

19CSCIP

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

건설기술연구사업 사업 제4차 연도 최종 보고서

R&D / 19CSCIP

무인검사장비 기반 교량구조물 신속진단 및 평가기술 개발

최종보고서

2020.01.31.

주관연구기관 / 한국과학기술원
공동연구기관 / (주)엑스드론
경북대학교 산학협력단
한국시설안전공단
(주)브로드웨이브
위탁연구기관 / 세종대학교 산학협력단
서울시립대학교 산학협력단
한국건설기술연구원

2020

국토교통과학기술진흥원
국토교통부

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

제출문

제 출 문

국토교통과학기술진흥장관 귀하

‘무인검사장비 기반 교량구조물 신속진단 및 평가기술 개발’(연구개발 기간 : 2016.08. ~ 2019.11.) 과제의 최종보고서 12부를 제출합니다.

2020.01.31.

주관연구기관명 :	한국과학기술원	(대표자)	신 성 철
공동연구기관명 :	(주)엑스드론	(대표자)	진 정 회
	경북대학교 산학협력단	(대표자)	김 상 동
	한국시설안전공단	(대표자)	박 영 수
	(주)브로드웨이브	(대표자)	이 태 진
위탁연구기관명 :	세종대학교 산학협력단	(대표자)	배 덕 효
	서울시립대학교 산학협력단	(대표자)	서 순 탁
	한국건설기술연구원	(대표자)	한 승 현



주관연구기관책임자: 정형조

공동연구기관책임자: 진정회, 홍원화, 박재봉, 이태진

위탁연구기관책임자: 안윤규, 조수진, 이종석

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에

동의합니다.

보고서 요약서

보고서 요약서

과제 고유 번호	19SCIP-C1168 73-04	해당 단계 연구 기간	2019. 01. 31 ~ 2019. 11. 30	단계구분	(4단계)/(4단계)
연구사업명	중사업명	건설기술연구사업			
	세부사업명	-			
연구과제명	대과제명	무인검사장비 기반 교량구조물 신속진단 및 평가기술 개발			
	세부과제명	-			
연구책임자	정형조	해당단계 참여연구원 수	총: 93 명 내부: 93 명	해당단계 연구비	정부: 1,159,000 천원 민간: 443,500 천원 정부외: - 천원 상대국: - 천원 계: 1,602,500 천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 344 명 내부: 344 명	총 연구비	정부: 5,748,500 천원 민간: 2,099,000 천원 정부외: - 천원 상대국: - 천원 계: 7,847,500 천원
연구기관명 및 소속 부서명	한국과학기술원, 경북대학교 산학협력단, 한국시설안전공단, (주)엑스드론, (주)브로드웨이브			참여기업명 (주)티이솔루션, (주)공간정보, (주)에스큐엔지니어링, (주)안전융합기술원	
국제공동연구	-			-	
위탁연구	서울시립대학교 산학협력단			조수진	
	세종대학교 산학협력단			안윤규	
	한국건설기술연구원			이종석	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

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

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허		보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
		출 원	등 록						생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기탁 번호	23	16	9		1		9					

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

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

요약

- 교량 외관조사용 무인검사장비
- 외부환경에서의 자율운행 플랫폼
- 무인검사장비의 운영 및 원격통제가 가능한 지상관제센터 시제품
- 강재 표면 도막두께 및 부식 정량화 기술
- 강재균열 정량화 및 볼트연결부 손상 진단 기술
- 콘크리트 균열 정량화 기술
- 콘크리트 백태, 박락 정량화 기술
- 교량검사를 위한 무인체 측정 및 관리 데이터 처리 기술
- 무인검사장비 측정정보 기반 외관조사망도 표출 기술 개발
- 무인검사장비 계측 데이터를 활용한 성능중심평가기법 기반 내구성요소 평가기술
- 무인검사장비 수집 데이터와 BMS DB 연계 교량 상태등급 산정 기술
- 무인검사장비 기반 교량 안전점검 운영지침
- 무인검사장비에서 수집된 데이터, 영상, 결과의 통합 관리 코드

보고서 면수 : 99

요약문

연구의 목적 및 내용	무인체 기술(무인비행체) 및 이중영상장비(RGB 카메라, 열화상 카메라)등 다양한 첨단기술의 융·복합을 통해 기존 교량 안전진단방법의 문제점들을 해결할 수 있는 ‘무인검사장비 기반 교량구조물 외관 상태 신속 진단 및 성능평가 기술’을 개발하고자 함 • 교량 외관조사를 위한 무인검사장비 개발: 교량의 외부 조사에 최적화된 무인검사장비를 기보유하고 있는 무인비행체 기술을 토대로 개발하고, 이러한 무인검사장비를 이용해 보다 효과적으로 교량의 외관상태 검사를 위해 필수적인 무인검사장비의 자율운행을 위한 플랫폼 개발 • 무인검사장비의 운영 및 원격제어 기술 개발: 무인검사장비의 운영 및 원격 통제가 가능한 지상관제센터를 개발하고, 다양한 검사 시나리오에 맞춰 무인검사장비를 효율적이고 안정적으로 운영하기 위한 플랫폼 개발 • 이중영상 데이터 융·복합 기반 비접촉식 상태검사 기술 개발: RGB 영상, 열화상 카메라 등과 같은 다양한 영상장비를 활용하여 교량의 비접촉식 상태 진단 기술을 개발하고, 이를 통해 다양한 손상(콘크리트 교량의 미세균열, 박락, 백태 등, 강교량의 도막두께, 부식, 균열, 볼트연결부 손상 등)을 검출하고 이러한 손상을 정량화하는 기술 개발 • 무인검사장비 수집데이터를 이용한 교량의 신속한 외관상태 평가 기술 개발: 무인검사장비를 통해 계측된 데이터의 수집, 처리 및 분석을 위한 플랫폼 및 계측된 데이터의 맵핑 및 가시화 기술을 개발하고, 무인검사장비 수집 데이터와 BMS DB를 연계한 교량 상태등급 산정 기술 및 무인검사장비에서 수집된 데이터, 영상, 결과 등을 통합 관리할 수 있는 코드 개발																																					
	• 교량 외관조사용 무인검사장비 • 외부환경에서의 자율운동 플랫폼 • 무인검사장비의 운영 및 원격통제가 가능한 지상관제센터 시제품 • 강재 표면 도막두께 및 부식 정량화 기술 • 강재균열 정량화 및 볼트연결부 손상 진단 기술 • 콘크리트 균열 정량화 기술 • 콘크리트 백태, 박락 정량화 기술 • 교량검사를 위한 무인체 측정 및 관리 데이터 처리 기술 • 무인검사장비 측정정보 기반 외관조사망도 표출 기술 개발 • 무인검사장비 계측 데이터를 활용한 성능중심평가기법 기반 내구성요소 평가기술 • 무인검사장비 수집 데이터와 BMS DB 연계 교량 상태등급 산정 기술 • 무인검사장비 기반 교량 안전점검 운영지침 • 무인검사장비에서 수집된 데이터, 영상, 결과의 통합 관리 코드 <예상되는 연구개발성과 유형> <table><tr><th rowspan="2">구분</th><th rowspan="2">논문</th><th rowspan="2">특허</th><th rowspan="2">보고서 원문</th><th rowspan="2">연구시설 · 장비</th><th rowspan="2">기술요약 정보</th><th rowspan="2">소프트웨 어</th><th rowspan="2">화합물</th><th colspan="2">생명자원</th><th colspan="2">신품종</th></tr><tr><th>생명 정보</th><th>생물 자원</th><th>정보</th><th>실물</th></tr><tr><td>예상성과 (N/Y)</td><td>Y</td><td>Y</td><td></td><td>Y</td><td></td><td>Y</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>											구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트웨 어	화합물	생명자원		신품종		생명 정보	생물 자원	정보	실물	예상성과 (N/Y)	Y	Y		Y		Y				
구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트웨 어	화합물	생명자원		신품종																												
								생명 정보	생물 자원	정보	실물																											
예상성과 (N/Y)	Y	Y		Y		Y																																
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	• 기존의 인력 검사에 의존하는 유지관리방식에서 탈피하여 시설물 건전도 정보 수집을 자동화하고, 정량화된 계측 데이터베이스 기반의 시설물 관리를 수행함으로써 사회인프라 시설의 유지관리 신뢰성 및 안전성 향상 • 무인체 탑재용 비접촉식 모니터링 기술 (하드웨어 및 소프트웨어)개발로, 강재 및 콘크리트 비파괴검사 분야의 원천기술 확보 • SOC뿐만 아니라 선박, 원전설비, 자동차, 신소재 등 다양한 산업 분야로 개발 기술 확대 가능 • 국내외 대형 구조물의 검사 및 진단 장비로 확대 가능 • 육안점검 결과를 객관화하여 대체할 수 있는 기술을 활용한 유지관리 분야의 새로운 기술 창출 가능 및 시설물 점검 분야의 패러다임 전환(인력 중심→장비 중심)																																					
국문핵심어 (5개 이내)	무인검사장비		이중영상 데이터 융합		손상 정량화기술		교량신속진단		교량평가기술																													
영문핵심어 (5개 이내)	Unmanned inspection equip ment		Hybrid image data fusion		Damage quantification technology		Bridge rapid diagnosis		Bridge assessment technology																													

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	1
1-1. 연구개발과제의 개요	1
1-2. 연구개발과제의 필요성	3
2. 연구수행내용 및 성과	6
2-1. 연구 개발 추진 전략·방법 및 추진체계	6
2-2. 연구수행내용 및 결과	11
2-3. 통합 시스템 현장검증 내용 및 결과	69
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	87
3-1. 목표 달성도	87
3-2. 관련 분야 기여도	90
4. 연구개발성과의 활용 계획	95
붙임. 참고 문헌	
별첨. 주관기관의 자체평가의견서	

1. 연구개발과제의 개요

1-1. 연구개발과제의 개요

○ 본 연구는 무인검사장비 기반 교량 구조물 신속진단 및 평가기술 개발을 최종목표로 한다.

- 본 연구과제의 목표달성을 위하여, 첨단계측장비를 탑재하고 구조물의 외부를 용이하게 진단할 수 있도록 기존 무인검사 장비를 보완 및 개정하여 무인검사장비를 개발하고, 무인검사장비의 운용, 원격 통제를 위한 지상관제 장비를 개발함
- 무인검사장비에 탑재된 첨단계측장비(RGB 영상, 열화상 카메라 등 이중영상장비 기반)를 통하여 검사인력이 접근하기 어려운 위치를 포함하여 교량 외부를 비접촉식으로 검사할 수 있는 상태검사 및 획득한 데이터를 활용하여 손상을 정량화하는 기술을 개발함
- 무인검사장비를 통해 계측/수집된 다양한 데이터를 저장, 처리가 가능한 현 BMS 시스템과 연계하며, 계측정보를 맵핑하고 외관조사망도로 가시화하는 기술을 개발함
- 최종적으로 무인검사장비로부터 획득한 데이터와 기존 BMS 연계를 통해 교량 상태등급을 산정함으로써, 보다 효과적으로 교량의 상태를 평가하고 이를 기반으로 하는 교량 유지관리 운영체계를 구축함



연구개발 최종 목표
(단, 지상 관제 차량 개발은 연구범위에 포함되지 않음)

○ (CTE1) 교량 외부 외관조사를 위한 무인검사장비 개발

- CTE 1에서는 교량의 외부 외관조사를 위한 무인검사장비 개발에 관한 연구로써, 교량의 외부 조사용 무인검사장비를 개발하고 무인검사장비의 자율운행을 위한 플랫폼을 개발함
- 보다 용이한 교량 외관상태 진단을 위해 무인체가 갖추어야 할 필요요건을 도출하고, 이를 만족시킬 수 있는 교량 외부 검사용 무인체를 기존 무인체 기술 개선을 통해 확보함
 - 교량 외부 외관검사를 위한 무인검사장비 개발
 - 교량 외부 환경에서의 자율운동 플랫폼 개발

○ (CTE2) 무인검사장비의 운영 및 원격제어 기술 개발

- CTE 2에서는 무인검사장비의 운영과 원격제어 기술에 관한 연구를 수행하며, 무인검사장비의 운영 및 원격통제가 가능한 지상관제시스템을 개발하고 무인검사장비를 운영하기 위한 플랫폼을 개발함
 - 무인검사장비의 통합 운용, 원격 제어가 가능한 지상관제 장치 개발
 - 무인검사장비 운영 플랫폼 개발(단, 지상 관제 차량 개발은 연구범위에 포함되지 않음)

○ (CTE3) 이종영상 데이터 융합 기반 교량 비접촉식 상태검사 기술 개발

- CTE 3에서는 RGB 영상, 열화상 카메라 등 다양한 영상 장비를 융복합하여 기존 방법보다 성능이 향상된 교량 비접촉식 상태 진단 기술을 개발함
- 딥러닝 기술을 이용하여 손상부위를 자동 탐지하는 기술을 접목함으로써, 강교량과 콘크리트교량에 대한 외부상태를 효율적으로 진단하고 정량화함
 - 강재표면 도막두께 및 부식 정량화 기술 개발
 - 강재 및 콘크리트 균열 정량화 및 볼트연결부 손상 진단 기술 개발
 - 콘크리트 균열 정량화 기술 개발
 - 콘크리트 백태, 박락 정량화 기술 개발

