18CTAP-C129787-02

15층 이상 고층건물의 깊이 50mm급 구조체 손상 평가를 위한 UAV 및 열화상 모듈 기반 SMART SKY EYE 기술 개발

최종보고서

2019

국토교통과학기술진흥원

국토교통부

보안 과제( ), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개( )발간등록번호()

국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종보고서

R&D / 18CTAP-C129787-02

15층 이상 고층건물의 깊이 50mm급 구조체 손상 평가를 위한 UAV 및 열화상 모듈 기반 SMART SKY EYE 기술 개발 최종보고서

2019. 03. 27.

주관연구기관 / 고려대학교 산학협력단

국 토 교 통 부

(전문기관) 국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

'15층 이상 고층건물의 깊이 50mm급 구조체 손상 평가를 위한 UAV 및 열화상 모듈 기반 SM ART SKY EYE 기술 개발'(연구개발 기간 : 2017. 04. 01~ 2018. 12. 31) 과제의 최종보고서의 발간 및 배포를 완료하였습니다.

2019. 03. 27.

주관연구기관명 : 고려대학교 산학협력단 (대표자) 허준 (인)

주관연구기관책임자: 주영규

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	18CTAP-C129787-02	해당 단계 연구 기간	2018. 01. 01 ~ 2018. 12. 31	단계구분	(2)/(2)
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	기초원천			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	15층 이상 고층건물의 깊이 50㎜급 구조체 손상 평가를 위한 UAV 및 열화상 모듈 기반 SMART SKY EYE 기술 개발			
연구책임자		해당단계 참여연구원 수	총: 11명 내부: 11명 외부: 0명	해당단계 연구비	정부: 201,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 201,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 11명 내부: 11명 외부: 0명	총 연구비	정부: 370,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 370,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	고려대학교 산학협력단			참여기업명: -	
국제공동연구	상대국명: -			상대국 연구기관명: -	
위탁연구	연구기관명: -			연구책임자: -	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 갈음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설·장비	기술요약 정보	소프트웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명정보	생물자원	정보	실물
등록·기탁 번호	4	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

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

요약 | 보고서 면수 : 113

본 연구는 기존 안전진단 기술에 비해 신속하고 객관적인 안전성 평가를 위하여 UAV와 적외선 열화상 카메라를 이용한 SMART SKY EYE 기술을 개발하는 것이 목표로, 이를 정리하면 다음과 같다.

1. 적외선 열화상 기법을 활용한 구조물 결함 평가 방안 국내외 사례 조사 10건
2. 열화상 이미지 및 머신러닝 알고리즘을 활용한 균열부 온도와 깊이 사이의 경향성 파악 실험 및 균열부 깊이 예측 알고리즘 개발
3. 이미지 프로세싱 기반 건축물의 균열 현황도, 기울기 및 침하량 측정 기법 제시
4. 실제 건축물 및 긴급 위험도 평가에 적용하여 무인비행체 긴급 위험도 평가 프로세스를 확립 및 SMART SKY EYE 기술의 적용가능성 검증
5. 실제 건축물 대상 UAV 및 열화상 모듈을 이용한 건축물 균열 깊이 평가 적용가능성 검증

[단계별 기술 적용 계획]

1단계 (완료)	2단계 (완료)	3단계 (완료)	4단계 (완료)
초기 시험 : 옹벽	저층빌라	중층아파트	고층아파트

요약서

연구의 목적 및 내용	■ **구조물 손상 폭과 깊이에 관련된 열화상 이미지 계측 사례 조사** 국내·외 열화상 이미지를 이용한 콘크리트 균열 계측 및 무인비행체를 이용한 구조물 손상 점검 관련 사례 조사 ■ **균열 깊이 평가를 위한 열화상 이미지 계측 실험** 균열 크기에 따른 콘크리트 시험체 내 열 영향 해석을 진행하여 적절한 시험체 형상을 결정, 10㎜씩 깊이가 증가하는 콘크리트 균열 모사 실험체 제작 및 열화상 카메라 촬영을 진행하여 외부 환경 조건 기록과 동시에 균열부의 온도를 측정 ■ **열화상 이미지 빅데이터 화** 열화상 카메라를 통해 획득한 균열, 용접 및 볼트 결함부 온도 데이터와 기타 장비로 측정한 외기 조건 데이터와 종합하여 빅데이터 구축 열화상 카메라 촬영 시 영향을 미치는 변수들에 대해 분석 ■ **열화상 이미지 빅데이터 분석** 획득한 열화상 데이터를 이용하여 결함부의 온도 값과 깊이에 대한 경향성을 파악할 수 있는 알고리즘을 개발하여 균열부의 온도로부터 깊이를 예측 ■ **무인비행체 기술을 적용한 건축물의 일부 손상구간 점검** 고해상도 카메라를 탑재한 무인비행체를 이용하여 실제 건축물에 대해 촬영을 진행하고 건축물에 대해 진행되었던 기존 점검기술과 비교하여 SMART SKY EYE 기술의 적용가능성 검증
연구개발성과	■ **기술 실용화 성과** 건축물의 균열 길이, 폭, 면적 등 정량적 균열 정보 계측 알고리즘 개발 1건 균열부 온도데이터를 통한 균열 깊이 평가 알고리즘 개발 1건 무인비행체를 이용한 건축물 일부 손상구간 점검 3건 ■ **연구성과** -국외 논문 게재 1건 - 국내 논문 게재 2건 - 특허 출원 2건 - 학회 발표 4건 - 관련 인력양성 4건 - 포상 2건
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	■ 노후된 공동주택의 조기 긴급 안전 점검 및 진단 ■ 구조물 붕괴 시 막대한 피해가 예상되는 다중이용시설 점검 ■ 구조물 손상 점검 및 비파괴 검사 기술의 국산화 및 시장개척 ■ 기존 안전점검 및 안전진단 업체 ■ 통일 후 북한 내 노후 시설물에 대한 신속하고 객관적인 점검 ■ 구조물 유지관리 분야의 비용절감 ■ 인력에 의존한 고소작업 최소화를 통한 점검자의 안전 확보

국문핵심어 (5개 이내)	무인비행체	적외선 열화상	빅데이터	구조물 건전도	긴급 위험도 평가
영문핵심어 (5개 이내)	UAV(Unmanned Aerial Vehicle)	Infrared thermograph	BIG DATA	SHM(Structural Health Monitoring)	Rapid Risk Assessment

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 5
   1.1. 연구개발 목적 ····· 5
   1.2. 연구개발의 필요성 ····· 7
   1.3. 연구개발 범위 ····· 10

2. 연구 수행 내용 및 성과 ····· 13
   2.1 안전점검 및 정밀안전진단 ····· 13
   2.2 무인비행체를 활용한 구조물 안전점검 ····· 20
   2.3 SMART SKY EYE 시스템 ····· 26
   2.4 건축물 육안조사와 외관조사망도 작성 프로토콜 ····· 37
   2.5 적외선 열화상 기법을 활용한 구조 결함 평가법 ····· 53
   2.6 무인비행체를 활용한 건축물의 긴급 안전도 평가 ····· 82
   2.7 건축물 균열 깊이 평가 ····· 98
   2.8 결론 ····· 106
   2.9 연구개발과제의 연구실적 ····· 108

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 110

4. 연구개발성과의 활용 계획 ····· 115

5. 참고 문헌 ····· 116

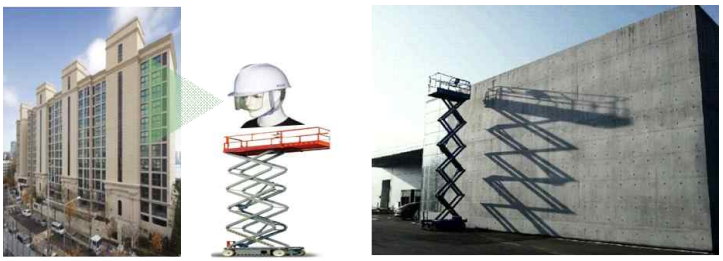
1. 연구개발과제의 개요

1.1. 연구개발 목적

무인비행체, 영상장비, 3D Modeling를 이용하여 건축물의 손상정도를 효율적으로 파악하는 SMART SKY EYE 기술을 제시하고, 기존의 방법과 비교하여 그 타당성을 검증함

가. 무인비행체를 이용한 건축물 안전성 평가 시 필요 요소 기출 도출 및 프로세스 확립

- 무인비행체를 이용하여 건축물에 대해 결함 조사를 실시할 시 확인 가능한 결함 종류를 선정
- 무인비행체로 기존 방식보다 효율적인 건축물의 결함 측정 기법에 대해 연구
- 건축물의 결함을 평가하기 위한 최적의 결함 평가 프로세스를 확립



[그림 1.1] 인력에 의존한 기존 안전점검

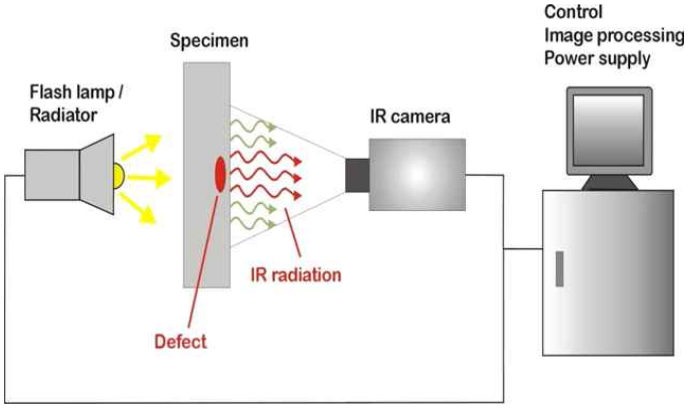


[그림 1.2] 무인비행체를 이용한 구조물 안정성 평가

나. 알고리즘 개발을 통한 건축물 이미지 기반 결함 측정

- 콘크리트 균열, 강재 접합부의 결함에 대해 모사체를 제작
- 제작한 모사체에 대해 온도 데이터를 획득하고 외부 환경과 함께 빅데이터 구축
- 구축한 빅데이터를 이용하여 결함부 온도를 통해 결함 계측이 가능한 알고리즘 개발

- 건축물의 외관조사망도 작성 및 정량적 균열 정보 측정 알고리즘 개발



[그림 1.3] 이미지 기반 결함 측정 방법 개념도

다. 무인비행체 기술을 기존 긴급 위험도 평가 기준에 적용하여 실제 적용 가능성 검증

- P시 지진 피해 시 사용한 긴급 위험도 평가 항목들에 대해 측정 기법 제시
- 실제 지진 피해 건축물에 대해 긴급 위험도 평가 실시
- 실제 긴급 위험도 평가 결과와 무인비행체를 이용한 긴급 위험도 평가와 결과 비교



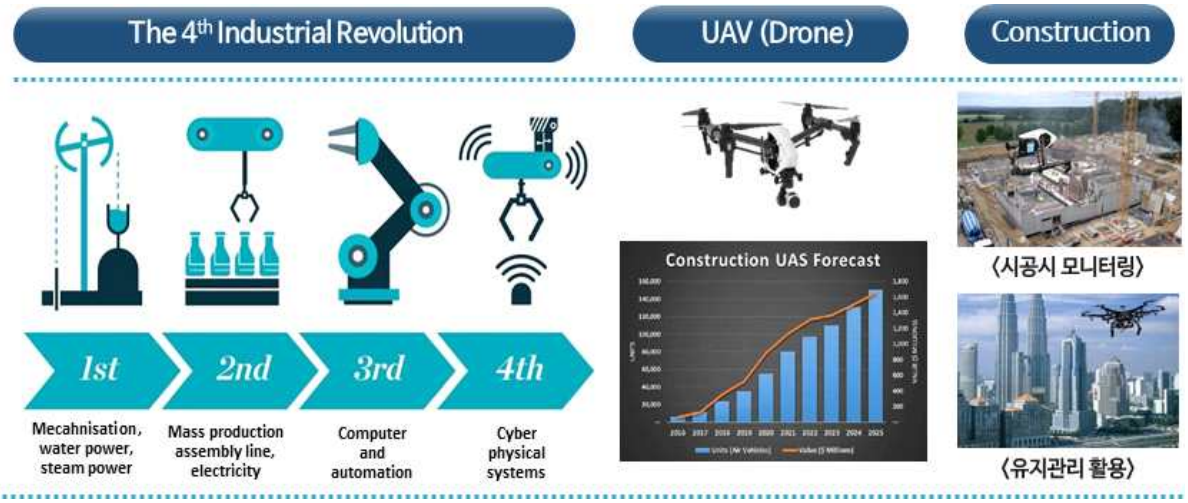
[그림 1.4] 기존 및 제안한 긴급 위험도 평가 비교

1.2 연구개발의 필요성

가. 4차 산업혁명과 드론 활용도 증대

- 정보통신 기술(ICT)의 융합으로 이루어 낸 제 4차 산업혁명 시대의 도래와 함께 인공지능(AI), 빅데이터(BIG-DATA), 무인비행체(Drone) 등의 다양한 기술들이 각 산업분야에서 활용도 증가 추세

- 최근 정부는 드론산업의 활성화를 위한 『드론산업 발전 기본계획(2017~2026)』을 수립, 국가·공공기관의 드론 활용분야에 5년간 약 3,700대 수요 발굴을 계획



[그림 1.5] 제 4차 산업 혁명과 드론기술

나. 산업별 드론 활용도 전망

- Teal Group과 EuroConsult에서 조사한 활용분야별 2020년 전 세계 드론 시장 전망에 따르면 건설(인프라 점검 및 시공) 시장을 향후 10년간 세계적으로 가장 상업화 가능성이 높은 분야로 전망함 (Teal Group Corporation, 2016; EuroConsult, 2016)

- 건설 분야에서의 드론 활용은 크게 시공 분야와 인프라 점검으로 나뉨, 이 중 인프라 점검 부분에 있어서는 국내 무인기 시장에서 성장세가 두드러지며, 공공수요가 다수 있는 등 상당 부분 기술적 잠재력이 높다고 평가됨

- 국내의 건설 분야 드론 활용 연구는 현재 미흡한 실정이며, 특히 인프라 점검에 있어서 단순 촬영 단계를 넘는 데이터 분석 S/W 기술 연구, 손상 부분 검출 기술 연구는 향후 효율적인 드론 활용 연구에 필요하나 국내 기술이 부족한 상황

[표 1.1] 활용분야별 2020년 전 세계 운용 대수

활용분야	Teal Group 전망	EuroConsult 전망	특성
건설 인프라 점검 및 사공	56,000	45,000	상업화 가능성이 가장 큼
에너지	26,000	18,000	빠른 현장 활용 가능
농업	56,000	130,000	현재 가장 큰 시장
통신	400	-	운용대수도 작고, 우리나라 실정과 다소 맞지 않음
보험	75,000	-	미국 위주로 시장형성, 영상과 활용 형태 유사
영상	130,000	41,000	초기에 성숙된 시장
수송	예측불가	-	가능성이 높으나 장기 소요
감시 / 방재	8,000	10,000	공공 수요위주

- 현재의 인프라 점검방식은 “시설물의 안전관리에 관한 특별법”에 의거하여 안전점검 및 정밀안전진단을 실시함, 그러나 재난상황에서 광역 · 복합적 피해 발생 시 기존의 안전점검 방법으로는 단시간 많은 인원과 비용의 소요가 요구될 것으로 예상됨. (Duque, 2017) 따라서 정밀한 안전진단의 필요 유무를 확인하고 신속하고 경제적인 방법으로 건축물의 안전성을 예진할 수 있는 기술이 요구됨.

- 최근 발생한 포항지진(규모 5.4)과 경주지진(규모 5.8)은 한반도의 강진 가능성을 시사함

- 현재 전국적으로 노후 건축물은 25년 이상 건축물 44.2%, 30년 이상 건축물 36.0%로 건축물의 노후화에 대한 대비책이 요구됨

- 특히 공동주택의 경우 국내 특성상 전체 주택재고에서 공동주택이 차지하는 비율이 높아짐에 따라 국가적으로 공동주택의 효율적 · 체계적인 관리가 필수적이므로 건축물의 장수명화를 위한 유지관리 기술의 선진화가 요구됨

- 안전진단의 빈도 및 필요성이 낮은 민간 시설물의 경우에도 시설물을 사용하는 인원의 인명·재산 피해를 최소화하기 위해 구조물 안전성 평가는 필수적임. 따라서 민간 시설물 또한 구조물 결함이 발생할 경우 정밀 안전진단의 필요유무를 확인하고 개괄적인 안전성을 평가할 수 있는 예진 기술이 활용성이 높을 것으로 판단됨

[표 1.2] 건설 분야 드론 활용 시장

활용분야	드론 활용법	시장 잠재력
빌딩, 교량 및 댐 점검	비디오 카메라 또는 열화상 모듈을 활용한 점검	매우 높음
철도 및 도로 점검	역 구조, 철도 및 도로 안전 등 점검	높음
통신망 점검	셀룰러 타워 점검, 라디오 플래닝 및 가시선 검사	보통
건설현장 상황 촬영	건설현장의 고해상도 실시간 모니터링	매우 높음
건설현장 활용	3D 지도를 활용한 건설 진행 상황 및 품질 점검	높음
용적 탐사	토양 및 시멘트의 용적 및 움직임 추적	낮음

[표 1.3] 공공부문 드론 활용 인프라 점검 사례

기관	용도	내용
한국시설 안전공단	시설물 유지관리	· 교량, 댐 등 시설물 점검에 사용 · 비탈면 변위 측정을 통한 낙석 위험구간 설정
한국도로공사	교량점검	· 바다나 수면 위의 교량 하부 안전점검에 사용 · 도로 포장 파손된 포트홀 측정, 3차원 모델링
한국전력공사	설비점검	· 철탑 점검용으로 사용 · 전신주 점검용으로 활용
해양수산부	항만시설물 점검	· 항만시설물 안전진단 · 항로표지 시설 유지관리
국토교통부 수자원정책국	현장조사	· 수해 등 발생 시 신속한 현장조사(녹조, 시설물) · 제방·호안 유지상태, 수문·다기능보 등 정비상태
한국철도공사	교량, 송전선 점검	· 철도교량, 송전선로 등 인력점검 취약한 철도시설 시설점검 및 감시용 운용

1.3 연구개발 범위

- 기존의 무인비행체 활용 기술과 안전점검 및 정밀안전진단 기술에 대한 국내·외 연구 동향을 분석하고, 각 요소 기술을 구체화하여 발전시킨 후 실제 건축물에 적용을 통한 연구로 검증 및 고안함

- 요소 기술로 무인비행체를 활용한 외관진단 기술, 상태검사 기술, 평가 기술로 나누어 연구를 진행하였으며 무인비행체를 활용한 외관진단 기술로는 건축물 점검을 위한 무인비행체 측정 및 관련 데이터 정리, 무인비행체 측정정보 기반 외관조사망도 작성 기술을 개발함

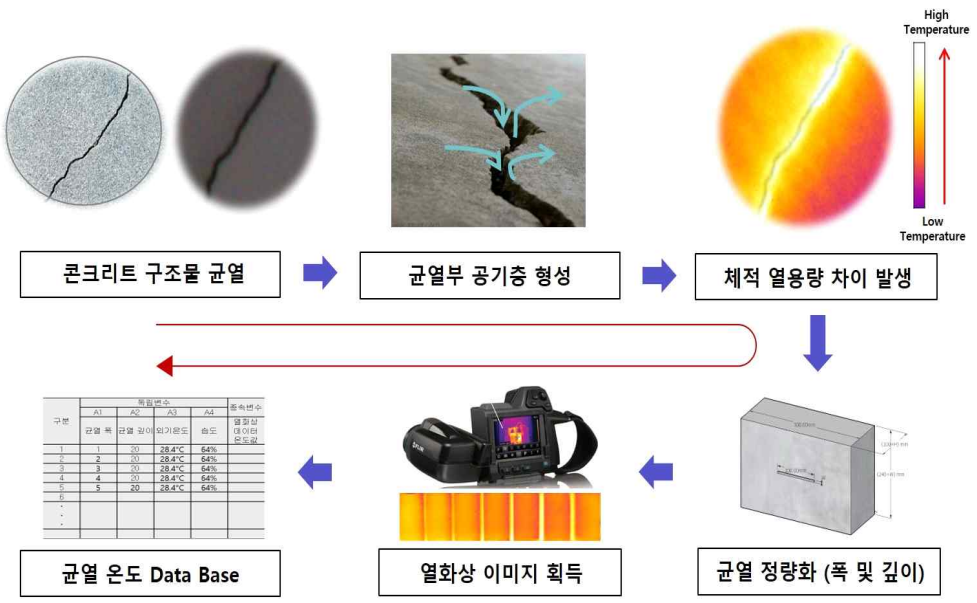
- 상태검사 기술로는 콘크리트 균열 정보(길이, 폭 및 깊이) 정량화 기술, 콘크리트 박락 및 백태 정량화 기술, 철골 접합부 결함 검출 기술을 연구하였으며 이를 통해서 기존 지진 후 피해 건축물 긴급 위험도 평가법의 적용을 통해 건축물의 신속한 건전도 점검을 실시하고 3단계로 분류하여 안전 상태를 판정함

[표 1.4] 연차별 연구목표 및 내용

연차	연구목표	주요연구내용
1차년도	구조물 손상 정보 계측을 위한 실험 및 측정값 빅데이터화	■ **국내·외 사례 조사** - 열화상 이미지를 활용한 결함 촬영 사례 조사 - 무인비행체를 활용한 건축물 손상 점검 사례 조사 ■ **열화상 이미지 계측 실험** - 프로그램을 이용한 열 영향 반경 해석 - 균열 모사체 및 접합부 결함 모사체 제작 - 최적 촬영 계획 수립 ■ **열화상 이미지 빅데이터화** - 외부 환경을 고려한 결함부 온도데이터 빅데이터화
2차년도	빅데이터 분석 및 무인비행체 기술을 이용한 건축물 일부 손상구간 점검	■ **결함 측정 알고리즘 개발** - 결함 정도, 온도, 기타 변수들 사이의 상관관계 도출 - 머신러닝 기반 알고리즘으로 결함 예측 - 균열의 정량적 정보 측정이 가능한 알고리즘 개발 ■ **무인비행체를 이용한 건축물 긴급 위험도 평가** - 무인비행체를 이용한 긴급 위험도 평가 프로세스 제시 - 무인비행체를 이용한 건축물 외관조사망도 작성 - 기존 건축물 결함 평가 보고서와 비교 검토 - 국내·외 긴급 위험도 평가법 조사 - 실제 지진 피해 건축물에 대해 기술 적용 - 무인비행체를 이용한 긴급 위험도 평가 결과 도출

■ 핵심 연구성과

정의	무인비행체와 열화상 모듈을 활용한 건축물 긴급 위험도 평가 기법
목적	무인비행체를 활용한 실화상 및 열화상 이미지 기반 건축물 긴급 위험도 평가
성능목표	· 기존기술 수준 - 인력에 의존한 건축물 결함 측정 및 평가 (시설물유지관리에 관한 특별법) · 개발기술 수준 - 열화상 기법을 활용한 50mm급 균열 깊이의 측정 기법 개발 - 무인비행체를 이용한 15층 높이의 구조물에 대한 결함 측정 기술 획득
성과달성 책임자 (소속기관)	주영규(고려대학교)
소요기간	'17.04 ~ 18.12'
성과달성 확인방법	① 열화상 기법을 활용한 50mm급 균열 깊이의 측정 - 열화상 기법을 활용하여 콘크리트 모의 균열 실험체의 균열 깊이 측정 실험을 수행하고, 빅데이터를 구축한 뒤 머신러닝을 통해 균열 깊이 알고리즘을 구축. 본 알고리즘의 예측 정확도 검토를 통해 검증.



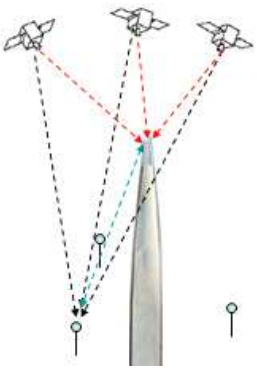
[그림 1.6] 열화상 이미지 기반 결함 측정 기법

② 고층아파트에 대한 결함 측정 기술

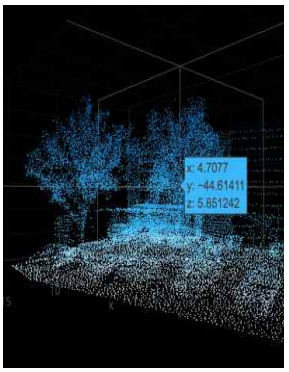
- 고층아파트 규모의 실제 건축물에 대해 무인비행체 활용 결함 조사 실시, 결과 값을 실제 결함 측정 결과와 비교를 통해 오차율 계산 및 신뢰성 검토



(a) 무인비행체의 건축물 비행 촬영



(b) 심각 측량법 통한 위치정보 획득



(c)포인트 클라우드 내 GPS 데이터 저장

[그림 1.7] 무인비행체 기반 건축물 결함 측정 기술

- 15층 높이의 고층아파트에 대한 적용을 목표로 초기 시험 대상인 옹벽부터, 저층아파트, 중층아파트, 고층아파트까지 시범적용을 실시하였으며, 기존 기술들과 비교하여 활용성을 확인하였음.
- 시범적용 당시 사용했던 손상 측정 기법들을 활용하여 고층아파트에 대한 손상 점검을 실시하고 저층 규모에서 고층 아파트까지 SMART SKY EYE 기술의 적용가능성을 파악



1단계 : 옹벽



2단계 : 빌라 (3층 규모)



2단계 : 저층아파트 (5층 규모)

[그림 1.8] 기술 적용 건축물 사례

[표 1.5] 단계별 기술 적용 계획

1단계 (완료)	2단계 (완료)	3단계 (완료)	4단계 (완료)
초기 시험 : 옹벽	빌라 (3층 규모)	저층아파트 (5층 규모)	고층아파트 (10층 규모)

2. 연구수행내용 및 성과

본 연구에서는 기존 안전점검 방식과 평가기준을 무인비행체 기술과 융합하여 건축물의 성능과 안전성을 평가하는 새로운 무인비행체와 열화상 모듈을 이용한 건축물의 긴급 결함탐지 기술인 SMART SKY EYE System을 제안하고자 한다.

무인비행체와 열화상 모듈을 이용한 건축물의 긴급 결함탐지기술 개발을 수행하기에 앞서 구조물 안전진단, 무인비행체를 활용한 구조물 안전점검, 적외선 열화상 기법의 연구동향 및 개발 현황을 분석하였다.

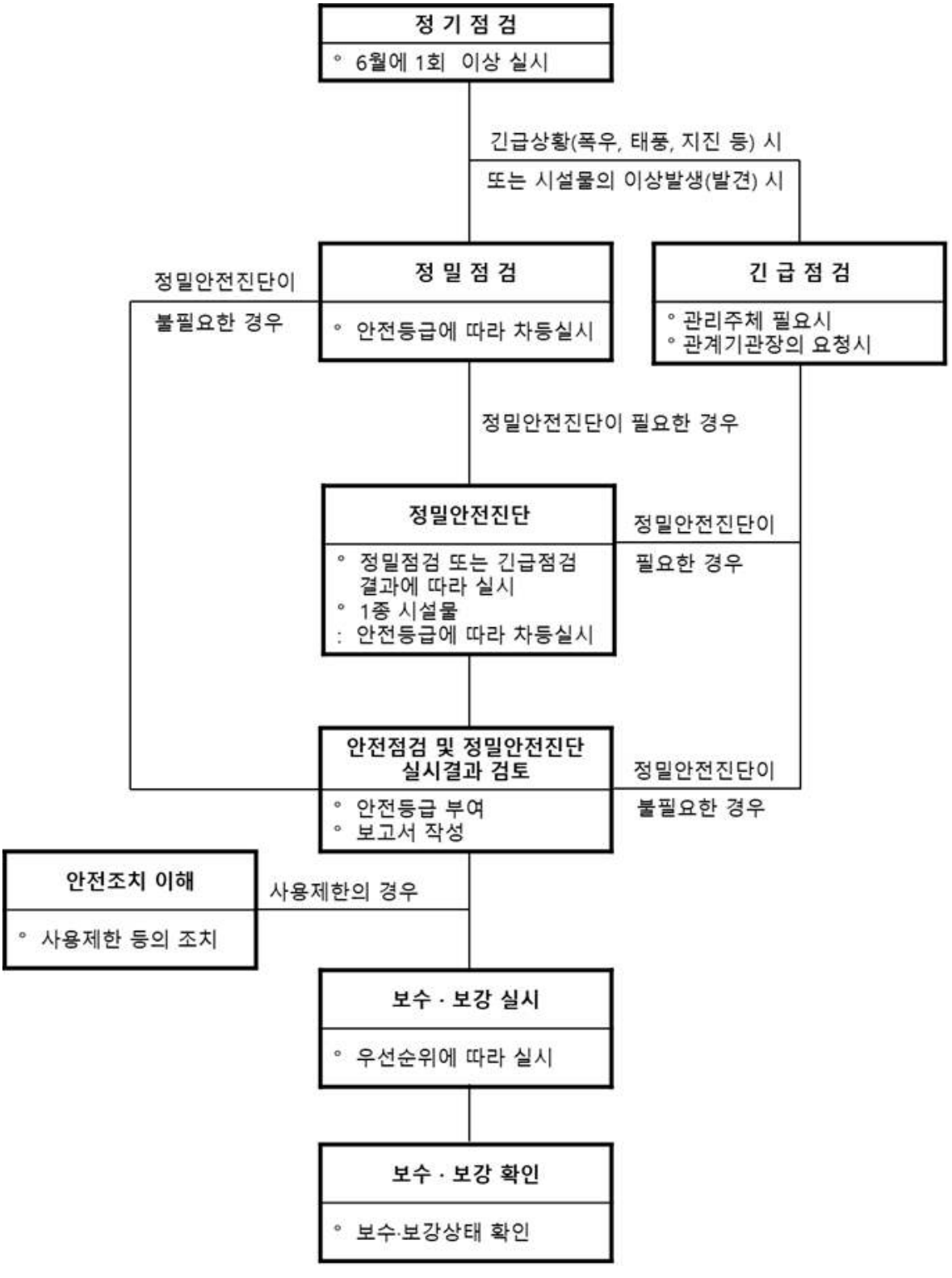
2.1 안전점검 및 정밀안전진단

안전점검 및 정밀안전진단은 『시설물의 안전관리에 관한 특별법』 제13조 및 같은 법 시행령 제13조에 따라 『시설물의 안전점검 및 정밀안전진단 실시 등에 관한 지침』에서 정하는 안전점검 및 정밀안전진단의 실시방법·절차 등에 의하여 시설물별로 다르게 적용하여 위험요인이나 시설물 기능 및 성능저하, 상태 등을 신속·정확하게 조사·평가하고, 그에 대한 적절한 안전조치를 취하여 재해 및 재난을 예방하며, 시설물의 안전성 및 기능성을 보완·보전케 함으로써 시설물의 효용성을 증진시킴과 더불어 과학적 유지관리를 체계화하는데 그 목적이 있다 (국토교통부, 2017).

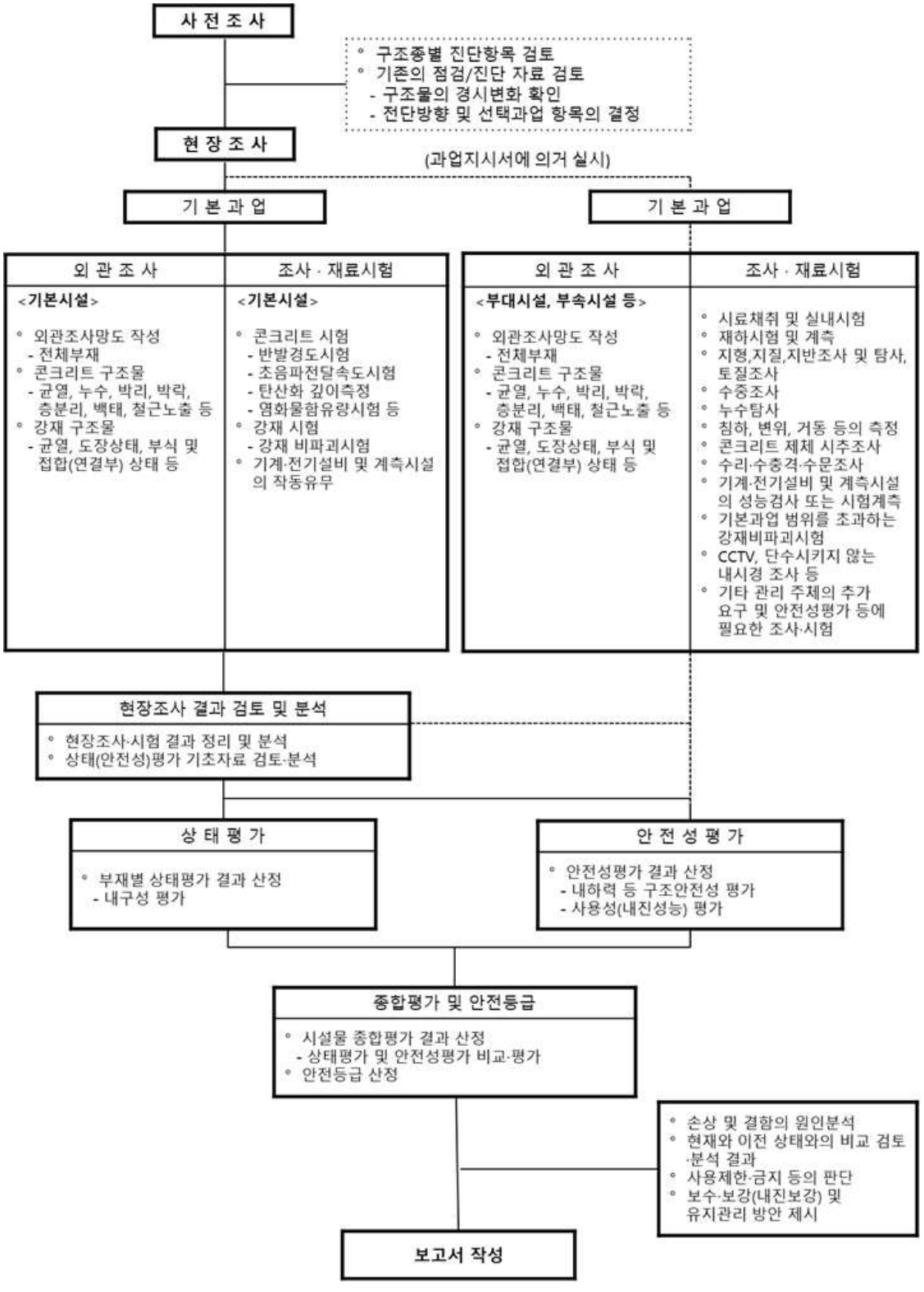
시설물 별로 확인 사항이 상이하나 안전점검 및 정밀안전진단에 관한 업무의 개괄적 흐름은 동일하며, 실시 주기와 실시자의 자격 등을 법과 지침에서 명시하고 있다. 안전점검 및 정밀안전점검의 종류로는 정기점검, 정밀점검, 긴급점검, 정밀안전진단이 있다.

○ 정기점검 : 세심한 외관조사 수준의 점검, 필요시 긴급점검 또는 정밀안전 진단 실시
○ 정밀점검 : 면밀한 외관조사와 간단한 측정·시험장비로 필요한 측정 및 시험 실시, 결함부위 등 주요 부위에 대한 외관조사망도 작성 등 조사, 결과 도면 기록
○ 긴급점검 : 관리주체 및 행정기관 장의 필요시 정밀점검 수준의 안전점검
○ 정밀 안전진단 : 정밀한 외관조사와 각종 측정·시험장비에 의한 측정·시험 실시, 안전점검으로 쉽게 발견할 수 없는 결함 및 안전성 평가

진단 결과 보수·보강이 필요한 경우 보수·보강방법을 제시하고 보고서의 형태로 기록되어야 한다. 안전점검 및 정밀안전진단 현장조사 시 육안검사 및 재료시험을 통해 상태평가 시, 시설물을 구성하고 있는 기둥, 보 슬래브 등 각각의 부재를 측정 장비를 이용하여 부재의 강도, 처짐 또는 변형상태 등을 측정한다. 점검 시 조사항목에 맞는 장비는 구조시스템 별로 상이하다. 일반적인 안전관리 및 진단 업무 흐름은 각각 [그림 2.1]과 [그림 2.2]와 같다.



[그림 2.1] 안전관리 업무 흐름도



[그림 2.2] 정밀안전진단 흐름도

[표 2.1] 안전진단 실시주기

안전등급	정밀점검	정밀안전진단	비고
A 등급	4년에 1회 이상	6년에 1회 이상	최초 정밀점검은 준공 후 4년 이내 점검
B, C 등급	3년에 1회 이상	5년에 1회 이상	
D. E 등급	2년에 1회 이상	4년에 1회 이상	

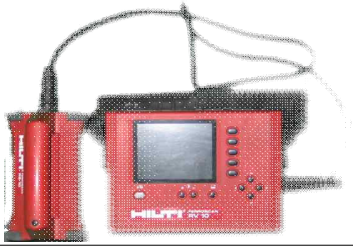
[표 2.2] 종합 평가 등급 기준

안전등급	시설물의 상태
A (우수)	문제점이 없는 최상의 상태
B (양호)	보조부재에 경미한 결함이 발생하였으나 기능 발휘에는 지장이 없으며 내구성 증진을 위하여 일부의 보수가 필요한 상태
C (미흡)	주요부재에 경미한 결함 또는 보조부재에 광범위한 결함이 발생하였으나 전체적인 시설물의 안전에는 지장이 없으며, 주요부재의 내구성, 기능성 저하 방지를 위한 보수가 필요하거나 보조부재에 간단한 보강이 필요한 상태
D (미흡)	주요부재에 결함이 발생하여 긴급한 보수·보강이 필요하며 사용제한 여부를 결정하여야 하는 상태
E (불량)	주요부재에 발생한 심각한 결함으로 인하여 시설물의 안전에 위험이 있어 즉각 사용을 금지하고 보강 또는 개축을 하여야 하는 상태

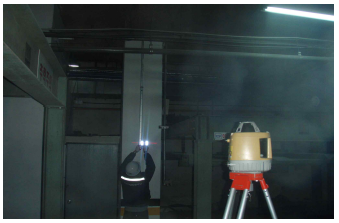
안전점검 및 정밀안전진단 현장조사 시 육안검사 및 재료시험을 통해 상태평가를 실시하는데, 시설물을 구성하고 있는 기둥, 보 슬래브 등 각각의 부재를 측정 장비를 이용하여 부재의 강도, 처짐 또는 변형상태 등을 측정한다. 조사항목에 맞는 장비와 그에 따른 목적을 [표 2.3]에 기재하였다. 점검 시 조사항목은 구조시스템 별로 상이하며 철근콘크리트 구조의 조사 항목 및 내용은 [표 2.4]와 같으며, 철골 구조물의 경우 [표 2.5]와 같다.

이를 살펴보면 구조형식별로 조사항목이 상이하고 장비의 사용여부도 다르지만 상태조사에 필요한 외관조사에 있어서는 인력에 의존한 육안검사의 비율이 높은 편이다. 하지만 육안검사의 경우 인력의 소요가 크고 작업자의 주관이 개입될 여지가 있다. 또한 작업자의 접근이 어려운 고층 건물의 경우, 크레인 등의 추가적인 양중장비가 필요하게 되는데 이 또한 작업 시의 위험성과 추가적인 비용 소요로 인해 접근이 어려운 부분들에 대해서는 검사가 소극적으로 이루어지는 실정이다.

