 및 간접식 및 직접식 증발냉각기 개선안 도출에 따라 최종 단계의 시제품 제작 과정에서는 기존 선행 연구를 통해 발생했던 개선안들을 시제품에 적용하고 최적의 시스템 제작 및 테스트베드 구축이 가능하도록 시제품을 제작함 (그림 132).

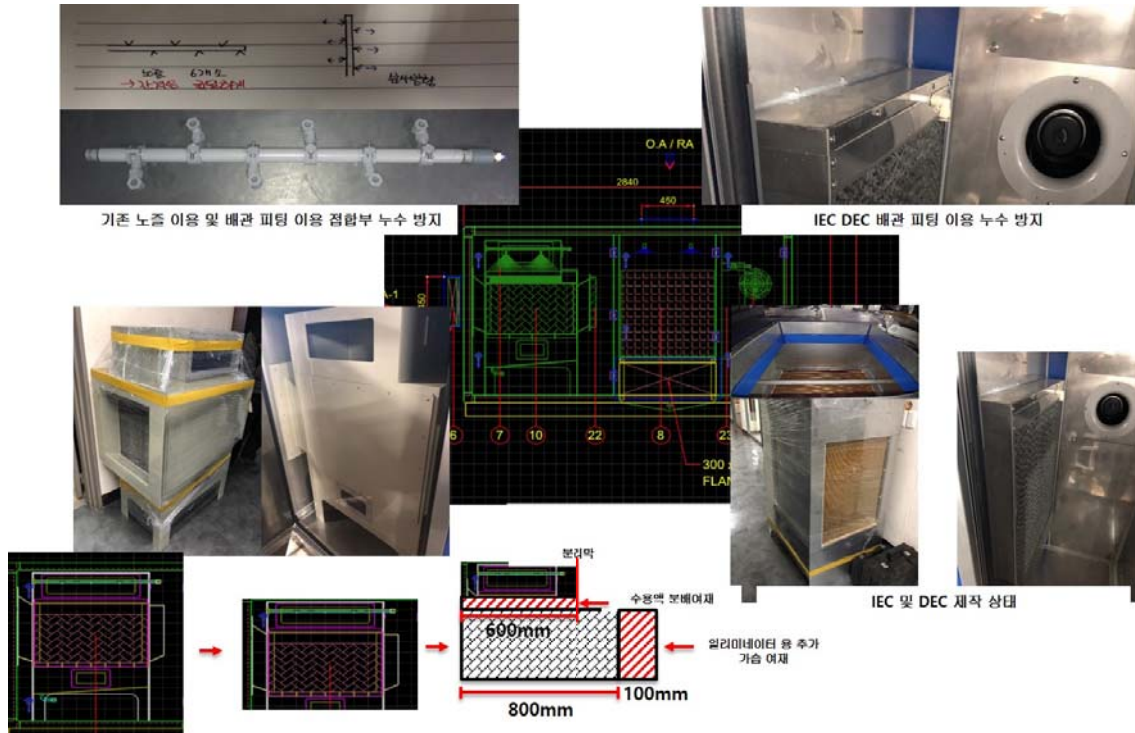


그림 132. 최종 단계 시제품 제작을 위한 각 부분별 개선사항 적용

- 시제품 냉방 운전 시 히트펌프 시스템의 안정적인 냉각 및 가열열원 공급을 위해 히트펌프 설계 값 변경 및 인버터 드라이버 설치를 통해 요구되는 부하에 맞는 시스템 운전이 가능하도록 설계 반영 및 구축을 완료 함.

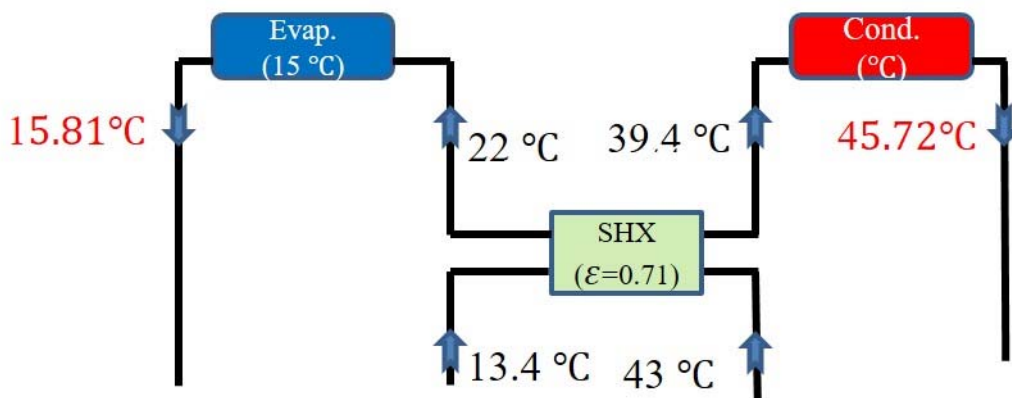


그림 133. 히트펌프 설계 값 변경에 따른 설계 시 증발기 및 응축기 설정 조건

- 변경된 히트펌프 설정 조건을 바탕으로 히트펌프 시스템은 추가적인 구축 방안 변경을 통해 시

제품 유닛 내부에 일체화 시켜 제작을 완료함. 또한 인버터 드라이버 설치를 통해 압축기 회전수 제어를 통한 시스템 부하에 맞는 운전을 가능하게 함으로서 시스템 에너지 소비 성능을 향상시킴.



그림 134. 히트펌프 구축 사례 및 인버터 드라이버 설치

- 인버터 드라이버 운전을 위해 요구되는 히트펌프 운전 부하는 액체식 제습수용액 공급 온도를 바탕으로 시스템 운전이 가능하도록 설계 되었으며, 히트펌프 시스템 증발기에서 토출된 제습수용액 공급온도 (제습부 공급온도)를 기준으로 압축기 주파수가 제어되어 운전될 수 있도록 구축.
- 액체식 제습수용액 공급온도 제어 방안은 PID 제어기를 설치하여 설정된 수용액 공급온도와 실제 계측되는 수용액 공급 온도를 기준으로 압축기 회전수 제어 신호를 송출 할 수 있도록 구성 되었으며, 이를 적용해 부하에 맞는 히트펌프 운전이 가능하도록 구축 완료 함.



그림 135. PID 온도제어기와 히트펌프 압축기 인버터 제어기 연동

- 각각의 시스템 성능 개선 및 안정성 확보 방안이 적용된 최종 단계의 시제품 유닛은 그림 133과 같이 지중 테스트베드에 구축을 완료함. 그림 136과 같이 지중 공간을 대표할 수 있는 테스트베드에 최종 단계의 시제품 구축이 완료됨.



그림 136. 최종 단계 시제품 실제 구축 사례

- 지중 테스트베드에 구축된 최종 단계의 시제품 유닛의 성능 개선에 가장 중요한 요소로 판단되는 간접식 증발냉각기 성능 개선안 적용 사례는 그림 137-138과 같음. 실제 시스템 구축에 따른 댐퍼 개폐 방안 및 팬 운전 방안등의 알고리즘을 도출하고 이를 실제 시제품 유닛에 적용하여 시스템 여름철 및 중간기 성능 개선 방안을 적용함.

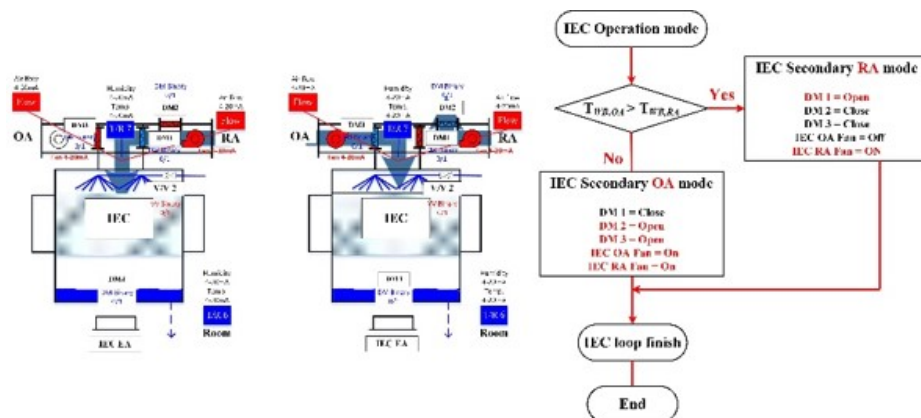
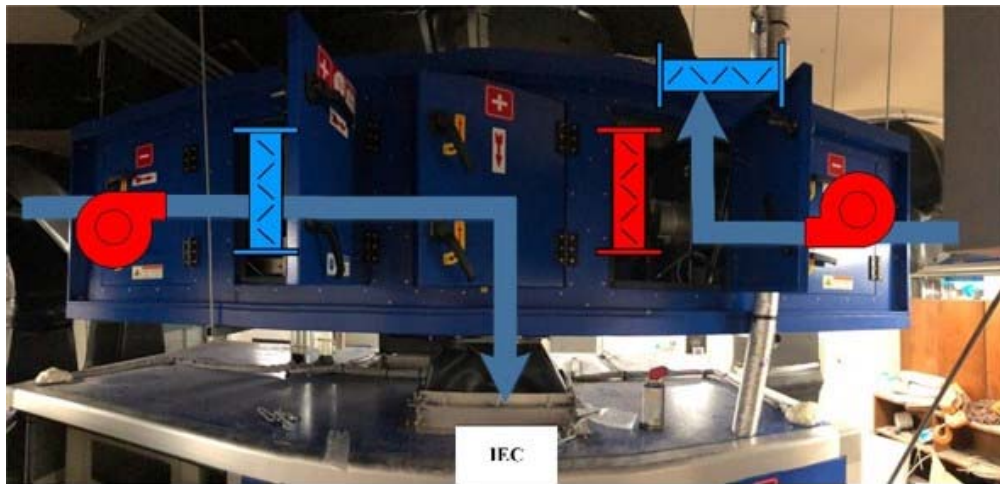
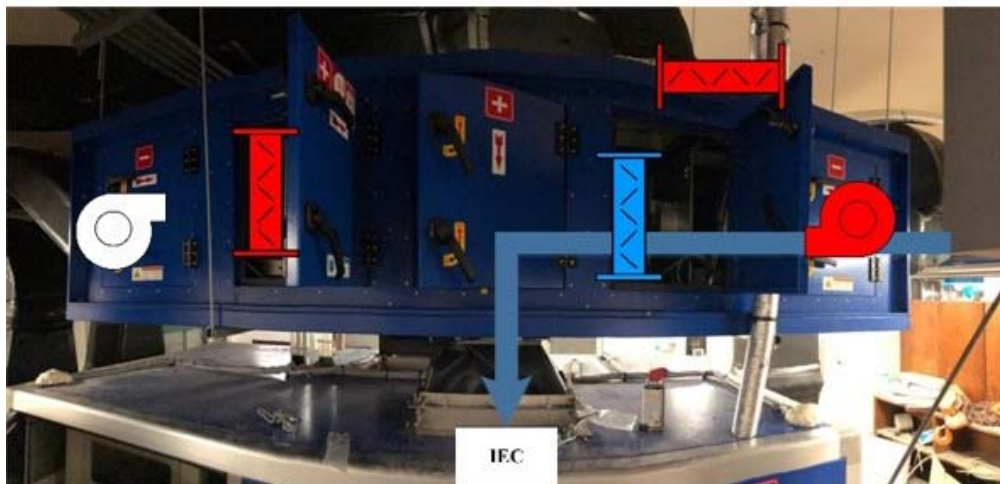


그림 137. 간접식 증발냉각기 성능 개선 방안 적용 알고리즘



IEC Secondary OA Mode



IEC Secondary RA Mode

그림 138. 간접식 증발냉각기 성능 개선 방안 적용에 따른 시스템 운전 방안

- 시제품이 설치될 지중 공간을 대표할 수 있는 테스트베드를 바탕으로 최종 단계의 시제품 유닛의 안정적인 운전을 위해 요구되는 전원 및 전기설비 구축을 완료하고 이를 자동제어 시스템 구축을 위한 제어 장비와 함께 결합하여 시스템 외부에 자동제어 및 모니터링 시스템 구축을 완료함.
- 최종 시제품 유닛에 적용된 전기를 소비하는 구성요소들은 시스템 측면부에 설치된 전원설비에 의해 전력을 공급받음. 각 구성 요소별 요구되는 전기 소비 특성에 따라 상, 전압, 및 전류가 적절히 제어되어 공급될 수 있도록 구축 완료.
- 전체 시스템에 들어오는 메인 전원 차단기 및 각 구성요소 별 전원 공급상태 및 시스템 내부에 구축된 센서 및 자동제어 시스템의 입출력 신호를 확인할 수 있는 자동제어 패널을 함께 구축하여 테스트베드 내에서 안정적인 시스템 평가가 가능하도록 구축.
- 표 40에 테스트베드 내에 구축된 시제품 유닛을 구성하는 각 구성 요소별 장치 특징을 분류함. 각 구성 요소는 선행연구에서 도출된 연구 결과를 바탕으로 설계 및 제작되어 장치 내부를 구성함.

표 40. 연구개발 최종 단계 시제품 구성 요소 설계 값

Liquid desiccant (Absorber and Regenerator)	Pad size	mm	800x450x450
	(WxDxH)	kg/s	0.33
	Solution mass	m ³ /h	1000
	flow	-	CELdek
	Air flow rate	-	LiCl
	Packing media Solution		
Indirect evaporative cooler	Pad size	mm	600 x800x800
	(WxDxH)	-	Aluminum
	Material	%	65
	Rated effectiveness		
Direct evaporative cooler	Pad size	mm	200x300x600
	(WxDxH)	-	CELdek
	Material	%	90%
	Rated effectiveness		
Heat pump	Cooling Capacity	kW	6.5
	Heating Capacity	kW	7.8
	Type	-	Liquid-to-Liquid
	HX effectiveness	%	70
	Refrigerant	-	R-134A
	Rated HP	PS	3
	Actual HP	PS	7
Fan	Rated air flow	m ³ /h	1000
	rate	m ³ /h	1500
	Actual air flow rate		
Pump	Mass flow rate	Kg/s	0.33
Monitoring system	Program	-	Labview



그림 139. 테스트베드에 구축된 시제품 유닛 전원 및 자동제어 신호 처리 설비

- 본 연구를 통해 개발될 시제품 유닛의 지중 공간에서의 시스템 성능 파악 및 실증 연구를 위한 테스트 베드 선정 및 시제품 운전을 위한 시스템 및 전기 설비 및 자동제어 설비 구축이 완료됨 (그림 139).
- 앞서 언급된 내용과 같이 본 시제품의 지중 공간에서의 시스템 실증 연구는 지중 공간을 대표할 수 있는 테스트베드 선정 및 적절한 외기 도입 방법, 시스템 성능 구현 연구 등의 선행 연구를 통해 연구 개발 최종 단계인 시스템 상용화 성능 분석을 위한 준비를 완료함.