○ (CTE4) 무인검사장비 수집데이터를 이용한 교량의 신속한 외관상태 평가 기술 개발

- CTE 4에서는 무인검사장비를 통해 계측된 데이터의 수집, 처리 및 분석을 위한 플랫폼을 개발하고 계측된 데이터의 가시화 기술을 개발함
- 최종적으로는 계측 데이터와 교량 BMS와의 연계를 통해 교량의 상태등급을 산정할 뿐만 아니라, 무인검사장비 기반 구조물 유지관리 운영 체계를 정립함
 - 무인검사장비를 이용한 사용자 기반 교량관리 시스템 개발
 - 무인검사장비 측정정보 기반 외관조사망도 표출 기술 개발
 - 무인검사장비 계측 데이터를 활용한 성능중심평가 방식 기반 내구성 요소 평가 기술 개발
 - 무인검사장비 수집 데이터와 BMS DB 연계 교량 상태등급 산정 기술 개발
 - 무인검사장비에서 수집된 데이터, 영상, 결과의 통합 관리 코드 개발
 - 교량 안전점검 등을 위한 무인검사장비 활용 가이드라인 개발

1-2. 연구개발과제의 필요성

가. 연구 개발의 필요성

- 최근 연이은 대규모 안전사고로 인하여 안전 관리의 중요성에 대한 국민들의 의식이 향상되고 있음. 대형 구조물의 붕괴는 인명피해 뿐만 아니라 수많은 경제적 피해를 야기하기 때문에 이를 예방하는 것이 중요함.
- 구조물 붕괴와 이로 인한 안전사고를 사전에 방지하기 위해 구조물 진단과 유지관리의 중요성이 증가하고 있음.
- 기존의 안전진단 및 유지관리는 전문 인력이 육안으로 또는 비파괴 검사 장비를 활용하여 수행하기에 진단 결과에 대한 신뢰도가 낮고, 내·외부의 효율적인 검사가 어려우며, 시간과 비용이 많이 소요된다는 한계점을 가지고 있기 때문에 구조물의 효율적인 검사와 유지관리를 위한 기술 개발이 필요함.

1) 사회적 필요성

- 경주 마우나 리조트 붕괴, 부산 남북항 대교 연결 고가도로 붕괴등과 같은 연이은 구조물 사고 발생으로 인해 안전성에 대한 국민들의 부정적 시각과 낮은 신뢰감이 팽배하게 자리 잡고 있음. 국민 안전 의식도는 과거에 비해 향상되었으나 개선여지가 많으며, 국토교통과학기술진흥원의 자료에 따르면 한국의 시설물 안전 및 유지관리 기술 수준은 최고기술보유국 대비 79.2%에 불과함.



(a) 성수대교 붕괴 (1993)



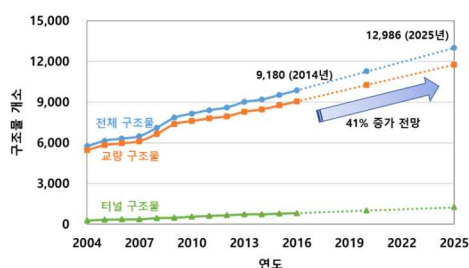
(b) 부산 남북항대교 연결도로 붕괴 (2013)



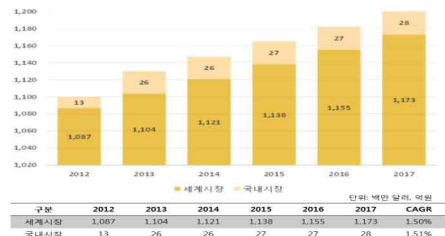
(c) 경주 마우나 리조트 붕괴 (2014)

구조물 붕괴로 인한 대형 사고 사례

- 국내 구조물의 전체 수량은 2014년 9,180개소에서 2025년에 지금보다 3,142개소 (41%) 증가한 12,986개소가 될 것으로 전망되며 이들의 안전등급은 현재 대부분 경미한 손상이 있으나 양호한 상태를 뜻하는 B등급 이상이나 보수가 필요한 C등급 구조물이 전체 9,180개소 중 178개소(1.9%) 정도 상존하고 있음.
- 최근 10년간 관리수량이 1.6배 증가하였고, 제설제 사용 증가로 구조물 노화가 점점 더 가속화되고 있어 높은 관심이 요구되는 B, C등급의 구조물이 큰 폭으로 증가될 것으로 예상됨.
- 유지관리가 필요한 구조물의 수량이 증가하고 있는 반면 구조물 유지관리 검사를 수행 할 수 있는 인력의 수는 점차 감소하고 있는 추세임. 검사인력 1명이 점검을 담당해야 하는 구조물의 숫자는 약 25개로 미국 미네소타주의 19개에 비하여 약 30% 가량 많은 수치를 보이고 있음.
- 구조물 유지관리 업종이 3D업종으로 인식되면서 젊은층의 기피가 심각하고 인력의 평균연령도 꾸준히 증가하고 있음. 구조물 유지관리 인력의 부족으로 인하여 효율적인 구조물 유지관리 방안 마련이 필요한 실정임.



국내 구조물 수량의 증가 추세 (한국도로공사, 2014)



출처: Internal Primary Research, Economist Intelligence Unit (www.eiu.com), Business Monitor International (www.bmionline.com), Deloitte (www.deloitte.com), Frost & Sullivan (www.frost.com), Marketline Business Research (www.marketline.com), Woodward Publishing Ltd (www.woodwardpublishing.com), Visiongain (www.visiongain.com), Gartner Technology Research (www.gartner.com)

무인체기술 국내외 시장 규모 변화

2) 경제적 필요성

- 준공 후 30년 이상 된 노후화 구조물은 2014년 239개소에서 2025년에는 7배 증가한 1,681개가 될 것으로 전망되고 있음. 최근 10년간 관리수량이 1.6배 증가하였고 구조물 노후화가 가속되고 있는 상황에서 구조물 안전진단에 관심이 요구되는 B, C등급의 구조물이 큰 폭으로 증가될 것으로 예상됨.
- 노후화 구조물의 증가에 따라 구조물들에 대한 점검, 진단 및 유지관리 비용역시 증가할 것으로 예상됨. 구조물의 유지관리 비용은 2014년 1,119억원에서 2020년에는 2,461억원으로 증가할 것으로 예상되며 점검 및 진단에 소요되는 비용이 3배 가까이 증가할 것으로 예상되고 있음.
- 구조물의 유지관리 비용이 크게 증가할 것으로 예상되는 가운데 우리나라의 건설투자 총액 대비 SOC 유지관리 투자율은 14.6%로 선진국(미국 30%, 캐나다 35%, 이탈리아 50%)의 절반에도 못 미치고 있는 수준임.
- 하지만 우리나라도 점차 선진국 수준으로 유지관리 비중이 점차 증가하고 있으며, 정부와 지방자치단체 등 주요 관리주체들이 SOC 시설물의 안전 및 유지관리 업무를 외부기관에 위탁하는 추세를 보이고 있음.
- 시설물 안전과 효율적 사용, 위탁기관의 관리 등을 위한 정책수립과 안전 및 유지관리 기준과 지침의 개발 등의 연구개발 기능에 보다 치중하는 방향으로 시장이 변화될 것으로 예상되고 있음.
- 구조물 유지관리에 소요되는 비용이 증가함에 따라 구조물의 효율적인 진단, 평가를 위한 기술 개발이 이루어지고 있음. 구조물의 효율적인 진단 방안으로 무인체 기반의 안전진단 기술이 주목받고 있으며 이에 따라 시장규모도 점차 확대되고 있음.

3) 정책적 필요성

- 미국, 일본 등의 선진국에서는 사회기반시설 노후화로 인한 불안감이 증가하고 있는 실정임. 특히 미국의 경우, 시설물 노후화 대비 실패로 인해, 보수와 개량을 위한 재원이 부족할 뿐 아니라 유지, 보수 및 개선을 위한 향상된 기술도 부족한 실정임. 이로 인해 시설물의 전반적인 보수, 개량을 위해서는 천문학적인 자금이 필요한 것으로 파악되었음. 이러한 선진국의 사례를 통해 사회기반시설의 지속적인 안전점검 및 진단이 매우 중요함을 파악할 수 있었음.
- 국토교통부에서는 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침을 통하여 안전점검 및 정밀안전진단의 실시방법·절차 등에 관한 필요사항을 시설물별로 보다 상세히 제시하였음. 안전진단 실시요령을 정하여 시설물에 내재되어 있는 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·보전하기 위한 유지관리를 체계를 제시하고 있으며 시설물 안전 및 유지관리 기본계획을 통하여 종합적인 시설안전을 구현해가고 SOC의 장수명화와 효율적인 활용을 유도하고 있음.
- 주요 선진국에서는 안전진단분야의 시장규모와 산업적 활용이 증대함에 따라 첨단 비파괴검사기술개발에 주력하고 있으며, 미국, 일본, 유럽 등 산업계와 학계를 중심으로 IT, BT 등 첨단융합형 원천/응용기술 및 검사 기법개발과 산업적 활용이 매우 활발하게 진행되고 있음.
- 미국, 유럽 등 선진국들은 NDT 개념에 입각한 R&D 계획·투자 및 전문 연구소를 설립하는 등 국가적 차원의 지원을 확대하고 있음. 미국은 I/UCRP Program과 NDE Center, 독일에서는 전문비파괴연구소가 있으며, 영국은 RCNDE, 프랑스는 NDE Group 등의 전문 연구소 및 프로그램이 활용되고 있음. 이외에도 정부지원 또는 독자적으로 규격개발, 기술지원, 검사기술, 인력양성 등 다양한 표준기반을 구축하고 있음.

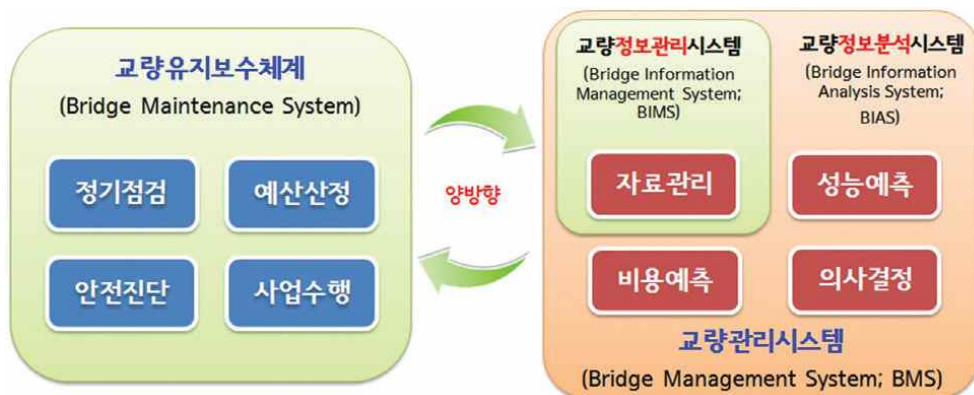
4) 기술적 필요성

- 군사 목적으로 개발된 무인체 기술이 대중화 되면서 다양한 분야에 적용되고 있음. 특히 최근에는 대형 구조물의 유지관리 목적으로 사용되면서 그에 따른 핵심 기술 개발이 필요성이 증가하고 있음. 국내 무인체 기술의 경우 국산화는 상당히 진행되었으나 무인체가 교량 안전진단과 같은 특수한 목적으로 활용하기 위해서는 정보통신 기술과 융합된 관련 핵심 기술 개발이 필수적임.

- 교량 형식이 다양해지고 수가 증가함에 따라 무인체를 활용한 진단 기술뿐만 아니라 계측 데이터를 분석하고 효율적으로 관리하기 위한 기술 개발의 필요성이 증가하고 있음. 예방적 차원의 유지관리를 통해 시설물의 성능과 비용의 효율성, 이용자의 만족도를 동시에 향상시키기 위하여 다양한 분석 방법과 기법, 시스템 등이 연구되고 있음.
- 예방적 유지관리의 핵심은 예방적 조치, 빈번한 점검 및 즉각적인 조치, 정확한 이력 데이터의 확보가 필요함. BMS는 예방적 관리가 가능하도록 축적된 자료의 분석을 통해 유지관리 대안 제시, 조치에 따른 결과의 피드백이 가능한 순환적 체계를 적극적으로 지원함.
- 기존의 BMS 데이터와 지속적인 유지관리를 위해 주기적으로 계측되는 데이터를 적극 활용한다면 관리주체의 합리적인 의사결정이 가능하며 신뢰성 높은 교량 성능평가 결과를 얻을 수가 있음. 노후화교량이 폭발적으로 증가하고 있는 추세를 감안할 때 효율적이며 신뢰성 높은 교량 유지관리 시스템 구축이 필요함.