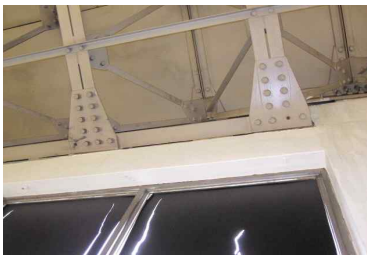
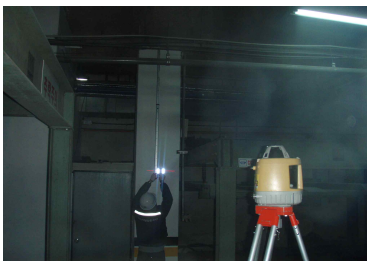
[표 2.3] 항목별 현장조사 목적 및 투입장비

조사항목	조사 목적	장비명	사진
철근탐사	설계도서와의 일치여부 확인 및 내하력 산정	페로스캔	
변위	구조물의 수직, 수평변위를 측정함으로써, 부동침하의 여부 및 구조물의 안전성 평가의 지표로 활용	광파기	
콘크리트 강도조사	부재의 조건이 유사한 경우 음속과 강도 사이에 상관관계를 바탕으로 압축강도 추정	초음파 측정기	
압축 강도조사	콘크리트 재료강도 상태를 조사	슈미트 해머	
균열조사	구조물의 균열 및 콘크리트 박락과 같은 변형상태 조사	크랙 현미경 크랙 스케일	

[표 2.4] 철근콘크리트 구조의 조사항목

구 분	조사항목	내 용 및 사 진
부재 상태 및 내구성	콘크리트 강도 및 규격	콘크리트 압축강도 및 부재규격
		 
	균열	균열폭, 면적율
		 
	콘크리트 탄산화	탄산화 깊이
		 
	표면 열화	박리, 박락 및 층분리, 누수 및 백태, 철근노출
		 
변위·변형	기울기 및 부동침하	건축물 기울기
		 
	부동침하	부동침하에 의한 구조 및 부재의 기울기

[표 2.5] 철골 구조의 조사항목

구 분	조사항목	내 용 및 사 진
부재 상태 및 내구성	강재의 규격	부재규격
	용접 접합상태	용접부 결함(균열 및 언더컷 등)
	볼트 접합상태	볼트 누락, 풀림, 이완
		 
	강재의 부식도	도장 및 부식상태
		
	내화피복	내화피복 두께 및 손상
		 
변위·변형	기울기 및 부동침하	건축물 기울기
		 
	부동침하	부동침하에 의한 구조 및 부재의 기울기

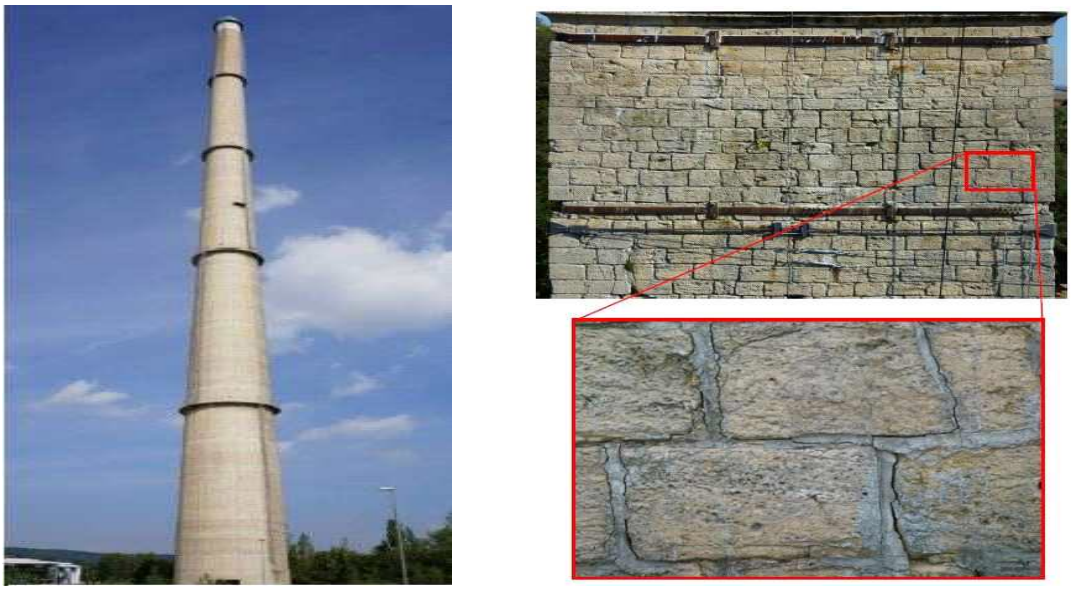
2.2 무인비행체를 활용한 구조물 안전점검

무인비행체 기술의 발전과 함께 시작된 무인비행체 활용 유지관리 기술 개발은 비행체의 비행성능과 점검에 사용되는 카메라 모듈 성능이 향상되면서 그 가능성을 넓혀가고 있다. 현재 무인비행체를 활용한 구조물의 안전점검 기술 개발은 크게 3가지 방법으로, '시각의존성 점검 방법', '컴퓨팅 기술 융합 점검 방법', '추가장비 활용 점검 방법'으로 구분할 수 있다.

가. 시각의존성 점검 방법

'시각의존성 점검 방법'은 항공촬영 및 이를 통해 구축한 3D 모델을 통해 시각적으로 점검하는 방법에 해당된다. 3D 모델링 외에 특별한 알고리즘이나 기법을 사용하지 않고 항공촬영 사진 및 이를 이용하여 구축한 3D 모델을 통하여 해당 대상물에 대해서 정성적인 결함 탐지를 하는 것이 특징이다.

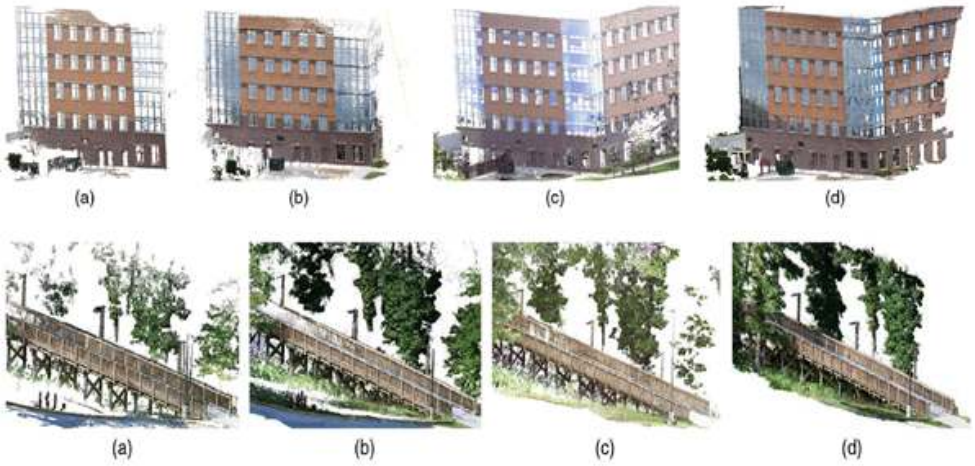
Hallermann & Morgenthal (2013)은 본 방법을 활용하여 높이 200m 이상의 굴뚝에 대해서 항공촬영을 실시하였으며, 고층부의 콘크리트 균열 및 열화를 관측하였다. 비행계획에 있어서는 자동비행과 수동비행을 병용하여 진행하였다. 또한 문화적 보존가치가 높은 교회 첨탑에 대한 항공촬영을 실시하여, 사람이 실시하기에 민감한 구간에 대한 육안검사를 실시하였고 첨탑 내 균열과 기타 철물 파괴 등을 확인함으로써 손상에 민감한 구조물에 대하여 무인비행체를 활용한 진단의 가능성을 확인하였다.



(a) 굴뚝 (225m) 에 대한 항공촬영 (b) 교회 첨탑부에 대한 항공촬영

[그림 2.3] 무인비행체를 이용한 구조물 상태검사 (Hallermann & Morgenthal, 2013)

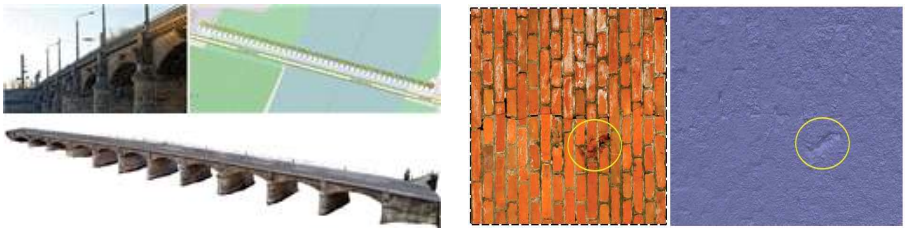
Khaloo & Lattanzi (2016)은 촬영한 항공사진을 활용하여 3D 모델링을 실시하고 이를 토대로 진단을 실시하는 연구가 진행되었다. 특히 3D 모델링을 위한 포인트 클라우드 작성 시 포인트 개체별 우선순위를 매김으로써 모델링의 정확도 및 해상도를 높였으며 이를 토대로 육안검사를 시도하였다. 대상물은 건축물, 목재 다리, 조형물에 해당되었고 모델링의 해상도에 의존한 시도로 그 결과 기존의 3D 모델링 방식과 비교하였을 때 더욱 우수한 결과를 획득하였다. 또한 노이즈를 최소화함으로써 3D Reconstruction 부분의 성과를 보였다.



[그림 2.4] 3D 모델링 기법 개발과 이를 통한 육안검사 (Khaloo & Lattanzi, 2016)

Hallermann & Morgenthal (2016)은 1883년에 완공된 216m 길이의 교량에 대하여 비행촬영을 실시하였고, 그를 토대로 안전점검을 실시하였다. 본 교량은 잦은 홍수로 인해 구조물 손상이 있었다.

이로 인해 교통에도 차질을 빚어 전체적인 점검이 필요한 상황이나, 교량 점검 시 차량 통제 및 추가적 비용 발생이 예상되어 무인비행체를 활용한 탐지를 실시하였다. 기체는 AscTec의 Falcon8+를 사용하였으며, 4시간 동안 촬영을 실시하였고 이후 3D 모델링을 진행하였다. 총 14개의 GCP(Ground Control Points)를 사용하여 GSD(Ground Sample Distance)는 1.1mm/pixel의 결과를 얻었다. RGB 카메라로만 실시하였고, 얻어낸 고해상도 3D 모델을 이용하여 결함부를 육안 탐지함으로서 대형 구조물에 대한 무인비행체를 활용한 안전점검의 가능성 및 유용성을 다시 한 번 확인하였다.

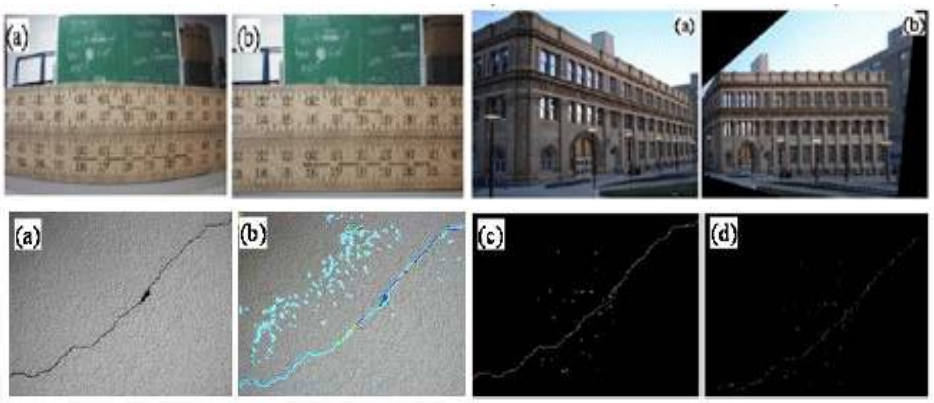


[그림 2.5] 교량의 3D 모델링을 통한 육안검사 (Hallermann & Morgenthal, 2016)

나. 컴퓨팅 기술 융합 점검 방법

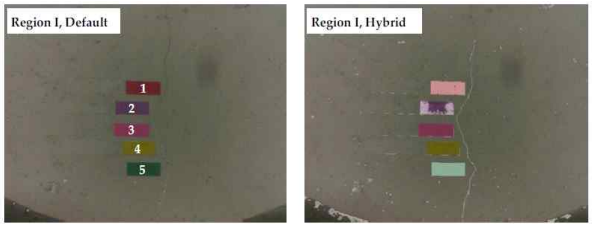
‘컴퓨팅 기술 융합 점검 방법’은 시각적 점검에 컴퓨팅 기술을 융합한 점검방법으로, 무인비행체를 이용하여 사진을 획득한 후 그 안에서 균열 및 결함을 이미지 프로세싱 기술을 통해 탐지하고 균열의 길이, 폭 및 결함의 면적 등을 정량화하는 연구가 주요하다.

Ellenberg, A. 등 (2014)은 조적 건축물의 균열탐지를 위해 항공촬영을 실시 후 촬영 사진을 이미지 프로세싱 알고리즘을 활용하여 균열부를 인식, 균열의 폭을 측정하는 연구가 진행하였다. 우선 이미지 프로세싱 전, 카메라 렌즈의 영향으로 인한 왜곡을 보정하고 이미지 프로세싱으로 찾을 수 있는 균열 폭의 한계를 확인하였다. 이 후 조적 건축물의 일부 구간에 대한 비행촬영을 실시한 후 균열부 주위의 작은 구간에 대해서 이미지 프로세싱을 통한 균열부 탐지를 실시하였고, 그 방법으로는 edge detection을 사용하였다. 그러나 이미지 프로세싱을 통한 균열부 탐지는 탐지의 임계값 설정에 따른 노이즈 발생이 필연적이므로 이에 대한 보정의 필요성을 제기하였다. Edge detection의 성능이 균열 정량화 결과를 좌우할 만큼 중요성이 큰 만큼 한계점으로도 지적하였다.

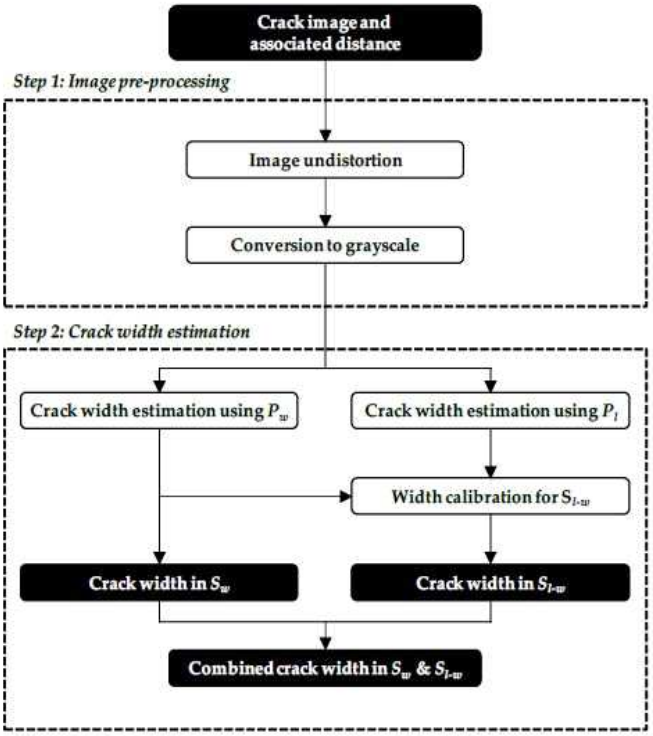


[그림 2.6] 교량의 3D 모델링을 통한 육안검사 (Ellenberg, A. 등, 2014)

김현준 등 (2017)은 무인비행체를 활용하여 촬영한 사진을 통해 콘크리트 균열 폭, 길이를 계산하는 하이브리드 이미지 프로세싱 기법을 개발하였다. 이미지 처리 관련 두 가지 계수를 사용하여 기존 이미지 프로세싱을 통한 균열 정보 정량화보다 향상된 결과를 얻었고, 이를 활용하여 균열 폭과 길이를 산출하였다. 제한된 크기의 사진을 통해 비교적 좋은 결과를 얻었다.

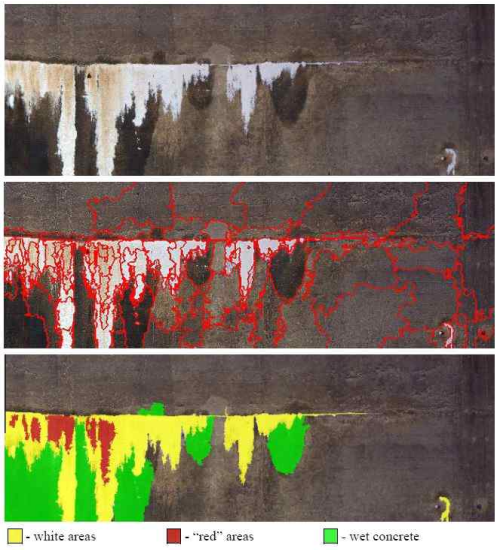


[그림 2.7] 알고리즘을 이용한 균열 탐지 결과 (김현준 등, 2017)



[그림 2.8] 균열 탐지 이미지 프로세싱 알고리즘 (김현준 등, 2017)

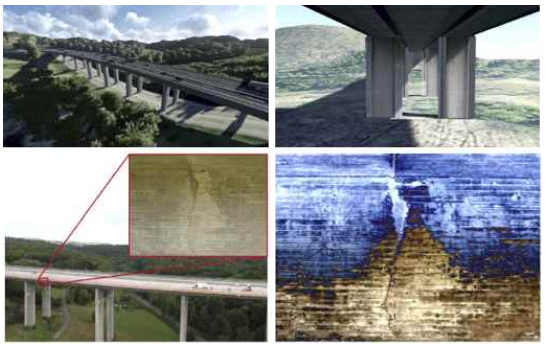
Henriques, M. J. & Roque. D (2015)는 댐의 누수 부위에 대한 특징을 이미지 분석 알고리즘을 활용하여 분류하고 시각화를 통해 쉽게 확인할 수 있는 연구를 하였다. 이미지 색상 별로 분류를 진행하여 손상의 정도와 연관시켰으며, 이를 활용하여 댐 배면의 누수 흔적과 백화 구간을 탐지하였다. Trimble 내의 eCognition이라는 이미지 특징 분류 프로그램을 사용하여 진행하였다.



[그림 2.9] 댐 배면 누수구간 탐지 (Henriques, M. J. & Roque. D, 2015)

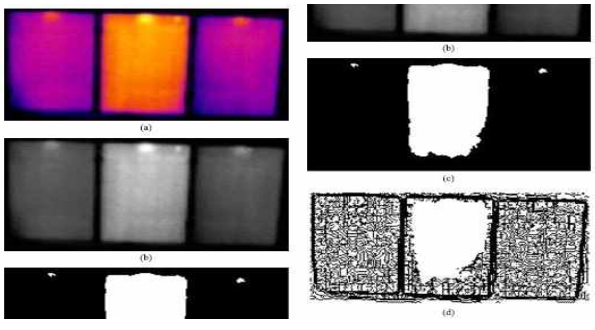
다. 추가장비 활용 점검 방법

‘추가장비 활용 점검 방법’은 무인비행체에 부착된 카메라 장비 외의 다른 추가장비를 활용하여 점검하는 방법으로, 추가 장비 또는 센서의 비용추가로 인해 몇몇 연구자들에 의해 발전되었다. 그 중 가장 많이 활용되는 장비로는 LiDAR(Light Detection and Ranging)와 IR(Infrared, 열화상) 모듈이 있다. Eschmann, C. 등 (2017)은 LiDAR와 IR 모듈을 활용하여 보다 정밀한 3D 모델링 및 교량 결함부 탐지 연구가 수행하였다. LiDAR는 레이저를 이용하여 사물의 위치와 거리를 탐지하는 고정밀 측량장비로 기존 RGB 카메라만을 이용한 모델링보다 훨씬 정밀한 3D 모델링 결과를 보였으며, 이를 토대로 장경간 교량의 고해상 도 모델을 확보하고 육안검사를 실시하였다. 또한 LWIR(Long Wave Infrared, 장파장 적외선 열화상) 모듈을 활용하여 누수 여부와 정도를 정성적으로 확인하였다.



[그림 2.10] LiDAR와 LWIR을 이용한 교량 점검 (Eschmann, C. 등, 2017)

Aghaei, M. (2015)은 무인비행체와 열화상 모듈을 활용하여 태양열발전기의 결함을 탐지하는 연구를 진행하였다. 다수의 태양열발전기가 넓은 범위에 분포해 있는 경우, 개별적인 점검은 많은 인력 및 시간 소요가 예상된다. 이를 열화상 모듈을 장착한 무인비행체를 활용하여 온도 이상부위를 탐지하고 분류함으로써 태양열발전기의 고장여부를 확인할 수 있다. 본 연구에서는 열화상 이미지를 이미지 프로세싱을 이용하여 이상부와 정상부를 구분하고, 다양한 방법의 이미지 프로세싱을 통해 성능을 비교하였다.



[그림 2.11] 무인비행체와 열화상 모듈을 활용한 태양열발전기 점검(Aghaei, M. 등, 2015)

라. 적외선 열화상 기법 활용 비파괴검사

적외선 열화상 기법은 인위적인 가진 및 가열의 유무에 따라 수동적 기법(Passive method)와 능동적 기법(Active method)로 구분되며 능동적 기법은 가진 및 가열 방법에 따라 초음파, 할로겐램프, 유도전자기, 레이저 위상잠금 등으로 구분된다. 국내 적외선 열화상 기법에 관한 연구는 아직까지는 기초적인 연구 단계로서 피사체의 결함을 정량적으로 파악할 수 있는 능동적 기법에 관한 연구가 주를 이루고 있다.

적외선 열화상 기법(Infrared Thermography)은 대상의 표면 복사에너지를 검출하고 이를 온도로 환산하여 실시간으로 영상으로 제공함으로서 재료의 열적 특성 평가, 전력시설물 열화진단, 복합재료 결함 검사, 건축물 단열 평가, 체열 측정을 통한 의료진단 등의 다양한 분야에 활용되고 있다. 이전의 열화상 기법은 우주·항공 및 기상 등과 같은 물리, 환경적 특성을 규명하는데 그 이용이 제한되어 왔으며, 기계, 전기 등 정밀 분야의 비파괴 손상 및 결함 측정에 제한적으로 적용되어 왔으나 최근에는 건축분야에 적용하고자하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

“열화상 기법을 이용한 구조물 결함에 대한 실험적 연구”에서는 콘크리트의 내부 결함을 적외선 카메라를 이용하여 콘크리트 내부의 공극의 위치와 공극의 깊이에 따른 온도분포 양상을 고찰하는 연구가 진행되었다. 연구 결과로 최대대기온도 이후에 공동의 깊이가 깊을수록 온도분포가 높아지는 것으로 결론지었다. (김우중 등, 2007) “열화상 정보를 이용한 부식률 예측기법”에서는 철근의 부식률과 콘크리트 표면 온도의 상관관계를 통해 철근의 부식률을 정량적으로 평가 할 수 있는 분석기법에 대해 연구하였다. 결과적으로 철근의 부식률이 증가할수록 콘크리트 표면 초기 온도상승률이 증가함을 확인하였다. (윤주영 등, 2007)

적외선 영상장치를 이용한 적외선법은 미국, 일본, 유럽 등 선진 외국에서 기상·우주분야, 군사분야, 의료분야, 공학분야 등 광범위하게 이용하고 있으며 건축·토목 분야에서는 1978년 미국의 ClemenaG.G의 연구에서 철근 부식에 의한 원인으로 발생한 고속도로 포장의 박리를 적외선 영상장치를 응용하여 조사한 사례와 1981년 발표된 D.G.Manning, F.B. Holt의 “Detecting Delamination in Concrete Bridge Decks”의 적외선 열화상 기법을 이용해 견고한 표면의 콘크리트와 갈라진 콘크리트의 표면 온도 차이에 의해 결함을 찾아낼 수 있다고 밝혔고 적외선 영상에 영향을 미치는 장비와 요소를 설명하였다.

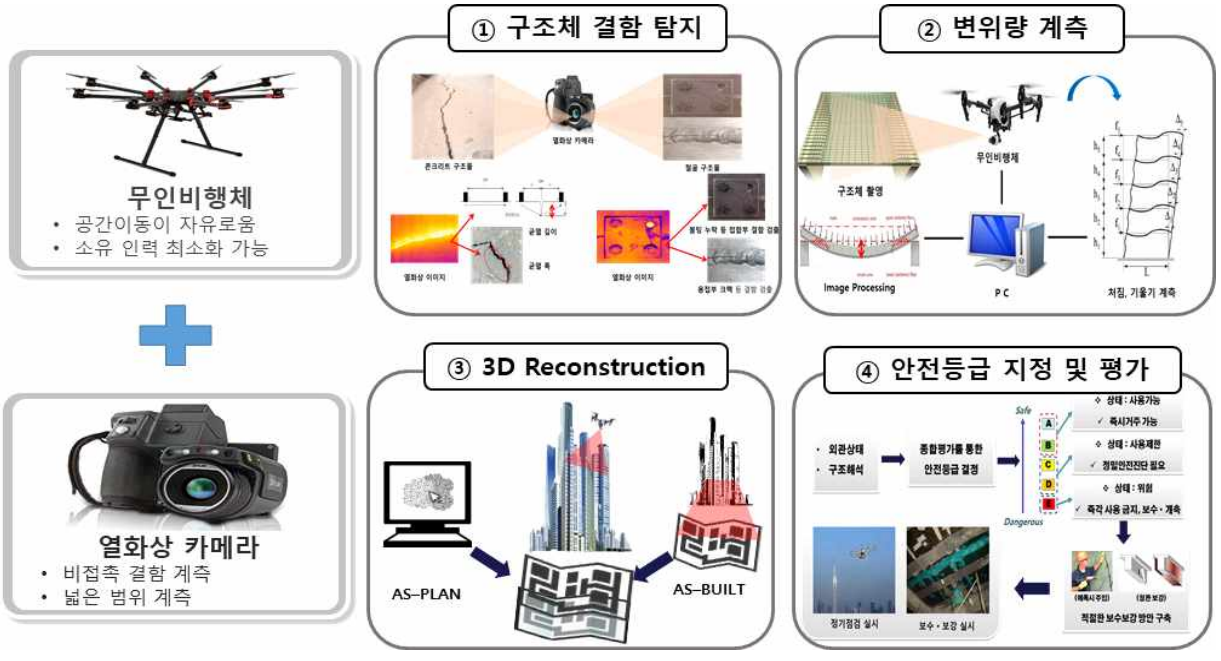
적외선 열화상에 의한 비파괴평가기술은 결함평가를 위한 비파괴검사 기술과 적외선응용측정 기술로 크게 나뉜다. 전자는 결함의 존재에 기인하는 재료 표면의 온도변화 영역을 검출함으로써 그 변화의 원인인 결함을 검사하는 열적 비파괴검사 방법이고, 후자는 재료에 하중이 부하되었을 때 의 열탄성 효과에 의한 온도변동을 적외선열화상에 의해 계측함으로써 재료에 작용되고 있는 응력분포를 가시화 계측하는 것이다.

2.3 SMART SKY EYE 시스템

본 연구에서는 기존 안전점검 방식과 평가기준을 무인비행체 기술과 융합하여 건축물의 성능과 안전성을 평가하는 새로운 무인비행체와 열화상 모듈을 이용한 건축물의 긴급 결함탐지 기술인 SMART SKY EYE 시스템을 제안하고자 한다.

본 기술은 건축물의 긴급 안전도를 평가하는 안전점검 시스템으로서, 무인비행체의 자유로운 기동성과 결함탐지 알고리즘을 통한 정량화로 탐지의 효율성을 도모할 수 있는 안전점검 시스템이다. 본 기술을 통해 건축물의 정밀안전진단에 선행하여 결함탐지를 수행하고 안전도를 평가하여 최종적으로 대상 건축물의 정밀 안전진단 필요 유무를 판단하여 결함탐지의 효율성을 도모할 수 있는 안전점검 시스템이다.

기존의 안전진단 방식은 현장조사 시 인력에 의존한 육안점검을 실시함으로써 부재별 상태조사를 실시하는데, 고층 건축물의 외관이나 사람이 접근하기 힘든 구간에 대한 점검은 다소 어려운 점이 있다. SMART SKY EYE 시스템은 무인비행체와 열화상 모듈을 활용하여 건축물의 외관 형상에 대한 촬영을 우선 실시하고 이 후 촬영된 열화상 및 실화상 이미지 분석을 통해 긴급 안전점검을 실시함으로써 비행·촬영 장비에 해당하는 하드웨어와 이미지를 분석하는 결함 탐지 및 안전도 점검에 해당하는 소프트웨어로 구성된다.



[그림 2.12] SMART SKY EYE 시스템 긴급 안전점검 소프트웨어 기능

하드웨어는 무인비행체와 이에 장착하는 열화상 모듈, 둘 간의 결합을 위한 짐벌로 구성된다. 소프트웨어는 촬영된 이미지를 활용한 긴급 안전점검 시스템으로 4가지 단계로 구분된다. 촬영된 이미지를 활용한 콘크리트 균열 및 철골 용접, 볼트 접합부 결함을 탐지하고 결함정도를 정량화하는 '구조체 결함 탐지' 단계, 기울기와 수평 변위를 계측하는 '변위량 계측' 단계, 촬영한 이미지에 대해 3차원 모델링을 실시하여 재구성하는 '3D Reconstruction (3D 재현)' 단계, 앞선 단계들로부터 얻은 손상정보들을 통해 긴급 안전등급을 지정하는 '안전등급 지정 및 평가' 단계가 이에 해당된다. 본 시스템의 구성은 무인비행체를 통한 점검에 맞게 기존의 안전점검 프로세스를 재구성함으로써 효율적인 점검이 가능하도록 하였다.



[그림 2.13] 무인비행체와 열화상 모듈을 활용한 SMART SKY EYE 시스템 개념도

가. SMART SKY EYE 시스템의 특징

SMART SKY EYE 시스템은 무인비행체와 열화상 모듈을 이용한 건축물 긴급안전진단 기술로서, 기존 안전진단 기술에 비하여 신속하고 객관적인 안전성 평가를 할 수 있는 안전진단 기법이라는 특징을 가지고 있다. 카메라를 통해 넓은 범위를 신속하게 탐지 할 수 있는 점과 무인비행체의 기동성을 활용할 수 있으며, 기존에 인력에 의존하던 안전진단 방식으로는 탐지하기 어렵거나 위험한 구간에 대해서도 효율적으로 탐지 가능한 요소 기술을 개발하였다. 기존 기술의 경우 15층 이상의 건축물의 경우 접근이 어려워 육안으로 평가가 불가하였으며, 크레인 등의 양중장비를 사용하여도 균열의 폭 수준만이 측정 가능하였다. 추가적인 장비를 활용하더라도 이는 많은 시간과 인력을 요구할 뿐만 아니라 인력에 의존한다는 점에서 계측결과에도 주관이 개입될 여지가 있다.

[표 2.6] 기존기술과 해당 개발 기술의 비교

구분	기존 안전성 평가 기술	SMART SKY EYE 긴급 안전성 평가 기술
기술 개요도		
문제점 및 개발 목표	• 많은 시간과 인력이 요구 • 계측결과의 객관성 결여 • 15층 이상의 경우 접근이 어려워 육안으로 평가 불가 • 추가적인 장비를 사용하여도 균열의 폭만 측정가능	• 소요 인력 최소화 • 계측결과의 객관성 확보 • 15층 이상 고층건축물 접근 가능 • 추가적인 장비 불필요 • 균열의 폭 뿐만 아니라 깊이 50mm까지 측정 가능

본 연구에서는 카메라 비전 장비와 촬영 이미지를 분석하는 컴퓨팅 기술을 활용한 방법으로 계측결과의 객관성을 확보할 뿐 아니라 결과물의 전산입력을 통한 데이터 관리 역시 용이하며 시간에 따른 결함의 진전정도도 파악할 수 있어, 점검 데이터 누적을 통한 건축물의 건전도 모니터링 시스템을 구축 할 수 있다. 또한 열화상 모듈을 통한 측정은 기존의 카메라 모듈로 확인할 수 없었던 비가시적 정보도 획득할 수 있다는 점에서 균열 깊이 파악, 철골 용접부 결함 탐지 등의 요소 기술 개발이 가능하였다.

나. SMART SKY EYE System의 점검 방법

SMART SKY EYE System의 건축물 긴급 건전도 평가 기법은 무인비행체와 열화상 모듈을 활용하여 긴급점검 수준의 안전점검을 수행하는 것을 목표로 한다. 본 연구에서 무인비행체와 열화상 모듈을 활용하여 구조결함을 검출하고 정량화하기 위해 두 가지 방법을 이용하여 접근하였다. 균열 등의 외관손상 검출 및 건축물의 기울기를 측정하기 위하여 3D Reconstruction (3D 재현) 방법을 사용하였으며, 균열 깊이 예측 및 용접부의 이상여부 검출에는 열화상 기법을 활용하여 결함을 검출하였다.

(1) 3D Reconstruction (3D 재현)

기본적으로 균열 등의 외관손상을 검출하고 건축물의 기울기를 측정하기 위하여 비전 기반의 이미지 프로세싱을 진행하였다. 무인비행체에 부착된 카메라를 통해 사진을 획득하고 이미지를 가공함으로써 결함 검출을 실시하였다. 획득한 건축물의 부분 이미지들은 각각 특정한 각도에서 건축물을 담고 있으므로 이에 대한 영향을 없애고, 더 나아가 부분의 이미지들을 통합시킬 필요가 있었다. 스티칭(Stiching)을 통하여 특정 각의 영향을 없애고 하나의 이미지로 통합시킬 수 있었으며, 시각화를 높이기 위하여 3D 모델링을 실시하였다. 이를 통해 촬영 각도와 촬영거리 등에 의해 왜곡되지 않은 실제 스케일의 검출된 구조결함을 정량화 할 수 있었다.



(a) 촬영거리 및 각도 45m 0'



(b) 촬영거리 및 각도 45m 45'

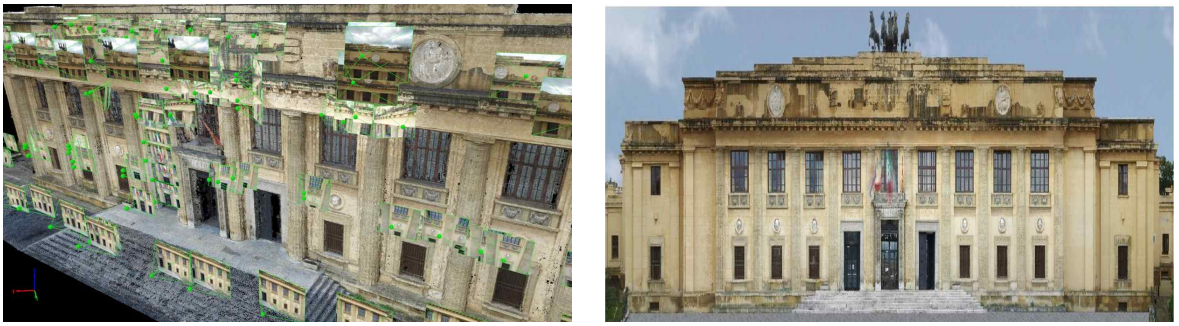


(c) 항공사진 결합을 통한 3D 모델링

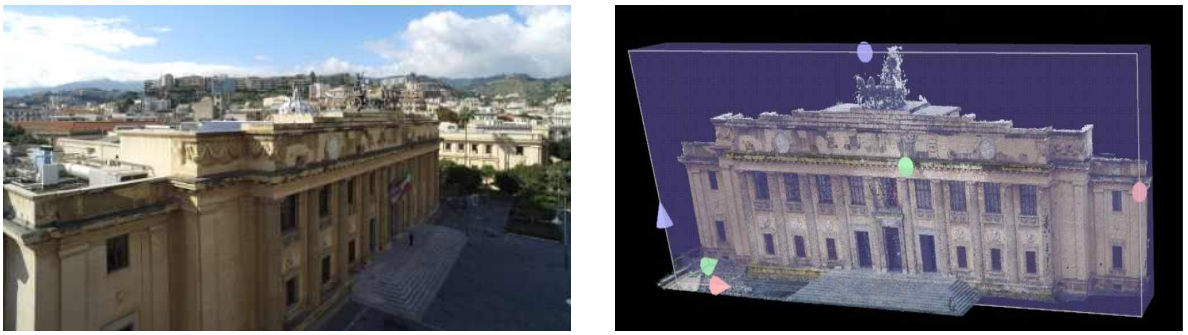
[그림 2.14] 3D 모델링을 통한 항공사진의 결합 및 효과

하나의 특정점에 대해서 2개 이상의 사진을 획득하였을 때, 그 특정점과 촬영 당시의 UAV GPS 포인트 2점을 이용하여 특정점과 촬영 당시의 촬영 거리를 계산할 수 있다. 이후 점들간의 매칭을 통해서 같은 지점을 촬영하는 다양한 사진들을 분류하고, 반복연산을 통해 공통 지점에 대해 좌표를 계산하는 원리로 포인트 클라우드 위치좌표를 계산하게 된다.

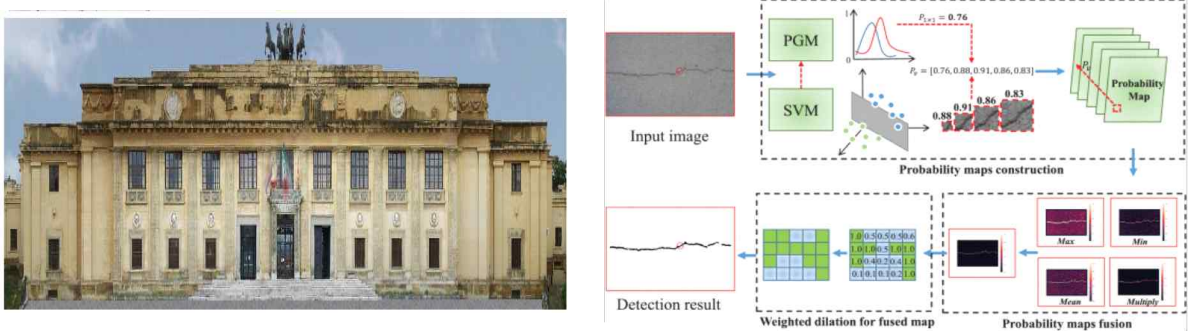
더 나아가 건축물의 외관조사망도 작성을 위해서는 2D 상에서의 작업이 필요하므로, 3D 모델의 각 벽면마다 정사작업(Orthomosaic)을 통해 고해상도 2D 외관현황 이미지 획득이 가능하다.



[그림 2.15] Orthomosaic 작업을 통한 2D 정사사진 획득



(a) 항공 사진 촬영 (b) 3D 모델링



(c) 2D 정사작업 (d) 알고리즘을 통한 분석

[그림 2.16] 3D Reconstruction을 이용한 결함 검출 과정

다. 적외선 열화상 기법의 결함 검출 원리

최근 적외선 열화상 기법을 활용한 건축물 점검이 이루어지고 있으나, 다수의 용도는 에너지 효율 점검에 국한되어있다. 적외선 열화상 기법은 기본적으로 물체의 열 흐름에 의해 온도가 다른 부분을 찾아내고, 각 부분의 온도를 측정하는 방법으로 이를 구조 결함 탐지에도 활용할 수 있다. 이와 관련된 적외선 열화상 기법의 원리를 설명하면 다음과 같다. 물체가 완전 방사체면 이 물체가 방사하는 적외선의 각 스펙트럼의 강도는 Plank의 식으로 나타낼 수 있다.

$$W_\lambda = C_1/[\lambda^5 \exp \cdot (C_2/\lambda T) - 1] \tag{2.1}$$

여기서, W_λ : 분광 방사 발산도 ($W \cdot cm^{-2} \cdot \mu^{-1}$)
λ : 방사되는 적외선 파장 (μm)
T : 절대온도 (^oK)
C_1 : $2\pi hc^2 = 2.7418 \times 10^{-12} (W \cdot cm^{-2})$
C_2 : $ch/k = 1.4388 (cm \cdot {}^oK)$
h : Planck constant ($= 6.6217 \times 10^{-27}$)
c : 광속도 ($= 2.997925 \times 10^{10^{-1}} cm \cdot s^{-1}$)
λ : Boltzmann constant ($= 1.3806 \times 10^{-16} erg \cdot {}^oK^{-1}$)

흑체의 파장과 분광방사발산도 Wein의 W_λ와의 관계도에서 각 곡선 의 정점을 이은 직선은 Wein의 변위법칙으로 식 2.2와 같이 나타난다.

$$\lambda = C/T \tag{2.2}$$

여기서, C : 정수 = 2,898 ($\mu m \cdot {}^o$K)

흑체의 단위면적에서 방출되는 적외선의 에너지량 W는 W_λ를 전체 파장에대해 적분하여 구할 수 있으며, Stefan · Boltzmann 법칙에 의해 나타낼 수 있다.

$$W = \sigma T^4 \tag{2.3}$$

여기서, W : 흑체 단위면적에서 방출되는 적외선 에너지 양 ($W \cdot cm^{-2}$)
여기서, σ : Stefan · Boltzmann constant $= 2\pi^5 k^4/15c^2h^2$
$= 5.673 \times 10^{-12} (W \cdot cm^{-2} \cdot {}^oK)$

일반적인 물체의 경우 적외선 방사는 물체의 종류 및 표면 상태에 따라 방사율 ε 가 다르다. 흑체의 방사율은 1이며 일반적인 물체에 있어서는 0 과 1사이에 있고, 콘크리트, 유리, 대리석의 방사율은 약 0.95이다. 따라서 일반적인 물체의 온도와 방출하는 적외선 에너지의 관계는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$W = \epsilon \sigma T^4 \, (0 < \epsilon < 1) \tag{2.4}$$

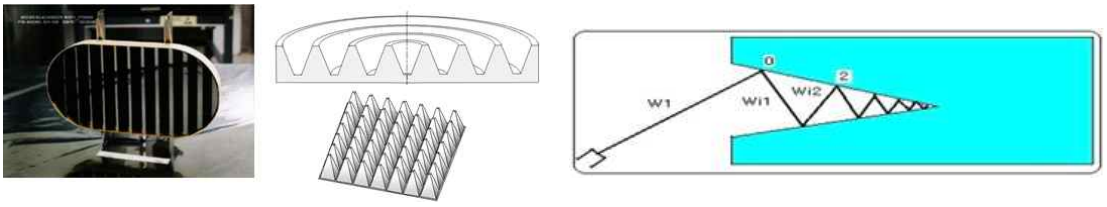
적외선 열화상 카메라는 적외선의 에너지량 W 를 측정 장치에 의해 전기신호로 변환하여 위식에 따라 연산 처리하여 물체의 온도를 농도 혹은 색에 의한 화상으로 표시한다. 물체에 도입된 적외선은 흡수율을α ,반사율을 ρ ,투과율을 τ 로 하면 에너지보존의 법칙에 따라 표현할 수 있다.

$$1 = \alpha + \rho + \tau \tag{2.5}$$

키르히호프의 법칙에 따르면 물체의 방사선 흡수력과 방사 능력의 비는 일정하므로 $\alpha = \epsilon$ 가 되며, 콘크리트 및 철골은 불투명체이므로 $\tau = 0$ 이 된다.

$$\epsilon = 1 - \rho \tag{2.6}$$

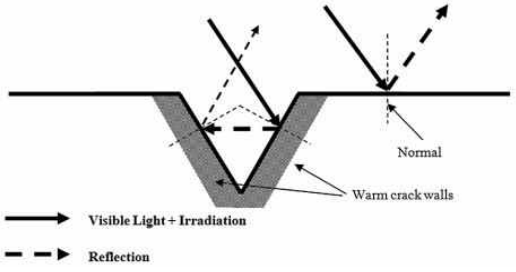
여기에서 적외선을 잘 반사하는 물체는 적외선 방사가 적게 되고 역으로 적외선을 잘 흡수하는 물체는 적외선을 잘 방출한다는 의미도 된다. 앞서 설명한 바와 같이 방사율ϵ은 물체의 종류 및 표면 상태에 따라 값이 다르다. 흑체의 경우 방사율은 1로, 에너지를 반사하지 않고 모두 흡수한다. 이를 인공 흑체 구조를 통해 살펴보면, 홈을 팜으로써 반사되는 에너지를 최소화하고 에너지를 최대한 흡수하도록 구성했다는 것을 알 수 있다. 이 점은 같은 물질이더라도 형상에 따라 방사율이 달라질 수 있다는 점을 시사한다.



