

최종보고서(일반과제용)										보안등급	
										일반[✓], 보안[]	
중앙행정기관명	국토교통부				사업명	사업명				국토교통기술촉진연구	
전문기관명	국토교통과학기술진흥원					내역사업명					
공고번호	공고-제00호				총괄연구개발 식별번호				-		
					연구개발과제번호				21TAP-C152248-03		
국가과학기술 표준분류	건설 교통		60%		건설 환경설비 기술		20%		건축환경 설비기술		20%
총괄연구개발명	국문	-									
	영문	-									
연구개발과제명	국문	리덕션 수치모델을 이용한 열화상 디지털 트윈 기반의 창호시공부위 하자평가									
	영문	Evaluation of construction defects with windows based on the digital twin technology between thermal images and reduced numerical models									
주관연구기관	기관명	인하대학교 산학협력단				사업자등록번호	121-82-10209				
	주소	(우) 22212				법인등록번호	120171-0003321				
주관연구책임자	성명	김의중				직위	부교수				
	연락처	직장전화	032-860-7589				휴대전화	010-4511-1870			
		전자우편	ejkim@inha.ac.kr				국가연구자번호	1143 1413			
연구개발기간	전체	2019. 04. 19 - 2021. 12. 31 (2년 9개월)									
	1년차	2019. 04. 19 - 2019. 12. 31 (9개월)									
	2년차	2020. 01. 01 - 2020. 12. 31 (1년)									
	3년차	2021. 01. 01 - 2021. 12. 31 (1년)									
연구개발비 (단위 : 천원)	정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금 자립자단체 기타()				합계			연구개발비 외 지원금
	현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계	
총계	550,000	18,351	165,150	-	-	-	-	568,351	165,150	733,501	-
1년차	130,000	4,350	39,150	-	-	-	-	134,350	39,150	173,500	-
2년차	125,000	4,167	37,500	-	-	-	-	129,167	37,500	166,667	-
3년차	295,000	9,834	88,500					304,834	88,500	393,334	
공동연구기관 등	기관명	책임자	직위	휴대전화		전자우편				비고	
										역할	기관유형
공동연구기관	(주)미래환경플랜건축사무소	장항인	이사(소장)	010-3497-5883		hjang@mrplan.co.kr				공동	중소기업
위탁연구기관											
연구기관 외 기관											
연구개발담당자 실무담당자	성명	최재술				직위	박사과정연구원				
	연락처	직장전화	032-860-7580				휴대전화	010-2062-9678			
		전자우편	sol1213@inha.edu				국가연구자번호	1174 5436			

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재 처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2022 년 1 월 14 일

주관연구책임자 : 김 의 중

주관연구기관의 장 : 인하대학교 산학협력단 유 창 경 (직인)

국토교통과학기술진흥원장 귀하

최종보고서(일반과제용)										보안등급		
										일반[✓], 보안[]		
중앙행정기관명	국토교통부			사업명	사업명		국토교통기술촉진연구					
전문기관명	국토교통과학기술진흥원				내역사업명							
공고번호	공고-제00호			총괄연구개발 식별번호		-						
				연구개발과제번호		21TAP-C152248-03						
국가과학기술 표준분류	건설 교통	60%	건설 환경설비 기술	20%	건축환경 설비기술	20%						
총괄연구개발명	국문	-										
	영문	-										
연구개발과제명	국문	리덕션 수치모델을 이용한 열화상 디지털 트윈 기반의 창호시공부위 하자평가										
	영문	Evaluation of construction defects with windows based on the digital twin technology between thermal images and reduced numerical models										
주관연구기관	기관명	인하대학교 산학협력단				사업자등록번호	121-82-10209					
	주소	(우) 22212				법인등록번호	120171-0003321					
주관연구책임자	성명	김의종				직위	부교수					
	연락처	직장전화	032-860-7589				휴대전화	010-4511-1870				
		전자우편	ejkim@inha.ac.kr				국가연구자번호	1143 1413				
연구개발기간	전체	2019. 04. 19 - 2021. 12. 31 (2년 9개월)										
	1년차	2019. 04. 19 - 2019. 12. 31 (9개월)										
	2년차	2020. 01. 01 - 2020. 12. 31 (1년)										
	3년차	2021. 01. 01 - 2021. 12. 31 (1년)										
연구개발비 (단위 : 천원)	정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그외기관 등의 지원금				합계			연구개발비 외 지원금	
	현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계		
	총계	550,000	18,351	165,150	-	-	-	-	568,351	165,150	733,501	-
	1년차	130,000	4,350	39,150	-	-	-	-	134,350	39,150	173,500	-
	2년차	125,000	4,167	37,500	-	-	-	-	129,167	37,500	166,667	-
3년차	295,000	9,834	88,500					304,834	88,500	393,334		
공동연구기관 등	기관명	책임자	직위	휴대전화		전자우편		비고				
								역할		기관유형		
	공동연구기관	(주)리앤경플랜건축사무소	장향인	이사(소장)	010-3497-5883	hjang@mrplan.co.kr	공동	중소기업				
	위탁연구기관											
	연구기관 외 기관											
연구개발담당자 실무담당자	성명	최재솔				직위	박사과정연구원					
	연락처	직장전화	032-860-7580				휴대전화	010-2062-9678				
		전자우편	sol1213@inha.edu				국가연구자번호	1174 5436				

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재 처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2022 년 1 월 14 일

주관연구책임자 : 김 의 종 (직인)

주관연구기관의 장 : 인하대학교 산학협력단 유 창 경 (직인)

국토교통과학기술진흥원장 귀하

< 요약 문 >

사업명		국토교통기술촉진연구사업			총괄연구개발 식별번호		-	
내역사업명					연구개발과제번호		21TAP-C152248-03	
국가과학기술 표준분류		건설 교통	60%	건설 환경설비 기술	20%	건설환경 설비 기술	20%	
총괄연구개발명		-						
연구개발과제명		리덕션 수치모델을 이용한 열화상 디지털 트윈 기반의 창호시공부위 하자평가						
전체 연구개발기간		2019. 04. 19 - 2021. 12. 31 (2년 9개월)						
총 연구개발비		총 733,501 천원 (정부지원연구개발비 : 550,000 천원, 기관부담연구개발비 : 183,501 천원, 지방자치단체 : 천원, 그 외 지원금 : 천원)						
연구개발단계		기초[] 응용[☒] 개발[] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[]			기술성숙도		착수시점 기준(3단계) 종료시점 목표(7단계)	
연구개발과제 유형		지정공모 [☒] 자유공모 []						
연구개발과제 특성		비실용화						
연구 개발 목표 및 내용	최종 목표		○ 창호시공부위에서 발생한 하자를 신속하게, 정량적으로 평가하기 위해 건축 설계 도면상의 창호 및 벽체 열성능 데이터를 토대로 벽체 표면 열화상과 3차원 수치모델을 결합하여, 창호 접합부 열교지표를 제시하는 것을 목적으로 함.					
	전체 내용		○ 창호시공부위 하자 평가를 위한 열화상 측정 방법론 개발 - 창호시공부위 하자 열화상 패턴화 - 창호시공부위 하자 평가를 위한 열화상 측정 방법론 제안 - 주요 열화상 및 해석 결과 DB화 - 열화상을 통한 모델기반 선형열관류율 현장 재연성 확인 ○ 열화상 매칭이 가능한 고속계산 수치모델 개발 - 3차원 수치모델의 해석 모델 개발 전략 구축 - 열화상 해석을 위한 3차원 수치모델 개발 - 고속계산을 위한 리덕션 기술이 적용된 수치모델 개발 및 적용 ○ 최적화기법을 이용한 선형열교계수 도출 기술 개발 - 기존 모델을 통한 최적화 기법 베이스라인 구축 - 선형열관류율 수치 재연성을 위한 필요조건분석 - 최적화를 통한 선형열교계수 도출 ○ 열화상을 이용한 창호시공부위 하자 평가 프로그램 개발 - 창과 벽의 3차원 도면 메쉬 생성 기술 개발 - 프로그램 입력/계산/출력 모듈 개발 및 통합 - 선형열관류율에 따른 건물 에너지 성능 영향도 평가					
	1년차	목표	- (주관) 3차원 수치모델의 해석모델 개발 전략 구축 - (주관) 기존 모델을 통한 최적화 기법 베이스라인 구축 - (공동) 창호시공부위 하자 열화상 패턴화 - (공동) 창과 벽의 3차원 도면 메쉬 생성 기술 개발					
내용		- (주관) 열화상 패턴에 따른 계산영역 분류 - (주관) 계산격자에 따른 민감도 및 서브영역 설정 - (주관) 기존 3차원 해석도구를 이용한 3차원 모델의 열화상 구현 가능성 점검 - (주관) 기존 3차원 모델을 이용한 선형열관류율 정의 및 예비 시뮬레이션 - (주관) 기존 모델의 선형열관류율 반복 수정을 통한 열화상 및 수치해석 결과 패턴 비교 검증 - (공동) 창호시공부위 하자 사례 수집 - (공동) 창호시공부위 하자 발생 시 열화상 패턴 분석 - (공동) 하자 부위 상세 열화상 측정 실시						

	2년차	목표	- (주관) 열화상 해석을 위한 3차원 수치모델 개발 - (주관) 열교계수 수치 재연성을 위한 필요조건 분석 - (공동) 창호시공부위 하자 평가를 위한 열화상 측정 방법론 제안 - (공동) 주요 열화상 및 해석 결과 DB화
		내용	- (주관) 계산 서버영역 구축 및 행렬화, solver, 수치해법 설정 - (주관) 메쉬 정보, 경계조건 입력 방법 설정 - (주관) 최적 측정방법론 제안을 위한 필요 입력데이터 분석 - (주관) 벽체 초기온도에 따른 시뮬레이션 적정 기간 분석 - (공동) 기존 열화상 측정 방법 분석 - (공동) 열화상 측정 환경 기준 (실내 · 외 온도차, 습도, 기류 등) 수립 - (공동) 열화상 측정 절차 (방사율보정, 반사온도 보정, 촬영위치 등) 수립 - (공동) 데이터베이스 구축 전략 수립 - (공동) 주요 열화상 및 해석 결과 DB 구축
	3년차	목표	- (주관) 고속계산을 위한 리덕션 기술이 적용된 수치모델 개발 및 적용 - (주관) 최적화를 통한 선형열관류율 도출 - (공동) 프로그램 입력 모듈 개발 - (공동) 프로그램 계산 및 출력 모듈 개발 - (공동) 모듈 통합 - (공동) 선형열관류율에 따른 건물 에너지 성능 영향도 평가
		내용	- (주관) 리덕션 수치모델 적용 및 검증 - (주관) 계산속도 및 필요 입력값 단순화 등 시공현장에서 적용성 검토 - (주관) 선형열관류율 도출을 위한 최적화 리덕션 통합 모델 개발 - (공동) 실증 대상 선정 - (공동) 열화상을 통한 모델기반 열교계수 현장 재연성 확인 - (공동) 프로그램 사용자 인터페이스 설계 - (공동) 프로그램 입력부 개발(모델링, 정보입력) - (공동) 리덕션 수치모델 탑재 - (공동) 프로그램 출력부 개발(결과 출력) - (공동) 입력 · 계산 · 출력 모듈 통합 - (공동) 프로그램 매뉴얼 개발 - (공동) 건물 에너지 성능 영향도 평가 방법 개발 - (공동) 건물 에너지 성능 영향도 평가
연구개발성과		○ 고속계산 수치 모델 구현 및 검증 - 현장 즉각 분석용 고속수치모델 정량적 성능수준 오차율 1% 달성(성능목표: 2%) - 기존 시뮬레이션 모델 대비 계산속도 9,800배 향상(성능목표: 100배 향상) - SCI(E) 논문 게재를 통한 열화상기반 열교 분석가능성 및 수치모델 성능 검증완료 ○ 현장 측정 및 분석 - 현장 즉각 분석을 위한 측정방법론 및 절차 수립 완료 - 선정한 실증 현장 4개소에서 제안한 방법의 재연실험 오차율 검증(오차율 15%이내) - 현장 측정 및 개발한 S/W 활용을 통한 현장실증시간 평균 2분 56초(성능목표 1시간 이내)	
연구개발성과 활용방안 및 기대효과		본 연구의 성과물은 열화상 기반 창-벽체 접합부위 열교 분석용 3차원 고속수치모델을 개발함으로써 시공이 완료된 현장의 단열시공성능 수준을 확인하는 것임. 이를 통해 시공현장에서 신속·정확하게 성능평가를 수행할 수 있으며, 그린리모델링, 건축물 에너지 절약 설계기준 마련 등에 기여 가능함. 또한 본 연구는 국외에서도 기술 개발이 되지 않은 기법을 이용한 정량적 열 성능 평가 기술의 최초 확보로 관련 분야의 기술 선점은 물론 에너지 성능평가, 건설 시공관리 등 다양한 분야에서 활용 가능함.	

연구개발성과의 비공개여부 및 사유	해당없음											
연구개발성과의 등록·기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구 시설· 장비	기술 요약 정보	소프트 웨어	표준	생명자원		화합물	신품종	
								생명 정보	생물 자원		정보	실물
	6	등록 : 1 출원 : 6	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-
연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황	구입기관	연구시설·장비 명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	ZEUS 등록번호			
	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
국문핵심어 (5개 이내)	열화상		디지털 트윈		창호		3차원 수치모델		시공 하자			
영문핵심어 (5개 이내)	Thermography		Digital twin		Window joint		3D numerical model		construction defects			

〈 목 차 〉

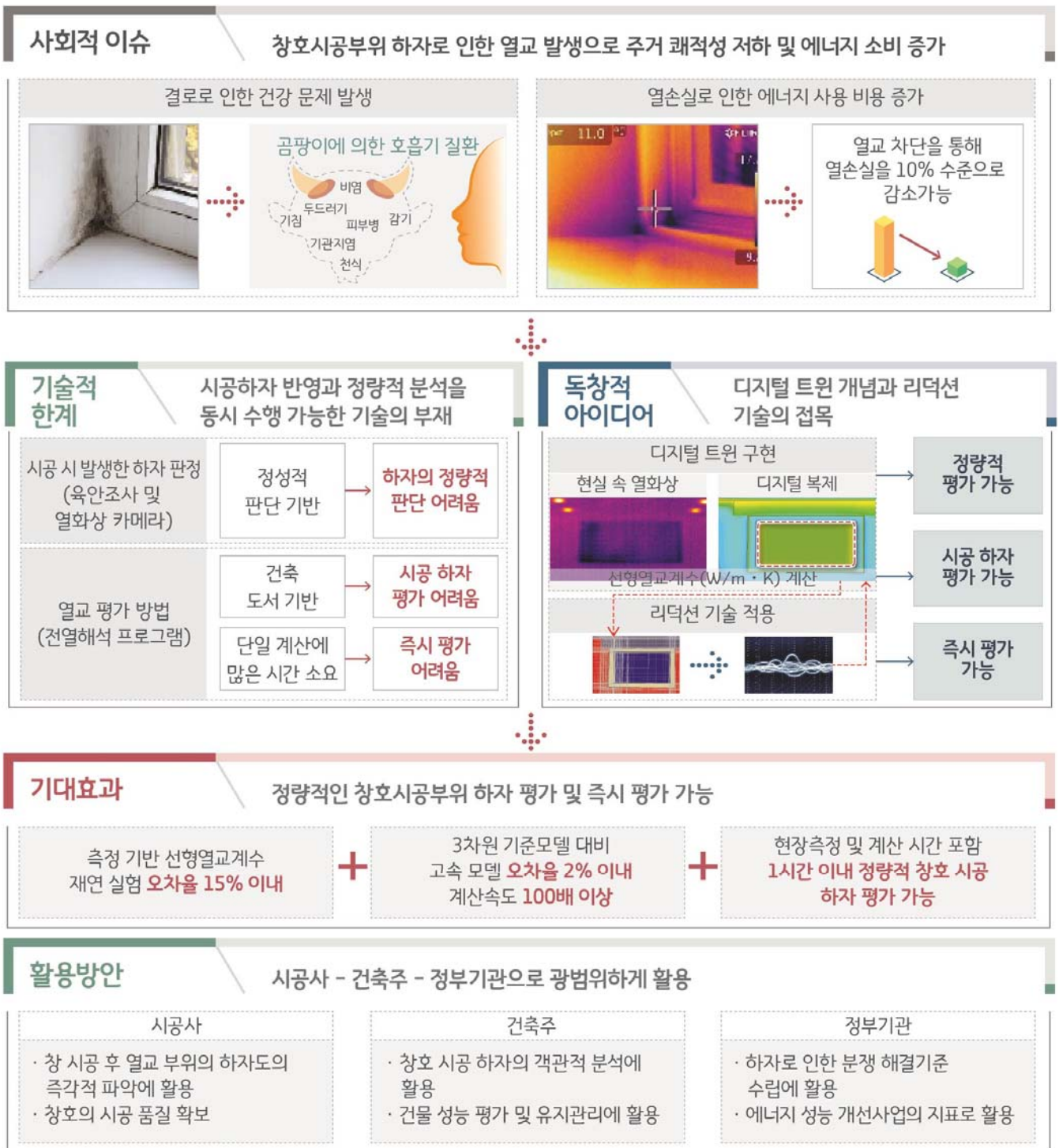
1. 연구개발과제의 개요	1
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용	4
- 핵심성과물 A. 열화상 매칭이 가능한 고속계산 수치모델	4
- 핵심성과물 B. 기존 모델을 통한 최적화 기법 베이스라인 구축	25
- 핵심성과물 C. 창호 시공부위 하자 평가를 위한 열화상 측정 방법론	52
- 핵심성과물 D. 열화상을 이용한 창 주변 열교 분석 프로그램	91
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도	109
4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)	116
5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도	117
6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획	117

1. 연구개발과제의 개요

1) 연구개발과제의 최종 목표

○ 연구개발 최종목표

- 본 연구개발의 최종목표는 창호시공부위에서 발생한 하자를 신속하게, 정량적으로 평가하기 위해 건축 설계 도면상의 창호 및 벽체 열 성능 데이터를 토대로 **벽체표면 열화상과 3차원 수치모델을 결합하여, 창호 접합부 선형열교계수를 제시**하는 것으로 이를 위해 필요한 수치모델, 측정방법, 평가도구 등을 개발하는 것을 목적으로 함



기대효과

정량적인 창호시공부위 하자 평가 및 즉시 평가 가능

측정 기반 선형열교계수
재현 실험 오차율 15% 이내

+

3차원 기준모델 대비
고속 모델 오차율 2% 이내
계산속도 100배 이상

+

현장측정 및 계산 시간 포함
1시간 이내 정량적 창호 시공
하자 평가 가능

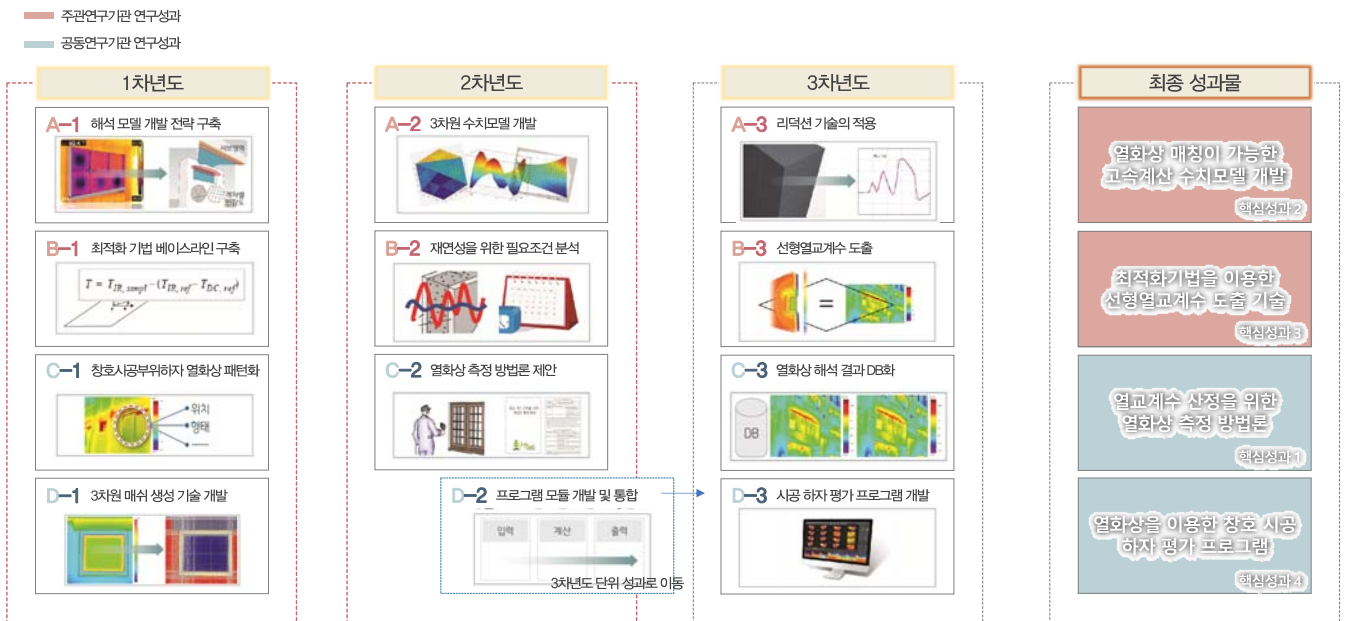
활용방안

시공사 - 건축주 - 정부기관으로 광범위하게 활용

시공사	건축주	정부기관
· 창 시공 후 열교 부위의 하자도의 즉각적 파악에 활용 · 창호의 시공 품질 확보	· 창호 시공 하자의 객관적 분석에 활용 · 건물 성능 평가 및 유지관리에 활용	· 하자로 인한 분쟁 해결기준 수립에 활용 · 에너지 성능 개선사업의 지표로 활용

[그림 1] 연구개발 개요

2) 연구개발과제의 년차별 목표



[그림 2] 연구개발 연차별 목표

<표 2> 연구개발 연차별 목표

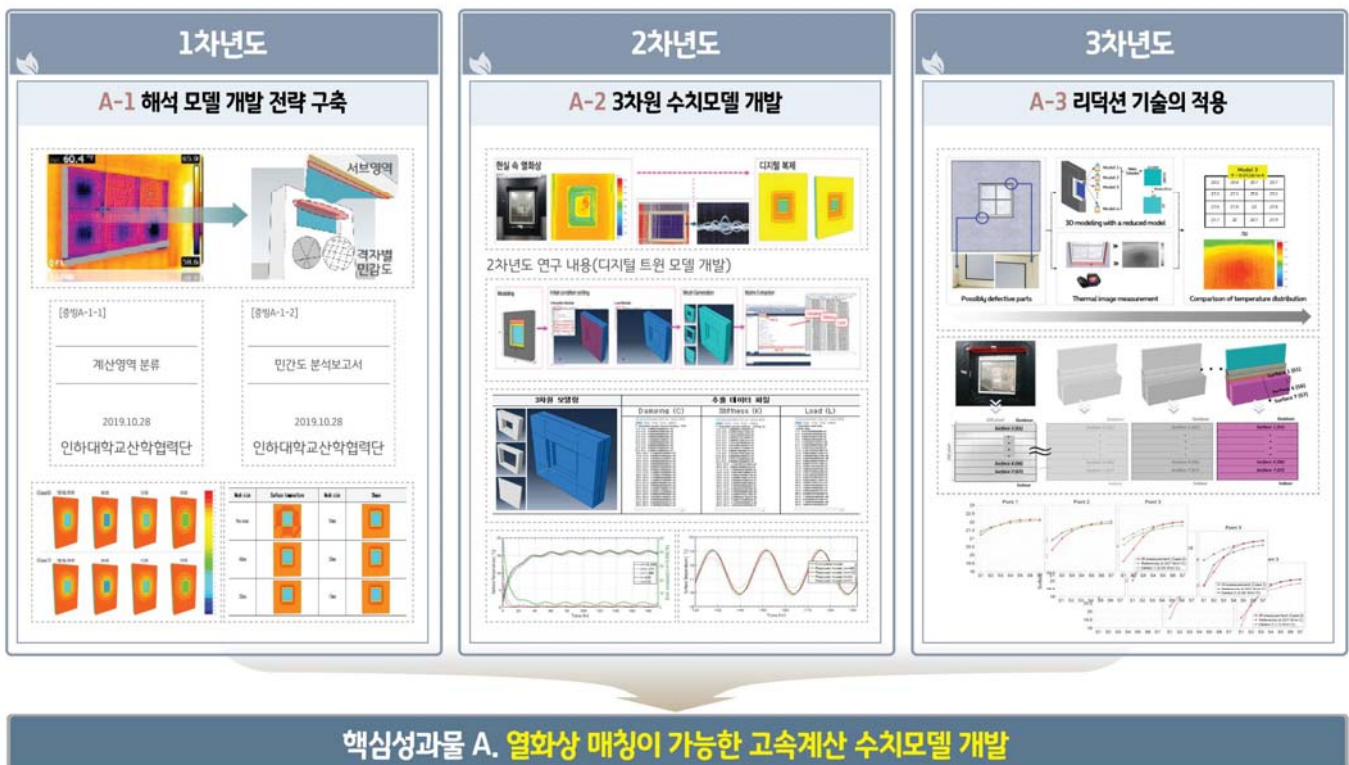
구분	연구개발목표	핵심 연구개발성과 (연구개발성과물)	현재 국내·외 기술수준	연구개발 목표치	목표치 설정 근거	가중치 (%)
1년차 (2019)	3차원 수치 모델의 해석모델 개발전략 구축	계산영역분류	소프트웨어를 통한 3차원 영역 구획	보고서 1건	-	-
		민감도 및 서브영역	-	보고서 1건	-	10
		열화상 구현 가능성	-	시뮬레이션 10건	-	5
	기존 모델을 통한 최적화 기법 베이스라인 구축	열교계수 정의 및 시뮬레이션	소프트웨어를 통한 선형열관류율 계산	보고서 1건	-	-
		열화상과 수치해석 패턴 비교	-	보고서 1건	-	-
	창 주변 열교 열화상 패턴화	창 주변 열교 사례 수집	공개된 열화상 열교 사례 전무	사례 100건	-	6
		열화상 패턴 분석	열교 부위 패턴 분석 연구 전무	사례 100건	-	
		열교 부위 상세 열화상 측정	열교 부위 특성 분석을 위한 열화상 전무	측정 10건	-	
	창과 벽의 3차원 도면 매쉬 생성 기술 개발	3차원 도면 특성 분석	소프트웨어를 통한 상용화 시도 존재	보고서 1건	-	6
		매쉬 생성 알고리즘 개발	매쉬자동생성기술 및 소프트웨어 확인	보고서 1건	-	

구분	연구개발목표	핵심 연구개발성과 (연구개발성과물)	현재 국내·외 기술수준	연구개발 목표치	목표치 설정 근거	가중치 (%)
2년차 (2020)	열화상 해석을 위한 수치모델 개발	서브영역 구축 및 행렬화	자동화 구현 전무	보고서 1건	-	10
		메쉬,경계 입력방법 설정	열화상 해석을 위한 설정법 전무	시뮬레이션 10건	-	-
	재연성을 위한 필요 조건 분석	필요 입력 데이터 분석	재연성을 위한 조건분석 연구 전무	보고서 1건	-	-
		시뮬레이션 적정기간 분석	-	보고서 1건	-	10
	열교 계수 산정을 위 한 열화상 측정 방법 론 제안	기존 열화상 측정 방법 분석	열화상 기반 열관류율 계산 방법 존재	보고서 1건	-	6
		열화상 측정 환경 기준 수립	창 주변 열교 정량화를 위한 기준 전무	보고서 1건	-	
		열화상 측정 절차 수립	창 주변 열교 정량화를 위한 측정 절차 전무	보고서 1건	-	
	주요 열화상 및 해석 결과 DB화	데이터베이스 구축 전략 수립	영상 관련 DB 구축 방법 존재	보고서 1건	-	6
		열화상 데이터베이스 구축	창 주변 열교 관련 열화상 DB 전무	데이터베이스 1건	-	
3년차 (2021)	리덕션 기술 적용 수 치모델 개발	모델 적용 및 검증	리덕션 모델 기반 현장 검증 전무	오차율 5%	기존 문헌 참조	-
		시공 현장 적용성 검토	리덕션 모델 기반 현장 검증 전무	보고서 1건	-	10
	열교계수 도출	통합모델개발	열화상비교를 위한 리덕션모델 전무	계산속도 100배	목표 현장평가 소요시간	10
	열화상을 통한 모델 기반 열교계수 현장 재연성 확인	실증 대상 선정	-	실증 2건	-	6
		열교계수 현장 재연성 확인	열교계수 현장 재연성 연구 전무	재연성 15%	기존 열관류율 측정장치 재연성 이상	
	프로그램 입력 모듈 개발	사용자 인터페이스 설계	-	설계도 1건	-	5
		프로그램 입력부 개발	-	모듈 1건	-	
	프로그램 계산 및 출 력 모듈 개발	고속 수치모델 탑재	-	모듈 1건	-	5
		프로그램 출력부 개발	-	모듈 1건	-	
	모듈 통합	입력·계산·출력 모듈 통합	창호 시공 하자 평가 프로그램 전무	S/W 1건	-	10
		프로그램 매뉴얼 개발	창호 시공 하자 평가 프로그램 전무	매뉴얼 1건	-	
	열교 계수에 따른 건 물 에너지 성능 영향 도 평가	영향도 평가 방법 개발	열교에 따른 영향도 평가 방법 전무	보고서 1건	-	5
		에너지 성능 영향도 평가	열교에 따른 영향도 평가 방법 전무	보고서 1건	-	

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

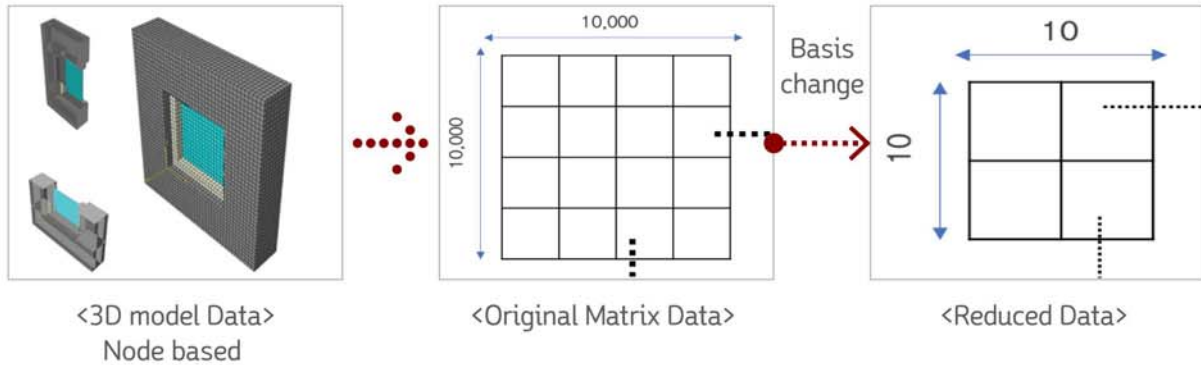
핵심성과물 A. 열화상 매칭이 가능한 고속계산 수치모델

핵심성과 A	열화상 매칭이 가능한 고속계산 수치모델		
정의	현장 열화상 촬영 결과물을 디지털-트윈 기술을 적용하여 즉각적으로 온도 패턴을 묘사할 수 있는 기술을 포함한 수치모델		
목적	기존 분석방법의 경우 열화상 촬영 후 시뮬레이션을 통한 현상 묘사에 오랜 시간이 걸려 실질적인 현상 묘사에 한계가 있는 반면 본 연구를 통해 개발된 수치모델을 활용하여 현장 즉각적인 묘사와 더불어 다양한 경계조건에 대한 분석이 가능해 집에 따라 효과적으로 창호-접합부의 하자를 확인할 수 있어 건설분야의 시공성 향상을 기대할 수 있음		
성능목표	(기존기술 수준) 창호-접합부를 포함하여 열화상 촬영 결과물을 리덕션 기술을 통해 묘사한 사례는 전무함 (개발기술 수준) 세계 최초로 열화상 결과를 높은 수준의 정확도와 빠른 속도로 묘사할 수 있는 기술이며 오차율 2%, 기존 분석기법 대비 계산속도 100배를 목표로 함		
성과달성 책임자 (소속기관)	김의중(인하대학교 산학협력단)		
소요기간	' 19.04 ~ ' 21.12(2년 9개월, 3년차)		
성과달성 확인방법	1) 열화상 결과물을 묘사하는 고속수치모델 관련 논문 2) 구축한 수치모델의 오차율 2%이내, 계산속도 100배 달성		
성과달성에 따른 정량적 성과 (계획)	특허 출원/등록	출원 : 1건, 등록 : 1건	(계획) 출원 : 1건, 등록 : 1건
	논문	SCI(E) : 1건, KCI : 1건	(계획) SCI(E) : 1건, KCI : 1건
	저작	0건	-
	S/W	0건	-
	신기술	0건	-
	기타	0건	-



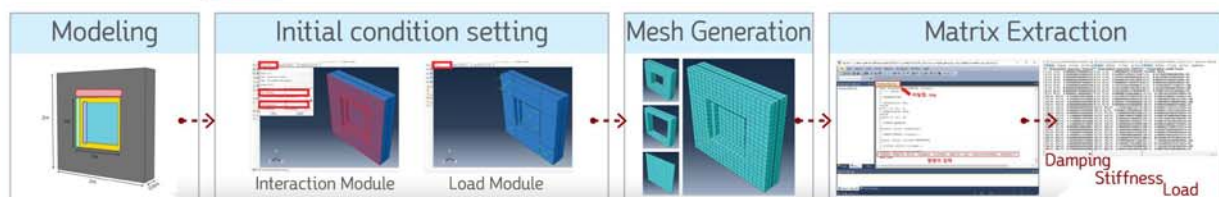
[그림 3] 핵심성과물 A. 열화상 매칭이 가능한 고속계산 수치모델 개발

Reduction Technique

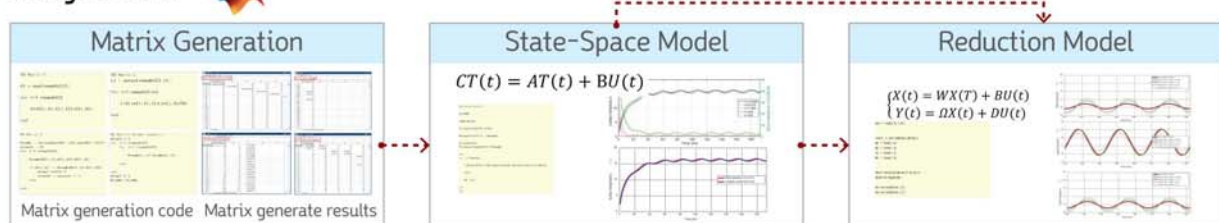


Reduction Process

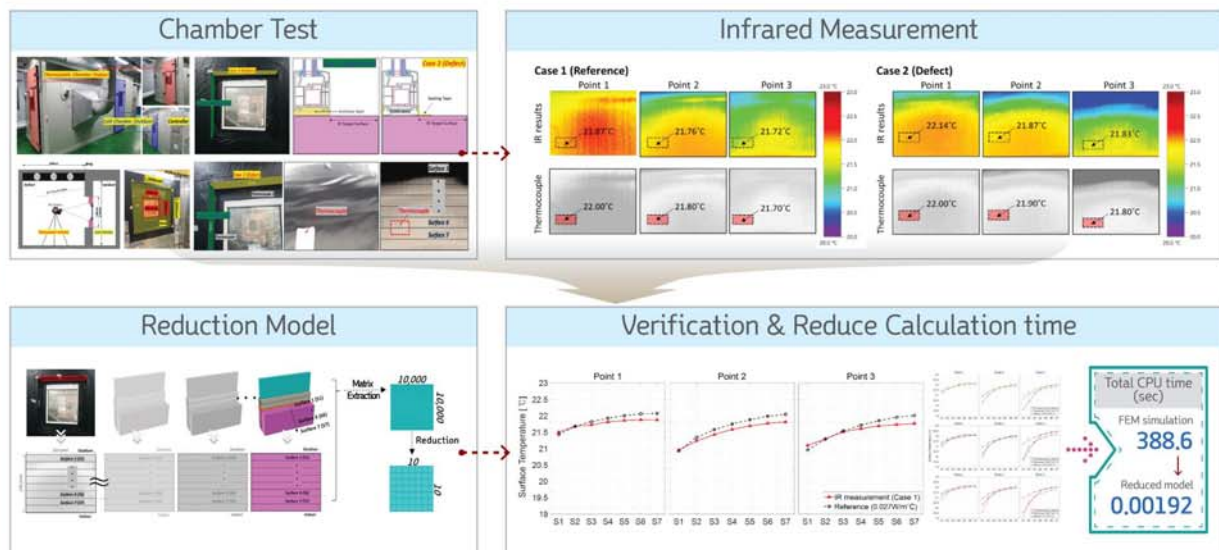
Using ABAQUS



Using MATLAB



Model Verification



[그림 4] 핵심성과 A. 주요 연구 성과

A-1) 3차원 수치모델의 해석 모델 개발 전략 구축

[연구 수행 결과 요약] ① 계산영역 분류: 영향인자에 따른 벽체 온도 분석 ② 민감도 및 서브영역 : 격자 크기에 따른 민감도 분석	계산영역 분류 보고서 [증빙 A-1-1] 민감도 분석 보고서 [증빙 A-1-2]
--	--

○ 열화상 패턴에 따른 계산영역 분류

- 다양한 변수에 대해 예비 시뮬레이션을 실시함으로써 3차원 열화상 구현 가능성을 점검하고 선형열관류율 도출 방법을 구축하기 위한 기초 자료로 활용하기 위해 상세 해석이 필요한 부위에 대하여 점검하고자 함. 따라서 접합부 단열성능, 벽체 축열에 따른 시뮬레이션 수행 시간에 따른 변화, 일사, 격자의 민감도등 다 방면에 대해 고려하여 구현 가능성 확인을 목적으로 함
- 열화상 이미지에 나타나는 패턴에 영향이 있는 요소에 대한 분석을 위해 전열해석 프로그램 ‘Physibel’ 을 사용함. 해당 프로그램은 유한체적(FVM) 해석방식을 기반으로 하며 계산 수행 속도가 빠른 장점이 있으며 해당 프로그램을 활용하여 요소 분석을 한 내용은 아래와 같음

<표 3> 열화상 패턴 영향인자 및 조건 분석사항

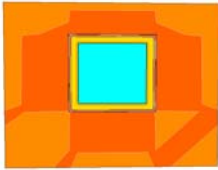
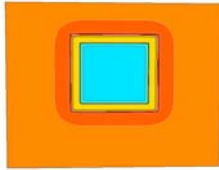
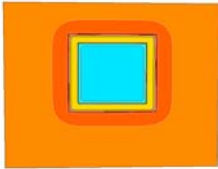
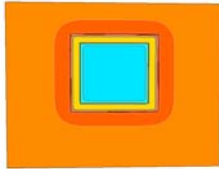
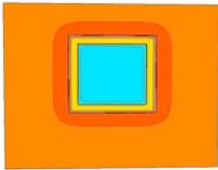
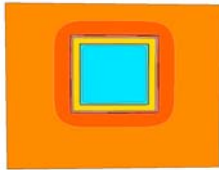
분석사항	분석 내용 요약
실내 · 외 대류열전달계수 적용부위	실내 · 외 온도 및 대류열전달계수 적용 방식에 따른 해석결과를 통해 적용 부위를 구획하고 단열조건인 Adiabatic 설정 방법과 영역을 확인함
실내 · 외 온도 적용 방법 및 부위	
접합부 열성능 변화에 따른 변화	접합부 열전도를 변화에 따라 벽체의 열 Contour가 변화함
여름철 기상 조건	실내 · 외 온도차가 적은 조건에서 접합부 열성능에 따른 해석을 진행하였으며 접합부 열성능에 따른 변화가 적음을 확인
겨울철 기상 조건	실내 · 외 온도차가 큰 조건에서 접합부 열성능에 따른 해석을 진행하였으며 접합부 열성능에 따른 변화가 뚜렷함을 확인
일사 조건에 따른 표면온도 변화	실외측표면 일사조건을 설정하였을 때 실내측 표면온도 변화 정도를 겨울철 조건을 대상으로 확인하였으며 열 Contour가 뚜렷한 겨울철의 경우 일사 조건에 따라 Contour 구분이 적게 나타나는 것을 확인함
시뮬레이션 기간에 따른 표면온도 변화	시뮬레이션 기간에 따라 축열효과에 따라 실내측 표면온도 변화를 확인할 수 있으며 온도 이력 측정의 필요성을 확인함

○ 계산격자에 따른 민감도 및 서브영역 설정

- 계산격자 크기는 해석결과의 정확성과 해석속도에 영향도가 커, 고속계산수치모델 개발을 위해 적정 격자 크기에 따른 분석을 실시함. 본 연구년도에서 활용한 시뮬레이션 모델을 통해 정확도 차이를 확인함
- 계산격자 크기에 대한 격자 독립성 테스트를 진행하였고 이에 따른 민감도를 벽체를 통해 유 · 출입 되는 전체 열류량과 표면온도 값을 통해 분석함. 격자 크기에 대한 표면온도 해석 결과는 아래와 같음. 격자 크기 증가에 따라 표면온도 오차가 증가하며 기준 격자 크기를 10mm 의 크기를 2배인 20mm로 하였을 때 표면

온도 차이는 0.018℃ 차이로 결과값에 대한 차이가 적어 기준 격자를 10mm로 설정함이 타당하다고 판단됨

<표 4> 격자크기별 해석결과

Mesh size	Surface temperature	Mesh size	Surface temperature
Maximum		50mm	
40mm		30mm	
20mm		10mm	

<표 5> 격자크기별 해석결과

Mesh size	Total heat flux (W)	Surface temperature (℃)	Temperature difference ratio (%)
Maximum	171.853	18.75	3.0
50mm	163.763	19.45	0.6
40mm	163.292	19.40	0.4
30mm	162.259	19.37	0.2
20mm	161.917	19.34	0.1
10mm(기준격자)	161.114	19.32	0

<표 6> 단위성과물 A-1 전문가 자문 결과

전문가 인적 사항	자문 결과 요약
- 성명: 장용성 - 소속: GS건설 - 직책: 책임연구원	- 자문일자: 2019.06.28 - 자문 제목: 3차원 수치모델 비정상상태 해석 적절성 - 비정상상태 해석 시 요구되는 시뮬레이션 고려사항에 대한 자문 및 건설사에서 창호 벽체 접합부 관련한 하자 및 대응 기술등에 대한 자문
- 성명: 엄재용 - 소속: 이건축호 - 직책: 책임연구원	- 자문일자: 2019.06.27. - 자문 제목: 창호 접합부 기술 동향 및 시뮬레이션 - 창호 전문 기업 연구원으로부터 창호 접합부에 대한 업계 동향 관련 기술 개발 현황 및 이를 정량적으로 분석할 수 있는 도구 등, 창에 대한 전반적인 자문.

A-2) 열화상 해석을 위한 수치모델 개발

[연구 수행 결과 요약]

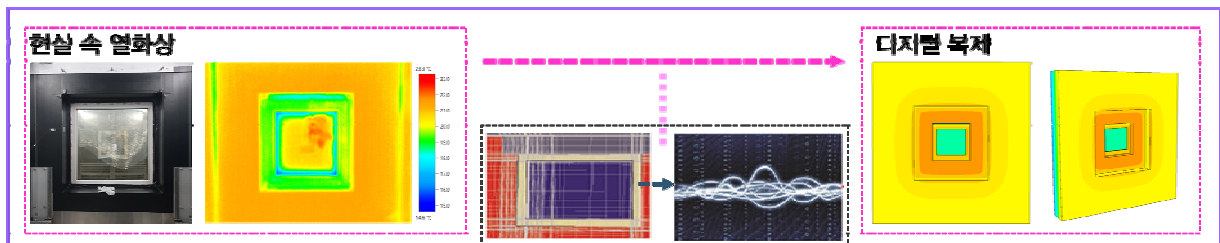
- ① 행렬 데이터 구축 및 수치모델 자동화
- ② 상태-공간모델, 리덕션 모델 검증

행렬 데이터 구축 보고서 [증빙 A-2-1]
메쉬 설정방법 보고서 [증빙 A-2-2]

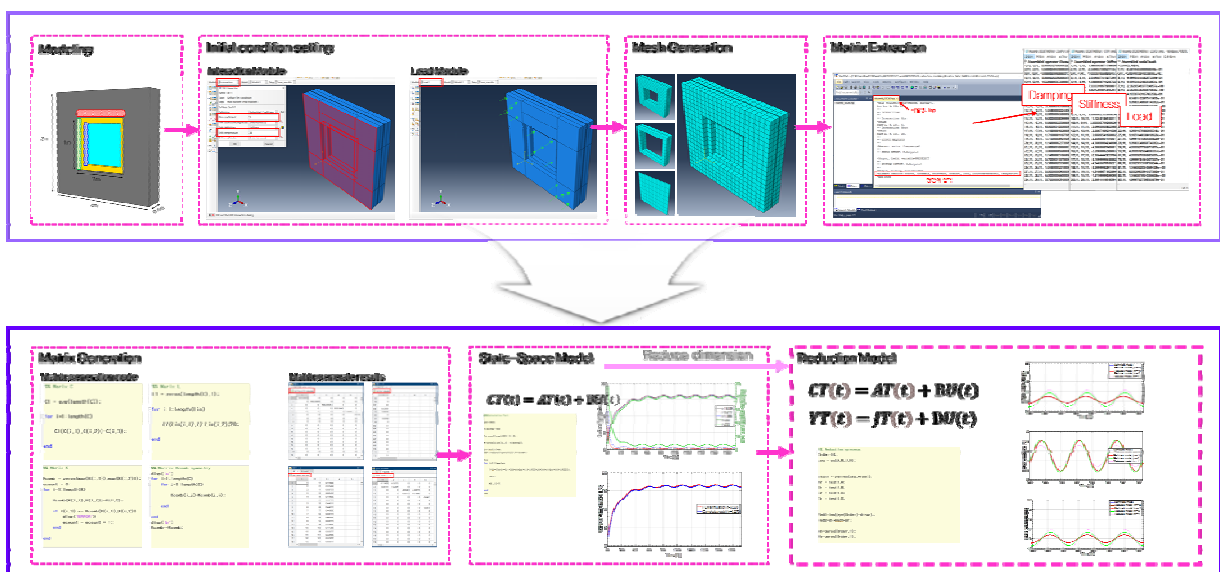
○ 디지털 트윈 기술을 접목한 열화상 묘사 기술

- 디지털 트윈 기술(Digital-twin technology)은 실제 현상을 가상으로 빠르고 정확히 묘사하는 기술로 본 연구에서는 창호-벽체 열화상을 수치모델을 통해 묘사함으로써 정량적 열교 분석이 가능하도록 하고자 함
- 기존 시뮬레이션을 통한 열교 분석 방법의 경우 도면 기반의 정상시공 상태를 가정하여 FEM 시뮬레이션 프로그램을 사용한 전열해석법을 사용하며 해당 방법의 경우 시공 하자에 대한 묘사, 다양한 경계조건에 대한 반복 해석에 어려움이 있어 현장 기반 열교 분석 방법으로 적합하지 않음
- 2차 연도 연구단계에서는 열교가 발생한 것으로 확인되는 창호-벽체의 표면 온도를 묘사할 수 있는 수치모델을 구현하기 위해 3차원 모델링 및 열 물성치 입력을 통해 데이터 추출 및 상태-공간모델 구현의 과정을 자동화함
- 3차 연도 연구단계에서는 정량적 열교 분석의 도구로써 활용하기 위하여 2차 연도에 개발한 수치 모델의 접합부의 물성치를 미지수로 설정한 최적화 모델을 개발할 예정이며, 이를 활용하여 촬영한 열화상 이미지와의 매칭 여부를 검증하고 이에 따른 접합부 품질을 평가할 예정임

디지털 트윈 모델의 활용



2차연도 연구 내용 (디지털 트윈 모델 개발)



[그림 5] 디지털 트윈 모델의 활용 방안 및 2차 연도 모델 개발 개요

○ 행렬 데이터 추출 및 상태-공간 수치모델 구현 자동화

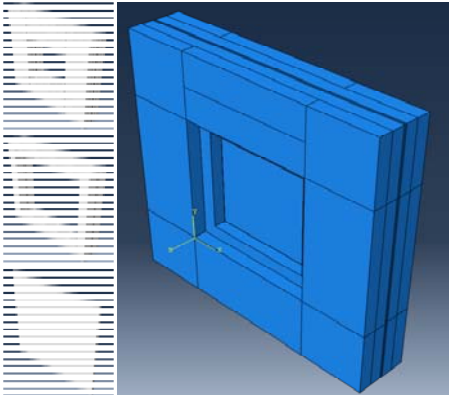
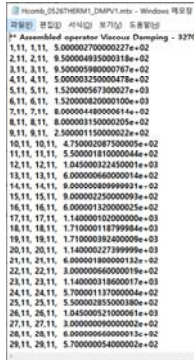
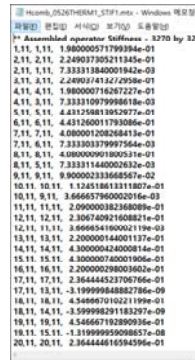
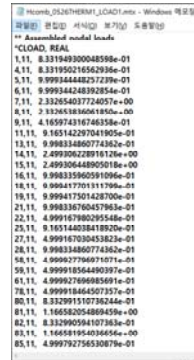
- 실제 다양한 창호 벽 접합부를 묘사하기 위해 독립적인 모델링 방법을 사용하여 연구를 진행하는 것은 실용적이지 않다고 판단됨. 이에, 기존 상용 해석 프로그램 중 계산 행렬 추출이 가능한 소프트웨어(ABAQUS)를 선택하여, 대상 정의, 메쉬 생성, 지배 방정식 및 경계 조건 설정 과정을 통해 모델을 설계하고 이로부터 대상 모델의 행렬을 추출함
- 상태-공간 모델은 공간 이산화가 이루어진 선형 시스템을 표현하는 방식으로, 외벽의 경우 적절한 내외부 대류열전달계수를 설정하면 접합부를 포함한 전체 창/벽체 영역을 상태-공간 모델로 표현할 수 있음. 상태-공간모델에 다양한 함수를 적용하여 대상 문제의 차수를 줄이거나 최적화 할 수 있음. 3차원 열평형방정식(Heat balance equation)을 계산 메쉬에 적용 후 계산 노드 사이의 상호 연관성을 표현한 상태-공간 행렬 방정식에 대한 내용은 [증빙 A-2-1]에 서술함

$$\dot{CT}(t) = KT(t) + LU(t)$$

$$\dot{Y}(t) = JT(t) + DU(t)$$

- 상태-공간모델을 구축하기 위해서는 3차원 모델을 격자화하고, 격자를 구성하는 노드들의 열적 정보를 나타내는 데이터가 필요하며 대상 모델의 노드 수가 많은 경우 수계산을 통해 구축하는데 한계가 있음
- 본 연구에서는 기존 상용 프로그램(ABAQUS)을 사용하여 3차원 모델링을 진행하고 노드 번호와 노드 위치에 해당하는 값을 추출하고 상태-공간모델을 구성하는 행렬로 정의하는 과정을 자동화하는 코드를 개발함([증빙 A-2-1])
- 상태-공간모델을 구성하기 위해서 ABAQUS를 사용하여 <표 6>와 같이 3차원 모델링을 진행하고 해석초기조건파일(.inp) 수정 및 명령어 입력을 통해 3가지 형태의 데이터 파일을 추출함
- 추출한 데이터 파일은 3차원 모델링 형상에서 격자화 된 각각의 노드의 정보를 포함하며 상태-공간모델에 적용하기 위해서 노드의 번호(행), 노드의 위치(열)에 해당하는 데이터 값을 행렬 방정식에 적용할 수 있는 행렬 형태로 자동화 및 수정이 필요함