표. 무인체 핵심 개발 기술

무인기 기술	상세 내용
항공 무인이동시스템 통신/항법/교통관리 기술	• 항공 무인이동시스템의 국가공역으로의 안전한 통합을 위해 필요한 고신뢰도 무인기 제어링크 기술 • 항재밍/항기만 항법 및 대체항법 기술 • 차세대 항공교통관리와의 통합 및 차세대 항공교통관리 기술
항공 무인이동체 제어 및 탐지/회피 기술	• 항공 무인이동체의 이착륙과 비행제어 및 자율화 향상 기술 • 안전한 비행과 임무 수행을 위해 다른 비행체나 물체 등의 위험요소를 탐지하고 충돌을 회피하는 탐지회피 기술
항공 무인이동시스템 센서 기술	• 항공 무인이동체의 안전한 운항 지원 및 임무 수행을 위한 센서 기술
항공 무인이동시스템 S/W 및 응용 기술	• 항공 무인이동체의 제어 및 임무 수행을 위한 고신뢰 실시간 OS와 interoperability 지원 개방형 S/W 플랫폼 및 표준 인터페이스 기술 • 무인이동체가 수행하게 될 특정한 임무 수행을 위해 필요한 탑재체 기술 및 빅 데이터 처리 등 응용 기술
항공 무인이동체 플랫폼 기술	• 다기능 초경량 소재 및 구조물 기술 • 무인기 actuator 및 기계/전기 기술 • 다학제 설계 기술 • 설계 자동화 기술
항공 무인이동체 동력원 기술	• 친환경적 고성능 · 고효율 동력원 기술



체계적인 유지관리 시스템의 필요성

2. 연구수행내용 및 성과

2-1. 연구 개발 추진 전략·방법 및 추진체계

가. 단계별 연구개발 추진 현황

- 연구개발 단계를 기반기술 확보를 위한 준비 단계, 핵심 요소기술의 고도화를 수행하는 성장 단계, 각 요소기술들의 통합 시스템 구축을 위한 성숙 단계, 시스템의 현장적용 및 실용화를 위한 완성 단계로 설정하였음
- 1차년도에 해당하는 준비 단계에서는 기반기술 확보를 위하여 기술 개발에 기초가 되는 기반 장비 및 평가 분석 프로그램 구축을 수행하고 선행 연구 성과를 활용하여 시스템 설계를 위한 기초 실험을 추진함
- 2차년도에 해당하는 성장 단계에서는 1차년도에 확보된 기반 기술을 통하여 핵심요소기술들을 고도화하여 성능을 높이는 연구를 수행함
- 3차년도에 해당하는 성숙 단계에서는 핵심 요소 기술을 완성시키고, 각 요소 기술들을 통합하여 현장 검증 및 고도화하는 연구를 수행함
- 4차년도에 해당하는 완성 단계에서는 최종적으로 구축된 시스템의 테스트베드 적용을 통하여 시스템 검증을 구행하고 통합 시스템의 운영지침, 매뉴얼 구축을 통하여 실용화 방안을 마련함. 최종 시스템을 통하여 교량 유지관리 및 전략을 수립함



연구추진 전략

■ 1차년도

1. 자율운행 플랫폼 기반기술 확보 및 비행 데이터 수집(분석)

- GPS/INS/SLAM 융합 위치추정 알고리즘 설계 및 개발
- 자율운행 플랫폼을 이용한 대형 구조물 3D맵 작성 알고리즘 개발
- 비행기체 ROC 분석 및 무인검사체계 개념개발, 성능 요구조건에 부합한 비행체 설계



2. 정적상태에서의 손상 탐지 요소기술 개발 및 검증

- 도장 및 부식 계측 시스템 개발 및 예비 실험 수행, 손상 탐지를 위한 영상 처리 알고리즘 개발
- 이종 영상을 활용한 계측 시스템 구축 및 균열 검출 알고리즘 개발 : 피로 균열 시편 제작 및 실내 실험 수행
- CCD/IR 영상 계측 시스템 구축 및 영상 융합 알고리즘 개발
- 초분광 영상 관련 장비 선정 및 진단 기법 개발



3. 기존 교량 점검 시스템 및 지침, 선행연구 사례조사

- 사용자 기반 교량 검사 관리체계 개발을 위한 데이터 모델 개발 및 BMS 데이터 연동 기술 개발
- 측정 데이터의 실시간 가시화를 위한 요소 기술 및 선진 기술 분석
- 국내 교량 시설물 유지 관리 체계 조사 및 분석, 무인검사장비 수집 데이터의 통합 관리코드 개발

■ 2차년도

1. 자율운행 핵심 요소기술 및 무인검사장비 시제품 제작/개발

- 자율운행 플랫폼의 고정밀 기동을 위한 위치 추정 알고리즘 개발
- 자율운행 플랫폼의 3차원 경로 생성 알고리즘 고도화 및 경로 추종 알고리즘 개발
- 교량 외관조사용 근거리 무인검사장비 시제품 및 원격제어 시스템 개발



2. 동적상태에서의 손상 탐지 요소기술 개발 및 실내 검증

- 도막 두께 및 부식 깊이 탐지 알고리즘 최적화 및 동적 상태에서의 검증 수행
- 강재 및 콘크리트 균열, 볼트 연결부 손상 탐지 알고리즘 최적화 및 동적 상태에서의 검증 수행

- CCD/IR 하이브리드 영상 정합 알고리즘 및 동적 영상 보정 알고리즘 개발
- 딥러닝 기반의 자동화 균열 평가 알고리즘 개발 및 선행 평가
- 초분광영상 및 2D 영상의 융합을 통한 백태, 박락 정량화 기술 개발



3. 테스트베드(T/B) 구축 및 교량 안전 검사 관리 시스템 구축

- T/B 후보 교량 선정에 위한 현장 예비실험 수행
- 측정정보 기반 교량 외관조사망도 표출을 위한 요소기술 개발
- 무인검사장비 수집데이터와 BMS DB 연계 알고리즘에 대한 프레임워크 설계

■ 3차년도

1. 교량 점검용 무인검사시스템 통합 수행

- 자율 운행 플랫폼 요소기술 및 교량 진단용 무인기체(UAV)의 통합 수행
- 이중영상 기반 무인진단장비의 소형화 및 진단장비용 집벌 설계, 제작을 통한 무인검사장비 시제품 제작
- 고해상도 영상 실시간 취득, 처리 및 저장을 위한 통합처리시스템 개발



2. 요소기술 현장 검증 (무인기 탑재 또는 유사 환경)

- 무인체 탑재 환경에서 손상 탐지 및 정량화 기술 검증
- Vision/IR 하이브리드 이동식 스캐닝 시스템을 이용한 균열 탐지 및 평가 기술 현장 적용
- 딥러닝 모델을 이용한 콘크리트 균열의 위치탐지 및 평가 기술 현장 적용
- 딥러닝 모델을 이용한 콘크리트 백태의 위치탐지 및 면적율 산정 기술 현장 적용



3. 교량 진단 및 평가 프로세스 개발

- 사용자 기반의 교량 관리 시스템 개발 (어플리케이션 S/W 등록)
- 측정정보 기반의 외관조사망도 표출 기술 고도화 수행(S/W 등록)
- 무인검사장비 기반 교량 상태 등급 산정 프로그램 (U-BMS) 개발
- 무인체 기반 통합 내구성요소 (탄산화, 염해) 평가 알고리즘 및 프로세스 개발

■ 4차년도

1. 교량 점검용 무인검사시스템 통합 수행 : T/B 현장 검증

- 근접식 통합기체(UAV + 자율운행 플랫폼) 활용 테스트베드 교량(일반, 특수) 현장 검증 수행
- 영상 실시간 취득, 처리 및 저장을 위한 통합처리시스템을 무인검사장비에 적용/검증
- 교량 점검 시나리오에 따른 T/B 교량 대상 현장 실험 수행



2. 통합기술 현장 검증 (무인검사장비 탑재)

- 근접식 통합기체 기반 Vision 영상을 활용한 균열 손상 탐지 및 정량화 기술 검증
- 부착식 통합기체 기반 Vision/IR 하이브리드 이동식 스캐닝 시스템을 이용한 균열 탐지 및 평가 기술 현장 적용
- 딥러닝 모델을 이용한 손상 분류 및 탐지, 평가 기술 현장적용



3. 무인검사장비 활용 점검 매뉴얼/운영지침 확립, 교량 유지관리 전략 수립

- 사용자 기반의 교량 관리 시스템 개선 및 고도화, 기존 BMS 데이터와의 연동
- 무인검사장비 기반 교량 상태 등급 산정 프로그램 (U-BMS) 개선 및 고도화, 현장 적용
- 무인검사장비 활용 점검 매뉴얼 및 점검 시나리오 확립

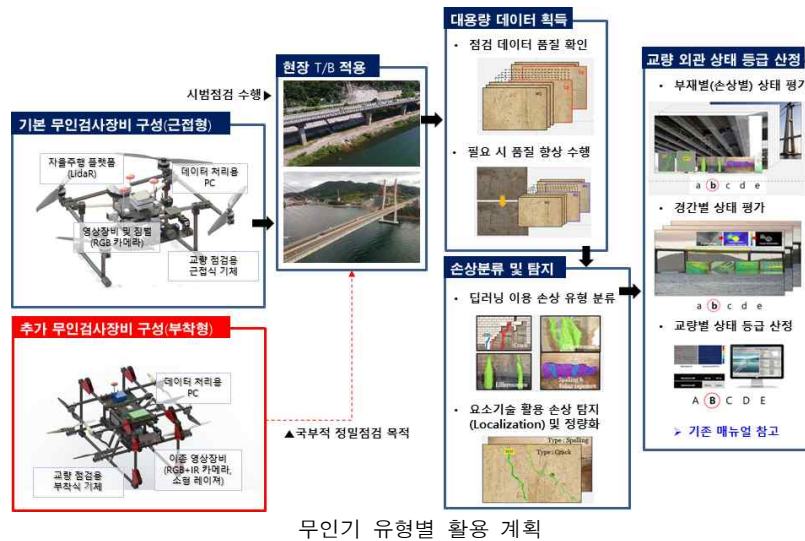
나. 연구개발 추진 및 활용 계획 수립

- 개발기술 적용 가능한 진단 및 평가 범위

무인검사장비 기술 적용이 가능한 교량 형식, 부재 및 손상 유형		
교량 형식	거더 형태가 단순한 단일 박스형 교량(강/콘크리트)	
검사 부재	상부구조(거더외부, 바닥판 하부) 및 하부구조(교각, 교대)	
손상 유형	강재	균열, 부식, 도막두께, 볼트연결부(볼트 풀림, 누락)
	콘크리트	균열, 백태 및 박락, 철근노출

- 무인기 유형별 탑재장비 및 세부 활용계획

무인기 유형	탑재영상장비	세부활용계획
근접형 무인검사기체	RGB 카메라	1. 사전 예비 비행 또는 대상 교량 주변 환경 조사시 활용 2. 교량 하부 등 GPS 음영지역 내의 교량 표면 손상에 대한 탐지 - 이미지 프로세싱 및 딥러닝 활용한 핵심 요소기술 개발 - 탐지가능 손상유형: 균열, 볼트손상, 백태 및 박락, 누수 등
부착형 무인검사기체	RGB 카메라	1. 대상 교량 주탑 상부에 대한 정밀 검사 시 활용 - 육안으로 식별 가능한 손상 탐지 목적
	RGB 카메라 +IR카메라 +레이저	1. 강재 교량 표면의 균열, 부식 및 도장두께 정밀 검사 시 활용 2. 콘크리트 표면의 미세균열 정밀 검사 시 활용