(4) 자동제어 및 모니터링 시스템 설치

- 본 시제품 유닛은 외기 조건에 따라 시스템 운전모드 변경을 통해 급기 설정 조건을 달성할 수 있도록 운전되어야 함. 따라서, 도입된 외기의 조건에 맞게 시스템 운전모드를 결정하고 이를 구

현하기 위한 자동제어 시스템이 필수적으로 요구됨.

- 선행 연구를 통해 제안된 계절별 운전 모드를 구현하기 위해 시제품 내부에 설치되어 있는 댐퍼 및 팬, 펌프 등과 같은 구성요소들을 운전 모드에 맞게 작동시킬 수 있는 자동제어 시스템을 설계하고 테스트베드 내 시제품 유닛에 연동하여 구축 완료.
- 자동제어 시스템은 크게 모니터링 시스템 및 자동제어 장치, 그리고 시스템 운전 상태를 확인하고 저장하는 데이터 장치로 구성됨. 모니터링 시스템은 Lab View를 적용해 시스템 모니터링 및 자동제어 알고리즘이 적용 가능하도록 구성함.
- 시제품 자동제어 시스템을 통해 장치 내부에 설치된 센서 및 구성 요소들에 대한 운전 신호 등을 전달할 수 있도록 구현되었으며, 동시에 측정된 데이터를 1분당 24시간 연속으로 저장할 수 있도록 설정함.
- 시제품 유닛의 특정 성능 평가를 위해 요구되는 개별 제어가 가능한 수동제어 모드 또한 모니터링 시스템 내부에서 적용 가능하도록 구축되어 시스템 성능 평가를 위한 실험자의 요구에 맞도록 장치 운전이 가능하도록 구축 완료 함 (그림 140).

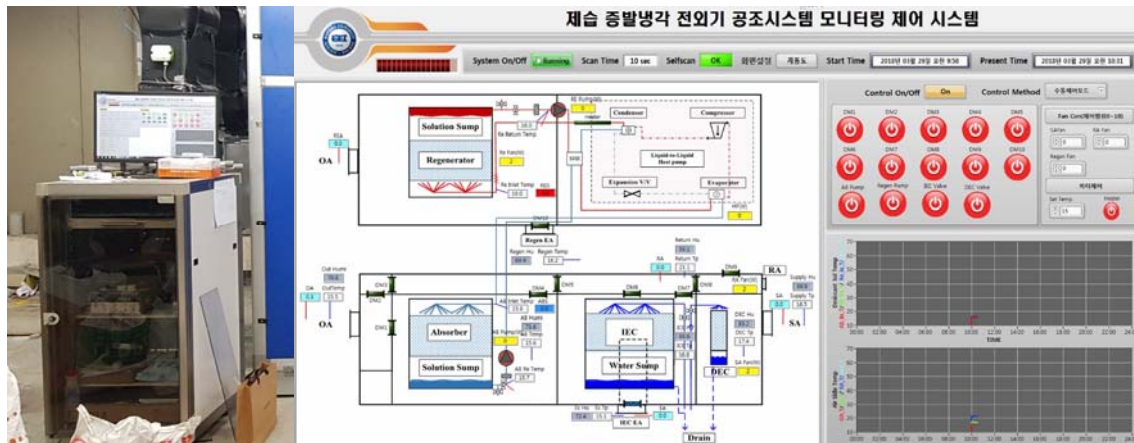


그림 140. 시제품 자동제어 시스템 및 모니터링 화면

- 시제품 운전 시 각 시스템 내부 운전에 따른 공기 및 수용액, 구성 요소들의 운전 상태를 확인하기 위한 모니터링 장비 설치를 완료함. 그림 141과 같이 시스템 내부 각 위치별 온도 및 습도, 유량계 등의 계측 장비를 설치하여 시제품 운전 상태를 모니터링 할 수 있도록 구현.
- 시제품 운전에 따른 공기의 열적 상태를 파악하기 위해 시스템 내부에는 8개의 온습도 센서가 설치되어 공기 변화를 계측함.
- 또한 4개의 유체 온도 센서를 제습수용액 배관에 설치하여 액체식 제습수용액의 제습부 및 재생부 공급 온도 및 토출 온도를 모니터링 할 수 있도록 설치하였으며, 제습수용액의 농도는 밀도계를 이용하여 시제품 운전 직전에 농도를 측정하여 제습수용액 조건을 계측함.
- 추가적으로 시스템에 도입된 공기의 풍량과 냉방 운전 시 액체식 제습시스템 운전에서 제습수용액 공급 유량을 확인하기 위해 5개의 풍량 센서와 2개의 유량 센서를 설치하여 시제품 운전 시 시스템 내부의 액기비를 평가할 수 있도록 구축하였음.
- 표 41에 모니터링 시스템 구축을 위해 적용된 센서들의 계측 특성을 분류 하였으며, 각각의 계측기 계측 범위 및 계측 오차는 추후 시스템 운전 데이터 분석 과정에서 모니터링 데이터의 정확성

을 확보하기 위한 자료로 검토하였음.

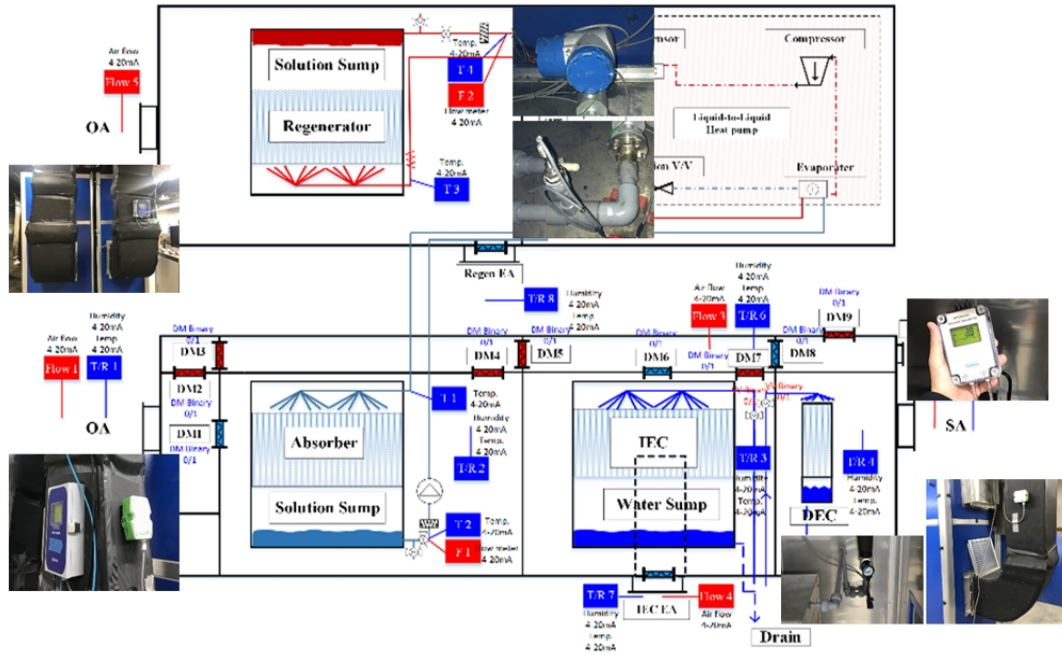


그림 141. 모니터링 시스템 구축을 위한 계측장비 설치 상세

표 41. 계측 장비 별 특성

Device	Type	Characteristics		
Temperature and humidity sensor	THD-R(room)-1-PT/C	Range	Temperature	-19.9℃ – 60.0℃
		Accuracy	Humidity	0.0 – 100 %
			Temperature	± 0.5 °C (5.0 – 40.0 °C)
				± 1.0 °C (40.0 – 60.0 °C)
			Humidity	± 3.0 % (40.0 – 60.0 %)
				± 4.0 % (20.0 – 40.0 %) (60.0 – 80.0 %)
Air flow transmitter		Power supply	DC 24 V	
		Output	4-20 mA	
		Signal		
		Range	0 – 2.5 kPa (0 – 10 inch H ₂ O)	
Air flow	Differential pressure sensor	Accuracy	± 0.5 %	
		Power supply	DC 24V	
		Output signal	4-20 mA or 0-10 V	
		Range	0-1250Pa	
1. Static pressure	2. Differential pressure sensor	Accuracy	± 0.3%	
		Power supply	DC 24V	
		Output	7. 4-20 mA	
		Range	0.055 – 1000 m ³ /h	
Flow meter	Magnetic flow meter	Accuracy	± 0.5 %	
		Power supply	DC 24V	
		Output signal	4-20 mA	
		Range	0.055 – 1000 m ³ /h	
Temperature sensor	RTD	Accuracy	± (0.15 + 0.002t) °C	
		Power supply	DC 24V	
		Output signal	0-10 V	
		Range	-50 – 150 °C	
Density meter	Glass hydrometer	Accuracy	1 kg/m ³	
		Range	1.00 – 1.40 kg/m ³	

- 시제품 유닛 자동제어 및 모니터링 시스템 구축을 위한 하드웨어 구축을 완료하고 실제 시제품 운전을 위한 자동제어 및 모니터링 시스템에서의 장치 운전 특성을 정립함.
- 시제품 운전 시 시스템 특성과 운전 안정성 확보를 위해 설정해야 하는 변수 및 시스템 상태들을 규정하고 본 연구의 최종 목표인 상용화 유닛의 성능 확보 및 실증을 위한 연구를 수행하기 위한 자동제어 및 모니터링 시스템 단계별 적용 상태를 계획함.
- 시제품 유닛은 시스템 운전 시 자동제어 모드를 통해 시스템이 구동 될 경우 도출된 계절별 운전 모드에 따라 시스템 내부에 입력된 자동제어 알고리즘을 통해 모든 시스템이 자동으로 운전됨. 시스템에 도입된 외기의 온도 및 습도 조건을 계측하고 선행 연구를 통해 제안된 자동제어 알고리즘을 통해 시스템 모드를 자체적으로 판단하고 이에 따른 운전 모드를 결정해 시스템이 운전 됨.
- 실제 시제품 유닛의 자동제어는 모니터링 시스템에서 자동 및 수동 제어를 선택할 수 있도록 구축 하였으며 모니터링 시스템에서 자동제어 모드를 선택 할 경우 앞서 언급된 외기 조건을 바탕으로 시스템 운전을 결정함.
- 항시 계측되는 외기의 온도 및 습도값을 바탕으로 시스템 자동제어 모드가 결정되면 각 계절별 운전 모드에 맞는 급기 유로를 형성하기 위한 시제품 유닛 내부의 댐퍼 포지션이 변동됨. 이때 운전 모드에 따른 급기 유로는 댐퍼 구동에 따라 운전 모드 선정 이후 180초 이내에 결정됨.
- 또한, 시제품 운전 모드가 선택되고 난 후 내부에 설치되어 있는 반송동력원 또한 자동으로 운전 되게 되며, 액체식 제습수용액 공급을 위한 수용액 펌프, 간접식 및 직접식 증발냉각기 급수를 위한 전자식 개폐 밸브 개도 또한 결정되어 제습수용액 및 급수를 공급하도록 설정됨.
- 시제품 자동제어 모드 운전에 따라 설정된 급기 유로 및 반송동력원 구동과 별도로 시스템 안전성 확보를 위한 장치로 제습수용액 열원 공급을 위한 히트펌프 및 팬의 구동은 수동으로 제어할 수 있도록 고려함.

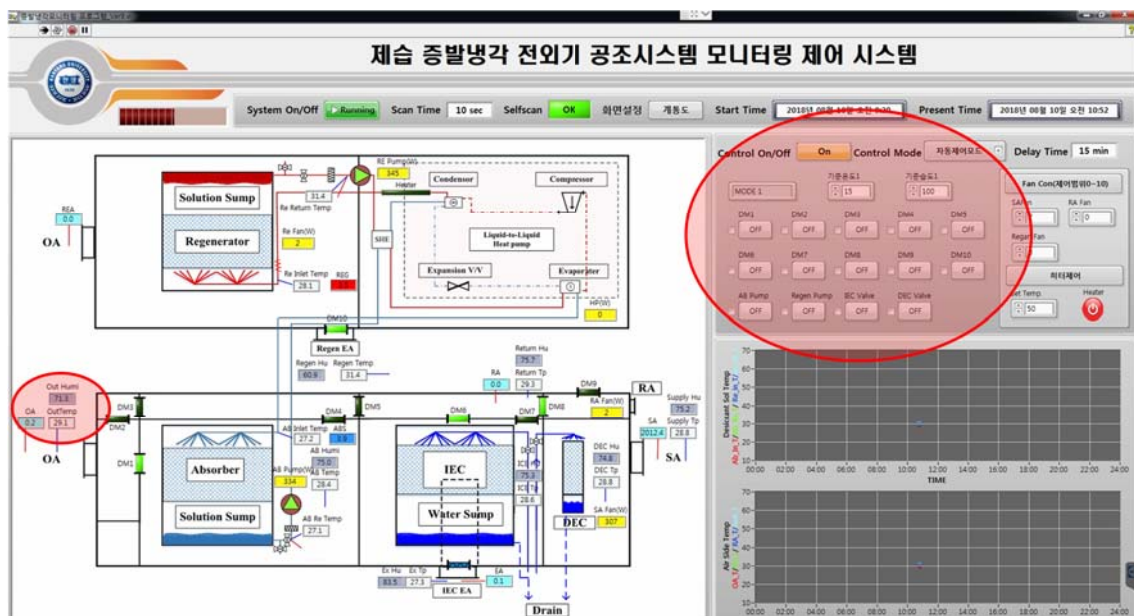


그림 142. 시제품 모니터링 시스템을 통한 운전 방식 선택 상세

- 그림 142와 같이 시제품의 모니터링 시스템 내에 시스템 자동제어 및 수동제어 모드 선택, 기타

안정 장치들을 고려한 제어 수단들을 마련함. 또한 그림 143과 같이 시제품 내부에 설치된 팬의 주파수를 별도로 제어할 수 있는 입력창을 통해 최종적으로 시스템 구동을 가능하게 하며, 팬의 주파수 신호는 0~10으로 급기 풍량을 모니터링 하며 요구하는 풍량을 맞출 수 있도록 구현함.