(a) 인공 흑체 구조 (b) 인공 흑체 구조 원리

[그림 2.17] 흑체의 구조와 방사율

따라서 콘크리트 균열 등의 구조적 결함 발생시 결함부의 형상 차이는 정상부에 비해 방사율 차이를 가져오기 때문에 적외선 열화상 촬영시 온도 차이로 이어지게 된다. 균열부의 경우 정상부에 비해 빛에너지가 도달하였을 때, 일부 반사되고 굴절되어 모이는 에너지가 균열부 안에서 다시 돌게 되면서 표면에서의 흡수량이 더 크게 된다.(Sham, F.C. 등, 2008) 따라서 균열부는 정상부에 비해 온도가 다르게 측정된다. 본 원리는 콘크리트 뿐만 아니라 철골에서도 적용되어 정상부에 비해 형상이 다른 결함부를 열화상 기법으로 찾아낼 수 있도록 한다.

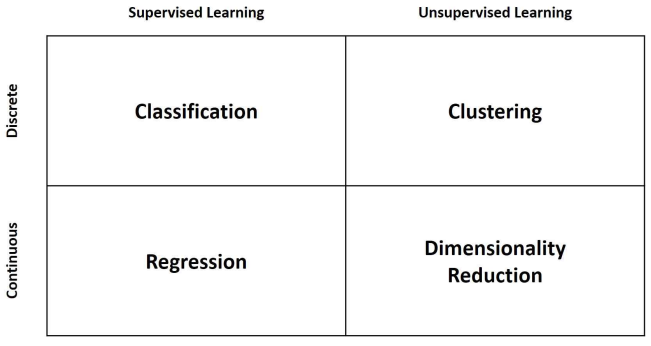


[그림 2.18] 균열부와 정상부의 방사율 차이 원리

콘크리트 구조물의 경우 기온 또는 복사열의 변화에 따라 각 재료의 열전도율이나 비열 등의 물리적 성질의 차이 또는 표면형상, 균열, 표면 근방에 공동이나 박리가 있는 경우 다른 온도변화를 나타낸다. 따라서 정상부위와 결함부위에서는 온도차이(Δt)가 발생하게 되며 이를 통해 적외선 카메라로 검출하게 된다.

라. 머신 러닝을 통한 결함 검출 알고리즘 학습

적외선 열화상 기법을 이용하여 콘크리트 균열부 온도, 정상부 온도 및 열전달에 영향을 줄 수 있는 요인들을 통해 콘크리트 균열 깊이를 예측하는 알고리즘을 도출하고자 본 연구에서는 머신 러닝(Machine Learning)을 활용하였다. 머신 러닝은 인공지능의 한 분야로 경험적 데이터를 기반으로 학습을 하고 예측을 수행하고 스스로의 성능을 향상시키는 시스템을 뜻한다. 머신 러닝은 샘플 데이터 집합(Dataset)의 레이블 값의 유무에 따라 지도 학습(Supervised learning)과 비지도 학습(Unsupervised learning)으로 나뉜다.



[그림 2.19] 레이블 유무와 값의 연속성에 따른 머신 러닝 분류

- 지도 학습(Supervised learning)

  데이터 샘플이 특징 벡터와 레이블 값의 쌍으로 주어지는 경우로, 테스트 데이터의 레이블 값을 예측하기 위해 파라미터를 추론하는 작업을 한다. 이 유형은 분류와 회귀 분석으로 나눌 수 있다.
- 분류(Classification)

  데이터 레이블의 부류(Class)에 대한 예측 방법을 훈련 집합을 통해 학습시키는 것이 주요 목표다. 분류는 이상 형태의 지도 학습으로, 레이블이 한정된 개수의 범주를 갖게 된다.
- 회귀 분석(Regression)

  레이블이 연속 변수로 주어진 데이터를 학습시켜 연속 변수를 예측하는 지도 학습이다.
- 비지도 학습(Unsupervised learning)

  훈련 집합이 레이블 값없이 특징 벡터 x로만 주어지는 경우로, 주로 군집화 알고리즘을 이용해 데이터 집합 내 유사한 예시를 찾거나 높은 차원의 공간에서 낮은 차원의 공간으로 데이터를 투영해 차원을 줄이고자 할 때 사용된다. 훈련 데이터에 레이블 값이 없기 때문에 데이터에서 직접 모델의 오차를 측정할 수는 없다. 따라서 군집 내 멤버들의 유사도와 군집 간 멤버들의 비유사도를 측정하는 기법이 필요하며, 대표적인 머신 러닝의 기법 및 모델들은 다음과 같다.

  ○ 의사 결정 나무(Decision Tree) : 트리 구조 형태를 예측 모델로 사용
  ○ 인공 신경망(Neural Network) : 생물의 신경 네트워크 구조와 기능을 모방
  ○ 유전자 프로그래밍(Genetic Programming) : 생물의 진화 알고리즘에 기반
  ○ 군집화(Clustering) : 관측된 예를 군집이라는 부분집합으로 분배
  ○ 몬테카를로 방법(Monter Carlo method) : 무작위로 추출된 난수를 통해 함숫값을 확률로 계산

마. 긴급 위험도 평가 프로세스

SMART SKY EYE System의 건축물 긴급 건전도 평가 기법은 무인비행체를 이용하여 건축물의 긴급위험도 평가 수준의 안전점검을 수행하는 것을 목표로 한다. 긴급위험도 평가는 지진 등의 재난 상황시 시설물 피해를 신속하게 평가하여 주민들에게 사용 여부를 알려주고 2차적 피해를 최소화하는 평가 시스템으로 미국, 일본, 뉴질랜드 및 국내에서 지진 발생시 시설물 평가에 사용하였다. 이는 1차대전 이후 활성화된 개념으로 환자의 중증 여부에 따라 응급환자를 분류하는 재난시 응급환자 분류체계(트리아제;Triage)와 같이 빠른 평가를 통해 시설물의 현재 상태를 파악하여 향후 적절한 대책 수립과 건축물의 장기간 사용 불능에 따른 경제적 손실을 방지하는데 목적이 있다.

긴급 위험도 평가법은 2단계로 구분하여 피해 건축물을 평가한다. 1단계는 정성적 수준의 평

가로 10~20분 안에 평가할 수 있도록 상세 평가 항목의 구성보다는 개략적인 위험 정도 평가에 초점이 맞추어져 있다. 2단계는 구조형식 별로 구분하여 인접 건축물, 지반, 구조체에 대한 위험도를 분석하고 낙하 위험물에 관한 위험도를 산출하여 종합 위험도를 평가하도록 구성되어있다. 점검 시간은 1~4시간 내 수행되는 것이 목표로 재료시험 없이 점검자에 의한 신속한 육안조사로만 이루어져 있으며 위험정도에 대한 판정을 '사용 가능', '사용 제한', '위험' 으로 구분하여 건축물의 위험도 평가 결과를 건축물 외부에 부착하고 사용자가 알 수 있도록 한다.

또한 기존 안전진단 방식보다 신속하고 자동화된 방법으로 빠르게 건축물을 스캔하고 진단하고 그 결과를 통해 정밀안전진단의 필요여부를 결정하는 것이 SMART SKY EYE System의 궁극적 목적인만큼 평가는 기존의 긴급 위험도 평가법을 참고하였고, 무인비행체 이용시 이에 최적화되고 신속한 평가가 가능하도록 구성하였다.

SMART SKY EYE System 점검은 무인비행체와 열화상 모듈을 이용한 비행촬영에서부터 시작한다. 건축물 배치, 대상건축물 및 인접건축물의 특징을 반영한 비행계획(Flight Planning)을 수립하고 실화상 및 열화상 촬영을 실시한다. 촬영방법 및 촬영계획은 건축물 특성뿐만 아니라 무인비행체, 열화상 모듈 등의 장비에 의해서도 달라질 수 있다.

SMART SKY EYE System 점검은 무인비행체와 열화상 모듈을 이용한 비행촬영에서부터 시작한다. 건축물 배치, 대상건축물 및 인접건축물의 특징을 반영한 비행계획(Flight Planning)을 수립하고 실화상 및 열화상 촬영을 실시한다. 촬영방법 및 촬영계획은 건축물 특성뿐만 아니라 무인비행체, 열화상 모듈 등의 장비에 의해서도 달라질 수 있다.

이후 촬영한 이미지들을 이용하여 3D Reconstruction(재구성) 및 요소별 데이터 분석을 실시한다. 항공촬영 이미지 기반 3D 모델을 구성함으로써 촬영 시점의 건축물을 고해상도로 구현하고, 점검이 필요하거나 외관조사망도 작성이 필요한 부분들에 대해서 2D 정밀 정사사진을 작성하여 고해상도 이미지 프로세싱을 통해 미세한 균열까지 검출 가능하다. 구축한 알고리즘을 이용하여 열화상 이미지 분석을 실시하고, 이를 통해 콘크리트 균열 깊이, 철골 접합부 이상점검 등 RGB 실화상으로 파악하기 어려운 결함을 검출한다.

다음은 요소별 상태평가로 앞서 실시한 데이터 분석을 토대로 중요부재 피해정도, 건축물의 기울기 및 침하, 낙하 위험물 요소 확인 등 평가요소별 결과를 산정하고 위험도를 산정한다. 산정한 위험도는 평가 알고리즘에 기입하여 종합 평가에 사용한다.

최종적으로 상태평가를 통해 종합 위험도를 판정한다. 이 때 평가법은 지진피해 건축물 긴급 위험도 평가를 적용하고, 위험도 평가결과에 따라 초록색(사용가능), 노랑색(사용제한), 빨강색(위험)의 플래카드를 부착한다.

무인비행체와 열화상 모듈을 활용한 SMART SKY EYE System 점검과 기존 긴급 위험도 평가법의 흐름도를 비교하였다. 기존의 현장 조사, 상태 평가, 종합 평가로 이루어지는 흐름과 대동소이하나 무인비행체와 촬영 이미지에 기반을 두는 특성을 평가법에 반영하였고, 평가 종료 시 결과는 세 가지 위험도로 판정한다는 공통점이 있으나, 조사시간에 있어 무인비행체와 데이터 처리를 통해 실시하는 점에서 자료 보관이 용이하고 인력 소요를 최소화하는 장점이 있다.



[그림 2.20] 무인비행체와 열화상 모듈을 활용한 SMART SKY EYE System 점검 흐름도

2.4 건축물 육안조사 및 외관조사망도 작성 프로토콜

가. 프로토콜 개발 개요

건축물 안전점검에 있어 현장조사는 점검자에 의해 이루어지는 건축물의 현 상황에 대한 조사로 큰 비중을 차지하며, 상태평가 및 안전등급 평가에도 중요하다. 현장조사는 크게 외관조사와 재료시험으로 이루어진다. 외관조사는 인력에 의한 육안조사를 통해 실시되어 콘크리트 및 철골구조물의 결함·손상 및 열화에 대하여 발생 위치, 유형, 크기 등과 그 원인, 발생이나 발견 시기 등을 정밀하게 조사하고 규명 혹은 추정하여 상세히 기록하고, 개략도면에 표시하여야한다. 이러한 기존 외관조사 방식은 필연적으로 결함 정보 획득에 있어 작업자의 주관이 개입될 여지가 있으며 접근하기 어려운 결함부에 대해서는 측정이 어렵다는 단점이 존재한다. 특히 양중장비가 사용가능한 구간에 대해서는 접근이 가능하나 작업자의 안전에 위험이 발생하며, 양중장비 진입이 어려운 구간에 대해서는 원거리 사진촬영으로 결함 탐지를 대체하고 있는 것이 현재의 안전진단이다.

SMART SKY EYE System 점검은 이러한 한계점을 극복하고자 무인비행체와 열화상 모듈을 이용하는 긴급 안전점검으로, 평가 프로세스는 긴급 위험도 평가와 마찬가지로 외관조사를 통해 이루어진다. 그러나 긴급 위험도 평가의 경우, 신속한 판정이 목적인만큼 외관 상태에 대한 기록이나 시각자료는 필수 기록대상이 아니므로 안전점검 및 정밀안전진단에 비해 부족한 단점이 있다. 그에 비해 SMART SKY EYE System 점검은 무인비행체와 열화상 모듈에 의해 획득한 이미지를 이용하여 평가하므로 외관 상태에 대한 자료기록을 이미지로 다수 남길 수 있는 장점이 있다.

이를 활용하여 안전점검 및 정밀안전진단에서 현장조사 후 결과물로 작성하는 외관조사망도를 작성하는 프로토콜을 제안하고, 기존 건축물에 적용함으로서 프로토콜을 검증하였다. 무인비행체와 열화상 모듈을 활용하여 점검을 한다는 특성을 반영하여 프로토콜을 구성하였고, 외관조사망도 작성은 외관조사에 있어 총괄적인 결과물로서 본 결과물 생성의 방법 및 가능성을 제시하여 무인비행체를 이용한 긴급 안전점검이 충분히 가능하다는 것을 보여주고, 좀 더 구체적인 활용방안을 제안하고자 한다.

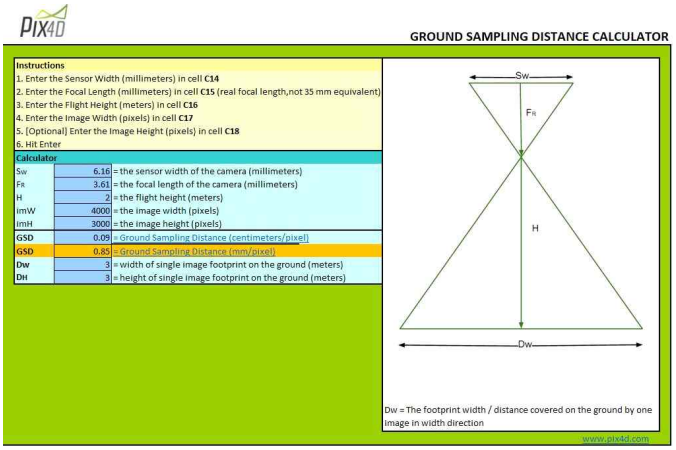
나. 무인비행체를 활용한 건축물 외관조사망도 작성 프로토콜

무인비행체를 이용하여 건축물 외관조사를 실시하고 그에 따라 외관조사망도를 작성하는 프로토콜을 제안한다. 본 프로토콜은 무인비행체의 기종 또는 자동비행 가능여부와 무관하게 적용가능하며, 실제 활용을 위한 내용으로 최대한 실용적인 방법을 사용하고자 하였다. 추가적인 장비 없이 무인비행체 이용 시 적용 가능할 것으로 예상한다. 제안하는 프로토콜은 다음과 같다.



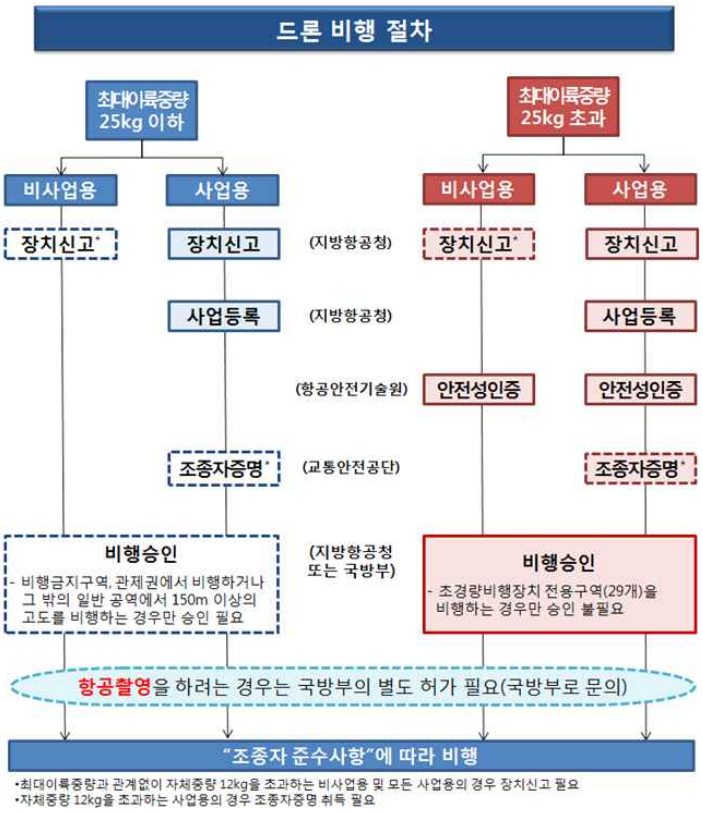
[그림 2.21] 무인비행체를 활용한 건축물 외관조사망도 작성 제안 프로토콜

1단계는 비행촬영계획(Flight Planning)으로 무인비행체를 이용한 비행촬영에 관한 건축물 정보 사전 수집, 사전 허가, 비행 계획, 안전 계획이 해당된다. 비행촬영에 앞서 건축물의 형상, 배치 및 인접건축물의 영향 등을 고려해야한다. 이 점은 비행 계획을 구상하는데 필수적이다. 그 건축물에 가장 적합한 비행 계획을 세우고 촬영을 시작하는 것이 전체 점검에 있어 안전사고를 예방하고, 추후 3D 모델링 등 데이터 처리 시 좋은 결과물과 직결된다. 불필요한 비행 및 무계획적인 과다한 사진 촬영은 평균 20~30분에 달하는 짧은 비행시간을 소모하고, 3D 모델링 작업에 필요한 시간을 상당히 길어지게 만드는 부작용이 있다. 촬영 시작부터 3D 모델링과 그로부터 얻을 수 있는 고정밀 사진의 해상도를 고려하는 것이 촬영 계획에 포함된다. 이미지에 기반을 두는 안전점검인만큼 해상도는 고려해야 할 가장 중요한 요소들 중 하나이다. 보통 해상도는 한 픽셀 당 거리에 해당되는 GSD(Ground Sample Distance)로 고려한다. GSD는 카메라의 초점거리, 카메라 센서의 폭, 센서에 맺히는 가로, 세로 픽셀수, 대상물과의 촬영거리에 의해 계산된다.



[그림 2.22] GSD(Ground Sample Distance) 계산 방법

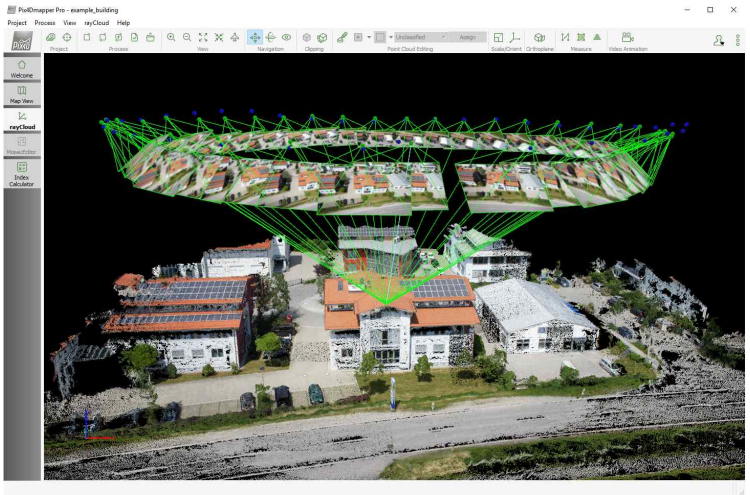
비행촬영에 앞서 사전 허가가 필요하다. 국내에서 무인비행체는 사용 목적과 최대이륙중량에 따라서 사전 허가 절차가 다르게 진행되며, 장치를 신고하고, 비행 및 촬영을 승인받아야한다. 국내 드론 비행 전 사전 허가 절차가 규정되어 있으므로 다음의 사전 허가 절차에 따라 진행하며, 항공기 운항스케줄 원스탑 민원처리시스템에서 최종 승인을 받아 진행하여야한다. 처리에 걸리는 시간은 금지구역, 제한구역 등 분류에 따라 다르며 금지구역에 대해서는 비행목적에 대한 증빙 및 관할 군·관의 유선 상의 인터뷰가 추가될 수 있다.



[그림 2.23] 무인비행체 사전 허가 절차

2단계는 항공촬영으로 목표 GSD가 충분히 확보될 수 있도록 건축물과 일정 거리를 유지하며 촬영을 실시한다. 촬영에 있어 기상상황을 고려하는 것이 중요하다. 우천 시 무인비행체를 활용한 운용은 기체 결함을 유발할 수 있으므로 피하고, 흐리거나 일몰 이후의 시간의 촬영도 피해야한다. 충분히 밝지 않은 상황에서 촬영시 이미지 역시 흐리고 해상도가 낮게 나오기 때문에 이는 이 후 3D 모델링에도 영향을 주어 상태평가 등 총체적인 문제를 야기할 수 있다. 또한 국내에서는 건축물 특성상 건축물을 가로지르는 전기줄 및 간판 등 비행에 방해가 될 수 있는 요소들을 충분히 고려하여 비행을 실시해야한다. 또한 촬영시 수신하는 GPS는 비행체의 호버링(Hovering)과 3D 모델링 시 위치정보 제공에 가장 중요한 요소로 상황판에 나타나는 GPS 수신 상황을 수시로 살피는 것이 점검의 정확도를 높일 수 있었다.

3단계는 촬영한 항공사진을 활용하여 3D 모델링하는 단계이다. UAV 전용 맵핑 프로그램을 사용하여 촬영 사진들을 스티칭(Stiching)하고 3D 모델로 재구성한다. 본 연구에서는 상업용 UAV 맵핑 프로그램 Pix4D Mapper을 사용하였다. Pix4D 프로그램에 항공촬영 사진을 입력하면 자동적으로 촬영시 무인비행체의 위치, 촬영각도 등 사진의 공간정보를 통합시킨다. 이후 맵핑 작업을 통해 포인트 클라우드(Point Cloud) 형태의 3차원 모델을 획득하고, Triangular Mesh 작업을 통해 점들을 이어 면 형태의 향상된 모델을 획득할 수 있다.



[그림 2.24] Pix4D를 이용한 항공사진 통합 및 3D 모델링

구성된 3D 모델은 부분적인 2D 이미지로 확인하기 어려운 촬영 당시 위치정보를 직관적으로 알 수 있는 장점이 있고, 결함을 다양한 각도에서 확인할 수 있어 상태평가 시 시각적인 효과를 극대화 시킬 수 있다.

4단계는 정사사진(Orthomosaic) 작업으로 3단계에서 얻은 3D 모델을 이용하여 2D 정사사진을 얻는 단계이다. 본 작업의 목적은 외관결함조사에 각 면의 2차원 형태의 이미지가 필요하여 3D에서 해당방향의 고해상도 2D 사진 획득에 있다. 이를 통해 다양한 각도에서 촬영한 항공사

진들의 각도에 의한 형상 왜곡을 보정할 수 있다. 해당 면에 수직하도록 항공사진들을 모두 조합한 후 정사시킴으로써 1개의 벽면에 해당되는 고해상도 이미지를 확보할 수 있었다.

5단계는 외관조사망도 작성으로, 촬영 사진들 간 스티칭(Switching)을 통해 얻어낸 2D 정사사진을 활용하여 외부 결함 탐지 작업을 실시하는 단계이다. 2D 정사사진의 높은 해상도를 통해 이미지 상에서 결함 탐지가 가능하였다. 외관조사망도 작성에 이미지 픽셀 기반 프로세싱을 통해 작업을 실시한다.

6단계는 건축물 외관 손상정보 데이터의 정량화 및 기록 단계로, 작성한 외관조사망도로부터 확인된 손상 데이터의 손상정도를 수치화하고 정리하는 작업에 해당된다. 외관조사망도의 손상 정도 수치화는 이미지 픽셀 기반 정량화 방법을 사용하였다. 본 방법은 이미지 프로세싱을 통한 균열 탐지 및 정량화에 많이 쓰이는 방법으로 단위 픽셀 길이와 면적, 위치를 통해 필요한 결함 정보를 계산한다.

본 방법을 기반으로 결함의 위치, 길이, 폭, 면적 등을 계산하는 알고리즘을 구축하였고, 이를 활용하여 결함 데이터 정리를 실시하였다. 균열 수치 계산이 가능한 알고리즘을 개발하여 균열 정보를 측정하였다. 균열의 길이와 폭의 경우, 해당 픽셀 수와 한 픽셀 당 길이를 곱하여 계산하였고, 결함 면적의 경우, 해당 픽셀 수와 한 픽셀 당 면적을 곱하여 계산하였다. 이와 같은 데이터 결과를 엑셀로 추출하여 데이터 정리가 가능할 수 있도록 하였고 데이터의 연번은 외관조사망도의 연번과 일치시킴으로써 결함의 위치 파악에도 용이하도록 하였다.

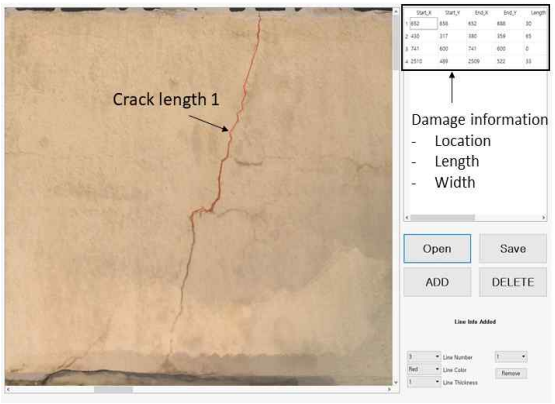
본 연구에서 개발한 균열 탐지 알고리즘은 이미지 픽셀 기반 사진측량법에 기초하여 단위 픽셀 길이를 계산하고 그를 이용하여 이미지 내에서 결함이 걸쳐있는 픽셀수와 위치를 통해 결함의 위치, 길이, 폭, 면적 등을 계산한다. 본 알고리즘으로 균열이 걸쳐있는 이미지를 선택하면 해당 점의 픽셀이 선택된다. 따라서 균열을 따라 픽셀들을 선택하면 알고리즘이 픽셀의 개수를 계산하여 픽셀이 나타내는 거리와 종합하여 정량적 정보들을 산정한다. 이런 일련의 프로세스를 정리하면 다음과 같다. 결함의 길이(L_d)로 균열 폭과 길이의 경우, 해당 픽셀 수(N_d)와 한 픽셀 당 길이(L_p)를 곱하여 계산하였고, 결함 면적(A_d)의 경우, 해당 픽셀 수(N_d)와 한 픽셀 당 면적(A_p)을 곱하여 계산한다.

· 결함의 길이, L_d

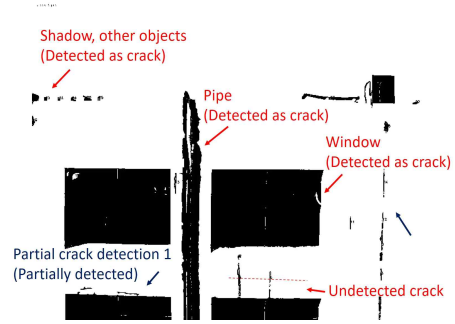
$$L_d = N_d \times L_p \tag{2.7}$$

· 결함의 면적, A_d

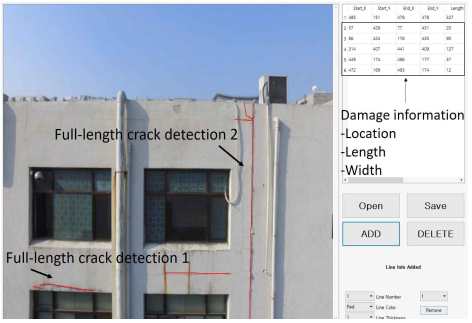
$$A_d = N_d \times A_p \tag{2.8}$$



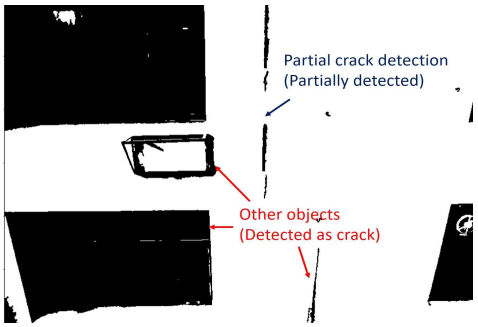
[그림 2.25] 픽셀 기반 결함 정량화 알고리즘 예시



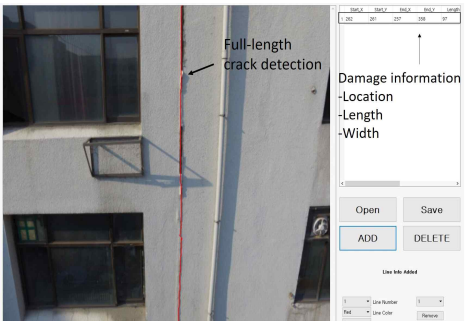
(a) 기존 화상처리기법 예시 1 (Yamaguchi, 2008)



(b) 사진측량법 알고리즘의 활용 예시 1



(b) 기존 화상처리기법 예시 2 (Yamaguchi, 2008)

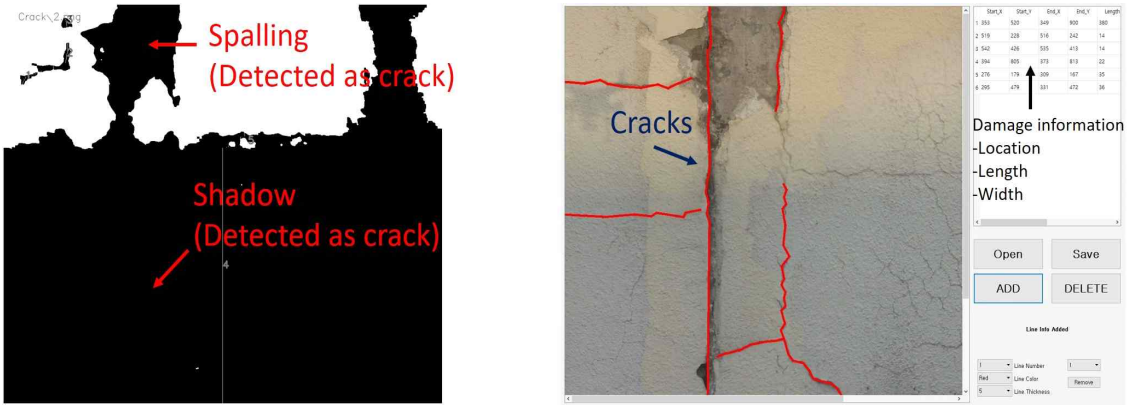


(d) 사진측량법 알고리즘의 활용 예시 2

[그림 2.26] 기존 화상처리 기법과 사진측량법 알고리즘 검출 결과 간 비교

그림 2.26은 촬영한 건축물을 대상으로 기존의 이미지 프로세싱을 활용한 균열 탐지기법과 본 연구에서 제시한 이미지 기반 사진측량법을 적용한 결과 비교 사진이다. 비교를 위해 사용한 기존 기법은 명암도 기반 이미지 프로세싱 균열 검출 기법(Yamaguchi, 2008)의 원리를 사용하였다. 그림 2-4-7은 국소부위를 대상으로 기존 사진측량법과 본 연구에서 제시한 사진측량법을 비교하였다. 기존 사진측량법은 균열을 제외한 창문, 파이프, 실외기, 그림자 등을 균열로 오인하여 검출하는 것을 확인하였다. 따라서 기존의 이미지 프로세싱 기법은 무인비행체를 활용하여 5-10m 떨어진 거리에서 촬영 시 이미지의 균열 검출에 있어 탐지의 낮은 정확도와

범위의 한계가 있는 것을 확인할 수 있었다.



(a) 기존 화상처리기법 (Yamaguchi, 2008)　　(b) 사진측량법 알고리즘의 활용

[그림 2.27] 기존 화상처리 기법에 의한 검출의 한계

본 연구에서 개발한 알고리즘으로 균열을 검출한다면 기존에 이미지 프로세싱을 활용한 균열부 탐지 기법에 비해 균열 오검출 혹은 미검출 확률이 크게 줄어든다. 기존의 이미지 프로세싱을 활용한 균열부 탐지 기법은 국소부위에 한정되어 알고리즘을 학습시켰으므로 건축물 전체 외벽에 대한 균열 검출 신뢰성이 낮다. 그러나 개발한 알고리즘은 무인비행체로 획득하여 생성한 건축물 외벽에 대해서 균열도 작성이 가능하여 실제 건축물의 안전점검 시 적용성이 높을 것으로 기대된다. 본 연구에서 제시한 알고리즘은 이미지 픽셀 기반으로 개발하였으므로 균열에 대해서 길이, 넓이, 위치를 정량적으로 계산할 수 있으며 획득한 정량적 균열 데이터 결과를 엑셀로 추출하여 결함 현황의 정리가 가능하다. 데이터의 연번은 외관조사망도의 연번과 일치시킴으로써 결함의 위치파악에도 용이하도록 하였다. 이러한 장점을 바탕으로 무인비행체를 활용하여 건축물의 외관조사를 실시 할 시, 획득한 건축물의 외관형상 및 균열 데이터 획득이 가능하다.

다. 기존 건축물을 통한 프로토콜 검증

앞서 설명했던 바와 같이 안전점검 및 정밀안전진단 시 상태평가를 실시하고 결함부위 등 주요 부위에 대한 외관조사망도 작성 등 조사결과를 도면으로 기록하여야 한다. 따라서 무인비행체를 활용한 외관결함조사 시 적절한 비행촬영계획과 데이터 프로세싱을 통한 작업 프로세스 구축이 필요하며, 최종적으로 무인비행체를 활용한 외관조사망도 작성 프로토콜을 제시하고 이를 실제 건축물 일부 구간의 외관결함탐지에 적용해봄으로써 검증하였다.

(1) 장비

본 연구에 사용된 무인비행체는 DJI phantom3 standard로 회전익 무인비행체를 사용하였다. 건축물 안전점검 시 위치이동과 함께 고도를 달리하는 수직비행이 필요하기 때문에 회전익보다는 고정익 무인비행체가 적합하다 판단하였다. 본 무인비행체는 해상도 4000×3000의 RGB 카메라 1개가 장착되어 있고, 무게는 약 1.2kg, 비행가능시간은 약 25분이다. 시중에 판매되는 산업용 무인비행체나 주문제작을 통한 무인비행체에 비해 경제적인 것이 특징이며, Wi-Fi를 통해 스마트폰 혹은 태블릿pc로 조작 가능하다.



[그림 2.28] 무인비행체 장비 : DJI Phantom3 Standard

[표 2.7] DJI Phantom3 Standard 제원

항목	상세
개체명	DJI Phantom3 Standard
비행 모드	수동 비행, 지능형 비행 모드 (Point of Interest, Waypoints etc)
렌즈	FOV(Field Of View) 94° 20mm(35mm format equivalent) f/2.8
최대 이미지 크기	4000×3000 (RGB)
무게	1.216kg
최대 비행시간	25분

(2) 대상 건축물 선정

대상 건축물은 고려대학교 자연계캠퍼스에 위치한 제2공학관으로 1963년 준공된 철근콘크리트조 5층(연면적 15,035 m^2) 규모의 학교건축물이다. 정밀점검은 2004년과 2015년에 실시하였으며, 정밀점검 결과는 C등급이다.

이에 따른 정밀점검 결과보고서와 구조도면은 보관되어 있지만 작성된 외관조사망도는 없는 상태였다. 선정 이유는 본 건축물이 철거가 예정된 건축물로 외관에 크고 작은 균열, 박리 등의 외관결함이 존재하고 외장재가 없어 균열 등의 구조 결함을 외관에서 확인할 수 있었으며, 학교건축물로 연구목적상 촬영승인을 받기에 용이하다고 판단하였다. 철거가 확정된 후로 내부 재실인원이 적었으며, 평소 건물 주변의 통행량이 적다는 점도 작용하였다.



[그림 2.29] 대상건축물 : 고려대학교(안암) 제2공학관 (1963년 준공)

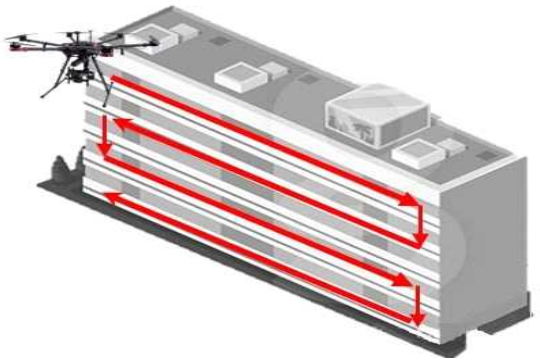
[표 2.8] 대상 건축물 제원

항목	상세
건물명	고려대학교(서울) 제2공학관
구조 유형	RC 구조
완공 연도	1964년
총면적	$15,035\ m^2$
정밀안전점검 결과	C (2015)
외부 손상 지도	없음

(3) 무인비행체를 활용한 외관조사망도 작성 프로토콜 적용

무인비행체를 활용하여 건축물의 외관검사를 진행하고 이를 통해 외관조사망도 작성, 결함 데이터의 정리 및 정량화를 위한 프로토콜을 개발하였고, 대상 건축물에 적용함으로써 검증하였다. 프로토콜은 무인비행체의 비행 특성, 데이터 획득 방안 등을 고려하여 6단계로 구성하였다. 제안한 프로토콜은 다음과 같다.

1단계는 비행촬영계획(Flight Planning)으로 무인비행체를 이용한 비행촬영에 관한 사전 허가, 비행 계획, 안전 계획이 해당된다. 비행촬영에 앞서 사전 허가가 필요한데 크게 2가지로 APS(Airline Business Plan Onestop Processing System)로부터 받는 공식 허가에 해당되는 '초경량비행장치 비행승인신청' 및 '항공사진 촬영허가 신청'과 건물 관리자로부터 받는 비행촬영에 대한 비공식 촬영허가가 있다. 본 연구에서는 학교건축물에 대한 연구목적의 촬영으로 APS와 학교 측으로부터 어렵지 않게 승인을 받을 수 있었다. 촬영에 관한 비행계획은 대상물 특성상 건축물 외벽면과 수평하게 비행해야 했으므로, 무인비행체 내에 내장된 GPS 기반 자율비행모드는 사용할 수 없었다. 대다수의 자율비행모드는 측량 목적으로 일정한 고도에서 이루어지는 GPS 기반 비행으로 사용되는 경우가 지배적이다. 본 연구에서 사용한 무인비행체의 비행기능으로 고도를 달리하는 자율비행모드는 없는 관계로 수동 비행촬영을 실시하였다. 비행경로는 무인비행체의 카메라 광각이 가로로 넓어 더 높은 오버랩 비율을 얻을 수 있다는 점에서 한 층씩 촬영하는 수평비행으로 결정하였다.