다. 개발기술 연계성 강화 전략 추진

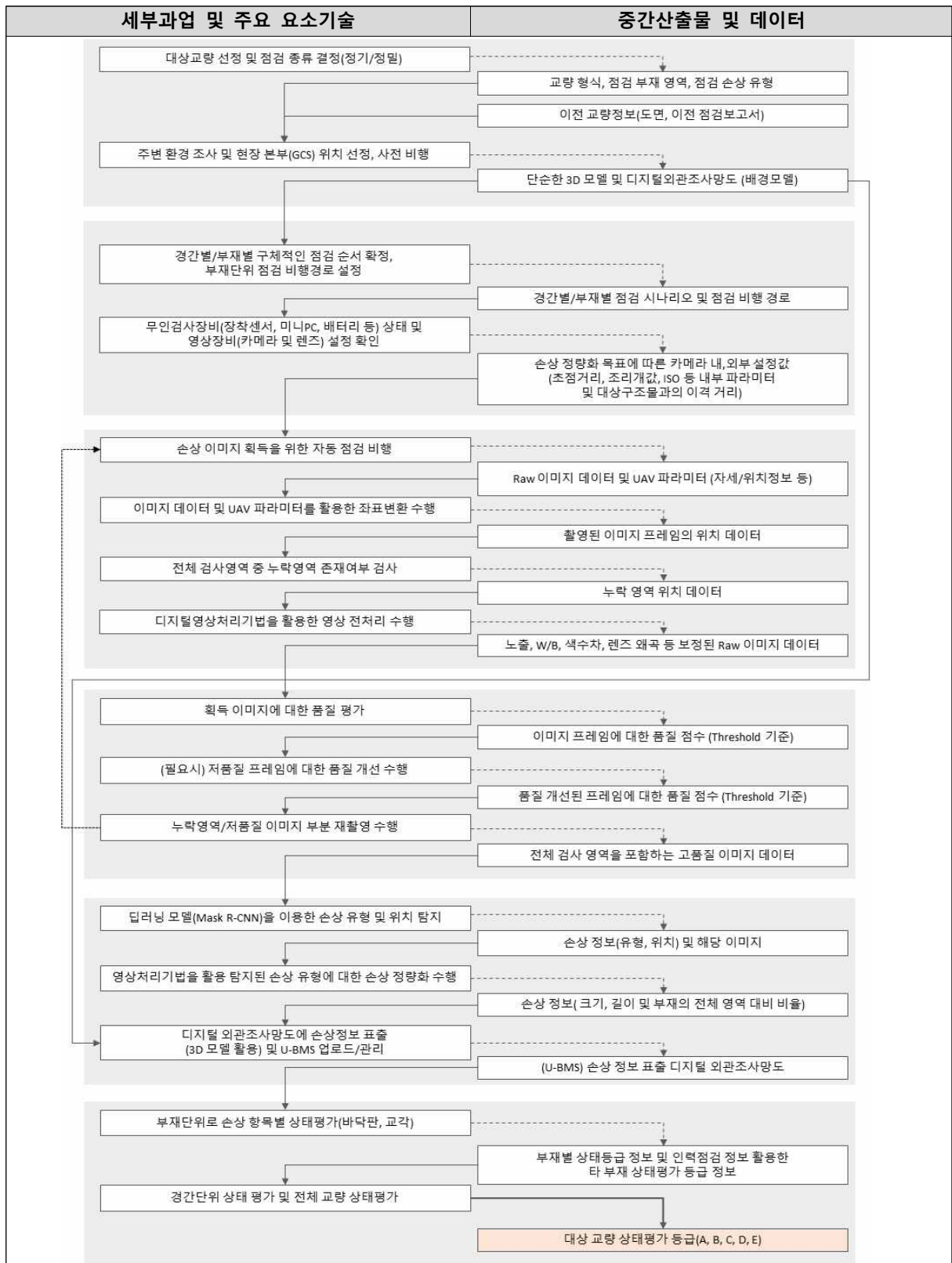
- 무인검사장비를 활용하여 교량의 신속진단을 수행하고 통합적인 유지관리 수행이라는 연구 개발의 최종목표를 성공적으로 달성하기 위해서는 각 세부기술개발뿐만 아니라 핵심기술 간의 연계가 필수적임



최종목표 달성을 위한 핵심요소기술별 연계 방안

라. 교량 검사용 무인기(UAV) 기반 교량 점검 시나리오(안)

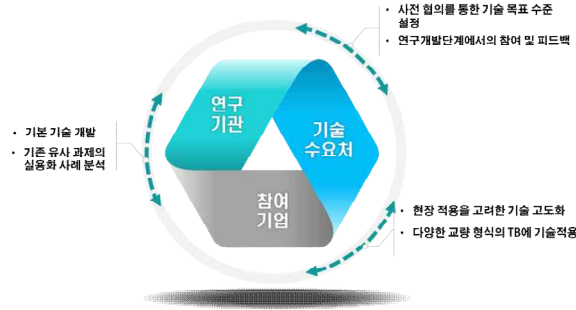
- 본 연구에서 개발예정인 주요 요소기술(CTE)이 반영된 업무 프로세스 및 단계별 중간산출물에 대한 정리는 아래와 같음.



- 각 세부 단계별 주요 내용은 별도 제출한 ‘무인검사장비 활용 가이드라인 및 매뉴얼’에 제시하였음.

마. 개발기술의 실용화 및 기술이전 추진 전략

- 최종 기술에 대한 수요를 가지고 있는 기관을 연구개발단계에서 적극 참여시킴으로써 현장 실무 조건에 적합하도록 맞춤형 기술개발을 수행하였음. 이를 위해 기술이전 업체의 수요(needs)를 최대한 반영하여 연구개발을 수행하였음.



개발 기술의 실용화 추진 전략

- 본 연구 과제를 통해 개발된 기술에 대한 기술이전 2건(실시계약 1건, 비영리기관 자체활용 1건)을 진행함

이전 기술명	무인항공기
기술개발기관	경북대학교 산학협력단(공동연구기관)
기술이전업체	(주)안전융합기술원(참여기업)
실용화방안	- 실제 기술 수요 업체인 (주)안전융합기술원과 사전 협의를 통한 기술 목표 수준을 설정하고 피드백을 통한 현장 맞춤형 기술 개발을 수행하였음 - 과제 종료 전 기술이전 실시계약을 수행하였으며, 계약기술을 이전함에 따라 기업체에서 운용하는 기술에 적용

활용 기술명	자율 비행 드론을 이용한 3차원 구조물 점검 기술
주관연구기관	한국과학기술원(건설 및 환경공학과, 정형조)
연구개발결과물 소유기관	한국과학기술원(전기 및 전자공학과, 명현)
활용기술 내용	- 본 과제의 개발 성과 중 ‘자율 비행 드론을 이용한 3차원 구조물 점검 기술’을 자체 활용하여, 신규개발 드론에 적용하고자 함 - 본 기술은 구조물 점검을 위한 자율 비행 드론 하드웨어 및 소프트웨어, SLAM 알고리즘 및 제어를 위한 소프트웨어 등이 포함되며, 구조물 점검에 특화된 신규 드론개발에 자체 활용할 예정임 - 비영리기관의 자체활용을 위한 기술활용보고서를 제출함

통상실시권 계약서

경북대학교 산학협력단(이하 "생체대"라 한다)과 주체로서 인공물합기술원(이하 "회사"라 한다)는 "생체대"가 보유한 "무인항공기"에 관한 기술을 공적목적 인공물합기술원(이하 "기술수요처"라 한다)으로부터 "기술이전계약"과 함께 "회사"에게 이전하고자 다음과 같이 계약을 체결한다.

제1조(목적)

본 계약은 "생체대"가 보유하고 있는 "생체대"에 대하여 "회사"에게 종량 생산권을 부여하고, "회사"가 그에 대한 실시권을 지급함에 있어 당사자 간의 권리와 의무를 규정하는 것을 그 목적으로 한다.

제2조(용어의 정의)

① "생체대"라 함은 "생체대"가 계약 체결일 현재 출원하여 보유중인 "생체대"에 대한 권리를 말한다.

② "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

③ "생체대"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

④ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

⑤ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

⑥ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

⑦ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

⑧ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

⑨ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

⑩ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

⑪ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

⑫ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

⑬ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

⑭ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

⑮ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

⑯ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

⑰ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

⑱ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

⑲ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

⑳ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

㉑ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

㉒ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

㉓ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

㉔ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

㉕ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

㉖ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

㉗ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

㉘ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

㉙ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

㉚ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

㉛ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

㉜ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

㉝ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

㉞ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

㉟ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

㊱ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

㊲ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

㊳ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

㊴ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

㊵ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

㊶ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

㊷ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

㊸ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

㊹ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

㊺ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

㊻ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

㊼ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

㊽ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

㊾ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

㊿ "기술수요처"라 함은 "생체대"를 사용하여 "기술수요처"에 대한 권리를 행사할 수 있는 자를 말한다.

통상실시권 계약서

기술이전 과제실적 확인서
(기술이전계약 보고서)

1. 연구개발과제 현황

연구기관명	연구기관소재지	연구기관대표자	연구기관대표자직책	연구기관대표자연락처
한국과학기술원	서울특별시	정형조	교수	02-516-1000

2. 계약기술 정보

계약기술명	계약기술분류	계약기술구분	계약기술구분	계약기술구분
자율 비행 드론을 이용한 3차원 구조물 점검 기술	기계공학	기계공학	기계공학	기계공학

본인이 기술이전 계약서는 정부지원사업에 포함되는 기술이전 계약서임을 확인합니다.

2019년 12월 5일

기술이전 계약서 - 총 1면

경북대학교 산학협력단 귀하

기술이전 과제실적 확인서

기술활용 보고서(비영리기관 자체활용)

이전 기술명	기술수요처명	기술수요처소재지	기술수요처대표자	기술수요처대표자직책	기술수요처대표자연락처
자율 비행 드론을 이용한 3차원 구조물 점검 기술	한국과학기술원	서울특별시	정형조	교수	02-516-1000

본인이 기술이전 계약서는 정부지원사업에 포함되는 기술이전 계약서임을 확인합니다.

2019년 12월 5일

기술이전 계약서 - 총 1면

경북대학교 산학협력단 귀하

기술활용 보고서

2-2. 연구수행내용 및 결과

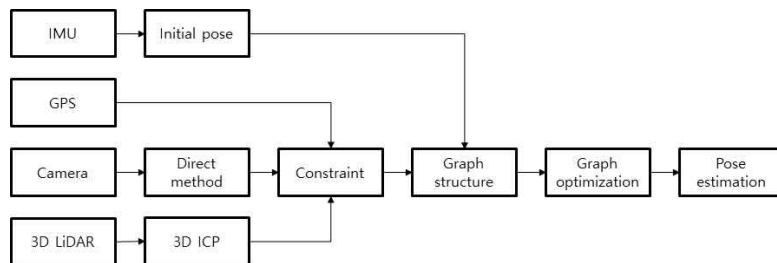
(CTE1-1) 자율운행 플랫폼 요소 기술 개발 (KAIST)

성과 기준					
질적성과지표		목표치	달성치	측정방법	검증방법
①	무인체의위치오차	0.5m 이내	0.5 m	무인체의 구조물 접근 거리 측정 및 오차 범위 계산	RTK-GPS 위치와, 알고리즘으로부터 추정 위치 비교
②	3차원 최단 경로 오차율	5% 이내	1.4%	개발 알고리즘 경로와 ground truth 간 백분율 차이	알고리즘으로부터 생성된 경로와 최단 경로 비교
③	자율운행 시스템 구동 작업성공률	95% 이상	95%	통합 자율운행 시스템 구동에 의한 작업 성공 확률 계산	알고리즘 전체 수행 횟수 대비, 알고리즘 성능 횟수 비교

(1) 그래프 구조를 이용한 위치 추정 알고리즘 설계

■ 알고리즘 기초 설계 및 실험 환경 구성

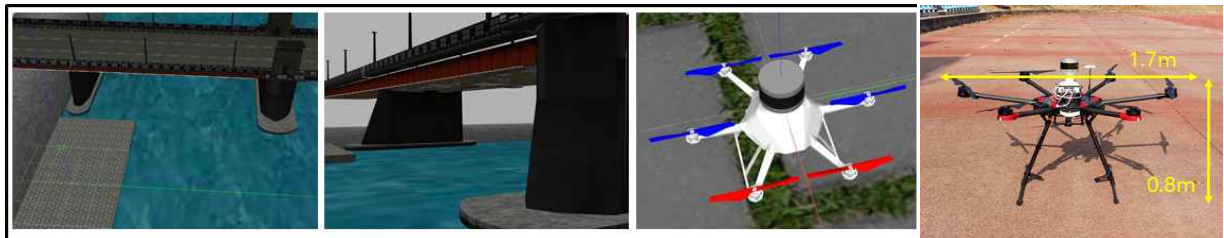
- IMU 정보로부터 초기 위치 (node) 구성 후, GPS, Camera, 3D LiDAR 정보로부터 각 노드간의 위치 구속 조건 (constraint) 생성
- 위치와 구속 조건을 이용하여 graph structure 생성 후, 최적화 기법을 통해 최종 위치 추정



위치 추정 알고리즘 흐름도

■ 알고리즘 수행을 위한 시뮬레이션 환경 및 시스템 구성

- 알고리즘 검증을 위해 ROS (Robot Operating System) Gazebo 시뮬레이터를 이용한 무인체의 시뮬레이션 환경 구성
- 시뮬레이션 환경을 통해 제안된 알고리즘의 성능을 평가하고 빠른 개발 진행
- 교량과 주변 환경을 구성하여 비행체가 교량을 인식하고 환경을 구성할 수 있도록 함
- Velodyne, 카메라, 비행체를 결합하여 센서들의 데이터가 획득 가능한 환경에서 시뮬레이션을 구동할 수 있도록 함



시뮬레이션 환경 구성

시스템 구성

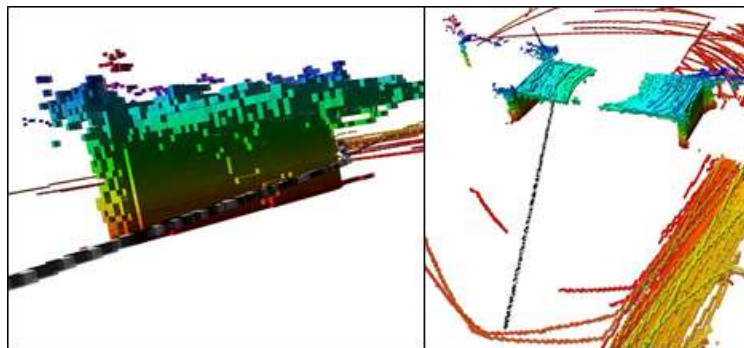
- 빠른 알고리즘 개발을 위해 상용 무인체를 이용하여 시스템을 구성함
- 시스템 구성은 다음과 같음
: UAV platform (DJI Matrice 600), 3D LiDAR (Velodyne VLP-16), RGB camera (PointGrey Flea3), mini PC (intel NUC i7)