그림 143. 시제품 팬 제어를 위한 제어값 입력창

- 추가적으로 시제품 냉방기 운전에서 히트펌프 시스템을 활성화 시켰을 경우 히트펌프 증발기 설정 온도에 따라 응축기에서 토출되는 수용액의 재생부 공급온도가 결정됨. 본 시제품에 설치된 히트펌프 시스템은 설계 조건에서 응축기 토출 수용액 온도는 65℃로 설계 되었으나, 실제 시스템 운전 시 외기 조건 및 수용액 열교환 조건에 따라 설계된 공급 온도를 달성할 수 없는 경우가 발생하고 이를 해결하기 위해 보조 히터가 추가적으로 설치됨.
- 보조 히터는 활성화 버튼 및 토출온도 설정이 가능한 제어를 통해 안정적으로 운전 되며 재생기에 공급되는 수용액 공급온도를 바탕으로 설정 온도 이상의 공급 온도에서는 자동으로 Off 되어 안정성을 확보함.
- 시제품 유닛의 수동제어 모드에서는 모니터링 시스템에서 100% 수동으로 제어할 수 있도록 구현됨. 이는 시스템 성능 분석을 위한 특정 실증 단계에서 인위적인 목적에 따라 각 구성요소들의 성능을 분석할 수 있도록 시스템 운전 조건 모사를 가능하게 함.

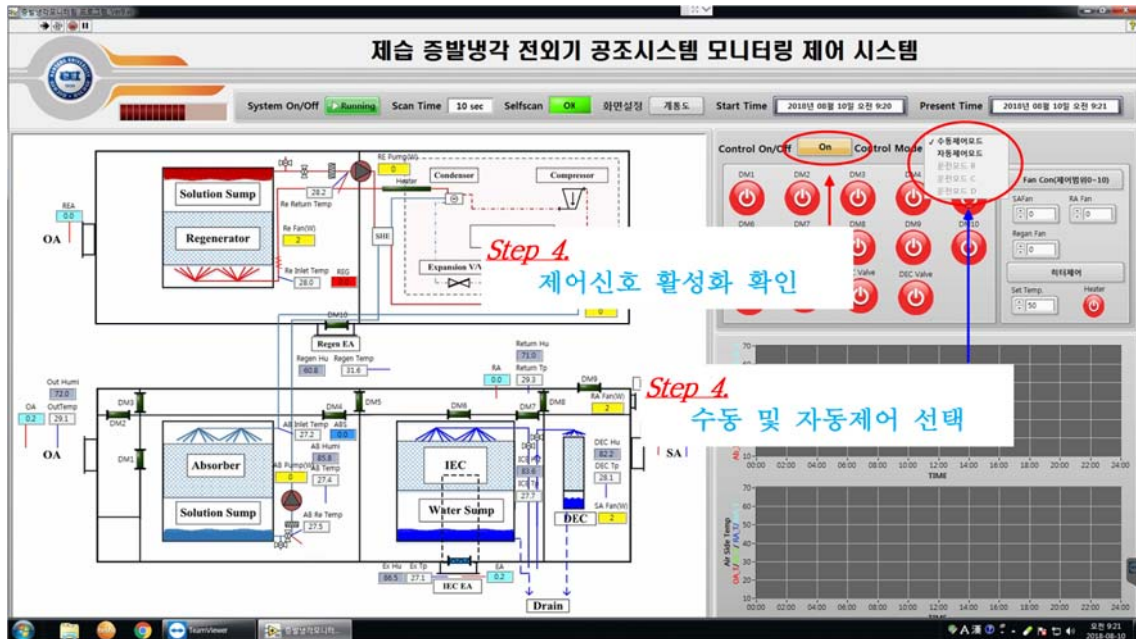


그림 144. 모니터링 시스템 내 수동제어 선택 상세

- 그림 144와 같이 시제품 유닛은 시스템 운전 선택 과정에서 수동 또는 자동제어 모드를 선택할 수 있도록 구현 되었으며, 시제품 운전 특성 및 실험 목적에 맞는 시스템 운전이 가능하도록 함.
- 시제품 유닛 운전을 통해 확인되는 시스템 상태 및 운전 특성을 분석하고 장단기 성능 데이터를 확보하기 위해 모니터링 및 자동제어 시스템과 연동된 데이터 구축이 가능한 데이터 저장 장비를 구축함.
- 저장 데이터는 시스템 내부 공기 또는 수용액, 반송동력원 및 히트펌프의 전기에너지 소비 등과 같은 각 구성부에서 대표되는 계측 값들을 자동 저장될 수 있도록 구현 하였으며, 시스템 운전 상태들을 저장하여 시제품 성능 실증 후 유의미한 데이터 분석이 가능하도록 함.
- 본 연구를 통해 개발된 제습증발냉각 기반 전외기 공조시스템 상용화 시제품의 자동제어 및 모니터링 시스템 구축을 통해 시스템의 안정적인 운전 및 상태를 확인할 수 있으며, 모니터링 시스템 및 자동제어 시스템 구축을 통해 시제품 장단기 성능 데이터 확보 및 운전 특성을 분석할 수 있는 유의미한 운전 데이터 확보가 가능함.
- 모니터링 및 자동제어 시스템 구축에 따른 시제품 유닛의 안정적인 운전 및 성능 구현을 통해 본 시제품의 상용화 가능성 및 시스템 성능 검증이 가능한 수준의 시제품 구축이 완료됨.

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

- 본 연구는 표 5에 정리된 연구개발 최종 목표를 달성하기 위해 총 34개월 동안의 각 년차별 연구를 통해 제습증발냉각 기반 전외기 공조시스템 상용화 시제품 개발을 완료하고, 개발된 시제품의 설계 및 제작을 통해 지중 공간을 대표하는 테스트베드에 시제품설치를 완료 함.
- 테스트베드에 구축된 시제품 유닛의 목표성능을 검증하고 상용화 가능성 실증 및 공인성적시험 분석을 통해 시스템 성능을 검증함. 또한, 본 연구개발을 통해 도출된 연구결과 및 요소 기술 등을 기술이전을 통해 시제품 상용화가 가능한 준비를 완료함.
- 연구개발 초기 단계에서 설정한 각 년차별 연구 목표 및 내용을 바탕으로 세부 연구목표 달성 여부 및 성과 점검을 통해 각 단계별 연구 수행의 적절성 및 연구 성과에 대한 자체평가를 통해 본 연구 수행 과정을 평가함.

3.1 1차년도 연구개발 성과 평가

가. 1차년도 연구개발 성과 점검

- 1차년도 연구에 대한 연차 점검을 통해 수행된 연구개발 과제의 성취도를 파악하고 동시에 본 연구 책임자가 평가한 성취도를 분석함. 우선, 계획된 1차년도 연구계획에 따라서 각 부분별 연구 성취도는 “완료”, “완료예정”의 두 가지로 분석을 실시함. “완료”의 경우 모든 연구개발 성과가 100% 수행되었음을 의미하며, “완료예정”의 경우 70-80%의 수행 완료를 의미하며 당해 연도 잔여기간 또는 차년도 연구기간 중 완료될 것을 나타냄.

표 42. 1차년도 각 연구 부분별 연구 성취도

1차년도 연구개발 내용		성취도		성취도 평가 지표
		완료	완료 예정	
주관 연구기관 (한양대학교 산학협력단)	기존 지중 다중이용시설 공조시스템의 개선점 도출	○		기존 지중 다중이용시설 공조시스템 적용에 따른 문제점 분석 및 개선안 도출 완료.
	차세대 지중 다중이용시설 공조시스템의 목표 성능을 설정	○		에너지 성능, 실내 온열환경 분석 및 공기질 개선효과 분석을 통한 차세대 공조시스템 검증 완료.
	차세대 지중 다중이용시설 공조시스템의 프로토타입 개발	○		차세대 공조시스템 운전 프로토콜 개발 및 각 구성요소별 용량산정 프로세스 개발 완료.

공동 연구기관 ((주) 삼화에이스)	기존 지중 다중이용시설 공조시스템 현황 및 문제점 도출	○		기존 지중 다중이용시설 적용 사례분석을 통한 현황표 작성 및 각 사례별 문제점 및 개선점 도출완료.
	지중 다중이용시설 공조시스템 관련 수요기업 조사	○		지중 다중이용시설 설계 및 시공사례 관련 기업조사 및 공조시스템 제작 업체 조사를 통한 차세대 공조시스템 수요기업 조사 완료.
	제습증발냉각 전외기 공조시스템 구성요소 설계 및 샘플 제작	○		차세대 공조시스템 구성요소 실험에 따른 시스템 성능 분석 및 실제 프로토타입 유니트 제작 완료.

나. 1차년도 성과점검기준표

표 43. 1차년도 연구 성과점검 기준

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준						양적 성과 건수
					질적 성과지표		목표 치	달성 치	측정방 법	검증방 법	
주관	지중 다중 이용시설 차세대 전 1외기 공조 시스템 프 로토타입 개발	1-1 공조시스템 프 로토타입 개발	①	프로토타입 개발	100 %	100 %		특허 출원		특허: 출원 1건 등록 1건 논문: 1건 시제품: 1건 SW: 1건	
			②	공조시스템 운전 프로 토콜	100 %	100 %		운전 프로토 콜 개발			
			③	시스템 용 량 산정 및 설계 프로 세스 개발	100 %	100 %		용량계 산 프로세 스 개발			
		1-2 에너지 절감, 실내 공기질 및 쾌적도 목 표치 설정	①	목표치 설 정	100 %	100 %		논문작 성 및 실 측자료		특허: 출원 1건 등록 1건 논문: 1건 시제품: 1건 SW: 1건	
		1-3 지역열원 및 지중 미활용열 원 적용방안 개발	①	적용방안 개발	100 %	100 %		논문작 성		특허: 출원 1건 등록 1건 논문: 1건 시제품: 1건 SW: 1건	
공동		1-4 기존 지중 다 중이용시설 공 조시스템 현황 조사	①	기존 공조 시스템 현 황조사	100 %	100 %		현황표		특허: 출원 1건 등록 1건 논문: 1건 시제품: 1건 SW: 1건	
			②	개선점 도 출	100 %	100 %		개선점 도출표			
		1-5 프로토 타입 개발을 위한 시스템 구성요 소 개발 및 제 작	①	시스템 구 성요소 개 발	100 %	100 %		시스템 구성요 소 제작		특허: 출원 1건 등록 1건 논문: 1건 시제품: 1건 SW: 1건	
계										100	특허: 출원 2건 등록 2건 논문: 3건 시제품: 1건 SW: 1건

- 1차년도 연구 성과점검 기준표에 따른 정량적 연구 성과분석은 각각의 단위 성과에 맞는 각 성과 지표별 연구 성과를 검증하였음. 차세대 공조시스템 프로토타입 유닛 제작과 관련된 특허출원 및 기존 공조시스템 현황 및 개선점 도출표와 같이 추가적인 자료를 1차년도 연구 성과점검 기준으로 검증함.
- 1차년도 연구수행 결과 본 연구를 통해 수행된 지중 다중이용시설 차세대 공조시스템 개발을 위한 1차년도 연구는 각 질적 성과 목표 별 100%의 연구 수행실적을 확인하였음.

다. 1차년도 핵심 연구성과

표 44. 1차년도 핵심 연구성과

연번	핵심성과 (CTE)	핵심성과 설명	성과 유형 ¹⁾	연구기관	해당 연차	TRL
1	지중 다중이용 시설 차세대 전외기 공조시 스템 프로토타 입 개발	- 지중 다중이용시설을 위한 차세대 제습증발냉각 기반 전외기 공조시스템의 에너지 절감, 실내 공기질 및 쾌적도 향상 목표치 설정. - 지역열원 및 지중 미활용 열원 적용방안 및 적용성 분석을 통한 친환경 열원 적용 기술 개발.	장비·장치	한양대학교 산학협력단	1	5
		- 기존 지중 다중이용시설 공조시스템의 현황 파악을 통한 개선점 도출을 통해 차세대 지중 다중이용시설 공조시스템 프로토타입에 반영. - 지중 다중이용시설 제습 증발냉각 전외기 공조시스템 프로토타입 개발을 위한 시스템 구성요소 설계 기술을 확보하며, 각 구성요소별 목표성능을 달성할 수 있는 시험용 샘플 제작.		(주)삼화에이 스		

라. 1차년도 핵심 연구성과별 설명

표 45. 1차년도 핵심 연구성과별 연구 수행 결과

핵심성과 1		
정의	지중 다중이용시설 차세대 전외기 공조시스템 프로토타입 개발	
목적	- 기존 지중 다중이용시설 공조시스템의 현황 파악을 통해 개선점을 도출하고 차세대 지중 다중이용시설 공조시스템의 프로토타입 개발에 반영. - 본 연구에서 개발되는 차세대 공조시스템 프로토타입의 지중 다중이용시설 적용 시 요구되는 에너지 절감, 실내 공기질 및 쾌적도 향상 목표치 설정. - 지역열원 및 지중 미활용 열원 적용방안 및 적용성 분석을 통한 친환경 열원 적용 기술 개발.	
성능목표	(기존기술 수준) - 선행연구를 통해 제습증발냉각 기술이 적용된 전외기 공조시스템에 대한 기초 이론연구와 실험실 수준에서 진행된 Proof-of-concept 단계의 실험적 연구를 통해 TRL 1-4 수준의 기술개발이 완료됨. (개발기술 수준) - 기존 지중 다중이용시설에 대한 현황 및 개선방안을 바탕으로 실제 사용환경을 고려하고 상용화가 가능한 제습증발냉각 기반 전외기 공조시스템 프로토타입 개발. - 패키지형 시제품을 제작하기 위한 준비 단계로 프로토타입 개별 구성요소 샘플 제작 및 성능 시험 실시. - 기존 TRL 4 단계 기술수준을 돌파하여 TRL 5단계까지 기술적 진보를 이루어냄을 목표로 함.	
성과달성 책임자 (소속기관)	정재원(한양대학교 산학협력단), 최병남((주)삼화에이스)	
소요기간	'16.06 ~ '17.06 (1년, 1년차)	
성과달성 확인방법	- 기존 지중 다중이용시설 공조시스템의 현황 조사 및 개선점 도출 여부. - 프로토타입 시스템을 위한 구성요소 개발 및 제작 여부. - 차세대 지중 다중이용시설을 위한 패키지 공조시스템 프로토타입 개발 여부. - 차세대 공조시스템 프로토타입의 에너지 절감, 실내 공기질 및 쾌적도 달성 목표치 설정 여부. - 지역열원 및 지중 미활용 열원 적용성 분석 여부.	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	출원: 2건, 등록: 0건
	논문	SCI(E): 1건, 국내학술지: 2건
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	1건 (시제품)