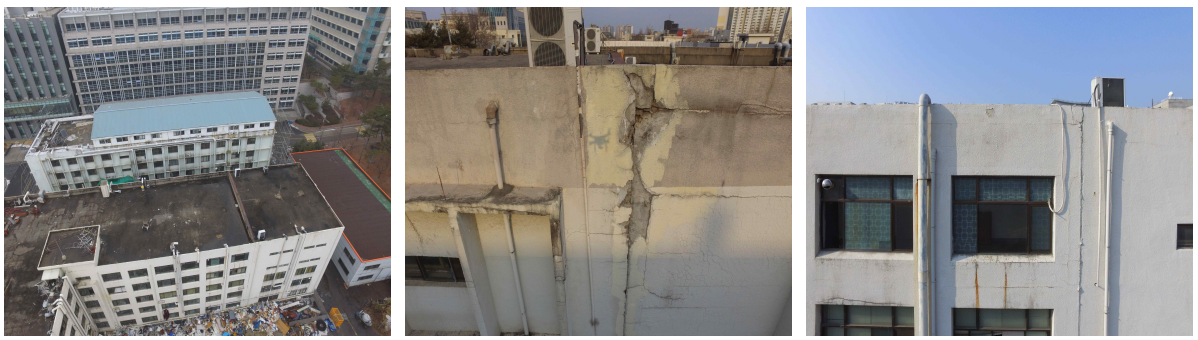
[그림 2.30] 비행계획 : 수동 수평 비행 계획

수동 촬영인 만큼 비행 속도는 1m/s 이하의 느린 속도로 이동하며 촬영하였고, 카메라 각도는 약 45°를 유지하며 촬영하였다. 차후의 3D 모델링 작업을 고려하여 최대한 사진 간의 오버랩이 많도록 많은 지점에서 촬영을 실시하였다. 촬영 당시 영하 10°C 안팎의 낮은 기온에서 비행이 진행되어 무인비행체의 빠른 배터리 방전으로 인한 실내 재충전 시간이 고려되었다. 이를 고려해서 촬영기간은 3일로 하루에 2시간씩 진행이 되었다.

촬영 시 안전계획으로는 무인비행체가 건축물과 충돌하는 사고를 방지하기 위해 비행체 조종자 1명 외 다른 1명이 서로 다른 위치에서 비행체의 위치정보를 알려주었다. 또 다른 1명은 해당 촬영 지점 주변 통행로에서 보행자들에게 비행촬영에 대한 내용은 사전 인지 시켜주고 특이사항을 전달해 줌으로써 보행자에 대한 사고위험에 대비하였다.

2단계는 항공촬영으로 총 면적 6100 m^2에 달하는 4면의 건축물을 3일에 걸쳐 촬영하였고, 벽면 수직 촬영 1592장, 자유 각도 촬영 89장으로 총 1681장의 항공사진을 확보하였다.

비행 촬영 시 무인비행체와 건축물 간의 간격은 충돌을 고려하여 1-2m 내에서 촬영을 실시하였다. 촬영 당시 바람이 많이 불지 않았지만, 수동비행을 실시하면서 GPS 수신이 원활하지 않아 비행체가 자주 건물 쪽으로 이끌려가는 현상을 보였다. 건축물의 높이 15m, 인접 건물 간의 최소 거리가 약 10m로 상대적으로 좁은 틈 사이에서 비행하였던 점이 GPS 수신을 방해하였고 비행체의 호버링에 영향을 준 것으로 파악하였다.



(a) 건축물 옥상 (b) 큰 균열이 있는 벽면 (c) 벽면 근접 이미지

[그림 2.31] 대상 건축물 비행 촬영 이미지

3단계는 촬영한 항공사진을 활용하여 3D 모델링하는 단계로, UAV 전용 맵핑 프로그램인 Pix4D를 사용하여 모델링을 실시하였다. SfM(Structure from Motion) 기반의 형상화로 다양한 각도에서 촬영한 사진들은 포인트 클라우드로 구현되며, 3D Modeling의 결과는 tiff파일 형태로 출력되었다.

GSD(Ground Sample Distance)는 2.0mm/pixel 이었으며, 포인트 클라우드의 최소 매칭 수를 3개로 두는 조건으로 프로세싱은 약 36시간 소요되었다. 이 후 GPS 오류로 인한 포인트 클라우드 보정작업을 프로그램 내에서 실시하였다.

4단계는 정사사진(Orthomosaic) 작업으로 3단계에서 얻은 3D 모델을 이용하여 2D 정사사진을 얻는 단계이다. 본 작업의 목적은 외관결함조사를 위하여 각 면의 2차원 형태의 이미지가 필요하기 때문이다. 이를 통해 다양한 각도에서 촬영한 항공사진들의 각도에 의한 형상 왜곡을 보정할 수 있다. 해당 면에 수직하도록 항공사진들을 모두 조합한 후 정사시킴으로써 1개의 벽면에 해당되는 고해상도 이미지를 확보할 수 있었으며, 그 결과는 그림 4.9와 같았다. 본 정사사진을 얻어내는데 약 40분가량 소요되었다. 얻어낸 고해상도 2D 이미지와 실제 촬영 이미

지 간 비교하여도 차이를 느끼기 어려운 수준이었으며, 잔 균열, 누수 부위까지도 이미지 내에서 검출 가능하였다.

5단계는 외관조사망도 작성으로, 촬영 사진들 간 스티칭(Switching)을 통해 얻어낸 2D 정사사진을 활용하여 외부 결함 탐지 작업을 실시하는 단계이다.

2D 정사사진의 높은 해상도를 통해 이미지 상에서 결함 탐지가 가능하였으며 탐지결함의 범례는 균열, 망상 균열, 박리 및 철근노출, 누수흔적 및 백화, 붉은 녹물 흔적, 변색 및 얼룩으로 총 6가지로 구분하였다. 결함 유형별로 색을 다르게 지정하여 외관조사망도에서 손쉽게 구분될 수 있도록 구성하였다.

6단계는 건축물 외관 손상정보 데이터의 정량화 및 기록 단계로, 작성한 외관조사망도로부터 확인된 손상 데이터의 손상정도를 수치화하고 정리하는 작업에 해당된다. 외관조사망도의 손상 정도 수치화는 이미지 픽셀 기반 정량화 방법을 사용하였다. 본 방법은 이미지 프로세싱을 통한 균열 탐지 및 정량화에 많이 쓰이는 방법으로 단위 픽셀 길이와 면적, 위치를 통해 필요한 결함 정보를 계산한다(Lee, 2003; Lim, 2007; Ellenberg et al, 2014).



[그림 2.32] 2D 정사사진(Orthomosaic)을 활용한 이미지 기반 결함 탐지

(4) 알고리즘을 이용한 균열 정량정보 검출 정확도

후처리 작업을 통해 획득한 고해상도 정사사진을 균열 검출 프로그램 상에 업로드 하여 외부 결함 탐지 작업을 실시하였다. 2D 정사사진의 높은 해상도를 통해 이미지 상에서 결함 탐지가 가능하였으며 탐지결함의 범례는 균열, 망상 균열, 박리 및 철근노출, 누수흔적 및 백화, 붉은 녹물 흔적, 변색 및 얼룩으로 총 6가지로 구분하였다. 사진 측량(Photogrametric method) 기법을 활용하여 확인한 균열 등 결함의 정량정보를 확인하였다. 고해상도 이미지를 바탕으로 가로 40m, 높이 16.5m 규모의 벽면 전체에 대한 결함 검출이 가능하였으며, 검출된 결과는 엑

셀 데이터로 정리 가능하였다. 그림 2-4-11과 그림 2-4-12, 표 2-4-3은 각각 정사사진을 활용하여 작성한 고려대학교 제2공학관 후면의 외관조사망도과 사진 측량법에 의한 정량적 결함 검출 현황 예시이다.

본 방법을 기반으로 결함의 위치, 길이, 폭, 면적 등을 계산하는 알고리즘을 구축하였고, 이를 활용하여 결함 데이터 정리를 실시하였다. 균열 수치 계산이 가능한 알고리즘을 개발하여 균열 정보를 측정하였다. 균열의 길이와 폭의 경우, 해당 픽셀 수와 한 픽셀 당 길이를 곱하여 계산하였고, 결함 면적의 경우, 해당 픽셀 수와 한 픽셀 당 면적을 곱하여 계산하였다. 이와 같은 데이터 결과를 엑셀로 추출하여 데이터 정리가 가능할 수 있도록 하였고 데이터의 연번은 외관조사망도의 연번과 일치시킴으로써 결함의 위치 파악에도 용이하도록 하였다.



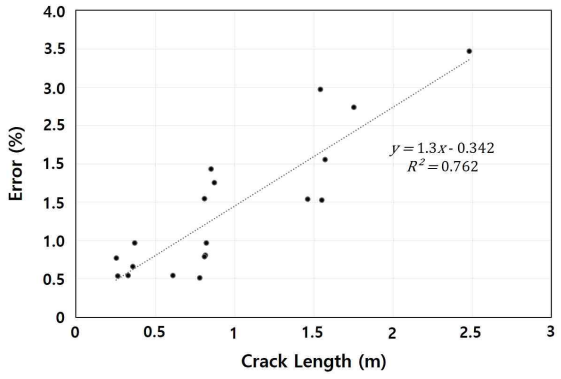
[그림 2.33] 사진측량학적 방법(Photogrammetric method)을 통한 외관조사망도 작성

[표 2.9] 사진측량법 활용 결함 정량화 결과 및 오차율

측정 결과 / 균열 번호		측정 결과값	기존 화상기법 측정 결과	오차율(%)
균열 1	균열 길이 (mm)	1570	1594	1.55
균열 2		870	862.2	1.25
균열 3		364	368.3	0.46
균열 1	균열 폭 (mm)	2.8	3	7.14
박리 1	균열 면적 (m^2)	0.045	0.038	15.56

① 균열 길이 측정 정확도

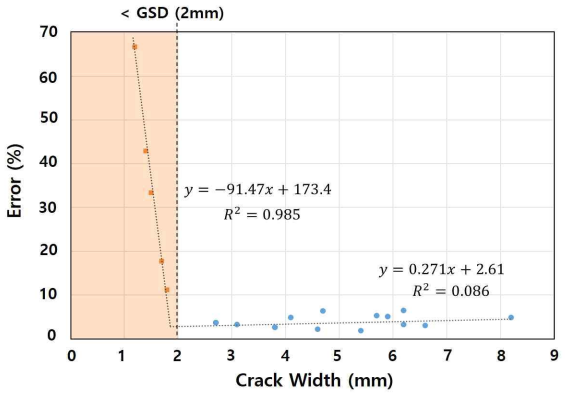
측정의 정확도 측면에서는 본 연구에서 제안한 사진측량법으로 측정한 결과와 실제 측정 결과를 비교함으로써 정확도를 확인하였다. 균열의 길이 측정에 있어서 오차율 4% 이내의 정확도를 나타냈다. 균열 길이별 오차 분포를 그림 2-4-14에 나타내었다. 균열 길이별 오차 분포는 균열 길이가 증가함에 따라 오차율도 함께 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 제시한 방법은 실제 균열의 굽어진 구간을 따라 여러 개의 선분의 조합으로 계산하여 균열의 비선형성을 고려하지만, 기존의 측정방법에서 시작점부터 끝점까지의 직선거리로 계산하기 때문에 균열의 길이가 길수록 오차가 커진다는 것을 알 수 있었다.



[그림 2.34] 사진측량법을 활용한 균열 길이 계측 정확도

② 균열 폭 측정 정확도

균열의 폭 측정에서는 균열 폭에 따라 상이한 오차율 분포를 나타냈다. 균열 폭 2mm 이상에서는 8% 이내의 정확도를 나타냈지만 균열 폭 2mm 미만에서는 2mm에서 멀어질수록 오차율이 커지는 경향을 확인할 수 있었다. 이는 본 연구에서 무인비행체를 통한 항공사진을 활용하여 조합했을 때의 최소단위에 해당하는 픽셀길이(GSD)가 2mm로 그 이하의 균열들을 검출이 어렵다는 것을 확인했다. 따라서 본 연구에서 제안하는 무인비행체를 활용한 결함탐지와 균열도작성은 최소 2mm 이상의 균열 및 결함에 대해 탐지가 가능하다고 판단된다.



[그림 2.35] 사진측량법을 활용한 균열 폭 계측 정확도

③ 손상 면적

기존의 손상 면적 측정법은 면적을 직사각형으로 산정하여 균열길이(L)에 0.25m을 곱하는 약산 법으로서 실제 면적이라 판단하기 어려워 본 방법 간의 단순비교가 어려운 점이 있다. 기존 방법과 비교했을 때 박리, 박락 등의 면적 측정에 있어서는 15% 수준의 값 차이를 나타냈다. 본 연구에서 제안하는 면적 계산법은 실제 기하학적 특성을 고려한 다각형 면적 측정으로 기존의 약산 법보다 실제 면적 산정에 더 가까울 것으로 보이며, 해상도에 따라 픽셀의 면적이 제곱꼴로 달라지기 때문에 해상도를 높이 가져간다면 측정 오차를 줄일 수 있을 것으로 예상한다.

(5) 외관조사 결과

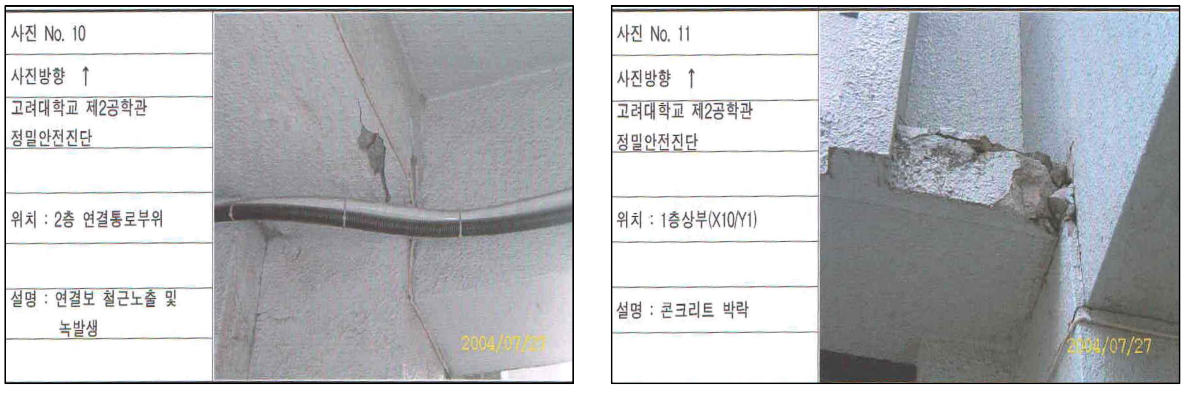
정사사진을 통해 실시한 외관조사에서 발견된 결함을 균열, 망상 균열, 박리 및 철근노출, 누수흔적 및 백화, 붉은 녹물 흔적, 변색 및 얼룩으로 총 6가지로 분류하였다. 주로 0.4mm 이하의 균열이 존재하였으며, 창문과 같은 개구부 주위, 지붕 파라펫 경계부, 증축 경계선 부근에서 발견되었다.



단위 : m^2

손상유형	손상면적	손상유형	손상면적	손상유형	손상면적
균열	-	망상균열	2.543	붉은 녹물 흔적	3.02
박리 및 철근노출	2.9	누수흔적 및 백화	1.842	변색 및 얼룩	0.71

[그림 2.36] 픽셀 기반 외관조사망도 작성 및 결함 면적 정량화



[그림 2.37] 기존 정밀안전진단 보고서 외관결함 기록 사진

이는 구조적 결함보다는 건조수축균열, 시공결함 혹은 건물이 노후하면서 자연 발생된 결함으로 판단하였다. 본 연구에서 적용한 외관조사결과는 대상건축물에 시행된 안전진단 결과와 비교하였을 때, 육안조사에 의한 상태검사 결과와 일치하였다. 기록 관리에 있어서는 기존 안전진단 보고서의 경우 결함 위치 서술에 어려움이 있고, 특정 방향의 사진만이 존재하는 반면, 본 방법은 건축물 진단시점의 3D 모델, 통합된 외관조사망도 등 향후에도 이용 가능한 디지털 자료를 남길 수 있다는 점에서 이점이 있었다.

라. 소결

본 장에서는 무인비행체를 이용한 건축물의 긴급결함탐지기술 개발을 통해 건축물 외관안전점검을 무인비행체를 활용하여 수행하였고, 획득한 데이터를 처리하는 프로세스를 개발하였다. 이를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

현재 진행되는 무인비행체 연구 분석을 통해 건축물 안전점검에 있어 육안점검 활용 가능성을 확인하였으며, 건축물 유지관리에 있어 안전진단에 필요한 자료 취득 및 자료처리를 수행하여 외관결함을 탐지하고 결함 정보 데이터를 획득하였다.

무인비행체로 획득한 사진을 통해 균열 검출 방법으로 이미지 픽셀 기반 사진측량법(Pixel-based Photogrammetry) 알고리즘을 구축하였다. 측정 정확도는 균열 길이 측정 시 오차율 4% 이내의 정확도를 나타냈고, 균열 길이가 증가함에 따라 오차율도 함께 증가하는 경향을 확인하였다. 균열 폭 측정 시 최소 픽셀길이(GSD)에 해당하는 2mm까지 측정 가능한 것으로 확인하였다. 본 연구에서 제안하는 무인비행체를 활용한 결함탐지와 균열도 작성은 최소 픽셀길이(GSD) 이상의 균열 및 결함에 대한 탐지가 적절한 것으로 판단된다.

무인비행체로부터 획득한 항공사진을 이용하여 3D 모델링을 실시하였고, 이미지 정사 작업을 통해 육안점검이 가능한 수준의 고해상도 이미지를 획득하였다. 기존 안전점검의 육안점검과 비교하였을 때, 시각효과를 높인 활용성 높은 디지털 자료 수집 및 자료 누적을 통한 결함 추적관리의 가능성을 확인하였다.

2.5 적외선 열화상 기법을 활용한 구조 결함 평가법

가. 개요

본 절에서는 적외선 열화상 기법을 활용한 구조 결함 평가법에 대한 연구 결과를 서술하였다. 적외선 열화상 기법을 활용한 콘크리트 균열 깊이 평가법과 강재 용접 및 볼트 결함 평가법에 해당된다. 먼저 콘크리트 균열 깊이 평가법은 표면 균열을 적외선 열화상을 이용해 검출하고 균열 깊이 평가 기법의 활용성을 검토하기 위해 실험적 연구를 수행하였다. 본 실험의 목적은 무인비행체에 부착된 열화상 모듈을 이용하여 콘크리트 균열을 검출하고, 균열 깊이를 예측함으로써 구조물의 중·대형 손상을 신속하게 파악하고 정량화하는데 있다. 본 연구에서는 먼저 실험을 위해 콘크리트 균열의 폭 및 깊이를 정량화한 실험체를 제작하였고, 폭 및 깊이에 따른 온도 차이를 확인하기 위해 적외선 열화상 장치로 촬영하여, 계측된 온도 데이터를 분석하였다. 분석방법으로는 빅데이터(BIG DATA) 분석을 위한 머신러닝(Machine Learning)을 활용하여 균열깊이 예측 알고리즘을 구축하였다.



[그림 2.38] 적외선 열화상 기법을 활용한 콘크리트 균열 평가법

적외선 열화상 카메라를 이용하여 콘크리트 균열 깊이 계측을 비파괴검사에 응용하고자 열화상 이미지 및 온도분포 특성을 알아보았으며 결함깊이를 예측할 수 있었다.

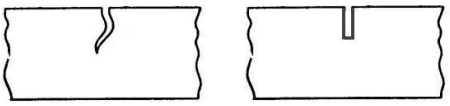
두 번째는 강재 접합부 결함 평가법으로, 강재 표면의 결함은 강재의 구조적 결함 중 하나로 본 연구에서는 열화상 기법을 활용한 결함 평가 기법에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 인공결함이 있는 실험 표본을 제작하고, 열화상 카메라를 통해 데이터를 수집하였다. 마찬가지로 분석방법으로는 빅데이터(BIG DATA) 분석을 위한 머신러닝(Machine Learning)을 활용하여 균열깊이 예측 알고리즘을 구축하였다.

나. 적외선 열화상 기법을 활용한 콘크리트 균열 깊이 평가법

(1) 실험체 계획 및 제작

(가) 연구의 기본가정

철근 콘크리트 구조물의 내구성 확보를 위하여 허용되는 균열 폭은 건조 환경의 경우 0.4mm, 습윤 환경의 경우 0.3mm로 콘크리트의 허용균열폭이 규정되어 있다. 본 실험체는 무인비행체와 열화상 모듈을 활용하여 중·대형 손상을 신속하게 파악한다는 목적과 제작의 현실성을 고려하여 최소 균열폭을 6mm로 설정하였으며 균열 깊이의 경우 실제 균열에서는 균열의 깊이에 대한 균열 진전방향이 비선형적인 방향을 나타내나 본 실험체 계획에서는 제작의 편의성을 고려하여 균열부 단면을 표면에서 수직 방향으로 제작하였다.



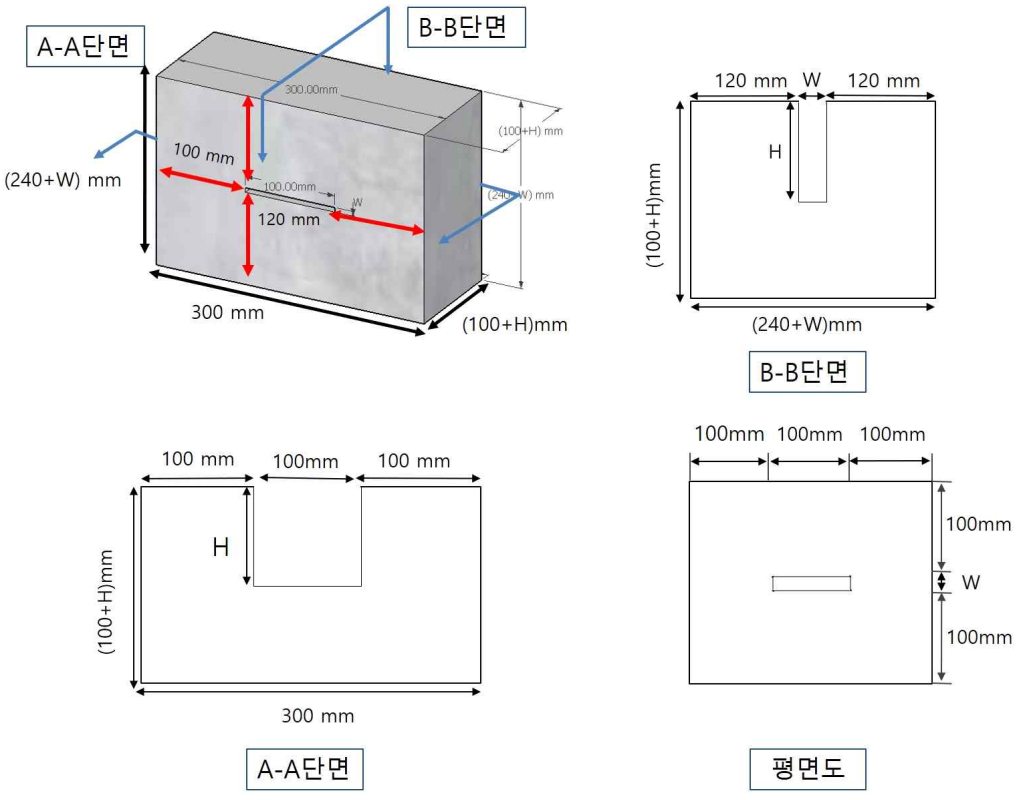
[그림 2.39] 균열 실험체 제작을 위한 기본가정

(나) 실험체 계획

균열의 폭 및 깊이에 따른 온도 차이를 확인하기 위하여 콘크리트 구조물에 발생한 균열을 모사하여 정량적인 폭과 깊이를 갖는 실험체를 제작하였다. 균열폭은 6mm, 10mm, 15mm, 20mm, 균열깊이는 20mm, 30mm, 40mm, 60mm를 실험변수로 하여 13개의 균열 모사 실험체를 제작하였다. 각각의 균열 일람과 균열 실험체 표기 방법은 다음과 같이 개략적으로 제시하였다.



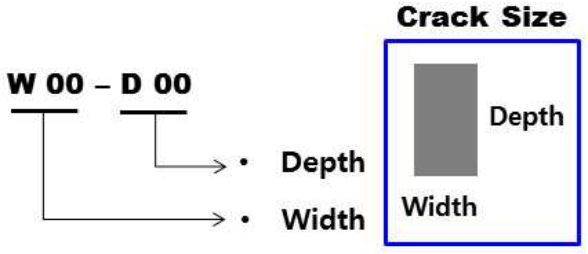
[그림 2.40] 콘크리트 균열모사 실험체 형상



[그림 2.41] 콘크리트 균열모사 실험체 도면

[표 2.10] 균열 실험체 일람

균열 깊이 / 균열 폭	20mm	30mm	40mm	60mm
6mm	-	-	W6-D40	-
10mm	W10-D20	W10-D30	W10-D40	W10-D60
15mm	W15-D20	W15-D30	W15-D40	W15-D60
20mm	W20-D20	W20-D30	W20-D40	W20-D60



(2) 적외선 열화상 촬영

(가) 적외선 열화상 카메라 실험 장비

본 연구에서 운용성이 좋은 포터블 형태의 적외선 열화상 카메라 FLIR T420을 사용하여 연구를 수행하였다. 고 해상도, 대형 터치스크린, 높은 온도 분해능, 회전식 렌즈, 뷰 파인더, Wi-Fi 및 블루투스(Bluetooth), USB등 연결 지원이 가능하다.

최고 320×240 픽셀의 IR해상도를 가지고 있으며, 측정 온도 범위는 -20℃ ~ 650℃, 민감도는30℃에서 0.045℃이다. 1~4× 연속 디지털 줌, 연속 자동 초점 및 수동 초점, 3메가 픽셀의 실 화상 카메라를 내장하여 열화상/실 화상 이미지를 동시 저장이 가능하여 실 화상 내 열화상 삽입(PIP) 및 합성이 가능하다.

또한 USB를 PC에 연결하여 촬영 영상의 녹화 및 스트리밍 가능하다. 기본적으로 Li-Ion 배터리 2개를 이용하여 외부 전원의 연결 없이 일정 시간 사용이 가능하며, 블루투스(Bluetooth)를 이용해 타 측정 장치와 연계가 가능해 측정의 정확도와 신뢰성을 향상 시킬 수 있다. 적외선 열화상 카메라 FLIR T420의 이미지와 FLIR T420의 성능은 다음과 같다.

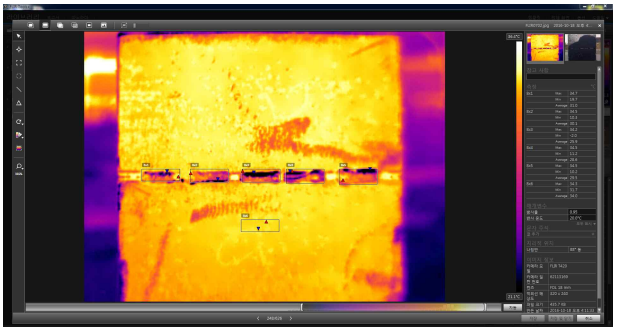


[그림 2.42] FLIR T420 포터블 열화상 카메라

[표 2.11] FLIR T420 제원

항목	상세
IR 해상도	320 x 240 픽셀
온도 범위	-20℃ ~ 650℃
시야	25° X 19°
열감도	45mK @+30℃
확대	1 - 4 X Continuous, digital zoom, including panning
Focus	Automatic (one shot) or manual
무게	0.88 kg

계측된 열화상 이미지는 FLIR Tools+ 소프트웨어를 통하여 분석 기법에 따라 계측하고자하는 픽셀의 온도 계측, Box단위 온도 Max값, Min값, Average값 계측 등 다양한 계측 기법이 있으며, 계측하고자 하는 피사체에 따라 설정하여 이미지 분석 및 온도 분석을 할 수 있다.



[그림 2.43] FLIR Tools+ 소프트웨어

(나) 풍속, 대기 온도 및 습도 측정기 : TESTO 410-2

본 실험장비는 열화상이미지 촬영 시 동시 기록할 풍속, 대기 온도 및 습도를 측정하는 장비로 환기 그릴 (공기 배출구) 및 옥외에서 사용 시 신속한 측정에 이상적이며, 설치된 베인 (직경 40mm)을 사용하여 0.4m / s ~ 20m / s의 낮은 공기 속도를 측정할 수 있다. 풍속계에는 장기간의 안정성을 특징으로 하는 TESTO 습도 센서와, 공기 조건을 검사하기 위한 - 10 ~ + 50 ° C의 측정 범위를 갖춘 NTC 온도 센서가 장착되어 있다. 따라서 이 기능을 사용하여 공기의 온도와 습도를 안정적으로 측정할 수 있다.

(다) 조도 측정기 : TESTO 540

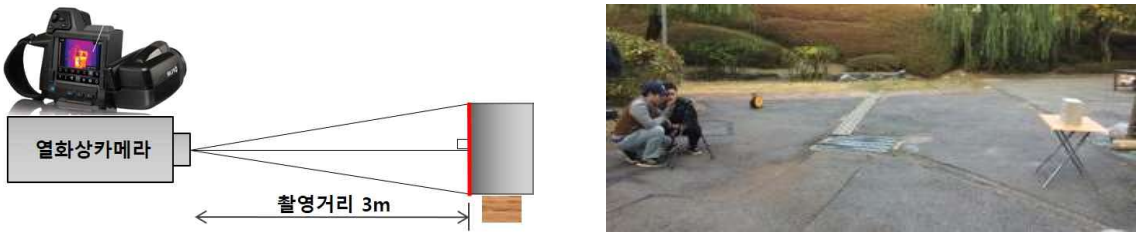
TESTO 540 조도계는 실험체에 도달하는 태양빛의 조도를 측정하기 위한 실험장비로 다양한 공간에서 검사를 수행하도록 설계된 소형 모델이다. 광센서는 사람의 눈의 분광 감도를 기반으로 설계되었으며 다양한 환경에서 조명 조건을 측정하는 데 이상적이다.



[그림 2.44] TESTO 540

(3) 적외선 열화상 촬영 계획

정량적 온도 계측에 앞서 실험체의 온도 분포 양상을 파악하기 위해 10:00부터 18:00까지 시간에 따른 열광 에너지 공급량의 변화를 이용하여 실험체와 적외선 열화상 카메라의 거리를 3m로 이격시켜 실험체 표면의 온도 변화를 측정하였다. 촬영 계획은 다음과 같다. 우선 실험체를 촬영 전날 야외에 비치시켜 열에너지를 충분히 받도록 한 후, 각각의 실험체에 대하여 촬영을 실시한다. 촬영시 콘크리트 실험체의 열전달에 영향을 주는 요인들로 대기온도, 대기습도, 풍속, 조도를 함께 측정함으로써 실험체의 온도데이터와 함께 구성되어 빅데이터를 구축할 수 있도록 구성하였다.



[그림 2.45] 콘크리트 균열모사 실험체 적외선 열화상 촬영

균열 폭 및 깊이에 따른 온도데이터의 정량적 분석을 위한 실험을 실시하였다. 직사광선의 영향이 비교적 적은 15:00부터 18:00까지 시간에 따른 열광 에너지 공급량의 변화를 이용하여 30분 간격으로 실험체 표면의 온도 변화를 측정하였다. 본 실험을 통해 균열의 폭 및 깊이에 따른 온도데이터를 정량적으로 분석하여 열화상 기법을 활용한 콘크리트 표면 균열 계측 기법의 가능성을 확인하였다.

(4) 머신 러닝(Machine Learning)을 통한 균열 깊이 예측 시스템

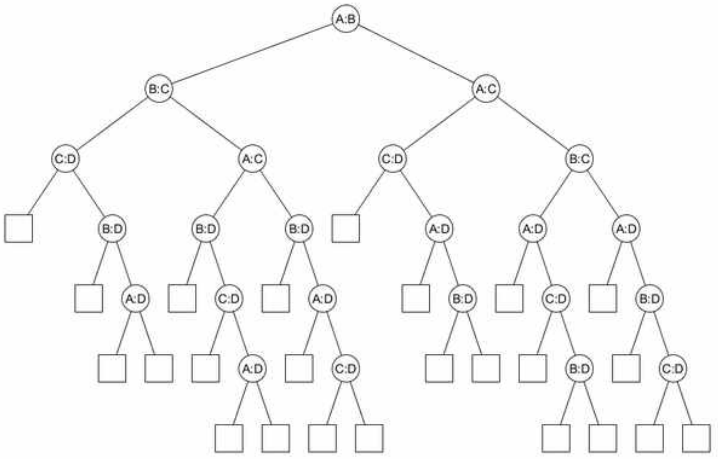
적외선 열화상 기법을 이용하여 콘크리트 균열부 온도, 정상부 온도 및 열전달에 영향을 줄 수 있는 요인들을 통해 콘크리트 균열 깊이를 예측하는 알고리즘을 도출하고자 본 연구에서는 머신 러닝(Machine Learning)을 활용하였다.

콘크리트 균열부는 균열의 형상과 크기 차이에서 오는 열적 물리량 차이로 인해 주변 정상부와 적외선 열화상 기법 적용시 온도가 달라지는 특징이 있다. 따라서 균열부의 온도와 균열의 깊이 간의 상관관계를 찾기 위해 수행한 실험을 토대로 데이터를 구축하고 이를 머신 러닝 기법을 활용하여 분석을 실시하였다. 데이터 구축에 있어서는 콘크리트 균열부 온도, 콘크리트 정상부 온도와 함께 콘크리트 실험체의 열전달에 영향을 주는 요인들로 대기온도, 대기습도, 풍속, 조도를 레이블로 구성하였다. 따라서 레이블과 함께 구성된 샘플 데이터 집합(Dataset)의 특성상 지도 학습(Supervised learning) 형태로 알고리즘을 구성하였다.

그에 따라 본 연구에서 랜덤포레스트(RandomForest), 의사 결정 나무(Decision Tree), 에이다부스트(AdaBoost), 가우시안 나이브 베이즈(GaussianNB), 서포트 벡터 머신(SVM)을 활용하여 측정한 균열부 온도 및 외기조건을 입력하면 균열깊이를 추정하는 Classifier 알고리즘을 개발하였다.

(가) 의사 결정 나무(Decision Tree)

의사 결정 나무(Decision Tree)는 지도 분류 학습에서 가장 유용하게 사용되고 있는 기법 중 하나로 모든 속성들이 이산적인 값들로 구성된 정의역을 가지고 있으며, 분류를 단일 대상 속성으로 지니고 있다고 간주한다. 분류의 정의역의 각 원소들은 클래스라고 불린다. 결정 트리 또는 분류 트리의 모든 내부 노드들에는 입력 속성이 일대일로 대응된다. 트리의 내부 노드에 연결된 가지에는 속성이 가질 수 있는 값들이 표시되며, 잎 노드에는 클래스 또는 클래스의 확률 분포가 표시된다. 학습에 사용되는 자료 집합을 적절한 분할 기준 또는 분할 테스트에 따라 부분 집합들로 나누며 순환 분할이라 불리는 방식으로 각각의 나눠진 자료 부분 집합에 재귀적으로 반복된다. 분할로 인해 더 이상 새로운 예측 값이 추가되지 않거나 부분 집합의 노드가 목표 변수와 같은 값을 지닐 때까지 계속된다. 결과를 해석하고 이해하기 쉬우며, 자료를 가공할 필요가 없다는 장점이 있다.

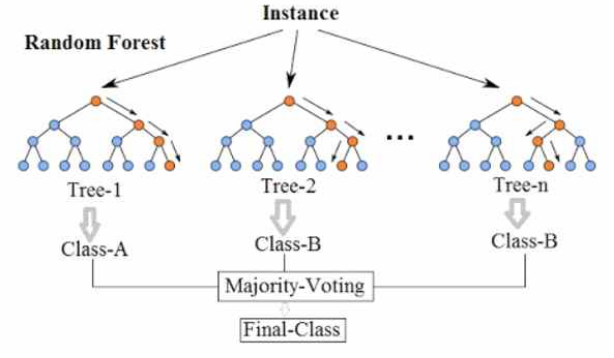


[그림 2.46] 의사 결정 나무(Decision Tree)의 개념도

(나) 랜덤포레스트(RandomForest)

랜덤 포레스트(RandomForest)는 여러 개의 의사 결정 나무(Decision Tree)들을 임의적으로 학습하는 방식의 앙상블 방법이다. 랜덤 포레스트 방법은 크게 다수의 의사 결정 나무를 구성하는 학습 단계와 입력 벡터가 들어왔을 때, 분류하거나 예측하는 테스트 단계로 구성되어있

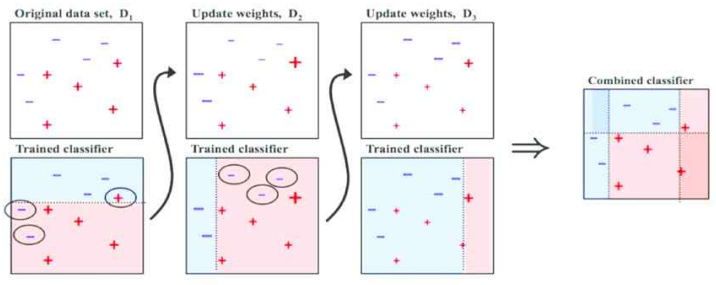
다. 랜덤 포레스트의 가장 핵심적인 특징은 임의성(randomness)에 의해 서로 조금씩 다른 특성을 갖는 트리들로 구성된다는 점이다. 이 특징은 각 트리들의 예측(prediction)들이 비상관화(decorrelation) 되게하며, 결과적으로 일반화(generalization) 성능을 향상시킨다. 또한, 임의화(randomization)는 포레스트가 노이즈가 포함된 데이터에 대해서도 강인하게 만들어 준다. 임의화는 각 트리들의 훈련 과정에서 진행되며, 가장 널리 쓰이는 두 가지 방법으로는 임의 학습 데이터 추출 방법을 이용한 앙상블 학습법인 배깅(bagging)과 임의 노드 최적화(randomized node optimization)가 있다. 이 두 가지 방법은 서로 동시에 사용되어 임의화 특성을 더욱 증진시킬 수 있다.



[그림 2.47] 랜덤포레스트(RandomForest)의 개념도

(다) 에이다부스트(AdaBoost)

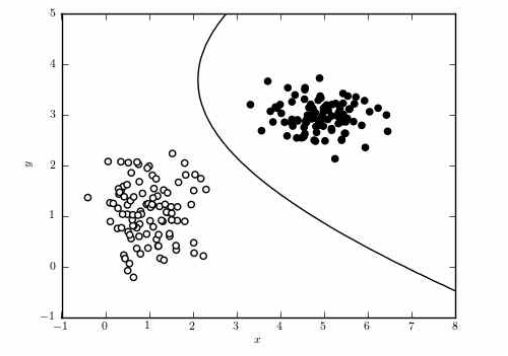
에이다부스트(Adaboost)는 성능을 향상시키기 위하여 다른 많은 형태의 학습 알고리즘과 결합하여 사용하는 분류기(Classifier)로 다른 학습 알고리즘(약한 학습기, weak learner)의 결과물들을 가중치를 두어 더하는 방법으로 표현한다. 이전의 분류기에 의해 잘못 분류된 것들을 이어지는 약한 학습기들이 수정해줄 수 있다는 점에서 효율적인 특징이 있다. 반면 노이즈가 많은 데이터와 이상점(outlier)에 취약한 모습을 보이지만, 차원수를 줄여주는 효과로 인해 다른 학습 알고리즘보다 과적합(overfitting)에 덜 취약한 특징이 있다. 개별 학습기들의 성능이 떨어지더라도, 최종 모델은 강한 학습기로 수렴한다는 원리를 이용한다.