■ 위치 추정 알고리즘 개발

- 카메라 이미지 기반의 위치 추정 알고리즘
- Visual odometry 기반 단일 카메라를 이용한 위치 추정 알고리즘
- RTK-GPS (ground-truth)와 위치 추정 결과 값의 비교 결과 (0.5m)의 오차를 보임

■ 3차원 경로 생성을 위한 알고리즘 개발

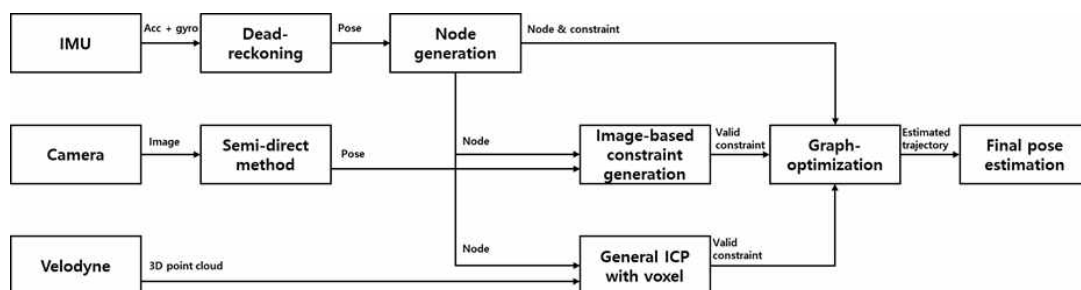
- 3차원 환경에서의 경로 생성의 속도 및 계산 능력을 고려하여 2.5차원 (2차원 + 높이)으로 환산하여 경로를 생성하는 알고리즘 개발
- 2차원에서의 경로 생성을 위해 목표지점과 출발지점 사이의 높이 (무인체의 크기 고려)의 맵만 2차원에 사영하고 나머지 지역은 고려하지 않도록 함
- 교량이라는 환경 상 비교적 맵이 크게 나오게 되고, 맵의 정밀도를 줄이지 않을수록 정확한 경로 생성이 가능하며, 이런 조건에서도 경로 생성 속도 및 연산량을 유지하기 위해 2차원으로 사영된 맵에서 일반 A* 경로 계획이 아닌 Multi-resolution A* 경로 계획 알고리즘을 구현
- 2차원으로 사영된 맵에서의 경로 생성 결과의 전체 길이를 구한 후, 출발 지점과 목표 지점의 높이 차이와 출발점에서 경로의 해당 위치까지의 거리를 구하여 경로 위의 위치들의 높이 값 계산
- 시뮬레이션 상에서 경로 생성 알고리즘을 통해 얻어진 결과를 ground truth와의 pixel 비교를 통해 오차를 계산 결과 1.4%의 오차를 보임



3차원으로 변환된 경로 계획 결과

(2) 전반적인 위치 추정 알고리즘 구조 변경

- 카메라 이미지 기반의 위치 인식의 경우, 간헐적으로 위치 정보가 발산하는 경향이 있음
- 3D Point cloud 기반의 ICP (Iterative Closest Point) 정합의 경우도 포인트 수가 부족하거나 무인체의 위치가 급격하게 변할 경우 위치 정보가 발산하는 경향이 있음
- 따라서 카메라와 3D LiDAR를 이용한 위치 추정 결과와 dead-reckoning을 이용한 위치 추정 결과를 각각 비교하여 constraint 유효성을 확인하고 graph-optimization을 수행함



위치 추정 알고리즘 흐름도

■ Graph-structure의 valid constraint 생성 방법

- Dead-reckoning 기법을 이용하여 graph structure의 node 및 연속적인 constraint 생성
- ICP 및 semi-direct method 기법을 통해 node 간 loop-closure constraint 생성
- 만약 icp 및 semi-direct method가 실패할 경우, constraint 미생성
- ICP 및 semi-ditect method를 이용하여 node간 위치 결과가 추정되더라도 dead-reckoning과 비교하여 발산할 경우, constraint 미생성

■ Generalized-ICP를 이용한 강인한 위치 추정

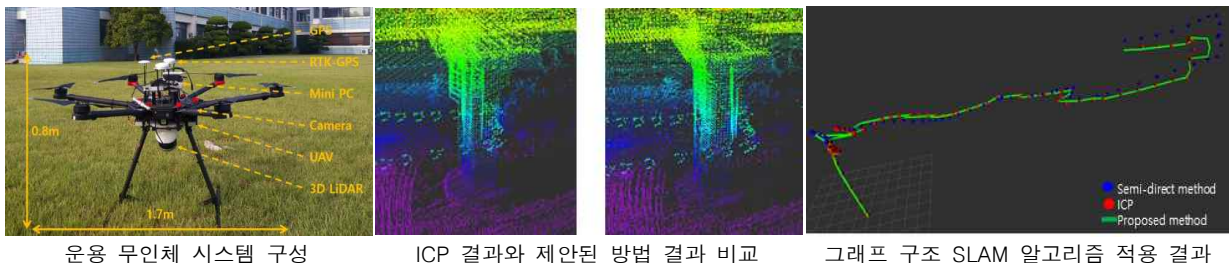
- Standard ICP (point-to-point), point-to-plane ICP의 경우 correspondence를 구할 때, 단순히 Euclidean distance에 따라 정합이 이루어지기 때문에 잘못된 정합이 발생할 수 있음
- Generalized-ICP는 정합 과정에서 local한 평면의 probabilistic model인 Gaussian distribution을 고려하여 기존 방법에 비해 강인한 정합이 가능함

■ Voxel (volum+pixel)을 이용한 ICP 알고리즘 가속화

- 3D point cloud에 대한 ICP의 computational complexity는 $O(n)$ 이므로 포인트의 수에 비례하여 연산 시간이 증가됨
- 3D point cloud의 voxel화를 통해 ICP matching 알고리즘 수행 시, 중첩된 point의 영향을 줄이고 ICP의 연산 시간을 단축시킴

■ 실제 등산교 데이터 기반 graph-based SLAM 알고리즘 적용

- RGB 카메라, 3D LiDAR, 무인체 자세 정보 (GPS 음역 지역으로 GPS 데이터 획득 불가)
- RTK-GPS (ground truth)와 위치 추정 결과 값의 비교



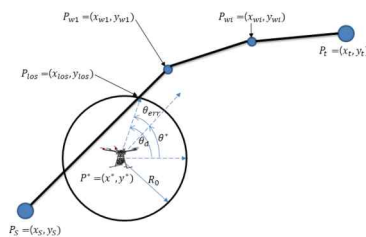
운용 무인체 시스템 구성

ICP 결과와 제안된 방법 결과 비교

그래프 구조 SLAM 알고리즘 적용 결과

■ LOS (Line-of-Sight) 기반의 비행 제어 알고리즘 개발

- 바람 등 외란에 대처하여 경로 추종을 위한 LOS guidance 알고리즘 적용



<LOS 기반의 경로 추종 및 무인체 컨트롤>

■ 자율 운행 플랫폼의 3차원 경로 생성 알고리즘 고도화

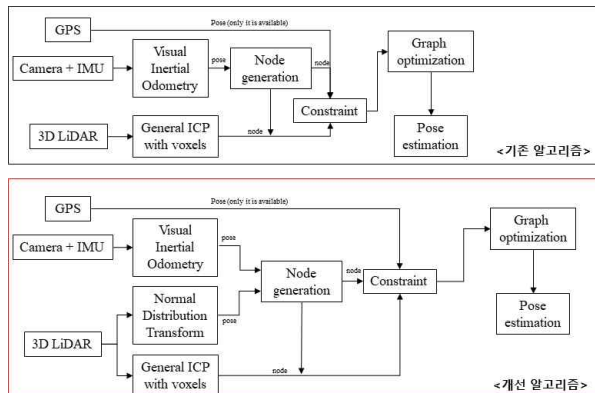
- 시뮬레이션 환경에서 테스트하였던 Multi-resolution A* 알고리즘을 실제 무인체에 적용 및 테스트
- 3D LiDAR로부터의 실시간 데이터를 기반으로 주변 장애물 등을 인식하여 실시간으로 안전한 경로를 재생성
- 아래 그림에서 초록색 원은 무인체 위치, 빨간색 원은 장애물 위치, 빨간선은 지나온 경로, 하늘색 선은 재생성된 경로를 나타냄
- 구조물과의 접촉 등으로 인한 추락을 최소화하기 위해 최적의 LOS guidance 파라미터와 구조물까지의 근접 거리 등을 설정
- 복잡한 장애물 발생 시에도 6% 정도의 최단 경로 오차를 발생



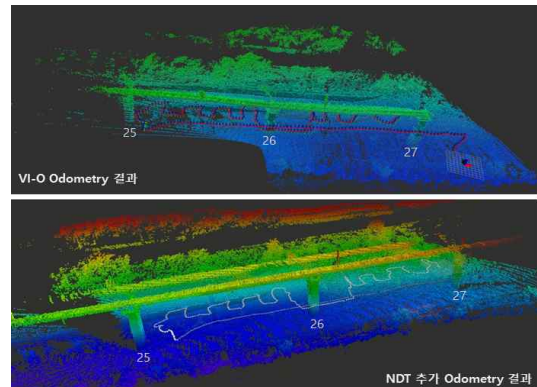
실시간 경로 재생성 및 장애물 회피

(3) 그래프 구조 고도화 및 주요 알고리즘 변경을 통한 위치 인식 알고리즘 개선

- 2차년도까지 위치 인식에 사용하였던 알고리즘은 기본 odometry 추출에 visual-inertial odometry (VI-0)를 사용하여 해당 결과를 그래프 구조의 노드 생성에 사용하였음
- 그러나 카메라 특성상 조도 변화에 강인하지 못하여 간헐적으로 특징점을 추출하지 못하여 추정값이 발산한다거나 오차가 커서 기본 노드 생성에 문제가 생기는 경우가 있었음
- 이를 개선하기 위해 그래프 구조에 LiDAR 기반 odometry (L0) 추가함
- VI-0와 더불어 local optimization 개념의 L0를 사용함으로써 기본 노드 생성에 안정성이 확보되었고 그로 인해 자율 비행 시스템도 고도화 및 안정화되었음
- 사용된 L0는 NDT (Normal distribution Transform)라는 알고리즘으로 3차원 포인트를 단일 크기의 cubic으로 나누고, 각 cubic에 포함된 포인트들을 이용하여 각각의 PDF (Probability Density Function)을 계산함. 계산된 PDF는 각 위치에서의 surface를 의미하게 되고, 이러한 surface들은 방향을 가지며 normal distribution에 의해 생성된 것이므로 smooth한 특징을 갖게됨.



기존 알고리즘과 개선된 알고리즘 비교

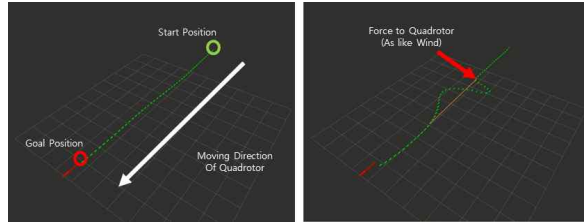


기존 알고리즘 결과와 개선된 알고리즘 결과 비교

- 위 3차원 point cloud map에서 알 수 있듯이 VI-0만을 odometry로 사용하여 그래프 구조를 돌린 결과는 교량의 하부면이나 기둥의 직선이 깔끔하게 그려지지 않고 곡선처럼 휘어서 획득됨
- 하지만 NDT가 추가된 구조는 교량의 하부면이나 기둥의 직선이 바르고 깔끔하게 표현됨

■ 강풍 (3~5m/s) 속 자율 비행 플랫폼 거동 분석

- 본 CTE1-1에서의 강풍 속 자율 운행 플랫폼 거동 분석은 강풍 속에서 자율 운행 플랫폼이 경로를 잘 따라가는지를 분석하는 것이 목표
- 즉, 아래 그림과 같이 바람의 영향에서 경로 추종에 이상이 없음을 테스트

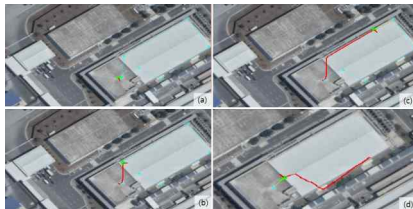


좌: 무풍 상황 경로 추종, 우: 강풍 상황에서의 경로 추종

- LOS (Line-of-Sight) 기반의 경로 추종 알고리즘을 사용하여 해당 알고리즘 적용 시 필요한 parameter들을 자율 운행 플랫폼의 안정성 및 교량 검사 커버리지 영역을 최대한 따라갈 수 있도록 설정
- 아래 그림은 1~4m/s의 바람이 예측하지 못하는 방향으로 부는 상황에서의 경로 추종 테스트 결과. 돌풍에 갑작스럽게 순간적으로 경로를 이탈하여도 다시 안전하게 원래 경로로 복귀하는 것을 확인