마. 1차년도 정량적 연구성과 목표 및 달성도

표 46. 1차년도 정량적 연구성과 분석표

구분		목표	달성도(%)	비고
국외 논문 게재	SCI	1건	100%	3건 달성
	비SCI			
	계	1건	100%	3건 달성
국내 논문 게재	SCI			
	비SCI	2건	100%	3건 달성
	계	2건	100%	3건 달성
특허 출원	국내	2건	100%	3건 달성
	국외			
	계	2건	100%	3건 달성
특허 등록	국내			
	국외			
	계			
인력 양성	석사			
	박사			
	계			
기술 이전	계약 건수			
	계약액			
	징수액			
국제 표준화	기고서 제출			
	기고서 채택			
	표준안 채택			
국내 표준화	기고서 제출			
	기고서 채택			
	표준안 채택			
등록·기탁 대상 성과물	보고서 원문			
	연구시설·장비			
	기술요약정보			
	생명자원	생명정보		
		생물자원		
		신품종		
	소프트웨어			
	화학물			
기타	시제품	1건	100%	
	성과 홍보			
	일자리 창출			

바. 1차년도 연구개발성과

표 47. 1차년도 국내외 논문 게재 성과

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일	등록 번호
1	Primary energy savings in desiccant and evaporative cooling-assisted 100% outdoor air system combined with a fuel cell	APPLIED ENERGY	Kim, M.H.; Dong, H.W.; Park, J.Y.; Jeong, J.W.;	180	England	Elsevier	SCI	2016.10.13	
2	Impact of district heat source on primary energy savings of a desiccant-enhanced evaporative cooling system	Energy	Dong, H.W.; Lee, S.J.; Yoon, D.S.; Park, J.Y.; Jeong, J.W.	123	England	Elsevier	SCI	2017.02.02	
3	Energy saving assessment of a desiccant-enhanced evaporative cooling system in variable air volume applications	Applied thermal engineering	Lee, S.J.; Kim, H.J.; Dong, H.W.; Jeong, J.W.	117	England	Elsevier	SCIE	2017.02.08	
4	열회수형 환기장치의 결로방지를 위한 지역별 예열코일 용량산정 및 분석	대한건축학회논문집 계획계	김원준, 김희정, 윤동섭, 정재원	32(10)	대한민국	대한건축학회	KCI	2016.11.03	
5	수중건물에 적용된	한국건축친환경석비학	조민석,	10(6)	대한민국	한국건축친환	KCI	2016.12.30	

	액체식 제습증발냉 각기반 전외기 공조시스템 의 연간 에너지 소비 및 성능 분석	회 논문집	박준 영, 신장 훈, 최병 남, 정재원			경설비 학회			
6	제습증발냉 각기반 전외기 공조시스템 의 지상 및 지중 공간 적용에 따른 에너지 소비분석	한국건축친 환경설비학 회 논문집	최은 지, 최병 남, 정재원	11(1)	대한민 국	한국건 축친환 경설비 학회	KCI	2017.02 .28	

표 47. 1차년도 국내 및 국제학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	2016 대한건축학회 추계학술발표대회	김원준	2016.10.05	부산 벅스코	대한민국
2	2016 대한건축학회 추계학술발표대회	신장훈	2016.10.05	부산 벅스코	대한민국
3	2016 대한건축학회 추계학술발표대회	조민석	2016.10.05	부산 벅스코	대한민국
4	ASIM 2016	김원준	2016.11.28	제주도 피닉스아일랜드	대한민국
5	ASIM 2016	신장훈	2016.11.28	제주도 피닉스아일랜드	대한민국
6	ASIM 2016	조민석	2016.11.28	제주도 피닉스아일랜드	대한민국
7	ASIM 2016	조상현	2016.11.28	제주도 피닉스아일랜드	대한민국
8	2016 한국건축친환경설비학 회 추계학술발표대회	박준영	2016.11.11	전라남도 국립목포대학교	대한민국
9	2016 한국건축친환경설비학 회 추계학술발표대회	윤동섭	2016.11.11	전라남도 국립목포대학교	대한민국
10	2016 한국건축친환경설비학 회 추계학술발표대회	조상현	2016.11.11	전라남도 국립목포대학교	대한민국

11	12 th IEA Heat Pump Conference 2017	최은지	2017.05.16	World trade center Rotterdam	네덜란드
12	12 th IEA Heat Pump Conference 2017	신장훈	2017.05.16	World trade center Rotterdam	네덜란드
13	12 th IEA Heat Pump Conference 2017	박준영	2017.05.18	World trade center Rotterdam	네덜란드

표 48. 1차년도 지식재산권 성과

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원				등록				기여율
			출원인	출원일	출원번호	등록번호*	등록인	등록일	등록번호	등록번호*	
1	공기 질 지표 적용 외기 냉방 운전 방법 및 그 방법이 사용되는 공조 장치	대한민국	정재원, 조상현	2016. 12.07	10-2016-0166100						50%
2	제습·증발냉각기반 전외기 공조시스템 및 제어방법	대한민국	정재원, 박준영, 이성준, 윤동섭	2016. 12.28	10-2016-0180665						50%
3	제습 장치 및 제습 시스템	대한민국	정재원, 임한솔	2017. 04.04	10-2017-0043513						50%

표 49. 1차년도 전문 연구 인력 양성

번호	분류	기준 연도	현황										
			학위별			성별			지역별				
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도 권	충청 권	영남 권	호남 권	기타
1	연구인력	2017		5			3	2	5				

3.2 2차년도 연구개발 성과 평가

가. 2차년도 연구개발 성과 점검

- 2차년도 연구에 대한 연차 점검을 통해 수행된 연구개발 과제의 성취도를 파악하고 동시에 본 연구 책임자가 평가한 성취도를 분석함. 우선, 계획된 2차년도 연구계획에 따라서 각 부분별 연구 성취도는 “완료”, “완료예정”의 두 가지로 분석을 실시함. “완료”의 경우 모든 연구개발 성과가 100% 수행되었음을 의미하며, “완료예정”의 경우 70-80%의 수행 완료를 의미하며 당해 연도 잔여기간 또는 차년도 연구기간 중 완료될 것을 나타냄.

표 50. 2차년도 각 연구 부분별 연구 성취도

2차년도 연구개발 내용		성취도		성취도 평가 지표
		완료	완료 예정	
주관 연구기관 (한양대학교 산학협력단)	패키지 유닛 시제품의 기본설계 및 제작 지원	○		프로토타입 패키지 유닛 운전을 통한 문제점 및 개선안 도출, 시제품 제작을 위한 기본설계 완료.
	인공기후실험 챔버를 이용하여 목표성능 검증	○		인공기후실험 챔버 테스트를 통한 목표성능 실증 및 차세대 공조시스템 각 구성요소별 성능 분석 완료.
공동 연구기관 (주) 삼화에이스)	패키지 유닛 시제품의 실시설계 및 제작	○		프로토타입 유닛 개선안이 적용된 기본설계안에 따른 시스템 실시설계 및 실험동에 시제품 유닛 구축 완료.
	공인시험기관을 통한 공인성능시험 수행	○		시제품 구축에 따라 공인인증시험기관을 통한 공인성능시험 수행 및 공인시험 성적서 획득.

나. 2차년도 성과점검기준표

표 51. 2차년도 연구 성과점검 기준

구분	핵심성과 (CTE)	단위성과	성과점검기준							영적 성과 건수	
			질적 성과지표		목표 치	달성 치	측정방 법	검증방 법	기준 치		
주관	지중 다중 이용시설 차세대 전 2외기 공조 시스템 시 제품 제작	2-1 챔버에서의 성능 실증	①	인공기후실험 챔버에서 성능 실증	100%	100%	인공기후실험 챔버에서 측정		10	특허: 출원 1건 등록 1건 논문: 2건 시제품: 1건 SW: 1건	
			②	실내 공기질 개선 실증	100%	100%		논문작성	15		
		2-2 설계 프로그램 개발	①	프로그램 개발	100%	100%		프로그램 개발	10		특허: 출원 1건 등록 1건 논문: 1건 시제품: 1건 SW: 1건
		2-3 시제품 제작	①	시제품 제작	100%	100%		시제품 제작	50		
공동		2-4 공인인증기관에서의 성능 실증	①	공인인증기관에서 시제품 성능 실증	100%	97%	공인인증기관 측정	공인시험성적서	15	특허: 출원 1건 등록 1건 논문: 1건 시제품: 1건 SW: 1건	
계									100	특허: 출원 1건 등록 1건 논문: 4건 시제품: 1건 SW: 1건	

- 2차년도 연구 성과점검 기준표에 따른 정량적 연구 성과분석의 단위성과별 각 성과 지표에 따른 연구 성과를 검증하였음. 차세대 공조시스템 패키지 유닛 시제품 제작과 관련된 국제특허출원 및 프로그램 등록, 공인시험 성적서와 같이 추가적인 자료를 2차년도 연구 성과점검 기준으로 검증함.
- 당해연도 연구수행 결과 본 연구를 통해 수행된 지중 다중이용시설 차세대 공조시스템 개발을 위한 2차년도 연구는 각 질적 성과 목표 별 100%의 연구 수행실적을 확인하였음.

다. 2차년도 핵심 연구성과

표 52. 2차년도 핵심 연구성과

연 번	핵심성과 (CTE)	핵심성과 설명	성과 유형 ¹⁾	연구기관	해 당 연 차	TR L
2	지중 다중 이용시설 차세대 전 외기 공조 시스템 시 제품 제작	- 인공기후실험 챔버를 이용하여 시제품의 목표 성능을 검증. - 설계단계에서 활용가능한 차세대 공조시스템 시뮬레이션 모델 및 설계 프로그램 개발.	장비· 장치	한양대학교 산학협력단	2	6
		1차년도 기술개발을 통한 프로토타입 시스템을 바탕으로 1000m³/h 용량의 시제품을 제작. - 시제품의 공인시험기관 성능실험 수행을 통한 목표성능 실증 및 공인시험성적서 확보.		(주)삼화에이스		

라. 2차년도 핵심 연구성과별 설명

표 53. 2차년도 핵심 연구성과별 연구 수행 결과

핵심성과 2	
정의	지중 다중이용시설 차세대 전외기 공조시스템 시제품 제작
목적	1차년도 기술개발을 통한 프로토타입 시스템을 바탕으로 1000m³/h 용량의 시제품을 제작. - 설계단계에서 활용가능한 차세대 공조시스템 시뮬레이션 모델 및 설계 프로그램 개발. - 인공기후실험 챔버를 이용하여 시제품의 목표 성능 및 실내공기질 개선효과 실증. - 공인시험기관의 성능 시험을 통해 공인성적서 확보를 통한 목표 성능 입증.
성능목표	(기존기술 수준) - 제습증발냉각 기술이 적용된 패키지형 전외기 공조시스템의 상용화를 고려한 시제품은 국내에서 개발된 바 없으며, 본 연구진이 Proof-of-concept 단계(TRL 4 수준)의 실험연구를 위해 제작한 파일럿 시스템을 보유하고 있음. - 유럽 및 북미 지역 선진국을 중심으로 유사한 제습증발냉각 기술이 적용된 패키지형 유닛 개발이 추진되고 있으나 현재까지는 실험실 수준의 연구로 진행되고 있음. (개발기술 수준) 1차년도 연구를 통해 개발된 지중 다중이용시설 전외기 공조시스템 프로토타입을 바탕으로 패키지 유닛 시제품을 개발함으로써 실제 건물적용을 통한 실증 실험이 가능하도록 함. 1000m³/h 용량의 시제품에 대한 인공기후실험 챔버를 이용한 실증 실험을 통해 지중 다중이용시설에 사용되고 있는 기존 공조시스템 대비 30% 이상 향상된 에너지절감 및 실내 공기질 개선 목표달성 가능여부 검증. - 전외기 공조시스템 적용을 통한 실간 교차오염 문제 90% 이상 해소 가능여부 검증. - 공인인증기관에서 시제품에 대한 공인시험실시 및 공인시험성적서 확보를 통한 기술적 완성도 검증. - 기술개발 수준을 1차년도의 TRL 5단계에서 TRL 6단계로 높여 유사기후환경에서의 실험을 통해 목표 성능 달성여부 검증.
성과달성 책임자 (소속기관)	정재원(한양대학교), 최병남((주)삼화에이스)
소요기간	'17.00 ~ '18.00(1년, 2년차)
성과달성 확인방법	- 지중 다중이용시설을 위한 차세대 전외기 공조시스템 패키지 유닛 시제품 제작 여부. - 인공기후실험 챔버 실험을 통한 시제품 목표 성능 실증 여부. - 실내 공기질 개선에 관한 실증 여부. - 시스템 설계 단계에서 활용할 수 있는 프로그램 개발 여부. - 공인시험기관에서의 공인시험성적서 확보 여부.