[그림 2.48] 에이다부스트(AdaBoost)의 개념도

(라) 가우시안 나이브 베이즈(GaussianNB)

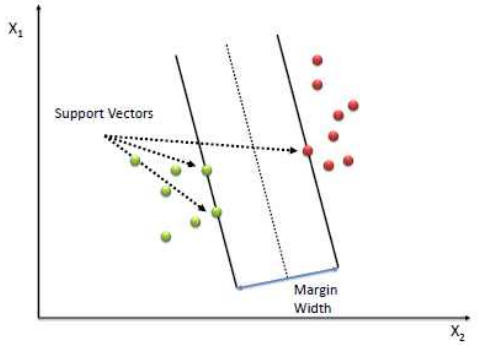
가우시안 나이브 베이즈(GaussianNB)는 일반적인 원칙에 근거한 여러 알고리즘들을 이용하여 훈련하며 공통적으로 모든 특성 값은 서로 독립임을 가정한다. 가우시안 나이브 베이즈의 특징으로는 분류에 필요한 파라미터를 추정하기 위한 트레이닝 데이터의 양이 매우 적으며, 많은 복잡한 실제 상황에서 잘 작동한다는 장점이 있다.



[그림 2.49] 가우시안 나이브 베이즈(GaussianNB)의 개념도

(마) 서포트 벡터 머신(SVM)

서포트 벡터 머신(Support Vector Machine, SVM)은 기계 학습의 분야 중 하나로 패턴 인식, 자료 분석을 위한 지도 학습 모델이며, 주로 분류와 회귀 분석을 위해 사용한다. 두 카테고리 중 어느 하나에 속한 데이터의 집합이 주어졌을 때, SVM 알고리즘은 주어진 데이터 집합을 바탕으로 하여 새로운 데이터가 어느 카테고리에 속할지 판단하는 비확률적 이진 선형 분류 모델을 만든다. 만들어진 분류 모델은 데이터가 사상된 공간에서 경계로 표현되는데 SVM 알고리즘은 그 중 가장 큰 폭을 가진 경계를 찾는 알고리즘이다. SVM은 선형 분류와 더불어 비선형 분류에서도 사용될 수 있다. 비선형 분류를 하기 위해서 주어진 데이터를 고차원 특징 공간으로 사상하는 작업이 필요한데, 이를 효율적으로 하기 위해 커널 트릭을 사용하기도 한다.



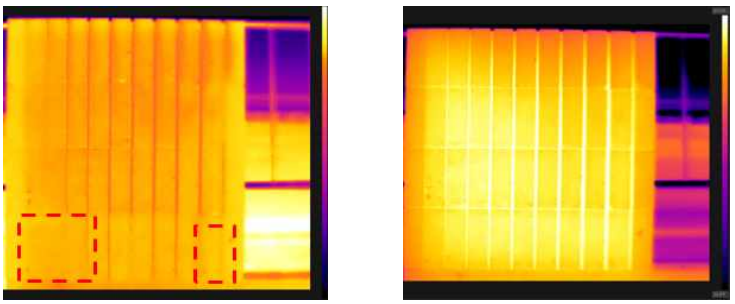
[그림 2.50] 서포트 벡터 머신(SVM)의 개념도

(5) 적외선 열화상 이미지 분석 결과

(가) 일사량 누적의 영향

콘크리트 균열부의 정량적 온도 계측에 앞서 실험체의 온도 분포 양상을 측정한 결과, 콘크리트 표면의 일사량 누적이 비교적 적은 오전 10시에 계측된 열화상 이미지의 경우 콘크리트의 표면보다 균열부의 온도 데이터가 낮게 나타는 것을 확인하였고, 반대로 콘크리트 표면의 일사량 누적이 비교적 많은 오후 3시에 계측된 열화상 이미지의 경우 콘크리트 표면보다 균열부의 온도가 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

다음의 그림은 일사량 누적의 영향을 나타내고 있으며, 오전 10시 열화상 이미지의 경우 특정 부분에서 콘크리트의 표면과 균열부의 온도 차이가 크지 않아 열화상 이미지를 바탕으로 균열부를 계측하기에 무리가 있어 보이나, 오후 3시 열화상 이미지의 경우 균열부의 모든 경우에 있어 콘크리트 표면보다 온도가 높게 계측되어 휘도가 높은 밝은 색으로 나타나는 것을 확인 할 수 있었으며 이를 통해 열화상 이미지를 활용하여 균열부를 계측 할 수 있다.

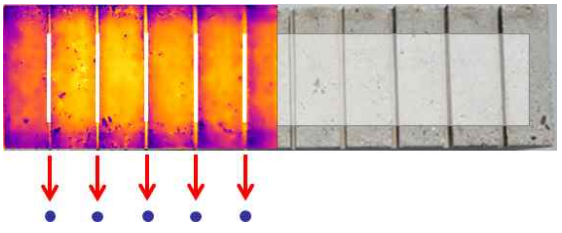


(a) 오전 10시 열화상 이미지 (b) 오후 3시 열화상 이미지

[그림 2.51] 일사량 누적의 영향

(나) 균열 깊이 정량적 분석을 위한 열화상 이미지 분석

열화상 이미지를 활용한 균열부의 온도 분포 파악 실험을 통해 열화상 기법을 활용하기 위한 콘크리트 표면 균열 계측 기법의 가이드라인을 확인하였으며, 해당 결과와 계산된 촬영거리를 적용하여 열화상 촬영을 실시하였다. 실험체 표면의 인위적 결함을 모사한 각각 균열부의 온도데이터를 바탕으로 균열의 폭 및 깊이에 따른 온도 데이터를 획득하기 위하여 FLIR Tools+의 Box단위 온도 average 값을 활용하여 균열부에 해당하는 픽셀의 평균온도를 계측하여 비교하였다.



[그림 2.52] 열화상 데이터 처리 예

(6) 열화상 이미지 빅데이터화

실험을 통해 얻는 빅데이터는 균열 및 표면 온도, 습도, 풍속, 균열 및 표면 및 공기 온도로 이루어진 변수 및 데이터로 구성하였다. 총 900여개의 데이터를 축적하였으며, 각 데이터마다 변수값 기록을 함께 수행하여 추후 알고리즘 구축 및 이를 이용한 데이터 분석이 원활히 수행될 수 있도록 정리하였다. 열화상 이미지를 이용한 건전도 평가 실험을 통해 이미지와 빅데이터 축적에 앞서 빅데이터를 구성할 변수를 설정하였다. 실험에 영향을 미치는 요인들을 변수별 분석하였다.

(가) 열전달 특성

콘크리트 실험체는 일조시간 동안 태양복사에너지를 받아 온도가 상승하게 된다. 열전달 이론에 따라 실험체는 온도의 상승과 하락을 반복하고, 변수 설정에 있어 하나의 요인으로 작용한다. 열전달 이론에서 열은 온도의 차이로 인해 하나의 시스템에서 외부로 전달되는 에너지를 뜻한다. 열은 항상 뜨거운 물체에서 시원한 물체로 이동하며, 다른 방향으로는 이동하지 않는다. 열은 전도, 대류, 그리고 복사의 세 가지 방법으로 전달된다.

① 전도

전도는 두 물체의 물리적 접촉을 필요로 한다. 벽면의 경우를 예로 들면, 열은 벽 내부의 층을 통해 더운 곳에서 시원한 곳으로 전도된다.

② 대류 : 풍속 및 대기 온도에 의한 영향

대류는 유체 또는 공기 흐름으로 인해 열이 전달되는 것을 말한다. 열이 대류에 의해 공기 또는 유체로부터 콘크리트 표면으로 전달되는 과정으로 표면에서 유체 또는 공기로의 확산과 확산에 의한 에너지 전달을 뜻한다.

$$q''_{cv} = h(T_S - T_\infty) \qquad (2.5.1)$$

대류는 뉴턴의 냉각 법칙에 의해 규율 되며, qcv''는 대류 열 유속(W / m^2), h는 대류 계수 (W / $m^2 \times K$), Ts는 표면 온도(K), T∞는 대기 온도 (K)를 의미한다. 콘크리트 실험체에서는 공기 온도는 대기 온도 (K)로 근사 될 수 있다.

대류 열전달은 자유 대류와 강제 대류라는 두 가지 범주로 나눌 수 있다. 자유 대류에서의 벌크 유체 운동은 지역 유체 밀도의 차이로 인한 부력에 의해 발생한다. 지역 유체 밀도 변화도는 표면과 접촉하는 유체의 가열 또는 냉각에 의해 발생한다. 강제 대류에서 유체 운동은 유체 운동의 외부적 요인에 의해 발생한다. 콘크리트의 경우, 대류는 자유 대류와 강제 대류의

조합이다. 경계층 공기가 컬럼에 의해 가열되면 공기 밀도는 낮아지고 공기가 콘크리트 위로 이동한다. 이는 자유 대류의 결과이다. 바람은 콘크리트 주위로 공기를 이동시켜 강제 대류를 만든다. 아래의 방정식은 강제 및 자유 대류로 인한 대류 계수를 계산하는 데 사용된 관계를 보여준다.

$$h = C \times 0.2782 \times [1/(T_{avg} + 17.8)]^{0.181} \times |T_S - T_a|^{0.266} \times \sqrt{1 + 2.8566 \times w} \quad (2.5.2)$$

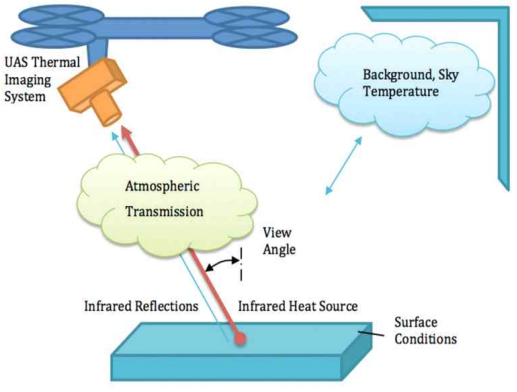
여기서 C는 열 흐름 상수, T_{avg}는 평균 공기 충전 온도 (°C), 그리고 w는 풍속(m/s)을 뜻한다. T_{avg}는 T_a와 T_s의 평균으로 근사할 수 있다. 주위보다 더 뜨거운 하부 수평 표면, 또는 주위보다 더 차가운 상부 수평 표면에 대해 C = 10.15, 수직 표면에 대해 C = 15.89이다. 방정식에 표시된 대류 방정식은 파이프 및 평평한 표면에 대한 것이다. 따라서 이를 통해 풍속 및 대기 온도는 분석의 변수로 작용한다.

③ 복사 : 태양복사에너지에 의한 영향 (조도 측정)

열은 지면이 빛, 적외선, 자외선 또는 마이크로파와 같은 전자기파를 교환할 때 복사를 통해 전달된다. 복사는 유동성 매체 또는 접촉이 아닌, 방사선을 교환하는 표면 사이의 공기 간극이나 다른 투명한 매체를 필요로 한다. 복사 교환은 한 표면이 다른 표면보다 더 따뜻하고 그들 서로가 맞닿아 있을 때 일어난다.

(나) 열화상 카메라의 온도보정 특성

열화상 카메라는 물체가 방출하는 열복사의 차이를 기반으로 이미지를 생성한다. 에너지가 카메라까지 도달하는 동안 에너지는 대기 중을 통과하게 되고 이 사이 일부 에너지의 손실 등으로 인해 카메라를 이용한 온도 측정에서는 이에 따른 온도 보정이 필요하다. 온도 보정에 영향을 미치는 요인들은 다음과 같다.



[그림 2.53] 열화상 기법을 이용한 온도측정과 보정

① 대기조건 (온도, 풍속, 습도 및 조도)

대기는 에너지가 카메라까지 도달하는 동안 카메라와 표면 사이의 거리에 따라 도달하는 열에너지에 영향을 준다. 지구의 대기는 대기 밀도, 상대 습도 (RH) 및 대상 표면과 카메라 사이의 거리를 기반으로 적외선 복사를 흡수 및 방출하여 열화상과 간섭한다. 대기 중의 투과율을 고려하지 않으면 실제 표면 온도보다 낮은 온도로 측정된다. 매우 따뜻하고 습한 날을 전제로 했을 때, 100 미터 공기 경로 (35 ° C 공기 온도, 80 % RH)의 이론적인 전송률은 80 %이다. 이는 표면에서 방출되는 방사열의 80 %만이 카메라에 도달한다는 것을 의미한다. 이 대기 전송 손실이 고려되지 않은 경우 0.97의 알려진 방사율을 가진 50 ° C 물체를 보는 카메라는 공기 경로만으로 인한 2.4 ° C 오차 인 47.6 ° C를 읽는다. 본질적으로 적외선 에너지가 대상으로부터 카메라까지의 거리가 멀어질수록 그 신호는 감쇠되므로, 이에 따른 감쇠 계수를 고려해야 한다. 열을 방출하는 물체로부터 열화상 카메라까지 그 사이의 공기를 통해 에너지가 감쇠되는 부분에서 습한 공기는 적외선 복사의 방패 역할을 한다. 따라서 여름에 수행하는 열화상 이미지를 통한 온도 측정은 일반적으로 높은 습도로 인해 겨울철에 비해 감쇠가 더 큰 특징이 있으며, 측정은 여름에 비해 겨울에 열화상 카메라로 보다 선명하게 보일 수 있다. 이와 같이 습한 기상상황은 적외선 복사량이 손실되는 한 가지 변수에 해당된다.

② 방사율

열화상 응용 분야에서 발생하는 방사율 값의 범위와 재료에 따른 방사율 표는 다음과 같다. 방사율 (E)은 E = 1-R에 의해 반사율 (R)과 관련되므로 반사율과도 직접적으로 연관이 있으며, 본 실험에서는 콘크리트 실험체에 대해 0.95을 사용하였다.

[표 2.12] 재료에 따른 방사율

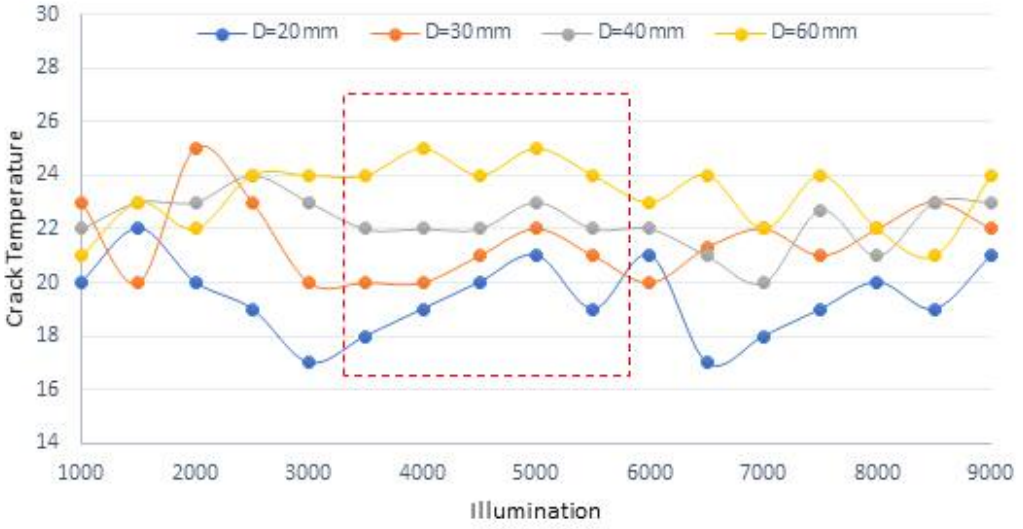
재료	방사율
아스팔트	0.90 - 0.98
콘크리트	0.92
마른 모래	0.90
젖은 모래	0.95
나무	0.90
벽돌	0.93 - 0.96
스테인리스강	0.16 - 0.45
녹슨 철	0.69

(7) 열화상 기법을 활용한 균열깊이 예측을 위한 빅데이터 구축

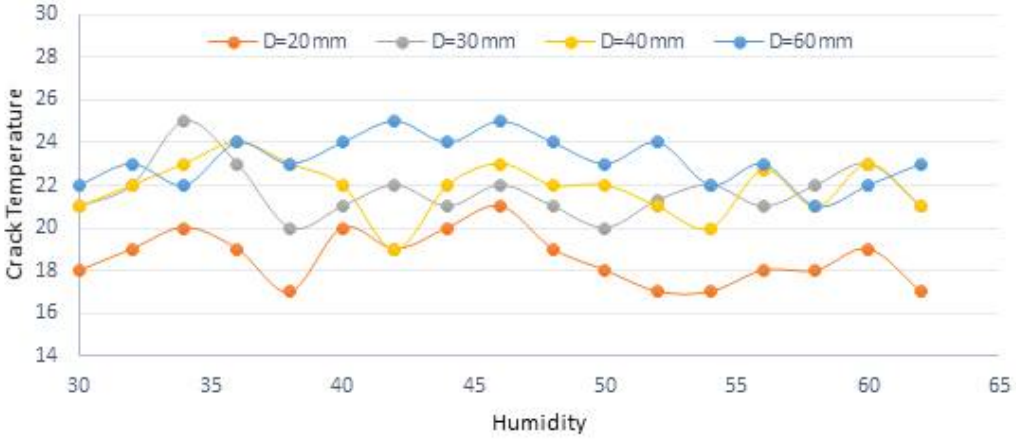
열화상 이미지를 이용한 건전도 평가 실험을 통해 이미지와 빅데이터 축적을 실시하였다. 이미지 데이터와 레이블별 데이터 셋은 표 2-5-4 같이 구성하였다. 열화상 이미지와 이미지로부터 얻을 수 있는 온도데이터 및 실험에 영향을 미치는 변수별 분석한 결과 습도와 조도, 대기온도가 낮은 조건에서의 열화상 이미지 촬영 시 높은 해상도를 얻을 수 있는 것으로 확인하였다. 콘크리트 균열을 평가하기위한 적절한 시간은 오후 3 시 이후가 적합하다. 또한 열화상 이미지를 촬영하기 가장 좋은 외부 환경은 습도가 35 %에서 50 % 사이 일 때 조명이 3500lux 에서 5500lux 사이이고 기온이 23 ℃에서 27 ℃ 사이인 것으로 확인하였다. 이를 통해 약 1000 회의 열화상 촬영 및 다양한 변수의 수집을 통해 콘크리트 균열 결함에 대한 열화상 빅데이터 구축하였으며, 추후 구축한 깊이 50mm급 구조체 손상 평가를 위한 열화상 이미지 빅데이터를 분석하여 알고리즘을 개발하고 구조체의 건전도 평가를 위한 데이터베이스를 구성하였다.

[표 2.13] 열화상 이미지를 이용한 건전도 평가 실험 빅데이터 축적

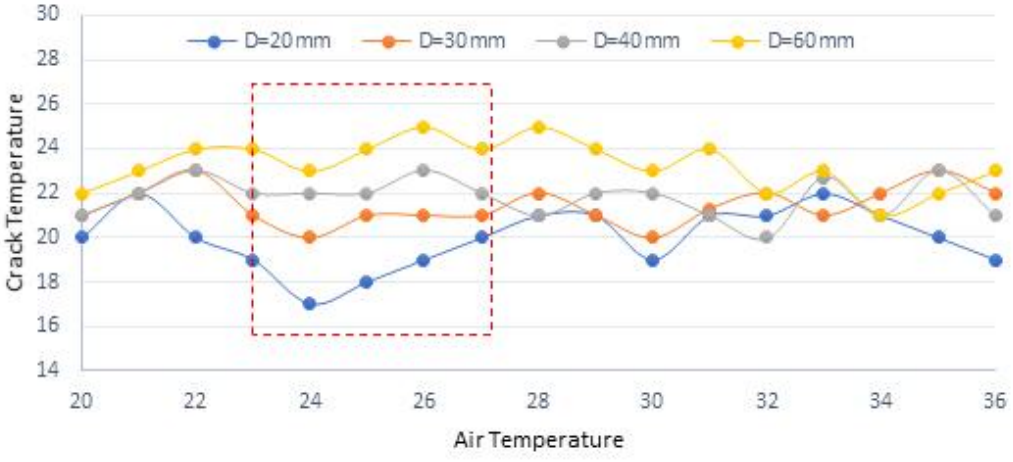
No.	온도 (균열)	온도 (Spot1)	온도 (Spot2)	공기 온도	공기 습도	풍속	조명도 (균열)	조명도 (표면)
1	17.81	17.39	17.46	20.87	32.73	0.42	2187.58	2131.86
2	19.73	19.97	20.06	21.23	35.69	0.31	4994.28	4855.44
3	19.27	18.86	18.90	21.35	37.41	0.08	2028.43	2084.63
4	10.80	10.70	10.06	12.83	19.90	0.63	1349.63	1342.35
5	13.64	13.48	13.47	16.77	44.53	0.56	2734.22	2685.62
…	…							
998	11.1	10.8	10.5	13	19.2	0.8	1540	1466
999	11.2	10.7	10.4	13.1	19	1.1	1747	1755
1000	17.7	17.6	17.7	21.2	32.3	0.6	2640	2700



[그림 2.54] 균열부 열화상 데이터 획득 변수별 분석 (조도)



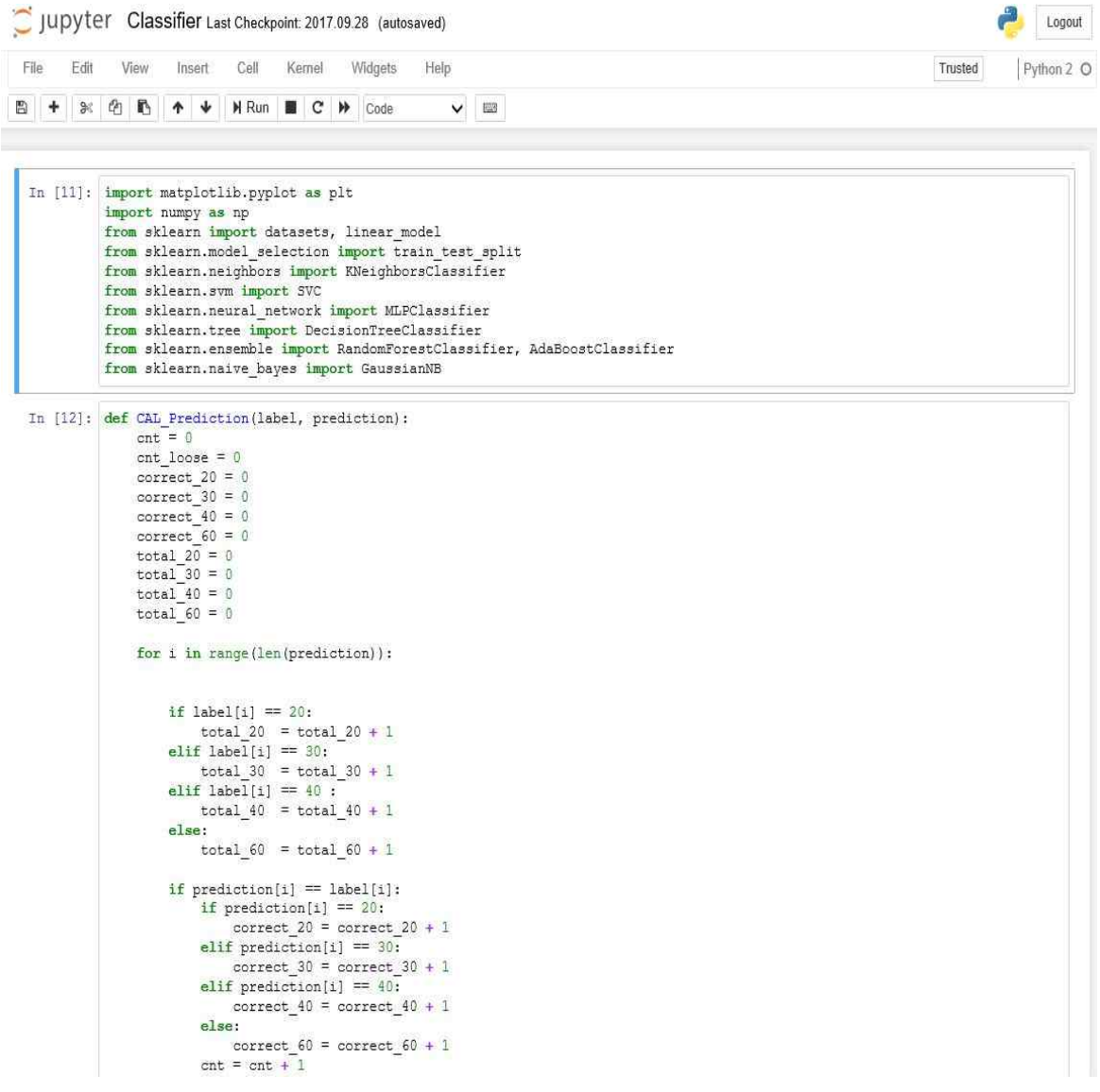
[그림 2.55] 균열부 열화상 데이터 획득 변수별 분석 (습도)



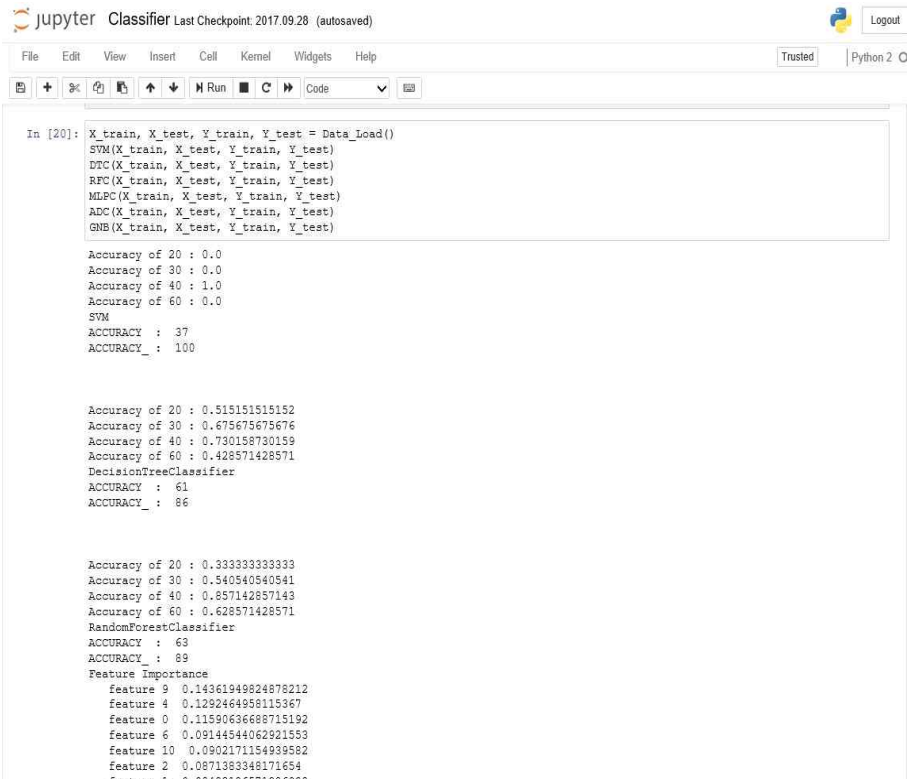
[그림 2.56] 균열부 열화상 데이터 획득 변수별 분석 (외기온도)

(8) 머신러닝 분석을 통한 균열 깊이 예측 결과

구축한 빅데이터 분석을 위해 Python 프로그램 사용하였다. 축적한 빅데이터를 지도학습하여 향후 들어올 데이터에 대하여 레이블들을 삽입하면 예측할 수 있도록 구축하였다. 머신러닝의 목적은 측정한 균열부 온도 및 외기조건을 입력하면 균열깊이를 추정하는 Classifier 알고리즘을 개발하는 것으로, 성능 검증을 위해 랜덤하게 데이터 중 80%로 학습하고 남은 20%로 테스트를 실시하여 정확도를 확인하였다. 사용한 분석방법으로는 의사 결정 나무(Decision Tree), 랜덤포레스트(RandomForest), 에이다부스트(AdaBoost), 가우시안 나이브 베이즈(GaussianNB), 서포트 벡터 머신(SVM)으로 5가지 방법으로 분석하였다.



[그림 2.57] 균열깊이 예측을 위한 머신러닝 알고리즘



[그림 2.58] 균열깊이 예측을 위한 머신러닝 알고리즘 검증 결과

[표 2.14] 머신러닝 기반 콘크리트 균열 깊이 추정 알고리즘 검증 결과

Classifier 종류 / 정확도	랜덤포레스트	결정 나무	에이다부스트	가우시안 나이브 베이즈	서포트 벡터 머신
해당 균열 깊이(Class) 예측 (%)	72	61	57	37	36
인접 깊이(Class)까지 인정할 경우(%)	89	83	79	72	100

구축한 5가지 알고리즘 중 랜덤포레스트(RandomForest)로 구현하였을 때 균열 깊이의 예측 정확도는 72%, 인접 깊이(Class)까지 인정할 경우 예측 정확도는 89%로 나타나 구축한 데이터셋(Dataset)에 가장 적합한 모델로 나타났다. 따라서 본 알고리즘은 열화상 이미지를 활용하여 균열 깊이 정보 예측의 가능성을 확인할 수 있었다.

본 알고리즘을 통해 얻은 균열 깊이 정보는 앞선 장에서 보인 실화상 이미지와 3D 모델링을 통해 얻은 손상정보 데이터(균열 폭, 균열 길이 등)에 결합하여 균열 깊이 정보까지 포함된 건축물의 손상정보 통합 시스템을 구축한다. 이로써 실화상 모듈과 열화상 모듈을 탑재한 무인

비행체를 활용한 긴급점검 플랫폼을 구축하고, 촬영한 데이터를 활용하여 손상정보를 검출 가능하다. 또한 축적된 손상정보 데이터와 열화상 및 실화상 이미지는 데이터베이스에 누적되어 기계학습을 통해 평가 시스템의 신뢰도를 향상시킬 수 있다.

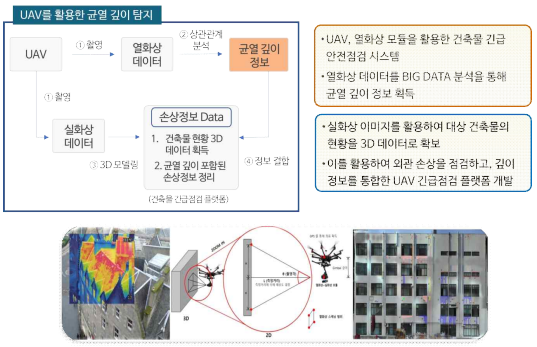
(9) 소 결

적외선 열화상 기법을 활용한 콘크리트 균열 깊이 평가 기법의 개발을 위한 실험적 연구를 진행하였고, 다음과 같은 결과를 얻었다.

일사량 누적의 영향과 직사광선의 영향을 종합한 결과 열화상 기법을 활용한 콘크리트 균열 평가를 실시하기 위한 적절한 시간대는 직사광선의 영향이 큰 정오의 전후를 피함과 동시에 일사의 영향을 충분히 받은 오후 3시 이후가 적절 할 것으로 판단된다. 이 결과는 계측 시기, 위치, 지역, 계절 등에 따라 그 결과가 상이하겠지만 하루 중 최고온도 관측 후 온도가 감소하기 시작하는 시점으로부터 2~3시간 후에 계측하는 것이 적절하다고 판단된다.

균열부 온도에 영향을 주는 변수로 균열부 온도 및 정상부 온도 외에 대기온도, 습도, 풍속, 조도를 선정하였다. 열화상 이미지와 변수들의 데이터 수집을 통해 빅데이터를 구축하였고, 이를 머신러닝을 통해 분석하였다. 분석방법으로는 의사 결정 나무(Decision Tree), 랜덤포레스트(RandomForest), 에이다부스트(AdaBoost), 가우시안 나이브 베이즈(GaussianNB), 서포트 벡터 머신(SVM)으로 5가지 방법으로 분석하였다. 구축한 5가지 알고리즘 중 랜덤포레스트(RandomForest)로 구현하였을 때 균열 깊이의 예측 정확도는 72%, 인접 깊이(Class)까지 인정할 경우 예측 정확도는 89%로 나타나 구축한 데이터셋(Dataset)에 가장 적합한 모델로 나타났다. 따라서 본 알고리즘은 열화상 이미지를 활용하여 균열 깊이 정보 예측의 가능성을 확인할 수 있었다.

본 알고리즘을 통해 얻은 균열 깊이 정보는 앞선 장에서 보인 실화상 이미지와 3D 모델링을 통해 얻은 손상정보 데이터(균열 폭, 균열 길이 등)에 결합하여 균열 깊이 정보까지 포함된 건축물의 손상정보 통합 시스템을 구축하고 무인비행체를 활용한 긴급점검 플랫폼 구축에 활용 가능하다.



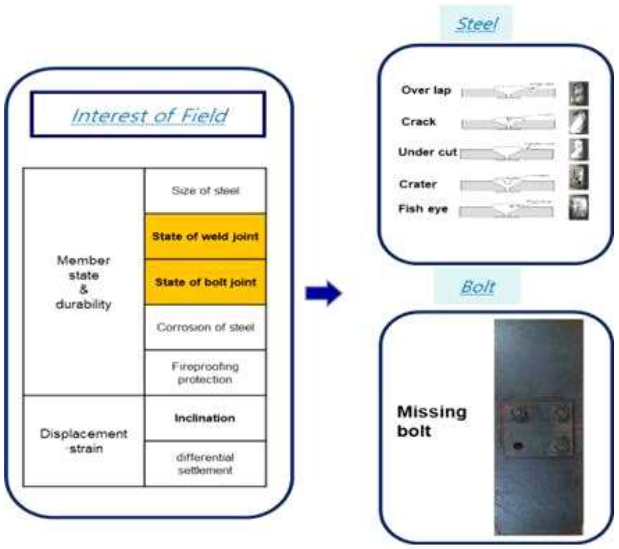
[그림 2.59] 균열깊이 예측을 위한 머신러닝 알고리즘의 적용 계획

다. 열화상 카메라를 이용한 용접 및 볼트 결함의 평가

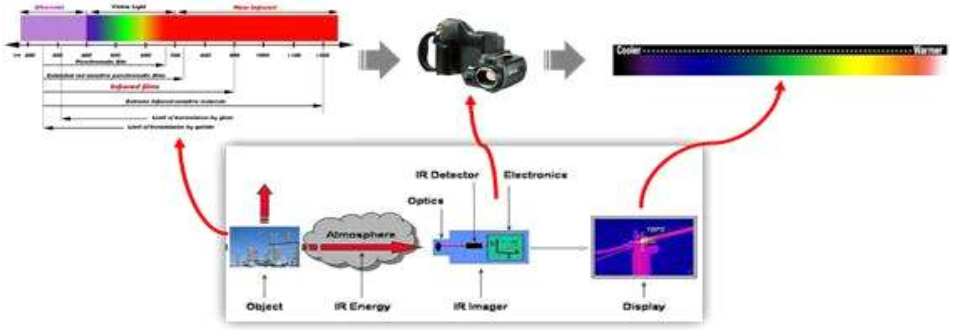
(1) 개요

강재 접합부 결함은 용접 접합부의 결함 또는 볼트 접합부의 결함으로 나눌 수 있다. 기존의 접합부 결함은 점검자에 의한 육안 점검에 의존하여 정확성에 문제가 있었으며, 관측자가 접근하기 어려운 지역에서는 중장비 같은 추가 장비 없이 결함을 측정하는 것은 시간과 경제적 비효율이 예상되었다.

근래 비파괴 검사법 중 적외선 열화상 기법을 통한 구조물의 결함 검사가 각광을 받고 있다. 본 연구에서는 용접 접합부 및 볼트 접합부 결함모사 실험체를 제작하고 이에 대해 열화상 기법을 활용하여 촬영 실험을 실시, 빅데이터를 구축하였다. 이후 온도와 결함의 관계를 확인하기 위해 몇 가지 머신러닝 기법을 적용하였다. 다양한 종류의 머신러닝 기법 중에 K-NN, SVM를 사용하여 강재의 결함을 분류하였다.



[그림 2.60] 건축물 유지관리 검사 항목 중 접합부 결함 검사

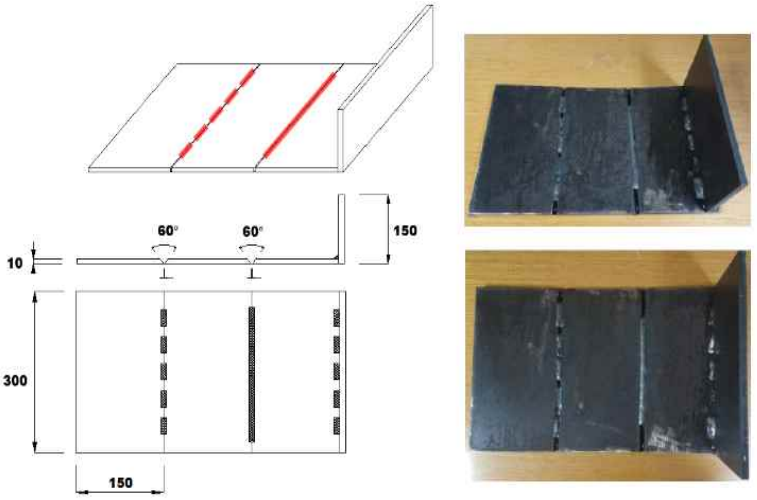


[그림 2.61] 적외선 열화상 기법의 원리

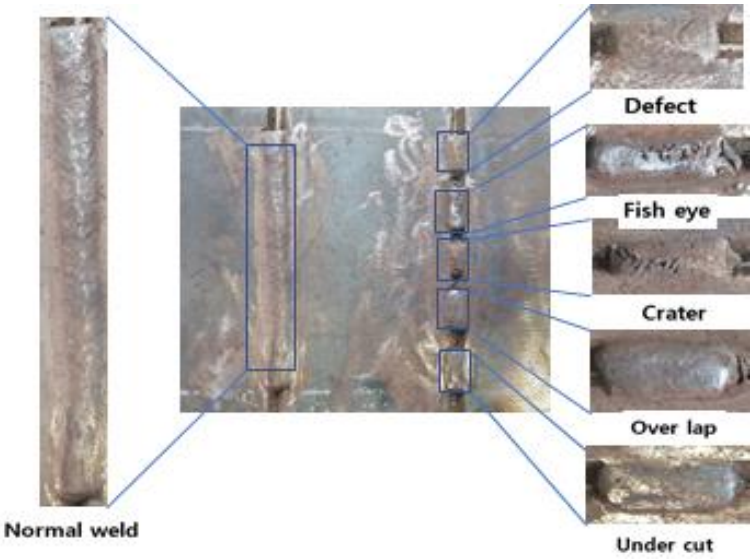
(2) 실험 계획

실험의 목표는 열화상 기법을 활용하여 데이터를 조사하고 분석 한 다음 머신러닝을 활용하여 자동으로 결함을 분류하는 알고리즘 구축을 위한 데이터 확보였다. 앞서 서술한 열화상 카메라를 활용하여 이미지와 온도데이터를 통해 수집하였고, 용접 결함 모사 실험체 및 볼트 실험체를 대상으로 10.000 개의 온도데이터를 수집하였다. 실험 중에는 열화상 카메라로 결함 및 정상부 표면 온도를 수집하고 대기 온도를 함께 기록하도록 하였다.

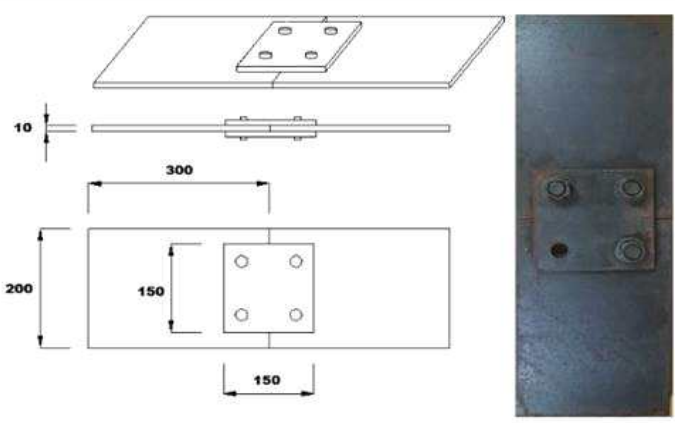
볼트 결함은 볼트 누락에 대하여, 용접 결함은 오버랩, 크랙, 언더컷, 크레이터 및 피시아이로 전형적인 용접 결함 모사 실험체를 제작하였다. 각 이미지에 대해 철골 접합부 결함에 대한 대기 온도와 온도를 엑셀 시트에 기록하면서 열화상 이미지를 촬영하였다.