■ 센서 데이터 기반 실시간 시스템 오류 감시 프로그램 개발

- 실시간 센서 데이터 감시 프로그램을 제작하여 이상이 있을 시 사용자가 확인할 수 있도록 함
- 실시간 시스템 오류 (센서 통신 끊김, LTE 통신 끊김)들을 확인하고, 발생 시 사용자가 개입하여 원격조종을 통해 안전하게 복귀할 수 있도록 함



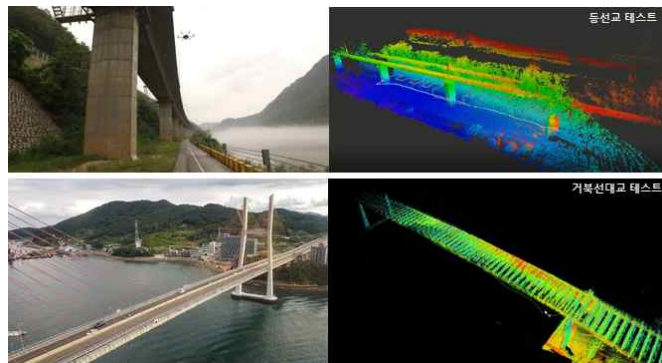
자율 운행 플랫폼의 경로 추종 테스트



실시간 오류 감시 시스템

■ 자율 운행 시스템 현장 테스트 진행

- 육지 교량 (강원 춘천시 등선교), 해상 교량 (여수시 거북선대교)에서 본 플랫폼으로 테스트 수 회 진행



현장 테스트 실험 결과

- CTE1-2에서 개발한 비행체와 시스템 통합 완료 및 현장 테스트 진행

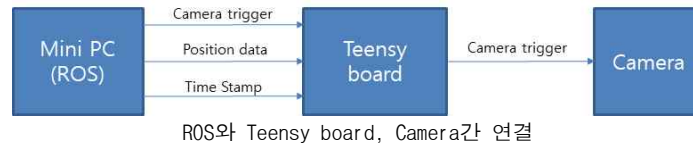


CTE1-2 기체와 시스템 통합 및 등선교 테스트

(4) 자율운행 통합 hardware 및 software 안정화

■ 교량 이미지 정보 획득을 위한 시스템 구축

- 단순 무인기 비행을 위해서는 무인기의 지역적인 위치 (local position)만 추정하면 되지만 최종적으로 GPS가 들어오지 않는 교량 밑에서 전역적인 지도 (global map)에서의 무인기가 촬영한 이미지의 위치를 알려면 무인기의 지역적인 위치를 다시 global한 GPS 좌표계로 변경이 필요
- 개발한 SLAM 알고리즘으로부터 추정된 무인기의 위치 정보 -> UTM 좌표계로 변환 -> GPS 좌표계에서의 위치 추정 데이터로 변환 -> 획득 이미지와 매칭
- ROS (Robot Operating System)를 통해 아두이노 계열 보드로 데이터 Serial 통신



■ 실내 풍동 실험을 통한 기체 비행 테스트

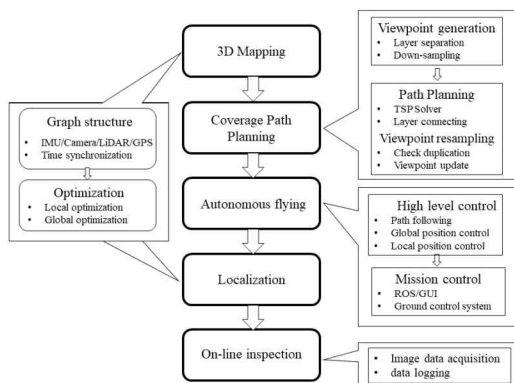
- 기체의 큰 사이즈 때문에 우선 feasibility 확인을 위해 기체 소형화 후 현 센서 시스템 및 알고리즘 기반 실내 호버링 테스트 (Pixhawk 기반)
- 약 7~11m/s 풍속 환경에서 호버링 테스트 수행 완료



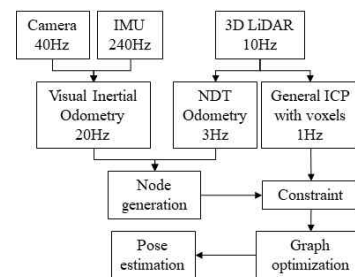
실내 풍속 테스트

■ 현장 검증 테스트

- 현장 테스트 프레임워크



무인체 운용 프레임워크



그래프 기반 SLAM 구조

- 먼저 정밀한 지도 제작을 위해 RTK-GPS (Real-Time Kinematic Global Positioning System)를 기반으로 한 3차원 점군 지도를 만듦. 일반적으로 RTK-GPS는 지상 시스템과 비행 시스템으로 구성되며, 교량의 중앙부에 지상 시스템을 설치함으로써 넓은 부분을 커버할 수 있으며 일정 시간 설치해 정확도가 수렴되도록 할 수 있음. 사전 비행을 통해 획득한 3차원 지도를 기반으로 사용자는 교량의 점검할 부분을 미리 지정하여 경로 계획을 할 수 있음. 이를 통해, 점검 경로를 효율적으로 계획할 수 있고 나뭇가지나 교량 기둥 등과 같은 장애물 회피도 용이해짐. 교량 대부분이 평면과 직선으로 이루어진 구조라, 사용자의 안전과 편의를 위해 2.5차원의 A* 알고리즘을 사용하여 최단 경로를 계획함. 이렇게 사전 준비가 끝나면 무인기는 실제 점검을 위해 자율

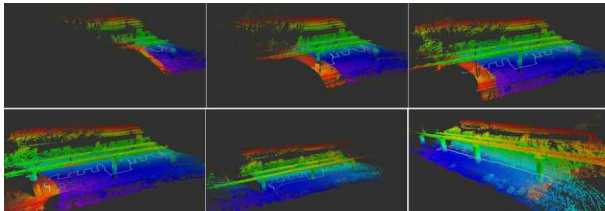
비행을 하게 되는데 이 때 가장 중요한 것은 무인기의 위치 추정임. 교량의 하부는 GPS 신호가 수신되지 않기 때문에 본 연구에서는 IMU, 카메라, 3D LiDAR를 융합한 그래프 기반의 SLAM 알고리즘을 사용함. 그래프 구조를 이용하면 다양한 센서로부터 획득된 무인기의 위치 정보를 쉽게 융합할 수 있음. 최종적으로 위와 같이 획득된 무인기의 위치 정보를 기반으로 무인기가 자율 비행을 하며 교량 점검 부분의 데이터를 획득할 수 있으며, 또한 이상이 있는 부분의 교량에서의 위치 정보도 0.5m 이내의 오차로 측정할 수 있음.

■ 타겟 교량인 춘천시 등선교 대상으로 수습 회 테스트 진행

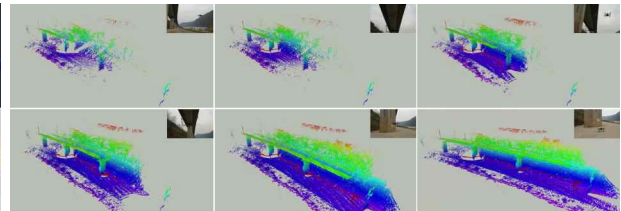


테스트 플랫폼

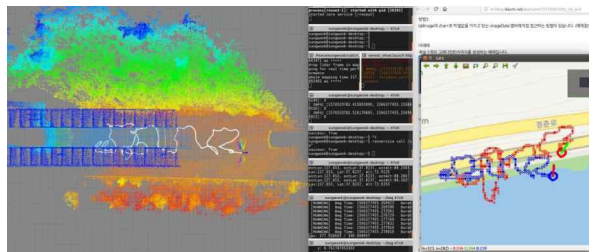
- CTE1-2에서 개발한 쿼드콥터 타입의 무인체. 전방에는 Sony 알파 9 DSLR이 짐벌 시스템에 결합되어 탑재되어 있으며 기본적으로 비행 컨트롤러는 Pixhawk2를 사용함. 탑재된 PC는 Intel i7 NUC이며 1280*1024 해상도의 Pointgrey FL3-U3 카메라가 하방으로 부착되어 있음. 사용된 3D LiDAR는 Velodyne사의 Puck lite로 pitch 축으로 270도 돌려서 장착되어 있음. 기체와 서버의 통신을 위해 LTE 모뎀이 달려있음.
- 다양한 시나리오 별 테스트 결과



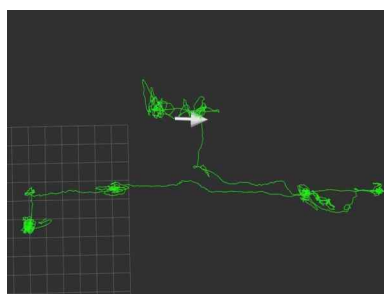
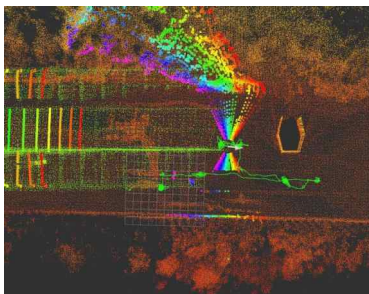
지그재그 경로 테스트 결과



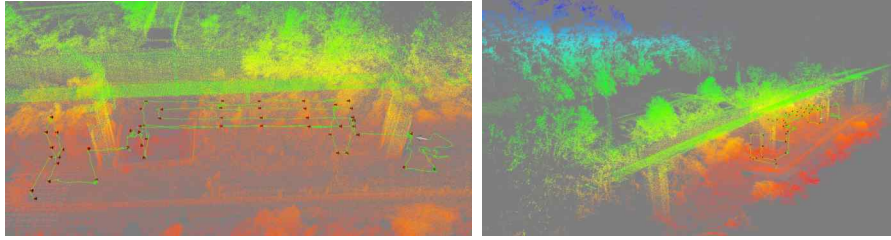
일자 경로 테스트 결과



지그재기 경로 비행 결과 및 추정된 무인체 위치 2D 시각화 (파란선: SLAM 결과, 빨간선 GPS)



교각 점검을 위한 비행 결과 (좌: 3차원 맵핑 및 위치 추정, 중: 무인체 추정 위치, 우: 시각화)



교각 및 바닥판 점검을 위한 사용자 입력 비행 경로 추종 비행 결과 (빨간색 화살표: 경유점, 초록선: 비행 경로)



등선교 및 거북선대교 SLAM 결과 비교

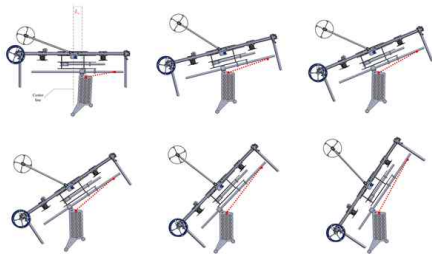
파트	실제 치수	제안 방법		최신 알고리즘 (LOAM)	
		추정	오차율	추정	오차율
d_1	50	49.89	0.22	49.62	0.76
d_2	50	49.75	0.50	49.35	1.30
h_1	14.5	14.27	1.58	14.23	1.86
w_1	11	10.90	0.91	10.88	1.09
d_3	230	227.2	1.21	발산	
h_2	23	22.7	1.30	발산	
w_2	20	20.32	1.6	발산	

- 제안한 알고리즘의 경우, 거북선대교에서의 오차가 등선교에서의 오차보다 약간 높지만 두 결과 모두 2%를 초과하지는 않음. 반면에 3D LiDAR만 사용하는 LOAM (State-of-the-art 알고리즘) 의 경우, 등선교 결과는 각 파트에 대해 제안한 방법보다 약간 높은 오차율을 나타냄. 거북선대교에서는 교량의 바닥이 해수면인 특수사항 때문에 LiDAR가 찾아내는 특징점이 바닥면에 없고 위의 교량 바닥판만 있으므로 LOAM은 대부분 발산하는 결과를 보여줌. 그래프 SLAM에서 노드 생성을 위해 수퍼 노드를 사용하여 VI-0 및 NDT odometry의 로컬 최적화를 추가하여 제안한 SLAM 알고리즘이 기존의 State-of-the-art 알고리즘보다 강인하고 정확함을 확인할 수 있음

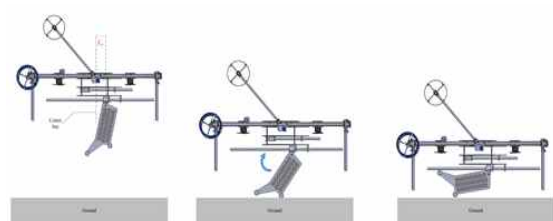
(5) 벽면 이동형 플랫폼 프로토타입 설계 및 제작

■ 벽면 이동형 플랫폼 프로토타입 설계 및 틸트로터 기반 벽면 부착형 비행로봇 제작

- 기존의 슬라이딩 ballast 구조는 자세의 각도(경사) 및 탄성력에 의존한 제어의 정밀성이 떨어지는 한계가 있으며 이를 해결하기 위한, 슬라이딩 ballast 구조를 변경함.
- 보다 능동적 제어가 가능하도록 Arm folding 메커니즘을 융합하여 ballast의 정밀한 위치제어가 가능해짐.