성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	출원: 1건, 등록: 1건
	논문	SCI(E): 2건, 국내학술지: 2건
	저작	0건
	S/W	1건
	신기술	0건
	기타	1건 (시제품)

마. 2차년도 정량적 연구성과 목표 및 달성도

표 54. 2차년도 정량적 연구성과 분석표

구분		목표	달성도(%)	비고
국외 논문 게재	SCI	2건	115%	2.3건 달성
	비SCI			
	계	2건	115%	2.3건 달성
국내 논문 게재	SCI			
	비SCI	2건	150%	2.5건 달성
	계	2건	150%	2.5건 달성
특허 출원	국내	1.5건	150%	1.5건 달성
	국외	0건		1건 달성 (목표 초과 달성)
	계	1.5건	150%	2.5건 달성
특허 등록	국내	1건	0	등록 예정
	국외			
	계	1건	0	등록 예정
인력 양성	석사			
	박사			
	계			
기술 이전	계약 건수			
	계약액			
	징수액			
국제 표준화	기고서 제출			
	기고서 채택			
	표준안 채택			
국내 표준화	기고서 제출			
	기고서 채택			
	표준안 채택			
등록·기탁 대상 성과물	보고서 원문			
	연구시설·장비			
	기술요약정보			
	생명자원	생명정보		
		생물자원		
		신품종		
	소프트웨어		1건	100%
	화학물			1건 달성 (등록 신청 완료)

구분		목표	달성도(%)	비고
기타	시제품	1건	100%	1건 달성
	성과 홍보			
	일자리 창출			

바. 2차년도 연구개발성과

표 55. 2차년도 국내외 논문 게재 성과

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일	등록 번호
1	Empirical analysis of indoor air quality enhancement potential in a liquid-desiccant assisted air conditioning system	BUILDING AND ENVIRONMENT	Park, JY; Yoon, DS; Li, S; Park, J; Bang, JI; Sung, M; Jeong, JW	121	England	Elsevier	SCI(E)	2017.07.18	
2	Experimental verification of a virtual water flowmeter applicable to air conditioning systems	ENERGY AND BUILDINGS	Kim, MH; Jeong, JW	155	England	Elsevier	SCI(E)	2017.09.20	
3	Energy Saving Potential of a Thermoelectric Heat Pump-Assisted Liquid Desiccant System in a Dedicated Outdoor Air System	Energies	Min-Hwi Kim; Joon-Young Park; Jae-Weon Jeong	10(9)	SWITZERLAND	MDPI AG	SCI(E)	2017.09.01	

4	Energy-Saving Benefits of Adiabatic Humidification in the Air Conditioning Systems of Semiconductor Cleanrooms	Energies	Min-Suk Jo; Jang-Hoon Shin; Won-Jun Kim; Jae-Weon Jeong	10(11)	SWITZERLAND	MDPI AG	SCI(E)	2107.11.03	
5	Impact of Heat Pump-Driven Liquid Desiccant Dehumidification on the Energy Performance of an Evaporative Cooling-Assisted Air Conditioning System	Energies	Jang-Hoon Shin; Joon-Young Park; Min-Suk Jo; Jae-Weon Jeong	11(2)	SWITZERLAND	MDPI AG	SCI(E)	2018.02.02	
6	Empirical Analysis for the Heat Exchange Effectiveness of a Thermoelectric Liquid Cooling and Heating Unit	Energies	Hansol Lim; Seong-Yong Cheon; Jae-Weon Jeong	11(3)	SWITZERLAND	MDPI AG	SCI(E)	2018.03.08	
7	현열 및 잠열교환 효율 차이를 고려한 전열교환 환기장치의 결로방지용 예열코일 용량산정에 관한 연구	한국건축 친환경설비 학회논문집	김원준, 정재원	11	대한민국	한국건축친환경설비학회	KCI	2017.06.30	

8	액체식 제습시스템 의 운전 방식에 따른 에너지 소비량 분석	한국건축 친환경설비 학회논문집	조민 석, 정재원	11	대한민 국	한국건 축친환 경 설비학 회	KCI	2017.08 .30	
9	히트펌프 구동 기반 액체식 제습시스템 과 기존 액체식 제습시스템 의 에너지 소비 분석	대한건축 학회 논문집	신장 훈, 박준 영, 조민 석, 정재원	33	대한민 국	대한 건축학 회	KCI	2017.09 .30	
10	제습증발냉 각 전외기 공조시스템 의 설계 프로세스 개발	한국건축 친환경설비 학회논문집	최은 지, 정덕 수, 정재원	12	대한민 국	한국건 축친환 경 설비학 회	KCI	2018.02 .28	

표 56. 2차년도 국내 및 국제학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	대한설비공학회 2017 하계학술발표대회	동혜원	2017.06.22	용평리조트	대한민국
2	대한설비공학회 2017 하계학술발표대회	임한솔	2017.06.22	용평리조트	대한민국
3	대한설비공학회 2017 하계학술발표대회	조혜진	2017.06.22	용평리조트	대한민국
4	대한설비공학회 2017 하계학술발표대회	최은지	2017.06.22	용평리조트	대한민국
5	대한설비공학회 2017 하계학술발표대회	박준영	2017.06.22	용평리조트	대한민국
6	38th 2017 AIVC interna tional Conferenc	김원준	2017.09.13	Nottingham	영국
7	38th 2017 AIVC interna tional Conferenc	박준영	2017.09.13	Nottingham	영국
8	38th 2017 AIVC interna tional Conferenc	조혜진	2017.09.13	Nottingham	영국

9	38th 2017 AIVC international Conference	임한솔	2017.09.13	Nottingham	영국
10	10th 2017 ISHVAC Conference	동혜원	2017.10.20	Jinan	중국
11	10th 2017 ISHVAC Conference	임한솔	2017.10.20	Jinan	중국
12	10th 2017 ISHVAC Conference	리쓰잉	2017.10.20	Jinan	중국
13	10th 2017 ISHVAC Conference	신장훈	2017.10.20	Jinan	중국
14	10th 2017 ISHVAC Conference	조민석	2017.10.21	Jinan	중국
15	10th 2017 ISHVAC Conference	최은지	2017.10.21	Jinan	중국
16	한국건축친환경설비학회 2017 추계 학술발표대회	조혜진	2017.11.23	서울대학교	대한민국
17	한국건축친환경설비학회 2017 추계 학술발표대회	박준영	2017.11.23	서울대학교	대한민국
18	한국건축친환경설비학회 2017 추계 학술발표대회	리쓰잉	2017.11.23	서울대학교	대한민국
19	대한설비공학회 2017 동계 학술발표대회	임한솔	2017.11.29	과학기술회관	대한민국
20	대한설비공학회 2017 동계 학술발표대회	동혜원	2017.11.29	과학기술회관	대한민국
21	대한설비공학회 2017 동계 학술발표대회	천성용	2017.11.29	과학기술회관	대한민국
22	대한설비공학회 2017 동계 학술발표대회	김원준	2017.11.29	과학기술회관	대한민국
23	2018 COBEE Conference	박준영	2018.02.07	Melbourne	호주
24	2018 COBEE Conference	동혜원	2018.02.07	Melbourne	호주
25	2018 COBEE Conference	임한솔	2018.02.07	Melbourne	호주
26	2018 COBEE Conference	리쓰잉	2018.02.07	Melbourne	호주

표 57. 2차년도 지식재산권 성과

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원				등록				기 여 율
			출원 인	출원 일	출원번호	등록번호 *	등록 인	등록 일	등록번호	등록번호*	
1	외기 조절 시스템	대한민국	정재원, 천성용, 임한솔	2017. 07.17	10-2017- 009057 7						50
2	외기 조절 시스템	대한민국	정재원, 천성용	2017. 09.26	10-2017- 012458 1						50
3	제습· 증발냉각기반 전외기 공조시스템 및 제어방법	국제특허	정재원, 박준영, 이성준, 윤동섭	2017. 12.26	PCTKR20 1701550 5						50
4	열전소자를 이용한 공조기 및 공조 방법	대한민국	정재원, 천성용, 임한솔	2018. 03.14	10-2018- 002964 0						50

표 58. 2차년도 저작권 성과

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록 번호	저작권자명	기여율
1	제습증발냉각기 반 전외기 공조시스템 용량산정 프로그램	2018.02.18	최은지, 정재원	2018.03.22	C-2018-007801	한양대학교 산학협력단	100%

표 59. 2차년도 전문 연구 인력 양성

번호	분류	기준 연도	현황										
			학위별			성별			지역별				
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타
1	연구인력	2018		4			3	1	4				

3.3 3차년도 연구개발 성과 평가

가. 3차년도 연구개발 성과 점검

- 3차년도 연구에 대한 연차 점검 및 연구과제 개발 단계 최종 연성과 점검을 통해 수행된 연구개발 과제의 성취도를 파악하고 동시에 본 연구책임자가 평가한 연구과제 최종 성취도를 분석함. 우선, 계획된 3차년도 연구계획에 따라서 각 부분별 연구 성취도는 “완료”, “완료예정”의 두 가지로 분석을 실시함. “완료”의 경우 모든 연구개발 성과가 100% 수행되었음을 의미하며, “완료예정”의 경우 70-80%의 수행 완료를 의미하며 연구과제 종료 후속 1년 이내 완료될 것을 나타냄.

표 60. 3차년도 각 연구 부분별 연구 성취도

3차년도 연구개발 내용		성취도		성취도 평가 지표
		완료	완료 예정	
주관 연구기관 (한양대학교 산학협력단)	시제품 테스트베드 적용을 통한 장단기 운전성능 모니터링	○		연구개발 최종 단계 시제품 실제 운전을 통한 장단기 성능 모니터링 및 운전 특성 분석 완료.
	상용화 가능성 실증 및 기술이전 추진	○		상용화 가능성 분석을 위한 공인시험성적분석을 통한 시스템 성능 검증 완료 및 연구개발을 통해 도출된 설계 및 제작 기술 등을 기술이전.
공동 연구기관 (주) 삼화에이스	테스트베드 선정 및 시제품 설치	○		지중 대표 공간 선정을 통한 테스트베드 선정 및 2차년도 시스템 성능 개선안이 적용된 최종 단계의 시제품 유닛 설치 완료.
	자동제어 및 모니터링 시스템 설치 수행	○		자동제어 방안 및 운전 프로토콜 구현이 가능한 자동제어 및 시스템 성능 파악을 위한 모니터링 시스템 구축 완료.

나. 3차년도 성과점검기준표

표 61. 3차년도 연구 성과점검 기준

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준						양적 성과 건수
					질적 성과지표	목표 치	달성 치	측정방 법	검증방 법	기중 치	
주관	테스트베드 통한 차세대 지중 다중이용 시설 공조 시스템 상용화 실증	3-1	시제품 테스트베드 적용을 통한 장단기 운전성능 모니터링	① 테스트베드 설치	100%	-		설치유무 및 설치 보고서 작성		특허: 출원 1건 등록 1건 논문: 1건 시제품: 1건 SW: 1건	
				② 장단기 모니터링 실행	100%	-	테스트 베드에서 측정				
		3-2	상용화 가능성 실증	① 목표성능 실증	100%	-		실험유무		특허: 출원 1건 등록 1건 논문: 2건 시제품: 1건 SW: 1건	
				② 친환경 열원 적용	100%	-	친환경 열원 적용 여부				
공동	시스템 상용화 실증	3-3	기술이전 및 상용화 추진	① 상용화 제품 도출 및 기술이전	100%		상용화 제품 및 기술이전 여부	기술이전 실시 계약 완료		특허: 출원 1건 등록 1건 논문: 1건 시제품: 1건 SW: 1건	
		3-4	테스트 베드 대상 선정 및 시공	① 테스트 베드 시공	100%		테스트 베드 시공 여부			특허: 출원 1건 등록 1건 논문: 1건 시제품: 1건 SW: 1건	
계										100	특허: 출원 1건 등록 2건 논문: 4건 시제품: 1건 SW: 1건

- 3차년도 연구 성과점검 기준표에 따른 정량적 연구 성과분석의 단위성과별 각 성과 지표에 따른 연구 성과를 검증하였음. 차세대 공조시스템 최종 단계 시제품 제작과 관련된 국제특허출원 결과 해당 기술에 대한 대상국 진입을 완료 하였으며, 연구 개발을 통해 도출된 기술들에 대한 특허등록을 완료함. 추가적인 해당 기술에 대한 기술이전 계약을 체결하고 본 기술의 상용화 준비를 완료함. 본 연구 성과들을 바탕으로 3차년도 연구 성과점검 기준으로 검증함.
- 당해연도 연구수행 결과 본 연구를 통해 수행된 지중 다중이용시설 차세대 공조시스템 개발을 위한 3차년도 연구는 각 질적 성과 목표 별 100%의 연구 수행실적을 확인하였음.