<표 7> 상태-공간모델 구축을 위한 3차원 모델링 및 데이터 추출 결과

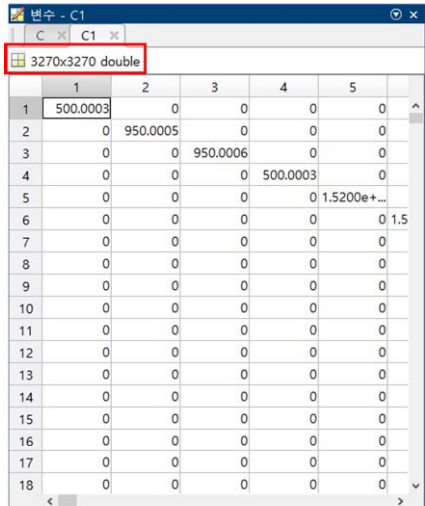
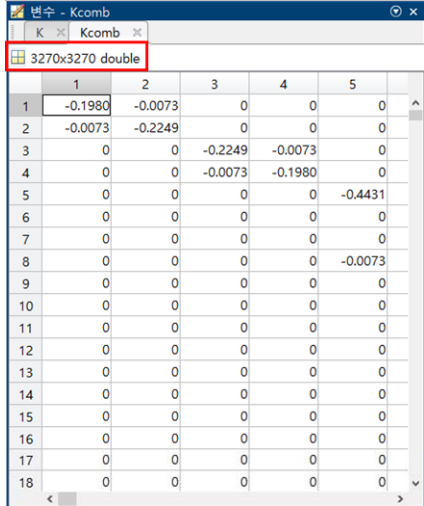
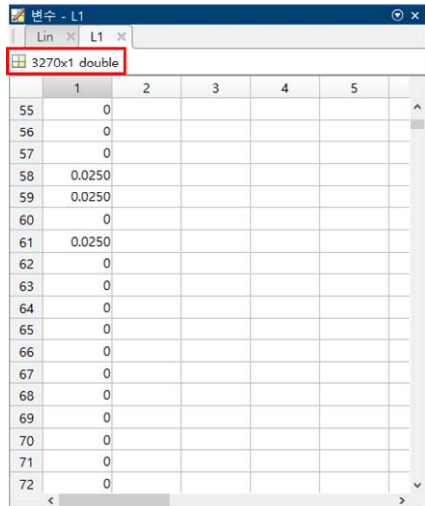
3차원 모델링		추출 데이터 파일		
		Damping (C)	Stiffness (K)	Load (L)
				

- 시뮬레이션 프로그램(ABAQUS)으로부터 추출된 데이터 파일 행렬화 코드 및 결과는 <표 8>, <표 9>와 같음

<표 8> 상태-공간모델 구축을 위한 추출 데이터 행렬화 코드

추출 데이터 행렬 구성 코드		
Damping (C)	Stiffness (K)	Load (L)
<pre> %% Matrix C C1 = eye(length(C)); for i=1:length(C) C1(C(i,1),C(i,2))=C(i,3); end </pre>	<pre> %% Matrix K Kcomb = zeros(max(K(:,1)),max(K(:,2))); ecount = 0; for i=1:length(K) Kcomb(K(i,1),K(i,2))=K(i,3); if K(i,3) ~= Kcomb(K(i,1),K(i,2)) disp('ERROR') ecount = ecount + 1; end end Kcomb=Kcomb; </pre> <pre> %% Matrix Kcomb symmetry disp('a') for i=1:length(C) for j=1:length(C) Kcomb(i,j)=Kcomb(j,i); end end disp('b') Kcomb=Kcomb; </pre>	<pre> %% Matrix L L1 = zeros(length(C),1); for i=1:length(Lin) L1(Lin(i,1),1)=Lin(i,2)/20; end </pre>

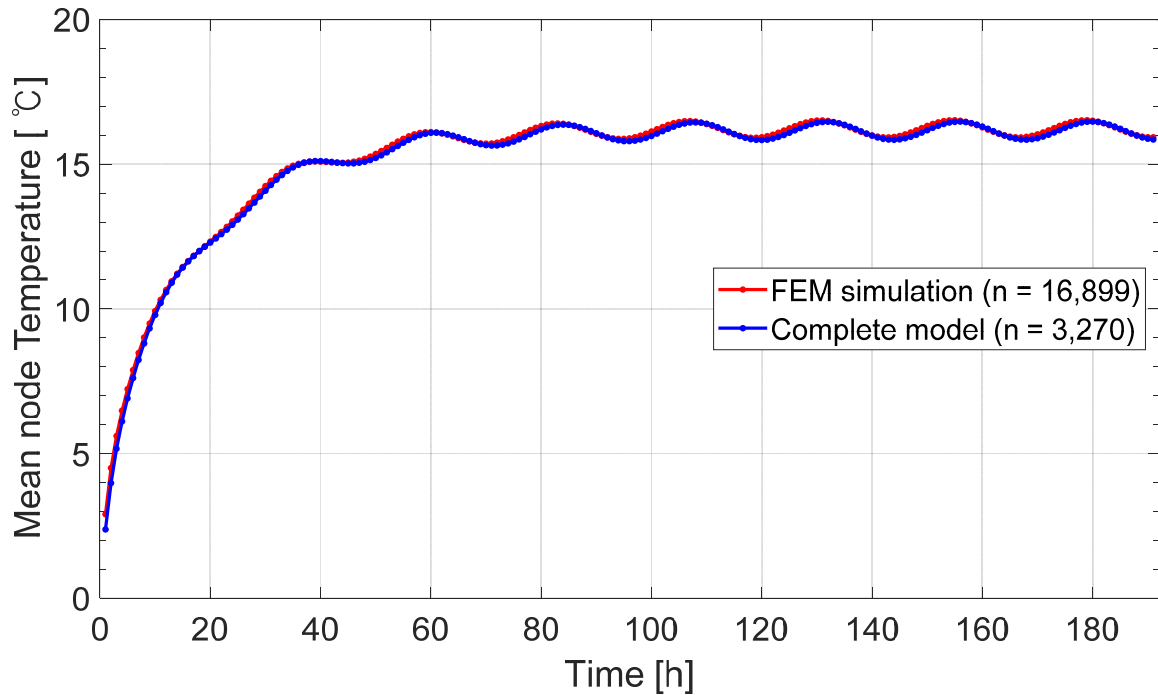
<표 9> 상태-공간모델 구축을 위한 추출 데이터 행렬화 결과

추출 데이터 행렬화 결과		
Damping (C)	Stiffness (K)	Load (L)
		

- 추출한 노드 데이터를 상태-공간 행렬 방정식을 구성하는 행렬로 자동화를 완료하였으며 자동화 과정에서 오류 및 부적합성을 판단할 수 있는 코드를 자동화 과정에 포함함 ([증빙 A-1-1])

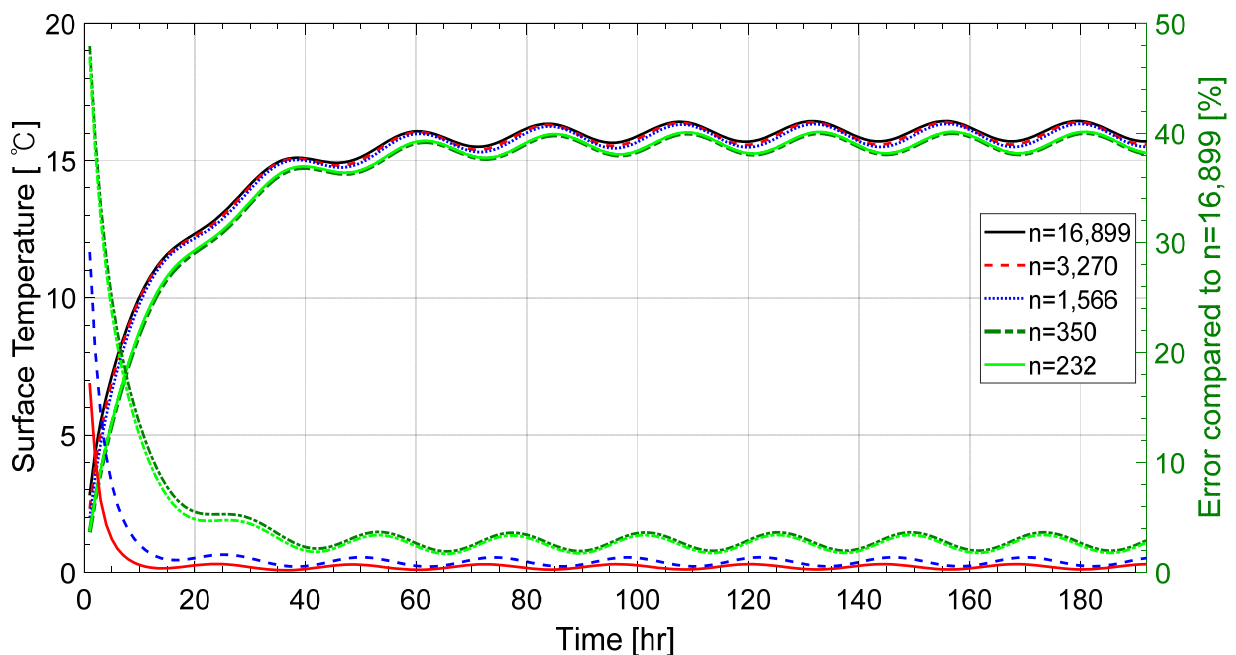
○ 상태-공간 수치모델 검증

- FEM 시뮬레이션 프로그램에서 구성한 격자의 크기에 따라 결정되는 노드의 수가 결정되고 본 연구에서는 모든 노드의 데이터를 추출하여 상태-공간모델을 구성하기 때문에 FEM 시뮬레이션에서 적절한 격자 크기를 구성할 필요가 있음
- 따라서 본 연구에서는 동일한 경계조건과 모델의 FEM 시뮬레이션 프로그램과 상태-공간모델을 구성하여 상태-공간 모델의 차수에 따른 결과값 변화 정도를 확인함
- 모든 조건을 동일하게 적용하였을 때 상태-공간모델의 오차는 FEM 시뮬레이션 대비 1% 이하(0.85%)로 나타남에 따라 수치 모델로써 활용이 가능할 것으로 판단하였으며 해당 내용에 대해 전문가 자문을 실시하여 타당성을 검증함



[그림 6] FEM 시뮬레이션, 상태-공간모델 결과 비교

- 상태-공간모델의 타당성 검증 후 행렬 차수에 따른 민감도를 분석하기 위해 격자 독립성 테스트를 진행함
- 격자 독립성 테스트는 일반적으로 격자 수 또는 단위 격자의 크기를 조정하여 결과값 및 계산속도를 고려 하한 합리적인 격자의 크기를 설정하기 위해 실시함. 특히 FEM 시뮬레이션과 같이 매우 조밀한 격자로 구성되어 계산에 걸리는 시간이 큰 경우 필요성이 큼
- 본 연구에서 상태-공간모델을 구성하는 각각의 행렬의 크기(차수)가 클수록 해석 도구(PC)에 많은 부하가 요구되기 때문에, 적절한 차수의 행렬을 구성하기 위해 격자 독립성 테스트를 함
- 다음 그림은 상태-공간모델을 구성하는 행렬의 차수별 계산 결과임. 본 연구에서는 가장 차수가 높은 모델 (16,899차) 대비 오차율이 1% 이하로 나타난 3,270차 케이스를 상태-공간모델의 기본 차수로 설정함



[그림 7] 상태-공간 모델의 격자 독립성 테스트

○ 전문가 검토 의견

- 2차 연도 연구성과 보고서에 대한 객관적 판단 및 평가를 위해 전문가 자문을 요청하고 의견서를 받음
- 코로나 19로 인하여 비대면으로 자문을 진행하였으며 최초 작성한 보고서에 대한 전문가 의견을 반영하여 보고서 수정을 완료하였음

<표 10> 성과 보고서 검증 전문가

전문가 성명	소 속	직 위	검토 보고서
남 유 진	부 산 대 학 교	교 수	[증빙 A-2-1]
이 광 호	고 려 대 학 교	교 수	[증빙 A-2-1]
도 성 록	한 발 대 학 교	교 수	[증빙 A-2-2]
문 진 우	중 앙 대 학 교	교 수	[증빙 A-2-2]

전문자 의견

- 향후의 학제 연구는 최근 주목 받고 있는 그린 리모델링 및 제로에너지빌딩 보급에 큰 기여를 할 것으로 보이며, 향후 비 분야의 융합가능성이 높은 연구임.

- PEM 수지교환 시뮬레이션의 경우, 부재의 항상 재화를 자주롭게 할 수 있으며 학제의 정확도가 높아 신뢰성 높은 검증 결과가 기대되나 모델 작성과 계산에 많은 시간이 소요되는 단점이 있음. 실무 적용 가능성이 높은 리덕션 모델의 활용을 통한 어프로치임.

- PEM, 선택공간모델, 리덕션 모델을 비교 분석한 결과를 활용하여 매우 빠르게 분석 결과를 적용한 정책도에서 도출하려는 시도는 아주 높이 평가됨.

- 향후, 열확산 디지털 트윈 기반 실험이나 실제 결과와의 비교 검토가 필요할 것으로 보임.

- 전체 학제에 있어 학제 대응모델개발에수나 시공 상황에 따른 Infiltration과 어떻게 잘 반영되어 설계와의 오차를 줄일 수 있느냐가 관건일 것으로 보임.

- 새로운 학제가 있는 모델을 실험과 함께 분석하면 좀더 나은 결과가 나올 것으로 판단됨.

국립과학기술연구원 "리덕션 수지교환을 이용한 열확산 디지털 트윈 기반의 향후 시공부하 학제 평가" 2차년도 성과 보고서에 대한 전문가 의견을 본인이 직접 작성하였음을 확인합니다.

2020년 8월 4일

부 산 대 학 교 교 수 남 유 진 (인)

전문자 의견

- * 자료일자: 2020.05.04.
- * 자료 제목: 수지교환 수치를 위한 열확산 데이터 구축 및 과학 실험방법
- * 3D 모델링 초기공제조건(대체열전달계수, 실내-외 공기 온도, 그리고 Heat Flux) 입력을 위한 재현을 위한 수지교환으로 명시되어 있음. 고려 모델 프로세스도 검토됨이 있음
- * 향후 계정에 반영되는 이상모델에 대한 분석이 학제학적 전문성에 있음 또한 전문성 확장 계획 검토도 필요 고려하는 상황임이 있음
- * 시뮬레이션 도출된 학제시간에 대한 비교분석 결과, 선택공간모델과 리덕션 모델이 PEM시뮬레이션 대비 월등히 빠른 학제시간을 보임. 이는, 빠른 학제가 필요한 상황에서 매우 유용할 것으로 보임
- * 이후 PEM 시뮬레이션 결과와 학제시간이 두 모델의 과학 수 준기에 따른 학제시간 분석이 수행된다면 모델 산출시간은 비 높아질 것으로 판단됨

국립과학기술연구원 "리덕션 수지교환을 이용한 열확산 디지털 트윈 기반의 향후 시공부하 학제 평가" 2차년도 성과 보고서에 대한 전문가 의견을 본인이 직접 작성하였음을 확인합니다.

2020년 8월 4일

한 발 대 학 교 교 수 도 성 록 (인)

전문자 의견

- 본 연구에서는 기존의 3D 모델링을 통한 열확산 분석을 고려한 선택공간모델과 리덕션 모델 구축 및 검증과정을 다루고 있습니다.
- 모델의 개발과정, 검증 등의 과정을 다루어보고, 무엇보다 기존의 선택공간모델과 리덕션 모델의 속도 등을 향상시킴으로써 실제 현장에 적용할 수 있는 좋은 연구라고 판단됩니다.
- 다만, 제(1), (2), (3)에 대한 설명이 없고 해당모델을 통해 얻은 수치를(1), (2), (3)에 대한 설명도 없는데 이에 대한 추가가 필요할 것 같습니다. 또한, 제(15)에서 각 변수들(Operational, Diffusion, etc, Load)의 있는 의미에 대한 설명도 추가가 필요해보입니다.
- 훌륭한 연구 수행하시라고 수고 많으셨습니다.

국립과학기술연구원 "리덕션 수지교환을 이용한 열확산 디지털 트윈 기반의 향후 시공부하 학제 평가" 2차년도 성과 보고서에 대한 전문가 의견을 본인이 직접 작성하였음을 확인합니다.

2020년 8월 14일

고 려 대 학 교 교 수 이 광 호 (인)

전문자 의견

- 본 연구에서 제시한 열확산이치로부터 표면 온도를 유추할 수 있는 수지교환 개발은 현장적용 및 연구의 목적으로 활용도가 높은 매우 의미 있는 연구인 것으로 사료됨.
- 현재까지 진행한 1) 3D 모델링 결과물에 대한 과학 위치, 물성데이터 도출, 2) STATE-SPACE MODEL 구성, 3) REDUCTION MODEL의 제안 한 연구의 목적에 부합하도록 적절한 과정을 수행하였음.
- 선택공간 검증 결과 신뢰도가 확보된 것으로 보이나 실제 적용을 통하여 보다 완전한 결과를 보길 희망.
- 리덕션 모델의 경우 해석시간 측면에서 매우 놀라운 적용성을 보이고 있음. 다만 선택공간과 마찬가지로 실제 적용의 과정이 수행되어야 할 것으로 사료됨.
- 향후 프레임에서 발생하는 차이는 향후 시공하중로 결합시키는 다소 무리가 있을, 따라서, 장과 벽간에 발생하는 이상 온도분포를 분석하는 방법이 필요할 것으로 사료됨. 또한, 온도 차뿐만 아니라 온도 변화의 방향, 분포의 형상과 같이 다양한 요소를 확인해야 함.

국립과학기술연구원 "리덕션 수지교환을 이용한 열확산 디지털 트윈 기반의 향후 시공부하 학제 평가" 2차년도 성과 보고서에 대한 전문가 의견을 본인이 직접 작성하였음을 확인합니다.

2020년 8월 13일

중 앙 대 학 교 교 수 문 진 우 (인)

[그림 8] 전문가 의견 스캔본

A-3) 리덕션 기술 적용 수치모델 개발

[연구 수행 결과 요약] ① 모델 적용 및 검증 ② 시공 현장 적용성 검토	적용결과보고서 [증빙 A-3-1]
---	---------------------------

○ 리덕션 수치모델 구현 (2, 3차 연도 성과 목표 조기 달성)

- 수치 모델은 리덕션 기술(Reduction technique)이 적용된 모델로서, Moore's method에서 차용된 기술로 Balanced truncation method로 불림. 행렬 변수(Variables)의 Controllability (제어가능성)와 Observability(관측가능성)의 균형 조정 접근법에 기초한 효율적이고 높은 정확성을 나타내는 방법으로 평가받고 있음
- 본 연구에서 리덕션 기술을 적용한 고속 수치 모델은 상태-공간 모델을 구성하는 각각의 행렬의 차수를 줄인 모델임. 예를 들어 리덕션을 적용하지 않은 3,270차 원본 모델 경우 시뮬레이션을 위해 3,270개의 방정식이 필요한 반면, 리덕션 모델은 10~30개 수준의 방정식으로 목적으로 하는 결과값을 빠르고 정확하게 산정 가능함
- 아래 식은 자동화를 완료한 상태-공간모델로부터 Basis Change가 된 새로운 상태(X)로부터 모델의 차수를 줄이는 리덕션 모델 개념을 간단히 설명한 것이며, 실제 코드에서는 이 과정을 MATLAB 내장 함수인 Blared를 활용하여 진행함

$$W_c = \int_0^{\infty} e^{2A} B B^T e^{A^T t} dt, W_o = \int_0^{\infty} e^{A^T t} C^T C e^{A t} dt \quad (1)$$

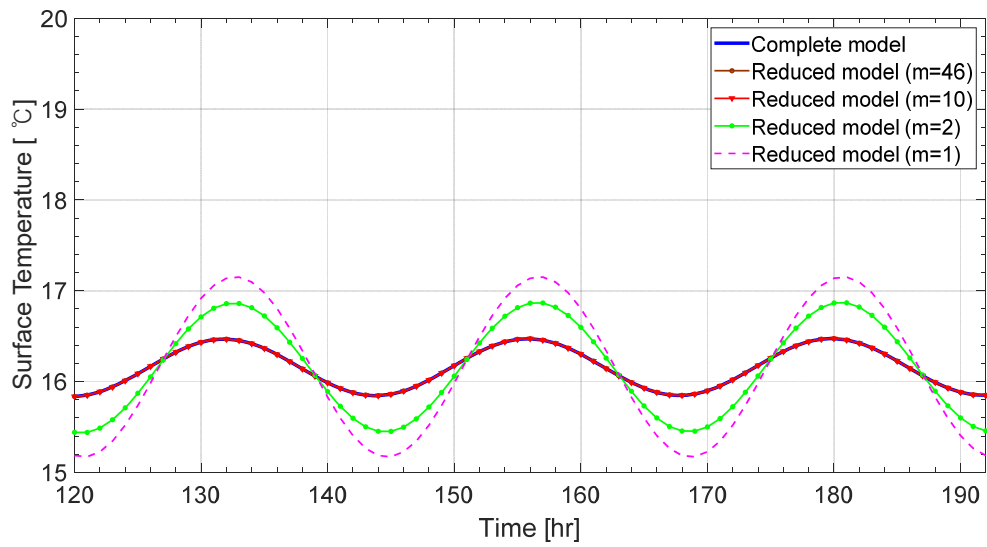
$$\begin{cases} (C^{-1}A)W_c + W_c(C^{-1}A)^T + (C^{-1}B)(C^{-1}B)^T \\ (C^{-1}A)W_o + W_o(C^{-1}A) + J^{-1}J \end{cases} \quad (2)$$

$$X(t) = WX(t) + BU(t) \quad (3)$$

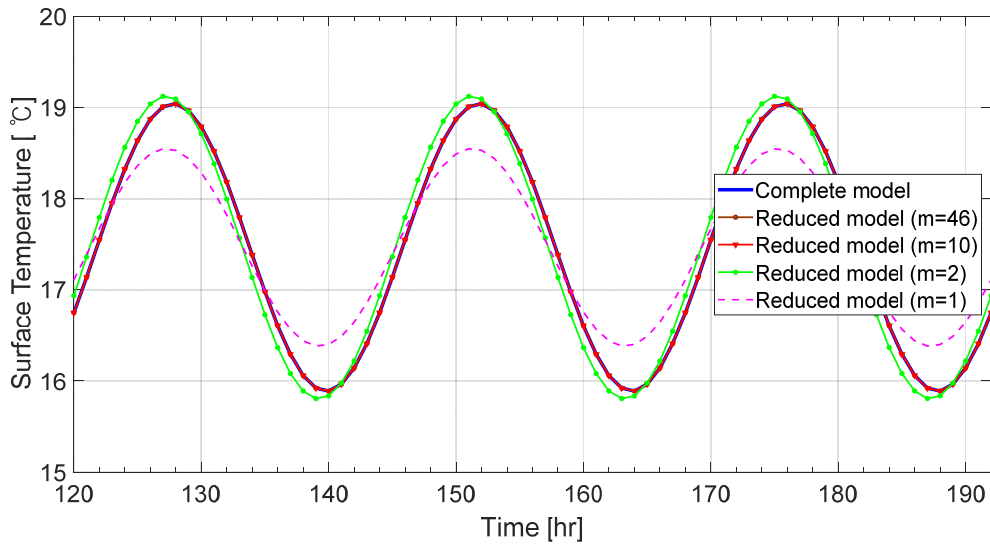
$$Y(t) = \Omega X(t) + DU(t) \quad (4)$$

○ 리덕션 수치 모델 검증

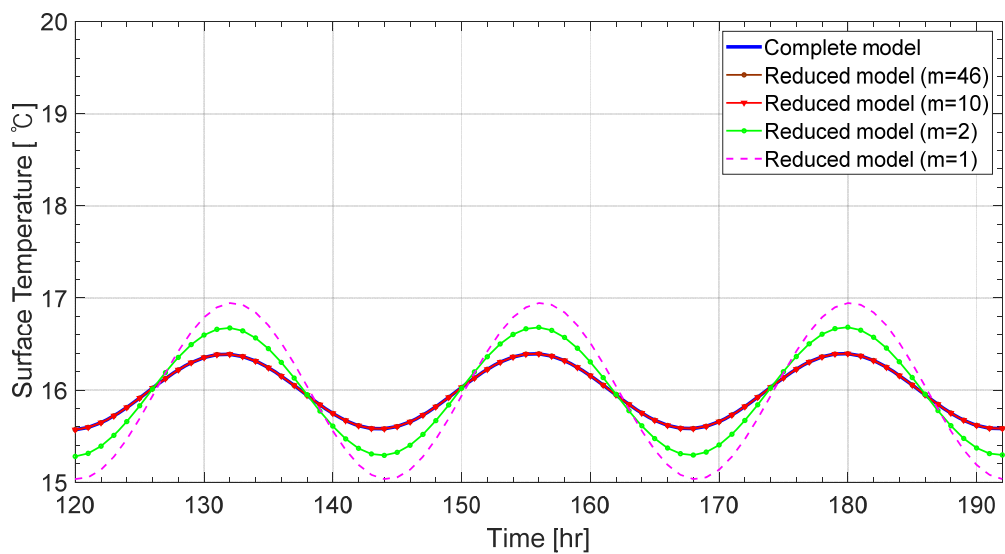
- 본 연구에서 구현한 리덕션 모델의 결과 검증을 위해 앞서 검증되었던 상태-공간모델을 활용하여 리덕션 모델의 결과를 비교 검증함
- 창호-벽체에서 열류의 이동에 민감한 것으로 사료되는 세 부위의 표면 온도를 각각 비교하여 리덕션 모델을 검증하였으며, 세 부위에 대한 내용과 계산 결과의 세부적인 내용은 [증빙 A-2-2]에 작성함
- 다음 그래프는 상태-공간모델(Complete model)과 차수가 각각 1, 2, 10, 46으로 설정된 리덕션 모델로 열류 이동이 민감한 세 부위의 표면 온도 결과를 비교한 것으로, 낮은 차수 케이스(m=1, m=2)를 제외할 때 상태-공간모델과 유사성이 높은 것을 확인함 (오차율 1% 이내)



[그림 9] 상태-공간모델, 리덕션모델 비교 검증 1



[그림 10] 상태-공간모델, 리덕션모델 비교 검증 2



[그림 11] 상태-공간모델, 리덕션모델 비교 검증 3

○ 해석 도구별 계산 속도 비교

- 2차 연도 연구에서 구현한 상태-공간모델과 리덕션 모델의 계산 성능을 확인하기 위해 동일한 경계조건에서 FEM 시뮬레이션(ABAQUS), 상태-공간모델, 리덕션 모델의 해석시간을 비교함
- <표 11>은 계산에 걸리는 시간을 비교한 결과로 리덕션 모델은 1초 미만의 매우 빠른 계산속도를 나타내는 것을 확인할 수 있음
- 3차원으로 정의된 모델의 크기가 클수록 FEM 시뮬레이션의 경우 계산시간이 기하급수적으로 증가하기 때문에 현장 촬영된 열화상을 즉각적으로 디지털-트윈하여 묘사하는 것이 어려움. 반면 리덕션 모델의 경우 계산 성능이 매우 우수하여 다양한 경계조건에 대한 반복 계산이 가능하여 열화상 묘사 가능성이 높을 것으로 예상됨

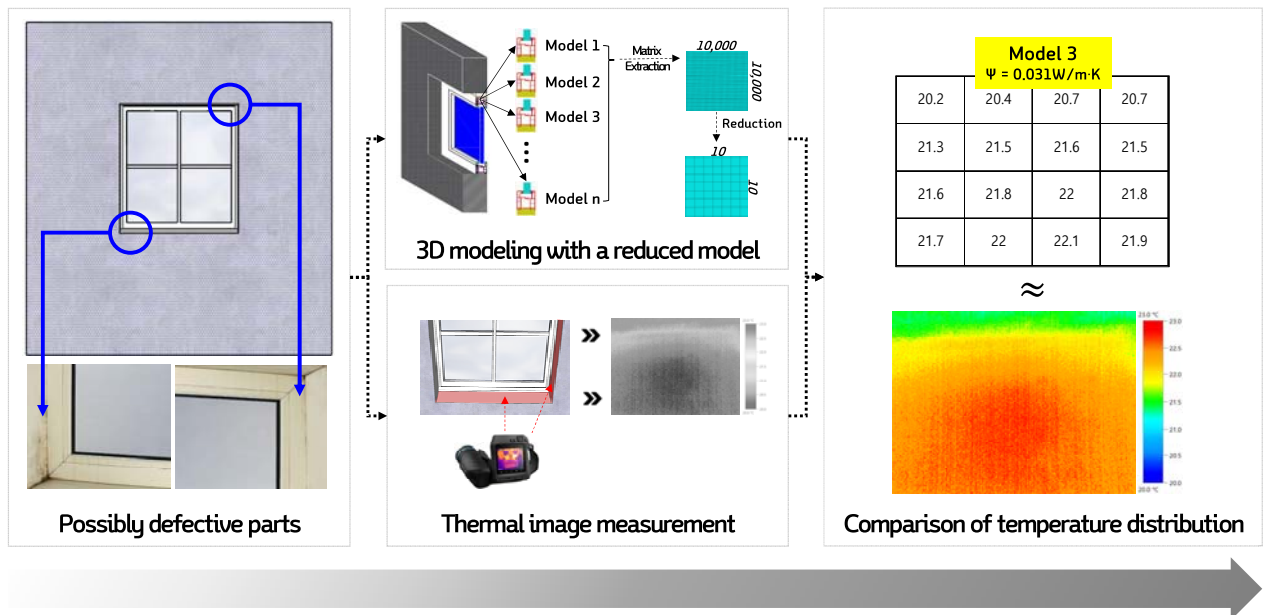
<표 11> 시뮬레이션 도구별 계산시간 비교

시뮬레이션 도구	노드 수(n), 차수(m)	Total CPU time (sec)	CPU time ratio
FEM simulation	n = 16,899	21,387 (=5.94 hour)	-
FEM simulation	n = 3,270	79.5	Reference
상태공간 모델	n = 3,270	0.013	0.00016 (=1.64e-04)
리덕션 모델	m = 10	0.002172	0.000027 (=2.73e-05)

○ 현장 즉각 창-벽체 접합부 열교 분석 프로세스

- 디지털-트윈 기술은 실제 현상을 가상의 시뮬레이션을 통해 빠르게 묘사하고 이를 통해 문제를 해결하는 방법을 총칭하는 용어로, 본 연구에서는 열화상 측정을 통해 획득한 이미지를 고속계산이 가능한 수치 모델을 통해 현장에서 즉각적으로 창-벽체 접합부의 시공 정도를 확인하기 위해 이용함
- 본 연구에서 제안하는 현장 열화상 측정 프로세스는 창-벽체 접합부의 열화상 이미지를 획득하는 과정, 사전에 측정된 실내외 온도를 모델에 입력하여 결과를 산출하는 과정, 열화상 이미지와 수치 모델의 결과를 비교하는 세 가지 과정으로 구성됨
- 열화상은 창과 벽체가 접합하는 부위와 근접한 표면을 대상으로 시간에 따른 온도 변화 이력에 맞추어 여러 시점에서 촬영하며 수치 모델은 도면 정보를 기반으로 외형과 물성을 입력한 정상 시공(Reference model)과 접합부의 열전도율이 상이한 10~20개의 모델을 추가로 구성함
- 접합부의 열전도율이 서로 다른 각각의 수치 모델을 사전에 설계하여 창-벽체 접합부의 열 손실을 나타내는 지표인 선형열관류율 정보를 분석함. 현장에서 열화상을 측정한 시점까지의 온도 이력을 수치 모델에 입력하면 열화상 이미지와 가장 유사한 수치 모델을 통해 접합부 단열 시공 정도를 진단하게 됨

- 현장평가 전과 현장평가로 시점을 나누어 프로세스를 분류하면 다음 [그림 12]와 같이 현장평가 전, 도면 기반으로 접합부 열전도율이 서로 다른 다양한 모델을 구현함으로써 접합부의 선형열관류율이 서로 다른 다양한 케이스를 구성할 수 있음

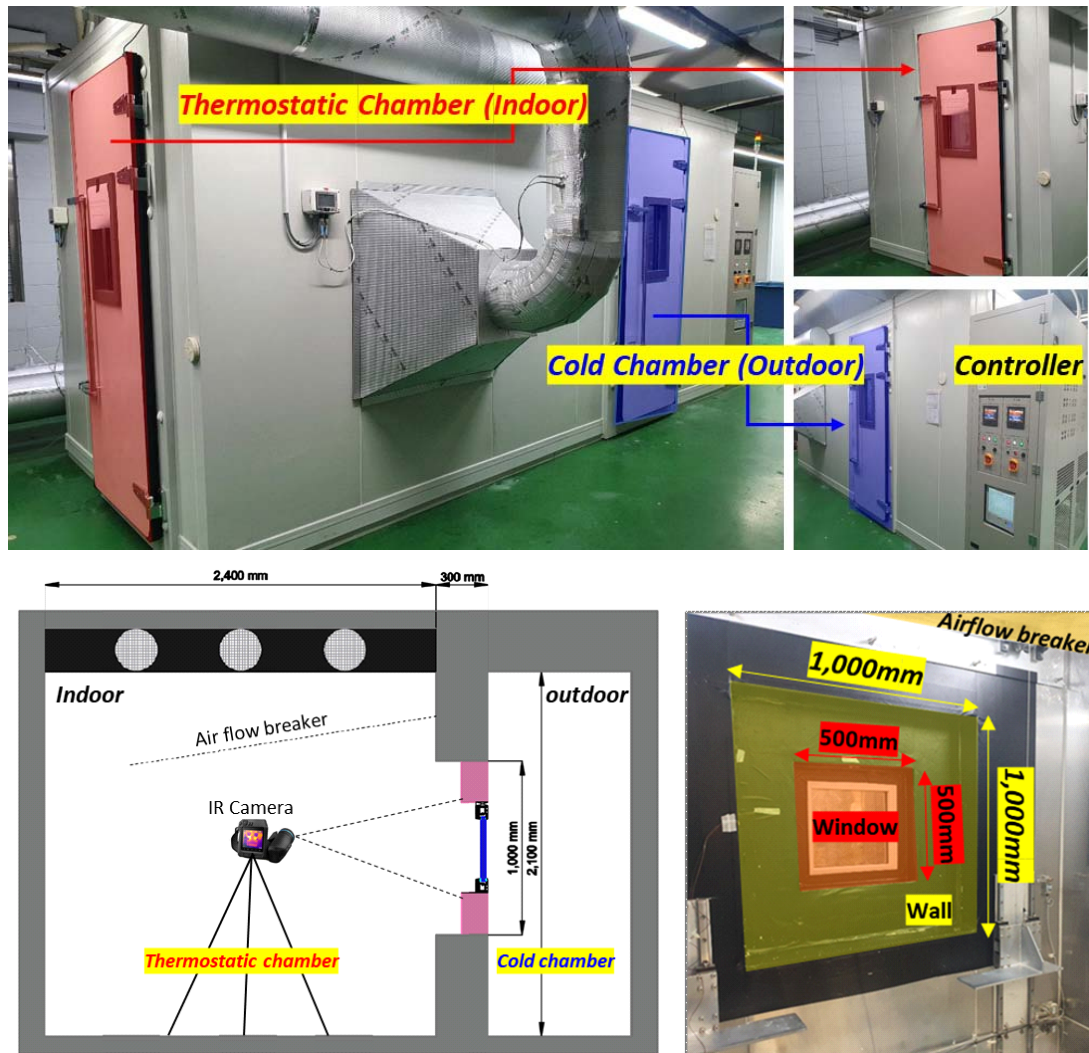


[그림 12] 디지털-트윈 기술을 통한 현장기반 창-벽체 접합부 단열 성능확인 프로세스

- 수치 모델의 해석을 위해 열화상 촬영 전까지 현장의 실내, 실외의 온도 이력에 대한 데이터가 필요하므로 사전에 데이터 로깅이 가능한 온도계를 실내와 실외에 각각 설치해야 함. 현장평가 시 창-벽체 접합부 주변을 열화상 촬영하고 사전에 측정한 실내, 실외 온도데이터를 수치 모델에 입력함
- 고속계산이 가능한 수치 모델을 통해 즉각적으로 열화상과 온도를 비교하며, 가장 온도 차이가 적은 최적 모델을 도출함. 최적 모델과 정상 시공을 가정한 모델의 선형열관류율을 비교하여 창-벽체 접합부의 단열 성능 저하 수준을 확인할 수 있음

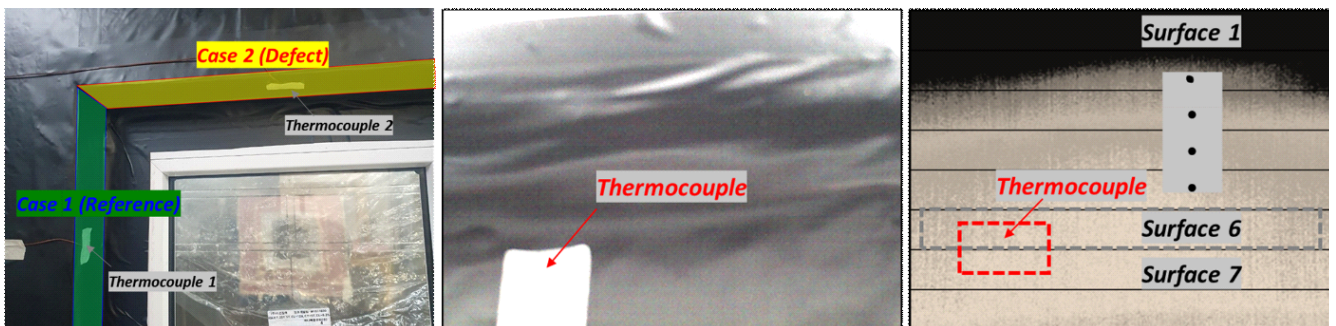
○ 현장 적용성 확인을 위한 챔버 실험

- 창-벽체 접합부의 단열 시공 수준 평가를 위한 디지털 트윈 프로세스의 적용 가능성을 확인하기 위해 항온·항습이 가능한 챔버에 창-벽체 구조물을 설치하는 실험을 계획함. 실험에 이용한 챔버는 항온실과 저온실로 구성되며, 연결된 제어기(Controller)를 통해 각 공간의 온·습도 환경이 조절 가능하며 현장 상황과 유사한 환경을 조성하기 위해 저온실의 온도를 다양하게 변경함



[그림 13] 현장 적용성 확인을 위한 챔버 구성

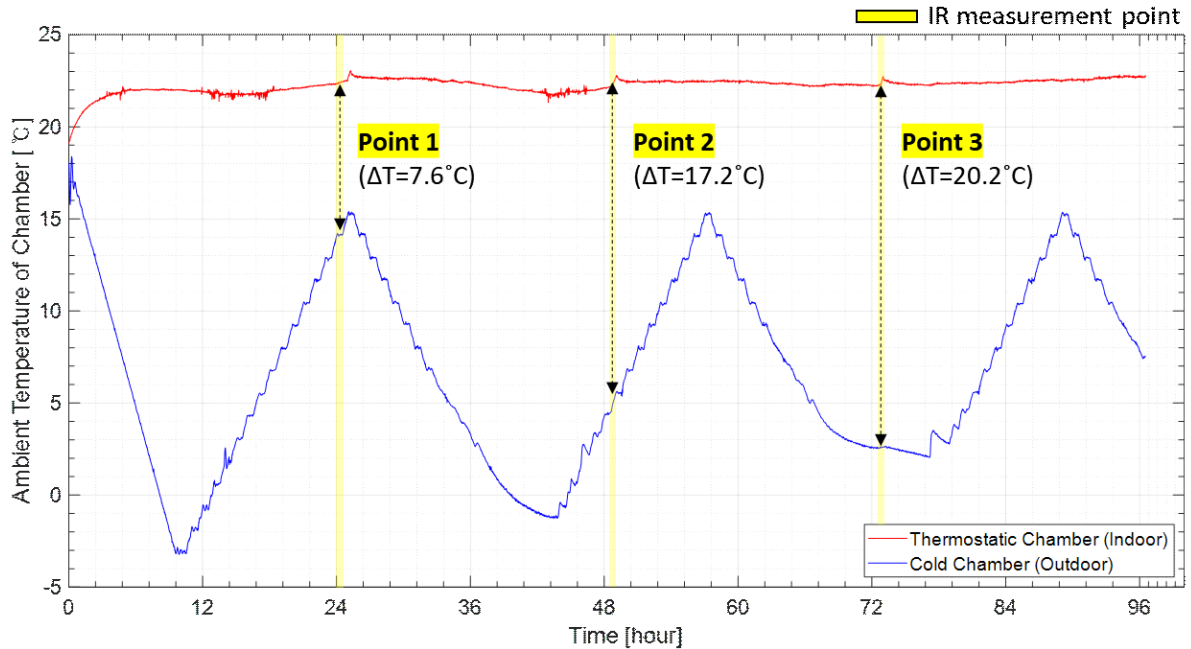
- 열화상 측정은 기기가 내포하는 오차와 더불어 피사체를 구성하는 재료의 방사율과 주변 물체의 복사에너지로부터 반사된 반사온도의 영향을 받음. 본 실험에서는 열화상 카메라로 측정을 진행함과 동시에 시공 방법에 따라 구분한 표면에 접촉식 온도계 Thermocouple을 설치하여 촬영된 열화상을 통해 측정한 온도와 일치 여부를 재차 확인함



[그림 14] 열화상 촬영 결과 검증을 위한 접촉식 온도계 설치

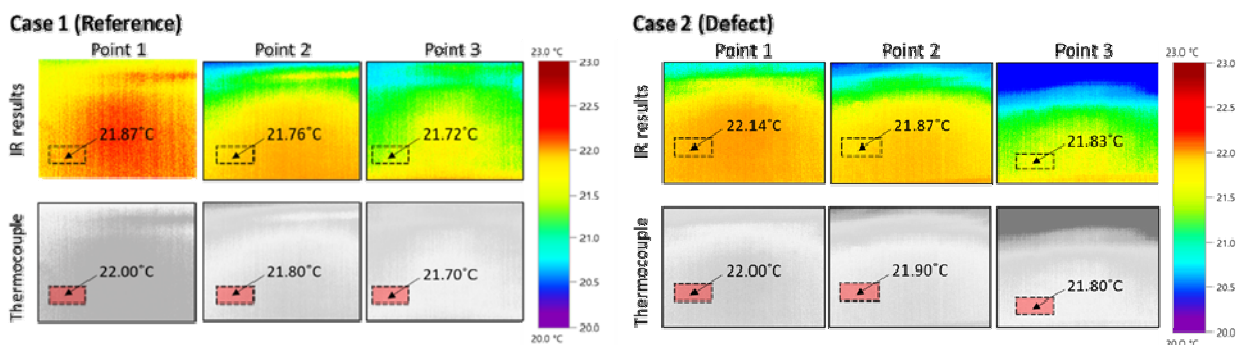
○ 현장 적용성 확인을 위한 챔버 실험 결과

- 접합부 시공 수준에 따라 Case 1과 Case 2를 구분하고 동적 환경을 묘사하기 위해 저온실의 온도 최고온도 15℃, 최저온도 -5℃로 변화하도록 설정하였으며 항온실은 22℃ 수준을 유지함. 열화상 측정 시점은 총 3개로, 각각 항온실과 저온실의 온도차가 7.6℃, 17.2℃, 20.2℃로 측정됨



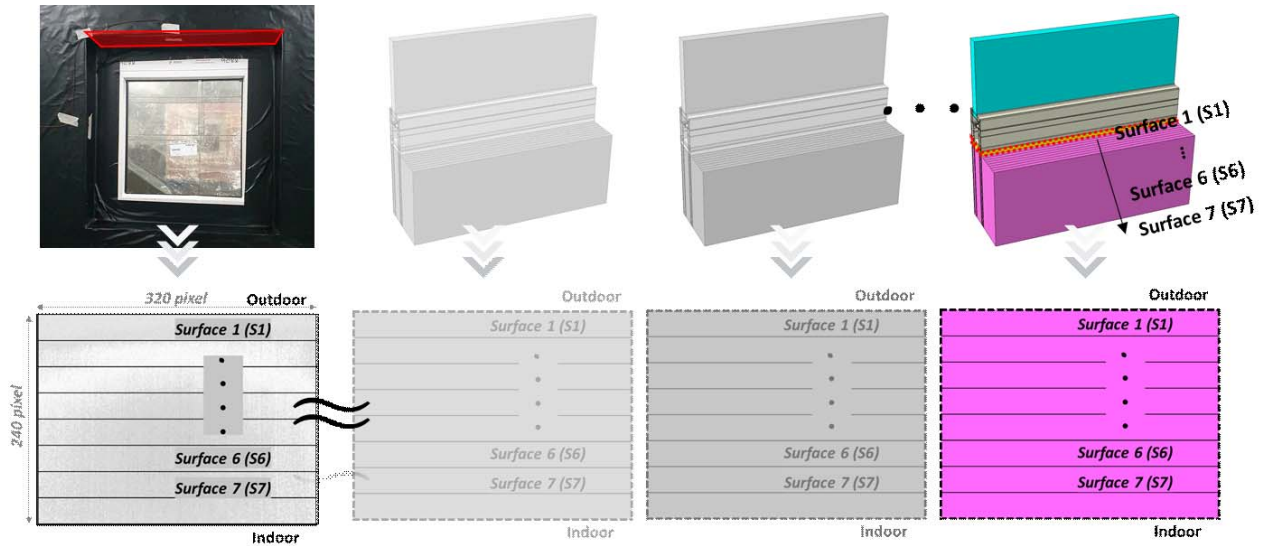
[그림 15] 열화상 촬영 시점 및 항온실, 저온실 온도 측정 결과

- 열화상이 정확한 온도를 나타내는지 확인하기 위해 설치한 접촉식 온도계를 열화상 이미지와 비교하였으며, 평균 0.05℃의 작은 오차를 나타냄을 확인함



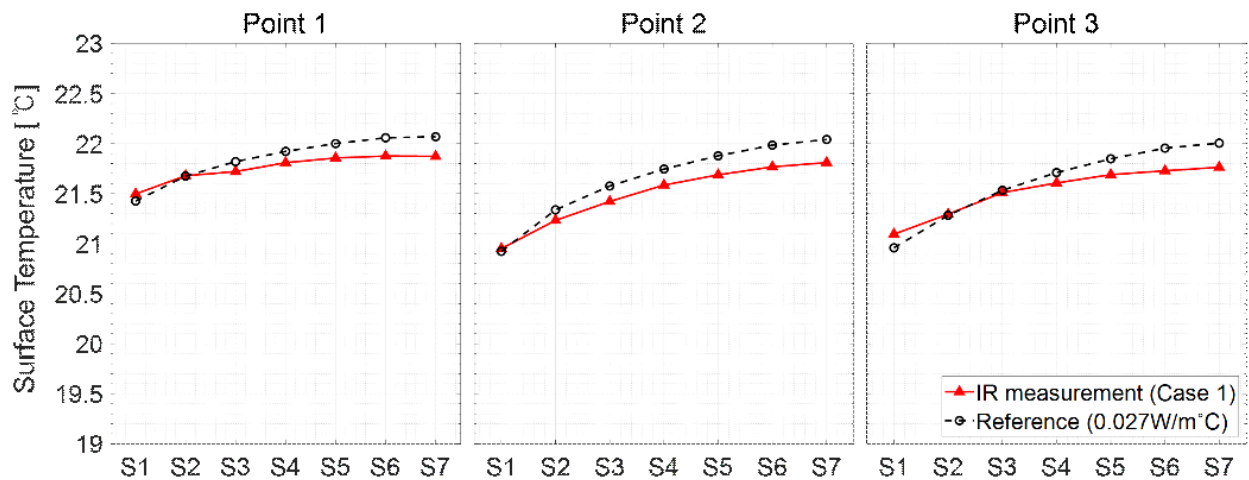
[그림 16] 창-벽체 접합부 주변 열화상 측정 결과

- 열화상 촬영 이미지와 수치 모델을 비교하기 위해 열화상 카메라의 resolution 값인 320*240 pixel에서 세로 축인 240 pixel을 8등분하고 창호와 가까운 7개 그룹에 해당하는 pixel의 온도 데이터를 평균함. 수치 모델도 동일한 방식으로 3차원 모델링 단계에서 표면을 8등분하고 창호 방향으로부터 7개 표면에 해당하는 노드 온도를 평균하여 결과를 비교함



[그림 17] 열화상과 수치 모델 결과 비교 프로세스

- 정상 시공을 가정한 Case 1을 대상으로 3개 측정점에 대해 수치 모델의 결과와 비교하였을 때 접합부와 영향이 가장 큰 것으로 판단할 수 있는 Surface 1(S1)의 오차는 평균 0.07°C 로 산정됨. 이에 수치 모델이 시공 수준에 따른 변화를 묘사할 수 있을 것으로 판단함

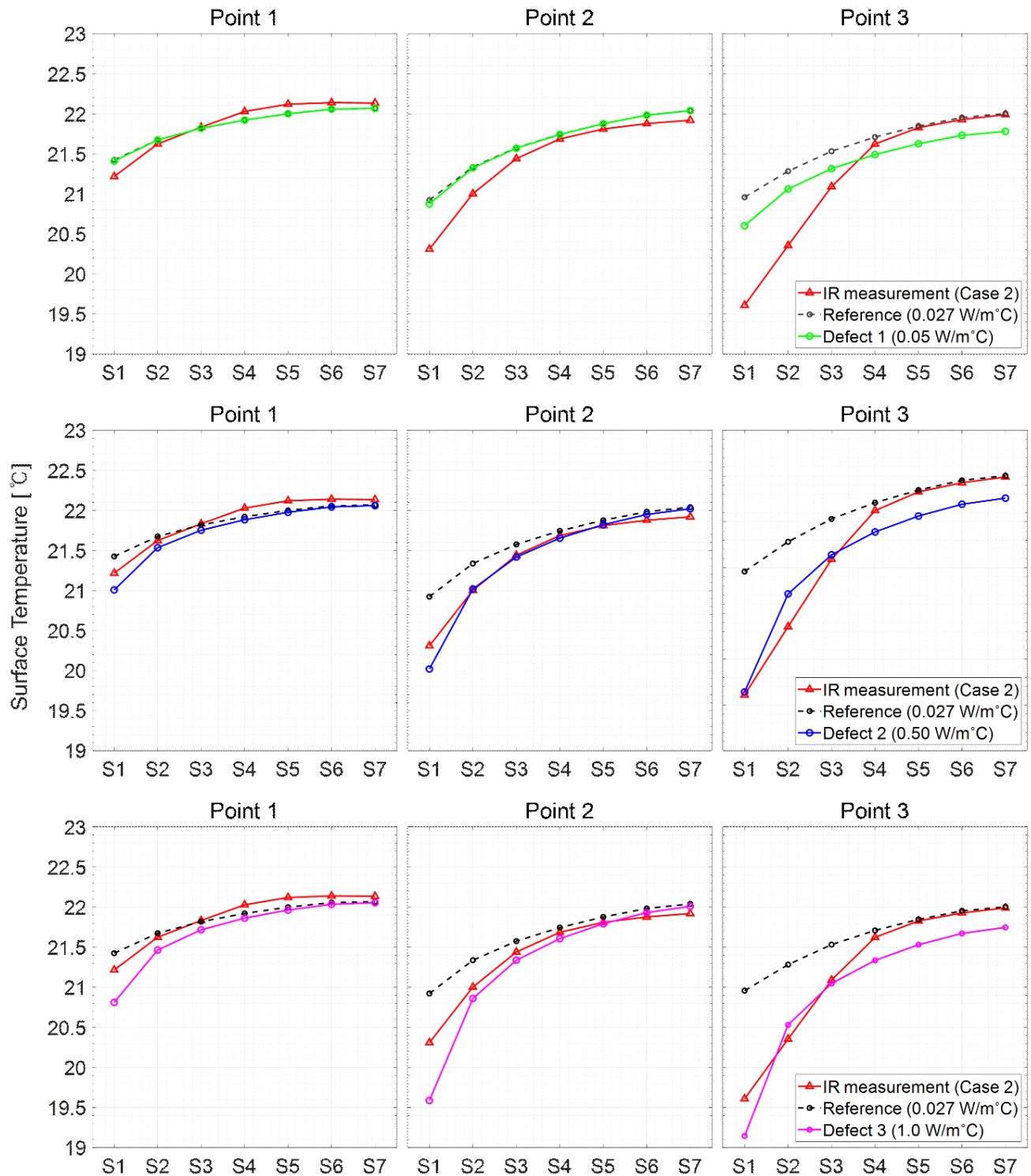


[그림 18] Case 1(정상시공) 열화상 결과와 수치 모델 계산 결과 비교

- 정상 시공을 가정한 경우에 대한 수치 모델의 묘사 가능성 확인 후 하자 시공을 가정한 케이스에 대한 묘사를 진행함. 수치 모델은 열화상 이미지를 묘사하기 위해 접합부 열전도율이 상이한 세 가지 케이스로 구성됨. 열화상 이미지를 가장 잘 묘사하는 케이스는 접합부 열전도율이 $0.50\text{W/m}^{\circ}\text{C}$ 인 Defect 2로, RMSE는 0.133°C 로 산정되었음. 해당 케이스의 접합부 열전도율은 정상 시공 대비 20배임