[그림 2.62] 용접접합부 결함 모사체

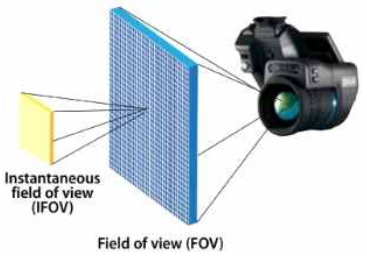


[그림 2.63] 다양한 용접결함 모사 예시



[그림 2.64] 볼트접합부 결함 모사체

아래 그림은 측정거리 결정을 위한 분석으로 T420 열화상 카메라 해상도 (320x240)의 순 시야 (IFOV)을 고려하여 측정거리를 결정하였다. 순 시야는 원격 감지 영상 시스템의 공간 해상도로 광학 시스템 축에 있는 단일 검출기 요소에 의해 지정된 각도로 정의된다는 특징이 있다. 따라서 이미지 내에서 용접부에 대해 최소 픽셀 크기를 다양화하기 위해 0.5m에 대한 볼팅결함 및 1m, 2m, 3m, 4m, 5m의 용접결함 촬영거리를 결정하였다.

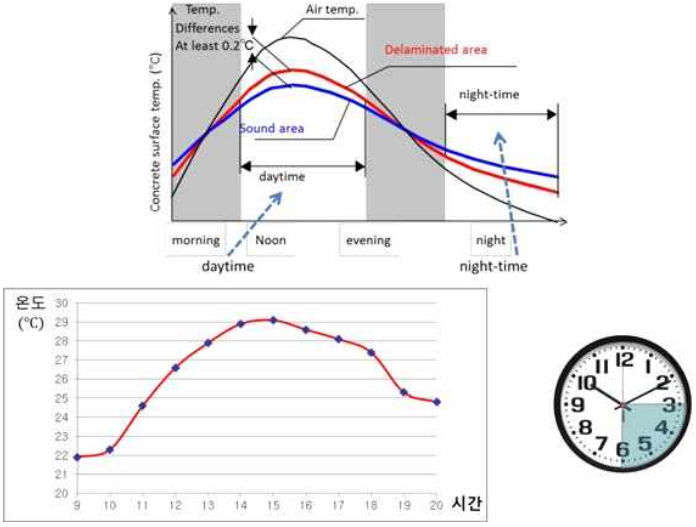


[그림 2.65] IFOV 개념도

[표 2.15] 순간 시야각에 따른 촬영거리 결정

픽셀 크기 (mm) (IFOV값×거리)	IFOV값	촬영거리(m)
6.8	0.00136	5
5.44	0.00136	4
4.08	0.00136	3
2.72	0.00136	2
1.36	0.00136	1
0.68	0.00136	0.5

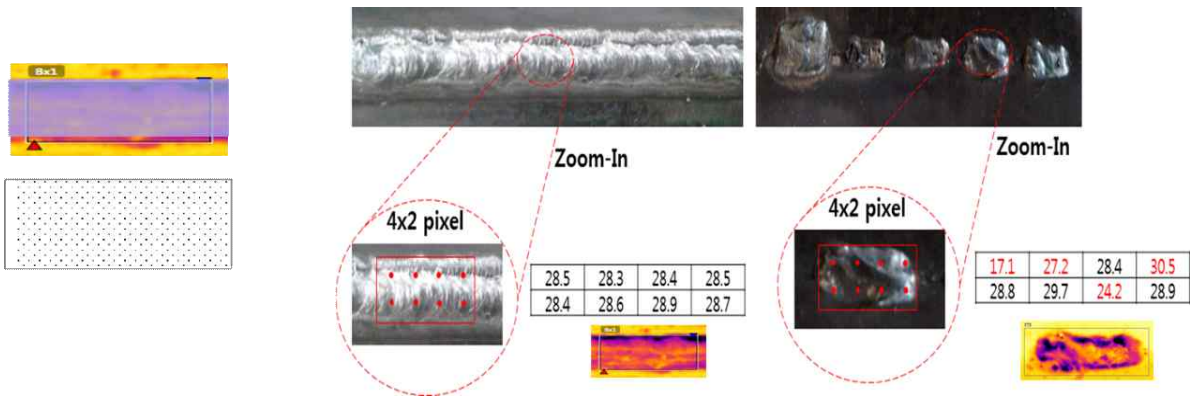
아래 사진은 시간에 따른 적외선 열화상 기법 결과로 빨간 선은 시간에 따른 결함부의 온도 변이를 보여 주며 파란 선은 일별 온도 변화를 나타낸다. 적외선 열화상을 사용하는 철골구조의 결함 평가를 위한 최적의 시간은 직사광선의 영향이 상대적으로 적고 하루 중 최고 온도로부터 감소하기 시작하는 시간대인 오후 3시에서 5시 사이에 실시하였다



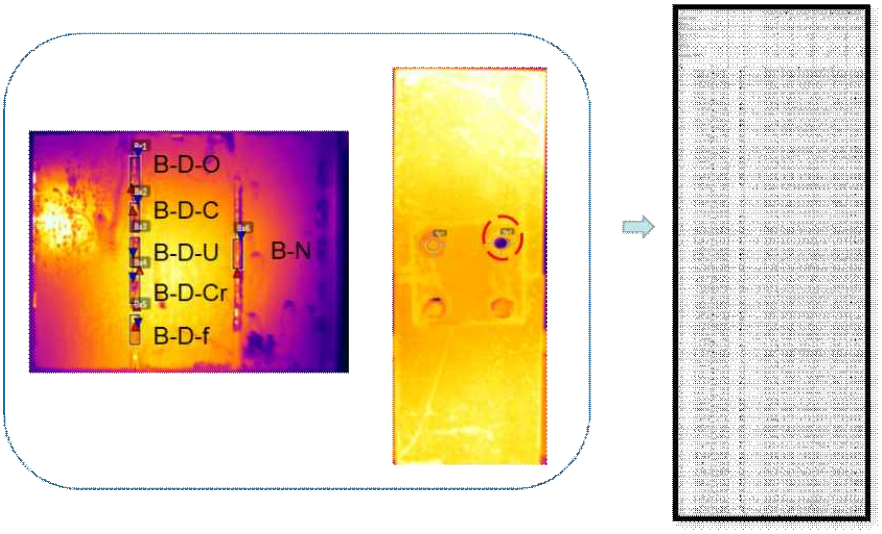
[그림 2.66] 최적 열화상 이미지 촬영 시간 산정

(3) 적외선 열화상 촬영

아래 그림과 같이 실험을 수행하고 대기 온도, 결함 온도 및 강 표면에 각 이미지의 엑셀 시트에 약 10,000 개의 데이터를 기록하였다. 결함이 있는 열화상 검사 이미지와 사전 처리 된 이미지를 통해 FLIR Tool 내 온도분석 기능을 활용하여 결함이 있는 열화상 검사 용접 및 볼트 이미지와 픽셀 당 온도 데이터를 획득하였다.



[그림 2.67] 용접접합부 결함 온도 데이터 예시



[그림 2.68] 용접접합부 온도데이터에 대한 빅데이터 구축

추출, 노이즈 감소, 향상 및 분할의 과정을 거쳐 이미지 처리를 실시하였으며, 열화상을 200x200 픽셀 크기의 이미지로 추출하였다.



[그림 2.69] 접합부 정상부·결함부에 대한 온도 분포

빅데이터의 추가적인 구축을 위해 최종적으로 공기 온도, 습도, 조도 등과 함께 추가 실험을 진행하였고, 각 실험의 결과값에 대해 변수의 평균값을 계산하여 기록하였다.

다양한 날씨 조건 하에서 거리를 달리하며 열화상 이미지를 획득하였다. 용접 정상부과 용접 결함부의 표준 편차의 관계를 보여주는 각 데이터에서 추출한 측정값을 사용하여 표준편차를 산정하였다.

[그림 2.5.34]에서 알 수 있듯이 촬영거리 4m의 온도 이미지가 제대로 감지되지 않는 반면, 촬영거리 1m에서 찍은 이미지는 훨씬 좋은 해상도로 캡처된다는 것을 확인하였다. 또한 습도, 온도, 조도가 상대적으로 낮은 조건에서는 촬영거리 2m, 3m일 때 열화상 이미지에서 결함탐지가 용이하였다. 실험을 수행하여 획득한 열화상 온도 데이터를 통해 각각의 촬영거리에 대

해 표준 편차를 계산하여 결과를 표에 나타내었다. 촬영거리가 멀어 픽셀 수가 적은 경우에 대해서도 일반 용접과 용접 불량 간에 온도 차이가 있음을 확인하였다.

[표 2.16] 0.5m 측정거리 결함부 및 정상부 볼팅 및 용접의 표준편차 관계

상태	픽셀 평균 온도(℃)	온도 변위	표준편차	비고
Overlap	31.0	+4.6	3.54	결함부
Defect	30.1	+3.7	4.63	
Undercut	25.9	-0.5	10.07	
Crater	28.6	+2.2	5.24	
Fish-eye	29.5	+3.1	5.78	
Missing bolt	22.4	+5.1	-	
Normal	26.4	-	1.19	정상부

[표 2.17] 1m 측정거리 결함부 및 정상부 용접의 표준편차 관계

상태	픽셀 평균 온도(℃)	온도 변위	표준편차	비고
Overlap	26.6	+ 1.2	4.23	결함부
Defect	27.5	+ 2.1	5.42	
Undercut	23.6	- 1.8	6.38	
Crater	26.3	+ 0.9	5.16	
Fish-eye	28.0	+ 2.6	4.27	
Normal	25.4	-	1.12	정상부

[표 2.18] 2m 측정거리 결함부 및 정상부 용접의 표준편차 관계

상태	픽셀 평균 온도(℃)	온도 변위	표준편차	비고
Overlap	30.4	+ 1.0	4.81	결함부
Defect	31.0	+ 1.6	4.25	
Undercut	27.0	- 2.4	3.44	
Crater	30.5	+ 1.1	3.52	
Fish-eye	31.9	+ 2.5	3.67	
Normal	29.4	-	1.31	정상부

[표 2.19] 3m 측정거리 결함부 및 정상부 용접의 표준편차 관계

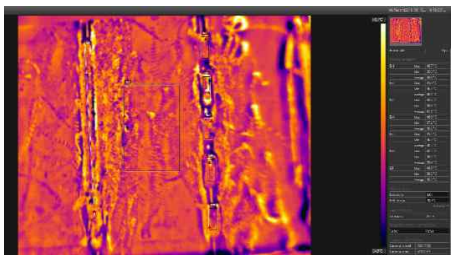
상태	픽셀 평균 온도(℃)	온도 변위	표준편차	비고
Overlap	27.6	+ 1.2	3.54	결함부
Defect	28.5	+ 2.1	4.63	
Undercut	27.4	+ 1.0	3.07	
Crater	27.9	+ 1.5	2.94	
Fish-eye	28.8	+ 2.4	3.78	
Normal	26.4	-	1.18	정상부

[표 2.20] 4m 측정거리 결함부 및 정상부 용접의 표준편차 관계

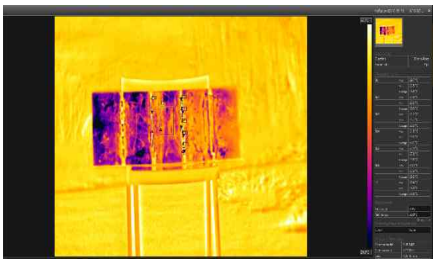
상태	픽셀 평균 온도(℃)	온도 변위	표준편차	비고
Overlap	24.1	+ 0.7	2.54	결함부
Defect	25.5	+ 2.1	2.63	
Undercut	22.4	- 1.0	3.07	
Crater	24.5	+ 1.1	3.24	
Fish-eye	24.9	+ 1.5	2.78	
Normal	23.4	-	1.13	정상부

[표 2.21] 5m 측정거리 결함부 및 정상부 용접의 표준편차 관계

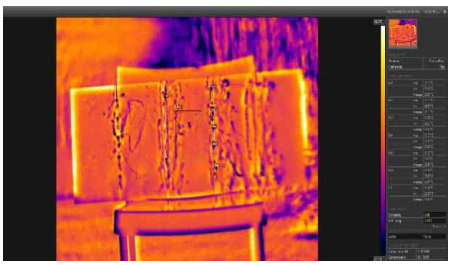
상태	픽셀 평균 온도(℃)	온도 변위	표준편차	비고
Overlap	24.1	+ 0.6	2.41	결함부
Defect	24.1	+ 0.6	2.41	
Undercut	23.1	- 0.4	1.19	
Crater	23.6	+ 0.1	2.11	
Fish-eye	23.9	+ 0.4	2.13	
Normal	23.5	-	1.14	정상부



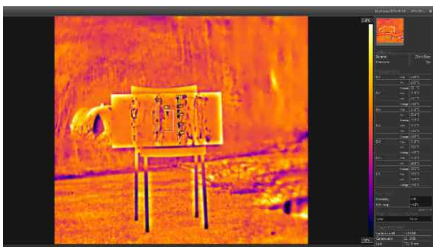
촬영거리 1m 열화상 이미지



촬영거리 2m 열화상 이미지



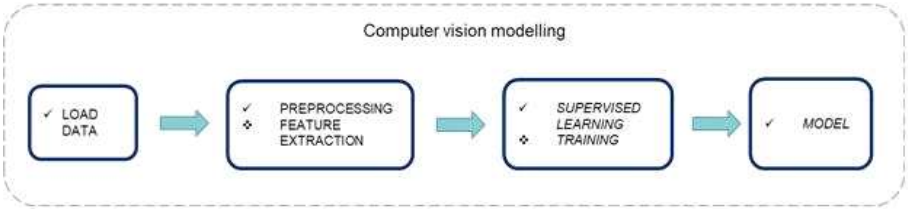
촬영거리 3m 열화상 이미지



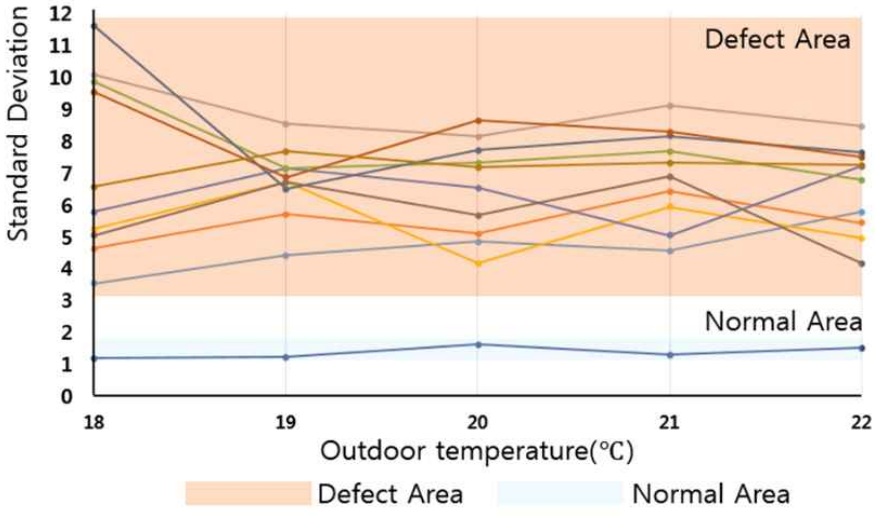
촬영거리 4m 열화상 이미지

[그림 2.70] 촬영 거리에 따른 열화상 이미지 해상도 비교

온도 분석결과 정상부 온도에 비해 결함부 온도의 표준 편차가 높게 나타나는 현상을 확인할 수 있었다. 이를 이미지 처리 기법을 통해 정상부와 결함부로 분류하고자 특징추출을 사용하여 Matlab 알고리즘을 구축하였다. 용접 결함 종류는 크게 오버랩, 균열, 언더컷, 크레이터, 피쉬 아이로 구분하였고, 볼트 접합부 결함은 정상부와 볼트 누락으로 분류하였다.

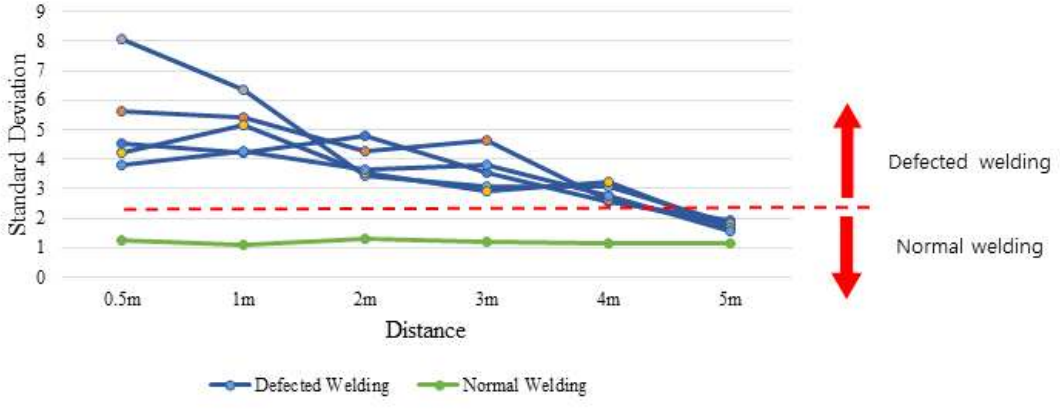


[그림 2.5.35] 이미지 비전 기술을 이용한 머신러닝 알고리즘 흐름도

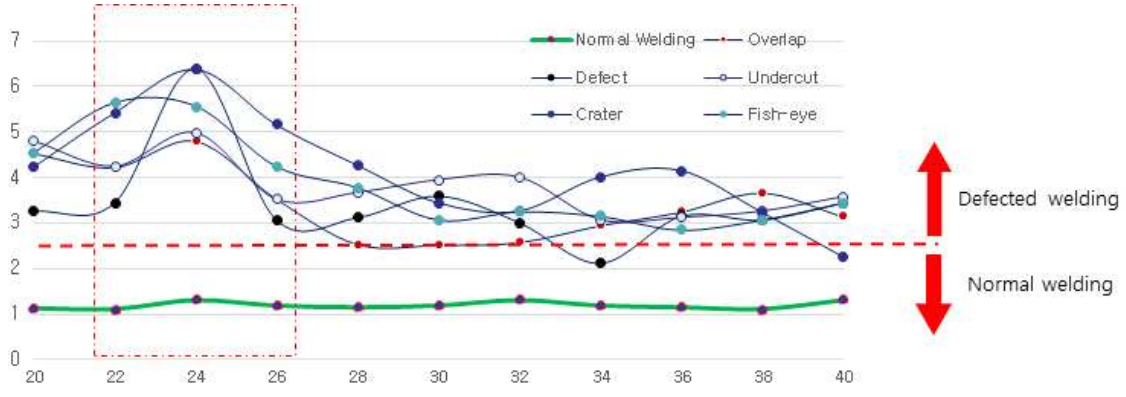


[그림 2.71] 0.5m 거리에서의 볼트 및 용접 정상부·결함부에 따른 온도 표준편차 그래프

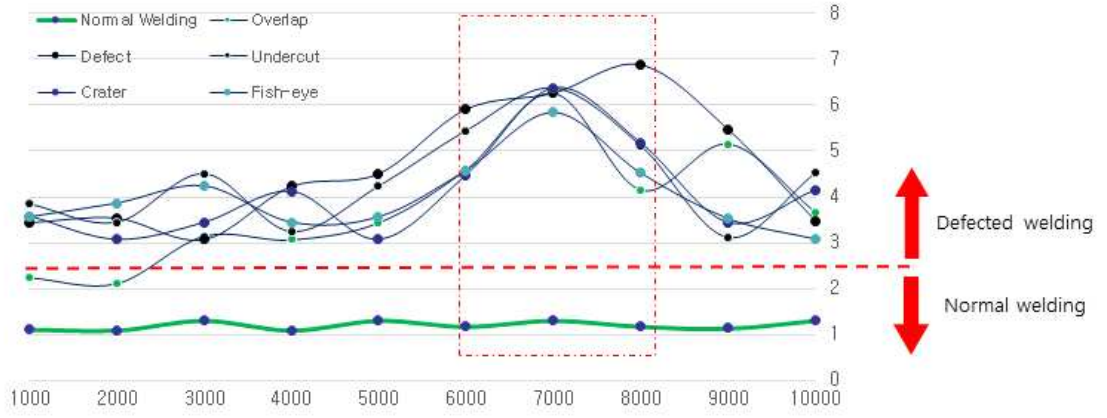
추가실험을 통해서 용접결함에 대한 다양한 거리로 촬영한 결과, 3m 이내 촬영거리에서는 결함부가 정상부에 비해 약 2.5 이상의 온도 표준편차를 갖는 것으로 확인하였다. 또한 외기온도가 22℃에서 26℃였을 때, 결함부 온도 표준편차 값이 4이상으로 가장 높아 본 열화상 결함 탐지 기법을 사용하기에 가장 적절한 것으로 판단된다. 또한 습도는 35% ~ 45%, 조도는 7000 lux ~ 8000 lux 사이일 때 열화상 이미지 내 정상부와 결함부 온도 차이가 명확하게 나타난 것을 확인할 수 있었다.



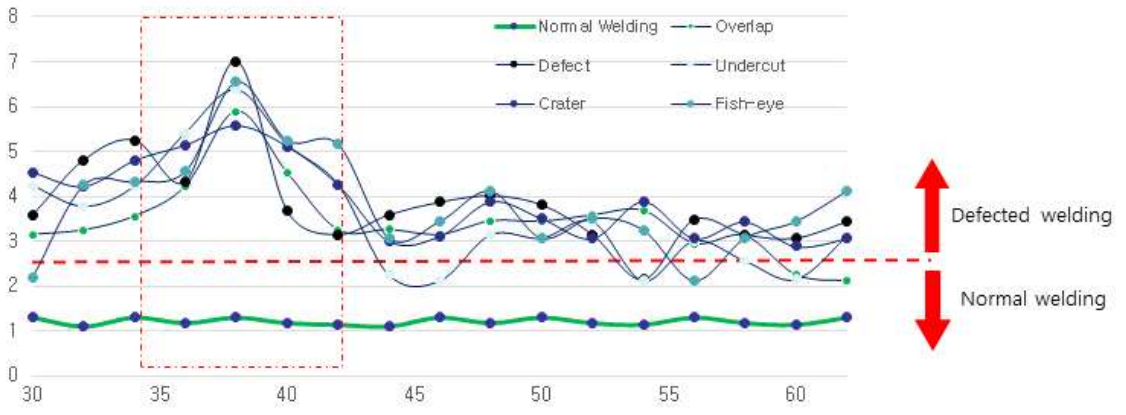
[그림 2.72] 촬영거리에 따른 정상부·결함부 온도 표준편차 그래프



[그림 2.73] 철골 용접 정상부·결함부 표준편차 변수별 분석 (외기온도)



[그림 2.74] 철골 용접 정상부·결함부 표준편차 변수별 분석 (조도)



[그림 2.75] 철골 용접 정상부·결함부 표준편차 변수별 분석 (습도)

(4) 분석 방법

다음의 머신러닝 알고리즘에 철골 용접부 열화상 데이터를 나누어 학습시키고 검증하였다. 다양한 머신러닝 알고리즘 중에 노이즈, 샘플 데이터의 비선형성, 적은 데이터량을 가진 본 실험결과에 SVM이 가장 적합할 것으로 판단하고 데이터들을 학습시켰다. 전통적인 머신러닝 알고리즘 중 하나인 K-Nearest-Neighbor와 비교하면, SVM은 학습 및 테스트 정확도가 약간 더 높고, 데이터량에 대해 크게 영향을 받지 않는 것이 가장 큰 요인으로 작용하였다.

[표 2.22] SVM 알고리즘을 이용한 용접 접합부 결함 탐지 정확도

머신러닝 알고리즘 분류	전체 외부 환경에서의 측정 결함 탐지 정확도 (%)	최적 외부 환경에서의 결함 탐지 정확도 (%)
Linear SVM	57	78
Quadratic SVM	56	58
Fine Gaussian SVM	56	65
Medium Gaussian SVM	50	71

(가) 서포트 벡터 머신(SVM)

서포트 벡터 머신(support vector machine, SVM)은 기계 학습의 분야 중 하나로 패턴 인식, 자료 분석을 위한 지도 학습모델이며, 주로 분류와 회귀 분석을 위해 사용한다. 두 카테고리 중 어느 하나에 속한 데이터의 집합이 주어졌을 때, SVM 알고리즘은 주어진 데이터 집합을 바탕으로 하여 새로운 데이터가 어느 카테고리에 속할지 판단하는 비확률적 이진 선형 분류 모델을 만든다.

들어진 분류 모델은 데이터가 사상된 공간에서 경계로 표현되는데 SVM 알고리즘은 그 중 가장 큰 폭을 가진 경계를 찾는 알고리즘이다. SVM은 선형 분류와 더불어 비선형 분류에서도 사용될 수 있다. 비선형 분류를 하기 위해서 주어진 데이터를 고차원 특징 공간으로 사상하는 작업이 필요한데, 이를 효율적으로 하기 위해 커널 트릭을 사용하기도 한다.

(나) k-최근접 이웃 알고리즘

패턴 인식에서, k-최근접 이웃 알고리즘(또는 줄여서 k-NN)은 분류나 회귀에 사용되는 비모수방식이다. 출력은 k-NN이 분류로 사용되었는지 또는 회귀로 사용되었는지에 따라 다르다. k-NN은 함수가 오직 지역적으로 근사하고 모든 계산이 분류될 때까지 연기되는 인스턴스 기반 학습의 일종이다. k-NN 알고리즘은 가장 간단한 기계 학습 알고리즘에 속한다.

분류와 회귀 모두 더 가까운 이웃일수록 더 먼 이웃보다 평균에 더 많이 기여하도록 이웃의 기여에 가중치를 주는 것이 유용할 수 있다. 예를 들어, 가장 흔한 가중치 스키마는 d가 이웃까지의 거리일 때 각각의 이웃에게 1/d의 가중치를 주는 것이다. 이웃은 항목(k-NN 분류의 경

우)이나 객체 특성 값(k-NN 회귀의 경우)이 알려진 객체의 집합으로부터 구해진다. 이것은 명시적인 훈련 과정이 필요하지는 않지만, 알고리즘을 위한 훈련 집합이라고 생각될 수 있다. k-NN 알고리즘의 단점은 데이터의 지역 구조에 민감하다는 것이다.

(5) 소결

철골 구조물에 대한 열화상 촬영 시 대기 환경은 온도 측정에 영향을 미칠 수 있지만, 알고리즘 학습을 통한 데이터의 전산화와 빅데이터 분석을 통해 다양한 기상조건에 대해 정상부 및 균열부 온도를 측정할 수 있다. 명확한 철골 결함부 열화상 이미지를 획득하기 위해 다양한 기상 조건에서 반복적으로 실험을 수행하였다. 열화상 실험을 통해 철골 구조물의 시각적 결함을 즉각적으로 파악할 수 있기 때문에 본 실험을 통해 효율적인 철골 구조물 결함 탐지가 가능할 것으로 판단된다.

실험 결과에 의하면 직사광선과 태양 복사에너지의 영향으로 인해 열화상 기술을 사용하여 철골 결함을 평가하기 위한 적절한 시간은 콘크리트 균열 탐지 기술과 동일하게 오후 3시 이후가 적절한 것으로 판단하였다.

열화상 이미지로부터 온도 데이터를 측정하여 정리한 결과, 결함 영역 온도의 표준 편차는 모두 0.5m에서 4m까지 정상 용접 영역보다 2.5를 초과하는 것으로 나타나 결함 탐지가 가능하였다. 또한 날짜별 열화상 이미지를 분석한 결과 대기 온도가 21℃에서 27℃ 일 때 습도가 34 %에서 43 %이고 조명이 6000lux에서 9000lux의 외부 조건을 만족하는 경우 가장 높은 열화상 이미지의 해상도를 획득할 수 있음을 확인하였다.

향후 철골 접합부 결함탐지의 정확성을 높이기 위해서 추가적인 데이터 및 레이블이 필요할 것으로 판단하였다. 향후 측정 장비의 추가와 실험 횟수의 증가를 통해 빅데이터를 추가 확보할 경우 정확도가 높아질 것으로 예상된다.

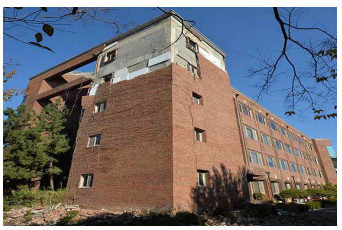
2.6 무인비행체를 활용한 건축물의 긴급 안전도 평가

가. 개요

최근 발생한 포항지진(규모 5.4)과 경주지진(규모 5.8)은 한반도의 강진 가능성을 시사하였으며 이와 같은 범국가적 차원의 재난 상황 시 재난 복구 단계에서 신속한 피해 상황 조사 및 건축물의 안전성 상태 검사는 이 후의 복구 전략 수립과 생존자 구출, 이주 여부 결정 등 초동 대처에 중요한 정보를 제공하는 역할을 한다. 하지만 인력에 의존한 조사는 단시간 다수의 조사량 처리에 있어 어려움을 겪을 수밖에 없으며, 인력의 전문성도 고려되어야 하여 초동 대처가 늦어지는 결과를 초래할 수 있다. 따라서 지진피해가 빈번한 미국, 일본 등에서는 지진발생 직후 지진 피해를 받은 시설물의 사용가능 여부를 단시간에 신속하게 평가하고, 여진으로 인한 추가붕괴 등의 2차 재난으로부터 국민 안전을 확보하는 긴급 위험도 평가기술을 실제 지진 피해 현장에서 적용 및 발전시켜왔다. 미국과 일본에서는 각각 ATC-20(1989), 진재시설물 등 의피해도 판정 기준 및 복구기술지침(1991)을 개발, 노스리지 지진(1994), 동일본 지진(2011) 등에 적용하여 큰 성과를 이룬바 있다(이정한 & 김혜원, 2016). 국내에서도 국립재난안전연구원에서 지진피해 건축물 긴급 위험도 평가 매뉴얼(2013)이 개발되어 지진피해 건축물에 대한 위험도 평가 기준을 제시한 바 있다.



(a) 필로티 구조 건축물의 피해



(b) 포항 H대학교 외장재 피해

[그림 2.76] 포항 지진(2017) 피해 건축물

지진피해 건축물에 대한 긴급 위험도 평가법과 기존에 실시하는 유지관리 기술인 안전점검 및 정밀안전진단 모두 외관에 대한 육안조사는 점검에 있어 상당히 중요한 비중을 차지하고 있다. 하지만 건축물이 점차 고층화·대형화 되어감에 따라 기존의 방법은 많은 시간과 인력이 요구되며 고층건물과 같은 경우 추가적인 양중장비가 추가되어 안전하고 효율적인 안전진단 기술의 필요성이 증가되고 있다. (Hallermann, N. & Morgenthal, G., 2013).



(a) 육안조사에 의존한 기존 점검 방식



(b) 고베 지진, 1995

[그림 2.77] 기존 긴급 위험도 평가 방식의 한계

본 연구를 통해 기존의 사진 촬영이나 국부적인 데이터 수집 수준에 머물러 있는 무인비행체 기술을 지진 후 건축물의 긴급 안전도 평가법을 도입하여 기존에 인력에 의해 수행된 평가를 무인비행체를 통해 비행촬영에서부터 건축물의 위험도 평가 수준까지 수행 가능하도록 요소별 평가법을 제시하고 이를 검증하는 것이다. 정량적 평가요소에 해당되는 지반파괴에 의한 건축물 전체 침하량, 부동침하에 의한 건축물 전체 경사도를 무인비행체 기술을 활용하여 계산할 수 있는 방법과 낙하 위험물에 대한 위험도 등의 정성적 요소의 평가법을 제시하고 이를 기존 노후 건축물과 P시 지진 피해 건축물에 대해 각각 정량적 평가 요소 계산법 및 무인비행체 기술의 긴급 위험도 평가 적용을 검증하고자 하였다.

촬영을 진행한 P시와 그 주변 지역의 경우 특히 지진피해가 컸던 지역이다. A아파트 및 B빌라가 대표적인 피해건축물들로 다수의 균열과 건물의 기울기가 발생했다. 따라서 무인비행체를 이용하여 피해건축물을 선정하고, 선정한 건물들에 대한 손상 정도를 측정하고 기존의 지진피해 건축물 긴급 위험도 평가법과 비교해본다.

지진피해지역의 경우 여진이 진행되는 위험성이 존재하고, 지진피해를 받은 건축물들의 평가를 위해 전문가들이 건물 내로 진입하기에 구조적, 비구조적 안전성을 확보하기 어려운 문제점이 존재한다. 따라서 본 SMART SKY EYE 기술을 활용하여 구조물 점검의 신속성 및 경제성을 확보하고 피해지역에서의 점검 시간을 줄임으로써 점검자의 안전 확보가 가능하다.

나. 국내·외 긴급 위험도 평가법

긴급 위험도 평가는 미국, 일본 등을 중심으로 발전해 왔으며, 1980년 이탈리아 남부지진 이후로 조직적인 형태를 보이기 시작했다. 일반적으로 2단계로 평가법을 분류하여 지진피해를 평가하며 건축물의 붕괴 또는 외장재나 설비 등의 낙하위험에 대해 등급을 매긴다.

(1) 미국

1987년 미국의 ATC(Applied Technology Council)에서 지진발생 직후 위험도 평가에 대한 가이드라인을 만들어 1989년 Loma Prieta 지진부터 사용해 왔다. 총 2단계의 평가법이 존재하고 3단계의 평가 프로세스로 이루어져 있다. 1단계 평가인 긴급평가는 건축물의 구조형식에 상관없이 6개의 평가항목에 대해서 오직 외관으로만 평가한다. 2단계 상세평가의 경우 건축물 구조에 따라 목조, 조적조, 조립식, 철근콘크리트, 철골조형식으로 나누어 평가한다. 2단계 평가에서는 구조해석 및 내진성능평가가 가능한 구조엔지니어가 참여하며 1단계, 2단계 평가 모두 “조사완료”, “제한된 이용”, “불안전”의 등급으로 건물의 안전성을 진단한다.

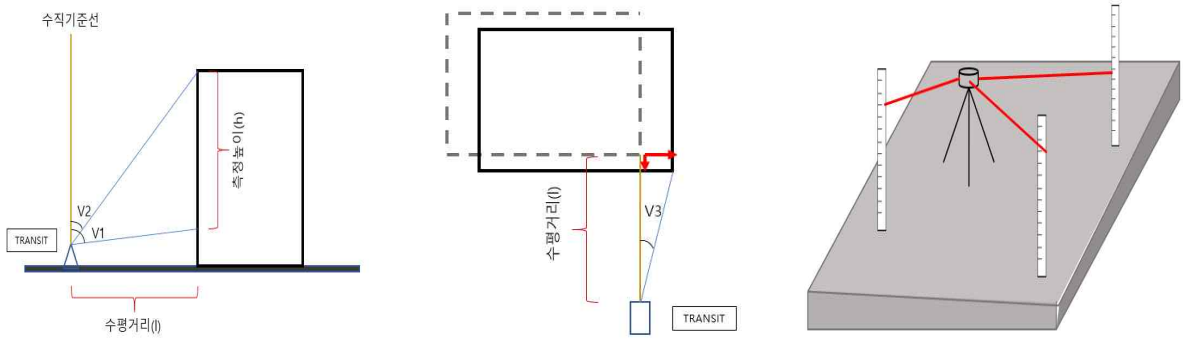
(2) 일본

일본의 경우 지진피해 건축물의 1단계와 2단계 평가 모두 3개의 구조형식으로 구분한다. 미

국과 다르게 목조, 철근콘크리트, 철골조 형식에 대해서만 평가방법이 마련되어 있다. 지진발생시 주요시설이나 공공시설이 주요 평가대상인 미국과 달리 주택건축물이 우선순위 평가대상이다. 2단계 평가를 통해 복구 여부 판정이 가능하며, 구조부재 평가항목에 대해서는 직접 실험을 하여 지진피해를 받은 구조부재의 위험도를 등급에 따라 나누었다. 일본의 매뉴얼의 경우 각각의 상황에 맞게 업무가 세분화 되어있어, 지진대응 업무에 대한 전문지식이 부족한 지자체 공무원들에게 이해도를 높일 수 있다. 이러한 특성은 피해지역 지자체에서 위험도 평가 업무를 수행하는 국내 지진대응 실정과 유사한 점이 많다.

(3) 국내

지진피해 시설물 위험도 평가단 구성 및 운영에 관한 조례는 2011년 지진재해대책법에 근거하여 소방방재청에서 제정하였다. 이후 2012년에 지자체 상황을 반영하여 시·도는 지원업무를, 시·군·구는 긴급 위험도 평가의 핵심 업무를 수행하도록 개정되었다. 하지만 이러한 기존의 조례 내용은 각 기관들의 개별 업무 관련 항목에 대해서만 제시하고 있었고, 이를 통해 지진피해에 대한 경험이 없는 지자체에서 각자 상황에 맞는 조례를 작성하고 긴급 위험도 평가 업무 계획을 세우는데 있어서 많은 무리가 따랐다. 따라서 국립방재연구원은 지진피해 건축물을 긴급 위험도 평가에 대한 매뉴얼을 제안하였다. 매뉴얼은 지진 발생 이후 시·도·군·구에 긴급 위험도 평가를 실시하기 위한 지진 발생 이전, 이후 업무 수행에 대한 구체적인 내용을 담고 있다. 미국, 일본과 같이 건물의 평가등급에 대해서 총 3단계 “사용가능”, “사용제한”, “위험”으로 구분하고 있다.



(a) 수직변위 측정 방법 (b) 횡변위 측정 방법 (c) 침하량 측정 방법

[그림 2.78] 기존 긴급 위험도 평가 시 사용되는 측정 기법 개념도

부록 표 3.9 2단계 긴급위험도 평가 조사표(철근콘크리트조)

2단계 긴급위험도 평가 조사표 (철근콘크리트조 건축물)

건축물 개요

1. 건축물 번호 _____
2. 건축물 주소 _____
3. 건축물 용도 1) 단독주택 2) 공동주택 3) 다중이용시설 4) 공공청사 5) 학교 6) 업무시설 7) 위험물 저장 및 처리시설 8) 기타
4. 구 조 형 식 1) 골조 2) 조적채움벽 골조 3) 벽식 4) 철골철근콘크리트 5) 혼합구조 ( )와 ( )
5. 층수 지상____층 지하____층
6. 건축물 규모 1층 치수 X방향 약 _____m × Y방향_____m

조 사

(1) 인접 건축물, 지반, 구조체에 관한 위험도

	레벨1	레벨2	레벨3
1) 인접건축물, 주변지반 파괴에 의한 위험	1. 거의 피해 없음	2. 조금 있음	3. 낙하 위험 있음
2) 지반파괴에 의한 건축물 전체 침하	1. 2.5cm 이하	2. 2.5cm ~ 10cm	3. 10cm 초과
3) 부동침하에 의한 건축물 전체 경사	1. 1/500 이하	2. 1/500 ~ 1/200	3. 1/200 초과
4) 기둥의 파괴 [조사층 (파괴가 가장 큰 층) : _____층, 조사기둥 수/ 조사층의 총 기둥 수 : _____/_____개			
① 손상도 III 의 기둥 수/ 조사기둥 수	1. 20% 이하	2. 20% ~ 30%	3. 30% 초과
② 손상도 IV 의 기둥 수/ 조사기둥 수	1. 10% 이하	2. 10% ~ 20%	3. 20% 초과
③ 손상도 V 의 기둥 수/ 조사기둥 수	1. 1% 이하	2. 1% ~ 10%	3. 10% 초과

(1)의 위험도 평가	1. 사용가능 (전부 레벨1)	2. 사용제한 (레벨2가 1개 이상 있는 경우)	3. 위험 (레벨3이 1개 이상 있는 경우)

(2) 낙하 위험물에 관한 위험도

	사용가능	사용제한	위험
1) 난간, 굴뚝 외 기타	1. 거의 피해 없음	2. 처짐, 균열	3. 낙하 위험 있음
2) 창호	1. 거의 피해 없음	2. 처짐, 균열	3. 낙하 위험 있음
3) 외장재 (습식인 경우)	1. 거의 피해 없음	2. 부분적인 균열, 간격	3. 현저한 균열, 분리
4) 외장재 (건식인 경우)	1. 줄눈 균열 정도	2. 판에 틈이 보임	3. 현저한 줄눈 틈어짐, 판파괴
5) 간판, 기기류	1. 경사 없음	2. 경미한 경사	3. 낙하 위험 있음
6) 옥외계단	1. 경사 없음	2. 경미한 경사	3. 명료한 경사
7) 기타	1. 안전	2. 요주의	3. 위험

(2)의 위험도 평가	1. 사용가능 (전부 레벨1)	2. 사용제한 (레벨2가 1개 이상 있는 경우)	3. 위험 (레벨3이 1개 이상 있는 경우)

종합 위험도 평가 (※ 조사 (1)과 (2)의 큰 쪽 위험도로 평가)

1. 사용가능(초록) 2. 사용제한(노랑) 3. 위험(빨강)

평가의견

평가일시 년 월 일 (회) 평가자

[그림 2.79] 국내 철근콘크리트조 건축물 2단계 긴급 위험도 평가 보고서 양식

다. 무인비행체를 이용한 긴급 위험도 평가법과 프로세스

(1) 무인비행체를 이용한 긴급 위험도 평가 프로세스

건축물 긴급 위험도 평가법은 무인비행체를 이용하여 건축물의 긴급위험도 평가 수준의 안전점검을 수행하는 것을 목표로 한다. 긴급위험도 평가는 지진 등의 재난 상황시 시설물 피해를 신속하게 평가하여 주민들에게 사용 여부를 알려주고 2차적 피해를 최소화하는 평가 시스템으로 1차대전 이후 활성화된 개념으로 환자의 중증 여부에 따라 분류하는 재난시 응급환자 분류체계(트리아제;Triage)와 같이 빠른 평가를 통해 시설물의 현재 상태를 파악하여 향후 적절한 대책 수립과 건축물의 장기간 사용 불능에 따른 경제적 손실을 방지하는데 목적이 있다.