다. 3차년도 핵심 연구성과

표 62. 3차년도 핵심 연구성과

연 번	핵심성과 (CTE)	핵심성과 설명	성과 유형 ¹⁾	연구기관	해 당 연 차	TRL
3	테스트베드 통한 차세 대 지중 다 중이용시설 공조시스템 상용화 실 증	2차년도 연구를 통해 개발된 시제품을 실제 지중 다중이용시설 혹은 유사 환경을 가지고 있는 테스트베드에 적용. - 장단기 데이터 모니터링을 통해 운전 데이터 확보 및 개선점 도출. - 도출된 개선점을 바탕으로 상용화를 위한 시스템 개선 및 기술이전 추진.	장비· 장치	한양대학교 산학협력단	3	7
		- 시제품 실증 테스트 베드 선정 및 테스트 베드 시공. - 상용화 제품 도출 및 기술이전을 통한 시제품 상용화 방안 확보.		(주)삼화에이스		

라. 3차년도 핵심 연구성과별 설명

표 63. 3차년도 핵심 연구성과별 연구 수행 결과

핵심성과 3		
정의	테스트베드 통한 차세대 지중 다중이용시설 공조시스템 상용화 실증	
목적	2차년도 연구를 통해 개발된 차세대 전외기 공조시스템 패키지 유닛 시제품을 테스트베드로 선정된 실제 지중 다중이용시설 혹은 유사 환경을 가진 공간에 설치. - 장단기 운전 성능 모니터링을 통해 시제품의 실제 운전 데이터를 확보 하고 시제품 및 프로토타입의 개선점 도출. - 테스트베드에서 도출된 시스템 개선점을 바탕으로 시제품을 개선하고, 상용제품 개발을 위한 기술이전을 추진.	
성능목표	(기존기술 수준) - 국내의 경우 제습증발냉각 기술이 적용된 패키지형 전외기 공조시스템 테스트베드 적용을 통한 실제 운전성능 검증은 수행된 바 없음. - 본 연구진은 Proof-of-concept 단계(TRL 4 수준)의 실험연구를 위해 제작한 제습증발냉각 전외기 공조 파일럿 시스템의 장단기 운전 경험을 보유하고 있음. - 선진국의 경우도 유사한 시스템의 테스트베드 적용 사례 및 논문을 통한 연구결과 보고는 찾기 어려움. (개발기술 수준) - 지역열원 및 분산형 열병합시스템, 폐열회수, 지중열 및 지중침출수 등을 활용한 친환경 열원기술 적용을 통해 기존 공조시스템 대비 30% 이상의 1차 에너지 절감과 탄소배출 저감 달성. - 액체식 제습 및 증발냉각기술을 활용하여 높은 GWP를 가진 기존 냉매사용량 50% 절감. 2차년도의 연구개발 수준인 TRL 6단계에서 TRL 7단계의 기술수준으로 향상 시키고 시제품의 테스트베드 적용을 통해 실제 환경에서의 목표 성능 달성여부 검증과 상용화를 위한 기술이전을 추진.	
성과달성 책임자 (소속기관)	정재원(한양대학교), 최병남((주)삼화에이스)	
소요기간	'18.00 ~ '19.00(1년, 3년차)	
성과달성 확인방법	- 실제 지중 다중이용 시설 또는 유사 환경 공간을 테스트베드로 활용한 시제품 설치 및 장단기 모니터링 시스템 설치 여부. - 시스템의 장단기 운전을 통해 실제 운전 성능 데이터 확보 여부. - 실제 운전성능 데이터 분석을 통한 시제품 개선점 도출 및 적용 여부. - 참여기업 및 수요기업에 대한 기술이전 계약 여부.	
성과달성에	특허 출원/등록	출원: 1건, 등록: 2건

다른 정량적 성과	논문	SCI(E): 2건, 국내 학술지: 2건
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	1건 (시제품)

마. 3차년도 정량적 연구성과 목표 및 달성도

표 64. 3차년도 정량적 연구성과 분석표

구분		목표	달성도(%)	비고
국외 논문 게재	SCI	2	450%	12건 게재
	비SCI			
	계	2	450%	12건 게재
국내 논문 게재	SCI			
	비SCI	2	50	1건 게재
	계	2	50	1건 게재
특허 출원	국내	1	450%	7건 출원
	국외			
	계	1	450%	7건 출원
특허 등록	국내	2	200%	4건 등록
	국외			
	계	2	200%	4건 등록
인력 양성	석사			
	박사			
	계			
기술 이전	계약 건수	1	100	노하우 이전
	계약액			
	징수액			
국제 표준화	기고서 제출			
	기고서 채택			
	표준안 채택			
국내 표준화	기고서 제출			
	기고서 채택			
	표준안 채택			
등록·기탁 대상 성과물	보고서 원문			
	연구시설·장비			
	기술요약정보			
	생명자원	생명정보		
		생물자원		
		신품종		
	소프트웨어			
	화학물			

구분		목표	달성도(%)	비고
기타	시제품	1	100%	최종 상용화 시제품 제작
	성과 홍보			
	일자리 창출			

바. 3차년도 연구개발성과

표 65. 3차년도 국내외 논문 게재 성과

번호	논문명	학술지명	주저 자명	호	국명	발행 기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일	등록 번호
1	Impact of an Ultraviolet Reactor on the Improvement of Air Quality Leaving a Direct Evaporative Cooler	Sustainability	Wonjun Kim	10	SWITZERLAND	MDPI AG	SCI(E)	2018.04.09	
2	Energy saving potential of the thermoelectric modules integrated into liquid desiccant system for solution heating and cooling	APPLIED THERMAL ENGINEERING	Hansol Lim	136	England	Elsevier	SCI(E)	2018.05.25	
3	Energy Performance of Liquid Desiccant and Evaporative Cooling-Assisted 100% Outdoor Air Systems under Various Climatic Conditions	Energies	Shiyin Li	11	SWITZERLAND	MDPI AG	SCI(E)	2018.05.29	
4	Energy saving potential of the thermoelectric radiant cooling panels with a dedicated outdoor air system	Energy and Buildings	Hansol Lim	169	England	Elsevier	SCI(E)	2018.06.15	

5	Evaluation of thermal comfort in an office building served by a liquid desiccant-assisted evaporative cooling air-conditioning system	Energy and Buildings	Hye-Jin Cho	172	England	Elsevier	SCI(E)	2018.08.01	
6	Thermoelectric radiant cooling panel design: Numerical simulation and experimental validation	APPLIED THERMAL ENGINEERING	Hansol Lim	144	England	Elsevier	SCI(E)	2018.10.04	
7	Energy benefit of a cascade liquid desiccant dehumidification in a desiccant and evaporative cooling-assisted building air-conditioning system	Applied thermal engineering	Park, Joon-Young	147	England	Elsevier	SCI(E)	2019.01.25	
8	Experimental analysis of dehumidification performance of an evaporative cooling-assisted internally cooled liquid desiccant dehumidifier	Applied energy	Park, Joon-Young	235	England	Elsevier	SCI	2019.02.01	
9	Applicability of thermoelectric heat pump in a dedicated outdoor air system	Energy	Seong-Yong Cheon	173	England	Elsevier	SCI	2019.04.15	

10	Experimental analysis of dehumidification performance of counter and cross-flow liquid desiccant dehumidifiers	Applied thermal engineering	Cho, Hye-Jin	150	England	Elsevier	SCI(E)	2019.03.05	
11	Thermoelectric Module Integrated Fuel Cell in a Liquid Desiccant-Assisted Air-Conditioning System	Heat Transfer Engineering	Hansol Lim	36	USA	TAYLOR & FRANCIS INC	SCI(E)	2019.03.27	
12	Indoor Air Quality Enhancement Performance of Liquid Desiccant and Evaporative Cooling-Assisted Air Conditioning Systems	Sustainability	Beom-Jun Kim	11	SWITZERLAND	MDPI AG	SCI(E)	2019.02.16	
13	변풍량 공조시스템의 환기량 제어 및 이코노마이저 운전에 따른 학교건물의 환기 기준 별 에너지 소비량 분석	대한설비공학회 논문집	이재희	31(5)	대한민국	대한설비공학회	KCI	2019.05.01	

표 66. 3차년도 국내 및 국제학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	대한설비공학회 2018 하계 학술발표대회	박준영	2018.06.22	평창	대한민국
2	대한설비공학회 2018 하계 학술발표대회	변유석	2018.06.22	평창	대한민국
3	2018 Room ventilation Conference	동혜원	2018.06.06	헬싱키	핀란드
4	2018 Room ventilation Conference	임한솔	2018.06.06	헬싱키	핀란드

5	2018 Room vent ventilation Confernece	조혜진	2018.06.06	헬싱키	핀란드
6	2018 Room vent ventilation Confernece	천성용	2018.06.06	헬싱키	핀란드
7	2018 Room vent ventilation Confernece	박준영	2018.06.06	헬싱키	핀란드
8	2018 Purdue international Conference	변유석	2018.07.10	퍼듀 대학교	미국
9	2018 Purdue international Conference	조혜진	2018.07.10	퍼듀 대학교	미국
10	2018 Purdue international Conference	천성용	2018.07.10	퍼듀 대학교	미국
11	2018 Purdue international Conference	동혜원	2018.07.10	퍼듀 대학교	미국
12	2018 Purdue international Conference	임한솔	2018.07.10	퍼듀 대학교	미국
13	2018 Purdue international Conference	박준영	2018.07.10	퍼듀 대학교	미국
14	2018 한국건축친환경설비학회 추계학술발표대회	김범준	2018.11.16	인하대학교	대한민국
15	2018 한국건축친환경설비학회 추계학술발표대회	천성용	2018.11.16	인하대학교	대한민국
16	2018 한국건축친환경설비학회 추계학술발표대회	동혜원	2018.11.16	인하대학교	대한민국
17	2018 한국건축친환경설비학회 추계학술발표대회	임한솔	2018.11.16	인하대학교	대한민국
18	대한설비공학회 2018 동계학술발표대회	조혜진	2018.11.23	과학기술회관	대한민국
19	대한설비공학회 2018 동계학술발표대회	윤수열	2018.11.23	과학기술회관	대한민국
20	대한설비공학회 2018 동계학술발표대회	변유석	2018.11.23	과학기술회관	대한민국

21	대한설비공학회 2018 동계학술발표대회	강용권	2018.11.23	과학기술회관	대한민국
22	4th Asia Conference of International Building Performance Simulation Association	김범준	2018.12.04	홍콩 과학기술 대학교	중국
23	4th Asia Conference of International Building Performance Simulation Association	변유석	2018.12.04	홍콩 과학기술 대학교	중국
24	4th Asia Conference of International Building Performance Simulation Association	천성용	2018.12.04	홍콩 과학기술 대학교	중국
25	4th Asia Conference of International Building Performance Simulation Association	동혜원	2018.12.04	홍콩 과학기술 대학교	중국
26	4th Asia Conference of International Building Performance Simulation Association	임한솔	2018.12.04	홍콩 과학기술 대학교	중국

표 67. 3차년도 지식재산권 성과

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국 명	출원				등록				기 여 율
			출원 인	출원 일	출원번 호	등록번호 *	등록 인	등록 일	등록번 호	등록번호*	
1	태양광 발전기	대한 민국	정재원 , 변유 석, 박 준영	2018. 05.28	10-2018 -006062 8						100
2	태양광 발전 장치	대한 민국	정재원 , 변유 석	2018. 06.07	10-2018 -006532 3						100
3	공조 장치 및 이를 이용한 공조 방법	대한 민국	정재원 , 임한 솔	2018. 06.27	10-2018 -007393 9						50
4	열전 소자 및 상변화물질을 이용한 발전 장치 및 발전 방법	대한 민국	정재원 , 변유 석	2018. 08.10	10-2018 -009401 5						50

5	열전소자를 이용한 온도 제어 장치	대한민국	정재원, 강용권, 임한솔	2018. 08. 23	10-2018-0098874						50
6	열전소자가 결합된 복사 냉방 시스템 및 설계 방법	대한민국	정재원, 임한솔	2018. 09. 17	10-2018-0110797						50
7	열전소자 기반 에너지 하베스터	대한민국	정재원, 윤수열	2019. 03. 15	10-2019-0029691						50
8	공기 질 지표 적용 외기 냉방 운전 방법 및 그 방법이 사용되는 공조 장치	대한민국					정재원, 조상현	2018. 07. 25	10-1883982-0000		50
9	제습 · 증발냉각기반 전외기 공조시스템 및 제어방법	대한민국					정재원, 박준영, 이성준, 윤동섭	2018. 11. 09	10-1919206-0000		50
10	제습 장치 및 제습 시스템	대한민국					정재원, 임한솔	2019. 03. 13	10-1960158-0000		50
11	외기 조절 시스템	대한민국					정재원, 천성용	2019. 04. 09	10-1969228-0000		50

표 68. 3차년도 전문 연구 인력 양성

번호	분류	기준 연도	현황										
			학위별			성별			지역별				
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타
1	연구인력	2019		2				2	2				

3.4 연차별 연구 성과 자체 평가

- 연구개발 초기 단계에서 설정한 각 연차별 연구 목표 및 내용을 바탕으로 세부 연구목표 달성 여부에 따른 각 단계별 연구 수행의 적절성 및 연구 성과에 대한 자체평가를 통해 본 연구 수행 과정을 평가함.

표 69. 1차년도 연구 수행 자체 평가

성과 목표	자체 평가
국외 논문 게재	1차년도 연구개발 계획 시 국외 논문 게재 목표의 경우 1건으로 계획 하였으나, 본 연구 수행 과정을 통해 3건으로 목표를 넘어서는 연구 성과를 달성함.
국내 논문 게재	- 차세대 공조시스템의 지중 다중이용시설 적용 가능성 분석 연구에 따라서 지중 환경에서의 차세대 공조시스템의 적용가능성 분석에 따른 에너지 성능 분석과 관련된 국내 논문을 게재 함. - 지중 환경과 유사한 조건인 수중조건과 관련된 차세대 공조시스템의 적용 가능성 분석 연구를 통한 추가적인 국내 논문게재 성과를 달성함.
특허 출원	차세대 공조시스템 패키지 유니트의 운전 모드, 제어 알고리즘 및 시스템 모듈 등 시스템 개발을 위한 관련 내용들을 특허 출원함.
시제품	- 차세대 공조시스템 패키지 유니트 구성요소 분석 및 운전 프로토콜, 제어알고리즘에 따른 차세대 공조시스템 프로토타입 유니트 제작을 완료함. - 시제품 제작에 따라서 차세대 공조시스템 유니트의 성능 실증이 가능할 것으로 판단되며, 차년도 연구과제 수행을 위한 프로토타입 개발이 완료됨.

표 70. 2차년도 연구 수행 자체 평가

성과 목표	자체 평가
국외 논문 게재	2차년도 연차실적 계획 당시 국외 논문 게재 목표는 2건으로 계획하였음. 2차년도 연구개발에 따라서 총 6편의 국외 논문을 게재 하였으며 목표를 넘어서는 연구 성과를 달성함 (중복 사사 반영).
국내 논문 게재	프로토타입 패키지 유닛 개발 및 차세대 제습증발냉각 전외기 공조시스템 관련 연구를 수행하며, 전열교환기, 히트펌프, 액체식 제습시스템, 제습증발냉각 설계 프로세스와 관련된 연구 결과 4건을 국내 논문으로 게재함 (중복 사사 반영).
특허 출원	차세대 공조시스템 패키지 유닛의 운전 모드, 제어알고리즘 및 시스템 모듈과 관련된 내용들을 국제 PTC 특허 출원을 완료 하였으며, 전외기 공조시스템의 외기 조절과 관련된 연구들을 바탕으로 3건의 국내 특허를 출원 완료함 (중복 사사 반영).
특허 등록	차세대 공조시스템 패키지 유닛과 관련된 특허 출원 (1차년도 출원 완료) 내용이 연구 기간 내 등록 될 것으로 판단됨.
소프트웨어 개발	차세대 공조시스템 패키지 유닛 시제품 설계 단계에서 적용 가능한 제습증발냉각 시스템 설계 프로그램을 개발하였으며, 이를 프로그램 등록 완료함 (한국저작권협회 등록 대기 중).
시제품	- 프로토타입 패키지 유닛 실증을 통한 문제점 및 개선안 도출을 통해 시제품 기본 설계를 수행 하였으며, 기본 설계안과 해석 프로그램 적용을 통한 실시 설계를 완료함. - 패키지 유닛 실시 설계안을 바탕으로 제작을 완료 하였으며, 시제품 실증을 위한 구축작업을 완료함.