<표 12> 케이스 별 접합부 열전도율 구성

Cases of the joints		Thermal conductivity of simulated urethan foam, k (W/m·°C)
Case 1	Reference	0.027
Case 2	Defect 1	0.05
	Defect 2	0.50
	Defect 3	1.00



[그림 19] Case 2(하자시공) 열화상 결과와 수치 모델 계산 결과 비교

○ 현장 적용을 위한 리덕션 수치 모델 정확도 비교 분석

- 현장 적용성 검토를 위해 사용한 수치 모델은 고속계산이 가능한 리덕션 모델로 본 증빙보고서 [증빙 A-3-1]에서는 상태공간모델과 리덕션 모델의 오차 수준을 비교함
- 상태공간모델($n=10,327$)과 리덕션모델($m=10$)을 비교한 대상은 본 챔버 실험의 정상시공을 가정한 Case 1에 대한 것으로 3개 측정점에 대한 오차율을 각각 비교함
- 상태공간모델과 리덕션모델의 오차율은 모든 구간에서 1% 이내이며, 평균 오차율 0.0010%로 정확도 확보 및 평가목표를 달성한 것을 확인함

<표 13> 상태공간모델과 리덕션모델 계산 결과

Point	Model	Surface Temperature (°C)						
		Surf 1	Surf 2	Surf 3	Surf 4	Surf 5	Surf 6	Surf 7
Point 1	State-Space model	21.2573	21.5385	21.6944	21.8019	21.8820	21.9365	21.9283
	Reduced model	21.2576	21.5391	21.6949	21.8022	21.8822	21.9366	21.9284
Point 2	State-Space model	20.7795	21.2275	21.4750	21.6466	21.7780	21.8778	21.9119
	Reduced model	20.7787	21.2275	21.4750	21.6466	21.7780	21.8778	21.9119
Point 3	State-Space model	20.8051	21.2755	21.5365	21.7178	21.8570	21.9639	22.0055
	Reduced model	20.8046	21.2751	21.5362	21.7176	21.8568	21.9638	22.0055

<표 14> 상태공간모델 대비 리덕션모델 오차율

Point	Error (%)							Avr (%)
Point 1	0.0013	0.0028	0.0022	0.0015	0.0009	0.0005	0.0002	0.0013
Point 2	0.0039	0.0002	0.0002	0.0001	0.0000	0.0001	0.0001	0.0007
Point 3	0.0026	0.0019	0.0013	0.0009	0.0006	0.0004	0.0002	0.0011

○ 현장 적용을 위한 수치모델 계산 속도 비교

- 리덕션 모델의 계산속도는 2차년도 연구 과정을 통해 기존 시뮬레이션 프로그램 대비 9,800배(FEM: 21,387sec, Reduction: 0.0022sec)임을 확인한 바 있으며, 전문가 검증을 통해 디지털-트윈 기법 적용 가능성이 높은 모델로 평가 받은 바 있음
- 챔버 실험과 동일한 모델 및 경계 조건을 통해 비교한 결과 리덕션 모델은 1회 계산 시 1초 미만의 속도를 나타냄. 모든 모델에 대하여 계산을 수행할 경우 리덕션 모델의 계산속도는 FEM 시뮬레이션 대비 더욱 적은 비율을 차지함을 확인할 수 있음

<표 15> 기존 시뮬레이션 프로그램과 리덕션 모델 계산 속도 비교

Simulation tool	FEM simulation (Abaqus)	Reduced model
n : Number of nodes m : Number of orders	n=10,327	m=10
Total CPU time (sec)	388.6	0.001923

○ 전문가 의견

<표 16> 단위성과물 A-3 전문가 자문 결과

전문가 인적 사항	자문 결과 요약
- 성명: 이광호 - 소속: 고려대학교 - 직책: 교수	- 자문일자: 2021.12.27. ~ 2021.12.28. - 전문가 의견 요약 - 기존 FEM 프로그램의 한계를 고려한 리덕션 모델 개발 및 검증과정이 알맞게 이루어졌으며 계산속도 향상은 열교를 빠르게 분석하는데 효과적일 것으로 판단됨 - 현장 열화상과 가장 일치하는 모델을 구체화한다면 좋은 연구가 될 것으로 판단됨

○ 핵심 성과 A. 소결

핵심 성과 A. 열화상 매칭이 가능한 고속계산 수치모델 개발		
A-1	3차원 수치모델 해석 모델 개발 전략 구축	- 창-벽체 접합부 해석을 위한 영향인자 시뮬레이션 테스트 수행 - 고속수치모델 개발을 위한 격자 민감도 테스트 수행
A-2	열화상 해석을 위한 수치모델 개발	3차원 창-벽체 구현 및 데이터 추출을 위한 input 파일 수정 방법 확인 - 데이터추출 및 상태공간모델 구현 자동화 완료 - 상태공간모델의 계산 정확도 검증 완료
A-3	리덕션 기술 적용 수치모델 개발	- 고속 계산을 위한 리덕션 모델 구현 완료 - 리덕션 모델 오차율 1%, 계산속도 FEM 대비 9,800배 향상 (계획: 오차율 2%, 계산속도 100배 향상) - 현장 적용 가능성 확인을 위한 챔버 테스트 수행 및 모델 검증

[그림 20] 핵심 성과 A. 소결

핵심성과물 B. 최적화기법을 이용한 선형열교계수 도출 기술

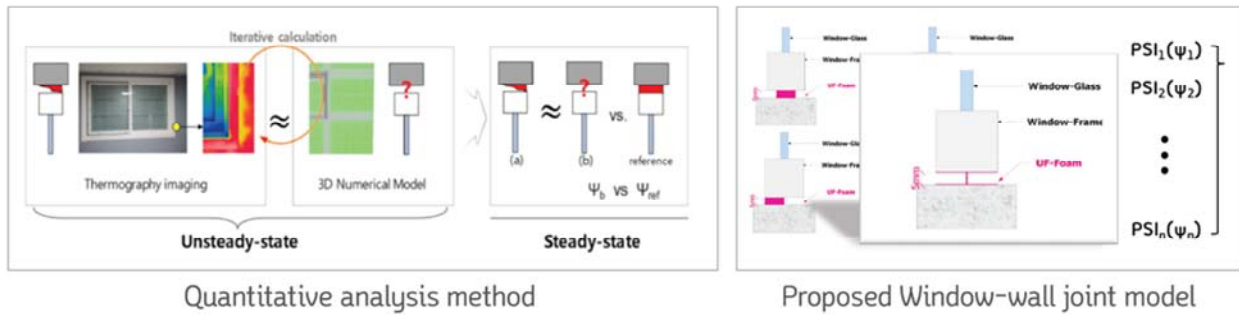
핵심성과 B	최적화기법을 이용한 선형열교계수 도출 기술		
정의	창호-벽체 접합부의 하자 및 열교를 평가하기 위한 지표로서 핵심성과 A를 적극적으로 활용하여 현장 즉각적인 창호-벽체 접합부 하자 및 열교 평가가 가능한 기술		
목적	현재 창호-벽체 접합부의 열교에 대해 평가 기준의 부재로 하자 발생 시 귀책사유에 대해 명확히 확인할 수 없는 실상으로, 본 기술을 통해 합리적이고 정량적인 평가 기준 마련에 기반을 마련할 수 있을 것으로 기대됨		
성능목표	(기존기술 수준) 정상상태 2차원 시뮬레이션을 통한 선형열교계수 도출은 가능 (개발기술 수준) 본 기술은 도면기반이 아닌 현장 열화상 촬영 기반의 기술로 3차원 형태의 열교 평가 지표를 제시할 수 있는 기술임		
성과달성 책임자 (소속기관)	김의중(인하대학교 산학협력단)		
소요기간	'19.04 ~ '21.12(2년9개월, 3년차)		
성과달성 확인방법	다양한 케이스에 대해 최적화 기법으로 열교 평가가 가능한 지표를 제시할 수 있는 논문 게재 (SCI 논문 추가 투고 예정)		
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	출원 : 2건, 등록 : 1건	(계획) 출원 : 1건, 등록 : 2건
	논문	SCI(E) : 1건	(계획) SCI(E) : 1건
	저작	0건	
	S/W	0건	
	신기술	0건	
	기타	0건	



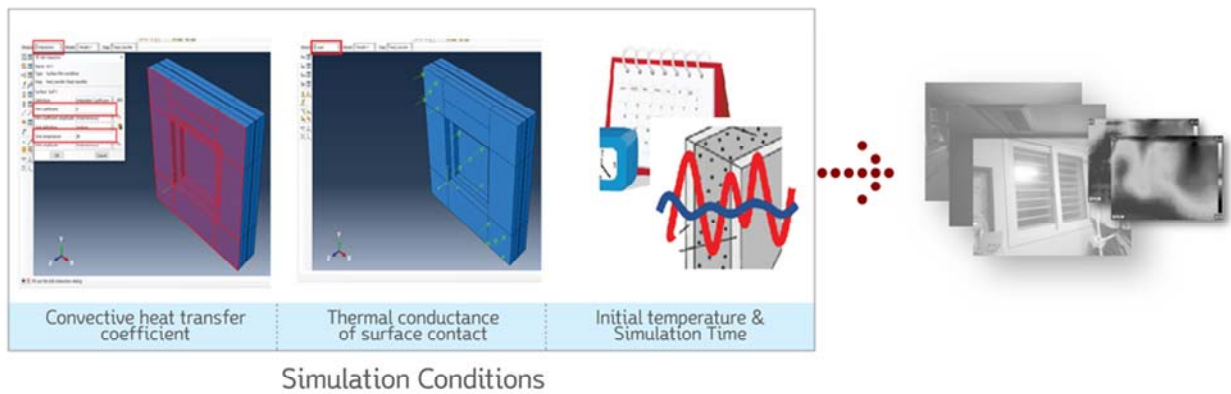
핵심성과물 B. 최적화 기법을 이용한 선형열교계수 도출 기술

[그림 21] 핵심성과물 B. 최적화 기법을 이용한 선형열교계수 도출 기술

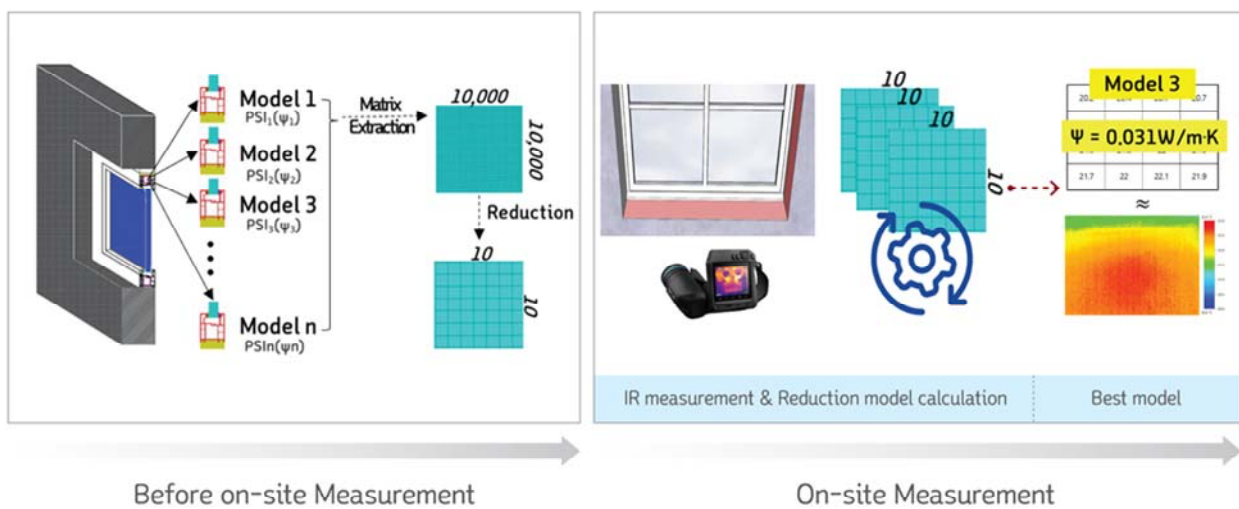
Construction Defect Description



Simulation Condition Analysis



Optimal model matching method



[그림 22] 핵심성과 B. 주요 연구 성과

B-1) 기존 모델을 통한 최적화 기법 베이스라인 구축

[연구 수행 결과 요약] ① 열교계수 정의 및 시뮬레이션:시공하자 케이스 선형열교계수도출 ② 열화상 패턴 분석: 열화상 시뮬레이션 패턴 100건	시뮬레이션 결과 보고서 [증빙 B-1-1] 패턴 비교 보고서 [증빙 B-1-2]
---	--

○ 열교계수 정의 및 시공하자 케이스 시뮬레이션

- 열교는 Thermal bridge, Cold bridge, Heat bridge라고도 불리며 주변 재료 보다 열전도성이 높고 열전달에 대한 저항이 가장 작은 경로를 만드는 물체의 영역 또는 구성요소임. 대표적으로 구조체 열교(Construction thermal bridge), 선형열교(Linear thermal bridge), 점형열교(Point thermal bridge)로 나뉨
- 구조체 열교는 건물의 코너, 천정과 벽면부와 같이 구획되는 면에서 발생하는 열교를 의미하며 선형열교는 모서리 접합부, 외부 벽이 바닥과 연결되거나 외벽에 설치된 창 또는 문과 같이 서로 다른 부재의 조인트에서 발생함. 점형열교는 세 가지 열교의 종류 중 가장 영향력이 적으며 특정부위에서 발생함
- 선형열관류율(Linear thermal transmittance)은 선형열교에서 발생하는 정상상태(Steady state)의 열류를 열교의 길이와 실내 · 외 온도차로 나눈 값을 의미하며 벽체와 창호 프레임이 접합하는 부위의 단열성능을 평가할 때 쓰임. 접합부의 단열성능 평가는 선형열교계수 (ψ)를 통해 평가할 수 있음. 선형열교계수는 선형열관류율을 통해 산정할 수 있으며, 단위는 W/m·K를 사용함
- 선형열관류율을 수식으로 설명한 내용은 아래 식 (1)과 같으며 선형열교계수는 영향력이 적은 점형 열교를 무시하고 식 이항을 통해 (1)을 변형하여 도출함

$$\Phi_T = (\sum U_i A_i + \sum \psi_j l_j + \sum \chi_k)(\theta_i - \theta_o) (W) \dots\dots\dots (1)$$

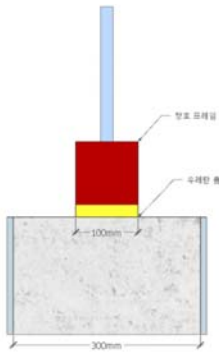
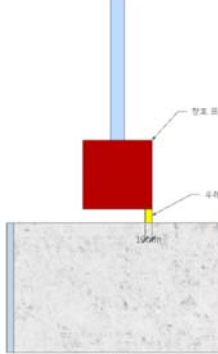
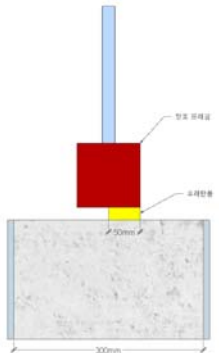
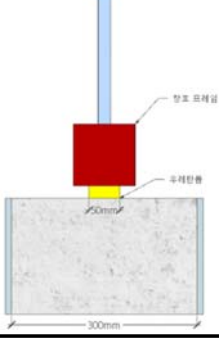
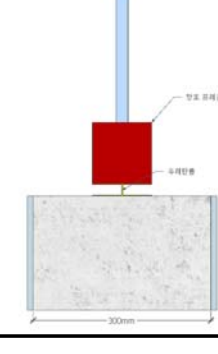
$$\psi = (\frac{\Phi_T}{\theta_i - \theta_o} - \sum U_i A_i) \frac{1}{l} (W/m \cdot K) \dots\dots\dots (2)$$

Φ_T	구조체를 통한 열류 (W)
U_i	열교와 이웃하는 부위 1차 열관류율 (W/m ² ·K)
ψ_j	선형열관류율 (W/m·K)
A_i	열 관류 면적 (m ²)
l_j	ψ_j 값을 갖는 선형열교의 길이(m)
θ_i	실내온도 (°C)
θ_o	실외온도 (°C)

- 창호시공접합부는 일반적으로 작업자가 충진재를 접합부에 분사하여 시공함. 시공 후 접합부의 열 성능은 접합부 골조의 시공년도, 작업자의 숙련도, 우레탄 폼의 열화 등에 의해 부분적으로 열 성능이 저하될 우려가 있음. 이를 고려하여 우수하게 시공된 케이스뿐만 아니라 다양한 시공결함 케이스의 3차원 모델을 설계하고 정상상태 해석을 실시하여 선형열관류율 도출하고 벽체 열화상 패턴을 확인함

- 다양한 시공하자케이스의 선형열교계수 및 벽체 열 분포 확인을 위해 <표 17>과 같이 모델을 구성하였으며 Case 1은 시공하자가 발생하지 않은 케이스임

<표 17> 시공하자케이스 가정 및 단면

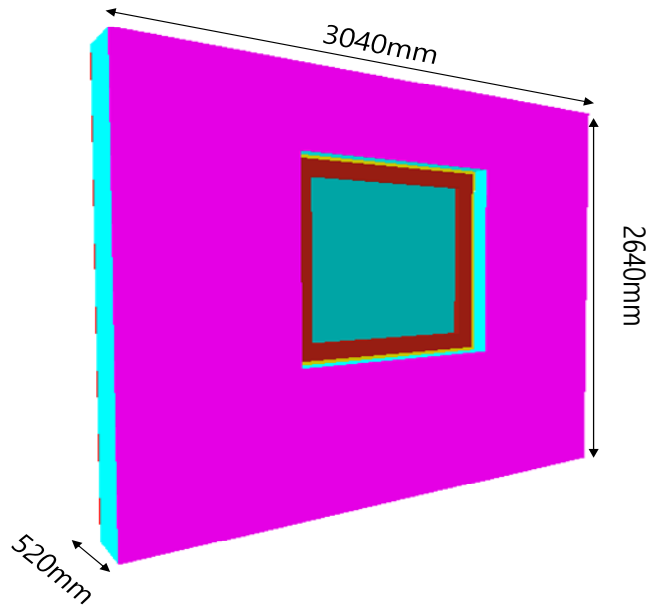
Case No.	Window-wall section	Case No.	Window-wall section
Case 1		Case 2	
Case 3		Case 4	
Case 5		Case 6	

- Physibel-Trisco를 사용하여 시공하자 모델을 해석했음. Physibel-Trisco는 일정한 실내외 온도조건에 대한 정상상태 시뮬레이션 프로그램임. 본 연구에서는 정상상태 조건을 실내온도 20℃, 실외온도 0℃ 조건으로 실내 · 외 온도차가 20℃인 겨울철 조건을 가정하였으며, 이때 실내 · 외 대류 열전달계수는 각각 25, 5 W/m² · K 로 설정됨

<표 18> 실내 · 외 온도 및 대류열전달계수 조건

Category	Temperature (℃)	Heat transfer coefficient (W/m ² ·K)
Outdoor	0	25
Indoor	20	5

- 시뮬레이션 대상 창호가 설치된 벽체의 크기는 3,040mm×2,640mm×520mm (가로×세로×두께)로 ISO-14683 Appendix의 Default Value에 제시된 2차원 도면 자료를 근거로 3차원 모델링을 실시함



[그림 23] 시뮬레이션 대상 창호가 설치된 벽체

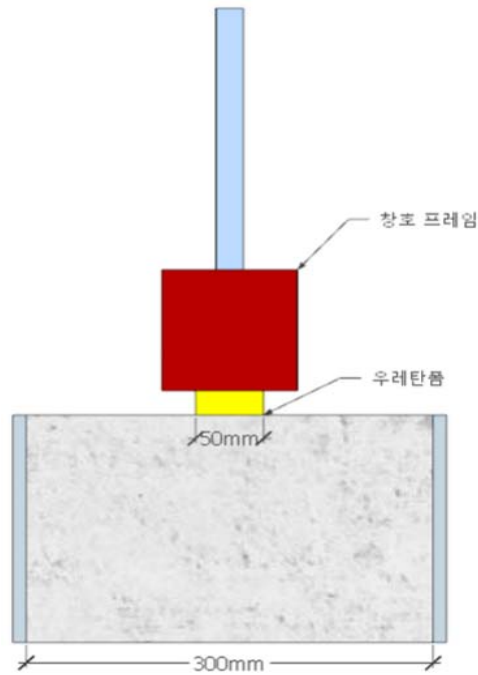
- 시뮬레이션 대상 벽체 및 창호의 물성치는 아래 <표 19>와 같이 구성하였으며, <표 17>에서 정의한 시공하자 케이스에 따라 Polyurethane의 두께와 위치에 차이를 둠

<표 19> 시뮬레이션 재료 물성치

Material	Thermal conductivity [W/m · K]
light mortar 800	0.34
cell concrete 600	0.18
gypsum 100	0.35
window frame (wood)	0.16
window glass	1
Polyurethane	0.027

○ 시공하자요사가 가능한 기준모델(Reference Case)선정을 위한 시뮬레이션

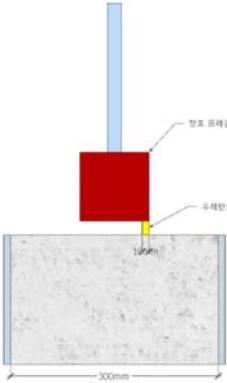
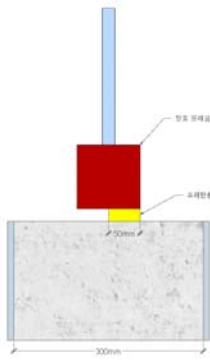
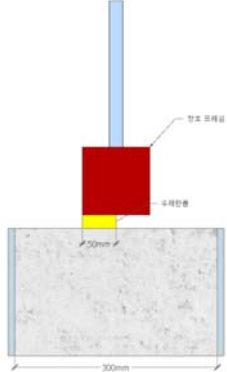
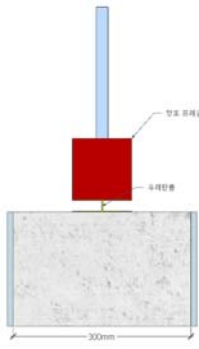
- 접합부 단열 시공하자 요사가 가능한 기준모델(Reference Case)은 <표 20>의 Case 4로, 접합부 충전재의 열전도율을 변화하도록 하여 다양한 시공 하자 케이스의 벽체표면에서 나타나는 열 패턴 및 표면 온도를 묘사할 수 있음을 비정상상태 시뮬레이션을 통해 확인함
- 창호 주변부 표면 온도가 가장 유사한 케이스에 대해 실내외 온도가 일정한 정상상태 해석을 진행하여 선형 열관류율을 도출하고 그 값을 시공 하자로 가정한 케이스의 선형열관류율과 비교함



[그림 24] 시공하자케이스 단면 형상

- 기준모델을 선정하기 위해 접합부 형태가 상이한 4가지 케이스를 구성하였음. Case 1은 실내측 방향으로 10mm의 폴리우레탄 폼이 충전된 케이스이며 Case 2와 3은 각각 실내외측 방향으로 50mm가 충전됨. Case 4는 접합부의 창호 프레임과 벽체가 실내외 경계조건 노출을 최소화한 'I' 자 형태임. 구성한 케이스의 접합부 UF-foam의 열전도도는 $0.027\text{W/m} \cdot \text{K}$ 이며, 각 케이스의 열전도도를 반복 수정하여 정상상태 해석을 진행하였을 때 시공하자 케이스를 묘사하는 케이스를 확인함

<표 20> 기준모델 선정을 위한 케이스 분류

Case No.	Window wall section	Case No.	Window wall section
Case 1		Case 2	
Case 3		Case 4	

- 접합부 열성능 반복수정 및 정상상태 해석을 통해 시공 하자로 가정한 케이스의 선형열관류율을 묘사하는 케이스를 확인 후, 비정상상태 해석을 통해 표면 온도를 비교함

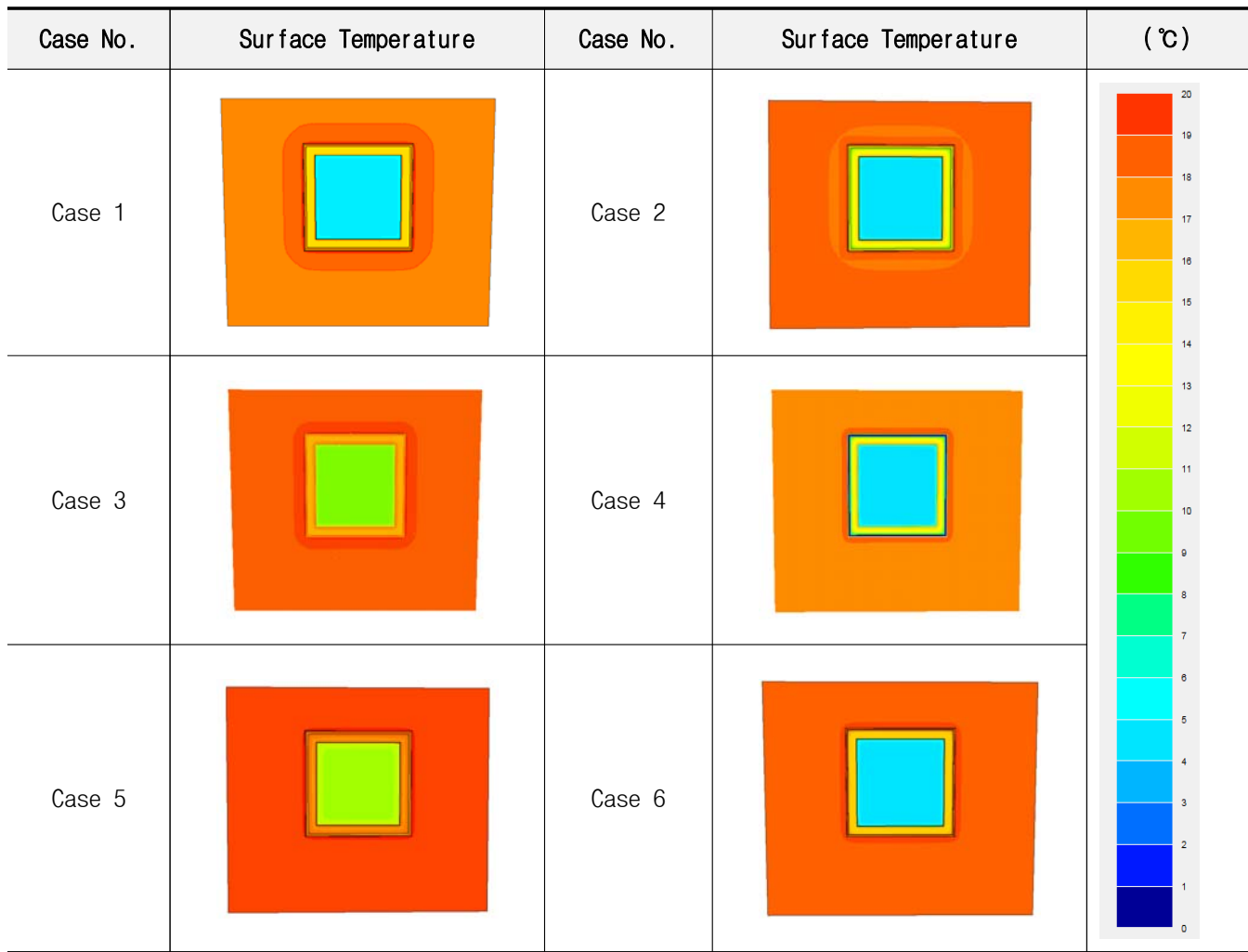
<표 21> 열 성능 반복수정 전 각 케이스의 총 열류량 및 선형열관류율 도출 결과

Case No.	Total heat flux (W)	Linear thermal transmittance (W/m · K)
Construction defect	162.905	0.438
Case 1	175.737	0.808
Case 2	165.345	0.4695
Case 3	173.315	0.8015
Case 4	170.534	0.719

○ [B-1-1] 열교계수 정의 및 시공하자 케이스 시뮬레이션 연구 결과

- 창호 접합부 선형열교에 대한 이론식 고찰을 토대로 전열해석 프로그램(Physibel)을 통해 다양한 시공하자 케이스에 따른 선형열교계수 및 창호 주변부 벽체 표면 온도 결과를 도출하였으며 창호 접합부 시공 상태에 따라 상이한 표면 열 분포 패턴이 나타남
- 표면 열 분포 패턴이 상이함과 더불어 열류 및 선형열관류율 또한 다양하게 나타남을 확인하였음. 도면정보 그대로 시공된 Case 1에서 선형열관류율이 가장 낮게 나타남에 따라 열교로 인한 하자 발생이 가장 적었으며, 접합부 UF-foam의 충진이 미비한 경우 선형열관류율이 높게 나타남을 확인함
- 현재 선형열관류율에 따른 시공하자를 판단할 수 있는 마련된 법적 기준이 없어 시공하자로 단정하여 판단할 수는 없으나 Case 2 ~ 6의 선형열교계수 값은 에너지 성능지표 (EPI)의 최고 배점 기준($\psi < 0.4$ W/m · K)을 만족하지 못하는 것을 확인함

<표 22> 시공 케이스별 실내 측벽 표면온도 해석결과



<표 23> 시공 케이스별 총 열류량 및 선형열관류율 도출 결과

Case No.	Total heat flux (W)	Linear thermal transmittance (W/m · K)
Case 1	159.285	0.2915
Case 2	175.737	0.808
Case 3	165.345	0.469
Case 4	173.315	0.8015
Case 5	162.905	0.4378
Case 6	170.534	0.719

B-2) 재연성을 위한 필요조건 분석

[연구 수행 결과 요약] ① 열화상 묘사를 위한 데이터 입력방법 분석 ② 시뮬레이션 적정기간 분석	입력 데이터 분석 보고서 [증빙 B-2-1] 시뮬레이션 적정기간 분석 보고서 [증빙 B-2-2]
--	---

○ 3차원 창호-벽체 시뮬레이션 입력조건

- 본 연구에서는 [증빙 A-2-1], [증빙 A-2-2]에서 FEM 시뮬레이션 프로그램(ABAQUS)을 사용하여 데이터를 추출하고 상태-공간모델 구현을 자동화 한 바 있음. 상태-공간모델과 리덕션 모델을 활용하여 열화상 이미지를 디지털-트윈하여 정량적 열교 분석을 가능케 하고자 함
- 상태-공간모델을 구현하기 위해서는 노드 데이터를 추출하는 과정이 필요함. 노드 데이터의 추출 방법은 FEM 시뮬레이션을 해석하기 위해 경계조건을 입력하는 방법과 차이가 있음
- 식 (1)은 공간분해 열전달 방정식의 전체 식임. θ 는 온도영역(temperature field), N^N 은 유한요소 보간 함수 (finite element interpolation function), ρ 는 부재의 밀도, $\dot{U}$ 는 부재의 내부 에너지를 시간에 따라 미분한 값(material derivative of the internal energy)을 의미하며, k 는 열전도도행렬(conductivity matrix), r 은 단위 부피당 열 유속(heat flux per unit volume), V 는 해석 도메인의 부피, S_q 는 단위 면 적당 열류의 영향을 받는 표면(Surface on which heat flux per unit area), q 는 대류열전달계수 또는 복사를 의미함

$$\int_V N^N \rho \dot{U} dV = - \int_V \frac{\partial N^N}{\partial x} \cdot k \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} dV + \int_V N^N r dV + \int_{S_q} N^N q dS \quad (1)$$

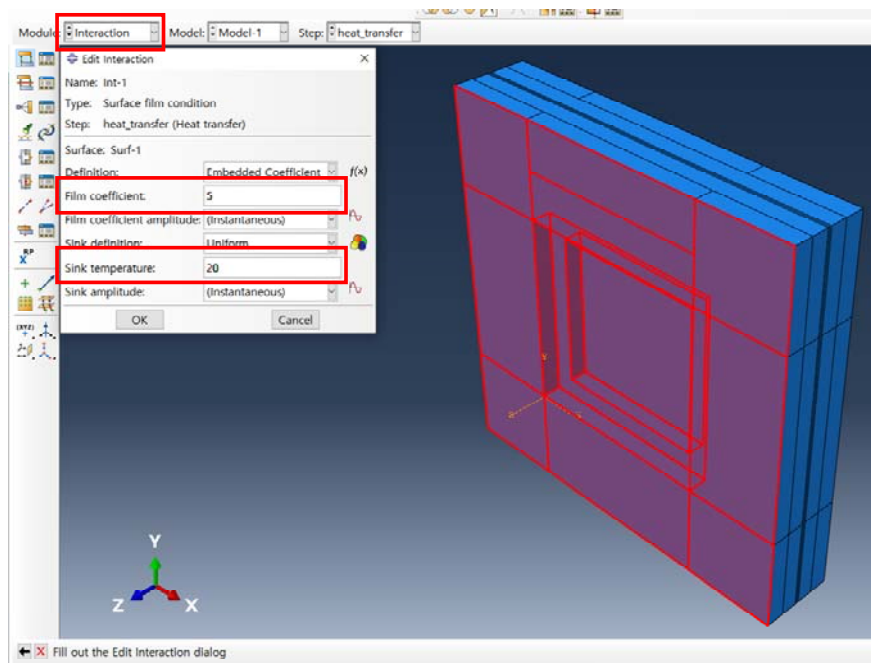
- ABAQUS에서 추출 가능한 3가지 데이터는 Damping, Stiffness, Load이며 해당 데이터를 도출하기 위해 필요한 경계조건에 대한 구분이 필요함. 식 (1)과 같이 부재의 열 물성치와 관련된 밀도, 비열은 Damping 데이터로 구분할 수 있으며 열의 이동과 관련된 부재의 열전도율은 Stiffness로 구분할 수 있음
- 현장 상황의 창-벽체를 시뮬레이션 묘사하기 위해서는 일사량, 대류열전달계수와 같은 경계조건에 대해서 역시 구분이 필요하며 일사량과 대류열전달계수는 외부의 자극으로 부재에 영향을 주는 인자로 해당 조건 들은 Load 데이터로 구분할 수 있음

<표 24> 경계조건별 데이터 구분

데이터 구분	Damping	Stiffness	Load
경계조건	밀도, 비열	열전도율	일사량, 대류열전달계수

○ 대류열전달계수 및 실내·외 온도 입력 방법

- 수치 모델에서 시간 이력에 따라 행렬로 구성된 상태-공간 행렬 식을 계산하기 위해서는 격자를 구성하는 각 노드가 실내·외 온도 또는 열류와 같은 경계조건에 대한 영향을 포함하여야 함
- 일반적인 FEM 해석을 수행할 경우 ABAQUS에서 실내·외 온도는 Boundary Condition으로 설정하나 상태-공간모델 구현을 위한 노드 데이터 추출을 목적으로 할 때 Load Module - Boundary Condition이 아닌 Interaction Module - Create Interaction - Surface film condition을 통해 설정이 가능함
- 프로그램 매뉴얼에 따르면 데이터 추출 시 Boundary Condition을 통한 실내·외 온도 설정값은 포함되지 않음. 예비 테스트를 통해 프로그램상의 Boundary Condition을 설정하여도 데이터 추출에 내용이 반영되지 않는 것을 확인함
- 창호-벽체 모델에서 대류열전달계수는 실내측, 실외측 표면에 작용하여 온도를 변화시키는 경계조건임
- 대류열전달계수는 앞서 데이터를 구분한 바와 같이 Load 데이터로 구분할 수 있음. 실내·외 대류열전달계수는 Interaction Module - Create Interaction - Surface film condition을 선택 후 적용될 Surface를 모델의 구획(Partitioning)된 면을 직접 선택하고 Film Coefficient 입력하여 설정함 [그림 25]

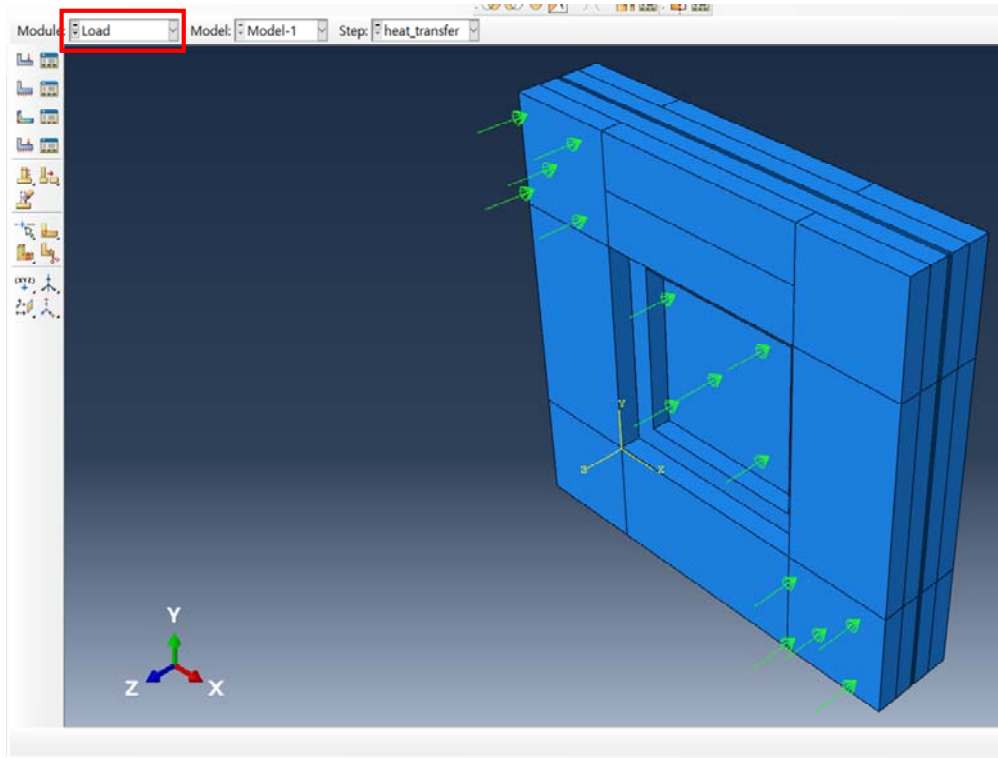


[그림 25] 대류열전달계수 및 실내·외온도 입력 예시

○ 열류 (Heat flux) 입력 방법

- 열화상 촬영 기법(Infrared Thermography)의 정량적(Quantitative) 촬영 기법인 (Pulsed Thermography; PT)를 활용하기 위해 열류의 입력 방법을 분석함. 열화상 촬영(IRT)은 온도 패턴 분석을 통한 정성적 기법으로 일반적으로 활용되나 본 연구와 같이 정량적 열고 분석 시 경계조건의 범위에 따라 해석결과의 정확도에 영향을 끼칠 수 있음. 이를 최소화하기 위해 Pulsed Thermography 기법을 3차 연도 연구에 시도하였으나 열류 제어의 어려움으로 향후 추가 진행이 필요함
- PT는 열화상 촬영 대상에 열원(Heat source)를 가하여 경계조건에 대한 영향도를 줄이고 빠르게 부재의 축열 정도를 준정상상태로 유지할 수 있는 효과적인 방법으로 평가되고 있음

- 대류열전달계수 및 실내·외 초기온도 입력과 달리 일사량과 같이 부재 표면에 열류(flux)에 대한 영향을 고려하기 위해서는 3차원 모델링 단계에서 설정이 필요함
- 일사량은 Load 데이터로 구분할 수 있으며 ABAQUS 프로그램에서 Load Module 설정을 통해 Load 데이터를 설정 및 추출할 수 있음. 열류가 작용하는 면을 지정하고 열류의 종류를 Surface flux로 설정하여 Load 데이터를 입력할 수 있음
- [그림 26]과 같이 100W의 열류가 세 표면에 작용하였다고 가정할 때 각 표면의 표면적 비율에 따라 총 100W의 열류가 적용되는 것을 테스트를 통해 확인함



[그림 26] 열류(Flux) 입력 예시

○ 시뮬레이션 적정기간 분석

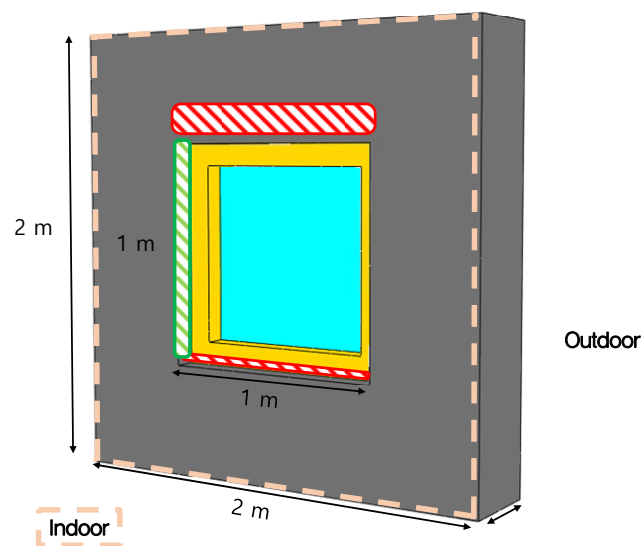
- 현장 경계조건에서 촬영된 열화상 이미지를 시뮬레이션 시 부재의 축열 효과를 고려하기 위해선 열화상을 촬영한 현장의 이전 시간대 경계조건 변화 데이터가 필요함
- 현장 열화상 촬영 시 창호-벽체가 정상상태에 준하는 상태(Quasi steady-state)에 해당하는 기간은 연 중 극히 드물며, 따라서 기본적으로 알 수 없는 벽체 초기온도가 열화상 측정 시 표면 온도에 영향을 미치지 않는 최적 기간에 대한 분석이 요구됨
- 다양한 경계조건 상황에서 실내측 벽체의 초기온도가 준정상상태에 도달하는 시간에 대하여 분석을 완료함
- 상태-공간모델은 FEM 시뮬레이션 프로그램과 달리 3차원 모델을 구성하는 부재의 초기온도를 설정할 수 있다는 장점이 있음
- <표 25>는 다양한 경계조건에서 시뮬레이션 적정기간을 분석하기 위한 케이스 분류로, 실내온도를 20℃로 고정하고 부재 초기온도가 0℃, 5℃, 10℃, 15℃, 실내온도 대비 실외온도를 5℃, 10℃, 15℃ 낮게 설정함. 각 조건에 대해 정상상태 도달에 소요되는 시간을 확인하였으며 1차년도 연구 과정에서 열화상 촬영 전 2~3일간 벽체의 거동을 수치적으로 묘사하고 촬영결과와 수치 모델을 비교하는 테스트 기법의 타당성을 확인함

<표 25> 시뮬레이션 적정기간 분석을 위한 케이스 분류

실내	실외	부재 초기온도	Case No.
20℃	15℃	0℃	1
		5℃	2
		10℃	3
		15℃	4
	10℃	0℃	5
		5℃	6
		10℃	7
		15℃	8
	5℃	0℃	9
		5℃	10
		10℃	11
		15℃	12
	-5℃	0℃	13
		5℃	14
		10℃	15
		15℃	16

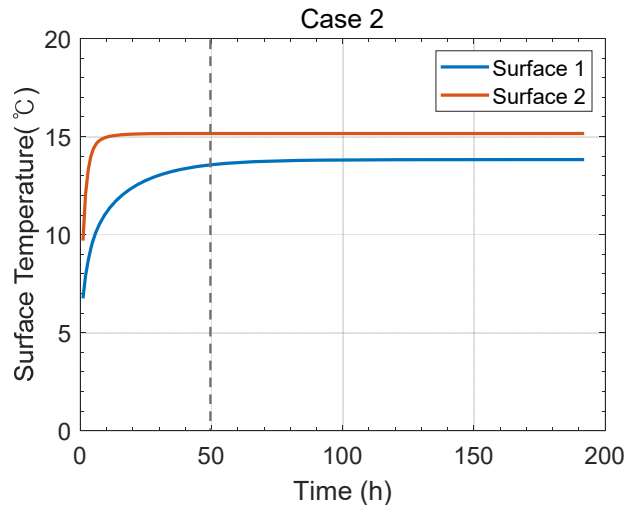
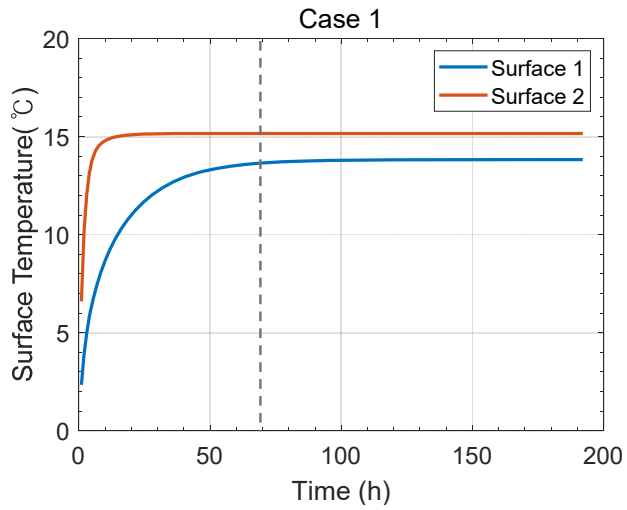
○ 시뮬레이션 적정기간 분석결과

- 본 연구에서 제안한 상태-공간모델을 이용하여 각 Case의 초기조건을 입력하여 벽체 표면 온도가 준 정상상태에 도달하는데 필요한 시뮬레이션 적정기간에 대한 분석을 완료함
- 시뮬레이션 적정기간 분석을 위해 창-벽체 구조물의 대상 표면을 설정함. 붉은색 영역에 해당하는 Surface 1은 창호 상단부 벽체로 창호 프레임의 영향을 간접적으로 받을 것으로 예상되는 부위이며 녹색 영역에 해당하는 Surface 2는 창호 프레임과 접합하는 표면임

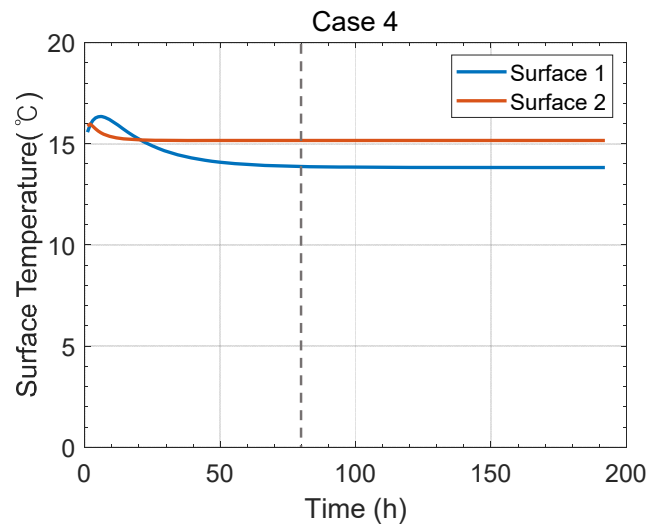
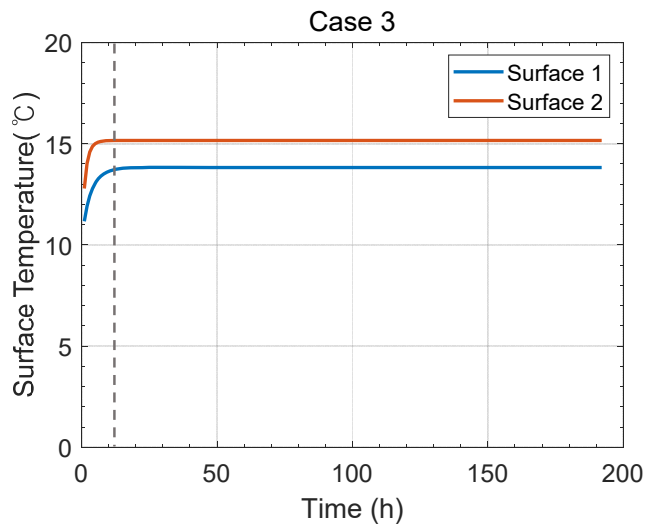


[그림 27] 시뮬레이션 적정기간 분석을 위한 표면 설정

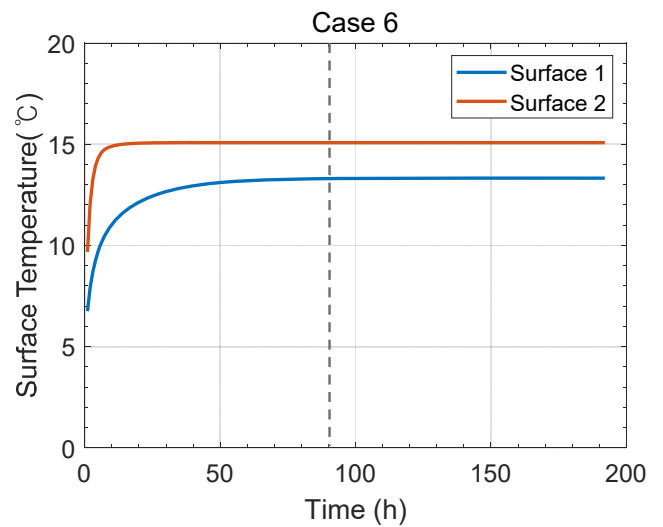
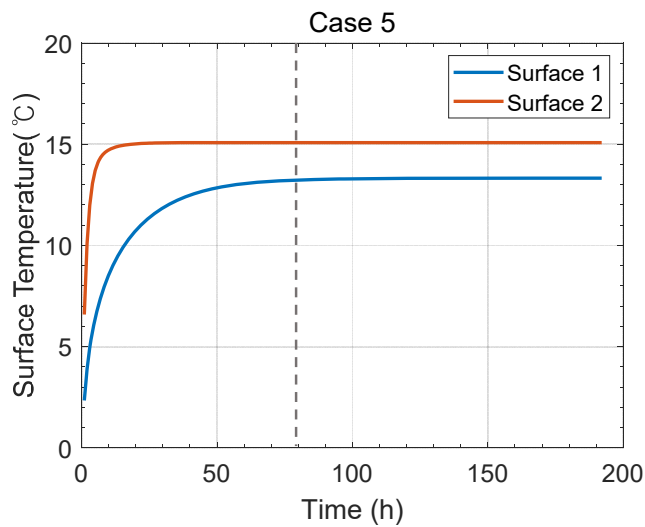
- 총 16개 케이스에 대해 분석한 결과는 [그림 28] ~ [그림 35]와 같음. 실내·외 온도차가 적은 경우에서 정상상태에 도달하는 시간이 짧았으나 Case 4와 같이 초기온도가 적절하게 설정되지 않는 경우 열관성(Thermal inertia)에 의해 일시적으로 온도가 상승하는 것을 확인함



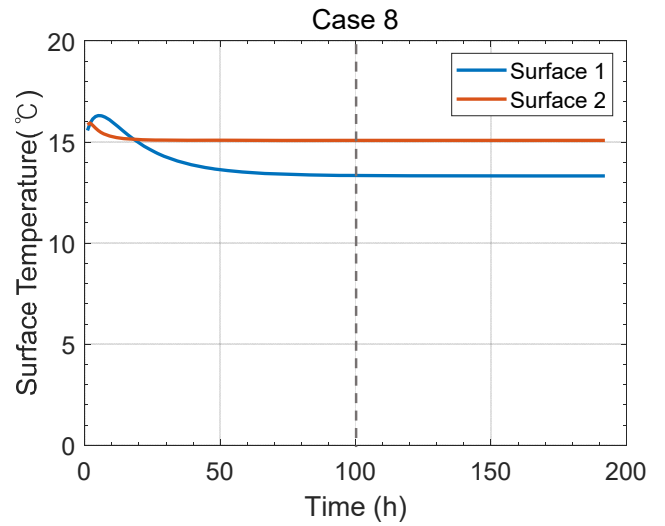
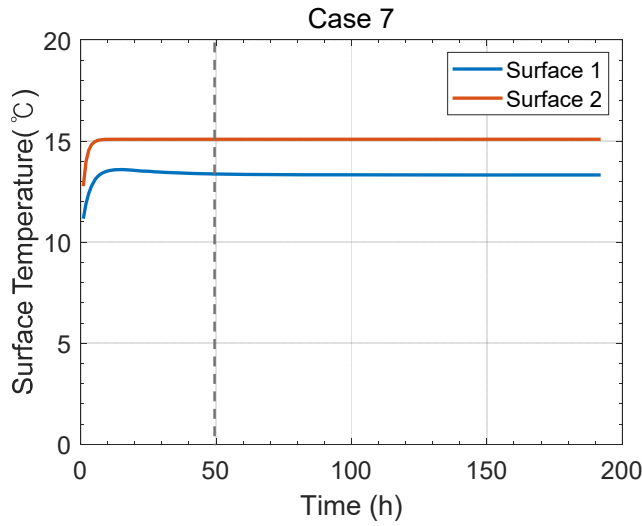
[그림 28] 상태-공간 모델 시뮬레이션 적정기간 케이스 분석결과 (Case 1, 2)