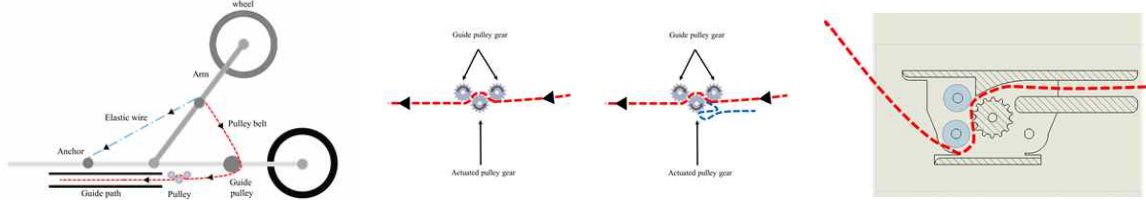


기존 슬라이딩 ballast 메커니즘



변경 후 폴딩 ballast 메커니즘

- 또한 ballast의 회전자유도를 증가시켜 기체의 roll 축 회전 비행의 안전성을 증가시켰으며, 휠 구동부 벨트 텐션으로 인한 변형 문제를 해결함.
- Arm 구동부의 벨트 꼬임 문제를 해결하기 위하여 벨트 가이드 path 구조를 적용하였으며 작동 테스트를 완료함.



Arm 구동부 개선 설계안

- 앞서 변경된 설계안을 바탕으로 프로토타입을 제작하여 비행 및 벽면 이동 풍 강인성 실험을 진행하였음. 배풍기의 최대 속도 풍속 13m/sec이며, GPS 신호 기반 호버링 상태와 벽면 이동 상태를 비교하였음.



벽면 이동 플랫폼 구조



벽면 이동 풍 강인성 실험 수행

- arm 메커니즘 개선 및 변경을 통해 구동부의 신뢰성과 내구성을 증대시키고 배터리 파트 슬라이딩 메커니즘의 액츄에이터 제어방식으로 설계변경 완료.
- 4K UHD (4096 x 2160 pixel) 카메라 설치를 통한 고해상도 영상 획득 가능.
- 개선된 플랫폼 검증을 위하여 콘크리트 교량인 적문교 현장 실증을 수행함.



개선된 벽면 이동 플랫폼 구조



현장 검증 (적문교)



현장 검증 취득 데이터(1)



현장 검증 취득 데이터(2)

(CTE1-2) 교량 외부 외관조사를 위한 무인검사장비 개발 ((주)엑스드론)

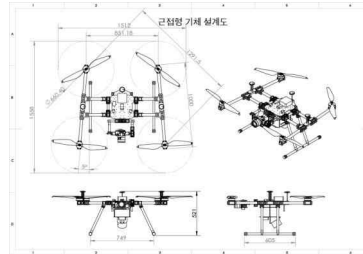
성과 기준					
질적성과지표		목표치	달성치	측정방법	검증방법
①	비행시간	최소 30분 이상	33분 10초	실외시간측정	시험공역 실증 (참관인 입회)
②	풍속극복능력	10m/s	10m/s	실외풍속측정 (풍동시험장)	공인시험성적서 발급

(1) 교량 외부조사를 위한 근접형 기체 개발

- 교량 외부조사를 위한 임무장비(4.2kg)에 최적화된 근접형 기체 개발
- 4.2kg의 Payload를 탑재 후 정량적 목표인 임무비행시간 30분, 순간풍속극복능력 10m/s를 만족하기 위하여 최대이륙중량 20kg 추력체계 선정 (MN-701S, Carbon Prop 26inch)
- 기체 형태를 전방 2축 짐벌 장착이 용이한 V-type의 형태로 개선(5°)
- 근접형 기체의 이륙중량 19kg (12S 30000mAh 배터리 7kg, 임무장비 4.2kg, 기체 자체무게 7.8kg)
- 상하 180° 회전 조작 가능한 전방 2축 짐벌 장착으로 교각 상하부 영상데이터 확보 가능



4차년도 근접형 기체 랜더링



4차년도 근접형 기체 설계도



4차년도 근접형 기체 시제품

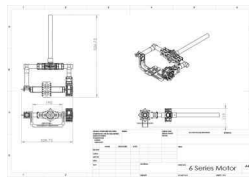
구분	근접형 기체 제원
사이즈(프로펠러 포함)	1568mm(측면) x 1522mm(후방) x 521mm(높이)
이륙중량	18.7kg(장착장비 및 배터리 포함)
최대이륙중량	20kg
비행시간	30min
순간풍속극복능력	10m/s
배터리(12S)	LiPo 6s 30000mAh × 2
FC	DJI A3 PRO
ESC	[T-Motor] Flame 60A
MOTOR	[T-Motor] MN701S 135KV
PROP	FA26.2×8.5 Prop-CW/CCW
조종기	DJI LightBridge 2

(2) 교량 외부조사를 위한 영상장비 짐벌 개발

- 교량 외부조사에 사용되는 SONY A9카메라를 장착하고 교각의 상하부를 촬영하기 위해 상하 180° 회전 조작 가능한 전방 2축 짐벌 개발
- SONY A9카메라의 무게를 제어할 수 있는 짐벌 모터 GBM6212H를 선정(Max 2800g)
- 근접형 기체 CG점을 고려한 짐벌 최적화 설계



근접 전방 2축 짐벌 랜더링



근접 전방 2축 짐벌 설계도



근접 전방 2축 짐벌 제작품

구분	근접 전방 2축 짐벌 제원
Size	526.75mm x 328.75mm x 119mm
Motor	GBM6212H-150T
Payload range	1200~2800g
Pitch	+90°
Roll	+90°
Voltage	12V
Material	Carbon, Aluminum, Plastic

(3) 교량 외부조사를 위한 근접형 기체 시스템 통합 성능검증

- CTE1-1에서 개발한 자율운행 플랫폼과 시스템 통합
- 타겟 교량인 춘천시 등선교 대상 테스트 진행
- 근접형 기체 임무 비행 시 비행 안정성 검증완료
- 등선교 교각 상하부 영상데이터 확보



근접형 기체 시스템 통합



근접형 기체 성능검증

(4) 교량 외부조사를 위한 근접형 기체 성능점검테스트

- 정성적 목표 달성을 위한 대구 시범공역 성능점검 비행테스트(실비행: 33분10초, 비행시간 30분 이상 달성)

일자	장소	기종	이륙시간	착륙시간	비행시간	기온	풍향/풍속	습도	자기장	시험내용
2019.09.24	대구	V type	11:21:31	11:55:24	00:33:39	23.5	남동/3.4	61	1	비행시간테스트 (이륙 및 착륙시간 포함)
2019.11.06	대구	V type	14:26:43	14:57:42	00:30:32	21.2	서/1.1	36	2	임무비행시간테스트
2019.11.06	대구	V type	15:46:54	16:18:00	00:30:46	21.5	서/1.1	45	2	임무비행시간테스트
2019.11.07	대구	V type	09:54:17	10:25:48	00:30:48	14.3	북서/2.2	59	3	임무비행시간테스트
2019.11.07	대구	V type	12:08:02	12:38:57	00:30:33	17	북서/2.2	53	3	임무비행시간테스트
2019.11.07	대구	V type	13:29:19	14:00:30	00:30:42	19.3	서/2.2	49	3	임무비행시간테스트
2019.11.07	대구	V type	14:34:27	15:05:39	00:30:43	19.5	0	46	3	임무비행시간테스트
2019.11.07	대구	V type	16:40:55	17:11:35	00:30:26	16.2	서/1.1	54	3	임무비행시간테스트

- 정성적 목표 달성을 위한 서산 KCL 한국건설생활환경연구원 성능점검 비행테스트
(10m/s 순간풍속극복능력 달성)

일자	장소	기종	이륙시간	착륙시간	비행시간	기온	풍향/풍속	습도	자기장	시험내용
2019.10.29	KCL	V type	14:35:33	15:07:12	00:31:18	17	서/4.3	56	2	3m/s 순간풍속테스트
2019.10.29	KCL	V type	15:30:02	15:36:52	00:05:21	15.7	서/4.5	58	2	5m/s 순간풍속테스트
2019.10.29	KCL	V type	15:51:48	15:58:35	00:05:19	15.6	북서/4.9	59	2	7m/s 순간풍속테스트
2019.10.30	KCL	V type	11:40:42	11:46:18	00:05:20	17.3	남서/4.0	51	1	10m/s 순간풍속테스트

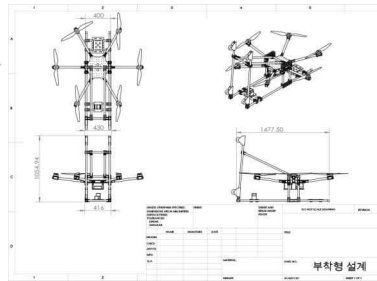
- 각 시험별 시험성적서(공인인증기관 확인 및 비행일지)는 첨부된 CTE별 보고서에서 제시하였음.

(5) 교량 외부조사를 위한 부착형 기체 개발

- 교량 표면을 정밀하게 촬영하기 위해 교량 표면에 밀착되어 이동할 수 있는 부착형 기체 개발
- 임무장비(제어부3.5kg, 계측부0.5kg) 조건(계측부 교량 표면과 거리 25cm 이격, 2cm/s 등속 이동, 저속 이동)에 최적화된 부착형 기체 개발
- 교량 표면에 부착하기 위한 전방 부착 지지대 각도 95°, 충격 흡수용 에바 폼 바퀴 사용
- 교량 표면 부착시스템 및 임무장비를 고려한 최대이륙중량 24kg 추력체계 선정 (X6 motor, 2388 Polymer Prop)
- 부착형 기체의 이륙중량 22kg(12S 22000mAh 배터리 5.3kg, 임무장비 4kg, 기체 자체무게 12.7kg)



부착형 기체 랜더링



부착형 기체 설계도



부착형 기체 시제품

구분	부착형 기체 제원
사이즈(프로펠러 포함)	1857mm x 1910mm x 1055mm
이륙중량	22kg
최대이륙중량	24kg
배터리(12S)	LiPo 6s 22000mAh × 2
FC	DJI A3 PRO
ESC	XRotor PRO HV 80A FOC V3
MOTOR	Hobbywing X6 motor 180KV
PROP	Hobbywing XR0TOR 2388 Polymer Prop
조종기	Futaba 14SG

(6) 교량 외부조사를 위한 부착형 기체 성능검증

- 교량 진단시스템 및 알고리즘 적용 부착형 기체 성능검증
- 타겟 교량인 춘천시 등선교 대상 테스트 진행
- 교량 표면 전방 부착 및 저속 이동 달성
- 분석 가능한 교량 표면 영상데이터 확보



부착형 기체 성능검증 비행(등선교)

(CTE2) 무인검사장비의 운영 및 원격 제어 기술 개발 ((주)엑스드론)

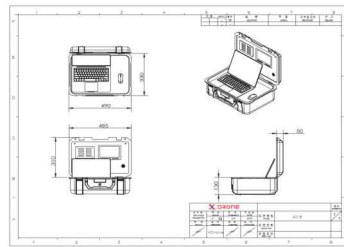
성과 기준					
질적성과지표		목표치	달성치	측정방법	검증방법
①	통신거리	3km	3km	실외거리측정 (Testbed 비행)	인증기관 확인 비행 동영상 GCS Data

(1) 무인검사장비 GCS(Ground Control System) 개발

- 무인검사장비 기체의 원격제어를 위하여 자동비행, 영상 전송, 기체상태 확인 등의 기능을 탑재한 시스템 개발이 목적(통신거리 3km)
- 탑재 프로그램에서는 기체의 PID 값 수정을 통한 비행 안정성을 조정할 수 있으며 Waypoint 지정으로 자동비행을 수행할 수 있음.
- 실시간 시스템 오류(센서 통신 끊김, LTE 통신 끊김)들을 확인하고, 발생 시 사용자가 개입하여 원격조종을 통해 안전하게 복귀할 수 있도록 하는 실시간 시스템 오류 감시 프로그램 개발