표 71. 3차년도 연구 수행 자체 평가

성과 목표	자체 평가
국외 논문 게재	3차년도 연차실적 계획 당시 국외 논문 게재 목표는 2건으로 계획하였음. 3차년도 연구개발에 따라서 총 12편의 국외 논문을 게재 하였으며 목표를 초과 달성하는 연구 성과를 달성함 (중복 사사 반영).
국내 논문 게재	- 시제품 유닛 운전 특성인 변풍량 공조 방식의 환기량 관련 연구를 수행하여 제습증발냉각 기반 전외기 공조시스템 관련 연구 결과 1건을 국내 논문으로 게재함 (중복 사사 반영). - 또한 연구 성과의 우수성으로 인하여 일부 연구 결과를 국내 논문이 아닌 국외 논문으로 전환하여 성과 달성.
특허 출원	- 시제품 유닛의 에너지 저장 능력 및 에너지 성능 향상을 위한 공조 방식 및 열전소자 적용, 상변화 물질 적용 등과 관련된 기술 내용들을 특허 출원함. - 다양한 기술적 개발을 통해 총 7건의 특허를 출원 완료함 (중복 사사 반영).
특허 등록	시제품 유닛의 운전 특성에 대한 특허 출원이 국내 특허 등록을 완료 하였으며, 본 연구개발을 통해 제안된 공기질 개선 방안 및 에너지 성능 향상을 위한 열전소자 적용 기술들에 대한 특허 출원들을 등록 완료함.
시제품	- 연구개발 최종 단계 수준의 시제품 유닛을 구축 완료 하였으며, 1차년도 및 2차년도 파일럿 시스템 분석을 통한 개선안이 적용된 상용화 단계의 시제품을 제작 완료함. - 또한, 상용화 시제품을 지중 환경을 대표할 수 있는 지중 테스트베드에 설치 완료하여 시제품 운전 특성을 분석하고 최종적인 상용화 가능성 검증을 완료함.

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

- 해당사항 없음.

4. 연구개발성과의 활용 계획

표 72. 연구개발성과 활용 가능 분야

기술이전	기업화	후속연구 추진	타 사업 활용	그 밖의 목적 활용	연구결과 활용중단
		○	○		

- 본 연구를 통해 제작된 제습증발냉각 기반 전외기 공조시스템 상용화 시제품을 활용하여 추가적인 성능 개선 연구 등을 추진함으로써 건물 공조시스템 시장에 진입할 수 있는 기반을 조성.

4.1 연구성과 활용 방법

- 제습증발냉각 기반 전외기 공조시스템 상용화 시제품을 활용하여 수요기업을 발굴하고 등록 특허 및 해외 PCT 대상국 진입 (미국 및 일본)도 성공적으로 등록될 수 있도록 추진함으로써 해외 시장 진출을 위해 필수적인 지적재산권 확보 추진.
- 관련 기업체 및 연구자 등 전문가 대상 기술세미나를 개최하여 본 연구개발 내용에 대한 이해도를 높여 새로운 수요창출과 시장형성을 도모.
- 시제품을 학생 및 기업체 전문가를 대상으로 한 시청각 교육 및 시운전 교육에 활용.
- 패키지형 차세대 공조시스템의 열병합발전 시스템과의 일체화를 위한 시제품 제작 진행.

4.2 사후 연구 성과 활용 계획

- 지속적으로 국제 저명 학술대회 및 컨퍼런스에 참가하여 후속연구 결과를 발표하고, 관련 해외 연구자 및 기업들과의 네트워크를 강화함으로써 본 연구결과를 바탕으로 기술이전을 받은 공동 연구기관 ((주) 삼화에이스) 또는 관련 국내 기업의 해외 시장 진출에 유리한 환경을 마련.
- 제로에너지 건물 및 그린 에너지 하우스 구현을 위한 주요 핵심기술로 활용.
- 주요 핵심기술의 국내 특허 및 PCT 출원을 통해 관련 기업체들에 대한 기술이전 추진.
- 병원, 지중 대공간 및 특수목적 건물의 실간/층간 교차오염 문제 해결을 위한 청정 공조시스템 개발 분야에 활용.
- 유기 랭킨 사이클이 적용된 새로운 공조 시스템으로써의 가능성을 정량적, 정성적으로 분석하여 제습증발냉각 기반 전외기 공조시스템의 에너지 소비 절감 도모.
- 본 연구를 통해 개발된 제습증발냉각 기반 전외기 공조시스템 상용화 유닛은 동일 급기 풍량을 공급하는 시스템 제작을 기준으로 기존 공조시스템 대비 초기 투자비용에서 약 1.2배 높음.
- 기존 변풍량 공조시스템 대비 동일 수준의 냉각 및 가열 열원 구축에 소요되는 초기 투자비용은 제습증발냉각 전외기 공조시스템 상용화 유닛의 히트펌프 적용을 통한 시스템 단순화 및 냉각 및 가열열원 동시 공급을 가능하게 함으로써 경제적인 이득을 달성함.
- 현 시점에서의 제습증발냉각 전외기 공조시스템의 초기 투자비용은 추후 각 구성요소 별 상용화 생산 단계에 도달 할 경우 투자비용 절감이 가능 한 것으로 예측되며, 각 구성 요소별 최적 설계 방안 적용에 따른 생산 기술 확보를 통해 초기 투자비용을 기존 공조시스템과 유사한 수준으로 제작 및 구축이 가능 할 것으로 판단됨.

표 73. 초기 투자비용 비교 ((주)아산 비교 견적 참고)

비교	기존 공조시스템 (변풍량 공조시스템)	제습증발냉각 전외기 공조시스템
급기풍량	1000 m ³ /h	1000 m ³ /h
냉동기	9,000,000원 (공랭식 칠러)	12,000,000원 (히트펌프)
보일러	3,000,000원 (온수 보일러)	•
배관	3,000,000원	4,000,000원
펌프	500,000원	500,000원
팬	500,000원	1,000,000원
케이싱	30,000,000원	30,000,000원
덕트	5,000,000원	5,000,000원
자동제어	15,000,000원	25,000,000원
소계	66,000,000원	77,500,000원

- 제습증발냉각 전외기 공조시스템 상용화 유닛은 기존 시스템 대비 연간 30% 이상의 운전 에너지 절감이 가능할 것으로 본 연구를 통해 도출되었으며, 이를 토대로 기존 변풍량 공조시스템과의 초기투자비용 회수 기간에서 일정 부분 이점이 있을 것으로 예측됨.
- 현 단계에서 제습증발냉각 전외기 공조시스템의 경제성 분석 및 투자비용 회수에 대한 심도 있는 언급은 추후 후속 단계에서 각 시스템 구성 요소별 생산기술 확보 및 시공기술 확보가 달성된 이후 평가하는 것이 적절할 것으로 판단됨.

4.3 연구개발 성과에 따른 기대효과

(1) 기술적 파급효과

- 여름철 안정적인 냉방 성능 및 겨울철에 70%의 열교환 성능, 중간기에 80%의 단열냉각 성능을 보여주는 국내 최초의 제습증발냉각 기반 전외기 공조시스템 상용화 유닛 개발 및 기술 구현을 통해 건물 공조시스템의 새로운 패러다임을 제시.
- 관련 기술개발과 시장 형성이 선진국들에 비해 늦어지고 있는 우리나라에서 관련 기술 개발과 새로운 시장형성을 위한 신 성장 동력이 될 것.
- 제습증발냉각 기반 전외기 공조시스템의 가장 큰 단점인 수용액에 의한 부식 문제와 누수, 복잡한 배관라인, 수용액 탱크로 인한 공간 문제 등을 강화 플라스틱 소재 사용, 히트펌프 적용, 수용액 탱크 일체화 등을 통해 해결함으로써 시스템 안정성을 확보함에 따라 기술적으로 상용화를 가속화 시킬 수 있는 단계가 됨.
- 제습증발냉각 기반 전외기 공조시스템에 적용된 핵심 기술 중 하나인 Non-vapour compression 기반 냉각기술 관련하여 다양한 연구개발이 국내에서 더욱 활발하게 진행되는 계기 제시.

(2) 사회적 파급효과

- 국민의 쾌적하고 건강한 업무 및 거주환경 제공과 이에 따른 국민 건강과 생활의 질 향상.
- 전 세계적으로도 도심지역 지중 공간 개발이 급속히 증가하고 있는 상황에서 제습증발냉각 기반 전외기 공조시스템이 지중 공간에 적용 시 실내 쾌적성 및 공기질을 향상시켜 건강하고 쾌적한 지중 공간 개발에 기여 및 다양한 건물분야에서의 적용 가능성을 성공적으로 도출함.
- 100% 외기를 사용함에도 불구하고 기존 변풍량 공조시스템 대비 에너지 및 탄소배출 절감효과와 향상된 환기성능 및 공기 오염물질 제거 효과를 보여주며 최근 국내에서 문제가 되는 미세먼지에 의한 실내 공기오염에 대한 걱정 해결과 온실가스 감축에 기여.

(3) 경제적 파급효과

- 국내 다양한 지역에 적용 시 설계단계에서 사용자가 편리하게 시스템 용량 산정 및 에너지 소비를 예측할 수 있는 설계 프로그램을 함께 제공할 수 있기에 비전문가도 쉽게 접근 가능하며, 건물 공조시스템으로써 제습증발냉각 기반 전외기 공조시스템이 전국적으로 빠르게 확산되는데 기여.
- 핵심 요소 기술 및 재료, 장비 등의 국산화를 이루었으며 국산화로 인해 신속한 상용화가 가능할 것으로 예상되며, 본 연구를 통해 개발된 차세대 공조시스템의 기술적 차별성을 바탕으로 국제적으로 높은 경제적 수익창출과 수출효과를 기대할 수 있을 것으로 예상.
- 액체식 제습시스템, 간접식 및 직접식 증발냉각 기술 시장의 성장과 성능 향상을 위한 신 재료 및 관련 요소기술 분야 산업의 발전에 기여.
- 다양한 신재생 에너지와의 적용성 확인을 통해 건물에서의 신재생 에너지 사용 확대 및 저에너지 친환경 건축물 및 탄소중립 도시 실현에 기여.
- 국내 관련업체에 기술이전 및 사업화를 통해 국내외에서 새로운 매출과 고용이 창출될 것으로 예상.
- 다른 산업분야에 비해 상대적으로 저평가 되어있는 고효율 저에너지 건물 공조시스템 산업분야에서 선진국과의 기술격차를 해소함으로써 지속적인 첨단화 및 해외 시장진출이 시도될 것으로 예상.

붙임. 참고문헌

- 홍태훈, 진경일, 김세환, 이윤규, 이경희. “지하 사무공간에서의 자연환기도입 효과”, 대한건축학회 학술발표대회 논문집 18(1), 1998, pp.535-542.
- 이홍철, 황인주, 김태형. “지하도 상가 냉난방.환기 시스템의 난방운전 특성 연구”, 대한기계학회 추계 학술발표대회 논문집, 2008.
- 이홍철, 황인주. “공기연령을 이용한 지하도상가 공조시스템 설계 기법에 관한 연구”, 대한설비공학회 학술발표대회 논문집, 2006. pp. 273-278.
- 이진영, 이수연, 정차수. “이화여대 지하캠퍼스 환기설비시스템 설계사례”, 설비저널 41(4), 2012. pp. 59-67.
- 박성환. 2013. “대심도 지하역사 공조시스템 관리방안 검토 연구”, 석사학위논문, 우송대학교 철도대학원.
- 조홍재, 박태주, 황동곤, 전준용, 이선민, 김주형. “변풍량 공조시스템 적용을 위한 공공 지하역사 승강장 반송동력 절감 효과 분석”, 대한설비공학회 학술발표대회 논문집, 2015. pp.310-313.
- Goetzler W., Zogg R., Young J., and Johnson C., “Energy Savings Potential and RD&D Opportunities for Non-Vapor-Compression HVAC Technologies”, Navigant Consulting Inc., prepared for US Department of Energy, 2014.
- Dieckmann, J., Roth, K. W., and Brodrick, J. (2004). “Liquid desiccant air conditioners”, ASHRAE journal, Vol. 46 (4), pp. 58-59.
- Min-Hwi Kim, Joon-Young Park, Jun-Seok Park, and Jae-Weon Jeong. (2015) “Application of desiccant systems for improving the performance of an evaporative cooling-assisted 100% outdoor air system in hot and humid climates”, Journal of Building Performance Simulation, Vol. 8 (3) pp. 173-190.
- Min-Hwi Kim, Jun-Seok Park, and Jae-Weon Jeong. (2013) “Energy Saving Potential of Liquid Desiccant in Evaporative-Cooling-Assisted 100% Outdoor Air System”, Energy, Vol. 59, pp. 726-736.
- Min-Hwi Kim, Joon-Young Park, Min-Ki Sung, An-Seop Choi, and Jae-Weon Jeong. (2014) “Annual operating energy savings of liquid desiccant and evaporative-cooling-assisted 100% outdoor air system”, Energy and Buildings, Vol. 76, pp. 538-550.
- Rafique, M. M., Gandhidasan, P., & Bahaidarah, H. M. (2016). “Liquid desiccant materials and dehumidifiers-A review”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 56, pp. 179-195.
- Xiaohua Liu, Zhen Li, Yi Jiang, and Borong Lin. (2006) “Annual performance of liquid desiccant based independent humidity control HVAC system”, Applied Thermal Engineering, Vol. 26, pp. 1198-1207.
- Chung, T. W., Ghosh, T. K., Hines, A. L., and Novosel, D. (1995) “Dehumidification of moist air with simultaneous removal of selected indoor pollutants by triethylene glycol solutions in a packed-bed absorber”, Separation Science and Technology, Vol. 30(7-9), pp. 1807-1832.