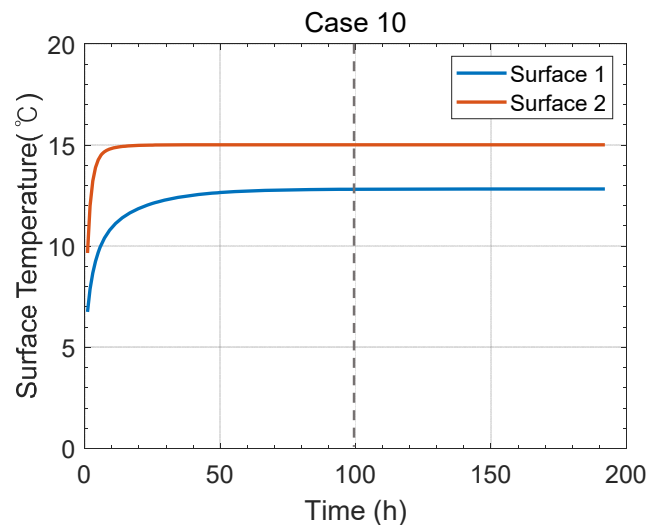
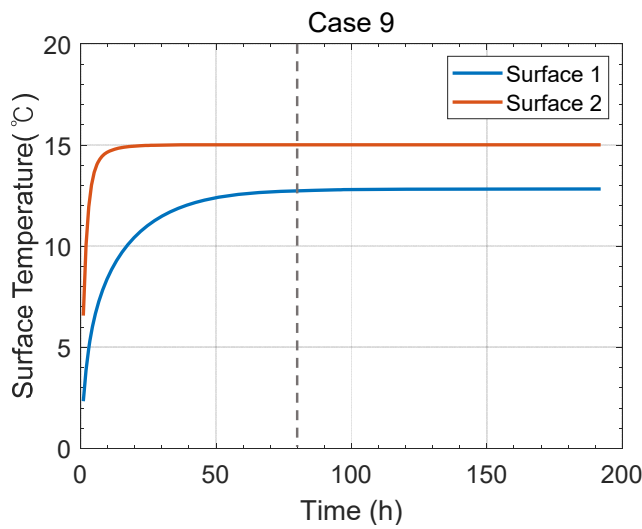
[그림 29] 상태-공간 모델 시뮬레이션 적정기간 케이스 분석결과 (Case 3, 4)



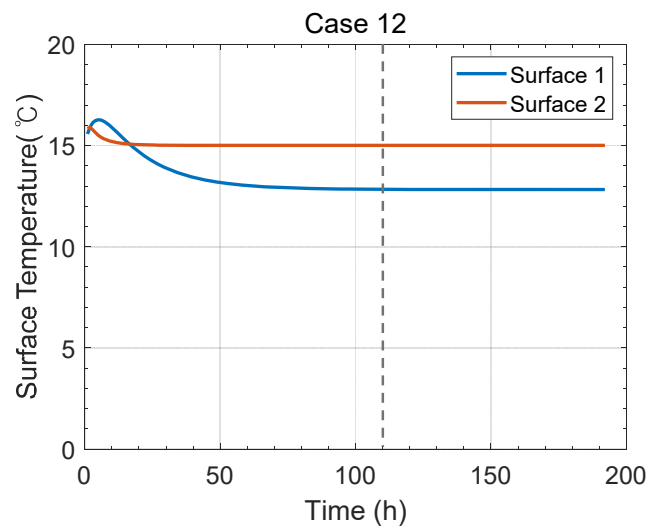
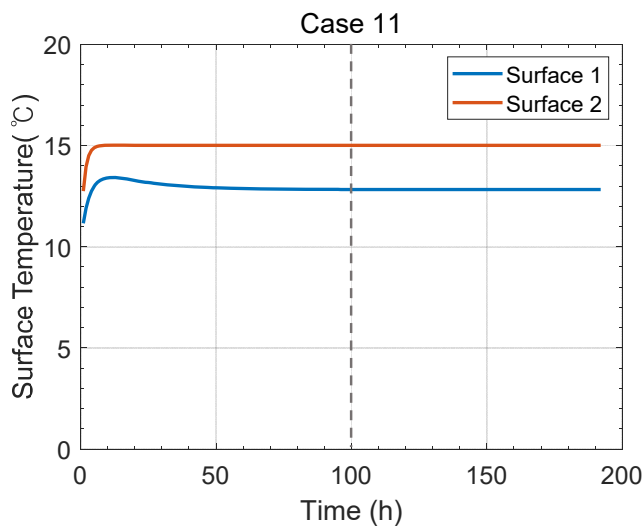
[그림 30] 상태-공간 모델 시뮬레이션 적정기간 케이스 분석결과 (Case 5, 6)



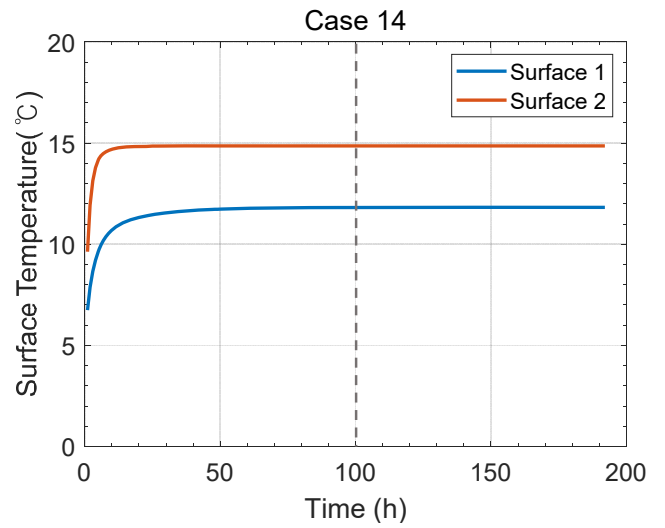
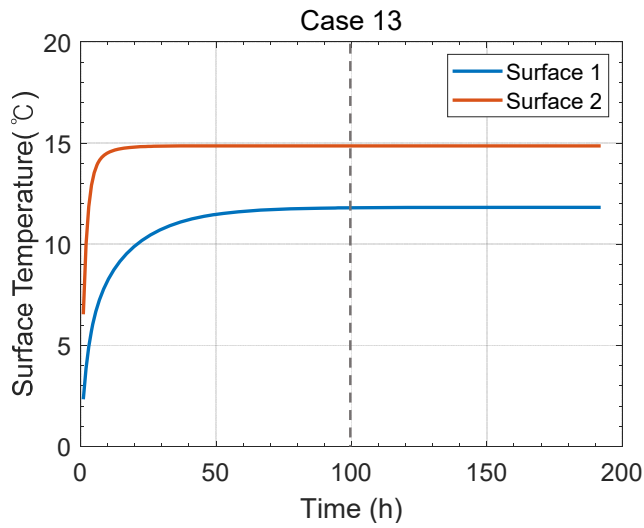
[그림 31] 상태-공간 모델 시뮬레이션 적정기간 케이스 분석결과 (Case 7, 8)



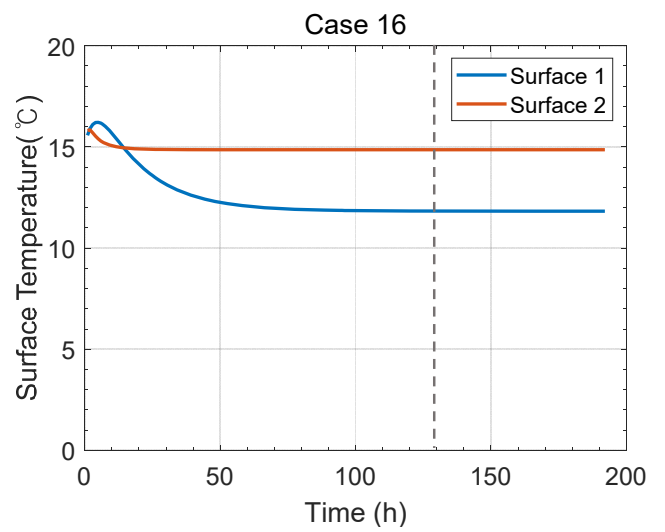
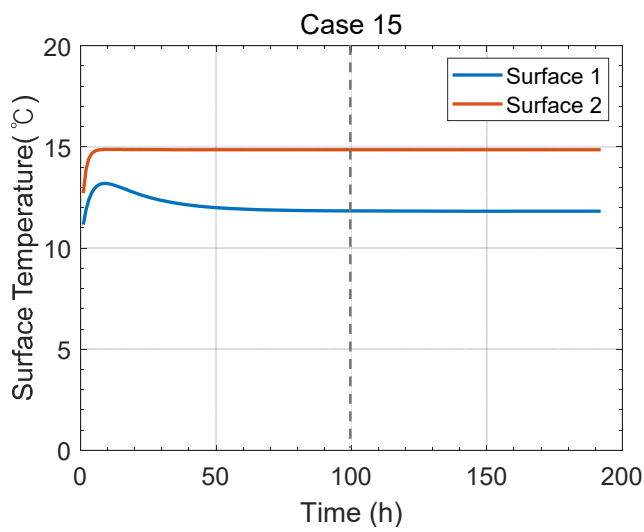
[그림 32] 상태-공간 모델 시뮬레이션 적정기간 케이스 분석결과 (Case 9, 10)



[그림 33] 상태-공간 모델 시뮬레이션 적정기간 케이스 분석결과 (Case 11, 12)



[그림 34] 상태-공간 모델 시뮬레이션 적정기간 케이스 분석결과 (Case 13, 14)



[그림 35] 상태-공간 모델 시뮬레이션 적정기간 케이스 분석결과 (Case 15, 16)

○ 전문가 검토 의견

- 2차 연도 연구성과 보고서에 대한 객관적 판단 및 평가를 위해 전문가 자문을 요청하고 의견서를 받음
- 코로나 19로 인하여 비대면으로 자문을 진행하였으며 최초 작성한 보고서에 대한 전문가 의견을 반영하여 보고서 수정을 완료하였음
- 본 연구 보고서에 대한 전문가 인적사항은 아래 <표 26>과 같음

<표 26> 성과 보고서 검증 전문가

전문가 성명	소 속	직 위	검토 보고서
엄 재 용	이 건 창 호	수석연구원	[증빙 B-2-1]
엄 재 용	이 건 창 호	수석연구원	[증빙 B-2-2]

전문가 의견 (증빙 B-2-1)

전문가 의견
• 자문일자: 2020.10.15. • 자문 제목: 창호-벽체에서 발생하는 열고 감지 및 평가를 위한 열원 데이터 구축의 입력 변수 및 설정 방법에 대한 자문 - 창이 설치되는 벽체의 개구부에서 설치 방식과 시공의 수준에 따라 해당 부분에서의 단열 및 기밀성 능이 크게 달라질 수 있으며, 그런 특성을 고려할 때 창과 벽체 및 설치 부분 재료의 밀도, 비열, 열전도율에 대한 명확한 물성값을 지정하는 것이 중요하고, 결과값에 많은 영향을 줄 것으로 사료됨. - 외부 일사량과 실내외 기류 조건에 대한 설정에 있어서 지역별/상황별 구분과 해당 데이터에 대한 세심한 고려가 요구됨. - 창이 설치 여건(방위각 및 경사각)에 따른 입력 변수 입력 방식에 대한 추가 고려를 추천함. - 특정 부재 온도 추출을 위한 설정 및 결과값을 활용하여 설치부분의 선형열관류율(U_{total}) 계산과 결과 성능을 도출에 활용 가능성 검토 요망. - 전체적으로 수치모델에서 설정한 경계 조건들은 창호 내외부에서 발생할 수 있는 다양한 물리적 현상들을 충분히 포함할 수 있을 것으로 사료되며, 해당 모델이 제대로 검증 되었다면 적절한 모델링 접근법이라 사료됩니다.

국토교통기술혁신연구사업 "리덕션 수치모델을 이용한 열화상 디지털 트윈 기반의 창호 시공부위 하자 평가" 2차년도 성과 보고서에 대한 전문가 의견을 본인이 직접 작성하였음을 확인합니다.

2020년 10월 15일

(주)이건창호 엄재용

전문가 의견 (증빙 B-2-2)

전문가 의견
• 자문일자: 2020.10.15. • 자문 제목: 벽체 및 창호 구성 부재의 축열 또는 축냉 예측 시뮬레이션 기간 설정 분석에 대한 자문 - 창호-벽체 부재별 밀도, 열전도율, 비열 선정시 각각의 부재들은 단일 부재(material)이 아닌 복합체로 구성되어 있는 점을 고려하여 선정 및 확인이 필요함. - Window Glass에 대해서 단일기준 형상에 따른 삼중유리 및 진공유리과 같은 경우에 대한 검토가 본 연구에 이어지면 좋을 것으로 사료되며, Window Glass 두께에 따른 영향에 대한 검토도 이루어지면 좋을 것으로 예상됨. - 준 정상상태 판단을 위한 부분으로 실내측 창호 주변부를 설정한 것은 유효할 것으로 예상됨. 하지만, 실내 인터리어의 다양한 마감 사례에 따른 다양성에 대한 고려가 요구됨. - 시뮬레이션 적정기간 분석을 위한 케이스 분류에 있어서, 이후 하절기 및 동절기를 고려한 실내온도 및 실외온도 그리고 부재 초기 온도에 대한 검토가 필요할 것으로 사료됨. - 이후 창호-벽체 연구에서 더 나아가 바닥 부분의 축열 효과에 대한 확장 검토가 가능하였다면 창호의 SHGC값에 따른 건물에너지 변화 예측에 활용이 가능할 것으로 예상됨. - 창호 자체에 대한 내용을 다시 한번 점검 바라며, 그러나 집합부의 주된 열적 영향이 프레임과 벽체의 물리적 특성에 주로 기인함으로 큰 무리가 없을 것으로 판단되며 제시한 3일 정도의 프리-시뮬레이션은 초기 조건의 불확실성을 충분히 상쇄할 것으로 판단됨.

국토교통기술혁신연구사업 "리덕션 수치모델을 이용한 열화상 디지털 트윈 기반의 창호 시공부위 하자 평가" 2차년도 성과 보고서에 대한 전문가 의견을 본인이 직접 작성하였음을 확인합니다.

2020년 10월 15일

(주)이건창호 엄재용

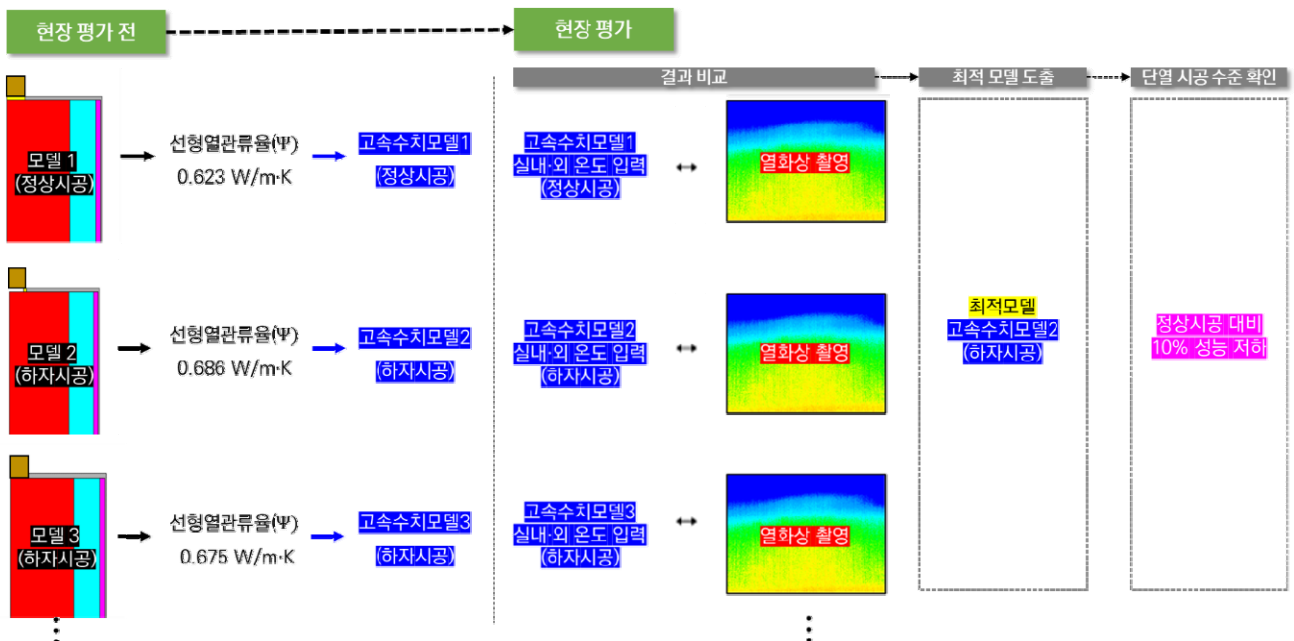
[그림 36] 전문가 검토 의견 스캔본

B-3) 열교계수 도출

[연구 수행 결과 요약] ① 현장 분석 프로세스 구체화 ② 리덕션 모델의 현장 적용	적용성검토보고서 [증빙 A-3-2]
--	----------------------------

○ 현장 즉각적 분석 프로세스

- A-3) 리덕션 기술 적용 수치모델 개발을 통해 구현한 리덕션 모델을 활용하여 현장에 적용하기 위한 프로세스를 구체화하였으며 현장 적용을 통해 가능성을 확인함
- 현장평가 전과 현장평가로 시점을 나누어 프로세스를 분류하면 다음 [그림 37]과 같이 현장평가 전, 도면 기반으로 접합부 열전도율이 서로 다른 다양한 모델을 구현함으로써 접합부의 선형열관류율이 서로 다른 다양한 케이스를 구성할 수 있음
- 열화상 촬영 전까지 현장의 실내, 실외의 온도 이력에 대한 데이터가 필요하므로 사전에 데이터 로깅이 가능한 온도계를 실내와 실외에 각각 설치할 필요가 있음. 현장평가 과정에서는 창-벽체 접합부 주변을 열화상 촬영하고 사전에 측정한 실내, 실외 온도데이터를 수치 모델에 입력함
- 고속계산이 가능한 수치 모델을 통해 즉각적으로 열화상 이미지와 온도 비교가 수행되며 가장 온도 오차가 적은 최적 모델이 도출됨. 도출된 최적 모델과 정상 시공을 가정한 모델의 선형열관류율을 비교하여 창-벽체 접합부의 단열성능 저하 수준을 확인할 수 있음



[그림 37] 현장평가 진행 전, 현장평가 진행에 따른 프로세스 분류

○ 고속계산이 가능한 리덕션 모델의 현장 적용

- [C-4 열화상을 통한 모델기반 열교계수 현장 재연성 확인]을 통해 선정된 4개 현장 중 3개소에 대한 결과를 최종보고서에 작성하였으며 모든 현장의 측정 결과 및 세부 내용은 [증빙 A-3-2]에서 확인 가능함
- 본 연구를 통해 개발한 리덕션 모델은 앞선 현장 측정 프로세스와 같이 도면 기반 정상시공 모델과 접합부 열전도율이 정상시공에 비하여 높게 구성된 모델들로 구성됨

<표 27> 실증 대상지

용도	No.	건물명	비고
공동주택	1	○○ 주공아파트 14단지	준공 후 30년 경과, 복도식
	2	○○ 센트레빌 1단지	준공 후 8년 경과, 계단식
업무시설	3	○○ 119안전센터 내 사무실	그린리모델링 대상지

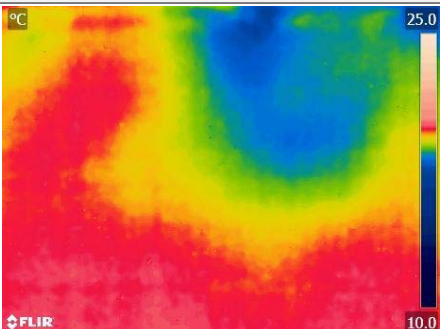
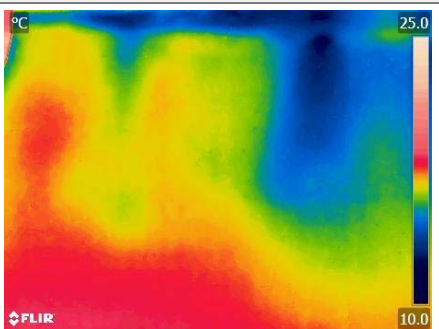
- 대상지 1번 공동주택에 현장 열화상 촬영 3일 전 실내·외 온도계 설치하여 온도 이력을 확보하였으며 온도계 설치 후 3일, 6일 2회에 걸쳐 열화상 촬영 및 수치모델 계산을 진행함

<표 28> 대상지 1번 개요

구분	내용		사진
공동주택 1	건물명	○○ 주공아파트 14단지	
	위치	서울특별시	
	용도	공동주택	
	구조	철근콘크리트구조	
	규모	지상 15층	
	건축연도	1989년	

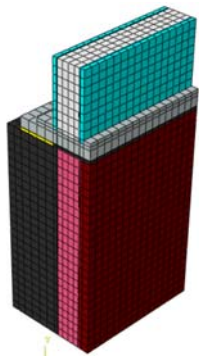
- 열화상 측정 부위는 좌측 창호 하단부를 대상으로 40cm × 30cm 영역을 대상으로 함

<표 29> 대상지 1번 공동주택 열화상 촬영 이미지

대상지	3일차	6일차
No.1 (공동주택)		

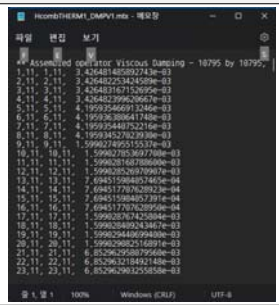
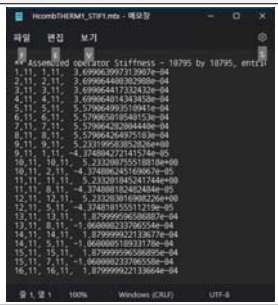
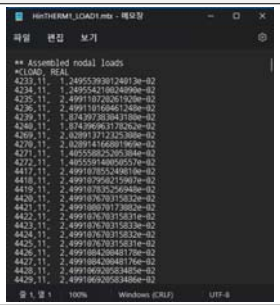
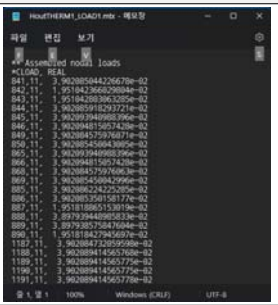
- 대상지 1번 공동주택의 열화상 촬영 이미지를 묘사하기 위한 3차원 모델을 구성함. 열화상 이미지를 묘사하기 위한 3차원 형상 모델은 접합부 단열재인 UF-foam의 열전도율이 상이하며 기준모델인 Reference 모델에서 접합부 열전도율은 $0.027 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 로 설정함

<표 30> 대상지 1번 공동주택 열화상 묘사용 3차원 창-벽체 형상 모델

대상지	3차원 창-벽체 모델 형상	물성치			
		부재 (적용부위)	열전도율 ($\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)	밀도 (kg/m^3)	비열 ($\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$)
No.1 (공동주택)		Concrete (wall)	1.700	2,150	870
		Wood panel (wall)	0.500	500	1,300
		Insulation (wall)	0.100	20	900
		UF-foam (joint)	0.027 (reference)	70	1,500
		PVC frame (window)	0.170	1,390	900
		Glazing (window)	0.960	2,500	750

- 대상지 1번 공동주택의 열화상 촬영 이미지 묘사를 위한 수치 모델을 고속 수치모델인 리덕션 모델로 구현하기 위해서는 각각의 3차원 모델의 물성이 반영된 행렬 데이터를 기반으로 상태-공간모델 구현이 필요함. 3차원 모델로부터 추출한 데이터는 총 4가지로 10,795개 노드로 구성된 3차원 형상모델로부터 추출됨

<표 31> 대상지 1번 공동주택 열화상 묘사를 위한 추출 행렬 데이터

추출 데이터	Damping	Stiffness	Load 1	Load 2
행렬 데이터 파일				
행렬크기	10,795 x 10,795	10,795 x 10,795	10,795 x 1	10,795 x 1

- 추출한 행렬데이터를 기반으로 상태-공간모델을 구현하고 MATLAB의 Balred function을 사용하여 리덕션을 진행함. 상태공간모델 대비 오차율을 산출을 통해 리덕션 모델의 기준 차수 $m=10$ 의 적정성을 확인함

<표 32> 대상지 1번 공동주택 열화상 묘사를 위한 추출 행렬 데이터

	리덕션 모델 차수(m) = 10	리덕션 모델 차수 (m) = 50
상태공간모델($n=10,795$) 대비 오차율(%)	0.0010 (기준 차수)	0.0007

- 대상지 1번 공동주택에 현장 열화상 촬영 3일전 실내·외 온도계 설치하여 온도 이력을 확보하였으며 온도계 설치 후 3일, 6일 2회에 걸쳐 열화상 촬영 및 수치모델 계산을 진행함. 각 모델의 창-벽체 접합부 선형 열관류율은 다음과 같음

<표 33> 대상지 1번 공동주택 열화상 묘사용 모델

모델 번호	선형열관류율(W/m · °C)	접합부 열전도율(W/m · °C)	비고
Model 1	0.0190	0.027	Reference
Model 2	0.0200	1.000	
Model 3	0.0210	0.027	
Model 4	0.0230	0.500	
Model 5	0.0235	0.750	
Model 6	0.0239	1.000	
Model 7	0.0270	5.000	
Model 8	0.0290	10.000	
Model 9	0.0300	20.000	
Model 10	0.0310	30.000	
Model 11	0.0314	40.000	
Model 12	0.0317	50.000	
Model 13	0.0319	60.000	
Model 14	0.0320	70.000	
Model 15	0.0321	80.000	
Model 16	0.0322	90.000	
Model 17	0.0323	100.000	
Model 18	0.0327	200.000	
Model 19	0.0328	300.000	
Model 20	0.0329	400.000	

- 대상지 1번 공동주택의 열화상 이미지를 수치모델과 비교하기 위하여 접합부 주변 영역을 나누어 평균온도를 계산하였으며 접합부와 가까운 순으로 Surface 1, 2, 3를 비교함

<표 34> 대상지 1번 공동주택 평균 표면온도 결과

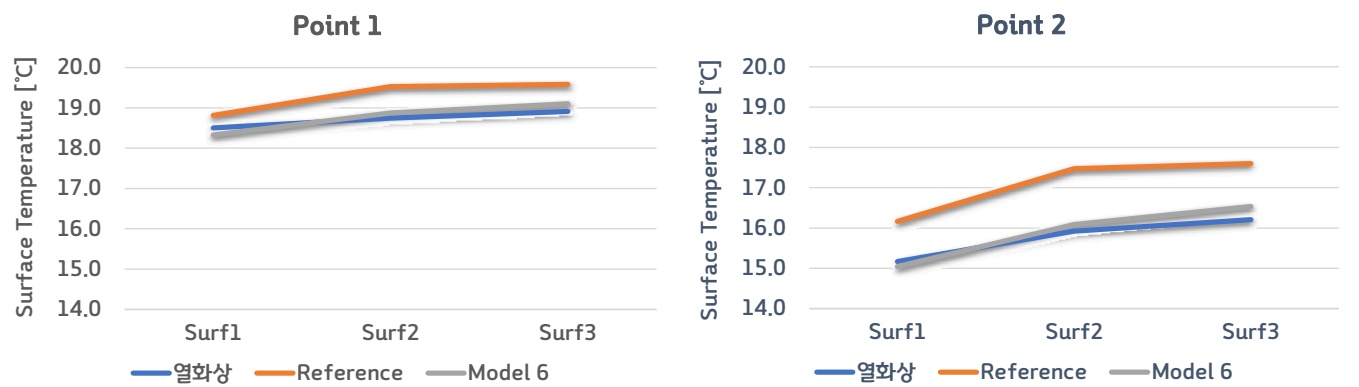
측정점	모델 번호	Surface 1	Surface 2	Surface 3
Point 1 (3일차)	열화상이미지	18.505	18.745	18.915
	Model 1	18.814	19.528	19.586
	Model 2	18.560	19.483	19.576
	Model 3	18.346	18.883	19.107
	Model 4	18.337	18.878	19.105
	Model 5	18.334	18.876	19.104
	Model 6	18.331	18.875	19.103
	Model 7	18.299	18.857	19.094
	Model 8	18.280	18.846	19.087
Point 2 (6일차)	열화상이미지	15.165	15.920	16.210
	Model 1	16.161	17.467	17.597
	Model 2	15.569	17.272	17.450
	Model 3	15.152	16.159	16.587
	Model 4	15.075	16.103	16.545
	Model 5	15.058	16.091	16.537
	Model 6	15.043	16.082	16.531
	Model 7	14.899	15.992	16.477
	Model 8	14.803	15.932	16.441

- 대상지 1번의 Model 3~6이 열화상 이미지의 온도 패턴을 유사하게 묘사하는 것을 확인할 수 있으며 모델의 측정 시점 및 종합 표면 평균온도 RMSE(℃)를 산출함

<표 35> 대상지 1번 공동주택 평균 표면온도 RMSE

모델 번호	RMSE (℃)			비고
	Point 1	Point 2	종합	
Model 1	0.6218	1.3300	1.0381	Reference
Model 2	0.5735	1.0845	0.8675	
Model 3	0.1646	0.2574	0.2160	
Model 4	0.1655	0.2259	0.1980	
Model 5	0.1658	0.2218	0.1959	
Model 6	0.1662	0.2191	0.1945	
Model 7	0.1704	0.2211	0.1974	
Model 8	0.1739	0.2477	0.2140	

- 대상지 1번의 도면 기반 물성 입력 시 열화상 패턴을 묘사한다고 판단하기 어려우며 RMSE가 가장 낮은 Model 6은 패턴 및 온도 변화 수준을 묘사하는 것을 확인할 수 있음



[그림 38] 대상지 1 열화상, 최적모델 표면온도 결과 비교

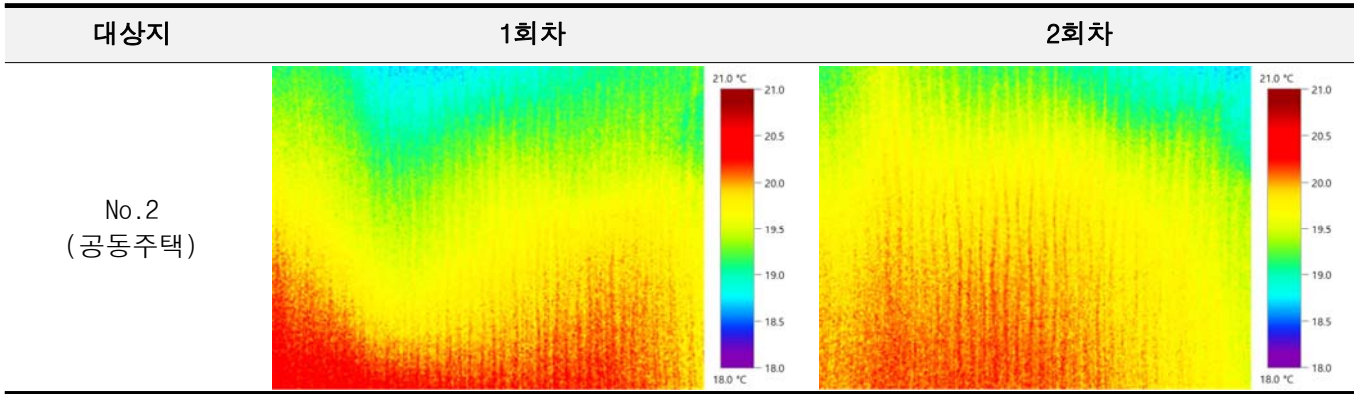
- 대상지 2번 공동주택에 현장 열화상 촬영 3일 전 실내·외 온도계 설치하여 온도 이력을 확보하였으며 온도계 설치 후 3일에 촬영하는 방식으로 2회 진행함

<표 36> 대상지 2번 개요

구분	내용		사진
No.2 (공동주택)	건물명	○○ 센트레빌 1단지	
	위치	인천광역시	
	용도	공동주택	
	구조	철근콘크리트구조	
	규모	지상 14층, 지하 2층	
	건축연도	2013년	

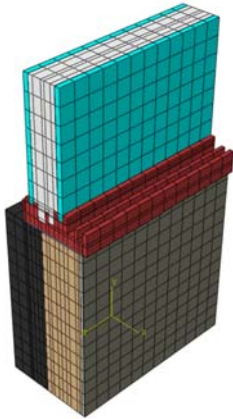
- 열화상 측정 부위는 좌측 창호 하단부를 대상으로 40cm × 30cm 영역을 대상으로 함

<표 37> 대상지 2번 공동주택 열화상 촬영 이미지



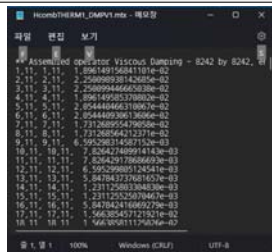
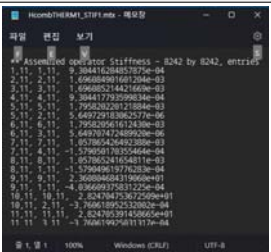
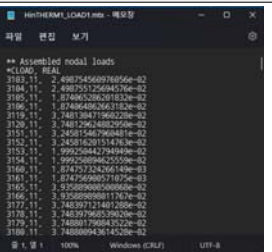
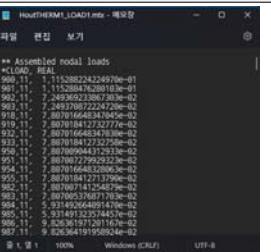
- 대상지 2번 공동주택은 현장 열화상 촬영 3일 전 실내·외 온도계 설치하여 온도 이력을 확보하였으며 온도계 설치 후 3일 후 촬영을 진행하는 방식을 2회 실시함. 각 모델의 창-벽체 접합부 선형열관류율은 다음과 같음
- 대상지 2번 공동주택의 열화상 촬영 이미지를 묘사하기 위한 3차원 모델을 구성함. 열화상 이미지를 묘사하기 위한 3차원 형상 모델은 접합부 단열재인 UF-foam의 열전도율이 상이하며 기준모델인 Reference 모델에서 접합부 열전도율은 0.027 W/m² · °C로 설정함

<표 38> 대상지 2번 공동주택 열화상 묘사용 3차원 창-벽체 형상 모델

대상지	3차원 창-벽체 모델 형상	물성치			
		부재 (적용부위)	열전도율 (W/m ² · °C)	밀도 (kg/m ³)	비열 (J/kg · °C)
No.2 (공동주택)		Concrete (wall)	1.590	2,150	870
		Insulation (wall)	0.034	16	900
		Gypsum (wall)	0.180	800	1,300
		PVC Frame (window)	0.500	1,390	900
		Glazing (window)	0.960	2,500	750
		UF-foam (joint)	0.027 (reference)	70	1,500

- 대상지 2번 공동주택의 열화상 촬영 이미지 묘사를 위한 수치 모델을 고속 수치모델인 리덕션 모델로 구현하기 위해서는 각각의 3차원 모델의 물성이 반영된 행렬 데이터를 기반으로 상태-공간모델 구현이 필요함. 3차원 모델로부터 추출한 데이터는 총 4가지로 8,242개 노드로 구성된 3차원 형상모델로부터 추출됨

<표 39> 대상지 2번 공동주택 열화상 묘사를 위한 추출 행렬 데이터

추출 데이터	Damping	Stiffness	Load 1	Load 2
행렬 데이터 파일				
행렬크기	8,242 x 8,242	8,242 x 8,242	8,242 x 1	8,242 x 1

- 추출한 행렬데이터를 기반으로 상태-공간모델을 구현하고 MATLAB의 Balred function을 사용하여 리덕션을 진행함. 상태공간모델 대비 오차율을 산출을 통해 리덕션 모델의 기준 차수 m=10의 적정성을 확인함

<표 40> 대상지 1번 공동주택 열화상 묘사를 위한 추출 행렬 데이터

	리덕션 모델 차수(m) = 10	리덕션 모델 차수 (m) = 50
상태공간모델(n=8,242) 대비 오차율(%)	0.0012	0.0005

<표 41> 대상지 2번 공동주택 열화상 묘사용 모델

모델 번호	선형열관류율(W/m · °C)	접합부 열전도율(W/m · °C)	비고
Model 1	0.0011	0.027	Reference
Model 2	0.0017	0.050	
Model 3	0.0031	0.100	
Model 4	0.0056	0.200	
Model 5	0.0081	0.300	
Model 6	0.0104	0.400	
Model 7	0.0127	0.500	
Model 8	0.0228	1.000	
Model 9	0.0649	5.000	
Model 10	0.0865	10.000	
Model 11	0.0162	0.027	접합부 형상 변경
Model 12	0.0168	0.050	접합부 형상 변경
Model 13	0.0181	0.100	접합부 형상 변경
Model 14	0.0207	0.200	접합부 형상 변경
Model 15	0.0231	0.300	접합부 형상 변경
Model 16	0.0254	0.400	접합부 형상 변경
Model 17	0.0276	0.500	접합부 형상 변경
Model 18	0.0376	1.000	접합부 형상 변경
Model 19	0.0821	5.000	접합부 형상 변경
Model 20	0.1063	10.000	접합부 형상 변경

- 대상지 2번 공동주택의 열화상 이미지를 수치모델과 비교하기 위하여 접합부 주변 영역을 나누어 평균온도를 계산하였으며 접합부와 가까운 순으로 Surface 1, 2, 3를 비교함

<표 42> 대상지 2번 평균 표면온도 결과

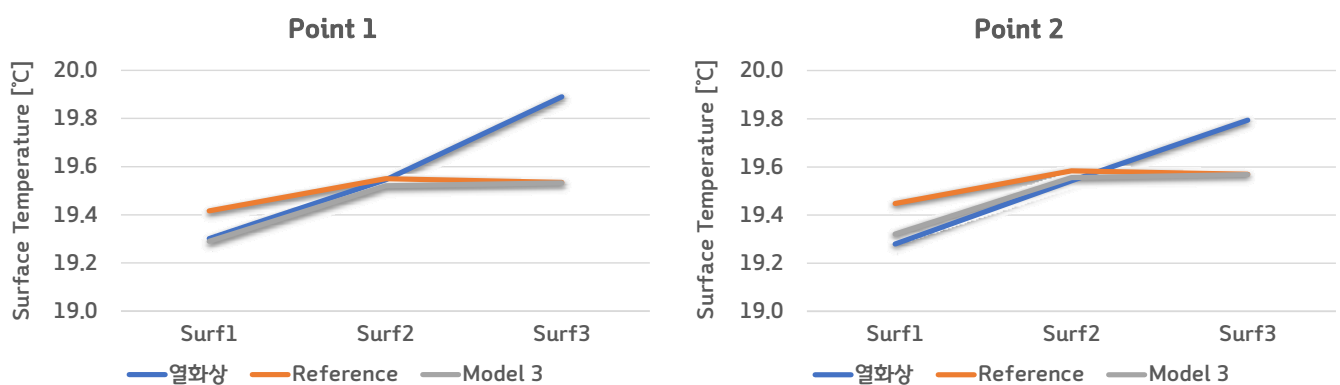
측정점	모델 번호	Surface 1	Surface 2	Surface 3
Point 1 (1회차)	열화상이미지	19.301	19.545	19.891
	Model 1	19.416	19.549	19.534
	Model 2	19.362	19.538	19.535
	Model 3	19.290	19.521	19.533
	Model 4	19.208	19.501	19.530
	Model 5	19.152	19.487	19.528
	Model 6	19.106	19.476	19.525
	Model 7	19.064	19.465	19.523
	Model 8	18.883	19.420	19.514
Point 2 (2회차)	열화상이미지	19.280	19.543	19.795
	Model 1	19.448	19.584	19.570
	Model 2	19.393	19.572	19.570
	Model 3	19.321	19.555	19.569
	Model 4	19.238	19.535	19.565
	Model 5	19.182	19.521	19.563
	Model 6	19.135	19.510	19.561
	Model 7	19.093	19.499	19.559
	Model 8	18.913	19.454	19.549

- 대상지 2번의 Model 4, 5가 열화상 이미지의 온도 패턴을 유사하게 묘사하는 것을 확인할 수 있음. 모델의 측정 시점 및 종합 표면 평균온도 RMSE(℃)를 산출함

<표 43> 대상지 2번 평균 표면온도 결과 RMSE

모델 번호	RMSE (℃)			비고
	Point 1	Point 2	종합	
Model 1	0.2164	0.1640	0.1920	Reference
Model 2	0.2087	0.1463	0.1802	
Model 3	0.2071	0.1330	0.1740	
Model 4	0.2165	0.1347	0.1803	
Model 5	0.2291	0.1459	0.1921	
Model 6	0.2426	0.1602	0.2056	
Model 7	0.2567	0.1757	0.2200	
Model 8	0.3327	0.2603	0.2987	

- 대상지 2번에서 RMSE가 가장 낮은 Model 3이 패턴 및 온도 변화 수준을 가장 적은 오차로 묘사하는 것을 확인할 수 있음. 대상지의 경우 벽체 단열 수준이 높고 창호가 바닥난방이 가동되는 바닥면으로부터 가까워 Surface 3에서 열화상 측정 결과가 다소 높게 나타남



[그림 39] 대상지 2 열화상, 최적모델 표면온도 결과 비교

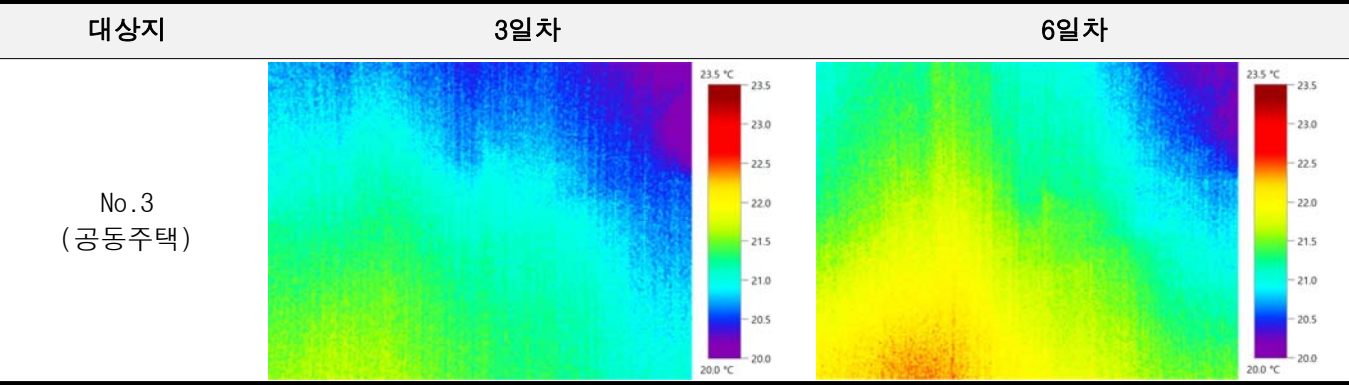
- 대상지 3번 사무실에 현장 열화상 촬영 3일전 실내·외 온도계 설치하여 온도 이력을 확보하였으며 온도계 설치 후 3일, 6일 2회에 걸쳐 열화상 촬영 및 수치모델 계산을 진행함

<표 44> 대상지 3번 개요

구분	내용		사진
No.3 (사무실)	건물명	○○ 119안전센터	
	위치	서울특별시	
	용도	제1종 근린생활시설(소방서)	
	구조	철근콘크리트구조	
	규모	지상 3층, 지하 1층	
	건축연도	1992년 (그린리모델링 대상지)	

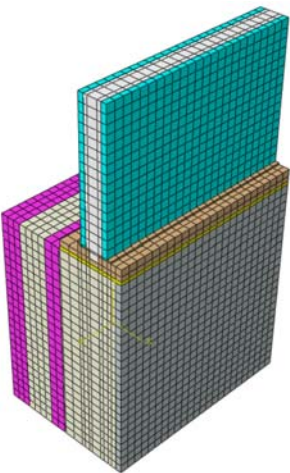
- 열화상 측정 부위는 좌측 창호 하단부를 대상으로 40cm × 30cm 영역을 대상으로 함

<표 45> 대상지 3번 사무실 열화상 촬영 이미지



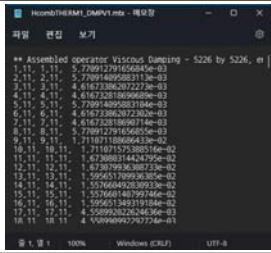
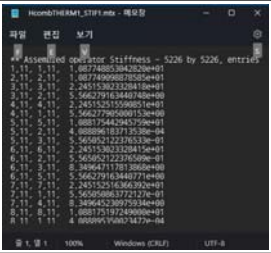
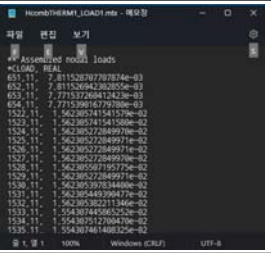
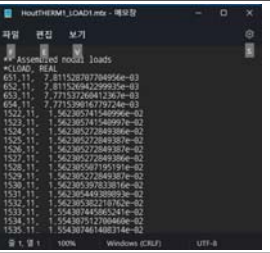
- 대상지 3번 사무실에 현장 열화상 촬영 3일전 실내·외 온도계 설치하여 온도 이력을 확보하였으며 온도계 설치 후 3일, 6일 2회에 걸쳐 열화상 촬영 및 수치모델 계산을 진행함. 각 모델의 창-벽체 접합부 선형열 관류율은 다음과 같음
- 대상지 3번 사무실의 열화상 촬영 이미지를 묘사하기 위한 3차원 모델을 구성함. 열화상 이미지를 묘사하기 위한 3차원 형상모델은 접합부 단열재인 UF-foam의 열전도율이 상이하며 기준모델인 Reference 모델에서 접합부 열전도율은 0.027 W/m² · °C로 설정함

<표 46> 대상지 3번 열화상 묘사용 3차원 창-벽체 형상 모델

대상지	3차원 창-벽체 모델 형상	물성치			
		부재 (적용부위)	열전도율 (W/m ² · °C)	밀도 (kg/m ³)	비열 (J/kg · °C)
No.3 (사무실)		Concrete Block (wall)	0.700	2,150	880
		Concrete (wall)	1.600	2,150	870
		Insulation (wall)	0.034	16	900
		Mortar (wall)	1.000	2,162	1,040
		PVC Frame (window)	0.170	1,390	900
		Glazing (window)	0.960	2,500	750
		UF-foam (joint)	0.027 (reference)	70	1,500

- 대상지 3번 공동주택의 열화상 촬영 이미지 묘사를 위한 수치 모델을 고속 수치모델인 리덕션 모델로 구현하기 위해서는 각각의 3차원 모델의 물성이 반영된 행렬 데이터를 기반으로 상태-공간모델 구현이 필요함. 3차원 모델로부터 추출한 데이터는 총 4가지로 5,226개 노드로 구성된 3차원 형상모델로부터 추출됨

<표 47> 대상지 2번 공동주택 열화상 묘사를 위한 추출 행렬 데이터

추출 데이터	Damping	Stiffness	Load 1	Load 2
행렬 데이터 파일				
행렬크기	5,226 x 5,226	5,226 x 5,226	5,226 x 1	5,226 x 1

- 추출한 행렬데이터를 기반으로 상태-공간모델을 구현하고 MATLAB의 Balred function을 사용하여 리덕션을 진행함. 상태공간모델 대비 오차율을 산출을 통해 리덕션 모델의 기준 차수 m=10의 적정성을 확인함

<표 48> 대상지 1번 공동주택 열화상 묘사를 위한 추출 행렬 데이터

	리덕션 모델 차수(m) = 10	리덕션 모델 차수 (m) = 50
상태공간모델(n=5,226) 대비 오차율(%)	0.0005	0.0003

<표 49> 대상지 3번 사무실 열화상 묘사용 모델

모델 번호	선형열관류율(W/m · °C)	접합부 열전도율(W/m · °C)	비고
Model 1	0.1700	0.027	Reference
Model 2	0.1800	0.100	
Model 3	0.1970	0.500	
Model 4	0.2080	1.000	
Model 5	0.2520	5.000	
Model 6	0.2760	10.000	
Model 7	0.2980	20.000	
Model 8	0.3090	30.000	
Model 9	0.3150	40.000	
Model 10	0.3190	50.000	
Model 11	0.0063	0.027	접합부 형상 변경
Model 12	0.0135	0.100	접합부 형상 변경
Model 13	0.0354	0.500	접합부 형상 변경
Model 14	0.0513	1.000	접합부 형상 변경
Model 15	0.1119	5.000	접합부 형상 변경
Model 16	0.1480	10.000	접합부 형상 변경
Model 17	0.1839	20.000	접합부 형상 변경
Model 18	0.2022	30.000	접합부 형상 변경
Model 19	0.2133	40.000	접합부 형상 변경
Model 20	0.2207	50.000	접합부 형상 변경

- 대상지 3번 사무실의 열화상 이미지를 수치모델과 비교하기 위하여 접합부 주변 영역을 나누어 평균온도를 계산하였으며 접합부와 가까운 순으로 Surface 1, 2, 3를 비교함

<표 50> 대상지 3번 사무실 평균 표면온도 결과

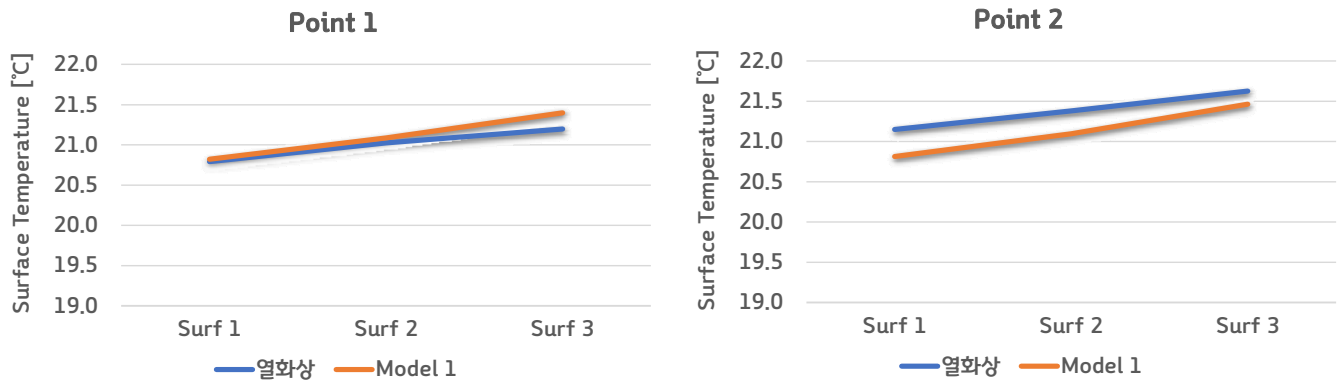
측정점	모델 번호	Surface 1	Surface 2	Surface 3
Point 1 (3일차)	열화상이미지	20.792	21.025	21.198
	Model 1	20.822	21.086	21.399
	Model 2	20.583	20.868	21.223
	Model 3	20.363	20.685	21.079
	Model 4	20.247	20.610	21.029
	Model 5	19.686	20.296	20.841
Point 2 (6일차)	열화상이미지	21.152	21.381	21.626
	Model 1	20.815	21.097	21.463
	Model 2	20.545	20.827	21.229
	Model 3	20.287	20.599	21.040
	Model 4	20.140	20.503	20.973
	Model 5	19.402	20.085	20.718