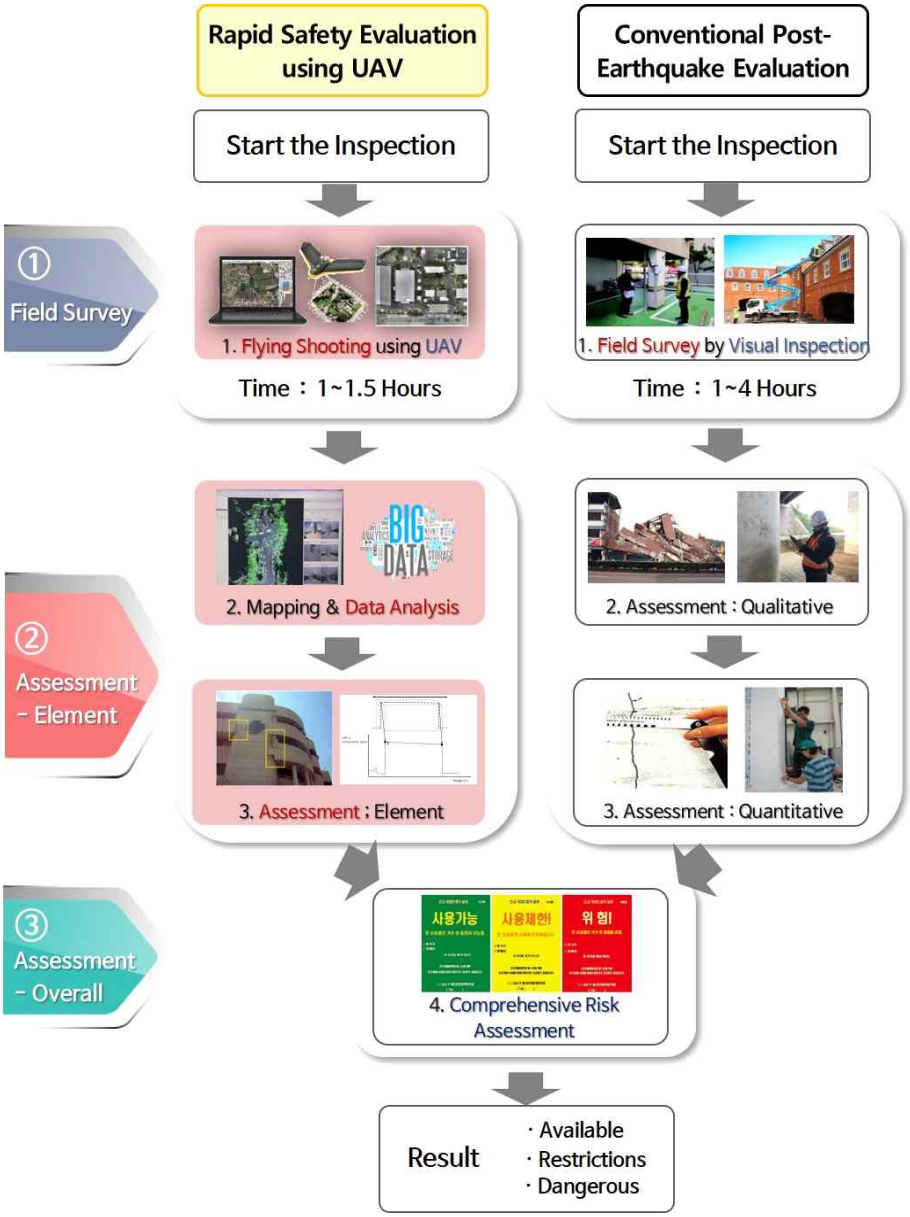
무인비행체를 이용한 건축물의 긴급위험도 평가 프로세스는 비행촬영 단계부터 시작하여 이미지 분석을 통한 요소별 평가 단계, 종합 위험도 평가 단계로 이루어져 있다. 무인비행체를 활용한 긴급 위험도 평가법과 인력에 의존한 기존 긴급 위험도 평가법의 흐름도는 다음 그림을 통해 비교하였다.

기존의 긴급 위험도 평가법의 현장 조사, 상태 평가, 종합 평가로 이루어지는 흐름에 무인비행체와 촬영 이미지에 기반을 두는 특성을 평가법에 반영하였다. 기존의 방법과 비교하였을 때, 무인비행체를 활용하여 촬영을 실시함으로써 기존의 육안검사를 대체하고, 요소별 평가에 있어 포인트 클라우드 및 3D 모델링 등의 무인비행체 활용시 적용 가능한 컴퓨팅 기술을 통해 실시한다는 점에서 차이가 있다.

국내 긴급 안전도 평가에는 건축물의 기울기, 부등침하량, 내부 기둥 피해, 낙하위험도가 평가 요소로 작용된다. 그 중 건축물 건축물의 기울기 및 부등침하량 항목은 정량적으로 측정하고 3단계의 레벨로 나누어 위험도를 평가하였으며, 인접건축물, 주변 지반파괴에 의한 위험, 낙하 위험물에 관한 위험도는 정성적 평가를 진행한다.

무인비행체를 통한 비행 촬영 후 포인트 클라우드를 통한 3차원 위치정보의 구현 기술은 촬영시 수신하는 GPS 위치 좌표와 획득한 이미지 데이터를 활용하여 기존의 측량기기를 사용하지 않더라도 3차원 좌표계에서 변위 값의 측정을 가능하게 한다. 따라서 건축물 기울기 및 부등침하량 측정에 대해 GPS 측량법을 통한 정량적 요소 평가법 및 구축된 고해상도 3D 모델을 통해 실시하는 정성적 요소 평가법을 활용하여 평가 요소를 획득하고 종합 평가를 수행한다.

평가 종료 시 결과는 세 가지 위험도로 판정하는 유사점을 가지나 조사시간에 있어 효율적이고 무인비행체와 컴퓨터를 활용한 데이터 처리를 통해 디지털 자료 보관이 가능하며 인력 소요를 최소화하는 장점이 있다.



[그림 2.80] 기존 및 무인비행체를 이용한 긴급 위험도 평가 흐름도 비교

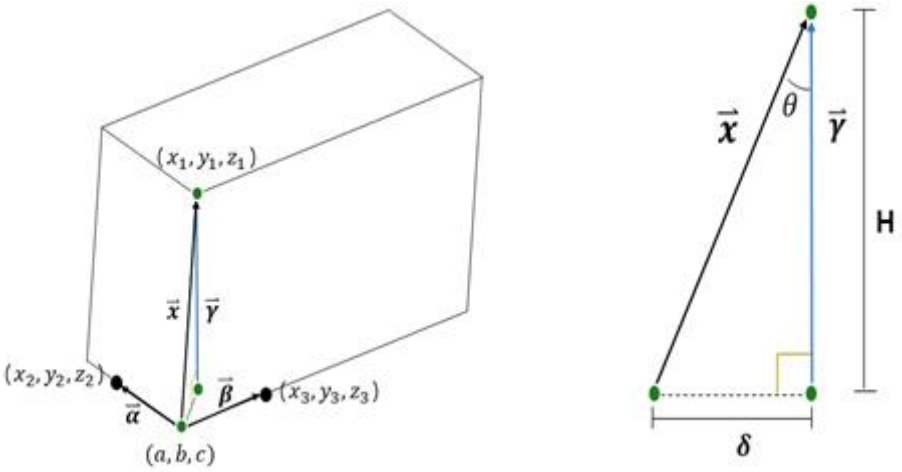
(3) GPS 측량법을 통한 정량적 요소 평가법

(가) 건축물 기울기 측정법

무인비행체 촬영 이미지를 이용하여 생성한 3차원 모델은 사진측량법 및 GPS 측량법에 의해 계산된 모델로 포인트 클라우드를 이루는 각각의 지점들이 GPS 정보를 계산결과로 갖게 된다. 각각의 지점에 대해 공간좌표를 확보하고 있다는 점을 활용하여 건축물 기울기 측정법을 제안한다. 먼저 측정대상 건축물 모델의 하단 꼭짓점에 기준점을 설정하고 상단부에 존재하는 꼭짓점을 연결한 벡터를 벡터 $\vec{x}$라 한다. 기준점과 연결된 건물 하단 모서리에서 각각 포

인트를 선택하여 벡터 $\vec{\alpha}$, $\vec{\beta}$를 설정한다. 이후 $\vec{\alpha}$, $\vec{\beta}$가 놓여있는 평면벡터에 수직하고 상단 부 포인트를 지나는 벡터 $\vec{\gamma}$를 구한다. 벡터 $\vec{x}$와 벡터 $\vec{\gamma}$은 내적 공식을 통해 두 벡터가 이루는 각 Θ을 얻을 수 있고 Θ와 건물의 높이 H 사이의 관계식에서 건물 하단의 기준점과 상단 부 포인트 사이의 변위 δ을 측정한다. 이를 통해 건물의 높이 및 상단부 횡변위로 산정하고 평가 기준을 통해 위험도 레벨 선정이 가능하다.

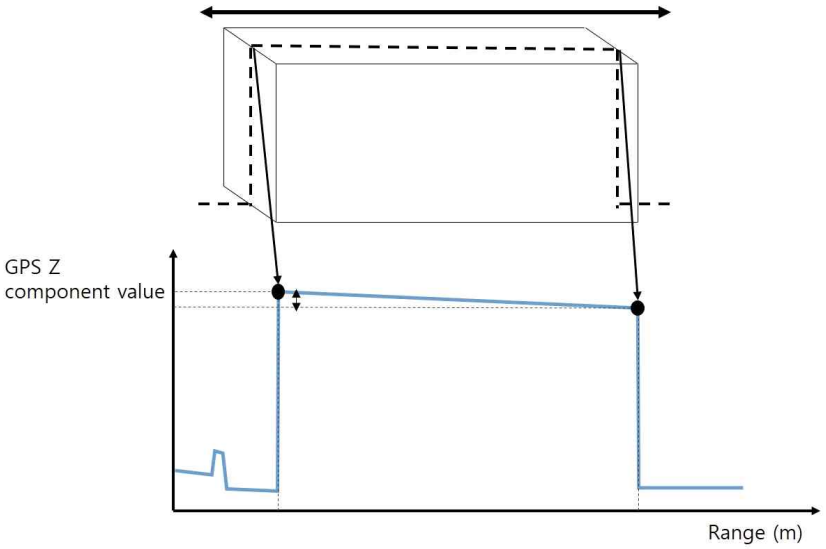
$$\tan\Theta = \frac{\delta}{H} = \frac{\sqrt{1-\cos\Theta}}{\cos\Theta} \tag{2.6.1}$$



[그림 2.81] GPS 데이터를 활용한 건축물 기울기 산정 기법

(나) 부등침하량 측정법

무인비행체로 획득한 영상 이미지는 포인트 클라우드 기술을 통해 3차원 모델을 생성할 수 있다. 각 지점의 GPS 정보를 활용하여 모델의 GPS Z값이 포함된 DSM(Digital Surface Model)을 추출한다. DSM은 모델 내 모든 지점의 높이 정보를 추출한 데이터로 건축물에서 수평을 유지해야 하는 구간에 대해 일정 구간을 조사함으로써 부등침하량을 측정할 수 있다. 예를 들면 같은 층에 위치하고 있다면 수평 방향으로 일직선상에 놓여 있어야할 창문이나 지붕선 등에 해당된다. 따라서 같은 층에 위치한 창문의 높이를 조사하여 건물 전체가 얼마나 침하되었는지 확인이 가능하다. 상부 구조물에 변형이 적을 경우, 건물의 지붕 혹은 옥상의 고도는 GPS 데이터를 통해 측정 가능하며 지붕의 고저차를 이용하여 건축물 침하량 산정이 가능하다.



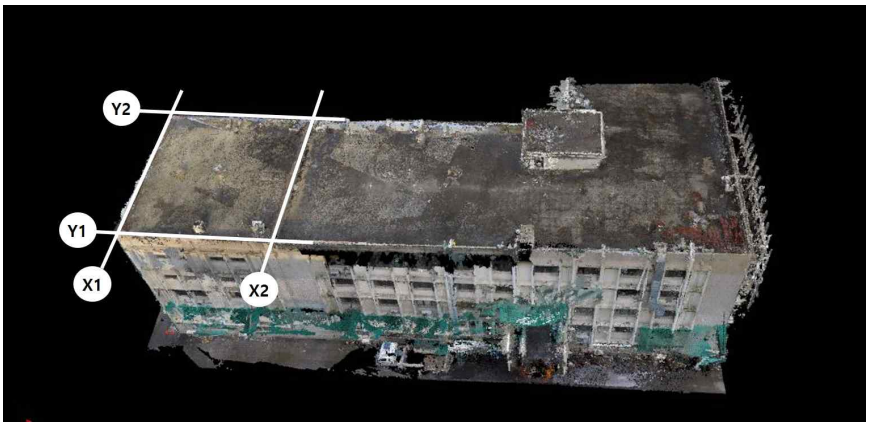
[그림 2.82] GPS 데이터를 활용한 건축물 침하량 산정 기법

(다) GPS 측량법을 통한 정량적 요소 평가법 검증

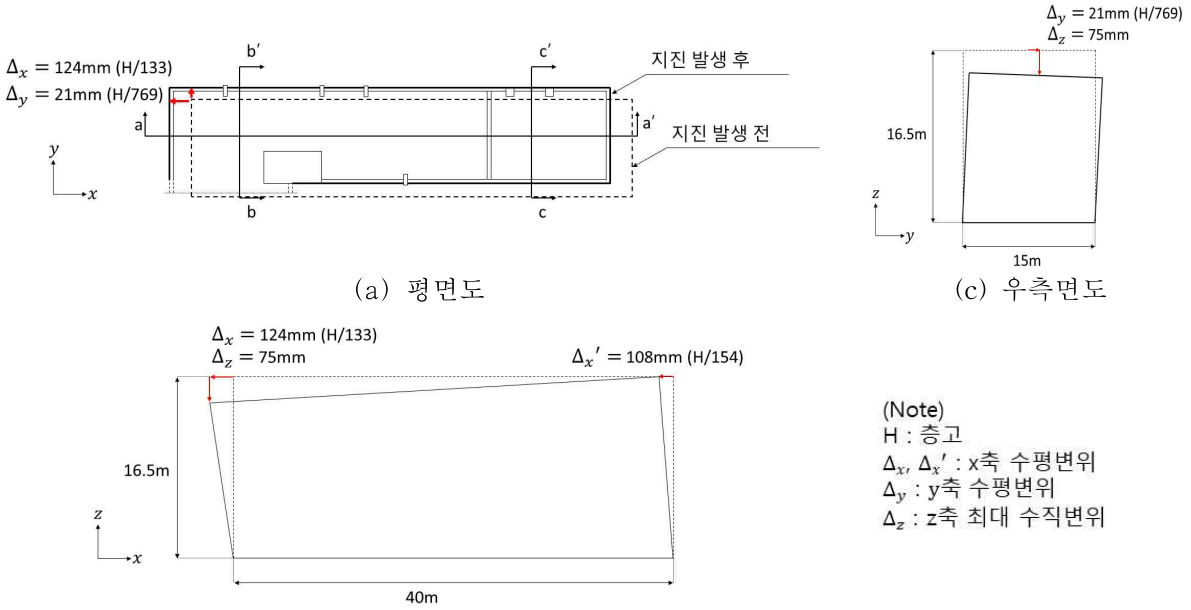
무인비행체 및 제안한 방법을 활용하여 고려대학교 제2공학관에 대해 긴급 위험도 평가의 정량적 요소 계측을 실시하였다. 그 결과를 기존의 제2공학관 안전진단 보고서 조사결과와 비교하여 타당성을 검증하였다.

기존 방법으로 진행한 제2공학관의 기울기는 전반적으로 1/300이하, 위험도 레벨2로 조사되었고, X1/Y1 구간의 기울기는 1/141로 위험도 레벨3으로 평가되었다. 침하량은 건물내부에서 X1부터 X2까지 조사하여 최대 82mm의 처짐이 조사되었다.

GPS 데이터를 기반으로 측정한 해당 구간에서의 기울기는 1/133 이고, 침하량은 75mm로 조사되었다.



[그림 2.83] 제2공학관 무인비행체 정량적 요소 평가 적용 구간



[그림 2.84] 제2공학관 수직, 수평변위 계측

[표 2.23] 기존 안전진단 결과와의 비교

유형 \ 결과		기존 방법	권장 방법	오차(%)
기울기	-	1/141	1/133	7.19
침하량	길이 (mm)	82	75	8.53

(라) 3D 모델링을 통한 정성적 요소 평가법

긴급 위험도 평가는 피해 건물과 인접한 건물의 파괴, 주변지반 파괴에 의한 위험, 낙하 위험물에 관한 위험도에 대하여 정성적인 평가를 실시한다. 육안조사를 통해 평가하는 본 요소들은 무인비행체 및 포인트 클라우드 기술을 통해 생성한 건물의 3차원 모델을 활용하여 피해를 받은 건물의 외관 형상정보를 전 구간에 걸쳐 획득할 수 있다. 건물의 3차원 모델을 생성함으로써 손상구간의 위치정보를 파악하여 낙하 위험도 평가에 대한 포괄적인 이해도를 높일 수 있다. 또한 삼각 메쉬를 생성하여 포인트들로 이루어진 3차원 모델을 실제와 근접한 건물 모델 생성이 가능하다. 이를 통해 피해 건물 주변 및 건물 외부의 낙하 위험도 기록과 파악이 가능하다.

(2) P시 지진 피해 건축물 촬영

(가) 촬영장비

P시 A아파트 긴급 위험도 평가에 사용된 무인비행체는 Intel Falcon 8+을 사용하였다. 본 무인비행체는 해상도 7360×4912의 RGB 카메라가 장착되어 있고, 무게는 약 1.2kg, 비행가능시간은 약 26분 비행가능하다. 정밀한 GPS 데이터 획득하며 인텔 프로세서를 탑재한 전용 조종기 인텔 칵핏을 통해 자동비행계획이 가능하여 효율적이고 안정적인 자동 비행촬영이 가능하다.



[그림 2.85] Intel Falcon 8+, controller

P시 B빌라의 경우 긴급 위험도 평가에 DJI Matrice 600 Pro를 사용하였다. DJI사의 산업용 무인비행체로 FLIR Duo Pro R 카메라를 장착하여 해상도 4000×3000의 이미지를 촬영하였다. 무게는 약 10kg, 비행 가능시간 약 30분 비행가능하다. 산업용 드론으로 안정적인 호버링이 가능하며 태블릿 PC로 조작 가능하다.



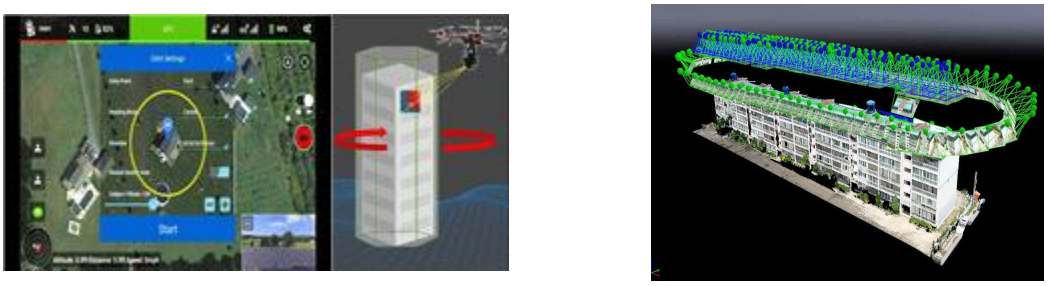
[그림 2.86] DJI Matrice 600 Pro, controller

(2) 촬영 계획

(가) A아파트

A아파트 촬영은 무인비행체의 경로를 지정하여 자동 비행으로 실시하였다. 아파트 단지 내

무인비행체가 비행 가능한 공간이 존재하였고 적절한 자동 비행을 설정하여 아파트의 항공 촬영을 진행하였다. 일반적인 무인비행체의 자동 비행에는 지표면에 수직한 촬영 각도를 유지하며 수평 비행하는 Nadir비행 혹은 특정 대상 주위를 원형으로 비행하는 POI(Point Of Interest) 기능이 제공된다. 하지만 이러한 비행계획은 직사각형의 형상을 띄고 있는 건축물들에 적용하기에 제약이 존재한다. Intel Falcon 8+는 인텔 프로세서를 탑재한 전용 조종기 인텔 칵핏 컨트롤러를 이용하여 건축물에 대해 촬영 각도, 촬영 사진 수, 비행 고도, 비행경로를 설정하여 건축물에 대해 효율적인 자동 비행이 가능하였다. 추가적인 건물 건축물 외벽 촬영 시에는 수동 촬영으로 전환하여 2m/s 이하의 속도를 유지하며 촬영하였고 촬영시간은 약 30분으로 진행하였다.



(a) POI 개념도 예시 (b) D아파트 비행 계획 개념도

[그림 2.87] 다양한 UAV 비행 경로

(나) B빌라

P시 B빌라 촬영 계획은 DJI Matrice 600 Pro를 사용하였고 수동 촬영으로 실시하였다. 특히 A아파트에 비해 건물 간의 간격이 좁고 지붕 쪽에 다수의 전선들이 위치하고 있어 자동 비행 계획을 수립하기에는 어려움이 있었다. B빌라 단지의 특성상 안전상의 이유로 0.5m/s 이하의 속도를 유지하여 촬영을 실시하였고 경사진 지형에 위치한 건축물이었기에 조종자 외 2명의 조사자가 드론의 위치정보를 알려주어 건물의 수평 방향을 촬영할 수 있도록 하고 특이사항을 전달하여 돌발 상황에 대해 대비하였다. 촬영 시간은 1번 배터리를 바꾸어 비행하여 40분 정도 진행되었다. 비행 촬영 시 무인 비행체와 건축물 간의 간격은 4-5m 내에서 촬영을 실시하였다.

(3) 긴급 위험도 평가 정량적 요소 측정값

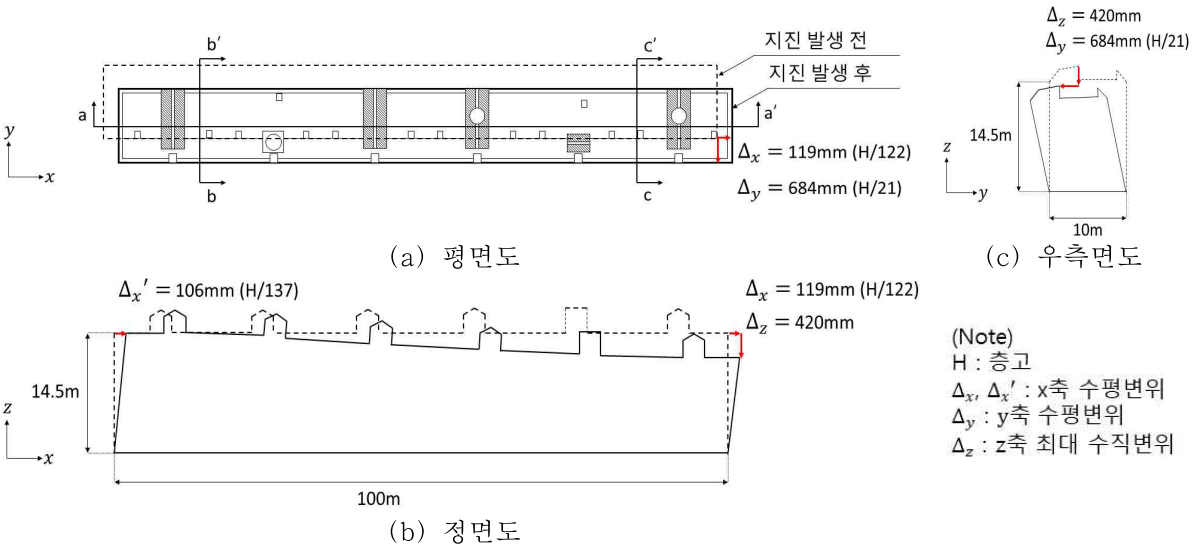
(가) A아파트 정량적 평가 요소 측정값

A아파트에 대해 정량적 평가를 실시한 결과 건축물의 전체 경사도는 0.04716, 건축물의 전체 침하량은 0.42m로 측정되었다. 이는 각각 레벨3 수준으로 위험에 해당한다. 다음 그림은 A아파트의 항공촬영 이미지를 통해 생성한 3D 모델링과 이를 통해 획득한 변위값이다.



[그림 2.88] 3D 모델링을 이용한 A아파트 정량 평가

3D 포인트 클라우드 모델의 좌표값을 이용하여 수직 및 수평변위를 산정하였으며, 이를 통해 다음과 같이 건축물의 수직 및 수평 변위 이동을 도면화하여 표현하였다. 산정한 수직 및 수평변위, 기울기 값을 이용하여 국내 긴급 위험도 평가 기준에 따라 등급을 평가하였다.



[그림 2.89] A아파트 수직, 수평변위 계측

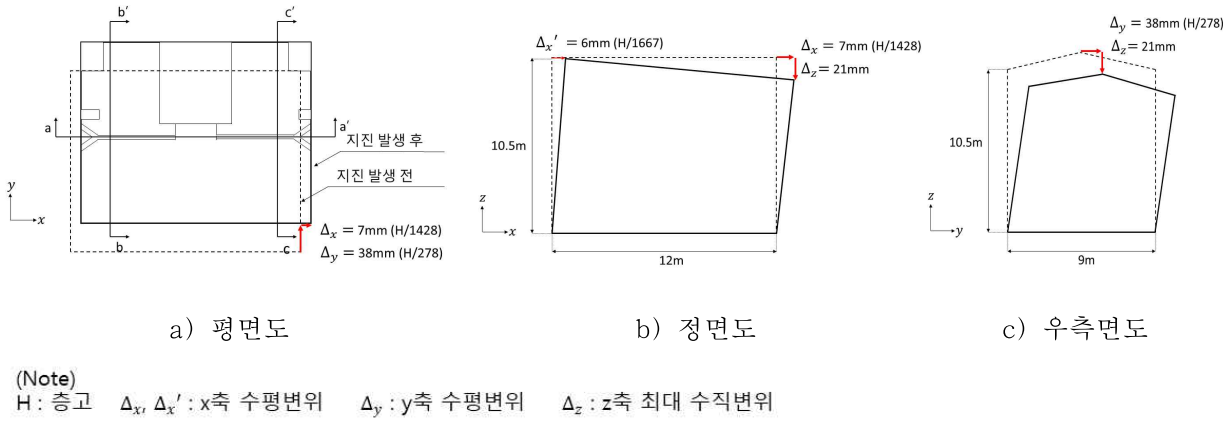
정성적 평가의 경우 인접 건축물로 인한 피해나 주변 지반 파괴에 대한 위험도는 레벨2로 판단되며, 마감재나 기타 기기 등 낙하 위험물에 대한 위험도 또한 레벨2로 판단된다. 따라서 A아파트의 경우 낙하 위험물에 대한 위험도는 상대적으로 낮지만 경사 및 침하로 인한 건축물의 구조적 위험성으로 인해 레벨3 위험 등급으로 선정하였다. 종합하였을 때 무인비행체를 이용한 긴급 위험도 평가 결과 A아파트는 '위험' 수준으로 나타났다.

[표 2.24] A아파트 긴급 위험도 평가 결과

평가 요소	위험 요인	요소별 평가 결과	위험도 평가 결과
정성적 지표	지반파괴에 의한 건축물 최대 수직변위	0.42m	위험도Ⅲ (위험)
	건축물 전체 기울기	47/1000	위험도Ⅲ (위험)
정량적 지표	인접건축물, 주변지반 파괴에 의한 위험	인접 아파트 건축물의 기울어짐에 따른 위험	위험도Ⅱ (사용제한)
	낙하 위험물에 관한 위험도	특별한 낙하물 위험요소 없음	위험도Ⅰ (사용제한)
종합 평가	▶ 위험도Ⅲ (위험) 건축물의 기울어짐과 최대 수직변위 허용값 이상, 위험 수준		

(나) B빌라 정량적 평가 요소 측정값

B빌라에 대해 정량적 평가를 실시한 결과 건축물 상단부 횡변위 0.0231m, 높이 6.5m로 전체 경사도는 약 0.004로 레벨2에 해당한다. 건축물의 전체 침하량의 경우 0.0211m 레벨1로 양호하였다. 다음 그림은 B빌라의 정량적 평가 과정의 예시 이미지다.



a) 평면도 b) 정면도 c) 우측면도

(Note)
H : 층고 Δ_x, Δ_x' : x축 수평변위 Δ_y : y축 수평변위 Δ_z : z축 최대 수직변위

[그림 2.90] B빌라 수직, 수평변위 계측

B빌라의 경우 무인비행체를 이용한 건축물 긴급 위험도 평가의 정량적 평가에서 제한적인 사용가능 판정을 받았다. 지진 피해를 받았지만 건축물의 전체 기울기나 수직, 수평 변위가 A아파트에 비해 양호한 수준이었다. 그러나 B빌라의 정성적 평가의 경우 마감재, 창호, 기기류 등 낙하 위험물에 관한 위험도 평가 항목에서 대다수가 레벨3 위험 등급을 판정받았다. 최종적

으로 종합 위험도 평가에서 낙하 위험물에 관한 위험도에 의해 레벨3 위험 등급을 선정하였다. 종합하였을 때 무인비행체를 이용한 긴급 위험도 평가 결과 B빌라는 '위험' 수준으로 나타났다.



[그림 2.91] 3D Modeling을 이용한 낙하위험물에 관한 위험도 평가

[표 2.25] B빌라 긴급 위험도 평가 결과

평가 요소	위험 요인	요소별 평가 결과	위험도 평가 결과
정성적 지표	지반파괴에 의한 건축물 최대 수직변위	0.21m	위험도Ⅲ (위험)
	건축물 전체 기울기	4/100	위험도Ⅲ (위험)
정량적 지표	인접건축물, 주변지반 파괴에 의한 위험	특별한 파괴 위험요소 없음	위험도Ⅱ (사용제한)
	낙하 위험물에 관한 위험도	외장재 다수 탈락 및 물탱크 추락에 의한 낙하 위험	위험도 I (사용제한)
종합 평가	▸ 위험도Ⅲ (위험) 건축물의 기울어짐과 최대 수직변위 허용값 이상, 위험 수준		

(4) 분석

(가) 본 연구에서 제안한 긴급 위험도 평가 요소의 정성적 평가 및 정량적 평가 모두 3D 모델을 활용하므로 포인트 클라우드의 구성은 요소별 평가 결과를 좌우한다. 특히 정량적 요소 평가 시 본 연구에서 제안한 방법은 모델 내 3차원 위치정보를 활용한 GPS 측량법에 기초하므로 위치정보 자체의 신뢰성은 계산 결과에 직결되는 것으로 판단할 수 있다. 포인트 클라우드 및 3차원 위치정보의 구성에 있어서 3D 모델링에 있어서 자율비행계획을 통해 사진을 획득한 A아파트 결과가 수동비행계획을 실시했던 B빌라 결과보다 높은 해상도를 나타냈다. A아

파트의 경우 촬영거리 약 15m에서 사진 수 총 860장 가량 자동비행촬영을 실시하였고, B빌라의 경우 촬영거리 약 m에서 사진 수 총 2100장 가량 수동비행촬영을 실시하였다. 그 결과 GSD는 A아파트가 3.4mm, B빌라는 4.2mm로 원거리 자동촬영을 했던 A아파트 결과가 근거리 수동촬영으로 더 많은 수의 사진을 촬영한 B빌라에 비해 더 좋은 해상도를 나타냈다. 따라서 GPS 기반 자동비행을 활용하여 사진촬영 후 얻은 3D 모델링 결과는 카메라 위치 결정에 있어 수동비행에 비해 명확하기 때문에 고해상도의 포인트 클라우드 구성으로 이어질 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 측정 정확도에 자동·수동 비행방법 결정이 광학기기 해상도와 촬영 거리만큼 중요한 영향을 줄 수 있다는 것을 확인하였다.

(나) 무인비행체를 활용한 건축물의 긴급 위험도 평가 시 건물 전 구간에 대해 외부정보 획득이 가능하였다. 이후 기존의 측정방법과 비교하면 오차율은 10% 미만 수준으로 신뢰할 수 있는 수준임을 확인하였다. 특히 추가적인 조사장비나 조사시간의 단축, 조사자 안전거리 확보와 같이 현장조사 시 경제적·시간적 비용 절감이 가능할 것으로 판단된다.

그럼에도 불구하고 이 연구에서 제안한 프로세스는 무인비행체 촬영의 특성상 평가 항목 중 하나인 내부 수직구조부재 조사가 불가능하다. 국외 및 국내 긴급 위험도 평가는 모두 내부 수직구조부재에 대해 평가 항목이 마련되어 있으므로 외부정보 획득에 중점을 둔 본 평가 프로세스로는 명백한 한계점이 존재한다.

그러나 고려대학교 제2공학관, A아파트, B빌라에 대해 진행하였던 긴급 위험도 평가는 외관정보 획득만으로 종합평가등급 선정이 가능하였다. 또한 대다수 지진 피해 건축물들은 내부 구조체의 피해보다 건물 외부에 손상이 발생하므로 무인비행체를 이용하여 실시한 건축물 긴급 위험도 평가에 대해서 활용가능성이 있는 것으로 파악하였다.

마. 소결

이 연구에서는 무인비행체를 이용한 건축물의 긴급 위험도 평가 프로세스를 제시하고 건축물의 긴급 위험도 평가에 필요한 정량적, 정성적 평가 요소들에 대한 측정 및 평가 방법을 개발하여 기존 인력에 의존한 평가법과 비교함으로써 제안내용을 검증하였다. 그를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 현재 진행되는 무인비행체 및 포인트 클라우드 기술을 이용한 건축물 3차원 모델링 연구분석을 통해 건축물에 대한 평가에 있어 긴급 위험도 평가 활용 가능성을 확인하였으며, 긴급 위험도 평가 시 요구되는 정량적, 정성적 평가 요소들에 대한 측정 및 평가 프로세스를 제안하였다.

(2) 건축물의 구조적 손상에 해당하는 건축물의 경사도 및 침하량에 대한 정량적 데이터들을 3차원 공간 위치정보를 이용하여 측정하는 방법론을 제시하였다. 이를 노후 건축물에 시범 적용하고 기존에 실시한 안전진단 보고서 데이터와 비교 분석을 통해 오차율을 파악하고 타당성을 검증하였다. 기존 방법으로 측정한 값과 비교하였을 때 오차율을 계산한 결과 10% 미만 수준의 정확도를 확인하였다.

(3) 무인비행체를 이용한 긴급 위험도 평가법에 대한 검증을 위하여 P시 지진 피해 건축물들에 대해 무인비행체를 활용하여 긴급 위험도 평가를 실시하였고, 인력 및 육안점검에 의존한 기존의 평가 결과와 비교하였다. 대상 건축물들에 대한 기존의 평가 결과와 일치하였으며, 다양한 디지털 자료들의 수집, 구조 결함에 대한 정량적 검출을 통해 무인비행체를 이용한 긴급 위험도 평가의 가능성을 확인하였다.

(4) 무인비행체를 활용한 건축물의 긴급 위험도 평가 시 건물 전 구간에 대해 외부에서 측정 가능한 구조적 결함에 대한 신속한 계측 및 평가를 통해 가능성을 확인한 한편 무인비행체 촬영의 특성상 긴급 위험도 평가 항목 중 하나인 내부 수직구조부재에 대한 조사가 불가능하다는 점을 통해 한계점을 확인하였다. 하지만 A아파트의 사례와 같이 본 제안 평가 기술을 통해 건축물의 경사도, 침하량 등 평가 요소에 있어 심각한 구조 결함이 파악되는 건축물에 대한 신속한 위험도 평가가 가능함에 있어서 효용성을 나타내었다.

2.7 건축물 균열 깊이 평가

『시설물의 안전관리에 관한 특별법』에 의해 실시되는 건축물 안전점검 및 안전진단에서 균열에 대한 조사는 일반적으로 수행되는 점검항목 중 하나이다. 그러나 국내 건축물 안전점검 및 안전진단은 작업방식이 인력에 의존하여 이루어지므로 고층 혹은 점검자가 진입하기 위험한 구간에 대해서는 사진자료와 같은 정성적 자료로 점검보고서에 기록하는 것이 일반적이다. 또한 균열의 정량적 정보를 측정하는 경우에도 균열의 길이, 폭 혹은 면적을 위주로 측정하는 것이 일반적이다. 따라서 본 연구에서는 국내 건축물 안전성 평가 시 간과하기 쉬운 콘크리트 균열 깊이를 개발한 알고리즘과 무인비행체 및 열화상 모듈을 활용하여 서울시 내 대규모 아파트 단지를 방문하여 건축물의 균열 깊이를 측정하고 기존의 균열 깊이 평가 기법인 Tc-To법과 결과를 비교하였다.

국내 건축물 대다수는 철근콘크리트조로 이루어져 있다. 철근콘크리트구조 건축물은 콘크리트의 균열 문제를 피할 수 없다. 콘크리트의 균열은 건축물 외관 경관을 해쳐 가치를 하락시킬 뿐 아니라, 균열의 깊이가 깊어질 경우 콘크리트 내부의 철근을 부식시켜 구조적 안전성을 하락시킬 수 있다.

본 연구에서는 무인비행체와 열화상 모듈을 이용한 건축물의 긴급 결함탐지기술 SMART SKY EYE 시스템의 개발을 목표로 무인비행체를 활용한 안전점검 시 필요한 요소 기술을 도출한 후, 각 요소 기술에 대한 구체화 연구를 하였다. 기존 안전점검 방식과 평가기준을 무인비행체 기술과 융합하여 건축물의 성능과 안전성을 평가하는 새로운 무인비행체와 열화상 모듈을 이용한 건축물의 긴급 결함탐지기술인 SMART SKY EYE System을 제안하고 결함탐지 알고리즘을 구축하였다. 이를 검증하기 위해 P시 지진 피해 건축물을 본 시스템을 이용하여 점검하고 비교하였다. 이를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

가. 장비

무인비행체 및 열화상 모듈을 이용한 건축물 균열 깊이 평가 시 사용된 무인비행체는 P시와 동일하게 Intel Falcon 8+ 및 Matrice 600 Pro를 사용하였다.

Intel Falcon 8+ 무인비행체는 해상도 7360×4912의 RGB 카메라와 열화상 카메라를 탑재하였고, 무게는 약 1.2kg, 비행가능시간은 약 26분 비행가능하다. 정밀한 GPS 데이터 획득하며 인텔 프로세서를 탑재한 전용 조종기 인텔 칵핏을 통해 자동비행계획이 가능하여 효율적이고 안정적인 자동 비행촬영이 가능하다. 사전 촬영을 통해 2차원 지도 위에 간단한 포인트 클라우드 모델을 생성하였고 생성한 모델과 지도, 수신하는 GPS 정보를 기반으로 사진 촬영 매수, 최적 비행거리, 촬영 거리 등을 산정하여 자동비행을 실시하였다.