- Miao, R. "Study of alternative liquid absorbents using a thermodynamic model and a combined physico-optical method" (Ph. D Thesis), University of Illinois at Chicago, 1997.
- Weirong, Z., Kaiyang, Q., Xiaohua, L., and Xiaomin, C. (2004) "Pilot study of the impact of liquid desiccant dehumidification on IAQ", *Journal of HV&AC*, Vol. 11, pp. 114–117.
- Advantix systems. (2010) "Liquid desiccant technology delivers energy cost reductions and indoor air quality improvements", *Advantix Ducool Catalogue*.
- Fang, L., Zhang, G., and Fanger, P.O. "Experimental investigation of the air cleaning effect of a desiccant dehumidifier on perceived air quality", *Proceedings: Indoor Air (2005)*
- Liu, X., Guan, B., and Liu, X. (2015) "Experimental Study on the Filtration Efficiency of Structured Packing Air Handling Processors", *Procedia Engineering*, Vol. 121, pp. 2037–2043.
- Wang, Y. F., Chung, T. W., and Jian, W. M. (2011) "Airborne fungi inactivation using an absorption dehumidification system", *Indoor and Built Environment*, Vol. 20 (3), pp. 333–339.
- Kovak, B., Heimann, P. R., and Hammel, J. (1997) "The sanitizing effects of desiccant-based cooling", *ASHRAE journal*, Vol. 39 (4), pp. 60–64.
- Harriman III, L. G. "The Dehumidification Handbook", (1989).
- Ghosh, T. K., and A. L. Hines. (1999) "Removal of microorganisms/particulates from indoor air." *Studies in Surface Science and Catalysis*, Vol. 120, pp. 833–862.
- ASHRAE. 2009. *ASHRAE Handbook: Fundamentals*, Chapter 32 SI: Sorbents and desiccants. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- ASHRAE. 2012. *ASHRAE Handbook: HVAC systems and equipment*, Chapter 24 SI: Desiccant dehumidification and pressure – Drying equipment. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- ASTM E 741. Standard test method for determining air change in a single zone by means of a tracer gas dilution 2006;00:17.
- Luma Sense technologies. "INNOVA Multi gas monitoring instruments", (2012).
- TSI. "P-TRAK Ultrafine particle counter Model 8525 user manual", (2012).
- ASHRAE. 2012. *ASHRAE Standard*, Chapter 52.2 Method of testing general ventilation air-cleaning devices for removal efficiency by particle size. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- BUCK BioCulture. "Bio-contaminants sampler Model B30120 Technical brief"
- T. Katejanekarn, S. Chirarattananon, S. Kumar, An experimental study of a solar-regenerated liquid desiccant ventilation pre-conditioning system, *Solar Energy* 83 (6) (2009) 920–933.
- J. Woods, E. Kozubal, A desiccant-enhanced evaporative air conditioner: Numerical model and experiments, *Energy Conversion and Management* 65 (2013) 208–220.
- M.H. Kim, J.H. Kim, O.H. Kwon, A.S. Choi, J.W. Jeong, Energy conservation potential of an

- indirect and direct evaporative cooling assisted 100% outdoor air system, *Building Services Engineering Research and Technology* 32 (4) (2011) 345–360.
- M.H. Kim, J.W. Jeong, Cooling performance of a 100% outdoor air system integrated with indirect and direct evaporative coolers, *Energy* 52 (1) (2013) 245–257.
- 장영수 외, 2016, “액체식 제습 냉방기술의 동향”, *설비저널* 제 45권 제 6호, 대한설비공학회, 48–54
- TRANE, *Applications Engineering Manual Chilled-Water VAV Systems*, (2011).
- T. Katejanekarn, S. Kumar, Performance of a solar-regenerated liquid desiccant ventilation pre-conditioning system, *Energy and Buildings* 40 (7) (2008) 1252–1267.
- I.P. Koronaki, R.I. Christodoulaki, V.D. Papaefthimiou, E.D. Rogdakis, Thermodynamic analysis of a counter flow adiabatic dehumidifier with different liquid desiccant materials, *Applied Thermal Engineering* 50 (2013) 361–373
- G. Ge, F. Xiao, X. Niu, Control strategies for a liquid desiccant air-conditioning system, *Energy Build.* 43 (2011) 1499–1507.
- Y. Yin, X. Zhang, Z. Chen, Experimental study on dehumidifier and regenerator of liquid desiccant cooling air conditioning system, *Build. Environ.* 42 (2007) 2505–2511.
- Klein SA, Beckman WA, Mitchell JW, and Duffie JA. TRNSYS 17 transient system simulation program, user manual. Solar Energy Laboratory; 2010.
- Klein SA, Beckman WA, Mitchell JW, and Duffie JA. EES–Engineering Equation Solver for Microsoft Windows Operating Systems, F-Chart Software, 2008.
- ISO 7730, 2010, “Ergonomics of the thermal environment–Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.
- ASHRAE, 2013 *ASHRAE Handbook: Fundamentals*, Chapter 18 SI: Nonresidential Cooling and Heating Load Calculations, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, 2013.
- ASHRAE, ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90.1–2004 *Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings User’s Manual*, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, 2004.
- 서승직, 2004, “건축설비계획” 일진사, 111–116.
- ASHRAE Standard55, 2005, “Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy” chapter 5.2.1.2
- Fanger, P. O., 1967, “Calculation of Thermal Comfort : Introduction of a Basic Comfort Equation, *ASHRAE Transactions.*, vol.73, Pt2.
- M.H. Kim, J.W. Jeong, Commissioning of desiccant and evaporative cooling-assisted 100% outdoor air system, *Advanced Engineering and Technology*, 7 (2014).
- M.H. Kim, J.Y. Park, J.S. Park, J.W. Jeong, Application of desiccant systems for improving the performance of an evaporative cooling-assisted 100% outdoor air system in hot and

- humid climates, *Journal of Building Performance Simulation* 8(3) (2015) 173–190.
- Chung, T. W. Predictions of moisture removal efficiencies for packed-bed dehumidification systems. *Gas Separation and Purification*. 1994, 8, 265–268.
- Chung, T. W.; Luo, C. M. Vapor Pressures of the Aqueous Desiccant. *Journal of Chemical and Engineering Data*. 1999, 44, 1024–1027.
- Celdek 7060–15; Evaporative cooling pad–product sheet; Munters. Available online: <http://www.munters.com> (15/01/2017).
- Wilo pump data sheet; Wilo manufacturer online Catalog; Wilo. Available online: <http://www.wilo.com> (15/01/2017).
- Duan Z, Zhan C, Zhang X, Mustafa M, Zhao X, Alimohammadisagvand B, Hasan A, Indirect evaporative cooling: Past, present and future potentials, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 6823–6850.
- Chen Q, Yang K, Wang M, Pan N, Guo ZY, A new approach to analysis and optimization of evaporative cooling system I: Theory, *Energy* 35 (2010) 2448–2454.
- Chen Q, Yang K, Wang M, Pan N, Guo ZY, A new approach to analysis and optimization of evaporative cooling system II: Applications, *Energy* 36 (2011) 2890–2898.
- Amer O, Boukhanouf R, Ibrahim HG, A review of evaporative cooling technologies, *International Journal of Environmental Science and Development* 6 (2015) 112–117.
- Riangvilaikul B, Kumar S, An experimental study of a novel dew point evaporative cooling system, *Energy and Buildings* 42 (2010) 637–644.
- Riangvilaikul B, Kumar S, An experimental study of a novel dew point evaporative cooling system, *Energy and Buildings* 42 (2010) 637–644.
- Pandelidis D, Anisimov S, Worek M W, Performance study of counter-flow indirect evaporative air coolers, *Energy and Buildings* 109 (2015) 53–64.
- Kanzari M, Boukhanouf R, Ibrahim HG, Mathematical modeling of a sub-wet bulb temperature evaporative cooling using porous ceramic materials, *International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering* 7 (2013) 538–544.
- Lee J, Lee DY, Experimental study of a counter flow regenerative evaporative cooler with finned channels, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 65 (2013) 173–179.
- Ham SW, Jeong JW, DPHX (dew point evaporative heat exchanger): System design and performance analysis, *Energy* 101 (2016) 132–145.
- Elberling L, Laboratory evaluation of the Coolerado cooler indirect evaporative cooling Unit, Pacific Gas and Electric Company Application Assessment Report #0402 (2006).
- Maisotsenko V, Heaton TL, Gillan AD, Gillan LE, Method and plate apparatus for dew point evaporative cooler using a trough wetting system, United States Patent (2003) US006705096B2.
- Anisimov S, Pandelidis D, Jedlikowski A, Polushkin V, Performance investigation of a M (Maisotsenko)–cycle cross-flow heat exchanger used for indirect evaporative cooling,

- Energy 76 (2014) 593–606.
- Zhao X, Li JM, Riffat SB, Numerical study of a novel counter-flow heat and mass exchanger for dew point evaporative cooling, *Applied Thermal Engineering* 28 (2008) 1942–1951.
- El-Dessouky H, Ettouney H, Al-Zeefari A, Performance analysis of two-stage evaporative coolers, *Chemical Engineering Journal* 102 (2004) 255–266.
- Moshari S, Heidarinejad G, Fathipour A, Numerical investigation of wet-bulb effectiveness and water consumption in one-and two-stage indirect evaporative coolers, *Energy Conversion and Management* 108 (2016) 309–321.
- Al-Juwayhel F, El-Dessouky H, Ettouney H, Al-Qattan M, Experimental evaluation of one, two, and three stage evaporative cooling systems, *Heat Transfer Engineering* 25 (2004) 72–86.
- Terzi A, Foudhil W, Harmand S, Ben Jabrallah S, Liquid film evaporation inside an inclined channel: Effect of the presence of a porous layer, *International Journal of Thermal Sciences* 109 (2016) 136–147.
- Kozubal E, Woods J, Burch J, Boranian A, Merrigan T, Desiccant enhanced evaporative air-conditioning (DEVap): Evaluation of a new concept in ultra efficient air conditioning, NREL Technical Report (2011) TP-5500-49722.
- Kozubal E, Woods J, Judkoff R, Development and analysis of desiccant enhanced evaporative air conditioner prototype, NREL Technical Report (2012) TP-5500-54755.
- Ham SW, Lee SJ, Jeong JW, Operating energy savings in a liquid desiccant and dew point evaporative cooling-assisted 100% outdoor air system, *Energy and Buildings* 116 (2016) 535–552.
- ASHRAE, ASHRAE STANDARD 143-2015, Method of test for rating indirect evaporative coolers, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- ASHRAE, ASHRAE STANDARD 55-2013, Thermal environmental conditions for human occupancy, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- ASHRAE, ASHRAE GUILDLINE 2-2010, Engineering analysis of experimental data, Atlanta: American Society of Heating, Refrigeration, and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- Liu Z, Allen W, Modera M, Simplified thermal modeling of indirect evaporative heat exchangers, *HVAC&R Research* 19 (2013) 257–267.
- Attard G, Rossier Y, Winiarski T, Eisenlohr L. Urban underground development confronted by the challenges of groundwater resources: Guidelines dedicated to the construction of underground structures in urban aquifers, *Land Use Policy* 64 (2017) 461–469.
- Li Y, Geng S, Zhang X, Zhang H. Study of thermal comfort in underground construction based on field measurements and questionnaires in China, *Building and Environment* 116 (2017) 45–54.

- Tu R, Hwang Y, Ma F. Performance analysis of a new heat pump driven multi-stage fresh air handler using solid desiccant plates, *Applied Thermal Engineering* 117 (2017) 553–567.
- Tu R, Hwang Y, Ma F. Performance analysis of a new heat pump driven multi-stage fresh air handler using solid desiccant plates, *Applied Thermal Engineering* 117 (2017) 553–567.
- Xie Y, Zhang T, Liu X. Performance investigation of a counter-flow heat pump driven liquid desiccant dehumidification system, *Energy* 115 (2016) 446–457.
- ASHRAE Standards Committee. ANSI/ASHRAE Standard 133–2008, Method of Testing Direct Evaporative Air Coolers [S] 2008.
- ASHRAE, ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90.1–2004 Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings User's Manual, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, 2004.
- ASHRAE, 2013 ASHRAE Handbook: Fundamentals, Chapter 18 SI: Nonresidential Cooling and Heating Load Calculations, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, 2013.
- ASHRAE, 2000, ASHRAE Guideline 12–2000, Minimizing the Risk of Legionellosis Associated with Building Water System.
- Chen Q, Yang K, Wang M, Pan N, Guo ZY, A new approach to analysis and optimization of evaporative cooling system I: Theory, *Energy* 35 (2010) 2448–2454.
- Z. L. Chena, J. Y. Chena, H. L. Z. F. Zhang. Present status and development trends of underground space in Chinese cities: Evaluation and analysis, *Tunnelling and Underground Space Technology* 71 (2018) 253–270.
- F. Zaini, K. Hussin, M.M. Raid. Legal considerations for urban underground space development in Malaysia, *Underground Space* 2 (2017) 234–245.
- Y. K. Qiaoa, F. Le. Penga, Y. Wang. Monetary valuation of urban underground space: A critical issue for the decision-making of urban underground space development, *Land Use Policy* 69 (2017) 12–24.
- Nurullah Kayaci, Hakan Demir. Numerical modelling of transient soil temperature distribution for horizontal ground heat exchanger of ground source heat pump, *Geothermics* 73 (2018) 33–47.
- Pirjo Majuri. Technologies and environmental impacts of ground heat exchangers in Finland, *Geothermics* 73 (2018) 124–132.
- Pirjo Majuri. Technologies and environmental impacts of ground heat exchangers in Finland, *Geothermics* 73 (2018) 124–132.
- Ning Zhang, Shao-You Yin. Investigation on capacity matching in a heat pump and hollow fiber membrane-based two-stage liquid desiccant hybrid air dehumidification system, *International journal of refrigeration* 84 (2017) 128–138.
- Sepehr Sanaye, Morteza Taheri. Modeling and multi-objective optimization of a modified hybrid liquid desiccant heat pump (LD-HP) system for hot and humid regions, *Applied Thermal Engineering*

neering 129 (2018) 212–229.

주 의

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