- 대상지 3번의 경우 도면을 기반으로 모델링한 Model 1에서 가장 유사한 결과가 나타났으며 리모델링 부위에 대한 단열 보강이 이루어진 것으로 판단됨

<표 51> 대상지 3번 사무실 평균 표면온도 결과 RMSE

모델 번호	RMSE (℃)			비고
	Point 1	Point 2	종합	
Model 1	0.1223	0.2712	0.2103	Reference
Model 2	0.1516	0.5268	0.3876	
Model 3	0.3233	0.7533	0.5797	
Model 4	0.4073	0.8605	0.6732	
Model 5	0.7922	1.3619	1.1141	

- 대상지 3번의 경우 도면을 기반으로 모델링한 Model 1에서 가장 유사한 결과가 나타났으며 리모델링 부위에 대한 단열 보강이 이루어진 것으로 판단됨



[그림 41] 대상지 3 열화상, 최적모델 표면온도 결과 비교

- 현장 즉각적 창-벽체 접합부 단열 시공 성능 및 열교계수 도출 프로세스를 적용한 실험결과에 대해 전문가 자문을 실시하였으며 관련 전문가 의견은 아래와 같음

<표 52> 단위성과물 B-3 전문가 자문 결과

전문가 인적 사항	자문 결과 요약
• 성명: 최원기 • 소속: (주)선우시스 • 직책: 소장	• 자문일자: 2021.12.27. ~ 2021.12.28. • 전문가 의견 요약 - 설계 도서를 명확히 알 수 있는 추가적인 현장 검증을 통해 예측 프로세스를 개발한다면 활용도가 매우 높은 연구가 될 것으로 판단됨 - 현장의 다양한 외기 온습도 조건에서의 비교 검증 프로세스에 대한 내용이 추가되면 좋을 것으로 판단됨 - 도출된 결과를 기반으로 현장에서 즉각적으로 성능을 판단할 수 있는 프로세스가 필요할 것으로 사료됨

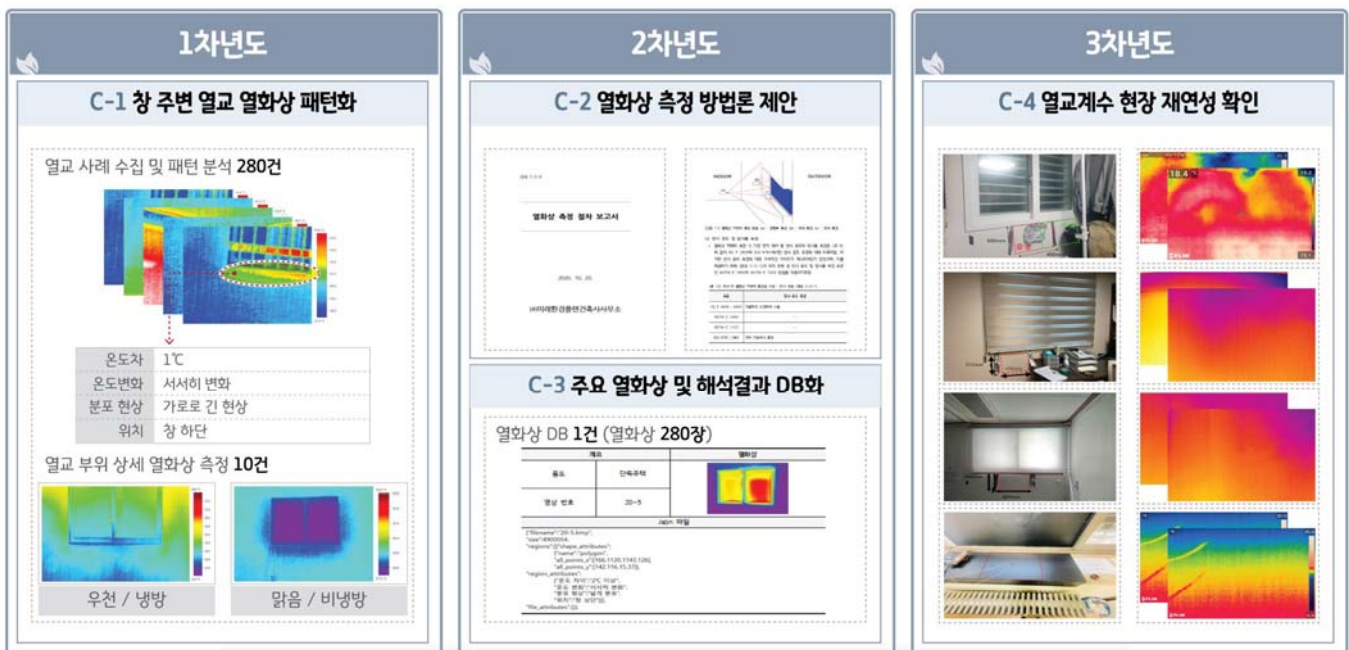
○ 핵심 성과 B. 소결

핵심 성과 B. 최적화 기법을 이용한 선형열교계수 도출 기술		
B-1	최적화 기법 베이스라인 구축	1. 창-벽체 접합부의 형상 및 열전도를 변화에 따른 선형열관류율 변화 가능성 확인 2. 접합부 시공하자를 묘사할 수 있는 최적 형상 모델
B-2	재연성을 위한 필요조건분석	1. 현장 재연성 확보를 위한 필요조건 및 요소 분석 2. 현장 재연성 확보를 위한 필요조건의 상태공간모델 탑재 완료 3. 현장 재연성 확보를 위한 부재 초기온도 및 시뮬레이션 적정기간 확인
B-3	선형열교계수도출	1. 현장 즉각적 창-벽체 접합부 단열 시공 성능 확인 프로세스 구축 2. 현장 열화상 촬영 및 리덕션 수치모델 수치계산을 통한 현장 테스트 실시 3. 현장 상황을 반영한 최적 열교계수 도출 및 단열 시공 수준 확인

[그림 42] 핵심성과 B. 소결

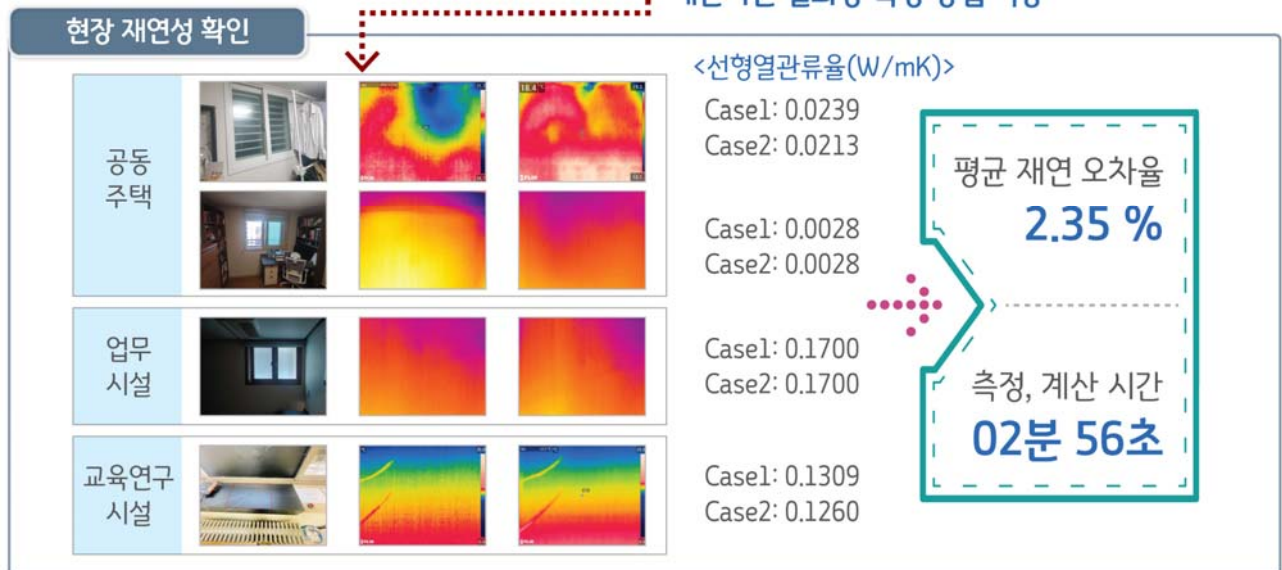
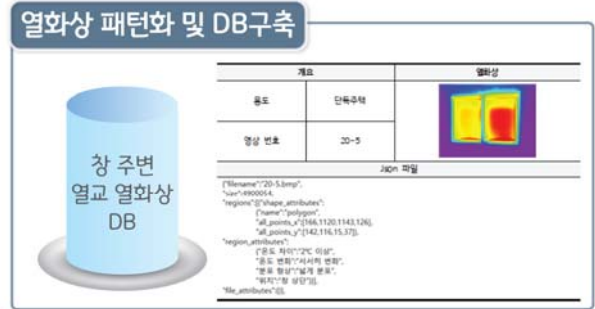
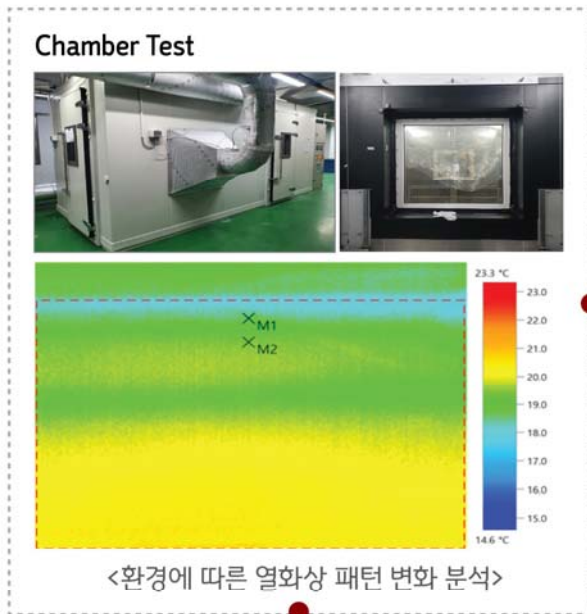
핵심성과물 C. 창호 시공부위 하자 평가를 위한 열화상 측정 방법론

핵심성과 C	창호 시공부위 하자 평가를 위한 열화상 측정 방법론	
정의	창호와 벽의 접합부위에 대한 하자를 열화상으로 평가하기 위한 사전조사 항목, 측정환경(대기온도, 안정화 시간 등), 창호 설치 상황에 따른 측정 방법 등을 포함하는 방법론	
목적	창호와 벽의 접합부위에 대한 시공 하자를 확인할 수 있는 열화상 측정 방법론이 부재함에 따라, 열화상 측정이 건물의 단열성능 평가에 한정되어 활용됨. 본 연구를 통해 개발된 창호 시공부위 하자 평가를 위한 열화상 측정 방법론을 통해, 창호와 벽의 접합부위에 하자가 발생할 경우 비접촉식 방법으로 하자를 확인할 수 있음. 또한, 열화상 카메라의 건설분야 활용성을 높일 수 있음.	
성능목표	(기존기술 수준) 창호 시공부위의 하나를 대상으로 한 열화상 표준 또는 측정 방법론이 존재하지 않음. (개발기술 수준) 세계 최초로 창호 시공부위의 하자를 인식하기 위한 열화상 측정 방법론을 제안하며, 재연실험의 오차율은 15% 이내임.	
성과달성 책임자 (소속기관)	장향인(㈜미래환경플랜건축사사무소)	
소요기간	' 19.04 ~ ' 21.12(2년9개월, 3년차)	
성과달성 확인방법	1) 창호 시공부위 하자 평가를 위한 열화상 측정 매뉴얼 개발 2) 제안한 측정 방법론을 통한 재연실험 오차율 15% 이내 달성	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	출원 : 1건 (계획) 출원 : 1건
	논문	SCIE : 1건(accepted), KCI : 2건 (계획) KCI : 2건
	저작	0건 (계획) 0건
	S/W	0건 (계획) 0건
	신기술	0건 (계획) 0건
	기타	학술회의 발표 : 1건 (계획) 0건



핵심성과물 C. 열교계수 산정을 위한 열화상 측정 방법론

[그림 43] 핵심성과물 C. 열교계수 산정을 위한 열화상 측정 방법론



[그림 44] 핵심성과 C. 주요 연구 성과

C-1) 창 주변 열교 열화상 패턴화

[연구 수행 결과 요약] ① 창 주변 열교 사례 수집: 열화상 사례 수집 <u>280건</u> ② 열화상 패턴 분석: 열화상 패턴 분석 사례 <u>280건</u> ③ 열교 부위 상세 열화상 측정: 상세 열화상 측정 <u>10건</u>	사례수집 보고서 [증빙 C-1-1] 열화상 패턴 분석 보고서 [증빙 C-1-2] 상세 측정 보고서 [증빙 C-1-3]
---	--

○ 창 주변 열교 사례 수집

- 창 주변 열교 사례를 수집하기 위하여 국내 건축물에서 큰 비중을 차지하는 업무시설과 주거시설을 대상으로 함. 특히 공동기관인 (주)미래환경플랜건축사무소의 다년간 공공건축물 그린리모델링 사업 수행 경험을 바탕으로 공공건축물 그린리모델링 대상지에 대한 열화상 촬영 허가를 획득함. 다음 <표 53>은 본 연구에서 창 주변 열화상을 수집하기 위한 대상을 나타냄. 공공건축물 그린리모델링 대상지뿐만 아니라 신축과 기축 주거 건물 단지를 대상으로 포함함

<표 53> 창 주변 열화상 수집 대상

구분	번호	건물명 / 지역	위치	준공시기
공공건축물 그린리모델링 대상지	1	○○광역시청	대전광역시 서구	1999년
	2	보은군 ○○○회관	충청북도 보은군	2002년
	3	○○면사무소	경기도 화성시	1997년
	4	세종시청 ○○○청사 C동	세종특별자치시 조치원읍	1988년
	5	○○군청	강원도 양구군	1984년
	6	○○시의회	전라남도 광양시	1993년
	7	경북 ○○시청 본관	경상북도 구미시	1979년
	8	국립○○○○관리원	경상남도 창원시	1988년
	9	○○구청	부산광역시 금정구	1991년
	10	대구북구 ○○1동 주민센터	대구광역시 북구	1992년
	11	○○○역사	대구광역시 동구	1971년
	12	○○2동 주민센터	부산광역시 동구	1989년
	13	부산 ○구청	부산광역시 중구	1988년
	14	○○군청	충청북도 음성군	1995년
	15	○○ 행정복지센터	전라남도 장성군	1989년
	16	진주 ○○ 2차 주공아파트	경상남도 진주시	1991년
	17	○○군청	경상남도 하동군	1992년
	18	○○2동 주민센터	서울특별시 양천구	-
	19	○○시청 3별관	경기도 포천시	-
신축 단지	20	항동 단독주택 단지	서울특별시 구로구	2019년
기축 단지	21	미아역 인근	서울특별시 강북구	-
	22	월계/공릉동 인근	서울특별시 노원구	-
	23	은평구 인근	서울특별시 은평구	-

- 정성적 방법으로 열화상 분석이 가능하도록 건물의 실내와 실외에서 창과 창 주변의 온도분포를 열화상 카메라로 촬영함. 본 연구에서는 열화상 촬영을 위해 공동연구기관에서 보유한 Testo 882를 사용함. Testo 882에 대한 상세 내용은 다음 <표 54>와 같음

<표 54> 본 연구에서 활용한 열화상 카메라

사진	항목	내용
	모델명	Testo 882
	측정범위	-20℃ ~ 550℃
	정확도	측정값 ± 2℃
	열화상 민감도	0.05℃ at 30℃
	방사율	0.01 ~ 1 / 수동
	해상도	320 × 240 pixel
	파장 영역	8 ~ 14μm

- 열화상 수집 대상 건물 또는 지역을 방문하여 창과 창 주변을 열화상 카메라로 촬영함. 다음 <표 55>는 각 건물 또는 지역에서 획득한 열화상 수를 나타냄. 총 280장의 열화상을 획득하여 기존 계획인 100장과 비교할 때 280%의 실적을 달성함

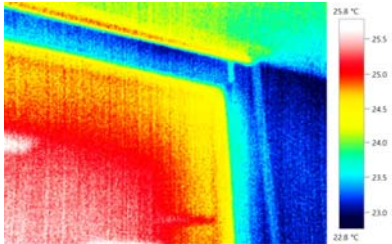
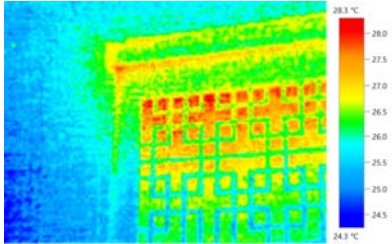
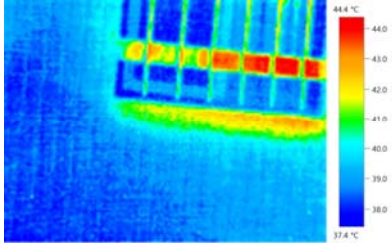
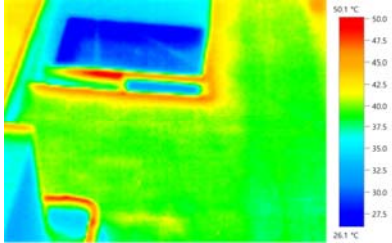
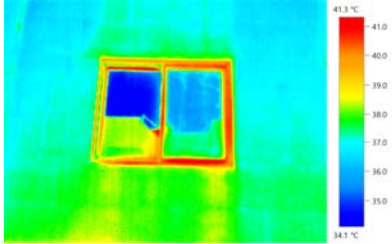
<표 55> 창 주변 열화상 수집 대상

구분	번호	건물명 / 지역	위치	열화상 수(장)
공공건축물 그린리모델링 대상지	1	○○광역시청	대전광역시 서구	12
	2	보은군 ○○○회관	충청북도 보은군	18
	3	○○면사무소	경기도 화성시	14
	4	세종시청 ○○○청사 C동	세종특별자치시 조치원읍	8
	5	○○군청	강원도 양구군	18
	6	○○시의회	전라남도 광양시	12
	7	경북 ○○시청 본관	경상북도 구미시	16
	8	국립○○○○관리원	경상남도 창원시	8
	9	○○구청	부산광역시 금정구	14
	10	대구북구 ○○1동 주민센터	대구광역시 북구	8
	11	○○○역사	대구광역시 동구	8
	12	○○2동 주민센터	부산광역시 동구	8
	13	부산 ○구청	부산광역시 중구	14
	14	○○군청	충청북도 음성군	10
	15	○○ 행정복지센터	전라남도 장성군	12
	16	진주 ○○ 2차 주공아파트	경상남도 진주시	10
	17	○○군청	경상남도 하동군	14
	18	○○2동 주민센터	서울특별시 양천구	16
	19	○○시청 3별관	경기도 포천시	14
신축 단지	20	향동 단독주택 단지	서울특별시 구로구	17

구분	번호	건물명 / 지역	위치	열화상 수(장)
기축 단지	21	미아역 인근	서울특별시 강북구	10
	22	월계/공릉동 인근	서울특별시 노원구	14
	23	은평구 인근	서울특별시 은평구	5
합계				280

- 다음 <표 56>은 본 연구를 위해 수집한 창 주변 열화상 예시를 나타냄. 전체 280장의 열화상은 [증빙 C-1-1] 창 주변 열화상 수집 사례 보고서에서 확인 가능함

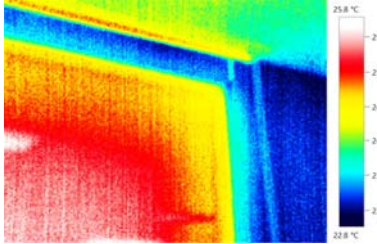
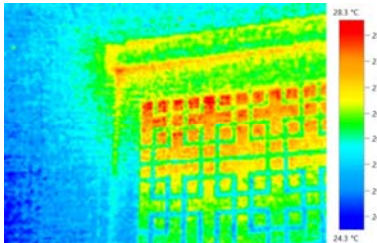
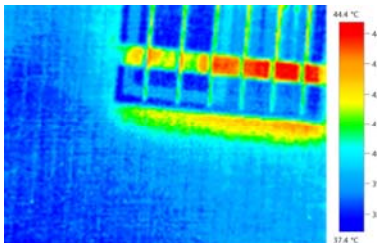
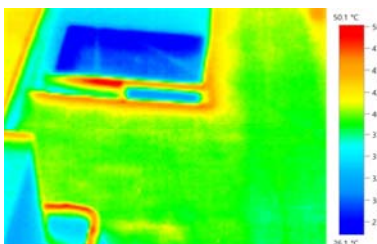
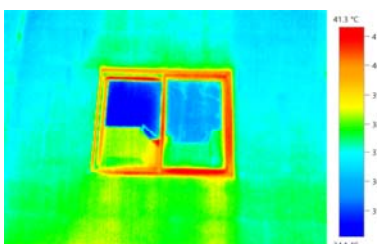
<표 56> 창 주변 열화상 예시

열화상 번호	가시영상	열화상
5-8		
7-9		
8-6		
10-5		
19-7		

○ 열화상 패턴 분석

- 열화상 패턴 분석을 위해 국내·외 문헌 연구와 전문가 자문을 통해 패턴 분석 항목을 선정함. 그리고 획득한 280장의 열화상을 대상으로 결함으로 추정되는 부위의 패턴을 정리함. 다음 <표 57>은 창 주변 열화상 패턴 분석 예시를 나타냄. 전체 280장의 열화상 패턴 분석 결과는 [증빙 C-1-2] 열화상 패턴 분석 보고서에서 확인 가능함

<표 57> 창 주변 열화상 패턴 분석 예시

열화상	패턴 분석 항목				결함 종류
	온도 차이	온도 변화	분포 형상	위치	
	1°C 이내	서서히 변화	길고 둥근 형상	창 우측	열교
	1°C 이내	서서히 변화	모서리를 포함한 형상	창 우측 상단 모서리	열교
	1°C 이상	서서히 변화	가로로 긴 형상	창 하단	열교
	5°C 이상	서서히 변화	창 경계를 따라 분포	창 우측, 창 하단	열교
	3°C 이상	급격히 변화	광범위하게 분포	창 상단, 창 하단	습기

- 열화상 패턴 분석 결과를 검증하고 신뢰성을 확보하기 위해 전문가 검증을 수행함. 1) 열화상 패턴 분석을 위한 항목 정의, 2) 열화상 결함 분류 결과 자문, 3) 상세 열화상 측정 방안 도출을 위한 자문 총 세 번의 전문가 검증을 수행하였으며, 상세 전문가 자문 결과는 다음 <표 58>과 같음

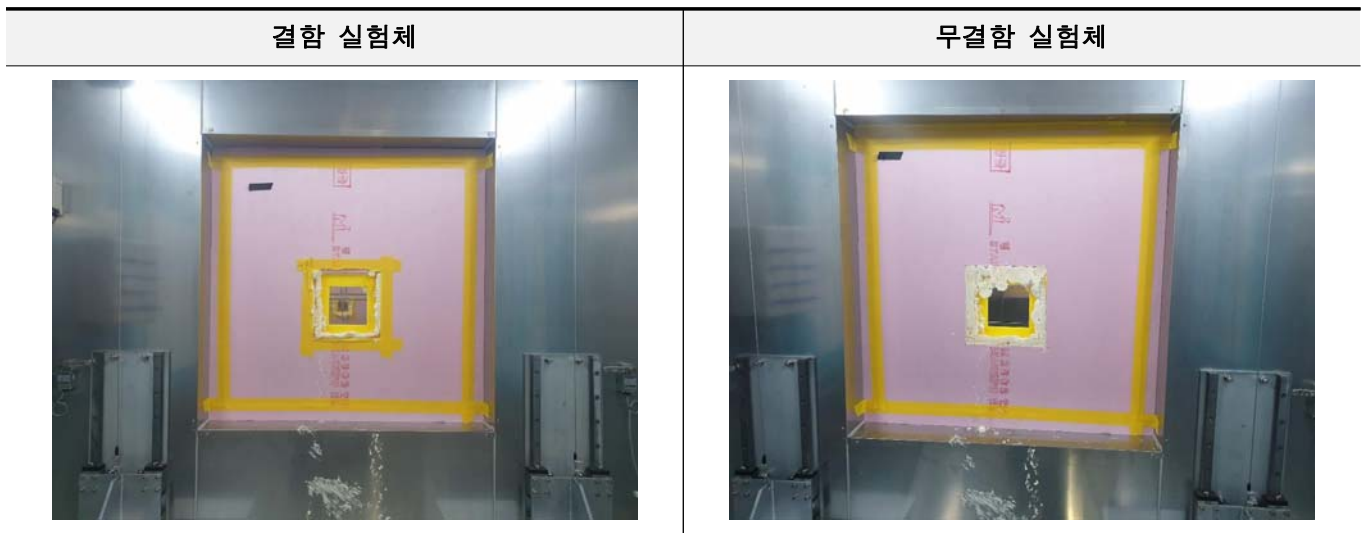
<표 58> 전문가 자문 결과

전문가 인적 사항	자문 결과 요약
• 성명: 송승영 • 소속: 이화여자대학교 • 직책: 교수	• 자문일자: 2019.05.09. • 자문 제목: 열화상 패턴 분석을 위한 항목 정의 - 열화상의 패턴 분석은 단순히 열화상 내 온도 차로 간주하면 오판할 가능성이 큼. - 온도 차뿐만 아니라 온도 변화의 양상, 분포의 형상과 같이 다양한 요소를 확인해야 함. - 특히 창과 창 주변에 대상을 한정할 때는 결함이 발생하는 위치도 중요한 요소가 될 것으로 판단됨.
• 성명: 성욱주 • 소속: 한국건설생활환경시험연구원 • 직책: 선임연구원	• 자문일자: 2019.06.21. • 자문 제목: 열화상 결함 분류 결과 자문 - 열화상의 패턴 분석을 위한 항목이 적정히 구성되었으며, 그에 따른 분류도 신뢰성이 있음. - 창 프레임에서 발생하는 차이는 창의 시공하자라고 판단하기는 어려우므로 창과 벽간에 발생하는 이상 온도분포에 초점을 맞추어 필요 있음. - 창에서 하자가 발생할 경우 열화상 패턴도 중요하나, 정상적으로 시공된 경우의 열화상 패턴도 확인이 필요함.
• 성명: 엄재용 • 소속: 이건축호 • 직책: 책임연구원	• 자문일자: 2019.07.19. • 자문 제목: 상세 열화상 측정 방안 도출 - 열화상은 여름철보다 겨울철에 신뢰성이 높으므로, 여름 상세 측정과 함께 겨울에도 상세 측정 수행이 필요함. - 우선 챔버 실험을 통해 실내·외 온도를 안정화한 후, 온도 분포를 확인해야 함(KS 기준 참고). - 여름철과 겨울철에 발생할 수 있는 다양한 상황에 맞춰 열화상의 패턴을 확인함으로써 열화상 측정 조건 정의가 가능함.

○ 열교 부위 상세 열화상 측정

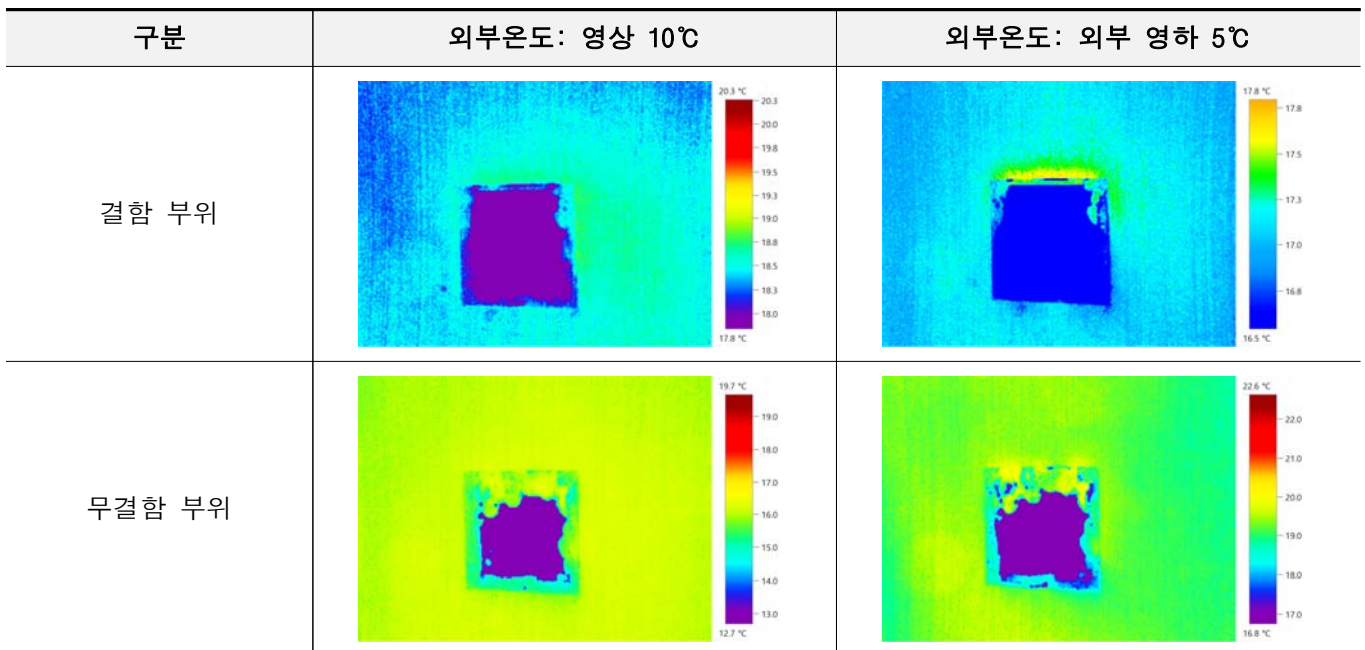
- 열교 부위 상세 열화상 측정을 위해 KS F 2829 : 2005 “적외선 촬영법에 의한 건축물 단열 성능 평가 방법” 에서 제시한 측정 방법을 적용함. KS F 2829 : 2005에서는 실내로 가정되는 공간의 온도는 20℃로 설정하며, 시료가 설치된 양측 공간의 온도차는 10℃ 또는 25℃로 가정할 수 있음. 이에 본 연구에서는 실내로 가정되는 공간의 온도는 20℃로 고정하고, 실외로 가정되는 공간의 온도를 10℃와 영하 5℃로 설정한 후 열화상을 측정함. 또한 <표 59>와 같이 ‘전형적 무결함 부위’ 와 ‘전형적 결함 부위’ 로 시료를 제작하기 위해 창 상단에 시공 하자가 발생한 것을 가정함

<표 59> 열교 부위 상세 열화상 측정을 위한 실험체



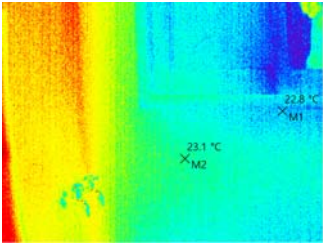
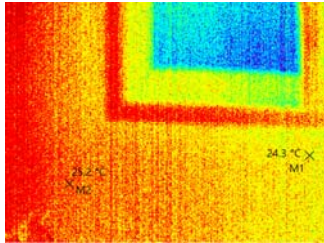
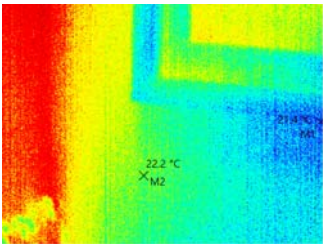
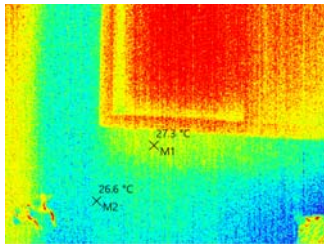
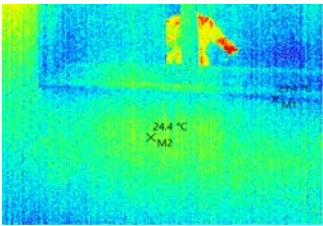
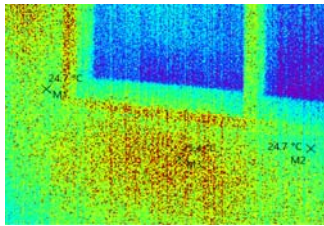
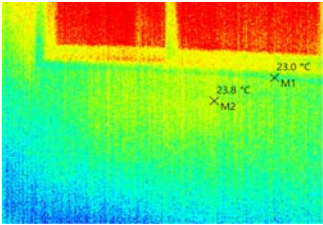
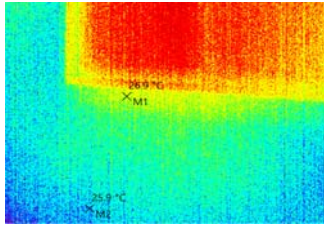
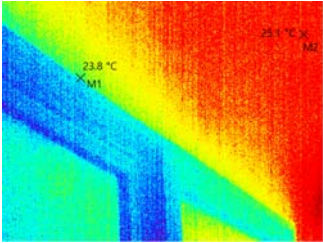
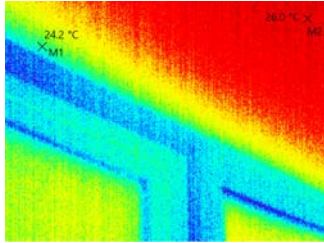
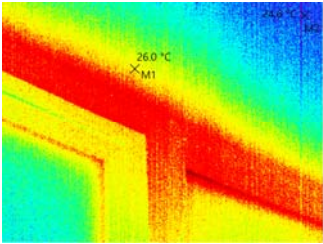
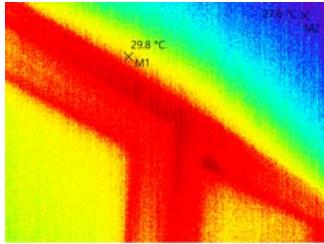
- 다음 <표 60>은 외부온도와 결함에 따른 열화상 측정 결과를 나타냄. 외부 온도가 영하 5℃ 이하인 경우, 결함이 발생한 아크릴 상단에 특정 패턴이 나타나는 것을 확인할 수 있음

<표 60> 상세 열화상 측정 결과



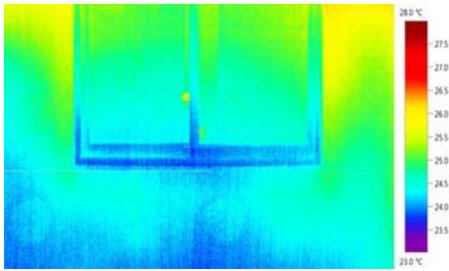
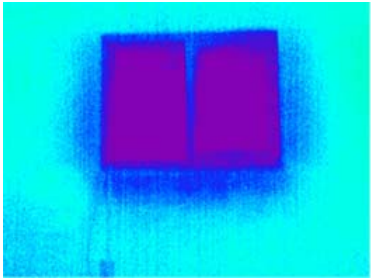
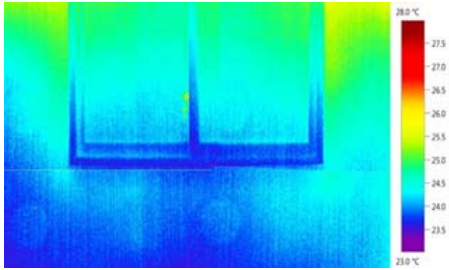
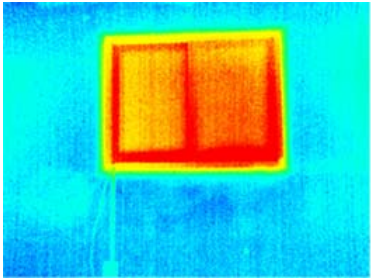
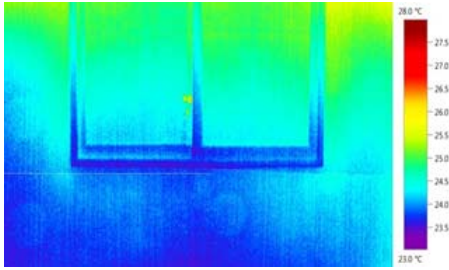
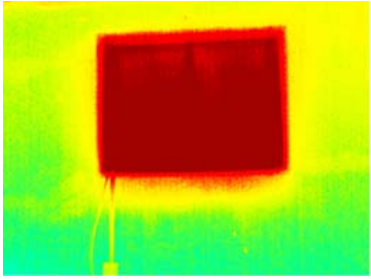
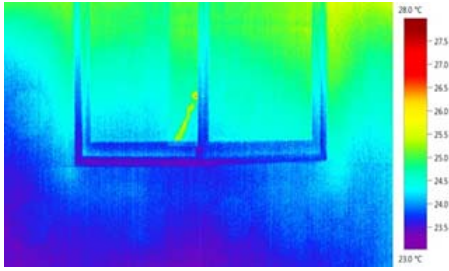
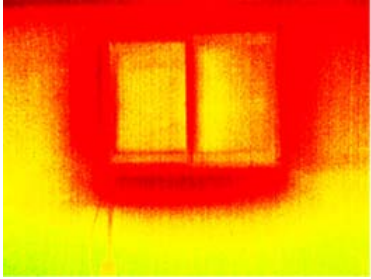
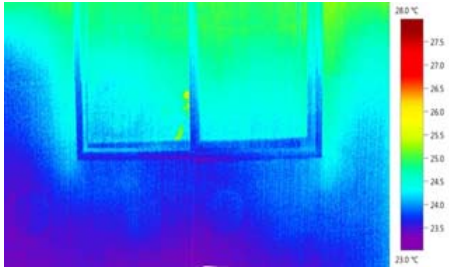
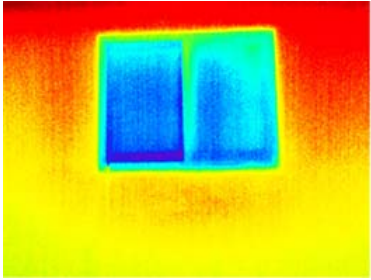
- 본 연구에서 개발하고자 하는 창호시공하자 판정 방법의 여름철 적용 여부를 파악하기 위해 공동주택을 대상으로 1) 냉방 시 오전, 2) 냉방 시 오후, 3) 비냉방 시 오전, 4) 비냉방 시 오후의 네 가지 조건에 대해 상세 열화상을 측정함. <표 61>은 촬영 시간과 냉방 여부에 따른 여름철 열화상 상세 측정 예시를 나타냄. 전체 열화상은 [증빙 C-1-3] 열교 부위 상세 측정 보고서에서 확인 가능함

<표 61> 촬영 시간과 냉방 여부에 따른 여름철 열화상 상세 측정 예시

위치	시간	냉방	비냉방
다용도실	오전		
	오후		
작은방	오전		
	오후		
발코니	오전		
	오후		

- 여름철에 열화상 측정 시 시간과 환경에 따른 패턴이 시뮬레이션에서 구현 가능한지 확인하기 위하여, 본 연구에서는 여름철 1) 우천과 냉방 시, 2) 맑음과 비냉방 시 측정 시간에 따른 열화상 패턴을 확인함. 다음 <표 62>는 여름철 시간에 따른 열화상 패턴 예시를 나타냄. 전체 열화상은 [증빙 C-1-3] 열교 부위 상세 측정 보고서에서 확인 가능함

<표 62> 여름철 시간에 따른 열화상 패턴 예시

시간	열화상	
	우천 / 냉방	맑음 / 비냉방
07:00		
10:30		
14:00		
17:30		
21:00		

C-2) 열교 계수 산정을 위한 열화상 측정 방법론 제안

[연구 수행 결과 요약] ① 기존 열화상 측정 방법 분석 ② 열화상 측정 환경 기준 수립 ③ 열화상 측정 절차 수립	측정 방법 비교 보고서 [증빙 C-2-1] 열화상 측정 기준 보고서 [증빙 C-2-2] 열화상 측정 절차 보고서 [증빙 C-2-3]
--	---

○ 기존 열화상 측정 방법 분석

- 국내·외에 열화상 카메라를 활용하여 창호의 시공 부위에 발생한 하자를 평가하는 표준은 아직 개발되지 않았기 때문에, 다음 <표 63>과 같이 건물의 열화상 측정법 표준인 KS F 2829, ASTM C 1060, ASTM C 1153, ISO 6781에서 열화상 측정 방법을 분석하여 열화상 측정을 위해 고려해야 할 항목을 도출함

<표 63> 국내·외 대표적인 건물의 열화상 측정법 표준

국가	표준	표준명
대한민국	KS F 2829	적외선 촬영법에 의한 건축물 단열 성능 평가 방법
미국	ASTM C 1060	골조구조물의 외피공간 단열설비의 열적 검사방법 표준
	ASTM C 1153	적외선 이미징을 이용한 지붕구조물의 습식 단열재 위치추정에 관한 표준
국제 표준(ISO)	ISO 6781	단열재-건물 외피의 열적 불규칙성을 정적으로 감지 - 적외선 방법

- 다음 <표 64>는 국내·외 열화상 카메라 측정 표준에 제시된 열화상 측정을 위해 고려해야 할 항목을 요구 조건과 측정조건 및 주의사항으로 구분하여 나타낸 결과임
- 국내 열화상 카메라 측정 표준인 ‘KS F 2829 적외선 촬영법에 의한 건축물 단열 성능평가 방법’ 1)은 ‘ISO 6781’ 과 ‘EN 13187’ 을 참고해 만들어진 표준으로, 열화상 카메라 측정 시 고려되는 인자의 수가 가장 많으며 세세하게 기록되었지만 대기 온도 및 주변 환경에 대해서만 상세하게 나타냈으며 열화상 카메라 측정방법에 대해서는 상세하게 설명하지 못함
- 국외 표준 중 ASTM 기준인 ‘ASTM C 1060 골조구조물의 외피 공간 단열설비의 열적 검사방법 표준’ 2)과 ‘ASTM C 1153 적외선 이미징을 이용한 지붕 구조물의 습식 단열재 위치추정에 관한 표준’ 3)에서는 각 표준 검사방법에 맞게 필요한 인자들에 대한 요소를 포함했으나 골조구조물과 지붕 등 한정적인 구조에 대한 표준이기 때문에 인자가 적음
- ‘ISO 6781 단열재-건물 외피의 열적 불규칙성을 정적으로 감지- 적외선 방법’ 4)은 ‘KS F 2829’ 다음으로 많은 인자를 포함하고 있으며 ‘KS F 2829’ 의 참고표준이기 때문에 유사한 인자와 내용이 다수를 차지함. 다만 압력에 대한 인자 및 열화상 카메라 측정 방법에 대한 인자가 적고, ‘EN 13187’ 은 ‘ISO 6781’ 과 유사한 부분이 많기에 제외함

1) KS F 2829 (2005). 적외선 촬영법에 의한 건축물 단열 성능 평가 방법 1-17p

2) ASTM C 1060 (1997). Standard Practice for Thermographic Inspection of Insulation Installations in Envelope Cavities of Frame Buildings 1-6p

3) ASTM C 1153 (1997). Standard Practice for Location of Wet Insulation in Roofing Systems Using Infrared Imaging 1-6p

4) ISO 6781 (1983). Thermal insulation - Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes - Infrared method 1-12p

<표 64> 국내·외 열화상 카메라 측정 표준 인자별 포함 여부

대분류	중분류	소분류		KS F 2829	ASTM C 1060	ASTM C 1153	ISO 6781
요구 조건	사전 조사	건축물		○	○	-	○
		기상상태		○	-	-	○
	측정 조건	기상 상태	일사 조건	○	○	○	○
			실외	○	-	○	○
		위치선정 (주변 복사열의 영향 판단)		○	-	-	-
		표면상태		○	○	○	○
측정 조건 및 주의 사항	대기 온도	실내		○	○	-	○
		실외		○	-	○	○
		온도차		○	○	○	○
		정밀도		○	-	-	○
	태양복사량		○	-	-	-	
	풍속		○	○	○	-	
	압력	누기부위 조사		○	-	-	○
		압력 방향 파악		○	-	-	-
		실내외 압력차		○	-	-	○
		정밀도		○	-	-	○
	표면 온도	정밀도		○	-	-	○
	열화상 카메라	파장 영역		○	○	○	○
		표면 온도 재연능력		○	-	○	○
		정밀도		○	-	-	-
		실측값과 비교		○	-	-	-
		측정 방법	기준 거리 (최대거리)	-	○	○	-
			반사 온도 측정	○	-	-	○
			인식 크기	-	-	○	-
			측정 각도	○	○	○	-
			실내 촬영	-	○	-	-
			실외촬영	-	○	-	-

- 앞서 분석한 기존의 건물 열화상 측정법 표준들은 창호 접합부에서 발생한 하자를 측정하는 목적으로 개발된 표준이 아님. 이에 따라 기존 표준에서 제시된 인자들을 기준으로 창호 시공하자 방법론에 필요한 인자들을 정리함. 다음 <표 65>에서는 실내 창호 측정에서 필요한 인자들만 종합했으며, 일사 조건, 태양복사량, 압력 등 실외 표면에 영향을 주는 인자 및 압력에 관해서는 실외 측정 및 누기 조사에 필요한 인자들이므로 제외함. 전체적으로 실내·외 온도차 10℃, 일몰 후 측정, 측정 부위 표면상태 및 카메라 성능에 대해서 공통적인 인자들이 있음

<표 65> 창호 시공하자 방법론 필요 유무 구분

대분류	중분류	소분류		내용	필요 유무	비고
요구 조건	사전 조사	건축물		건축물 구조, 표면상태, 위치	○	-
		기상상태		기후, 운량, 강수량, 기상정보 등	○	-
	측정 조건	기상 상태	일사 조건	일사 환경	-	실내 측정이므로 제외
			실외	온도 변화가 심한 환경일시 측정금지	○	-
		위치선정 (주변 복사열의 영향 판단)		반사열의 영향이 적은 위치선정	○	-
		표면상태		측정 방해 요소는 없어야 함	○	-
측정 조건 및 주의 사항	대기 온도	실내		측정온도 기준 및 측정 위치	○	-
		실외		측정 시간 및 온도 기준	○	-
		온도차		실내·외 온도차 기준	○	-
		정밀도		대기 온도 측정 정밀도	○	-
	태양복사량		태양복사량 측정 기간	-	측정하는 실내 벽체에 영향이 없음.	
	풍속		풍속 기준	-		
	압력	누기부위 조사		누기 부위 조사가 필요할 경우 실시	-	주목적이 누기 부위 조사일 경우이므로 제외
		압력 방향 파악		정압 또는 부압	-	
		실내외 압력차		압력차 기준	-	
		정밀도		압력 측정 정밀도	-	
	표면 온도	정밀도		표면 온도 측정 정밀도	○	-
	열화상 카메라	파장 영역		열화상 카메라 성능	○	-
		표면 온도 재연능력		열화상 카메라 성능	○	-
		정밀도		열화상 카메라 측정값 정밀도	○	-
		실측값과 비교		표면 온도 실측값과 비교 오차	○	-
		측정 방법	기준 거리 (최대거리)	열화상 카메라 측정 거리	○	-
			반사 온도 측정	적절하게 조정하여 사용	○	-
			인식 크기	인식 크기 기준	○	-
			측정 각도	여러 각도에서 측정 및 측정 각도 제시	○	-
			실내촬영	화면구성에 대한 설명	○	-
			실외촬영	화면구성에 대한 설명	-	실내 측정이므로 제외

- 사전 조사와 측정 요구조건에 대해서 표준별로 비교하기 위해 <표 66>에 정리함. 사전 조사에서는 건축물에 대한 정보와 기상상태에 대해 언급됨. 건축물은 공통으로 건축물의 구조와 단열재 성능, 표면 정보 및 열원의 위치 및 종류에 대해 언급됨. 측정조건에서는 공통으로 실외 기상상태 및 표면상태에 대해 언급됨

<표 66> 국내·외 열화상 카메라 측정법 비교: 측정 요구조건

분류		KS F 2829	ASTM C 1060	ASTM C 1153	ISO 6781_1983
사전 조사	건축물	① 냉·난방시스템 종류와 위치 ② 건축물의 구조 ③ 단열재의 위치와 성능 ④ 외부표면 마감재와 피복재 ⑤ 표면 마감 재료 방사율 (측정 또는 문헌값 참조) ⑥ 외부표면 흡습 상태 ⑦ 방위 ⑧ 스케치 혹은 사진	① 육안조사, 사전 조사를 통해 열패턴 조사 ② 건축물의 구조 ③ 건물주, 거주자의 불만 조사 ④ 표면 마감 재료, 방사율 ⑤ 방위 ⑥ 조명기구나 열원 위치 ⑦ 스케치 혹은 사진 ⑧ 주변 모든 특징 기록	-	① 열전 장비의 사양과 기능 ② 구조 및 단열재 층의 위치 ③ 마감재의 복사특성 ④ 건물 외피와 관련된 도면 및 시공 문서 ⑤ 방위
	기상상태	① 지역 기후특성 ② 운량 ③ 강우량 ④ 풍속 ⑤ 기상정보 또는 기상청 기상정보 ⑥ 일사에 노출되어있는 상태	-	-	① 기후 ② 환경 영향 ③ 지역 기후 특성 ④ 외부 공기 온도 ⑤ 운량 ⑥ 강우량 ⑦ 건물 외부표면 습기 ⑧ 풍속
측정 조건	실외 기상상태	온도가 변하기 쉬운 환경일 때 촬영 금지	-	측정 24시간 전에 비가 오면 안됨	온도가 변하기 쉬운 환경일 때 촬영 금지
	위치선정 ※ 주변 복사열의 영향 여부 판단	반사열의 영향이 가장 적은 곳 촬영 위치를 바꾸어 가며 비교 측정	-	-	-
	표면상태	측정을 방해하는 요소는 없어야 함	건조상태 측정을 방해하는 요소가 있을 시 기록	건조상태 물, 눈 파편, 골재 등이 없어야 함	측정을 방해하는 요소는 없어야 함

- 대기 온도와 표면 온도에 대한 온도 측정조건 및 주의사항에 대해 표준별로 종합함 (<표 67>). 공통적으로 실내·외 온도차는 10℃ 이상을 기준으로 함. ASTM C 1153은 지붕에 관한 측정 표준이므로 측정하는 곳의 단열구조 및 성능이 다르기에 온도차 기준이 다르다고 판단되므로 비교 제외함. 온도 측정 위치 및 대기 온도 오차, 측정 유지 시간 등 각 항목에 대해 구체적으로 주의사항을 제시함

<표 67> 국내외 열화상 카메라 측정법 비교: 온도 측정조건 및 주의사항

분류		KS F 2829	ASTM C 1060	ASTM C 1153	ISO 6781_1983
대기 온도	실내	측정표면 2m 이내 실내 중간높이에서 온도 측정	25℃ ± 5℃	-	측정 중 ± 2℃ 이상 변화금지
	실외	최고온도, 최저온도 포함 측정 개시 72시간 전부터 측정 종료까 지 측정된 값 ※ 30분 간격 이내	-	실내온도보다 10℃ 이상 낮아야 함 ※ 흐린 날 기준	-
	온도차	3일간 일 평균 온도 차 10℃ 이상	시험 전 4시간 동안 내부온도에서 외부표 면 온도 또는 외부온 도의 차가 10℃ 이 상	벨러스트 지붕 온도 차 18℃ 이상 외단열 온도차 23℃ 이상	24시간 전부터 온도 차 10℃ 이상 검사 시작 시 이전온 도와 30% 이상 차 이하면 안 됨
	정밀도	± 1℃	-	-	± 1℃
표면 온도	정밀도	± 0.5℃	-	-	± 0.5℃

- 열화상 카메라 측정 시 주의사항은 다음 <표 68>에 종합함. 열화상 카메라 측정 시 카메라 성능은 공통적이지만 카메라의 정밀도 및 실측값과 비교에 대한 표준은 KS F 2829에만 기재되어 있어 참고함. 전체적으로 측정방법에 대해 완벽히 기술된 표준은 없었으며, ASTM C 1060과 ASTM C 1153에서는 측정방법에 대한 최소한의 가이드가 있지만, 창호를 측정하기엔 적합하지 않아 창호 시공 부위 측정에 맞는 열화상 카메라 측정 요소가 필요하다고 판단됨
- 열화상 카메라 측정방법은 ASTM C 1060과 ASTM C 1153 표준은 각 구조물에 한정해 기준 거리 및 촬영 방법, 각도에 대해 상세하게 기재함. KS 표준과 ISO 표준은 건물 외피에 대한 전반적인 것을 다루는 표준이기 때문에 측정방법에 대한 설명이 부족하고 주의사항만 기재됨. 기준 거리 및 인식 크기는 열화상 카메라마다 성능이 다르므로, 카메라 성능 표에 나온 최소 거리를 참고하면 된다고 판단됨