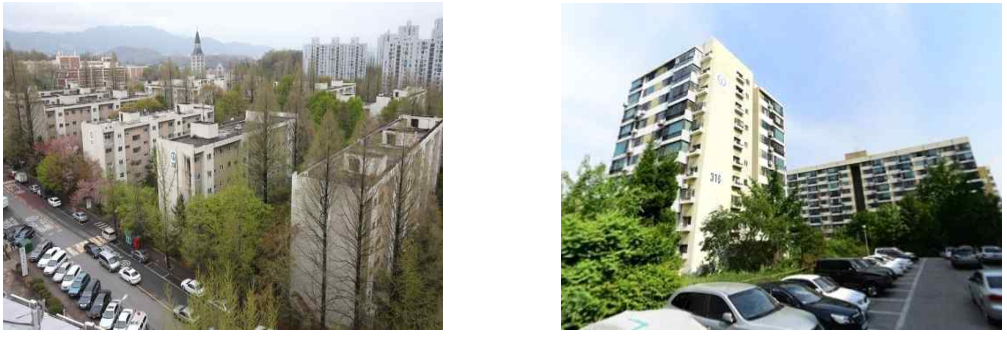


[그림 2.92] Intel Falcon 8+, controller

나. 촬영 계획

본 대상 건축물 C아파트는 1년전까지 거주자들이 생활하던 대규모 아파트 단지로 촬영했었던 학교 노후 건축물, P시 지진 피해 건축물보다 양호한 외관상태를 유지하고 있었다. 그러나 국내 일반적인 아파트 단지로 거주자들이 입주한 건축물이고 재난 상황 시 큰 피해가 예상되는 대규모 단지로 본 기술을 시범적용하기 적합하다고 판단하였다. 철거 현장 담당자와의 협의를 통해 오후12시부터 5시까지 촬영 협조를 부탁받았으며 구조사무소와의 협업을 통해 기존의 콘크리트 균열 깊이 탐지 장비인 Tc-To법 장비 또한 사용하였다.

본 연구에서 개발한 무인비행체를 활용한 외관조사망도 작성 프로토콜을 동일하게 활용하였으며 C아파트 촬영 시 자동 비행과 수동비행을 동시에 실시하였다. 기존의 학교 및 P시 건축물 촬영 시 근접 수동 촬영만 진행할 경우 모델링 시 촬영이미지 스티칭에 시간이 소요되는 문제점을 발견, POI 및 Nadir 비행을 추가하여 포인트 클라우드 작업소요시간을 단축하고자 하였다. 촬영한 동은 316동으로 10층 규모였으며 가로, 세로, 높이는 약 20m, 18m, 34m이다. 촬영 당시 영하 10°C 안팎의 낮은 기온으로 무인비행체의 배터리 방전 및 컨트롤러의 무인비행체 촬영영상 수신에 어려움이 있을 것으로 판단하여 비행시간을 최소화 할 수 있도록 비행계획을 수립하였다. 자동 비행시간을 늘렸으며, 상대적으로 소요시간이 긴 수동 비행시간을 단축하였다. 수동 촬영 시 2m/s 이하의 속도를 유지하며 촬영하였고 촬영시간은 한번 비행 시 약 20분으로 진행하였다.



[그림 2.93] C아파트 단지 위치도 및 전경

다. 외관조사 결과

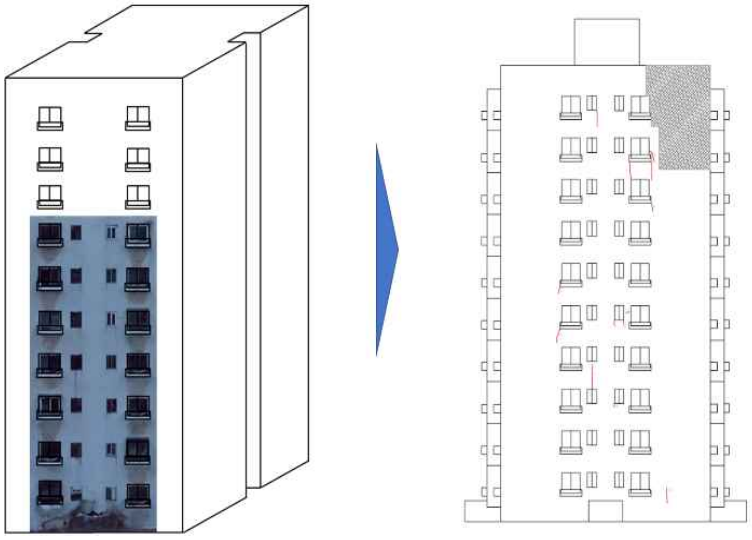
총 면적 2600 m^2에 달하는 4면의 건축물을 2일의 현장 방문 및 촬영을 진행하였고, 총 491장의 항공사진을 확보하였다.

3D 모델링 단계에서는 UAV 전용 맵핑 프로그램인 Pix4D와 PhotoScan을 사용하여 모델링을 실시하였다. GSD(Ground Sample Distance)는 2.0mm/pixel 이었으며, 포인트 클라우드의 최소 매칭 수를 3개로 두는 조건으로 프로세싱은 약 26시간 소요되었다. 이 후 촬영 당시 낮은 조도 및 적은 사진 개수로 인한 스티칭 문제를 해결하기 위해 포인트 클라우드 보정작업을 프로그램 내에서 실시하였다.

이후 정사사진(Orthomosaic) 작업을 진행하여 구축한 3D 모델을 이용하여 2D 정사사진을 추출하였다. 얻어낸 2D 정사사진을 활용하여 외부 결함 탐지 작업을 실시하였다.



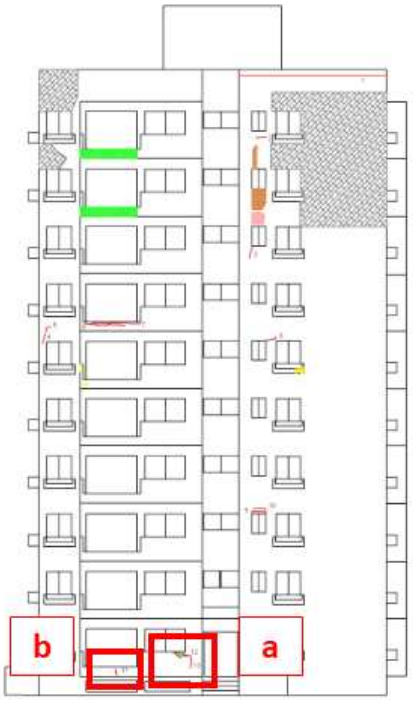
[그림 2.94] C아파트 항공촬영이미지 및 3D 포인트 클라우드 모델링



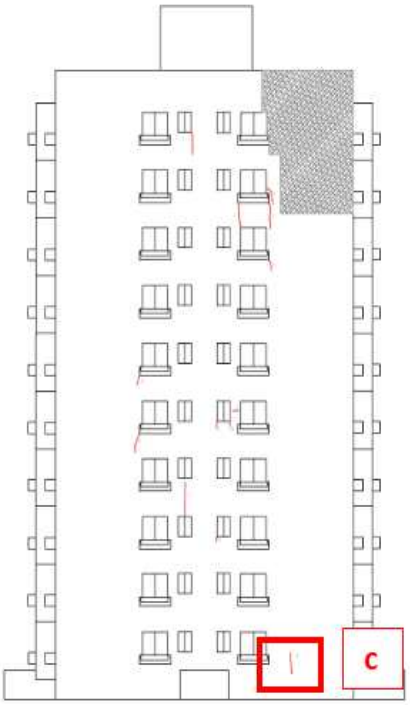
(a) 외관조사망도 작성 예시

(b) C아파트 외관조사망도 (좌측면도)

[그림 2.95] C아파트 전체 벽면 외관조사망도 작성 예시



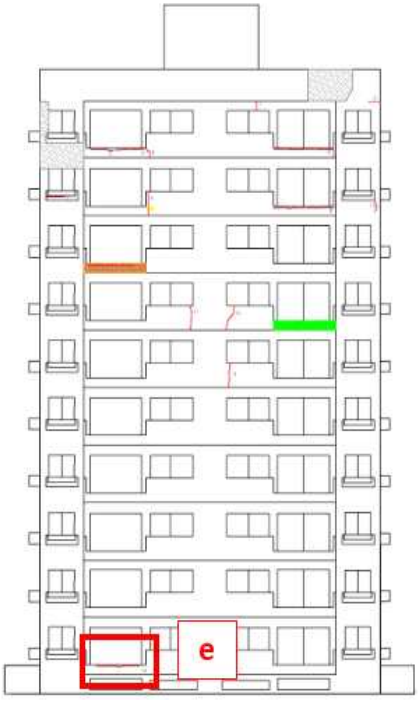
(a) C아파트 외관조사망도
(정면도)



(b) C아파트 외관조사망도
(좌측면도)



(c) C아파트 외관조사망도
(배면도)



(d) C아파트 외관조사망도
(우측면도)

단위 : m^2

손상유형	손상면적	손상유형	손상면적	손상유형	손상면적
균열 보수 구간	101.308	망상균열	1.444	붉은 녹물 흔적	2.033
박리 및 철근노출	1.133	누수흔적 및 백화	0.793	변색 및 얼룩	6.787

[그림 2.96] C아파트 전체 벽면 외관조사망도

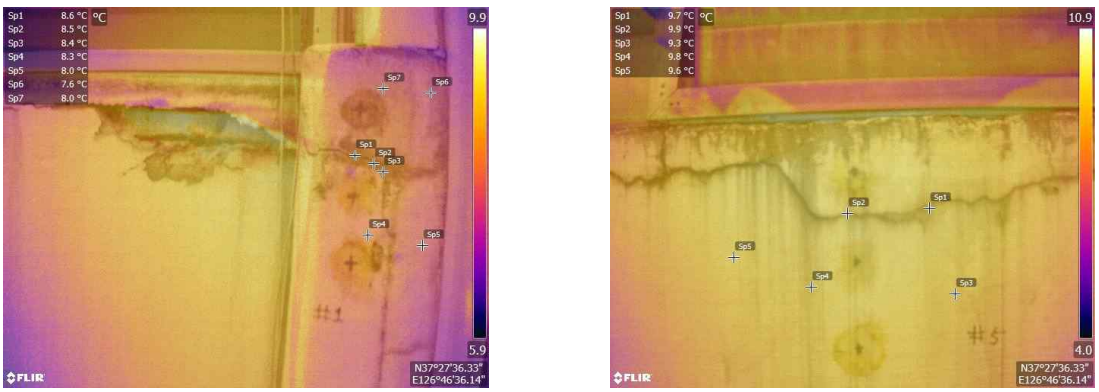
2D 정사사진의 높은 해상도를 통해 이미지 상에서 결함 탐지가 가능하였으며 탐지결함의 범례는 균열보수, 균열, 망상 균열, 박리 및 철근노출, 누수흔적 및 백화, 붉은 녹물 흔적, 변색 및 얼룩으로 총 7가지로 구분하였다. 결함 유형별로 색을 다르게 지정하여 외관조사망도에서 손쉽게 구분될 수 있도록 구성하였다. 또한 열화상 깊이 평가 비교를 위해 선정한 균열 a, b, c, d, e를 표시하였다.

라. 외관조사 결과

정사사진을 통해 실시한 외관조사에서 발견된 결함을 균열보수 구간, 균열, 망상 균열, 박리 및 철근노출, 누수흔적 및 백화, 붉은 녹물 흔적, 변색 및 얼룩으로 총 7가지로 분류하였다. 주로 0.6mm 이하의 균열이 존재하였으며, 창문과 같은 개구부 주위, 지붕 파라펫 경계부 부근에서 발견되었다. 본 외관조사망도에서 표시한 a, b, c, d, e 균열의 경우 UAV의 열화상 모듈과 Tc-To법 장비를 이용하여 건축물 균열 깊이를 평가를 진행한 균열이다.

마. 열화상 모듈을 이용한 건축물 균열 깊이 평가

UAV에 탑재된 열화상 모듈 및 개발한 알고리즘을 활용하여 건축물 균열 깊이 평가를 진행하였다. 전통적인 점검 장비인 Tc-To 초음파 탐지기의 경우 양중장비가 없을 시 점검자가 균열부에 접근하지 못하기 때문에 건축물 하단부 균열에 대해 깊이 평가를 진행하였다. 각 균열에 대해 a, b, c, d, e로 명명하였고 각각의 균열폭은 1.5mm, 0.45mm, 0.15mm, 0.25mm, 0.35mm로 측정하였다.



(a) 균열 a 열화상 이미지 (b) 균열 e 열화상 이미지

[그림 2.97] C아파트 균열 열화상 이미지 및 픽셀 기반 온도 측정 예시 사진

Tc-Tc법 초음파 탐지기 측정 결과와 UAV 열화상 모듈 및 알고리즘으로 측정한 콘크리트 균열 깊이 결과는 다음과 같다.

[표 2.26] Tc-To법 및 열화상 균열 깊이 평가 결과 비교표

균열 명칭	균열 깊이(mm) 및 오차율 (%)						
	Tc-To법	SVM	Decision Tree	Random Forest	MLP	Adaboost	Gaussian NB
a	535.00	60.00 (791.67)	60.00 (791.67)	37.78 (1316.09)	20.00 (2575.00)	60.00 (791.67)	80.00 (643.75)
b	430.60	60.00 (317.67)	60.00 (317.67)	32.00 (1245.63)	20.00 (2053.00)	60.00 (317.67)	80.00 (438.25)
c	80.40	60.00 (34.00)	60.00 (34.00)	42.50 (89.18)	20.00 (115.50)	60.00 (34.00)	80.00 (0.5)
d	43.10	60.00 (28.17)	60.00 (28.17)	33.33 (29.31)	20.00 (115.50)	60.00 (28.17)	80.00 (46.12)
e	55.40	60.00 (7.67)	60.00 (7.67)	37.14 (49.17)	20.00 (177.00)	60.00 (7.67)	80.00 (30.75)

Tc-To법 균열 깊이 측정 결과와 오차율이 30%인 경우 표 안에 표시를 하였다. a, b Tc-To법 측정결과는 신뢰하기 어려운 값을 얻었는데 그 이유로 Tc-To법 초음파 탐지기의 한계일 것으로 판단된다. 초음파 탐지기의 경우 균열 깊이 측정에 있어서 여러 제약이 존재한다. 표면이 매끄럽거나 그라인딩 처리가 되어있어야 하고 강우, 강설의 영향이 없는 양호한 기상상황, 측정기 반경 5cm 이내에 매끈한 콘크리트 표면이 연속되어야하고, 초음파 탐지기 하부에 철근이 없어야 하는 등 수많은 변수가 균열 깊이 평가 시 영향을 미친다. 촬영 당시 강설로 인해 콘크리트 표면부가 젖어있었고, 대체로 건축물 균열이 창틀에 분포해있어 측정기 반경 5cm를 확보하기가 어려웠으며, 아파트의 철근콘크리트 구조형식으로 인해 Tc-To법 초음파 탐지기를 사용하기 불리한 상황이었다고 판단된다.

반면 c, d, e 균열에 대해서는 신뢰할 만한 데이터를 획득하여 본 열화상 깊이 평가 결과와 비교하였다. c, d, e에 대해서 대체로 34% 이내의 오차율을 확인하였으며 균열 e에 대해서 대부분의 알고리즘이 높은 정확도를 보였다. 그러나 Random Forest 알고리즘을 제외하고 알고리즘 별로 균열 깊이를 일관되게 평가하였는데, 균열폭이 대체로 너무 작아 정상부와 균열부의 온도 차이가 크지 않았던 것과 계절로 인한 전반적인 온도 하락이 이유인 것으로 보인다. 추후 균열 깊이 평가 알고리즘에 겨울에 대한 온도데이터 및 다양한 균열폭을 학습시키면 C아파트와 같은 양호한 건축물에 대해서도 정확도가 향상될 것으로 기대된다.

바. 소결

본 장에서는 개발한 열화상 균열 깊이 평가 기법과 무인비행체를 이용한 건축물의 외관조사망도 작성을 통해 건축물 외관안전점검을 수행하였고, 기존 균열 깊이 탐지 장비인 Tc-To법 초음파 탐지기와 측정 결과를 비교하였다. 이를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

특별한 양중장비 없이 저층부에 대해서만 측정이 가능한 기존 Tc-To법 초음파 탐지기 장비

에 비해 건축물 전체 벽면에 대해 균열을 확인할 수 있는 무인비행체 및 열화상 모듈을 이용한 건축물 균열 계측 가능성을 확인하였으며, 외관결함을 탐지하고 균열 깊이값을 포함한 결함 정보 데이터를 획득하였다.

기존의 균열 깊이 측정 장비인 초음파 탐지기의 한계점을 확인하고 본 연구에서 개발한 무인비행체 및 열화상 모듈을 이용한 건축물 균열 깊이 평가법의 효용성을 확인하였다. 각각의 기법으로 측정한 결과값을 비교하여 본 연구에서 개발한 열화상 균열 깊이 평가법의 현장 적용성을 검증하였다.

무인비행체 및 열화상 모듈을 이용한 건축물 균열 깊이 평가법과 초음파 탐지기의 결과 비교를 통해서 높은 오차율이 발생한 원인을 파악하고 해결방안에 대해 고찰하였다. 구축한 열화상 이미지 계측 실험의 빅데이터에 추가로 포함되어야 할 데이터들을 제시하여 추후 개발한 열화상 기법의 신뢰성을 높일 방법을 제안하였다.

2.8 결 론

본 연구에서는 무인비행체와 열화상 모듈을 이용한 건축물의 긴급 결함탐지기술 SMART SKY EYE 시스템의 개발을 목표로 무인비행체를 활용한 안전점검 시 필요한 요소 기술을 도출한 후, 각 요소 기술에 대한 구체화 연구를 하였다. 기존 안전점검 방식과 평가기준을 무인비행체 기술과 융합하여 건축물의 성능과 안전성을 평가하는 새로운 무인비행체와 열화상 모듈을 이용한 건축물의 긴급 결함탐지기술인 SMART SKY EYE System을 제안하고 결함탐지 알고리즘을 구축하였다.

가. 무인비행체와 열화상 모듈을 활용한 건축물의 긴급 안전진단 시스템인 SMART SKY EYE 시스템에 대해 제안하고 구조체 결함탐지, 변위량 계측, 3D Reconstruction(3D 재현), 안전등급 지정 및 평가의 4단계 점검 프로세스를 제시함으로써 무인비행체를 이용하여, 기존의 안전점검 프로세스를 재구성하고 점검 기술 개발의 가능성을 확인하였다.

나. 무인비행체를 이용하여 안전진단 결과물 중 하나인 외관조사망도를 작성하고 이에 대한 프로토콜을 제시하였다. 이를 기존 노후건축물에 시범 적용하여 제안한 프로토콜을 검증했으며 결함별로 길이, 폭, 면적 등을 계산하여 결함정보를 정량화할 수 있었다. 무인비행체로부터 획득한 항공사진을 이용하여 3D 모델링을 실시하였고, 이미지 정사 작업을 통해 육안점검이 가능한 수준의 고해상도 이미지를 획득하였다. 기존 안전점검의 육안점검과 비교하였을 때, 시각효과를 높인 활용성 높은 디지털 자료 수집 및 자료 누적을 통한 결함 추적관리의 가능성을 확인하였다.

다. 적외선 열화상 기법을 활용한 콘크리트 균열 깊이 평가 기법의 개발을 위한 실험적 연구를 진행하였으며, 열화상 이미지와 변수들의 데이터 수집을 통해 빅데이터를 구축하였고, 이를 머신러닝을 통해 분석하였다. 구축한 5가지 알고리즘 중 랜덤포레스트(RandomForest)로 구현하였을 때 균열 깊이의 예측 정확도는 72%, 인접 깊이(Class)까지 인정할 경우 예측 정확도는 89%로 나타나 구축한 데이터셋(Dataset)에 가장 적합한 모델로 나타났다. 따라서 본 알고리즘은 열화상 이미지를 활용하여 균열 깊이 정보 예측의 가능성을 확인할 수 있었다. 추가적으로 본 기법을 서울 시 내 대규모 아파트 단지에 적용하여 기존의 균열 깊이 탐지법과 비교함으로써 현장적용성을 검증하고 개선방안에 대해 고찰하였다. 본 알고리즘을 통해 얻은 균열 깊이 정보는 앞선 장에서 보인 실화상 이미지와 3D 모델링을 통해 얻은 손상정보 데이터(균열 폭, 균열 길이 등)에 결합하여 균열 깊이 정보까지 포함된 건축물의 손상정보 통합 시스템을 구축하고 무인비행체를 활용한 긴급점검 플랫폼 구축에 활용 가능하다.

라. 앞서 제시한 SMART SKY EYE 시스템을 활용하여 P시 지진 피해 건축물들을 점검함

으로써 검증하였다. 외관 결함 상태, 기울기 및 침하상태, 낙하물에 대한 위험도 등 지진 피해 건축물 평가에 필요한 요소들을 조사하여 평가를 진행하였다. 평가 결과 3개 건축물 모두 위험 등급으로 나타났으며, 본 결과는 기존의 지진 후 긴급위험도 평가를 통해 나타난 결과와 일치하였다. 이로써 지진 등의 대규모 재난 시 피해 건축물에 대한 무인비행체 활용 긴급 안전도 점검의 가능성을 확인하였다.

2.9 연구개발과제의 연구실적

번호	구분 (논문/특허/기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일/특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	적외선 열화상 기법을 이용한 용접부의 결함 비파괴 측정기법	고려대학교	-	대한건축학회논문집 / 구조계	-	2017.11.30	단독	
2	논문	사진측량법을 활용한 무인비행체의 건축물 균열도 작성 기법	고려대학교	-	대한건축학회논문집 / 구조계	-	2019.01.28	단독	
3	논문	무인비행체를 이용한 건축물의 긴급 위험도 평가 기술 (SMART SKY EYE) 개발	고려대학교	-	대한건축학회논문집 / 구조계	-	2019.02.28	단독	
4	논문	Accuracy Analysis of Thermography on Welding Defect Under Various Environmental Condition	고려대학교	-	Structural Control & Health Monitoring	21.40%	2019.01 (심사중)	단독	SCI
5	특허	가시광 카메라와 열화상 카메라를 이용한 구조물의 건전도 평가 시스템	고려대학교	-	대한민국	-	2017.11.14 (출원)	단독	
6	특허	교육용 드론 시뮬레이터	고려대학교	-	대한민국	-	2018.07.06 (출원)	단독	

7	기타	무인비행체를 이용한 건축물의 긴급 결함탐지기술 개발	고려대학교	-	대한건축 학회 학술발표 대회논문집	-	2018.04.27	단독	
8	기타	다양한 기상 조건에서의 균열 검출을 위한 열화상 측정의 정확도 분석	고려대학교	-	한국복합신소재학회 학술발표 대회논문집	-	2018.04.19	단독	
9	기타	철골 중간모멘트골조 내진접합부	고려대학교	-	대한건축 학회 학술발표 대회논문집	-	2017.11.08	단독	
10	기타	접이식 옥외피난계단 앵커 접합부의 내화성능평가	고려대학교	-	대한건축 학회 학술발표 대회논문집	-	2017.11.08	단독	

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

3.1 목표

연차	연구목표	세부연구목표	연구개발 수행 내용
1차년도	구조물 손상 폭과 깊이에 관련된 열화상 이미지 빅데이터화	모의 열화상 이미지 계측 실험 및 열화상 이미지 빅데이터화	- 프로그램을 이용한 열 영향 반경 해석 - 균열 모사체 및 접합부 결함 모사체 제작 - 최적 촬영거리 및 촬영시간 산정 - 모사체에 대한 열화상 이미지 촬영 - 외기 조건 기록 - 획득한 열화상 온도 데이터 및 외기 조건 엑셀파일에 정리
2차년도	무인비행체를 활용한 열화상 이미지 손상 분석 시범 적용	열화상 이미지 빅데이터 분석	- 결함부 온도 및 상태에 따른 경향성 파악을 위한 머신러닝 학습 - 결함부 온도에 대한 변수별 분석 - 학습한 알고리즘을 기반으로 콘크리트 균열 깊이 파악 - 알고리즘 정확성 측정 - 균열 길이, 폭, 면적이 계산 가능한 알고리즘 개발
		무인비행체 기술과 결합한 시범적용	- 무인비행체를 이용한 건축물 긴급 위험도 평가 프로세스 제시 - 무인비행체를 이용한 외관조사망도 작성 - 노후 건축물을 대상으로 긴급 위험도 평가 항목에 대해 측정기법 제시 - 기존 안전진단 결과 데이터와 측정한 결과 데이터의 비교 및 타당성 검증 - 국내·외 긴급 위험도 평가법 조사 - 실제 지진 피해 건축물들에 대하여 긴급 위험도 평가 실시

3.2 목표 달성여부

■ 성과목표 및 달성치

연차	성과지표	측정방법	목표치	달성치	가중치
1차년도	국내·외 사례 조사	전문가 검토의견서	사례 5건	국내·외 10건 사례 조사	5
	열화상 이미지 계측 실험	실험결과 보고서	실험체 측정 실험	균열 모사체 접합 결함 모사체 제작 및 실험 수행	15
	열화상 이미지 빅데이터화	전문가 검토의견서	변수별 분석	약 1000회의 실험데이터 빅데이터화 및 변수별 분석	25
2차년도	결함 평가 알고리즘 개발	알고리즘 데이터	알고리즘 개발	결함 평가 알고리즘 개발 2건	25
	건축물의 일부 손상구간 점검	전문가 검토의견서	기존 기술과 오차 10% 이내	실제 건축물 적용 및 기존 기술과의 오차 10% 이내 확인	30

■ 관련 분야 기여도

구 분	내 용
기술적 측면	**■ 국산기술에 의한 결함탐지 장비 개발과 노하우 축적** - 건축물의 손상에 대한 결함 탐지 프로세스 제시 및 알고리즘 자체 개발 - 실제 건축물에 기술을 적용함으로써 프로세스 체득 **■ 사회기반시설 분야의 진단 시스템으로 확대 가능** - 건축물 뿐만 아니라 교량이나 대공간 구조물 등 기술의 사용범위를 확대
경제·산업적 측면	**■ 구조물 진단 분야의 비용절감 효과** - 인력 절감, 현장 조사 기간 단축, 사용 장비 단순화 등으로 인한 경제성 확보 **■ 장비 국산화로 수입대체 효과를 통한 국고 유출 최소화** - 자체 점검 기술 개발을 통해 과거 수입에 의존하던 비파괴검사 장비 대체
사회적 측면	**■ 고소작업 최소화를 통한 작업자 안전성 확보** - 고층 건물의 경우 점검을 생략하거나 사고를 감수하고 장비를 사용하여 작업하였음 - 본 기술을 통해 고층 건물에 대해 작업자의 안전을 확보하면서 상세한 점검 가능 **■ 안전진단 관련 전문성 확보 및 관련 일자리 창출** - 건축물 전체에 대한 외관조사가 가능하며 새로운 건축물 점검 방법이 제시됨으로써 관련 기술 직업군 형성 가능

3.3 연구결과의 한계점 및 차후대책

■ 연구결과의 한계점

본 연구를 통해 무인비행체와 열화상 모듈 기반 안전점검 시 필요한 요소 기술을 도출하고 각 요소 기술에 대한 구체화 연구를 하였다. 기존 안전점검 방식과 평가기준을 무인비행체 기술과 융합하여 건축물의 안전성을 예진하였고 결함탐지 알고리즘을 구축하여 본 기술이 기존 방식과 비교하여 신속하고 경제적인 점검이 가능하도록 하였다.

본 연구에서 개발한 SMART SKY EYE 기술은 정밀 안전진단과 같은 정확도 높은 점검이 목표가 아닌 신속하고 경제적인 예진이 목표로 기존 안전진단 기술과 비교하여 활용도와 정밀도에 대한 추가적인 검증이 요구된다. 특히 영상 기반 건축물 결함 탐지 기술의 경우 국내 시장의 관련 기술 성숙도가 낮아 추가적인 연구를 통한 기술 검증 필요성이 있다. SMART SKY EYE의 핵심기술인 열화상 이미지 기반 건축물 결함 평가 기법 또한 정확도 향상을 위한 추가적인 데이터 축적이 필요할 것으로 판단된다. 본 연구과제는 2차년도에 걸친 기술 개발 및 현장 적용이 목표였다. 과제 종료 이후 SMART SKY EYE 기술이 안전진단 시장에서 사용되기 위하여 수행한 3건의 현장 적용 프로젝트를 통한 건축물 점검 이외에도 추가적인 건축물 안전성 예진을 진행하여 본 기술의 활용가능성 확인이 요구된다. 그 내용은 다음과 같다.

기술 구분	한계점
열화상 이미지 기반 균열깊이 평가 기술	**■ 열화상 이미지 빅데이터화** - 알고리즘 학습 효율 증가를 위한 빅데이터 추가 구축 필요 - 실제 균열 정보 측정을 위한 다양한 균열 모사체 제작 **■ 균열 깊이 평가 알고리즘** - 실제 건축물 적용을 통한 알고리즘 적용성 검증 필요
실화상 이미지 기반 건축물 결함 탐지 기술	**■ 포인트 클라우드 모델 정확도** - 실화상 이미지를 이용한 포인트 클라우드 모델 생성 시 실제 건축물과의 치수 비교를 통한 정확도 검증 필요 - 포인트 클라우드 모델을 통한 건축물 변위 측정 기법에 대한 추가적인 적용 사례 필요
무인비행체 기술과 결합한 현장 적용	**■ UAV 비행 계획 수립** - 수동 비행 시 GPS 교란 및 포인트 클라우드 모델 오류 가능성 **■ SMART SKY EYE 기술 현장 적용** - 대상 건축물에 대한 전체 프로세스 적용 사례 미비 - 개발 기술의 추가적인 현장 적용 필요

■ 차후대책

2차년도에 걸친 본 연구과제를 수행 후 확인한 한계점 극복 및 SMART SKY EYE 기술의 완성도를 높일 계획으로 후속 연구를 통해 기술 수준 향상 및 현장 적용을 수행할 계획이다. 현재 SMART SKY EYE의 기술을 기반으로 한 연구 과제를 2건 진행 중에 있으며 이를 통해 각각의 기술에 대한 극복 방안이 될 것으로 판단된다.



[그림 3.1] 연구과제 수행결과 차후대책

열화상 이미지 기반 건축물 균열 깊이 평가 기술

본 연구에서 개발한 열화상 기법의 경우 2018년 12월에 시작한 연구 과제를 통해 본 연구 과제에서 구축한 균열 데이터를 보완·발전시킬 계획이다. SMART SKY EYE 기술개발 연구 과제에서 구축한 균열의 경우 직사각형의 모양으로, 실제와 비슷한 균열 모사체 제작을 위하여 삼각형 형상의 균열에 대한 열화상 이미지를 촬영하여 현장 적용성을 높일 계획이다. 이를 통해 약 3000건의 데이터베이스를 추가로 구축할 예정이다. 획득한 빅데이터를 이용하여 균열 깊이 평가 알고리즘의 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

실화상 이미지 기반 건축물 결함 탐지 기술

실화상 기반 모델링 및 획득 정보의 정확도 향상을 위하여 2018년 8월부터 시작한 연구 과제를 통하여 포인트 클라우드 모델의 도면화에 대한 연구를 수행하고 있으며, 그에 따라 기반 기술로 모델의 치수에 대한 정확도 검증을 추가적으로 확인할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 연구 수행을 위해 높은 비행안전성과 수직 자동비행 기능을 탑재한 UAV Intel Falcon8+를 구매하여 모델링과 비행계획에 대한 문제를 최소화할 예정이다. 또한 연구 과제를 수행하면서 다양한 건축물에 대한 촬영을 진행하여 실화상 기반 모델링 및 결함 탐지 프로세스 적용 사례를 추가할 계획이다. 라이다 기술과 결합하여 건축물 내·외부 전체를 포함한 포인트 클라우드

모델 생성 방안에 대해 개발 진행 중이며, 다양한 기술 융합을 통한 새로운 점검 항목에 대해서 연구를 수행 중이다.

무인비행체 기술과 결합한 현장 적용

담당자를 통해 교내 건축물에 대해 SMART SKY EYE 기술을 통한 안전 예진을 요청받아 4월 이내 Intel Falcon8+를 이용하여 학교 건축물에 대한 추가적인 적용을 실시할 계획을 수립하고 있다. 본 촬영을 통해 SMART SKY EYE 전체 프로세스를 적용하여 건축물 결함 탐지를 실시하고 안전성을 예진할 예정이다. 이후에도 지속적인 현장 적용을 통해 개발한 기술의 적용성과 정확도를 향상시킬 계획이며 관련 기업들과의 협업을 통해 문제점들을 타개할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 안전진단 관련 기업 혹은 건설 업체들과의 자문회의 혹은 긴밀한 협조를 통해 본 기술의 실용화 단계를 위한 필요 요소들을 도출할 수 있을 것으로 파악된다.



[그림 3.2] UAV 및 열화상 모듈을 이용한 교내 건축물 현장 적용 방안 전략

4. 연구개발성과의 활용 계획 등

4.1 연구개발성과의 활용 가능 분야



[그림 4.1] SMART SKY EYE 기술의 연구 활용 범위

1. 노후 건축물의 조기 긴급 안전 점검 및 진단

- 서울시 내 점검이 필요한 노후 아파트 단지, 낙후된 관공서 등 노후 건축물의 신속한 조기 긴급 안전 점검 실시를 통해 정밀안전진단의 필요성 타개

2. 구조물 붕괴 시 막대한 피해가 예상되는 다중이용시설 점검

- 대규모 시설물에 대한 신속한 점검 및 사각지대 없는 정밀한 결함 조사 가능

3. 기존 안전점검 및 안전진단 업체

- 육안점검의 보완 기술로서 점검 범위의 확대, 디지털 데이터 확보

4. 인력에 의존한 고소작업 최소화를 통한 점검자의 안전 확보

- 고층 아파트 단지, 고층 빌딩이 밀집한 업무·상업 지구 등 인력에 의존한 고소작업이 어렵거나 양중장비 활용이 제한되는 경우, 본 기술을 활용한 효율적인 점검 가능

5. 재난 피해 건축물에 대한 긴급 위험도 평가

- 본 기술을 활용하여 지진, 화재, 홍수 피해 등 재난 피해 건축물에 대한 긴급 위험도 평가를 진행하고, 이를 활용하여 신속한 사후 대책 수립 가능

6. 통일 후 북한 내 노후 시설물에 대한 신속하고 객관적인 점검

- 통일 대비 북한 노후 시설물에 대한 점검 시 정밀안전진단에 앞선 신속한 사전점검 가능



[그림 4.2] SMART SKY EYE 기술의 활용방안 – 북한 노후 시설물에 대한 신속 점검

4.2 현장 적용방법 전략 및 방안

■ 개발 기술의 현장 적용 전략

1. 후속 연구과제 수행을 통한 지속적인 SMART SKY EYE 기술 검증
- 관련 연구과제 수행을 통해 개발 기술의 정확도 향상
- 실제 건축물에 대한 추가적인 기술 적용을 통한 적용 사례 확보

2. 교내 건축물 대상 건축물 안전 예진 수행
- 기술의 본격적인 현장 적용 전 사전 단계로 교내 건축물에 대해 담당자와 협의하여 건축물 안전성 예진을 수행, 개발 기술의 활용을 위한 기술 성숙도 증진

3. 건설사 및 구조사무소와의 협업 등을 통한 SMART SKY EYE 기술 활용성 확인
- 대형 건설사의 신축 건축물에 대한 하자관리 분야 적용
- 전문적인 안전점검·안전진단 업체와의 협업을 통한 건축물 안전성 평가
- 관련 전문가들을 초청하여 본 기술의 활용성 방안 등 자문

■ 현장 적용방법

기술 적용 프로세스	내용
1. 촬영 대상지 현장 조사	**■ 촬영 대상지 선정** - 후속 연구대상, 교내 건축물, 관련 기업 현장 등 - 숙소, 이동 방법 등 촬영 대상 인근 지역 조사 **■ 대상 건축물 현장 조사** - 촬영 현장을 방문하여 결함 등 개략적인 육안조사
2. 비행·촬영 계획 수립	**■ 비행·촬영 계획 수립** - 현장 및 장비 상황에 맞는 비행 계획 수립 - 프로세싱 기간 등 데이터 획득을 위한 개략적인 작업 수행 기간 산정
3. 건축물 항공 촬영	**■ 건축물 항공 촬영 시 유의사항** - 작업자 안전, 비행 시 장애물 등에 유의하여 촬영
4. 포인트 클라우드 모델링 및 획득 데이터 분석	**■ 획득 데이터 프로세싱 및 분석** - 카메라 설정, 시간적 소요 등을 반영하여 모델링 수행 - 열화상 데이터 및 외기 조건 데이터 분석 - 오류 데이터 및 불필요한 이미지 제거
5. 건축물 결함 계측	**■ SMART SKY EYE 결함 탐지 수행** - 건축물 외관조사망도 작성 - 건축물 수직·수평 변위 계측 - 열화상 이미지 기반 균열 깊이 평가
6. 건축물 안전성 예진	**■ 종합적인 건축물 안전 예진 평가** - 국내 긴급 위험도 평가 기반 건축물 종합 안전 예진

5. 참고문헌

국토교통부(2017), 『드론산업 발전 기본계획(안) (2017~2026)』

국토교통부(2017), 『드론 활성화 지원 로드맵 연구』, p. 22~23

Teal Group Corporation (2016). “World Civil Unmanned Aerial Systems Market Profile & Forecast” : 2016 Edition

EuroConsult (2016). “Prospects for Remotely Piloted Aircraft Systems Market Analysis & Forecasts” : 1st Edition of A EuroConsult Executive Report, License No. RPAS16-S-003

Duque, L. (2017). “UAV-Based Bridge Inspection and Computational Simulations”. Master’s Theses. South Dakoata State University, p. 2159

Hallermann, N. & Morgenthal, G. (2013). “Unmanned aerial vehicles (UAV) for the assessment of existing structures”, Proc., IABSE Conference, 101(14), pp. 1~8

Hallermann, N. & Morgenthal, G. (2016). “From Aerial Photography to 3-Dimensional Inspection of Bridges”, Proc., IABSE Conference, pp. 546~553

Khaloo, A. & Lattanzi D. (2016). “Hierarchical dense structure-from-motion reconstructions for infrastructure condition assessment”, Journal of Computing in Civil Engineering, 31(1), p. 04016047

Ellenberg, A., Kontsos, A., Bartoli, I., & Pradhan, A. (2014). “Mansonry Crack Detection Application of an Unmanned Aerial Vehicle”, Proc., 2014 International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, pp. 1788~1795

Kim, H., Lee, J., Ahn, E., Cho, S., Shin, M., & Sim, S. H. (2017). “Concrete crack identification using a UAV incorporating hybrid image processing”, Sensors, 17(9), p. 2052.

Henriques, M. J. & Roque, D. (2015). “Unmanned Aerial Vehicles (UAV) as a Support to Visual Inspections of Concrete Dams”, Second International Dam World Conference Proceedings

Eschmann, C., & Wundsam, T. (2017). “Web-based georeferenced 3D inspection and monitoring of bridges with unmanned aircraft systems”. Journal of Surveying Engineering, 143(3), p. 04017003.

Aghaei, M., Grimaccia, F., Gonano, C.A., & Leva, S. (2015). “Innovative Automated Control Syste m for PV Fields Inspection and Remote Control”. IEEE Trans. Ind. Electron. 62(11), pp. 7287~72 96

Sham, F. C., Chen, N., & Long, L. (2008). “Surface crack detection by flash thermography on concr ete surface”. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 50(5), pp. 240~243.

Lee, B. (2004). “Development of Detecting System for Concrete Surface Cracks Using Image Processing and Artificial Neural Network”. Master’s Theses, Korea Advanced Institute of Science and Technology, p. 35

Lim, C. (2007). “Development of Portable Crack Measuring Instrument for the Cracks of Concrete Surface”. Master’s Theses, Korea Advanced Institute of Science and Technology, p. 29

Ellenberg, A., Branco, L., Krick, A., Bartoli, I., & Kontsos, A. (2014). “Use of Unmanned Aerial Vehicle for Quantitative Infrastructure Evaluation”, Journal of Infrastructure Systems, 21(3), p. 4014054

ATC-20 (1989). “Procedures for Post-Earthquake Safety Evaluation of Buildings, Applied Technolog y Council, California, Virginia

Jeong, D., Batbayar, E., & Ju, Y. (2018). “Unmanned Aerial Vehicle for Quantitative Building Inspection”, In review

Kim, K., Chang, S., Kim, J., & Lee, J. (2015). “Development of Mobile-based System Supporting Post-earthquake Safety Evaluation for Buildings by Case Studies”. Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, 15(2), pp. 217~224.

Yoon B. (2018). “Nonstructural Elements Resulting From Pohang Earthquake and Direction of Future Seismic Design Nonstructural Elements.” 62(4), pp. 23~28

Kim, S. & Kim H. (2018). “Comparative Analysis of Earthquake Management in Pohang and Japan.” 22(3), pp. 193~199

Kevin, P. (2015). 『Machine Learning: A Probabilistic Perspective』, Published on August 24th 201 2 by Mit Press

Isoni, A. (2016). 『Machine Learning for the Web』, Published on July 15th 2016 by Packt Publish ing Ltd, p. 29~30

주 의

1. 이 보고서는 국토교통과학기술진흥원에서 시행한 국토교통기술촉진연구 사업의 연구보고서입니다.

2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통과학기술진흥원에서 시행한 국토교통기술촉진연구 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.