<표 68> 국내·외 열화상 카메라 측정법 비교_3. 열화상 카메라 측정 주의사항

분류		KS F 2829	ASTM C 1060	ASTM C 1153	ISO 6781_1983
파장 영역		2 ~ 12 μ m	2 ~ 14 μ m	2 ~ 12 μ m	2 μ m ~
표면 온도 재연능력		0.3℃ 이내 해상도로 재연 가능 [기준 : 표면온도(20℃), 공간주파수(0.052 cycle/mm)]	-	0.3℃ 이내 해상도로 재연 가능 [기준 : 표면온도(20℃), 공간주파수(0.052 cycle/mm)]	0.3℃ 이내 해상도로 재연 가능 [기준 : 표면온도(20℃), 공간주파수(0.052 cycle/mm)]
정밀도		± 10% , ± 0.5℃ 둘 중 큰 값을 조건으로 측정	-	-	-
실측값과 비교		0.3℃ 이내	-	-	-
측정 방법	기준 거리 (최대 거리)	-	프레임 구분이 가능할 범위 내에서 가능한 가깝게 촬영 실내=3m 실외=5m	보행 조사 = 5m 높은 곳에서 측정 =5m	-
	실내촬영	-	화면에 최소 2개의 프레임 간격과 1개의 프레임 높이가 나와야 함	-	-
	반사 온도 측정	적절하게 조정하여 사용	-	-	여러 각도에서 측정
	인식 크기	-	-	최소 0.15m	-
	측정 각도	촬영 위치를 바꾸며 비교 측정	여러 각도에서 측정 반대 각도로 측정	0.35 rad 이상 (0.35rad = 20°)	-

- 국내·외 건물 열화상 표준을 비교한 결과, 열화상 카메라를 활용하여 창호의 시공 부위에 발생한 하자를 평가하기 위한 인자들은 다음 <표 69>와 같음. 국내·외 표준들을 종합한 결과 창호 시공 부위 측정을 하기 위한 주변 환경 및 대기 온도에 대한 인자는 상세하게 나타나 있지만, 열화상 카메라 측정방법에 대한 설명은 창호 접합부 하자 측정 기준으로 참고하기에는 열화상 카메라 측정방법에 대한 설명이 부족함. 이에 따라 창호 접합부 하자를 측정하기 위한 기준 수립이 추가로 필요함

<표 69> 창호 시공 하자를 위한 열화상 측정 인자

분류	세부 인자		내용	비고
사전 조사	건축물		① 냉·난방시스템 종류와 위치 ② 건축물의 구조 ③ 단열재의 위치와 성능 ④ 표면 마감재와 피복재 ⑤ 표면 마감 재료 방사율 (측정 또는 문헌값 참조) ⑥ 표면 흡습 상태 ⑦ 방위 ⑧ 스케치 혹은 사진	기존 문헌 차용
	기상상태		① 지역 기후특성 ② 강우량 ③ 기상정보 ④ 외부 공기 온도	기존 문헌 차용
측정 조건	기상 상태	실외	온도 변화가 심한 환경일시 측정금지	기존 문헌 차용
	위치선정 (주변 복사열의 영향 판단)		반사열의 영향이 적은 위치선정	기존 문헌 차용
	표면상태		건조상태 측정 방해 요소는 없어야 함	기존 문헌 차용
대기 온도	실내		25℃ ± 5℃ 측정 중 ± 2℃ 이상 변화금지	기준 제안 필요
	실외		최고온도, 최저온도 포함 실내온도보다 10℃ 이상 낮아야 함	
	온도차		4시간 ~ 3일간 온도차 10℃ 이상	
	정밀도		± 1%	기존 문헌 차용
표면 온도	정밀도		± 0.5℃	기존 문헌 차용
열화상 카메라	파장 영역		2 ~ 12μm	기존 문헌 차용
	표면 온도 재연능력		0.3℃ 이내 해상도로 재연 가능 [기준 : 표면 온도 (20℃), 공간주파수(0.052 cycle/mm)]	기존 문헌 차용
	정밀도		± 10% , ± 0.5℃ 둘 중 큰 값을 조건으로 측정	기존 문헌 차용
	실측값과 비교		0.3℃ 이내	기존 문헌 차용
	측정 방법	기준 거리(최대거리)	3m	기준 제안 필요
		반사 온도 측정	-	
		인식 크기	0.15m	
		측정 각도	-	
		실내촬영	-	

○ 열화상 측정 환경 기준 수립

- 본 연구에서는 창호 시공 부위의 하자를 열화상으로 측정할 수 있는 실내·외 온도차와 온도 안정화 시간에 대한 기준을 수립함
- 열화상 측정 환경 기준 수립을 위해 실물 창호를 대상으로 향온·향습 챔버를 활용하였으며, 기준 수립에 활용된 향온·향습기의 성능 및 크기는 아래 <표 70>과 같음

<표 70> 실험실 개요

항목		크기 및 성능	사진
향온실		2,400×2,100×2,100 (mm)	
저온실		1,800×2,100×2,100 (mm)	
온도 범위	저온실	- 10℃ ~ 60℃	
	향온실	10℃ ~ 30℃	
온도 정확도		± 0.5℃ at 20℃	
습도 범위		25% ~ 98% RH (at 30℃)	
습도정확도		± 2% at 70%	
개구부 (W×D×H)		1,000×1,000×300 (mm)	

- 측정 장비는 아래 <표 71>과 같이 열화상 카메라, 접촉식 표면 온도 측정기, 풍속 측정기 3가지를 사용함. 접촉식 표면 온도 측정기는 열화상 카메라와 표면 온도를 보정해서 방사율을 산출할 때 사용하며, 풍속 측정기는 실내 공조기를 통해 직접 창호에 영향이 가는지 확인하기 위해 사용함

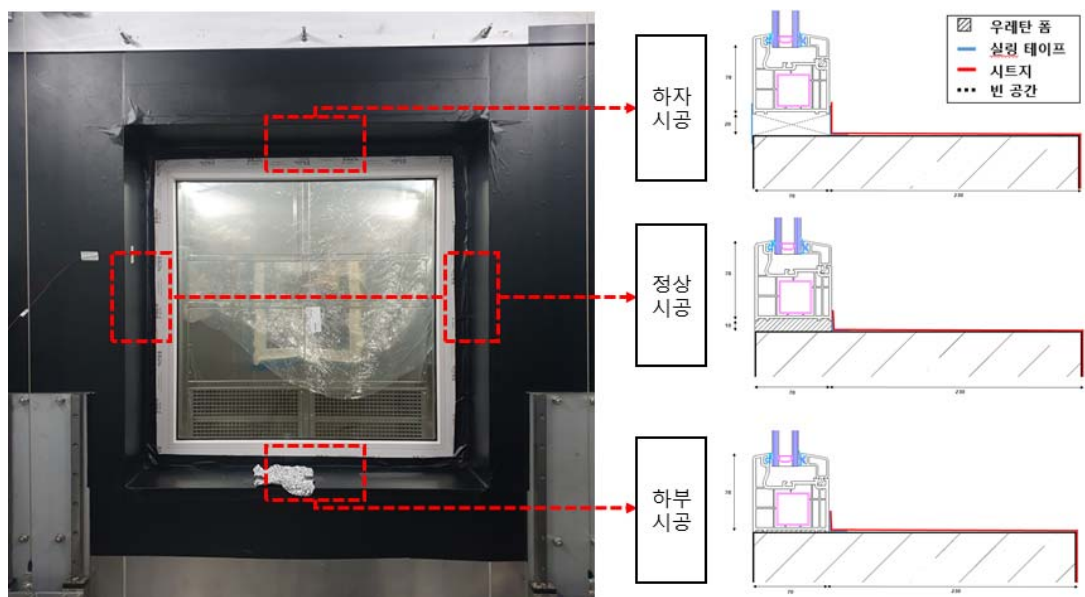
<표 71> 측정 장비 개요

장비명	개요	성능	사진
열화상 카메라	모델명	TESTO 882	
	해상도	320×240	
	FOV	32℃×23℃	
	IFOV	1.7 mrad	
	Super Resolution	640×480	
표면 온도 측정기	모델명	FLUKE 51 II	
	측정범위	K-Type : -200℃ to 1372℃	
	정확도	K-Type : ±0.05%, +0.3℃	
풍속 측정기	모델명	TESTO 410-2	
	측정범위	0.4 ~ 20m/s	
	정확도	±0.2 m/s + 측정값의 2%	

- 열화상 측정 환경 기준을 수립하기 위해 실물 창을 창에 정상 시공과 하자 시공으로 나눠 시공함. 또한 <표 72>, [그림 45]와 같이 정상과 하자 부위에 따라 다른 방법으로 시공함으로써 하자를 구현함

<표 72> 실험체 시공 방법

실험체 구성	시공 방법
하자 시공	접합부에 우레탄 폼을 사춤하지 않고, 실링 테이프로 실링 후 하자 시공 재현
정상 시공	접합부에 우레탄 폼 사춤 후 실링 테이프로 실링 처리
하부 시공	실험실 특성상 고정철물 없이 설치. 창호만 거치한 후 틈새에 우레탄 폼을 사춤한 뒤 실링 테이프로 실링 처리



[그림 45] 980x980mm 진공 창호 시공 후 사진

- 창호 크기별 차이를 확인하기 위해 <표 73>과 같이 각기 다른 크기(980×980mm, 500×500mm)의 창호에 대해 시험함

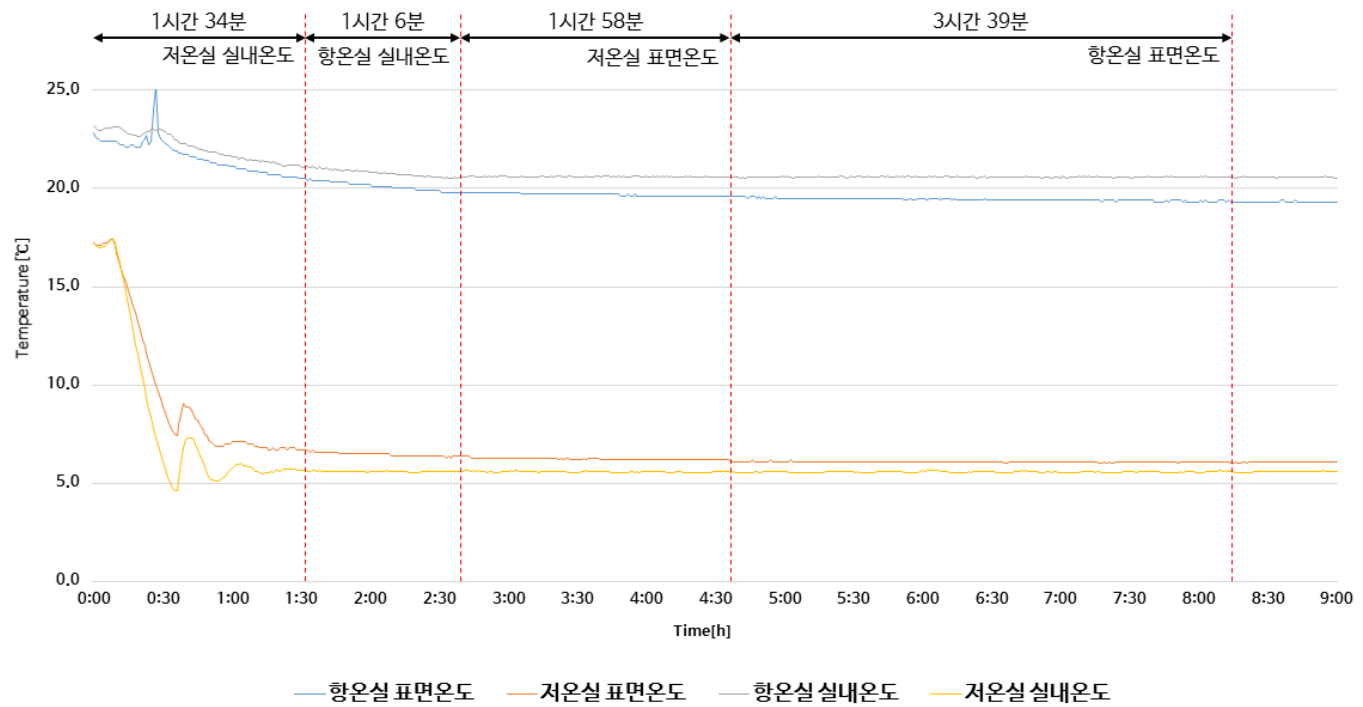
<표 73> 창호 크기별 시공 사진

980x980mm 진공 창호	500x500mm 진공 창호

- 창호의 최소 실내·외 온도차 기준을 분석하기 위해 <표 69>에서 공통으로 언급한 최소 실내·외 온도차 10℃를 중심으로 실내온도 20℃에 실외온도 5℃, 10℃, 15℃로 측정함. 접합부에서 발생하는 열교를 한눈에 관측할 수 있도록 실외 측에 창호를 시공함. 실험체 표면에 부착한 표면 온도 센서를 통해 표면 온도가 안정화된 것을 확인한 후 측정해 실내·외 온도차 기준과 벽체 온도 안정화되기까지 측정 시간 기준에 대해 실험함
- 다음 <표 74>와 [그림 46]은 온도별 안정화 소요 시간을 나타내며, 창호의 크기 및 온도차가 안정화 시간에 영향을 받지 않는다는 것을 확인함. 또한, 최대 안정화 시간은 8시간 17분으로 나타남

<표 74> 창호 온도차에 따른 총 온도 안정화 시간

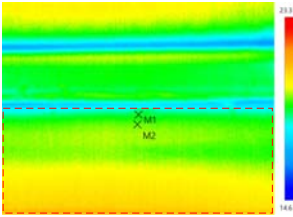
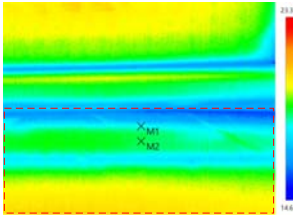
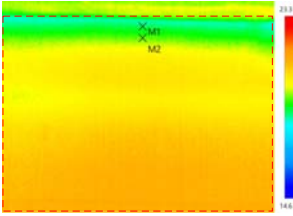
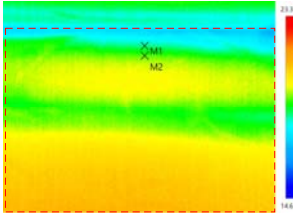
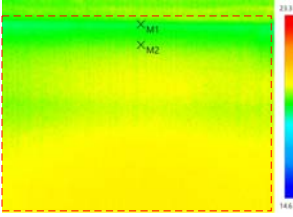
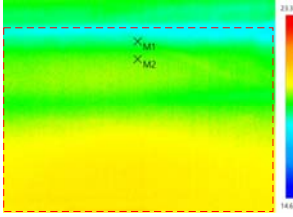
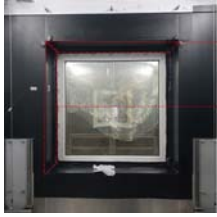
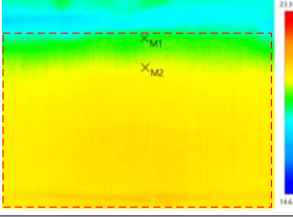
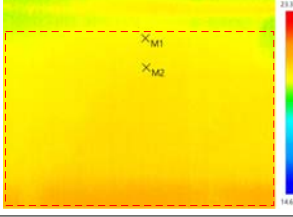
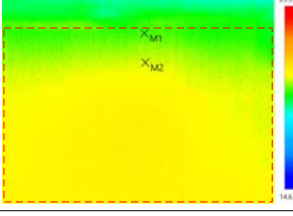
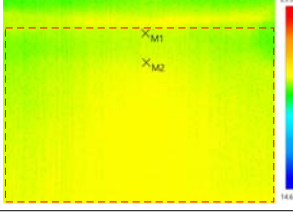
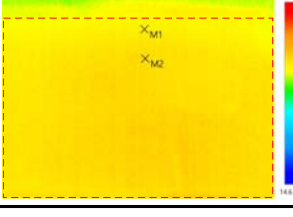
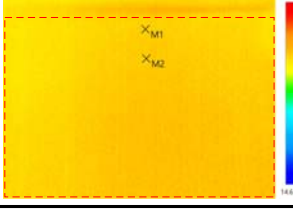
창호 크기	온도차	향온실 표면 온도	향온실 실내 온도	저온실 표면 온도	저온실 실내 온도	총 안정화 시간
980 × 980	15℃	8시간 17분	2시간 40분	4시간 38분	1시간 34분	8시간 17분
	10℃	11분	11분	2시간 1분	2시간 1분	2시간 1분
	5℃	4시간 20분	4시간 59분	2시간 37분	2시간 17분	4시간 59분
500 × 500	15℃	7시간 27분	7시간 27분	3시간 52분	1시간 42분	7시간 27분
	10℃	7시간 52분	7시간 52분	42분	1시간 02분	7시간 52분
	5℃	4시간 31분	5시간 13분	46분	46분	5시간 13분



[그림 46] 980×980 창호 실내온도 20℃ 실외온도 5℃, 온도차 15℃

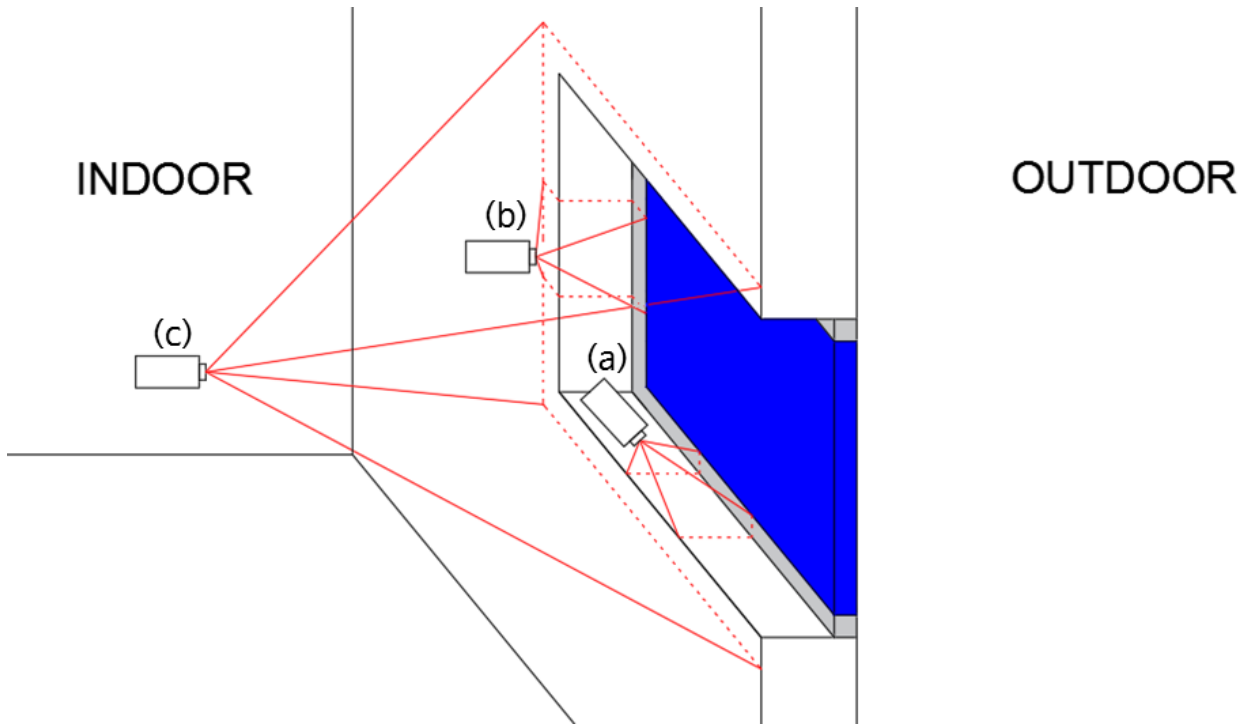
- 온도별 열화상과 시뮬레이션으로 창호 하자를 분석함. 다음 <표 75>는 실내외 온도차에 따른 열화상 비교 사진을 나타냄. 980x980mm와 500x500mm 진공 창호에서는 온도차 5℃에서는 정상과 하자 시공을 분간하기 힘들고 10℃부터 접합부 주변 열고 분포에 확연한 차이가 보임
- 열화상 카메라로 창호 접합부 하자를 판단할 수 있는 기준으로 온도차 10℃를 제시함. 창호의 크기나 온도차와 관계없이 안정화 시간이 다르게 나타남. 가장 안정화 시간이 오래 걸린 8시간 17분을 참고해 열화상 측정 전 최소 안정화 시간으로 9시간을 제시함

<표 75> 실내·외 온도차에 따른 열화상 측정 결과

창호 크기	온도차	열화상		위치
		정상 시공	하자 시공	
980 X 980	15℃			
	10℃			
	5℃			
500 X 500	15℃			
	10℃			
	5℃			

○ 열화상 측정 절차 수립

- 창호 시공 부위의 하자를 열화상으로 측정할 수 있는 절차를 수립하기 위한 적정 측정 위치에 대한 기준을 수립함. 이를 위해, 열화상 측정 환경 기준 수립과 동일한 챔버와 창을 활용함. 또한, 창 설치 위치에 따라 세 가지 유형에 대해 실험함
- [그림 47]은 창호와 벽의 접합부를 대상으로 열화상을 촬영할 경우의 대표적인 촬영 위치를 나타냄



[그림 47] 열화상 카메라 측정 방법 (a) 접합부 측정, (b) 벽체 측정, (c) 전체 측정

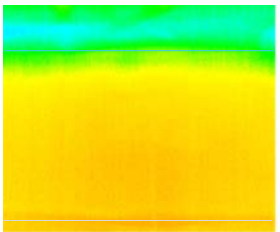
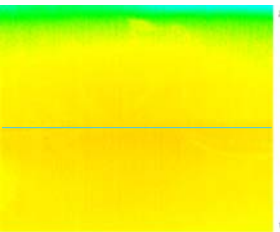
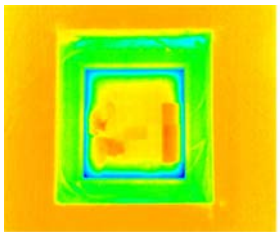
- <표 76>은 실험에 적용된 창호 시공 위치를 나타냄. 실외 근접은 건물 외벽 표면에 맞추어 시공된 창을, 중심은 외벽의 중간에, 실내 근접은 실내 표면에 맞추어 시공된 창을 의미함

<표 76> 접합부 위치별 창호 시공 사진

실외 근접	중심	실내 근접

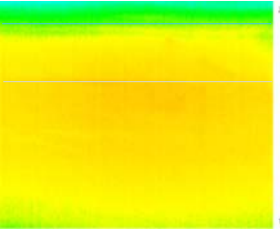
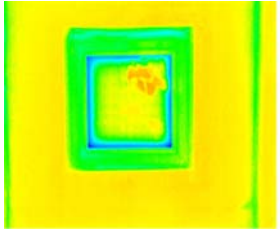
- 다음 <표 77>은 실내·외 온도차가 15℃를 유지된 상태에서 실외에 근접하여 시공한 창 열화상을 나타냄. 정상적으로 시공된 창에 촬영 위치를 변경하여도 열교가 발견되지 않음. 하자가 존재하도록 시공된 창 경우에는 (a) 접합부를 측정할 경우 패턴을 파악하기 쉬울 뿐만 아니라, 정상 시공과의 패턴 비교가 용이함. 그러나 (b) 벽체를 측정할 경우와 (c) 전체를 측정할 경우에는 열교로 인한 패턴의 확인이 육안으로 어려움

<표 77> 실외 근접한 위치에 시공한 창 열화상과 시뮬레이션

시공 위치	이미지	(a) 접합부 측정	(b) 벽체 측정	(c) 전체 측정
실외 근접	정상 시공			—
	하자 시공			

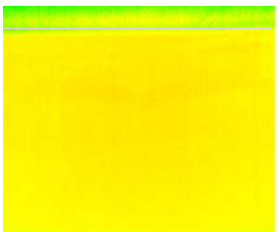
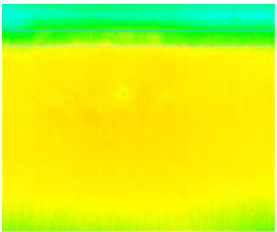
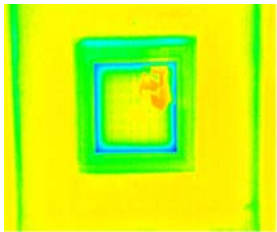
- 다음 <표 78>은 실내·외 온도차가 15℃를 유지된 상태에서 벽의 중심에 시공한 창 열화상을 나타냄. 벽의 중심에 시공한 창에 접합부의 측정은 열교 패턴이 나타날 정도로 충분한 거리가 확보되지 않아 측정이 어려움. 또한, 하자가 존재하도록 시공된 창에 (b) 벽체를 측정할 경우와 (c) 전체를 측정할 경우에는 열교로 인한 패턴 확인이 어려움

<표 78> 중심에 시공한 창 열화상과 시뮬레이션

시공 위치	이미지	(a) 접합부 측정	(b) 벽체 측정	(c) 전체 측정
중심	정상 시공	측정 불가		—
	하자 시공	측정 불가		

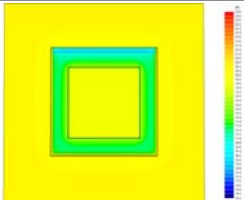
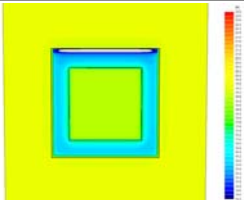
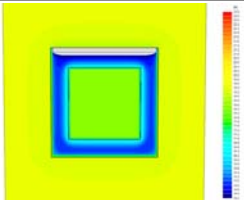
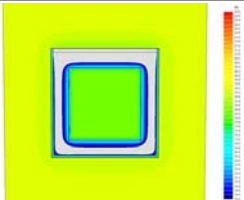
- 다음 <표 79>는 실내·외 온도차가 15℃를 유지된 상태에서 실내에 근접하여 시공한 창 열화상을 나타냄. 실내에 근접한 위치에 시공한 창 경우에 접합부의 측정은 열교 패턴이 나타날 정도로 충분한 거리가 확보되지 않아 측정이 어려움. 또한, 하자가 존재하도록 시공된 창 경우에 (b) 벽체를 측정할 경우와 (c) 전체를 측정할 경우에는 열교로 인한 패턴 확인이 어려움

<표 79> 실내 근접한 위치에 시공한 창 열화상과 시뮬레이션

시공 위치	이미지	(a) 접합부 측정	(b) 벽체 측정	(c) 전체 측정
중심	정상 시공	측정 불가		—
	하자 시공	측정 불가		

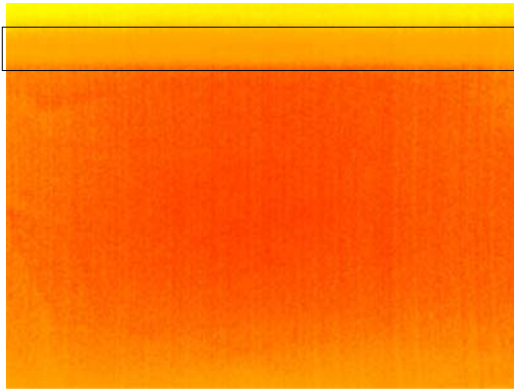
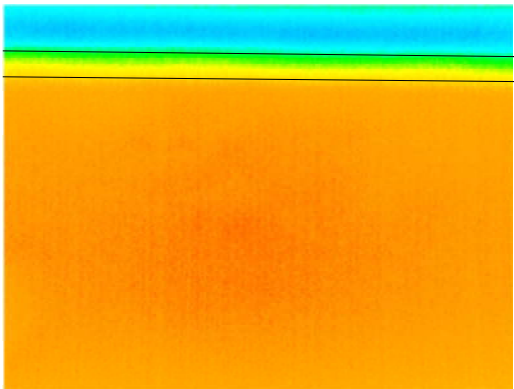
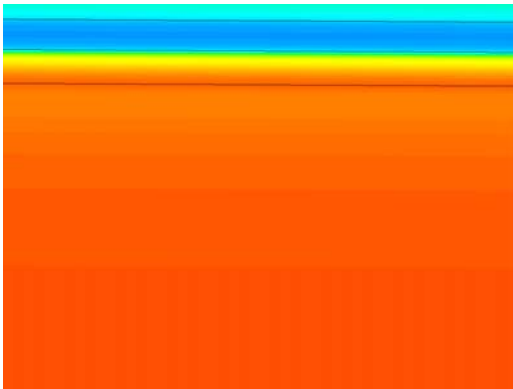
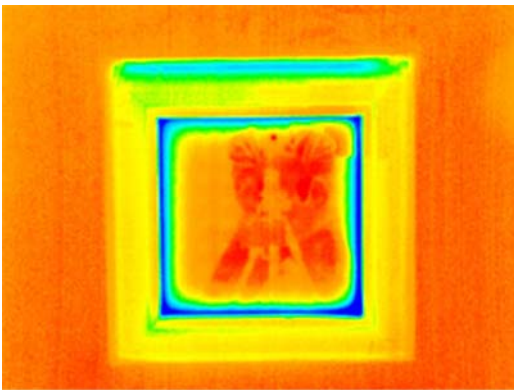
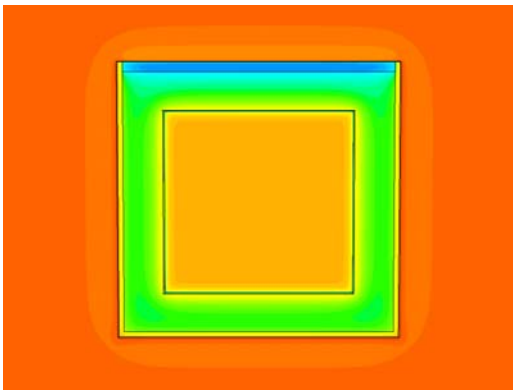
- 실외 근접한 위치에 시공한 창은 접합부를 열화상으로 측정하여 정상 시공된 경우와의 패턴 비교와 가능함. 그러나 중심에 시공한 창과 실내에 근접한 위치에 시공한 창 경우에 접합부, 벽체, 전체 측정 모두 정상 시공과 비교할 수 있는 패턴이 나타나지 않음
- 벽의 중심에 시공한 창과 실내에 근접한 위치에 시공한 창 열교 패턴을 확인할 수 있는 조건을 찾기 위해, 우선 시뮬레이션으로 온도차를 최대 30℃까지 높여가며 결과를 확인함. 15℃부터 30℃까지 벽의 중심에 시공한 창을 대상으로 한 시뮬레이션 결과는 다음 <표 80>과 같음. 결과에서 확인할 수 있듯이 온도차 25℃에서부터 열교 패턴이 관측되었으며, 실내·외 온도차 25℃에서 실내 근접위치에 하자가 발생하는 것으로 확인됨. 이에 따라 실내·외 온도차 25℃ 조건으로 챔버에서 실물을 대상으로 추가 측정을 수행함

<표 80> 기존 실험체 온도차별 소요 열량 비교

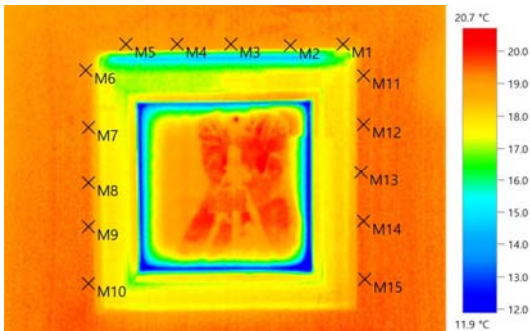
항목	15℃	20℃	25℃	30℃
시뮬레이션				
소요 열량	7.932W	10.438W	13.050W	15.660W
결로 발생 습도 기준	70%	63%	55%	49%

- 실내온도 20℃, 실외온도 -5℃의 조건으로 실내 근접위치 온도차 25℃ 추가 실험 결과는 다음 <표 81>과 같음. 진공 창호 실내 근접위치에서 (b) 벽체 측정과 (c) 전체 측정을 사용해 온도차 25℃ 측정 결과 접합부 주변 열교 패턴은 약 1 cm 관측됨. (b) 벽체 열화상 측정 시 벽체에는 열교 패턴이 발생하지 않았지만, <표 82>, <표 83>과 같이 벽체의 온도 분포가 약 0.4 ~ 0.6℃로 차이가 발생해 전체적인 온도 분포가 다르다는 것을 확인할 수 있었음. (c) 전체 측정 시 창호 주변의 열교 하자를 구분하기 힘들며, 실내 근접위치에서 열화상 카메라로 촬영하기 위해서는 온도차 25℃ 이상 조건에서 (b) 벽체 측정이 적합하다고 판단됨

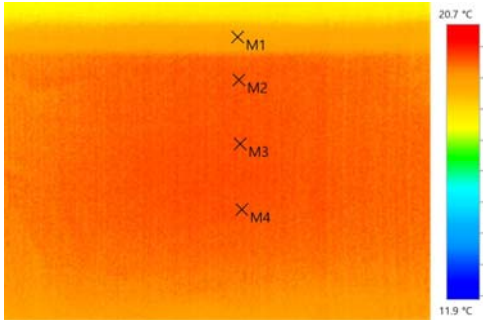
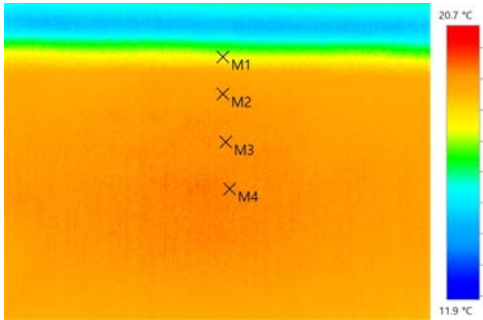
<표 81> 온도차 25℃ 열화상 시뮬레이션 결과 비교 (온도 범위 11.9℃~20.7℃)

측정 위치	열화상	시뮬레이션
정상 시공		
하자 시공		
전체		

<표 82> 온도차 25℃ 창호 주변 온도 분포

하자 시공		정상 시공(좌측)		정상 시공(우측)		열화상
번호	온도 (℃)	번호	온도 (℃)	번호	온도 (℃)	
M1	19.1	M6	19.1	M11	19.4	
M2	19.0	M7	19.2	M12	19.4	
M3	19.1	M8	19.4	M13	19.5	
M4	19.0	M9	19.4	M14	19.4	
M5	18.9	M10	19.4	M15	19.5	

<표 83> 온도차 25℃ 벽체 온도 분포

시공	번호	온도 (℃)	열화상
정상 시공	M1	18.9	
	M2	19.5	
	M3	19.6	
	M4	19.6	
하자 시공	M1	17.3	
	M2	19.0	
	M3	19.1	
	M4	19.3	

C-3) 주요 열화상 및 해석 결과 DB화

[연구 수행 결과 요약] ① 데이터베이스 구축 전략 수립 ② 열화상 DB 구축	DB 구축 전략 보고서 [증빙 C-3-1] 열화상 데이터베이스 [증빙 C-3-2]
--	--

○ 데이터베이스 구축 전략 수립

- 본 연구에서 수집한 열화상을 대상으로 데이터베이스를 구축하기 위해 대상 분류 체계를 수립함. 다음 <표 84>는 열화상을 측정하는 대상에 대한 분류체계를 나타내며, 단독주택, 공동주택, 제1종 근린생활시설, 운수시설, 업무시설로 구분함. 공공건축물 그린리모델링 사업이 해당 대상들을 위주로 수행되었기 때문에, 창호 시공부위 열교 관련 데이터베이스도 해당 용도의 건물을 대상으로 우선적으로 구축함

<표 84> 대상 건물 분류체계

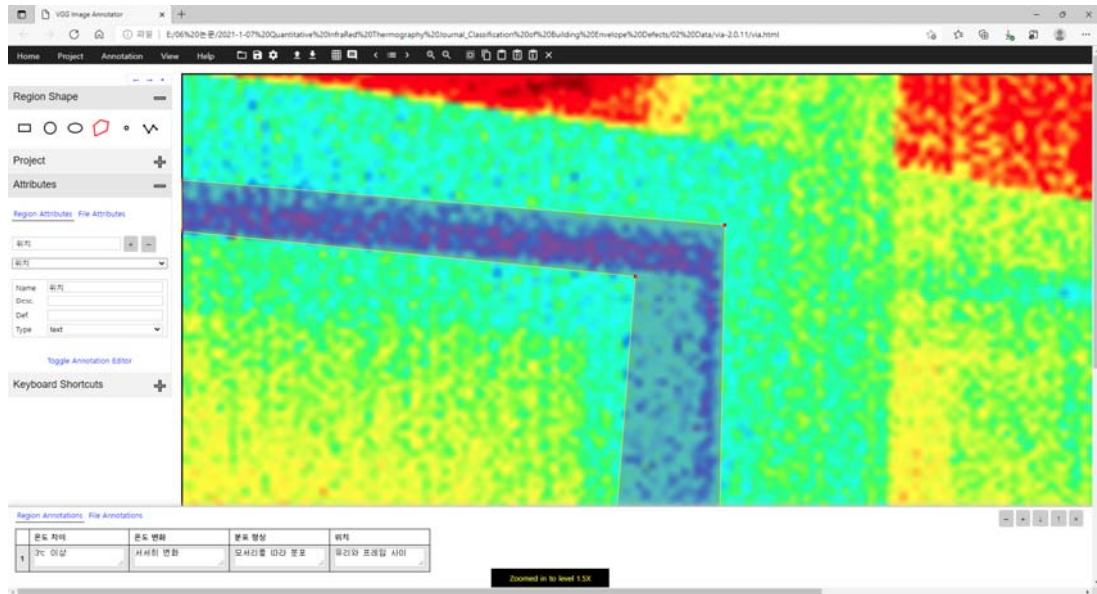
구분	설명	분류기준
단독주택	단독주택으로 사용하는 신축 또는 기축 건물	건축법에 따른 단독주택
공동주택	공동주택으로 사용하는 신축 또는 기축 건물	건축법에 따른 공동주택
제1종 근린생활시설	제1종 근린생활시설로 포함되는 신축 또는 기축 건물	건축법에 따른 제1종 근린생활시설
운수시설	운수업무로 사용하는 신축 또는 기축 건물	건축법에 따른 운수시설
업무시설	업무용도로 사용하는 신축 또는 기축 건물	건축법에 따른 업무시설

- 본 연구를 통해 구축할 데이터베이스는 다음 <표 85>와 같은 항목들에 대한 정보를 포함하고 있음. 열화상 데이터베이스는 이미지에 대한 일반 사항, 창호시공하자로 판단되는 영역에 대한 형상정보, 하자 영역의 온도, 형상, 위치 등을 포함하고 있음

<표 85> 창호 시공부위 열교 데이터셋 구성

구분	필드	속성
image	filename	파일명
	size	이미지 파일 크기
shape attributes	name	영역 형상 표현 방법
	all_points_x	영역의 x 좌표
	all_points_y	영역의 y 좌표
region attributes	온도 차이	열교와 비열교 영역 간 온도 차
	온도 변화	열교 부위 온도 변화
	분포 형상	열교 부위 분포 형상
	위치	열교 발생 위치

- 데이터의 가공을 위해 공개된 annotation tool인 VGG Image annotator를 사용함. 해당 툴을 사용하면 데이터베이스 구축을 위한 영역지정과 함께 속성 정보 입력이 가능함. 다음 [그림 47]은 작업자가 VGG Image Annotator를 사용하여 창과 벽의 접합부에 열교가 발생한 영역을 지정하고, 그에 대한 속성 정보를 입력한 예시를 보여줌



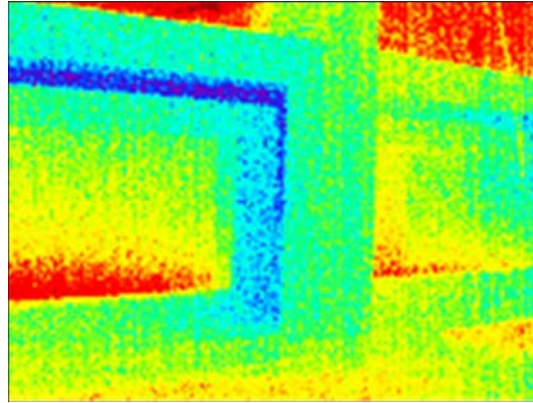
[그림 48] 열교 영역 지정 예시

- 작업자가 선택한 열교 영역과 속성 정보는 구조 정의의 용이성과 가독성으로 인해 널리 사용되고 있는 Json 파일 형식에 따라 저장함. 다음 <표 86>는 Json 파일에 포함되는 속성 정보와 그에 따른 입력 방안에 대해 나타냄. 이미지에 대한 영역을 작업자가 지정하면, 해당 영역으로부터 이미지 데이터의 속성 정보와 객체 속성 중 영역 형상과 좌표는 자동으로 추출됨. 이와 별도로, 온도 차이, 온도 변화, 분포 형상, 위치를 작업자가 추가로 입력하여 Json 파일 형태로 저장할 수 있음

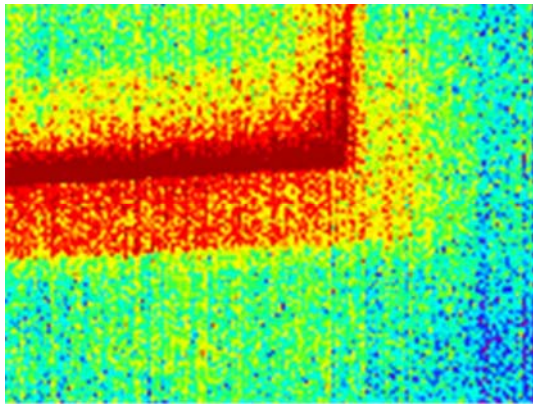
<표 86> Json 파일 속성 정보

구분	속성값	입력 방안
이미지 데이터 속성 정보	filename	이미지 파일명 추출
	size	이미지 속성 추출
객체 속성	name	Annotation tool 영역 형상 설정
	all_points_x	Annotation tool 좌표 설정
	all_points_y	Annotation tool 좌표 설정
	온도 차이	Text 직접 입력
	온도 변화	Text 직접 입력
	분포 형상	Text 직접 입력
	위치	Text 직접 입력

- 본 연구에서 제안한 Json 파일 변환 예시는 다음 [그림 48]과 같음.



```
{
  "filename": "1-1.JPG",
  "size": 165984,
  "regions": [
    {
      "shape_attributes": {
        "name": "polygon",
        "all_points_x": [10, 513, 550, 288, 335, 692, 704, 3],
        "all_points_y": [314, 347, 703, 730, 844, 825, 188, 133]
      },
      "region_attributes": {
        "온도 차이": "3°C 이상",
        "온도 변화": "서서히 변화",
        "분포 형상": "모서리를 따라 분포",
        "위치": "유리와 프레임 사이"
      }
    }
  ],
  "file_attributes": {}
}
```



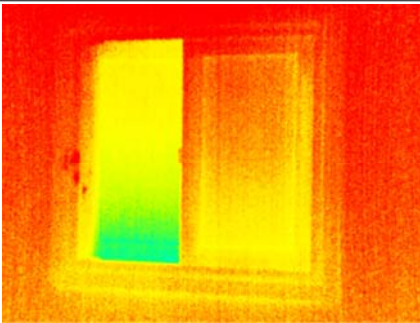
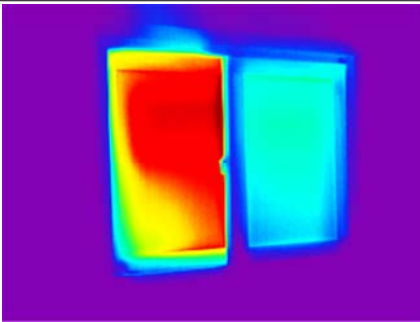
```
{
  "filename": "1-2.JPG",
  "size": 209447,
  "regions": [
    {
      "shape_attributes": {
        "name": "polyline",
        "all_points_x": [43, 134, 269, 389, 558, 730, 859, 955, 1024, 1046, 1030, 105],
        "all_points_y": [674, 756, 891, 968, 996, 986, 913, 797, 678, 628, 595, 659]
      },
      "region_attributes": {
        "온도 차이": "1°C 이상",
        "온도 변화": "서서히 변화",
        "분포 형상": "둥근 형상",
        "위치": "창 하단"
      }
    }
  ],
  "file_attributes": {}
}
```

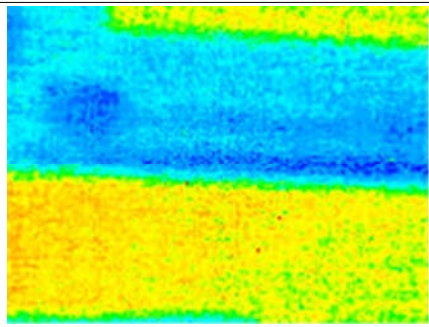
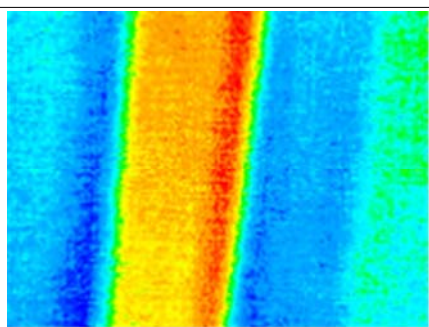
[그림 49] Json 변환 예시

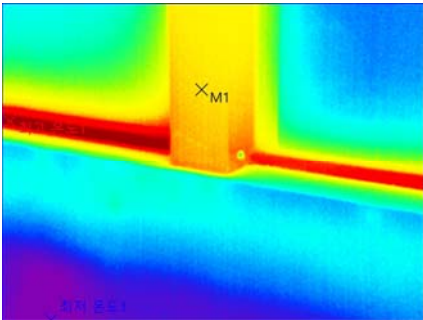
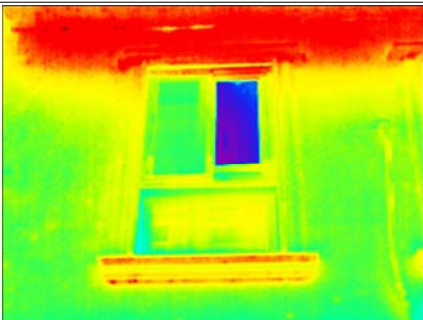
○ 열화상 DB 구축

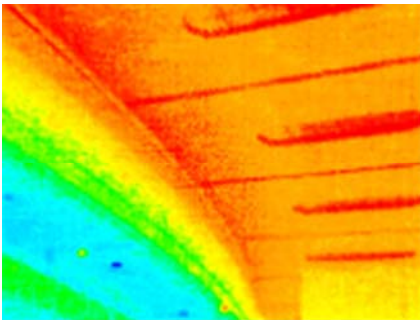
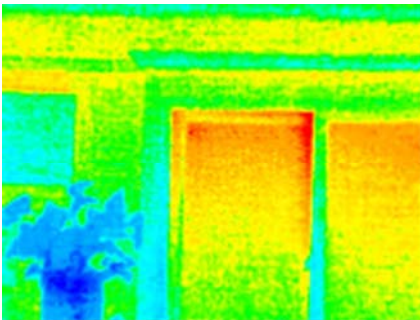
- 본 연구에서는 열화상 데이터 베이스를 단독주택, 공동주택, 제1종 근린생활시설, 운수시설, 업무시설로 분류하여 구축함. 각 용도별 열화상 데이터베이스는 다음 <표 87>과 같음

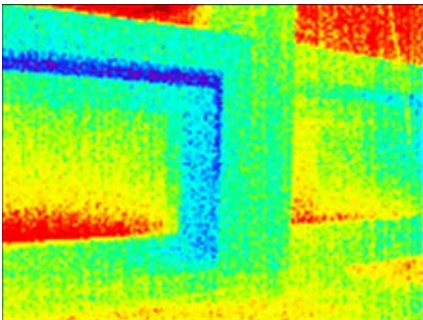
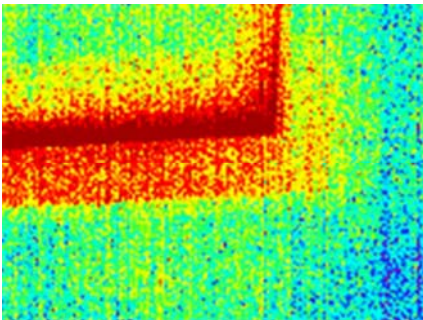
<표 87> 열화상 데이터베이스 예시

구분	데이터베이스		
단독주택	개요		열화상
	용도	단독주택	
	영상 번호	20-1	
	Json 파일		
	<pre>{ "filename": "20-1.bmp", "size": 4900054, "regions": [{ "shape_attributes": { "name": "polygon", "all_points_x": [238, 227, 12, 5], "all_points_y": [153, 819, 908, 352] } }], "region_attributes": { "온도 차이": "1°C 이내", "온도 변화": "서서히 변화", "분포 형상": "넓게 분포", "위치": "창 측면" } }, "file_attributes": {} }</pre>		
	개요		열화상
	용도	단독주택	
	영상 번호	20-1	
	Json 파일		
	<pre>{ "filename": "20-2.bmp", "size": 4900054, "regions": [{ "shape_attributes": { "name": "polygon", "all_points_x": [344, 399, 413, 477, 588, 639, 675], "all_points_y": [133, 113, 25, 1, 6, 104, 139] } }], "region_attributes": { "온도 차이": "2°C 이상", "온도 변화": "서서히 변화", "분포 형상": "둥근 형태", "위치": "창 상단" } }, "file_attributes": {} }</pre>		

구분	데이터베이스		
공동주택	개요		열화상
	용도	공동주택	
	영상 번호	16-1	
	Json 파일		
	{ "filename": "16-1.JPG", "size": 132213, "regions": [{ "shape_attributes": { { "name": "polygon", "all_points_x": [6, 1323, 1329, 4], "all_points_y": [536, 587, 987, 990] }, "region_attributes": { { "온도 차이": "1℃ 이내", "온도 변화": "급격히 변화", "분포 형상": "넓게 분포", "위치": "창 하단" } }], "file_attributes": {} },		
	개요		열화상
	용도	공동주택	
	영상 번호	16-2	
	Json 파일		
	{ "filename": "16-2.JPG", "size": 123981, "regions": [{ "shape_attributes": { { "name": "polygon", "all_points_x": [819, 691, 304, 392], "all_points_y": [5, 995, 989, 0] }, "region_attributes": { { "온도 차이": "1℃ 이상", "온도 변화": "서서히 변화", "분포 형상": "얇고 길게 분포", "위치": "프레임" } }], "file_attributes": {} },		

구분	데이터베이스		
제1종 근린생활시설	개요		열화상
	용도	제1종 근린생활시설	
	영상 번호	2-2	
	Json 파일		
	<pre>{ "filename": "2-2.JPG", "size": 104950, "regions": [{ "shape_attributes": { "name": "polygon", "all_points_x": [9, 1323, 1327, 5], "all_points_y": [440, 670, 993, 758] }, "region_attributes": { "온도 차이": "5°C 이상", "온도 변화": "서서히 변화", "분포 형상": "프레임 따라 분포", "위치": "창 하단" } }], "file_attributes": {} }</pre>		
	개요		열화상
	용도	제1종 근린생활시설	
	영상 번호	2-4	
	Json 파일		
	<pre>{ "filename": "2-4.JPG", "size": 123708, "regions": [{ "shape_attributes": { "name": "polygon", "all_points_x": [15, 94, 1299, 1327], "all_points_y": [29, 225, 194, 23] }, "region_attributes": { "온도 차이": "5°C 이상", "온도 변화": "급격히 변화", "분포 형상": "길고 넓게 분포", "위치": "창 상단" } }], "file_attributes": {} }</pre>		

구분	데이터베이스		
운수시설	개요		열화상
	용도	운수시설	
	영상 번호	11-1	
	Json 파일		
	{ "filename": "11-1.JPG", "size": 99914, "regions": [{ "shape_attributes": { "name": "polygon", "all_points_x": [6, 155, 388, 608, 743, 808, 823, 785, 666, 566, 372, 243, 67, 8], "all_points_y": [138, 228, 436, 669, 837, 956, 995, 993, 854, 738, 582, 468, 343, 320]}, "region_attributes": { "온도 차이": "2°C 이상", "온도 변화": "서서히 변화", "분포 형상": "길게 분포", "위치": "창 하단"} }], "file_attributes": {} }		
	개요		열화상
	용도	운수시설	
	영상 번호	11-6	
	Json 파일		
	{ "filename": "11-6.JPG", "size": 124720, "regions": [{ "shape_attributes": { "name": "polygon", "all_points_x": [518, 450, 428, 528, 532], "all_points_y": [395, 629, 987, 994, 386]}, "region_attributes": { "온도 차이": "1°C 이상", "온도 변화": "서서히 변화", "분포 형상": "모서리를 따라 분포", "위치": "창 측면"} }], "file_attributes": {} }		

구분	데이터베이스		
업무시설	개요		열화상
	용도	업무시설	
	영상 번호	1-1	
	Json 파일		
	{ "filename": "1-1.JPG", "size": 165984, "regions": [{ "shape_attributes": { "name": "polygon", "all_points_x": [10, 513, 550, 288, 335, 692, 704, 3], "all_points_y": [314, 347, 703, 730, 844, 825, 188, 133]}, "region_attributes": { "온도 차이": "3°C 이상", "온도 변화": "서서히 변화", "분포 형상": "모서리를 따라 분포", "위치": "유리와 프레임 사이"} }] "file_attributes": {} }		
	개요		열화상
	용도	업무시설	
	영상 번호	1-2	
	Json 파일		
	{ "filename": "1-2.JPG", "size": 209447, "regions": [{ "shape_attributes": { "name": "polyline", "all_points_x": [43, 134, 269, 389, 558, 730, 859, 955, 1024, 1046, 1030, 105], "all_points_y": [674, 756, 891, 968, 996, 986, 913, 797, 678, 628, 595, 659]}, "region_attributes": { "온도 차이": "1°C 이상", "온도 변화": "서서히 변화", "분포 형상": "둥근 형상", "위치": "창 하단"} }] "file_attributes": {} }		

C-4) 열화상을 통한 모델기반 열교계수 현장 재연성 확인

[연구 수행 결과 요약] ① 실증 대상 선정 4건 ② 열교계수 현장 재연성 2.35 %	실증 대상 선정 보고서 [증빙 C-4-1] 재연성 확인 보고서 [증빙 C-4-2]
---	--

○ 실증 대상 선정

- 공동연구기관이 참여 또는 참여예정인 국가 및 민간 기존 건축물 성능개선 사업에 적용을 통해 실제 건물을 대상으로 실험을 통한 개발 기술 실증 및 실용성 검증을 수행함. 개발기술 검증 대상은 다음 <표 88>과 같으며, 공동주택 1건과 주거, 업무, 교육, 연구시설 중 1건을 추가로 계획함

<표 88> 연구개발계획서 상 실증 대상

단계	실험	내용	
3단계	실제 환경 시작품 실험	실험개요	실제 건물에 적용을 통한 시작품 실험
		실험방법	사용자 편의성(측정시간) 및 정확성(오차율)
		실험범위	계획: 공동주택(1) 추가: 주거·업무시설(1), 교육·연구시설(1)
		대상선정	전문가 자문을 통한 대상시설의 대표성 확인 후 선정 예정
		평가기준	현장측정 및 프로그램 계산시간 1시간 이내

- 개발 기술 검증을 위해 측정을 위한 협조가 가능하며, 기초 성능과 관련한 도면을 보유하고 있는 실증 대상 후보지를 우선적으로 선정함. 실증 대상 후보지로 공동주택 2건, 업무시설 3건, 교육·연구시설 2건으로 총 7건을 실증 대상 후보지로 선정함. 다음 <표 89>는 본 연구에서 실증을 위해 선정한 대상 후보 목록의 상세 정보를 나타냄

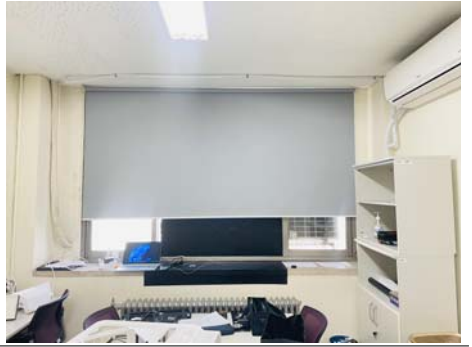
<표 89> 실증 대상 후보 목록

용도	건물명	비고
공동주택	○○ 주공아파트 14단지	준공 후 30년 경과, 복도식
	○○ 센트레빌 1단지	준공 후 8년 경과, 계단식
업무시설	○○ 119안전센터 내 사무실	그린리모델링 대상지
	○○ 업무시설 내 사무실	-
	○○ 스타디움 내 사무실	-
교육·연구시설	인천 ○○대학교 강의실	-
	서울 ○○대학교 강의실	-

- 7건의 실증 대상 후보지에 대해 실증 가능 여부를 확인하기 위해 사전답사를 수행하여 측정 부위에 대한 조사를 수행함. 조사항목은 위치, 용도, 건축연도 등의 기본 건물정보, 측정 대상 부위에 대한 치수와 열성능을 포함함. 다음 <표 90>은 실증 대상 후보지에 대한 사전답사 결과를 나타냄

<표 90> 실증 대상 후보 목록

구분	내용		사진
공동주택 1	건물명	○○ 주공아파트 14단지	
	위치	서울특별시	
	용도	공동주택	
	구조	철근콘크리트구조	
	규모	지상 15층	
	건축연도	1989년	
공동주택 2	건물명	○○ 센트레빌 1단지	
	위치	인천광역시	
	용도	공동주택	
	구조	철근콘크리트구조	
	규모	지상 14층, 지하 2층	
	건축연도	2013년	
업무시설 1	건물명	○○ 119안전센터	
	위치	서울특별시	
	용도	제1종 근린생활시설(소방서)	
	구조	철근콘크리트구조	
	규모	지상 3층, 지하 1층	
	건축연도	1992년	
업무시설 2	건물명	○○ 업무시설	
	위치	인천광역시	
	용도	업무시설	
	구조	철근콘크리트구조	
	규모	지상 5층	
	건축연도	-	
업무시설 3	건물명	○○ 스타디움	
	위치	경기도 용인시	
	용도	체육시설(종합운동장)	
	구조	철골철근콘크리트구조	
	규모	지상 4층, 지하 1층	
	건축연도	2017년	

구분	내용		사진
교육·연구 시설 1	건물명	인천 ○○대학교 강의실	
	위치	인천광역시	
	용도	교육연구시설(대학교)	
	구조	철근콘크리트구조	
	규모	지상 5층	
	건축연도	1964년(2005년 리모델링)	
교육·연구 시설 2	건물명	서울 ○○대학교 강의실	
	위치	서울특별시	
	용도	교육연구시설(대학교)	
	구조	철근콘크리트구조	
	규모	지상 5층	
	건축연도	2013년	

- 실증 대상 후보지 중 실증 대상지를 선정하기 위해, 건물 에너지 전문가를 대상으로 해당 후보지가 용도를 대표할 수 있는지에 대한 자문을 수행함. 다음 <표 91>은 실증 대상지 선정을 위한 전문가 자문 내용을 요약한 결과를 보여주며, <표 92>는 전문가 자문에 따라 선정한 4건의 실증 대상지를 나타냄

<표 91> 실증 대상지 선정을 위한 전문가 자문 결과

전문가 인적 사항	자문 결과 요약
• 성명: 남유진 • 소속: 부산대학교 • 직책: 교수	• 자문일자: 2021.11.10. • 자문 제목: 실증 대상의 대표성 검증 및 창호 열적성능 분석 자문 - 공동주택의 경우, 30년이 지난 복도식 아파트와 10년이 되지 않은 계단식 아파트로 특성이 달라 두 대상 모두를 실증하는 것을 추천함. - 업무시설은 실증 대상 후보지가 세 건이지만, 119안전센터 내 사무실이 실증에 가장 적합할 것으로 판단됨. 다른 두 건의 건물은 업무시설을 대표하기에 부족함. - 인천과 서울의 강의실은 모두 일반적인 강의실과 같으며, 두 건물이 유사하므로 하나를 선택하는 것이 바람직함.

<표 92> 실증 대상 선정

용도	건물명	비고
공동주택	○○ 주공아파트 14단지	준공 후 30년 경과, 복도식
	○○ 센트레빌 1단지	준공 후 8년 경과, 계단식
업무시설	○○ 119안전센터 내 사무실	그린리모델링 대상지
교육·연구시설	인천 ○○대학교 강의실	-

○ 열교계수 현장 재연성 확인

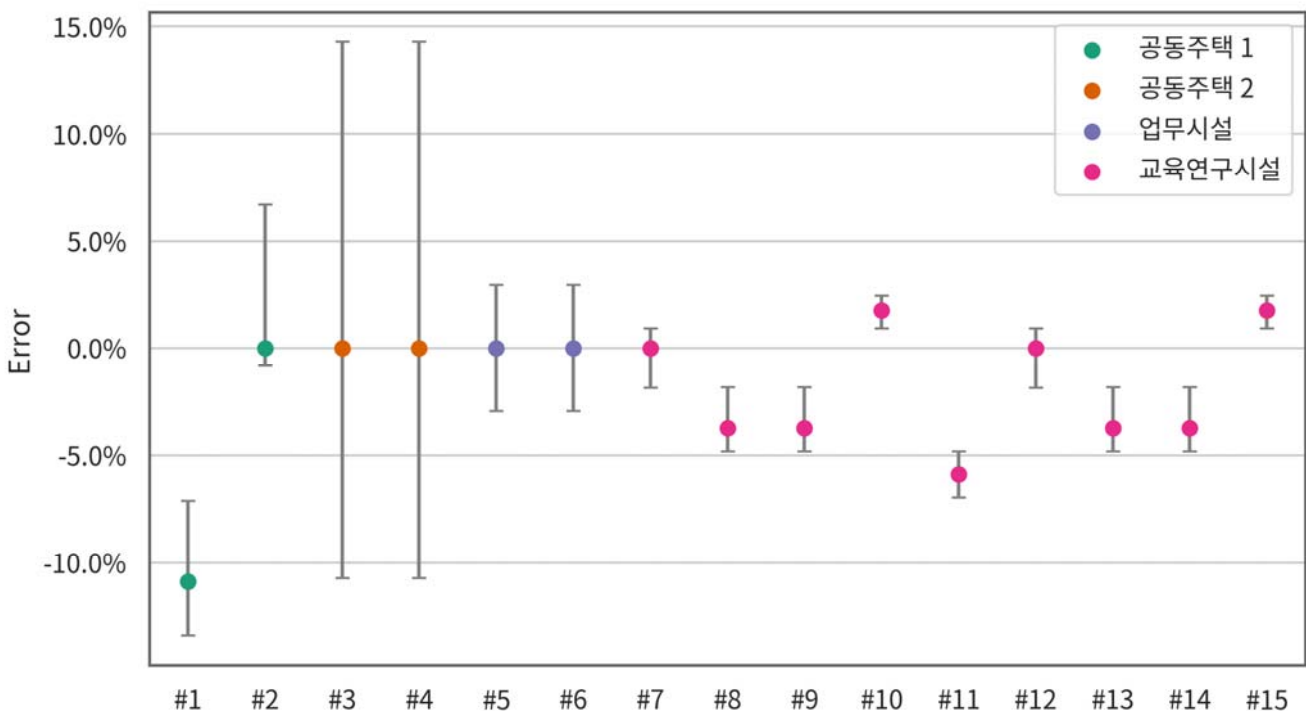
- 본 실증에서의 재연성은 동일한 대상을 다른 시점에 측정하더라도 유사한 결과가 도출됨을 의미함. 따라서 재연성을 측정하기 위해, 모든 측정 시점을 대상으로 최적화된 선형열관류율을 기준으로 각자의 측정 시점과의 평균 오차를 확인하고자 함. 다음 식(1)은 본 연구에서 제안하는 현장 재연성 측정 방법을 나타냄. U_{opt} 는 다수의 시점에서 최적화된 선형열관류율을 나타내며, U_i 는 i 번째 측정의 선형열관류율을 의미함

$$\text{재연 오차율(\%)} = \frac{U_i - U_{opt}}{U_{opt}} \times 100 \quad (1)$$

- 다음 <표 93>은 4건의 실증대상으로부터 측정한 15건의 결과를 바탕으로 재연 오차율을 종합한 결과를 나타냄. 본 실증을 통한 평균 재연 오차율은 2.35 %로 나타남. 각 측정 케이스 별 오차율은 [그림 50]과 같음. 그림에서 색상으로 표시한 포인트는 최적화된 모델과의 선형열관류율 차이를 나타내며, 상단과 하단의 표시는 모델 간의 간격으로 인해 발생할 수 있는 오차 범위를 나타냄. 그림에서 확인할 수 있듯이, 모델 간의 선형열관류율 간격으로 인한 오차 범위를 고려하여도 모든 케이스가 오차율 15% 이내의 재연성을 보임

<표 93> 종합 재연성 평가 결과

구분	평균 재연 오차율 범위(%)	평균 재연 오차율(%)
공동주택 1 (2 케이스)	-7.11 ~ 0.21	5.44
공동주택 2 (2 케이스)	-10.71 ~ 14.29	0.00
업무시설 1 (2 케이스)	-2.94 ~ 2.94	0.00
교육·연구시설 1 (9 케이스)	-3.12 ~ -0.60	2.71
종합		2.35



[그림 50] 목표 대비 개별 측정 결과

- 다음 <표 94>는 현장측정 및 프로그램 계산시간을 나타냄

<표 94> 현장측정 및 프로그램 계산 시간

측정자	현장	평균 현장측정 시간	수치모델 계산시간(초)	합계 평균(분:초)
측정자 A	공동주택 1	04:37	0.07716	04:38
측정자 B	공동주택 2	02:36	0.03629	02:37
	업무시설 1	02:16	0.06797	02:17
측정자 C	교육·연구시설 1	02:11	0.11582	02:12
합계				02:56

○ 핵심 성과 C. 소결

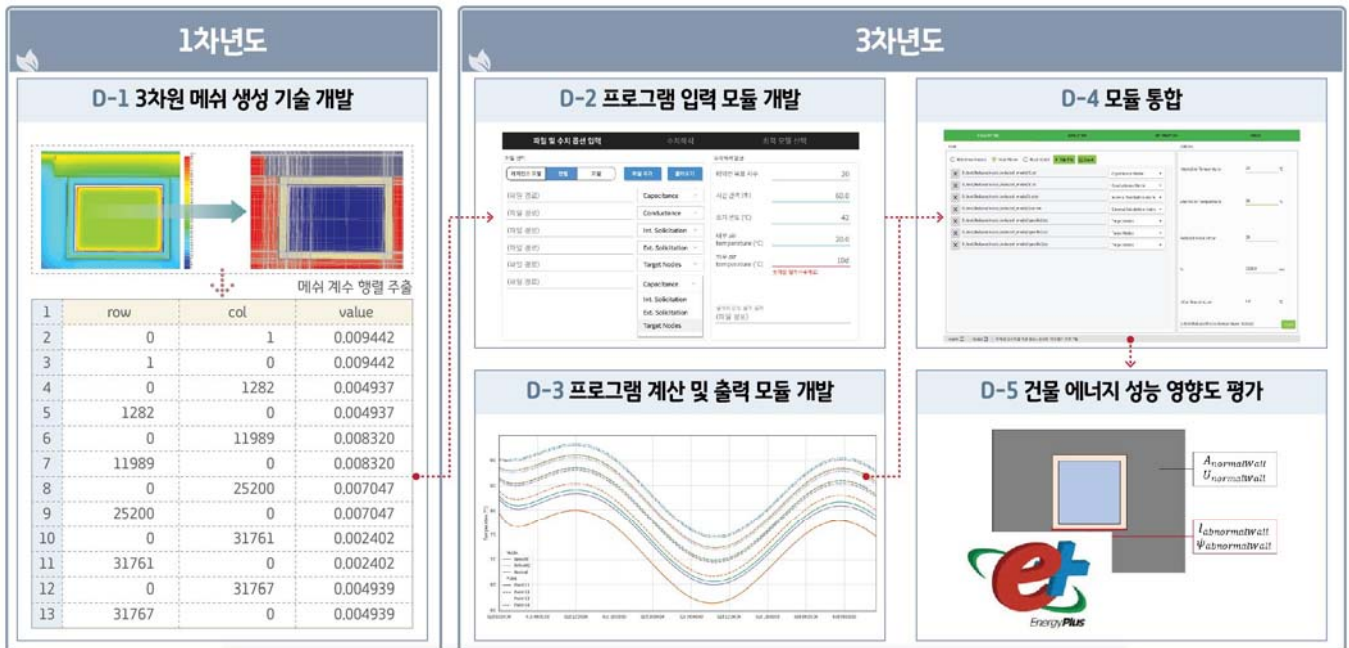
핵심 성과 C. 창호 시공부위 하자 평가를 위한 열화상 측정 방법론

C-1	창 주변 열교 열화상 패턴화	1. 창 주변 열교와 관련한 열화상 사례 280건 수집 완료 2. 창 주변 열교와 관련한 280건의 열화상 패턴(온도 차이, 온도 변화, 분포 형상, 위치) 분석 완료 3. 환경과 촬영 방법에 따른 창 주변 열교 가시화 확인을 위한 상세 측정 10건 완료
C-2	열교 계수 산정을 위한 열화상 측정 방법론 제안	1. 기존 열화상 측정 방법(KS F 2829, ASTM C 1060, ASTM C 1153, ISO 6781) 분석 완료 2. 창 주변 열교를 가시화 할 수 있는 측정 환경 기준 수립 완료 3. 창 주변 열교를 가시화 할 수 있는 측정 절차 수립 완료
C-3	주요 열화상 및 해석 결과 DB화	1. 창 주변 열교가 포함된 열화상 데이터베이스를 구축하기 위한 전략 수립 완료 2. 창 주변 열교와 관련한 280건 열화상의 데이터베이스 구축 완료
C-4	열화상을 통한 모델기반 열교계수 현장 재연성 확인	1. 열교계수 현장 재연성 확인을 위한 공동주택 2, 업무시설 1, 교육연구시설 1 선정 완료 2. 열화상을 통한 열교계수 현장 재연 오차율 2.35%, 평균 현장측정 및 수치모델 계산시간 2분 56초 달성 (계획: 재연 오차율 15%, 현장측정 및 수치모델 계산시간 1시간 이내)

[그림 51] 핵심성과 C. 소결

핵심성과물 D. 열화상을 이용한 창 주변 열교 분석 프로그램

핵심성과 4	열화상을 이용한 창호시공부위 하자 평가 프로그램	
정의	창호와 벽의 접합부를 촬영한 열화상과 시뮬레이션 모델을 이용하여 창호시공부위의 하자 정도를 선형열교계수를 통해 제시하는 프로그램	
목적	창호와 벽의 접합부위에 대한 시공 하자를 정량적으로 평가하는 방법이 없어, 시공하자로 인한 하자분쟁이 증가하고 경제적 손실이 발생함. 본 연구에서 개발하고자 하는 열화상을 이용한 창호시공부위 하자 평가 프로그램을 통해 창호시공부위에서 발생한 하자를 신속하게, 정량적으로 평가할 수 있도록 함	
성능목표	(기존기술 수준) 설계 도면을 기반으로 열교를 평가하는 전열해석 프로그램이 존재하나, 실제 시공 시 발생한 하자를 반영하지 못함 (개발기술 수준) 세계 최초로 창호 시공부위에 발생한 하자를 재연 실험 오차율 15%, 3차원 기준모델 대비 고속 모델 오차율 2%, 계산속도 100배 향상되게 평가함	
성과달성 책임자 (소속기관)	장항인((주)미래환경플랜건축사사무소)	
소요기간	' 19.04 ~ ' 21.12(2년9개월, 3년차)	
성과달성 확인방법	1) 열화상을 이용한 창호시공부위 하자 평가 프로그램 시제품 개발 2) 열화상을 이용한 창호시공부위 하자 평가 프로그램 저작권 등록	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	출원 : 2건, 등록 : 0건 (계획) 출원 : 1건, 등록 : 1건
	논문	0건 (계획) 0건
	저작	0건 (계획) 0건
	S/W	2건 (계획) 1건
	신기술	0건 (계획) 0건
	기타	0건 (계획) 0건



핵심성과물 D. 열화상을 이용한 창호 시공 하자 평가 프로그램

[그림 52] 핵심성과물 D. 열화상을 이용한 창 주변 열교 분석 프로그램

Input Data



Matrix Data

ABAQUS

```
1 ** Assembled operator Stiffness
2 ** 168 by 168, entries 2400, unsymmetric
3 1,11, 1,11, 1.25333333333333e+04
4 1,11, 2,11, -1.276756478318930e-13
5 1,11, 5,11, -1.129096816043784e-13
6 1,11, 6,11, -8.33333333333332e+00
7 1,11, 25,11, -1.231098556431220e-13
8 1,11, 26,11, -8.33333333333337e+00
9 1,11, 29,11, -8.33333333333332e+00
10 1,11, 30,11, -8.33333333333321e+00
```

Capacitation · Conductance ·
Solicitation Matrix
and Target Nodes

Application



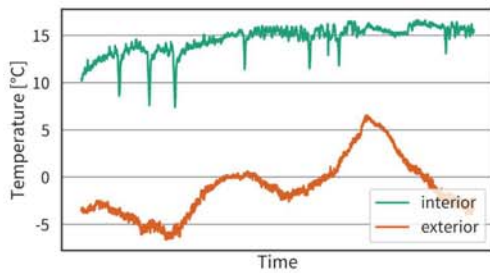
State-Space model

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \dots \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} \dots \end{bmatrix} U$$

Reduction



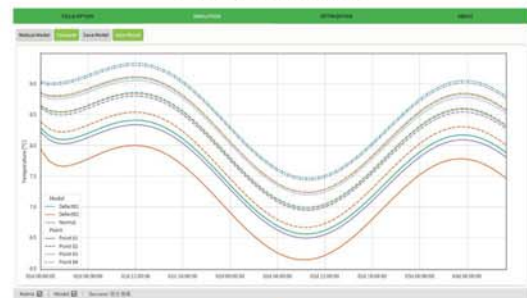
Environment



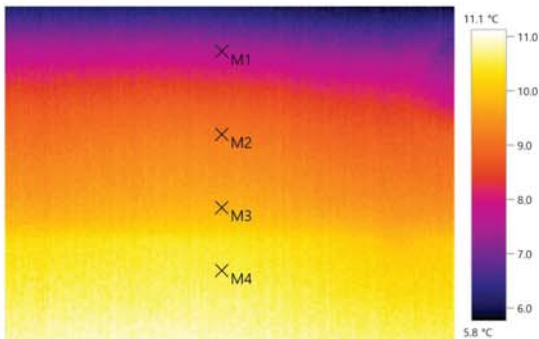
- Internal · External Temperature
- Initial Temperature
- Time step, etc.

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \dots \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} \dots \end{bmatrix} U$$

Thermal Analysis



Field Measurement



Thermography

$$\text{Error } E = [\sum (y - \hat{y})^2 / n]^{1/2}$$



[그림 53] 핵심성과 D. 주요 연구 성과

D-1) 창과 벽의 3차원 도면 메쉬 생성 기술 개발

[연구 수행 결과 요약]

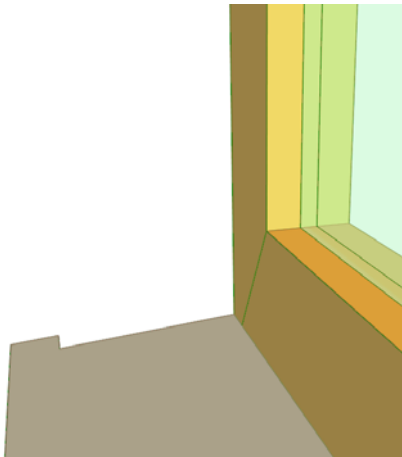
- ① 3차원 도면 특성 분석: 도면 특성 분석 보고서 1건
 ② 메쉬 생성 알고리즘 개발: 메쉬 생성 보고서 1건

도면 특성 분석 보고서 [증빙 D-1-1]
 메쉬 생성 보고서 [증빙 D-1-2]

○ 창호 3차원 도면 특성 분석

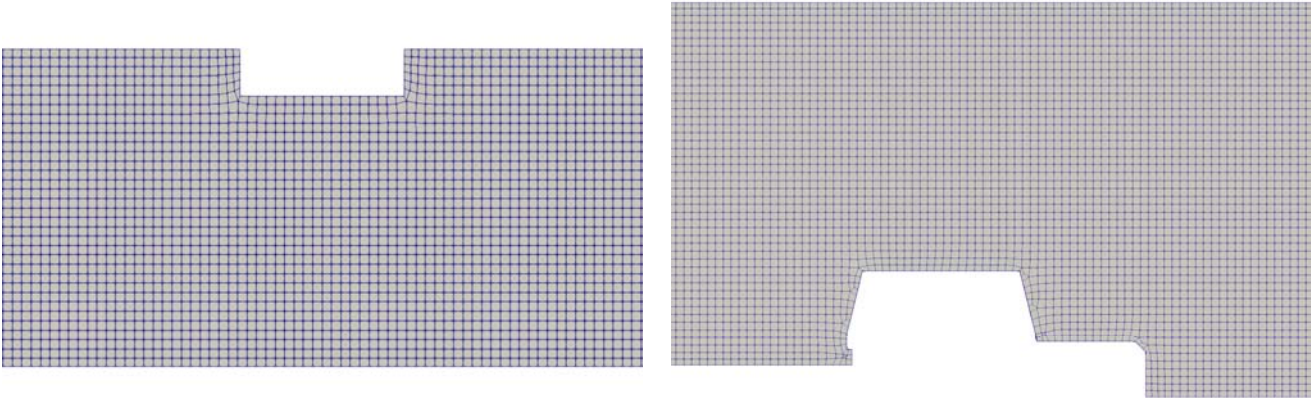
- 창호 주변의 열적 해석을 위한 메쉬 생성에 적합한 방법론을 개발하기 위해 시험 모델의 형상을 분석함. 시험 모델은 DURAARK 프로젝트에서 공개 BIM 라이브러리를 통해 제공하는 KIT Smiley West Arch (이하 KIT)와 SGD BODO Arc (이하 SGD)임
- 각 대상의 창호 3차원 도면을 추출한 결과는 <표 95>와 같음. 유리 안팎으로 높이가 다른 프레임이 위치하여 복잡한 형상을 띄고 있으나, 직육면체와 같은 단순한 다면체로 분해하여 표현할 수 있음. 창틀의 각 변이 사다리꼴 형상으로 표현되기 때문에 내각이 45° 인 다면체가 일부 존재하나, 고품질의 메쉬 설계를 방해하는 예각이 존재하지 않기 때문에 육면체 메쉬 (Hexahedral mesh)의 설계에 적합한 것으로 분석됨

<표 95> 창호 3차원 도면의 특성 분석 대상

모델	전체 형상	창틀 주변부
KIT		
SGD		

○ 메쉬 생성 및 계수 행렬 추출 알고리즘 개발

- 직육면체 등의 다면체로 구성되는 창호의 형상 특성을 고려하여 육면체 메쉬를 우선적으로 설계하는 cartesianMesh 방법론을 통해 시험 모델의 메쉬를 생성함 ([그림 53]). 생성된 메쉬의 수치해석에 대한 안정성을 평가하기 위한 품질 기준을 Orthogonality 70 이하, Skewness 4 이하, Aspect ratio 1000 이하로 설정하였으며, 시험 모델 모두 품질 기준을 만족함



(a) KIT 모델 단면 (b) SGD 모델 단면

[그림 54] 시험 모델의 격자 생성 결과

- 창호 모델의 열환경에 대한 수치해석을 위해선 선형대수 방정식 $A\psi = S$ 를 해석해야 함. 경계 조건인 S 에 대해 열환경 ω 의 해를 구하기 위해 생성된 메쉬로부터 계수 행렬 ω 를 추출함. 수치해석 소프트웨어로부터 계수 행렬을 추출하기 위한 프로그래밍 코드와 COO (Coordinate list) 형태로 추출한 계수행렬의 예시는 <표 96>과 같음

<표 96> 창호 메쉬의 계수 행렬 추출 예시

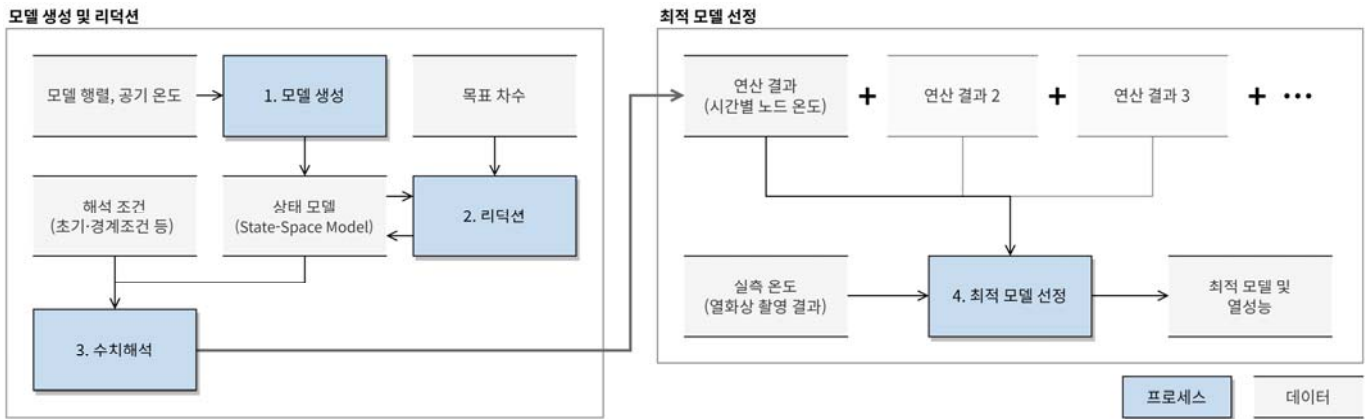
추출 코드	추출 결과			
<pre>// 파일 출력을 위한 객체 autoPtr<OFstream> ofsPtrDiag, ofsPtrOffDiag; ofsPtrDiag.reset(new OFstream("EEqnDiag")); ofsPtrOffDiag.reset(new OFstream("EEqnOffDiag")); forAll(mesh.cells(), i){ // 각 셀에 대해 계수 행렬의 대각 행렬 추출 ofsPtrDiag() << EEqn.diag()[i] << endl; } long l, u; // off-diagonal 원소의 index forAll(mesh.lduAddr().lowerAddr(), i){ l = mesh.lduAddr().lowerAddr()[i]; // off-diagonal 원소 추출 u = mesh.lduAddr().upperAddr()[i]; ofsPtrOffDiag() << l << "\t" << u << "\t" << EEqn.upper()[i] << endl; ofsPtrOffDiag() << u << "\t" << l << "\t" << EEqn.lower()[i] << endl; }</pre>	1	row	col	value
	2		0	1 0.009442
	3		1	0 0.009442
	4		0	1282 0.004937
	5		1282	0 0.004937
	6		0	11989 0.008320
	7		11989	0 0.008320
	8		0	25200 0.007047
	9		25200	0 0.007047
	10		0	31761 0.002402
	11		31761	0 0.002402
	12		0	31767 0.004939
	13		31767	0 0.004939
	14		1	2 0.010308
	15		2	1 0.010308

D-2) 프로그램 입력 모듈 개발

[연구 수행 결과 요약] ① 사용자 인터페이스 설계 ② 프로그램 입력부 개발	사용자 인터페이스 설계도 [증빙 D-2-1] 프로그램 입력 모듈 [증빙 D-2-2]
---	---

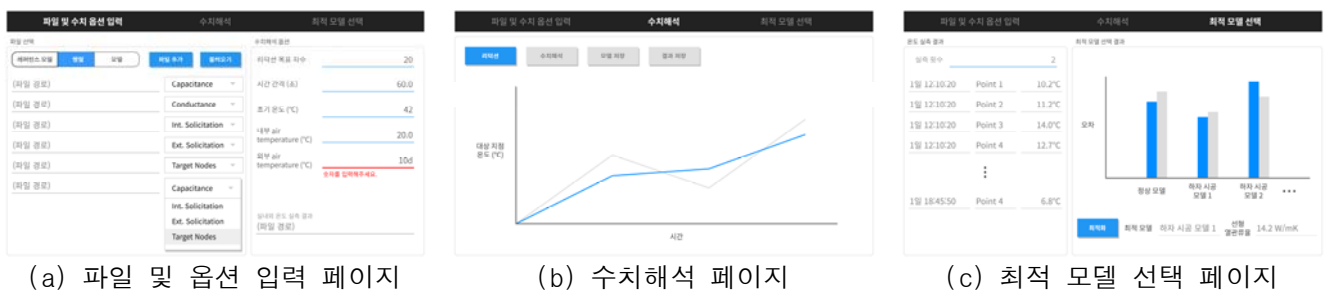
○ 사용자 인터페이스 설계

- 사용자 인터페이스의 설계에 앞서, 프로그램의 시행 단계별로 분석자가 입력하는 데이터와 출력되는 데이터를 정의해야 함. 개발 프로그램의 데이터 흐름도를 [그림 55]와 같이 분석하였음. 분석 대상인 창호시공부위의 상태-공간 모델은 행렬 파일과 모델 설계 시 설정한 공기 온도로부터 생성됨. 모델 리덕션을 적용하는 경우 목표하는 모델의 차수를 설정해야 하며, 출력값 역시 상태-공간 모델임
- 수치해석 시뮬레이션을 위해서는 초기조건·경계 조건 등의 해석 조건을 입력해야 하며, 출력 결과는 지정된 지점의 시간별 온도 변화 데이터임. 레퍼런스 모델 중 최적 모델을 고르는 경우, 다수의 수치해석 결과와 분석자가 실측한 창호의 지점 온도를 입력받고 선정된 최적 모델과 모델의 열성능을 출력함



[그림 55] 프로그램 데이터 흐름도

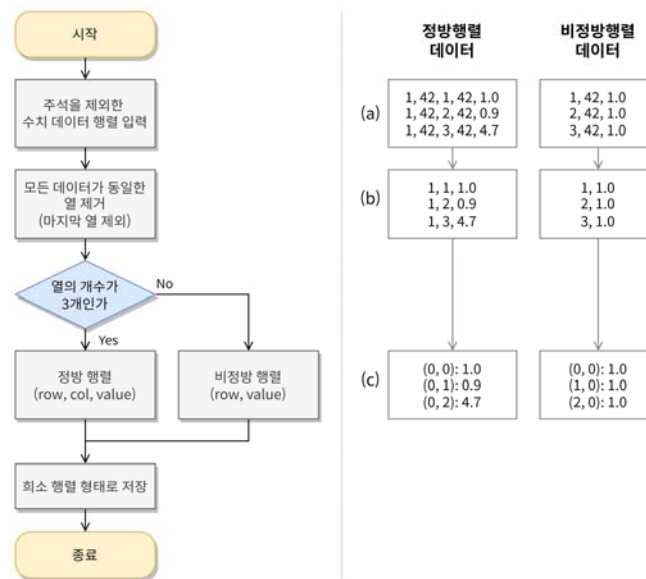
- 데이터 흐름도를 참고하여 설계한 프로그램 사용자 인터페이스를 [그림 56]에 표시함. 모델 구성, 리덕션 및 해석 조건의 입력은 [그림 56(a)] 파일 및 옵션 입력 페이지에서 입력하도록 설계함. 경계 조건에 해당하는 실내외 온도 측정 결과의 경우 시간별 다수의 데이터를 입력해야 함을 고려하여 온도 로깅 파일의 경로를 지정하도록 함
- 상태-공간 모델의 리덕션과 수치해석은 [그림 56(b)]의 수치해석 페이지에서 시행함. 해당 페이지는 시행 버튼 외에 분석자의 입력 항목은 없음. 수치해석 시행 시 선 그래프를 통해 계산 진행 상황과 시간별 지점 온도 변화를 시각화함. 마지막으로 최적 모델 선택 페이지 ([그림 56(c)])에서 창호의 실측 온도를 입력하며, 막대 그래프로 시각화한 각 모델의 오차와 최적 모델의 정보가 출력됨



[그림 56] 사용자 인터페이스 설계 결과

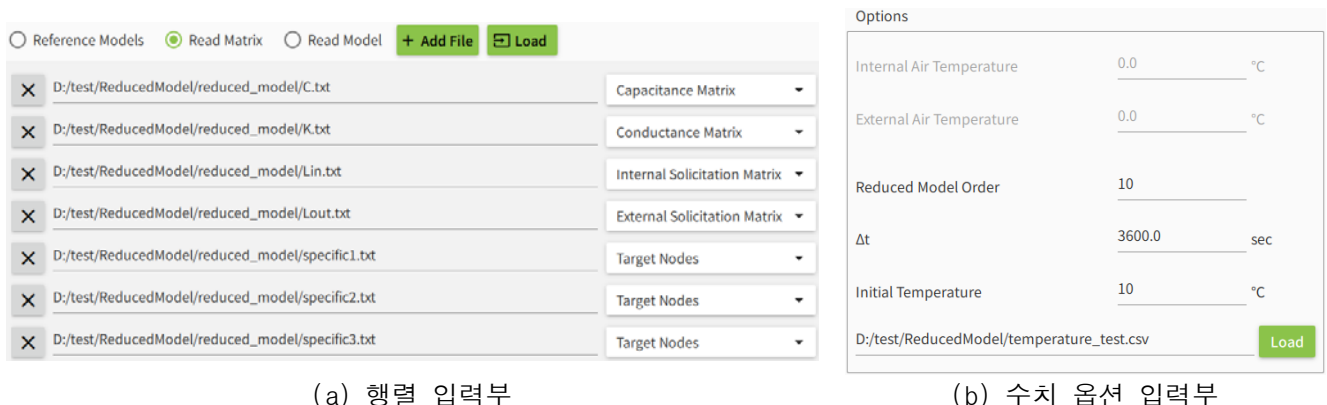
○ 프로그램 입력부 개발

- 개발 프로그램의 입력 데이터는 텍스트 데이터 (행렬 파일), csv 형식 (실내외 온도 측정값), 단일 수치 (리덕션 목표 차수, 공기 온도 등 해석 조건)으로 구분됨. csv 형식은 Python 프로그램 언어에 내장된 모듈을 이용하여 해석할 수 있으며, 단일 수치의 경우 GUI를 통해 쉽게 입력하고 불러올 수 있음. 반면 Abaqus 프로그램을 통해 추출한 행렬 파일은 주석 데이터, 각 원소의 행 · 열 · 값을 기록한 독자적인 형식이기 때문에 별도의 해석 알고리즘이 요구됨
- 행렬 해석 알고리즘을 [그림 57]과 같이 개발함. 입력된 텍스트 파일은 먼저 불필요한 데이터 (주석 및 모든 데이터가 동일한 열)을 제거하는 전처리 과정을 거침. Abaqus에서 추출된 행렬은 행 · 열 · 값이 기록되는 정방행렬 (Capacitance, Conductance matrix)와 행과 값만이 기록되는 열 벡터, 즉 비정방행렬 (Solicitation matrix, Target nodes)로 구분됨. 본 연구에서는 저장된 텍스트 파일의 열의 개수로부터 두 행렬의 종류를 자동으로 구분했으며, 데이터 처리 시 메모리의 절감을 위해 해석된 행렬을 희소행렬 형식으로 저장함



[그림 57] 행렬 해석 알고리즘

- [그림 58]은 프로그램 입력부의 개발 결과임. 행렬 입력부의 경우, 다수의 행렬을 입력해야 하므로, "Add File" 버튼을 통해 경로를 지정하고 각 파일의 종류를 드롭다운 메뉴로 고를 수 있도록 설계함. "Target Nodes" 행렬은 개수 제한 없이 선택할 수 있으며, 나머지 행렬은 1개씩 지정해야 함
- 수치 옵션의 경우, 파일 경로를 지정하는 실내외 온도 측정값을 제외하면 모두 GUI를 통해 직접 수치를 입력하도록 함. 이미 구성된 레퍼런스, 혹은 분석자가 저장한 모델을 불러오는 경우, 이용되지 않는 공기 온도 (Internal · External Air Temperature)의 입력부는 비활성화됨



[그림 58] 프로그램 입력부 개발 결과

D-3) 프로그램 계산 및 출력 모듈 개발

[연구 수행 결과 요약] ① 고속 수치모델 탑재 ② 프로그램 출력부 개발	프로그램 계산 모듈 [증빙 D-3-1] 프로그램 출력 모듈 [증빙 D-3-2]
---	--

○ 고속 수치모델 탑재

- 앞서 개발한 창호시공부위 상태-공간 모델의 해석과 리덕션 알고리즘 ([증빙 A-2-1], [증빙 B-2-1] 참조)을 개발 환경에 맞춰 구현하였음. [그림 59]은 행렬 해석 알고리즘을 통해 해석한 C , K , L 행렬로부터 상태-공간 모델을 구성하는 세 행렬 A , B , J 를 산정하는 코드임. 계산식은 다음과 같음

$$A = -C^{-1}K$$

$$B = C^{-1}L$$

$$J = [N_1 \ N_2 \ \dots]^T$$

- 여기서, C 는 Capacitance 행렬, K 는 Conductance 행렬, L 은 Solicitation 행렬을 가로 방향으로 합친 행렬이며, N_i 는 i 번째 Target Nodes 행렬임

```

1 def state_matrices(self) → Tuple[csc_matrix, csc_matrix, csc_matrix]:
2     L = sparse.hstack([self.LiTi, self.LeTe])
3
4     invC = sparse_inv(self.C) # inv(C)
5     A = -np.dot(invC, self.K) # inv(C) * -K
6     B = np.dot(invC, L) # inv(C) * L
7     J = sparse.hstack(self.Ns).transpose()
8
9     return A, B, J

```

[그림 59] 상태-공간 모델의 행렬 계산 코드

- 전열해석을 위한 수치해석 시뮬레이션의 코드는 [그림 60]와 같이 구현함. 변수 중 "bcn"은 경계 조건 ($U(t)$), "xn"은 시간별 상태 ($X(t)$), "yn"은 온도 ($Y(t)$), "omega" (Ω)와 "pi" (Π)는 연산을 위한 보조 행렬임. 계산식은 [증빙 A-2-1]에 서술한 것과 동일함

```

1 def _matrices(self, ss: StateSpace, dt, T0):
2     order = ss.A.shape[0]
3     omega = inv(np.eye(order) - dt * ss.A)
4     pi = dt * np.dot(omega, ss.B)
5
6     if T0 is not None:
7         x0 = self.initial_x(omega=omega, pi=pi, T0=T0)
8     else:
9         x0 = np.zeros(shape=(order, 1))
10
11     return omega, pi, x0

```

(a) 행렬 계산 코드

```

1 bcn = bc[step].reshape([2, 1]) # [[Tint], [Text]]
2
3 yn = np.dot(ss.C, xn) + np.dot(ss.D, bcn)
4 xn = np.dot(omega, xn) + np.dot(pi, bcn)
5
6 if y is None:
7     y = yn.reshape([1, -1])
8 else:
9     y = np.vstack((y, yn.reshape([1, -1])))

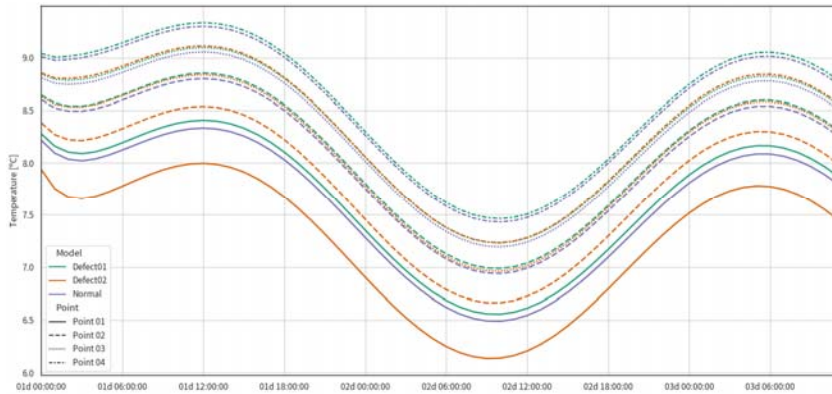
```

(b) 시간별 온도 계산 코드

[그림 60] 고속 수치모델 구현 결과

○ 프로그램 출력부 개발

- 상태-공간 모델의 수치해석 결과는 대상 지점 ("Target Nodes" 행렬로 지정된 노드들의 집합)의 시간별 온도 변화 데이터임. 해석 결과는 선 그래프와 csv 파일 두 가지 형태로 출력됨 ([그림 61]). 레퍼런스 모델을 해석하는 경우 여러 모델을 한번에 시뮬레이션함. 이때 데이터 간 구분을 위해 모델은 색으로, 지점은 선의 유형으로 구분하여 시각화함 ([그림 61(a)]). 분석자가 입력한 하나의 모델을 해석할 경우 색을 통해 지점을 구분함
- 출력되는 해석 결과는 행에 따라 시간을, 열에 따라 지점을 구분하고 각 원소가 온도를 의미하는 행렬 데이터로 출력됨 ([그림 61(b)]). 지점의 순서는 입력한 "Target Nodes" 행렬의 순서와 같음. 레퍼런스 모델을 해석한 경우 열의 이름은 "{모델 이름}:{지점}"의 형식으로 저장됨



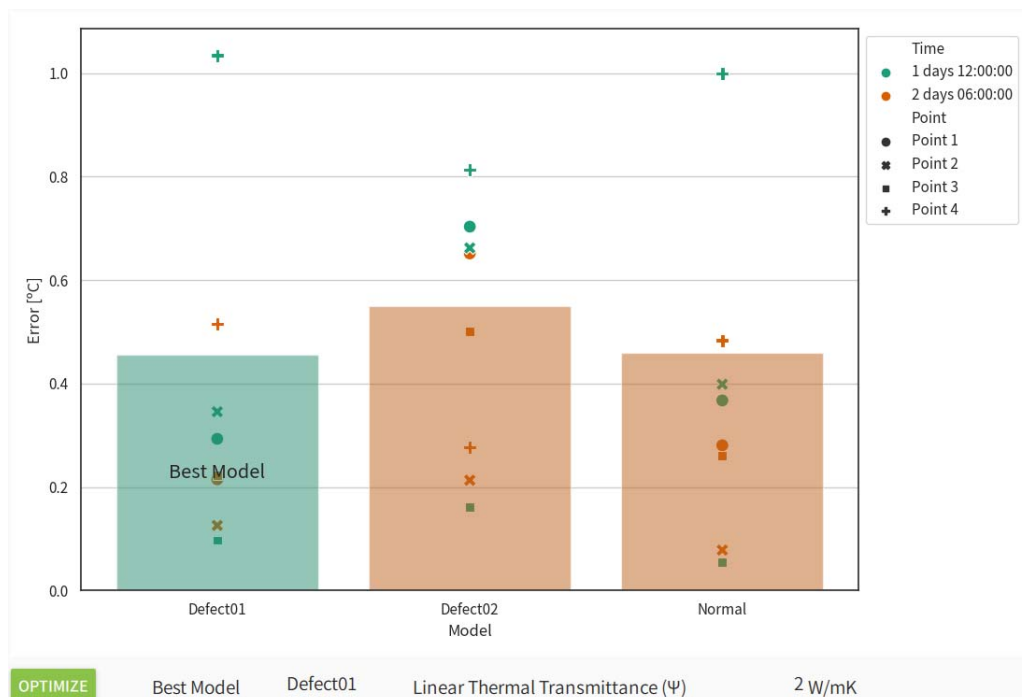
(a) 시간별 온도 시각화

```
1 time,Point01,Point02,Point03,Point04
2 0 days 00:00:00,0.000,0.000,0.000,0.000
3 0 days 01:00:00,3.794,4.005,4.054,4.120
4 0 days 02:00:00,4.696,4.982,5.066,5.177
5 0 days 03:00:00,5.287,5.605,5.713,5.849
6 0 days 04:00:00,5.745,6.084,6.209,6.361
7 0 days 05:00:00,6.123,6.477,6.616,6.779
8 0 days 06:00:00,6.442,6.889,6.960,7.131
9 0 days 07:00:00,6.715,7.093,7.254,7.433
10 0 days 08:00:00,6.949,7.337,7.507,7.692
```

(b) 파일 출력 결과

[그림 61] 수치해석 출력 결과

- [그림 62]는 레퍼런스 모델의 최적화 결과의 출력 예시임. 산점도는 각 측정치와 비교한 시뮬레이션의 절대 오차임. 측정 시기 (점의 색), 지점 (모양)에 따라 오차를 비교할 수 있도록 설계함. 막대 그래프는 모델별 RMSE (평균 제곱근 오차)임. RMSE가 가장 낮은 모델은 최적모델로 판단되며, 하단에 선형열관류율 (Linear Thermal Transmittance) 정보가 출력됨



[그림 62] 모델 최적화 결과 출력 모듈

D-4) 모듈 통합

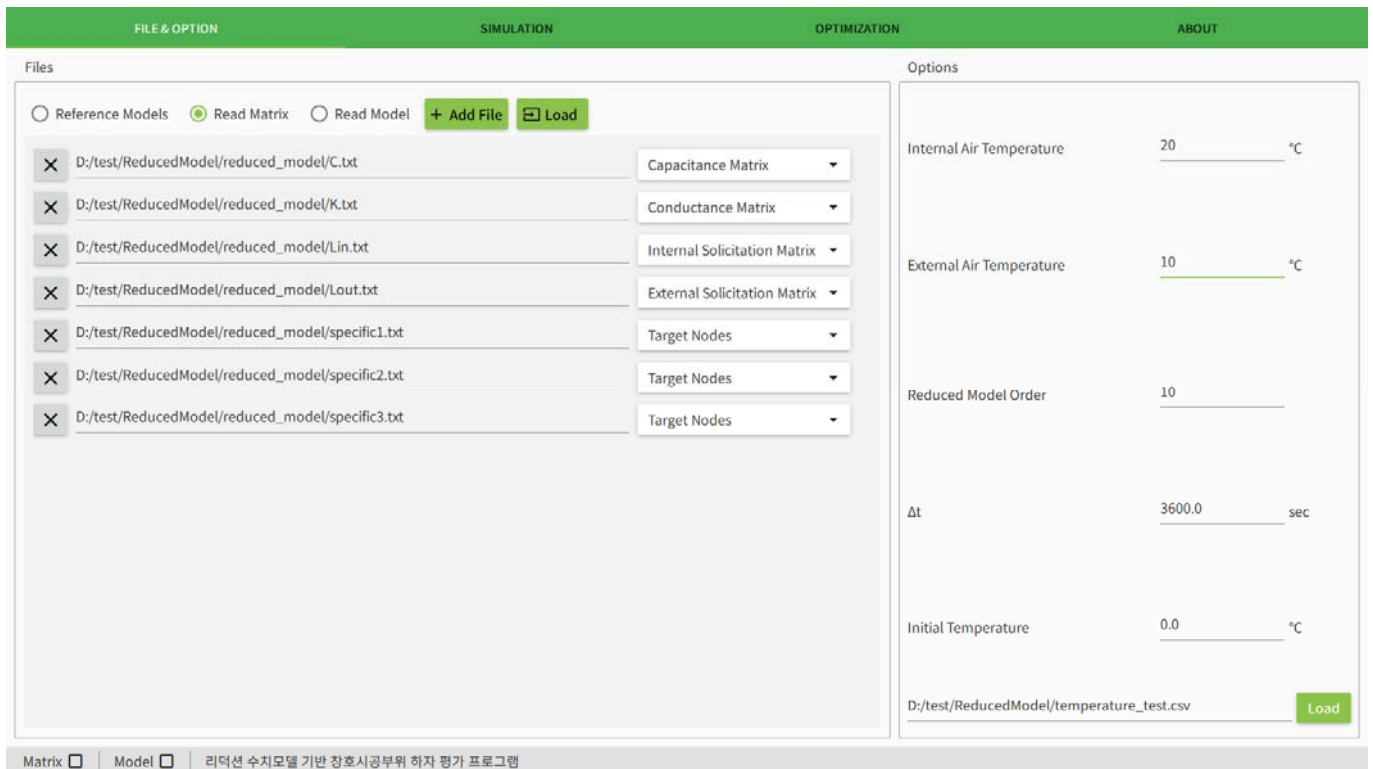
[연구 수행 결과 요약]

- ① 입력 · 계산 · 출력 모듈 통합
- ② 프로그램 매뉴얼 개발

프로그램 및 S/W 등록 1건 [증빙 D-4-1]
프로그램 매뉴얼 [증빙 D-4-2]

○ 입력 · 계산 · 출력 모듈 통합

- 앞서 서술한 상태-공간 모델의 입력 · 계산 · 출력 모듈을 통합하고 단독 실행 가능한 창호시공부위 하자평가 프로그램을 개발함 ([그림 63]). 단위성과물 D-2에서 설계한 사용자 인터페이스에 따라 개발하였으며, 분석 환경에 따라 레퍼런스 모델의 최적화, 분석자가 입력한 모델의 분석, 모델 리덕션 등의 작업을 선택할 수 있음



[그림 63] 창호시공부위의 리덕션 수치모델 분석 프로그램

- 한국저작권위원회를 통해 개발한 프로그램의 저작권을 등록함. 등록된 프로그램의 주요 기능, 실행 환경을 포함한 명세는 <표 97>과 같음

<표 97> 창호시공부위 하자평가 프로그램 명세

항목	내용
명칭	창호시공부위의 리덕션 수치모델 분석 프로그램
적용 분야	건축환경분야 수치해석
특징	창호부위의 시공 하자 여부를 평가하기 위하여, 리덕션 기술을 통해 3차원 전열해석 모델을 고속 해석하고 건물 내외 환경에 따른 온도 변화를 시뮬레이션하는 시스템.

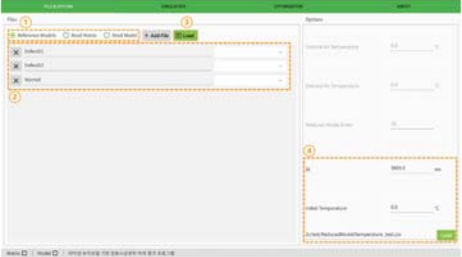
항목	내용
주요 기능	- 유한요소분석 Abaqus FEA 프로그램의 3차원 수치모델을 해석 - 리덕션 기술을 통해 해석한 모델의 복잡도를 낮추고 고속 시뮬레이션을 실행 - csv 파일 형태로 실내외 온도 조건 및 시뮬레이션 결과를 입출력 - 설정 파일 ("config.yaml")을 통해 해석 조건을 제어
사용 환경	- 기종: IBM-PC 호환 기종 - 운영체제: 64 bit Windows (Windows 10 권장) - 사용 언어: Python - 실행에 요구되는 프로그램: -

○ 프로그램 매뉴얼 개발

- 분석자의 편의를 위해 개발한 창호시공부위의 리덕션 수치모델 분석 프로그램의 매뉴얼을 [그림 63]과 같이 작성함. 프로그램의 페이지, 분석 설정에 따라 사용 방법을 서술했으며, 전문은 [증빙 D-4-2]에서 확인할 수 있음. 또한, 프로그램 실행 시 버튼과 입력부의 툴팁 메시지를 통해 이용 안내를 받을 수 있음

II. 파일 및 옵션 입력 페이지

1. 레퍼런스 모델 선택



① "Reference Models" 버튼 선택

② 레퍼런스 모델의 목록 확인

③ "Load" 버튼 클릭

- 레퍼런스 모델이 메모리에 로드됨

④ 수치해석 옵션 설정

- 모델 시간 간격, 초기 온도, 온도 측정 파일 경로 선택

- 2 -

2. 행렬 파일 선택



① "Read Matrix" 버튼 선택

② "Add File" 버튼을 선택하고 불러올 행렬 파일 선택

③ 행렬 파일의 종류 지정

- 우측 드롭다운 메뉴를 통해 종류 선택
- 사용되지 않는 파일은 좌측 "x" 버튼을 통해 지울 수 있음

④ 수치해석 옵션 설정

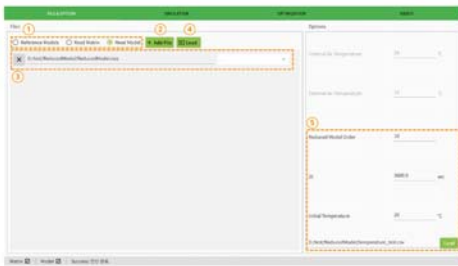
- 실내외 공기 온도, 목표 리덕션 차수, 모델 시간 간격, 초기 온도, 온도 측정 파일 경로 선택

△ 실내외 공기 온도 (Internal-External Air Temperature) 값을 설정한 후 "Load" 버튼을 클릭해야 함

⑤ "Load" 버튼을 통해 행렬 파일로부터 모델 로드

- 3 -

3. 모델 파일 선택

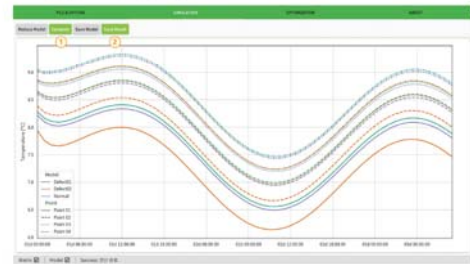


- ① "Read Model" 버튼 선택
- ② "Add File" 버튼을 선택하고 불러올 모델 파일 선택
 - 하나의 모델만 선택 가능
 - 모델 파일은 ".npz" 형식으로 저장됨 (§III.2 참조)
- ③ 선택된 모델 파일 확인
- ④ "Load" 버튼을 통해 행렬 파일로부터 모델 로드
- ⑤ 수치해석 옵션 설정
 - 모델 시간 간격, 초기 온도, 온도 측정 파일 경로 선택

- 4 -

III. 수치해석 페이지

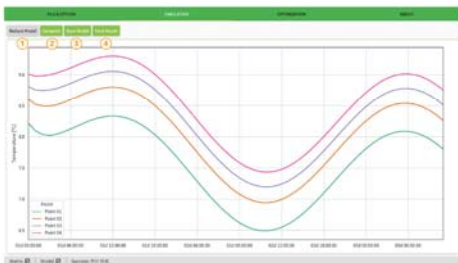
1. 레퍼런스 모델 수치해석



- ① 파일 및 옵션 입력 페이지에서 "Reference Models"를 선택한 경우
- ① "Compute" 버튼 선택
 - 레퍼런스 모델을 통해 수치해석을 시행하며, 동시에 시간별 온도 그래프 업데이트
- ② "Save Result" 버튼을 통해 결과를 저장할 경로 지정
 - ".csv" 형식으로 시간-위치별 온도 변화 데이터 저장

- 5 -

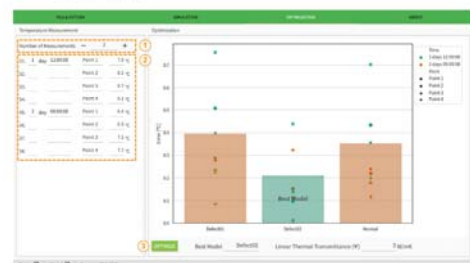
2. 단일 모델 수치해석 (행렬 및 모델 파일)



- ① 파일 및 옵션 입력 페이지에서 "Read Matrix" 또는 "Read Model"을 선택한 경우
- ① "Reduce Model" 버튼을 통해 모델 리덕션 시행
 - ① "Read Model" 모드의 경우 이미 리덕션된 모델을 불러오기 때문에 다시 리덕션 불가능
- ② "Compute" 버튼 선택
 - 레퍼런스 모델을 통해 수치해석을 시행하며, 동시에 시간별 온도 그래프 업데이트
- ③ "Save Model" 버튼을 통해 리덕션된 모델을 저장할 경로 지정
 - ".npz" 형식으로 리덕션 모델 데이터 저장
- ④ "Save Result" 버튼을 통해 결과를 저장할 경로 지정
 - ".csv" 형식으로 시간-위치별 온도 변화 데이터 저장

- 6 -

IV. 최적화 페이지



- ① 대상 관찰시공부위의 온도 실측 횟수 설정 ("Number of Measurements")
- ② 측정 시간-지점별 실측 온도 입력
 - 측정 시간은 시뮬레이션 시작 시간 ("1day 00:00:00")을 기준으로 함
 - 측정 지점은 "Target Nodes" 행렬의 입력 순서에 따라 "Point 1", "Point 2", ...로 지정됨
 - 입력 창의 개수는 온도 실측 횟수와 측정 지점 수에 따라 자동으로 조절
- ③ "Optimize" 버튼을 통해 최적 모델 분석
 - 패널 상단 그래프에 모델별 절대 오차 (경), RMSE (막대) 표시
 - 패널 하단에 최적 모델의 이름과 선행열관류율 표시

- 7 -

[그림 64] 프로그램 매뉴얼

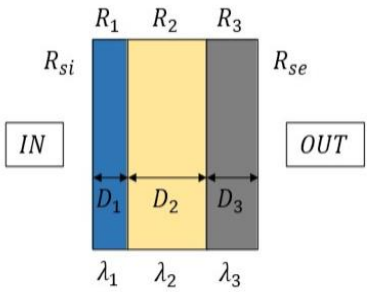
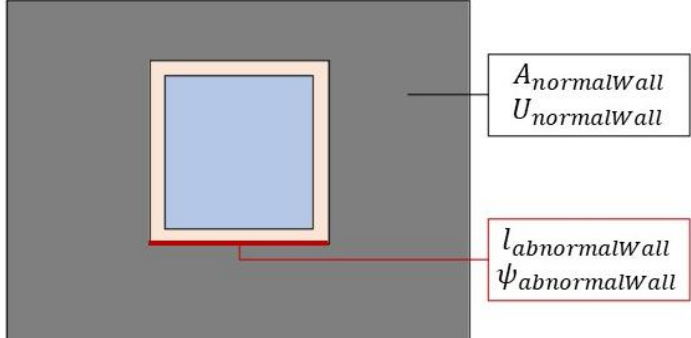
D-5) 선형열교계수에 따른 건물 에너지 성능 영향도 평가

[연구 수행 결과 요약] ① 영향도 평가 방법 개발 ② 에너지 성능 영향도 평가 4건	영향도 평가 방법론 [증빙 D-5-1] 성능 영향 분석 보고서 [증빙 D-5-2]
--	--

○ 영향도 평가 방법 개발

- 본 연구에서는 영향도 평가를 위해 열교 하자가 없는 벽체의 열관류율과 선형 열교를 반영한 벽체의 열관류율을 산출해야 함
- 열교 하자가 없는 벽체의 열관류율은 벽체 기준으로 양쪽의 실내·외 공기가 단위온도차일 때, 단위시간에 단위표면적을 지나 한쪽에서 다른 쪽으로 흐르는 열량으로 해석됨. 일반적으로 벽체의 열관류율을 구하기 위한 방정식은 다음 <표 98>과 같으며, 벽체의 열관류율 산정 시, 필요한 실내·외측 표면 열전달 저항은 건축물의 에너지절약설계기준을 준용함
- 선형 열교를 반영한 벽체의 열관류율을 구하기 위한 방정식은 다음 <표 98>과 같으며, 선형 열교 길이는 현장 열화상 측정을 통해 수집하고 선형열관류율은 개발된 프로그램을 활용하여 산출함. 선형열관류율과 선형 열교 길이에 따라 변화하는 것을 알 수 있음

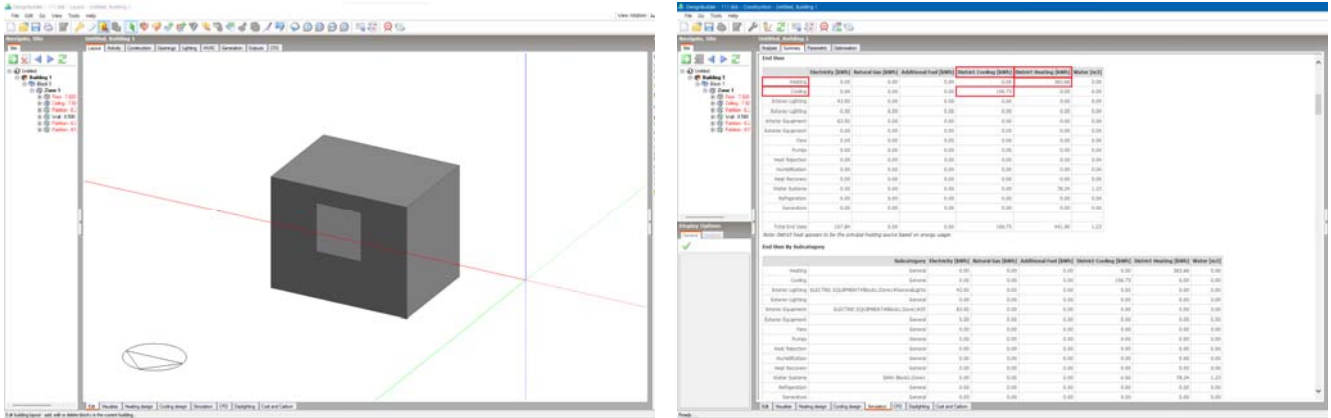
<표 98> 열관류율 산출법(열교 하자가 없는 벽체의 열관류율, 선형 열교를 반영한 벽체의 열관류율)

열교 하자가 없는 벽체의 열관류율	선형 열교를 반영한 벽체의 열관류율
$R = \frac{d}{\lambda}$ $U = \frac{1}{R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_{se}}$ R: 열전달 저항 [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$] U: 열관류율 [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$] d: 두께 [m] R_{si}: 실내측 표면 열전달 저항 [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$] R_{se}: 실외측 표면 열전달 저항 [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$]	$U_{Wall} = \frac{U_{normal\ Wall} \times A_{normal\ Wall} + \Psi_{abnormal\ Wall} \times l_{abnormal\ Wall}}{A_{Wall}}$ A: 면적 [m^2] U: 열관류율 [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$] l: 길이 [m] Ψ: 선형열관류율 [$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$]
	

<표 99> 열관류율 계산 시 적용되는 실내·외측 표면 열전달 저항

건물 부위	실내측 표면 열전달 저항 R_{si} [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$]	실외측 표면 열전달 저항 R_{se} [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$]	
		외기 간접	외기 직접
거실의 외벽	0.11	0.11	0.043

- ASHRAE 140 BESTEST 기준에 의해 공인된 에너지플러스(Energy Plus)를 기반으로 하는 디자인빌더(Design Builder)를 영향도 평가하기 위한 시뮬레이션으로 활용함
- 디자인빌더(DesignBuilder)는 LEED 및 ASHRAE 90.1 기반 템플릿이 내장되어 편리하게 모델링이 가능함. 동적 시뮬레이션으로써, 시간대별 기상데이터 활용, 실 운영 스케줄을 입력, 인접실에 관한 정보 입력이 가능하여 건축물 에너지사용량 분석의 정확성이 높은 장점이 있음



(a) 디자인빌더(DesignBuilder) 모델링 예시

(b) 디자인빌더(DesignBuilder) 시뮬레이션 결과 예시

[그림 65] 디자인빌더(DesignBuilder) 예시

- 창호 시공 하자가 발생한 공간을 모델링하기 위한 정보는 대상 건축물의 현장 조사와 도면자료를 활용함. 기상데이터와 창호 구성 정보, 실 운영정보, 경계 조건, 벽체 구성 정보를 입력 조건을 수집하여, <표 100> 과 같이 디자인빌더(DesignBuilder) 항목에 입력함

<표 100> 시뮬레이션 입력 조건

입력 조건	디자인빌더(DesignBuilder) 항목
기상데이터	Location_Template
창호 구성 정보	Openings_External windows
실 운영정보	Activity, HVAC
경계조건	Construction_Adjacency
벽체 구성 정보	Construction_External walls

- 영향도 평가를 위해 산출한 열교 하자가 없는 벽체의 열관류율과 선형 열교를 반영한 벽체의 열관류율을 변수로 입력하여 시뮬레이션을 수행함. 시뮬레이션은 Ideal Load Air System을 적용해 냉난방 요구량을 기준으로 비교함

<표 101> 시뮬레이션 입력 변수

입력 변수		디자인빌더(DesignBuilder) 항목
벽체의 열관류율	열교 하자가 없는 벽체의 열관류율	Construction_External walls
	선형 열교를 반영한 벽체의 열관류율	Construction_External walls

○ 에너지 성능 영향도 평가

- 창호시공부위 하자 부위의 영향도를 평가하기 위해 열화상 촬영의 허가를 득한 건물에서 창호하자부위를 확인함. 에너지성능 영향도 평가 대상 건물은 총 4개로 창호시공하자로 인한 연간 건물 에너지사용량 영향도를 분석하였고, 시뮬레이션 결과는 <표 102>와 같음
- ○○ 주공 14단지 아파트, ○○ 센트레빌 1단지의 경우, 선형 열교 값이 매우 낮아 대상 건축의 에너지사용량 영향도는 매우 낮은 것으로 분석됨
- 인천 ○○ 대학교의 경우, 난방은 연간 10.9 [kWh]로 2.43% 손실이 발생하며, 냉방은 연간 0.57 [kWh]만큼 증가하는 것으로 분석됨. ○○ 119안전센터의 경우, 난방은 연간 10.9 [kWh]로 2.43% 손실이 발생하며, 냉방은 연간 0.57 [kWh]만큼 증가하는 것으로 분석됨
- 인천 ○○ 대학교, ○○ 119안전센터의 경우, 선형열관류율이 높아 대상 건물의 에너지사용량 영향도는 높은 것으로 분석됨

<표 102> 에너지 성능 영향도 평가 결과

건물명		○○ 주공 14단지 아파트	○○ 센트레빌 1단지	인천 ○○대학교	○○ 119안전센터	
건물 개요	전경 사진					
	용도	공동주택	공동주택	교육 및 연구시설	제1종 근린생활시설	
	위치	서울특별시	인천시	인천시	서울특별시	
	준공연도	1989년	2013년	1964년	1992년	
	구조형식	철골철근콘크리트조	철골철근콘크리트조	철골철근콘크리트조	철골철근콘크리트조	
벽체 성능	열교 미반영 벽체 열관류율 (W/㎡K)		0.4550	0.1960	0.1600	0.2790
	선형 열관류율 (W/mK)		0.0213	0.0028	0.1700	0.1309
	열교 반영 벽체 열관류율 (W/㎡K)		0.4560	0.1970	0.1760	0.2880
영향도 평가	난방 에너지 사용량 (kWh)	열교 미반영	429.22	445.92	953.81	332.68
		열교 반영	429.73	446.31	969.40	336.57
		차이	+0.51 (+0.12%)	+0.39 (+0.09%)	+15.59 (+1.63%)	+3.89 (+1.17%)
	냉방 에너지 사용량 (kWh)	열교 미반영	91.73	215.66	545.09	89.75
		열교 반영	91.68	215.62	543.21	88.81
		차이	-0.05 (-0.05%)	-0.04 (-0.02%)	-1.88 (-0.34%)	-0.30 (-0.33%)

○ 핵심 성과 D. 소결

핵심 성과 D. 열화상을 이용한 창 주변 열교 분석 프로그램		
D-1	창과 벽의 3차원 도면 메쉬 생성 기술 개발	1. 창과 벽의 3차원 도면 특성 분석 완료 2. 창과 벽의 3차원 메쉬 생성 알고리즘 개발 완료
D-2	프로그램 입력 모듈 개발	1. 사용자 인터페이스 설계 완료 2. 행렬, 실내외 온도 등의 값을 입력할 수 있는 프로그램 입력부 개발 완료
D-3	프로그램 계산 및 출력 모듈 개발	1. 고속 수치모델 탑재 완료 2. 결과를 출력할 수 있는 프로그램 출력부 개발 완료
D-4	모듈 통합	1. 입력 모듈, 계산 모듈, 출력 모듈을 통합한 프로그램 개발 완료 2. 프로그램을 활용할 수 있도록 사용자 매뉴얼 개발 완료
D-5	선형열교계수에 따른 건물 에너지 성능 영향도 평가	1. 선형열교계수를 기반으로 건물의 에너지 성능을 평가할 수 있는 방법론 개발 완료 2. 실증 건물을 대상으로 에너지 성능 영향도 평가 4건 완료

[그림 66] 핵심성과 D. 소결

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

구분	세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	평가 목표 및 착안점	중빙	달성도
1차 연도 (2019)	열화상 매칭이 가능한 고속 계산 수치모델 개발	3차원 수치모델의 해석 모델 개발 전략 구축	열화상 패턴에 따른 계산영역 분류	계산영역의 일반화	[A-1-1]	100%
			계산 격자에 따른 민감도 및 서버영역 설정	창호 부위별 결과 영향도	[A-1-2]	100%
			3차원 모델의 열화상 구현 가능성 점검	Physibel을 통한 전열해석	-	100%
	최적화기법을 이용한 선형열교계수 도출 기술 개발	최적화 기법 베이스라인 구축	선형열교계수 정의 및 예비 시뮬레이션	테스트 시뮬레이션 전략 구축	[B-1-1]	100%
			열화상 및 수치해석 결과 패턴 비교 검증	수치모델의 적합성	[B-1-2]	100%
	창호시공부위 하자 평가를 위한 열화상 측정 방법론 개발	창호시공부위 하 자 열화상 패턴화	창호시공부위 하자 사례 수집	사례 100건 이상 수집	[C-1-1]	280%
			창호시공부위 열화상 패턴 분석	패턴 분석 결과의 일반화 정도	[C-1-2]	100%
			하자 부위 상세 열화상 측정 실시	10건 이상 상세 측정	[C-1-3]	100%
	열화상을 이용한 창호시공부위 하자 평가 프로그램 개발	3차원 도면 메쉬 생성 기술 개발	창과 벽의 3차원 도면 특성 분석	특성 분석 결과의 일반화 정도	[D-1-1]	100%
			메쉬 생성 알고리즘 개발	자동 메쉬 생성 여부	[D-1-2]	100%
2차 연도 (2020)	창호시공부위 하자 평가를 위한 열화상 측정 방법론 개발	열교 계수 산정을 위한 열화상 측정 방법론 제안	기존 열화상 측정 방법 분석	측정 방법 비교 보고서 1건	[C-2-1]	100%
			열화상 측정 환경 기준 수립	측정 환경 기준의 적합성	[C-2-2]	100%
			열화상 측정 절차 수립	측정 절차의 적합성	[C-2-3]	100%
		주요 열화상 및 해석 결과 DB화	데이터베이스 구축 전략 수립	DB 구축 전략의 합리성	[C-3-1]	100%
3차 연도 (2021)	창호시공부위 하자 평가를 위한 열화상 측정 방법론 개발	선형열교계수 현장 재연성 확인	실증 대상 선정	실증 대상 2건 이상 선정	[C-4-1]	100%
			열교계수 현장 재연성 확인	현장 재연성 15% 이내	[C-4-2]	100%
	열화상을 이용한 창호시공부위 하자 평가 프로그램 개발	프로그램 입력 모듈 개발	사용자 인터페이스 설계	사용자 인터페이스 설계도	[D-2-1]	100%
			프로그램 입력부 개발	프로그램 입력 모듈	[D-2-2]	100%
		계산 및 출력 모듈 개발	고속 최적수치모델 탑재	수치모델 동작 여부	[D-3-1]	100%
			프로그램 출력부 개발	프로그램 출력 모듈	[D-3-2]	100%
		모듈 통합	입력 계산 출력 모듈 통합	프로그램 저작권 등록 1건	[D-4-1]	100%
			프로그램 매뉴얼 개발	프로그램 사용자 매뉴얼 1건	[D-4-2]	100%
		건물 에너지 성능 영향도 평가	에너지 성능 평가 방법 개발	개발된 평가 방법의 합리성	[D-5-1]	100%
			에너지 성능 영향도 평가	성능 영향 분석 보고서 1건	[D-5-2]	100%

○ 타분야 방법론 건축분야 활용

- 제어 및 응용수학 분야에서 폭 넓게 사용하고 있는 리덕션 모델을 건물에너지 분야에서 활용하며, 현장 계산 시간을 줄이고 응용 프로그램까지 개발 완료

○ 정량적 열화상 분야 확대

- 열화상은 시각적 2D 결과를 제공하여, 온도 뿐 아니라 표면 패턴까지 확인할 수 있는 장점이 있어서 건축분야에서 정성적인 목적으로 활용되어 왔으나, 필요한 수치를 도출하는 정량적 분석은 제한적임. 본 연구는 모델 결합을 통해 정량적 분석을 확대할 수 있는 방법을 제안함

○ 창과 벽에서 발생하는 열교 관련 열화상 및 해석 결과 데이터베이스의 구축

- 건물에너지 분야에서 열화상 카메라를 이용하여 에너지 진단을 하려는 시도들이 있었으나, 관련 데이터베이스가 구축되어 있지 않아 개별 연구기관마다 산발적으로 구축하고 있음
- 전 세계적으로 열화상을 포함한 각종 영상으로 대규모 학습용 데이터를 구축하고자 하는 움직임이 있음. 본

연구에서는 이에 상응하여 창과 벽 접합부의 열교와 관련한 열화상에 대한 데이터베이스를 구축하고자 시도 하였으며, 280 장의 열화상을 포함하는 초기 데이터베이스를 구축함

- 기 구축한 데이터베이스는 인공지능 학습용 데이터로 활용할 수 있음. 본 연구에서는 해당 데이터베이스를 활용한 열교 인식 학습모델로 SCIE 논문 1건을 게재 완료함.

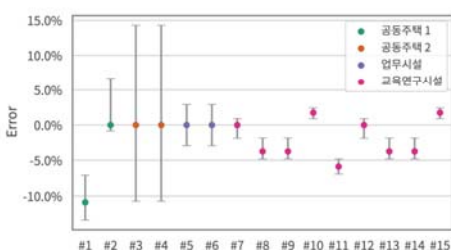
(2) 정량적 연구개발성과

- 연구개발기간 내 특허 등록 목표 건수 3건을 제외한 모든 항목에 대해 달성 또는 초과달성을 완료함. 현재 특허출원 건에 대한 심사가 진행 중인 상태로 특허 등록 심사결과에 따라 등록을 위한 추가적인 보완 및 노력을 지속할 예정임
- 연구과제 최종 평가 당시 Accept 상태의 논문 1건에 대하여 연구개발기간 종료 후 게재를 완료함

구분		목표	달성	달성도	비고
논문 게재	SCIE	2	3	150%	과제 종료 후 1편 게재
	KCI	3	3	100%	
학술회의 발표	국내	-	1	-	
특허	국내	출원	3	6	200%
		등록	3	1	33%
	국외	출원	1	1	100%
등록 성과물	소프트웨어	1	2	200%	1건 초과 달성
기타	시제품	1	1	100%	
	성과홍보	2	3	100%	1건 초과 달성
	열저리 창출	2	4	200%	2건 초과 달성

평가 항목	단위	비중 (%)	세계최고수준	연구 전 국내수준	개발 목표치	달성	평가 방법
			성능 수준	성능 수준			
재연실험 오차율	%	35	-	-	15.00	2.35	Field test
리덕션 모델 오차율	%	30	-	-	2.00	0.85	Simulation test
리덕션 모델 계산속도	배	10	-	-	100	9,800	Simulation test
현장측정 및 계산 소요시간	시간	25	-	-	1:00:00	0:02:56	Field test

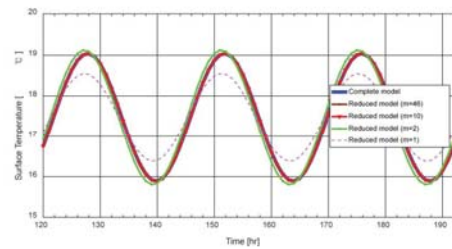
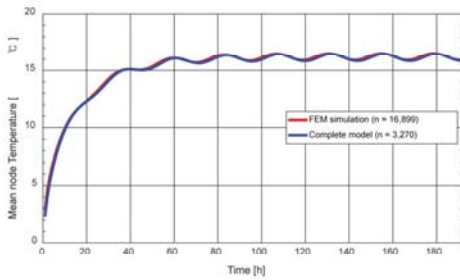
01 재연실험 오차율



다른 시점에 촬영한 열화상으로 결과 비교

- 전문가 자문을 통해 공동주택 2건, 업무시설 1건, 교육연구시설 1건을 실증 대상으로 선정
- 선정된 실증 대상에서 제안한 방법의 재연실험 오차율 검증
- 평균 오차 2.35%로, 제안한 방법의 재연성을 확보

02 리덕션 모델 오차율



FEM Simulation과 상태공간모델 비교

- FEM Simulation node 16,899, 상태공간모델 3,270차 비교
- FEM Simulation 결과 패턴을 상태공간 모델이 묘사함
- FEM Simulation 대비 상태공간모델 오차율 0.85%

상태공간모델과 리덕션모델 비교

- 상태공간모델 Basis Change를 통한 리덕션모델 구현
- 상태공간모델 3,270차 대비 리덕션모델 10차 오차율 0.004%
- 정량적 성능 수준 오차율 1% 달성 (계획 2%)

03 리덕션 모델 계산속도



FEM Simulation과 리덕션 모델 계산 속도 비교

- SCI 논문을 통한 리덕션 모델 계산 속도 검증
(FEM : 21,837sec, Reduce model : 0.002172 sec)
- 현장 적용성 검토를 위한 챔버 테스트서 계산 속도 추가 검증 완료
- 챔버 테스트 창-벽체 모델 1회 계산 시 FEM 388.6 sec,
리덕션모델 0.001923 sec로 계산속도 9,800배 향상
- 본 연구 프로세스와 같이 전체 모델에 대한 계산 시 9,800배
이상의 계산 속도 향상 가능

04 현장측정 및 계산 소요시간



실증 대상 별 촬영 및 계산 시간 측정

- 선정한 실증 대상 4건에 대해서 반사온도, 방사율 측정 및 열화상 촬영을 포함한 현장측정 시간과 프로그램 입력부터 결과 출력까지 계산 소요시간을 측정
- 평균 2분 56초, 목표 1시간 대비 시간을 대폭 감축

(3) 세부 정량적 연구개발성과

[과학적 성과]

□ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	열화상 현장 측정 방법에 따른 벽체 열관류율 계산 결과 비교 분석	한국건축친 환경설비학 회 논문집	김창민	13(5)	대한민국	한국건축친환 경설비학회	비SCIE	2019.10.01	1976-6783	100
2	현장측정 창-벽체 접합부 선형열관류율 도출을 위한 시뮬레이션 기초 연구	한국건축친 환경설비학 회 논문집	최재술	14(2)	대한민국	한국건축친환 경설비학회	비SCIE	2020.03.06	1976-6783	100
3	Automatic detection of linear thermal bridges from infrared thermal images using Neural Network	Applied Sciences	김창민	11(3)	스위스	MDPI	SCIE	2021.01.20	2076-3417	50
4	Detailed and fast calculation of wall surface temperatures near thermal bridge area	Case Studies in Thermal Engineering	최재술	25	네덜란드	Elsevier	SCIE	2021.03.09	2214-157X	100
5	열화상을 활용한 현장측정 기반의 창-벽체 접합부 선형열관류율 산출 방법	한국건축친 환경설비학 회 논문집	김창민	15(3)	대한민국	한국건축친환 경설비학회	비SCIE	2021.06.01	1976-6783	100
6	Automated classification of thermal defects in the building envelope using thermal and visible images	Quantitative InfraRed Thermograp hy Journal	김창민	-	영국	Taylor & Francis	SCIE	2022.01.31	1768-6733	100

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표 내용	발표자	발표 일시	장소	국명
1	2020년도 한국건축친환경설비학 회 추계학술발표대회	열화상 카메라를 이용한 건물 표면의 열전달계수 측정 프레임워크	장향인	2020.11.20	한국교통대학교 충주캠퍼스	대한민국

[기술적 성과]

□ 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신품종, 프로그램)

번호	구분	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원			등록			기여율	활용 여부
				출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호		
1	특허	열화상 촬영 이미지를 이용한 창호 시공부위 하자 평가 장치 및 그 방법	대한민국	인하대학 교산학협 력단	2019.10.28	10-2019- 0134508	인하대학 교산학협 력단	2021.01.05	10-22013 65	100	활용 예정
2	특허	열화상 및 실화상을 이용한 건물 외벽의 열적 이상 부위 판단 시스템과 그 방법	대한민국	(주)미래 환 경플랜건 축사사무 소	2020.10.15	10-2020- 0133228	-	-	-	100	활용 예정
3	특허	열화상 촬영 이미지를 이용하여 고속으로 창호 시공부위의 하자를 평가하는 방법	대한민국	인하대학 교산학협 력단	2020.10.19	10-2020- 0134866	-	-	-	100	활용 예정
4	특허	열화상 및 실화상을 이용한 건물 외벽의 열적 이상 부위 판단 시스템과 그 방법	PCT	(주)미래 환 경플랜건 축사사무 소	2021.04.08	PCT/KR20 21/00438 7	-	-	-	100	활용 예정
5	특허	건물 외피의 표면 열전달 계수 추정 시스템 및 방법	대한민국	(주)미래 환 경플랜건 축사사무 소	2021.12.20	10-2021- 0182681	-	-	-	100	활용 예정
6	특허	열화상과 고속수치모델을 이용한 창호-벽체 접합부 시공 상태 예측 장치 및 그 방법	대한민국	인하대학 교산학협 력단	2022.01.10	10-2022- 0003480	-	-	-	100	활용예정

○ 지식재산권 활용 유형

번호	제품화	방어	전용실시	통상실시	무상실시	매매/양도	상호실시	담보대출	투자	활용 예정	기타
										√	

□ 저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록번호	저작권자명	기여율
1	창호시공부위의 리덕션 수치모델 분석 프로그램	2021.11.01	주식회사 미래환경플랜건 축사사무소	2021.12.02	C-2021-052468	주식회사 미래환경플랜건 축사사무소	100
2	리덕션 수치모델을 통한 창호시공부위 하자평가 프로그램	2021.12.01	주식회사 미래환경플랜건 축사사무소	2022.01.11	C-2022-004399	주식회사 미래환경플랜건 축사사무소, 인하대학교 산학협력단	100

[경제적 성과]

□ 시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작업체명	설치장소	이용분야	사업화 소요 기간	인증기관 (해당 시)	인증일 (해당 시)
1	리덕션 수치모델을 통한 창호시공부위 하자평가 프로그램	2021.12.01	(주)미래환경플랜 건축사사무소	인하대학교 공과대학 2호관	시공 및 건설관리, 건물 에너지	3 년	-	-

□ 고용 창출

번호	사업화명	사업화 업체명	고용창출 인원(명)			합계(명)
			2019년	2020년	2021년	
1	창호시공부위 하자평가 프로그램	(주)미래환경플랜 건축사사무소	1	-	3	4
합계			1	-	3	4

[사회적 성과]

□ 전문 연구 인력 양성

번호	분류	연도	현황(명)										
			학위별				성별		지역별				
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타
1	인력양성	2020	-	1	-	-	-	1	-	-	1	-	-
2	인력양성	2022	-	1	-	-	1	-	1	-	-	-	-

□ 홍보 실적

번호	홍보 유형	매체명	제목	홍보일
1	간행본(학회지)	한국건축친환경 설비학회학회지	열화상기반 디지털 트윈 열교 분석 방법	2020.07
2	간행본(학회지)	한국건축친환경 설비학회학회지	열화상을 통한 정량적 열교 평가 가능성 고찰	2021.10
3	강습회	한국설비진단자 격인증원	2021 설비진단기술강습회 건물에너지의 열화상응용	2021.12.02

□ 포상 및 수상 실적

번호	종류	포상명	포상 내용	포상 대상	포상일	포상 기관
1	논문발표포상	우수논문발표상	논문발표우수	최재술, 김의종	2020.11.20.	한국건축친환경설 비학회
2	제31회 과학기술우수논문	과학기술우수논문상	과학기술논문우수	김의종	2021.09.10.	한국과학기술단체 총연합회

2) 목표 달성 수준

연구 개발 목표	달 성 내 용	달성도(%)
○ 열화상 매칭이 가능한 고속계산 수치모델 - 3차원 수치모델의 해석 모델 개발 전략 구축 - 열화상 해석을 위한 3차원 수치모델 개발 - 리더선 기술 적용 수치모델 개발	○ 계산영역의 일반화 방법 확인 ○ 창호 부위별 결과 영향도 분석 ○ Physibel을 통한 전열해석완료 ○ 3차원 수치모델 구축 ○ 입력데이터의 적합성 확인 ○ 기존모델 대비 오차율 1% 달성 ○ 챔버 실험 실시를 통한 적용성 검토	100%
○ 최적화 기법을 이용한 선형열교계수 도출 기술 - 열교계수 정의 및 시뮬레이션 - 열화상과 수치해석 패턴비교 - 필요 입력데이터 분석 - 시뮬레이션 적정기간 분석 - 열교계수도출	○ 테스트 시뮬레이션 전략 구축 ○ 열화상과 수치해석 패턴 100건 비교 ○ 필요 입력데이터 분석 완료 ○ 시뮬레이션 적정기간 분석 완료 ○ 통합모델개발완료 및 계산속도 9,800배향상	100%
○ 열교계수 산정을 위한 열화상 측정 방법론 - 창 주변 열교 열화상 패턴화 - 열교 계수 산정을 위한 열화상 측정 방법론 제안 - 주요 열화상 및 해석 결과 DB화 - 열화상을 통한 모델기반 열교계수 현장 재연성 확인	○ 창 주변 열교 열화상 사례 수집 280건 ○ 열화상 패턴 분석 사례 280건 ○ 열교 부위 상세 열화상 측정 10건 ○ 기존 열화상 측정 방법 분석 ○ 열화상 측정 환경 기준 수립 ○ 열화상 측정 절차 수립 ○ 데이터베이스 구축 전략 수립 ○ 열화상 DB 구축 ○ 실증 대상 선정 4건 ○ 열교계수 현장 재연성 평균 2.35%	100
○ 열화상을 이용한 창 주변 열교 분석 프로그램 - 창과 벽의 3차원 도면 메쉬 생성 기술 개발 - 프로그램 입력 모듈 개발 - 프로그램 계산 및 출력 모듈 개발 - 모듈 통합 - 선형열교계수에 따른 건물 에너지 성능 영향도 평가	○ 3차원 도면 특성 분석 ○ 메쉬 생성 알고리즘 개발 ○ 사용자 인터페이스 설계 ○ 프로그램 입력부 개발 ○ 고속 수치모델 탑재 ○ 프로그램 출력부 개발 ○ 입력 · 계산 · 출력 모듈 통합 ○ 프로그램 매뉴얼 개발 ○ 영향도 평가 방법 개발 ○ 에너지 성능 영향도 평가 4건	100

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)

1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

○ 특허 등록 계획 3건 대비 실적 1건

- 연구과제 수행 과정 서 3차년도 특허 등록 3건을 달성하기 위해 출원 3건을 진행하였으나 특허 등록 심사 기간이 본 과제수행 기간보다 길어짐에 따라 기간 내 모든 출원 건에 대한 등록을 완료하지 못함
-

2) 자체 보완활동

○ 특허 출원 추가 진행

- 연구 수행 기간 내 특허 등록 미 달성 2건에 대한 보완 활동으로 본 연구의 수행기관인 인하대학교 산학협력단과 (주)미래환경플랜 건축사사무소는 추가 출원 3건을 진행하였으며 과제 종료 후에도 특허 등록을 위한 활동을 지속할 예정임

○ 초과달성

- 특허 성과를 충족하지 못하였으나 그 외, SCI(E) 1건을 추가로 게재 완료하였으며 연구과제 종료 후 1건 투고 예정에 있음
 - 연구과제 수행 내용에 대해 홍보하는 활동을 지속적으로 수행하여왔으며 향후 본 과제의 핵심 성과를 기반으로 학술발표활동 및 홍보 가능한 활동을 수행할 예정임
-

3) 연구개발 과정의 성실성

○ 초과 달성 항목

- 정량적 연구성과 항목 9가지 (특허포함)중 특허 등록 1건을 제외한 모든 항목에 대해 목표를 달성하였으며 4개 항목에 대해 목표 대비 초과 달성한 바와 같이 연구개발 과정에서 주관기관과 공동기관이 협력하고 수행 연구 결과를 공유하기 위해 끊임없이 노력함

○ 수 상

- 정량적 연구성과 항목을 달성하는 과정에서 본 연구성과물에 대한 2건의 수상 실적이 발생함
-

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

- 표준 시방은 존재하지만, 시공품질이 다양하여 실제로도 하자 등이 빈번히 발생하고, 기존건축물의 경우 실제로도 열손실이 크게 발생하는 창호 접합부에 대하여, 최초로 정량적인 평가 방법을 제안하는 것으로 향후 열화상 이외에도 다양한 방법론을 통하여 이 분야의 방법론 고도화가 가능할 것으로 보임
 - 새로운 연구 대상 및 분야 개척
 - 리모델링 현장에서 실질적인 열성능 개선을 현장 평가로 확인 가능
- 열화상과 디지털 트윈의 결합
 - 열화상은 표면 온도를 시각적으로 확인할 수 있다는 장점이 있으나, 결과로 주어지는 표면온도외의 피사체 내부 및 경계 조건에 따른 영향을 직접적으로 확인할 수 없음
 - 열화상과 디지털 트윈의 결합은 표면 온도 매칭으로부터 내부 및 주변부 물성치 등의 주요 물리값과 현상을 유추할 수 있어서 다양한 관련 연구로 확대될 수 있음

6. 연구개발성과 관리 및 활용 계획

<연구 개발 성과의 활용 방안>

○ 현장적용 방안

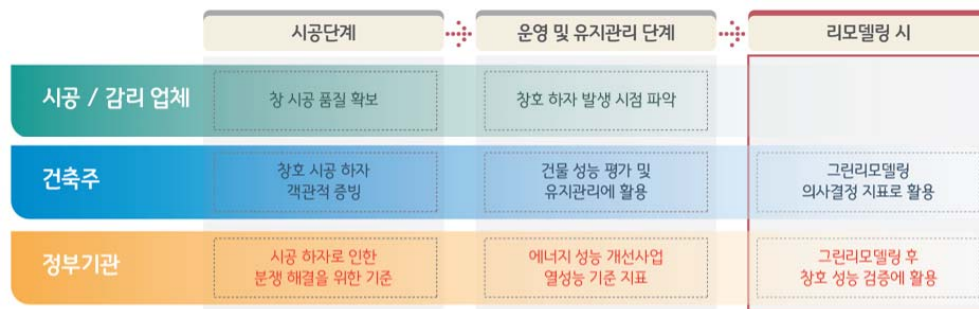
- 시공/감리 업체
 - 창 시공 후 열교 부위의 심각도를 바로 파악할 수 있음. 창 주변에 열교가 심할 경우 즉각 조치를 통한 창-벽체 접합부 단열 시공품질을 확보할 수 있음
 - 창 시공 후 하자평가 결과를 기록함으로써, 시공 시에 발생한 하자인지 유지관리 단계에서 발생한 문제인지에 대한 판단 방법으로 활용 가능함
 - 창호 시공과 관련한 가이드라인과 지침이 존재하지만, 현장 마다 다른 특성을 반영하기는 어려움. 시공 지침에 따른 시공과 현장측정을 병행함으로써 개별 현장 특성에 적합하도록 시공 지침의 개선이 가능함
- 건축주
 - 창호 시공과 관련된 하자의 경우 관련 전문 지식이 전무한 건축주는 하자를 증빙하기 어려움. 본 연구에서 개발한 기술을 통해 본인이 소유한 건물의 창호 시공 하자를 객관적으로 증빙 가능함.
 - 건축물의 시공완료 후 창호의 열교 부위 및 열 성능 신속 정확한 확인이 가능함에 따라 건물 성능평가 및 유지관리에 활용함
 - 리모델링 전·후 에너지 절감 효과에 대해 기존 대비 정확한 정보를 제공받아 기존 건축물의 그린리모델링 의사결정 지표로 활용 가능함
 - 본 연구 개발 성과를 현장적용하기 위한 구체적인 프로세스는 [그림 68]과 같음. 사용자는 본 연구에서 제안하는 열화상 측정 방법에 따라 열화상을 획득하며, 이를 개발 소프트웨어에 입력함. 소프트웨어는 입력된 정보에 따라 창호시공하자를 판단할 수 있는 선형열교계수를 산출함



[그림 68] 본 연구에서 제안하는 창호 시공 품질관리 프로세스

- 정부기관

- 하자로 인한 분쟁을 객관적인 기준을 통해 분쟁을 해결할 수 있음
- 본 연구과제의 최종결과물을 활용하여 시공완료 후 창호의 열성능에 대한 정확한 정보 확인이 가능함에 따라 그린리모델링 및 공공건축물 에너지 성능 개선사업에 열성능 기준을 마련하는 지표로서 활용 가능하며, 나아가 에너지 성능 평가를 효율적으로 수행 가능함
- 연구개발 결과를 관련기관과 협의를 통해 그린리모델링, 에너지성능 개선 사업에 지원한 공공건축물들을 대상으로 실제 적용하고, 개발한 시스템의 성능을 검증 및 공공목적으로 활용하는 것이 가능함



[그림 69] 연구 개발 성과 활용처

○ 개발기술의 실용화 및 제품화 방안

- 실용화 방안

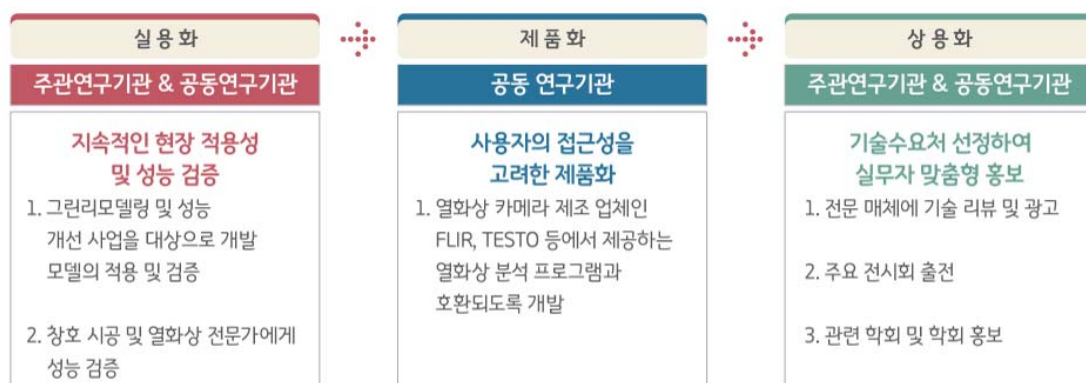
- 본 연구과제를 통해 개발한 기술을 실용화하기 위해 연구개발 과정과 종료 후 주관 연구기관에서 지속적으로 관련 사업 참여와 창-벽체 접합부의 단열성능평가를 필요로 하는 건축물 선정을 통해 개발기술의 현장 적용성 및 성능을 검증함
- 검증과정에서 창호 시공 및 열화상 전문가의 평가를 통해 개발기술의 성능 검증 및 결과의 신뢰도를 확보함

- 제품화 방안

- 기존 열화상 카메라 사용자의 접근성을 고려하여 대표적인 열화상 카메라 제조업체인 FLIR, TESTO에서 제공하는 열화상 분석 프로그램과 호환성을 높이는 활동을 계획하고 있으며 개발완료한 시제품을 각 업체의 유통채널을 통해서 기능을 홍보하고자 함

- 상용화 방안

- 건물 사용자, 시공 업체, 정부기관 등 모든 사용자가 쉽게 접근하여 활용할 수 있는 시스템으로 개발하고 사용자 연구 과정에서 작성한 매뉴얼을 보급함
- 시작품 제작 후 실무 적용 가능한 기술수요처를 선정하여 우선 사용기회 제공 및 제품의 개선사항 수집 후 실무자 맞춤형 성능개선으로 실용성을 확보함



[그림 70] 개발기술의 실용화 계획

○ 향후 연구 개발 방안

- 본 연구개발과제에서는 열화상과 고속수치모델의 디지털 트윈을 통한 현장 창-벽체 접합부의 열교 수준을 분석하는 것으로 실내·외 온도가 일정하게 유지되는 안정화 상태가 아닌 실내·외 온도가 동적으로 변화하는 환경 조건에서 적용 가능성을 확인하고 증명함
- 다만, 연구개발기술의 적용성 및 활용성 제고를 위해 기술의 개선 필요성이 있으며 현재 단계에서 제한되는 사항과 이를 개선하기 위한 방향은 아래와 같음

• 개발기술의 적용 제한 사항

- 창-벽체로 일체화된 구조체의 결합 방식 및 접합부 주변 벽체의 마감재에 따른 분석방법의 세분화가 필요함. 현재 기술은 창이 실내측 벽면에 가깝게 위치한 구조를 중심으로 개발 및 실증이 진행된 상태로 다양한 창-벽체 구조에 대한 적용 가능성 추가 확인이 필요함
- 창-벽체 구조물 중 창면적비가 높은 경우 접합부 단열 수준에 따른 인접 벽체 열 거동 변화 및 열화상 촬영이 어려워 본 연구개발 기술의 적용이 제한됨
- 창-벽체 구조물에 미관상 이유로 대리석 및 석재 마감이 된 경우 부재의 열전도율이 매우 높아 실내·외 온도차에 따른 열화상 변화가 적어 수치모델을 통한 열교 분석에 어려움이 있음. 따라서 오차를 줄이기 위해 열전대 활용 또는 열화상 측정 횟수를 증가하는 방향을 권장함
- 개발기술의 실증은 수행일정에 맞추어 겨울철에 진행되어 봄, 가을의 일교차가 큰 계절 조건에서 기술 적용 가능 여부를 확인하지 못함. 따라서 적용 가능한 기후 조건을 구체화하는 연구가 필요함
- 개발한 수치모델은 창-벽체가 일사에 노출이 적은 환경에 적용하였을 때 동적 실내·외 온도 변화에 따른 열 거동 묘사율이 높으나 일사가 강하게 유입되는 남측을 대상으로 적용하거나 인접 건물이 적어 일사에 직접 노출되는 경우에 대해서 추가적인 연구개발이 필요함
- 기류에 의한 변화 및 열화상 촬영 영향을 최소화하기 위해 본 연구는 실내 열화상 촬영 및 수치모델 분석을 진행함. 따라서 기류 변화에 따른 열화상 영향을 분석 및 보정하는 기술, 수치모델에 기류 변화를 반영하는 방법을 연구할 필요가 있음

• 수치 모델 적용성 및 정확도 향상을 위한 연구 개발

- 연구 개발한 고속 수치모델은 지속적인 연구를 통해 정확도 향상의 가능성이 높음. 특히, 다양한 환경 조건에 적용할 수 있도록 수치 모델의 입력데이터 개선의 필요성이 있다고 판단됨.
- 따라서 향후 현장 창-벽체의 일사량 및 기류 데이터를 확보하기 위한 측정법, 모델 입력방법, 모델 적용 방법에 관한 연구를 진행하여 수치모델의 적용성과 정확도를 증가시키는 연구를 진행할 예정임
- 지속적인 현장 데이터 확보를 통해 AI, 머신러닝과 같이 학습기반의 분석체계 마련을 통해 활용도 향상 가능성을 확인할 예정임
- 열화상 이미지에 영향을 미치는 환경 조건을 최대한 배제하기 위해 정량적 열화상 기법 중 Pulsed Thermography(PT)를 적용 및 도입하기 위한 연구를 진행 중임

• 개발기술의 활용성 제고를 위한 지속적 연구 활동

- 본 연구과제에서는 현장 즉각적 분석을 위한 열화상 측정법, 고속수치모델, 수치모델을 탑재한 프로그램 개발을 완료함에 따라 현장기반의 창-벽체 열교 하자 분석의 큰 틀을 마련하였다고 판단하고 있으나 세부 사항에 대한 보완을 통해 활용성 제고가 가능할 것으로 사료됨
- 개발기술의 활용성 제고를 위해 다양한 현장에 프로세스를 적용하여 분석결과를 토대로 창-벽체 구조체별 측정 부위, 측정 필요기간, 측정 가능 환경 조건을 구체화한 측정법을 제시하고 수치모델 및 프로그램 업데이트를 진행함과 동시에 사용자 매뉴얼을 제작 및 최신화할 예정임
- 현행 공동주택 하자판정기준 및 결로방지 설계기준의 한계점을 보완할 수 있는 동적 평가 방법 또는 도구

로 반영될 수 있도록 연구개발 및 홍보 활동을 지속할 예정임

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업 ‘**리덕션 수치모델을 이용한 열화상 디지털 트윈 기반의 창호시공부위 하자평가**’ 연구개발과제 최종보고서이다.
2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 국토교통부(국토교통과학기술진흥원)에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업의 결과임을 밝혀야 한다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 된다.