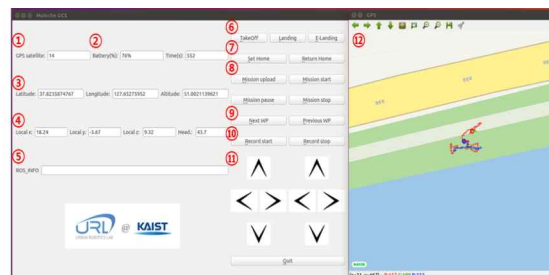
GCS 랜더링



GCS 설계도



GCS 결과물



GCS 프로그램

- 4차년 기체에 적용되는 FC의 추가적인 변경이 발생(A3 -> Pixhawk)하여 KAIST와 협업으로 GCS 프로그램을 개발하였으며 플랫폼에 부분적으로 수정 제작됨
- ① GPS 위성 개수 ② 배터리 잔량 체크, 비행시간 ③ 추정된 GPS 좌표 ④ SLAM 알고리즘 기반 위치 추정 ⑤ 각종 오류 및 경고 메시지 ⑥ 기체 이륙, 착륙, 비상 착륙 ⑦ 홈 지정, 홈 복귀 ⑧ 미션 시작, 멈춤, 중단 ⑨ 다음 웨이포인트로 이동, 이전 웨이포인트로 이동 ⑩ DLSR 녹화 시작, 중지 ⑪ 무인체 컨트롤 ⑫ Naver 지도 기반 무인체 위치 2D 시각화
- 위의 각 버튼들을 통해 전문적인 지식이 없어도 사용자가 쉽게 무인체를 운용할 수 있음
- GCS에 장착된 모니터 또는 노트북 화면으로 실시간 시스템 오류 감시 프로그램과 GCS 프로그램이 표시되어 실시간 점검이 가능하고 기체의 배터리 상태 및 좌표, 고도, 이동거리 등이 표시되어 비상상황 발생 시 대처할 수 있음.
- 정성적 목표 달성을 위한 대구 시범공역 성능검점 비행테스트(통신거리 3km 달성)

일자	장소	기종	이륙시간	착륙시간	비행시간	기온	풍향/풍속	습도	자기장	시험내용
2019.09.24	대구	V type	14:29:34	14:43:44	00:13:57	26.7	동/1.1	42	1	3km 통신거리테스트

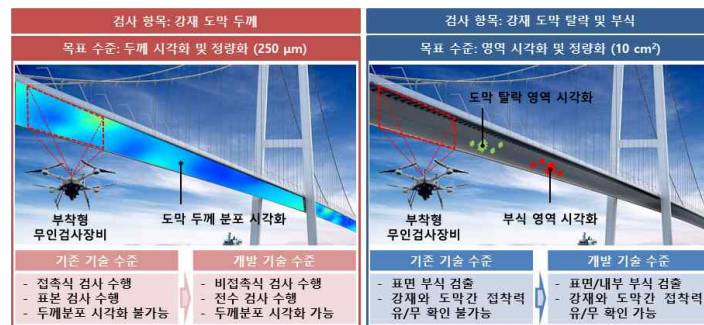
- 공인인증기관 확인은 첨부된 CTE별 보고서에서 제시하였음.

(CTE 3-1) 강재 도막 두께 및 부식 정량화 기술 개발 (KAIST)

성과 기준					
질적성과지표		목표치	달성치	측정방법	검증방법
①	도막 두께 측정	250 μm (현장실험)	40 μm (현장실험)	실측 데이터와 비교	달성 수치 확인
②	부식 넓이 측정	10 cm^2 (현장실험)	2.25 cm^2 (현장실험)	실측 데이터와 비교	달성 수치 확인

(1) 도막두께 및 부식넓이 진단기술 개요

- 능동형 열화상 기법과 비전 영상 기법을 통합한 비접촉식 도막두께 및 부식넓이 진단기술 개발.
- 강구조물 도막두께를 250 μm 단위로 정량화/시각화할 수 있는 진단기술 개발. (현, 40 μm 단위 정량화 가능)
- 강구조물 부식넓이를 10 cm^2 단위로 정량화/시각화할 수 있는 진단기술 개발. (현, 1 cm^2 단위 정량화 가능)



도막두께 및 부식넓이 진단기술 개요

- 기존 접촉식 및 표본 검사로 수행되던 도막진단을 비접촉식 및 전수 검사로 개선하여 구조물 진단 효율 개선.
- 표면뿐만 아닌 내부 부식 검출이 가능한 기술을 제안하여 구조물 진단 신뢰성 개선.
- 도막두께 및 부식진단 정보를 시각적으로 표출함으로써 대형 구조물 관리 및 진단 효율 개선 가능.
- 본 기술에 대한 독창성을 인정받아 원천기술 특허등록(10-1877480 / 2018. 07. 05)을 완료함.
- 본 기술을 활용한 해외시장 개척 및 기술활용을 위한 미국 특허 출원 (16307640 / 2018. 12. 06), 중국 특허 출원 (201880003344.4 / 2019. 02. 27)을 완료함.
- 특허출원 및 등록 증빙자료는 'CTE별 연구성과집'에 제출되어있음

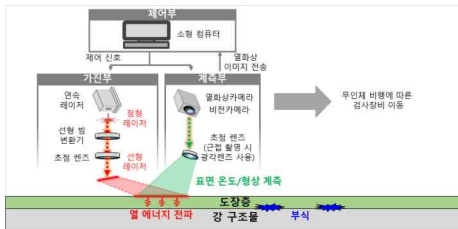
(2) 도막두께 및 부식넓이 진단시스템 개발 및 소형화

- 능동 열화상 및 비전 영상장비 통합 구성: 능동 열화상과 비전 영상을 동시에 계측하여, 고해상도 구조물 내부/외부 결함정보 (균열, 부식 등) 표출 및 재료분석정보 (도막 두께 및 열화) 시각화 가능.
- 도막두께 및 부식넓이 진단시스템 구동 원리: 제어부의 소형 컴퓨터로부터 가진부/계측부의 모든 장비가 제어되며, 제어부의 통제하에 가진부의 연속레이저가 구조물에 열에너지를 생성시키면 동시에 열화상 카메라가 구조물 열에너지 전파 패턴을 계측하며, 동시에 비전 카메라가 구조물 표면 형상을 함께 계측. 이후, 계측 화상 및 비전 영상은 소형 컴퓨터로 전송되어, 내장된 알고리즘으로 자동 구조물 진단 평가 수행.
- 옥외 활용 및 다양한 무인체 적용이 가능한 소형/경량 능동 열화상 및 비전 영상 계측 장비 구현 (세계최초): 50 cm^2/sec 검사 속도로 1시간 구동이 가능한 검사장비로, 무게 및 종량은 각각 4.10 kg, 30×16×10 cm^3 임.
- LTE 기술 접목을 통한 하드웨어 원격 제어 기술 구현. (LTE 통신망이 설치된 모든 지역에서 원격 제어 가능)

(3) 도막두께 및 부식넓이 진단시스템 무인체 탑재 및 최적화

- 도막두께 및 부식넓이 진단시스템 (진단시스템)의 무인체 탑재 (세계최초): 본 과제를 통해 개발된 진단시스템은 능동 열화상 및 비전 영상장비를 무인체에 탑재한 세계최초 활용 사례임.

- 능동 열화상 및 비전 영상장비를 활용하는 본 진단시스템의 구동 특성상 무인체의 정밀 위치/동작 제어가 필요하므로, 일반 원거리/근거리 무인체가 아닌 구조물에 부착이동이 가능한 부착형 무인체가 활용됨.
- 진단시스템을 탑재한 부착형 무인체는 구조물 취약부위 및 결함 발생 의심지역에 대한 국부 영역 정밀 검사 목적을 하며, 아래와 그림과 같은 시나리오를 토대로 운용하고 있음.



도막두께 및 부식깊이 진단시스템 구성도



도막두께 및 부식깊이 진단시스템



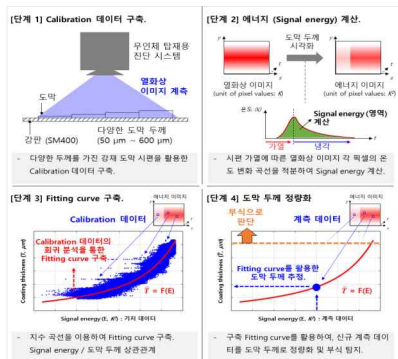
도막두께 및 부식깊이 진단시스템 (진단시스템) 무인체 탑재 및 운용



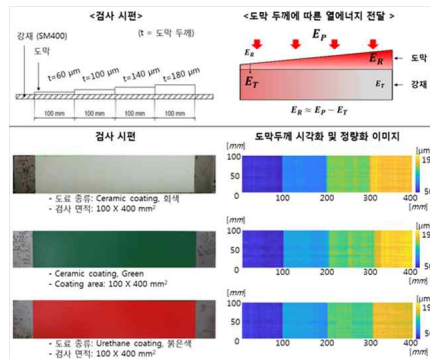
도막두께 및 부식깊이 진단시스템 (진단시스템) 탑재 무인체 운용 시나리오

(4) 도막두께 정량화 및 시각화 알고리즘 개발

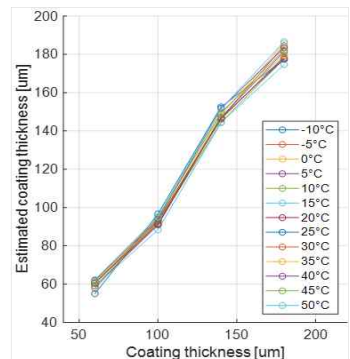
- 능동 열화상 기술을 이용한 도막두께 정량화 및 시각화 기술 개발: 도막 두께가 두꺼워질수록 레이저 가짐에 따른 도막 표면 온도 상승량이 커지며, 이를 활용한 도막 두께 검사 알고리즘 개발.
 - (단계 1) 레이저 가짐에 의한 도막 표면 온도는 변화계속.
 - (단계 2) 도막 표면 온도변화량 정규화를 위해 도막 표면 온도변화 그래프에 대한 Signal energy 계산.
 - (단계 3) Signal energy와 도막 두께의 상관관계 분석을 위해 fitting curve (3차 다항식) 구축.
 - (단계 4) fitting curve를 활용한, 도막 두께 자동 추정.
- 비전 영상을 활용한 능동 열화상 영상 보정 및 도막 두께 정량화 정확도 향상: 검사 도로 색상을 비전 카메라로 계측하여, 도로 색상 변화에 따른 계측 데이터 보정 및 도막 두께 검사정확도 향상 기법 개발.
- 다양한 시편을 활용한 개발 알고리즘 실험적 검증 완료: 도막 두께 40 μm 정량화 가능 (개발 목표: 250 μm)
- 다양한 외기 온도조건 아래에서도 적용이 가능한 열분석 기반 도막 두께 정량화 기술: 다양한 온도 및 습도 조건에서 개발 검사 시스템을 활용한 도막 두께 검사성능 검증 완료 (도막 두께 40 μm 정량화 가능)



도막두께 정량화 및 시각화 알고리즘 상세



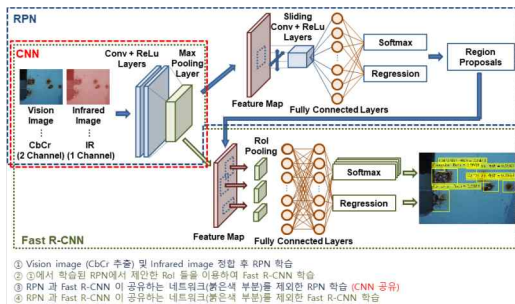
열에너지 전달 패턴 분석을 통한 도막두께 정량화 및 시각화



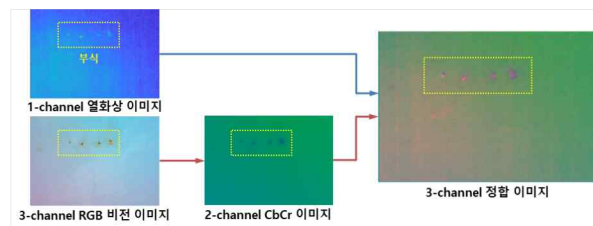
외기온도변화에 따른 도막두께 검사성능

(5) 부식률이 정량화 및 시각화 알고리즘 개발

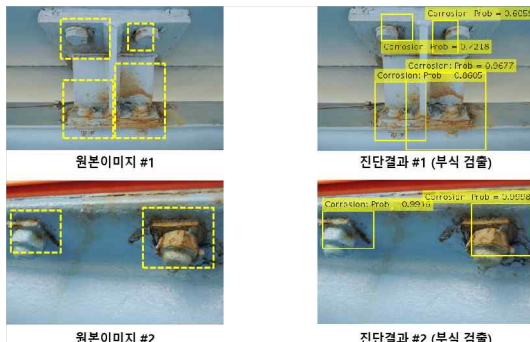
- 딥러닝 (Faster R-CNN) 기반 부식 정량화 및 시각화 알고리즘 개발: 비전 영상에 열화상 영상을 통합한 이미지를 부식 진단에 활용하여 육안 식별이 불가능한 부식영역을 검출해낼 수 있음. 이때, 딥러닝 기법을 활용하여 더욱 신속하고 정밀한 부식률이 정량화 및 시각화 알고리즘 구현이 가능함.
- 부식 정량화 및 시각화 알고리즘 검사정확도 확보를 위한 데이터 학습 상세 내용: (단계 1) R, G, B 3채널로 구성된 비전 이미지를 부식 시각화에 민감한 정보를 추출한 Cb, Cr 2채널의 이미지로 변환하고, 이를 1채널인 열화상 이미지와 융합 및 정합하여 RPN 학습 수행. (단계 2) 단계 1에서 학습된 RPN에서 제안한 ROI들을 이용하여 Fast R-CNN 학습. (단계 3) RPN과 Fast R-CNN이 공유하는 네트워크 (붉은색 부분)를 제외한 RPN 학습 (CNN 공유). (단계 4) RPN과 Fast R-CNN이 공유하는 (붉은색 부분)를 제외한 Fast R-CNN 학습.
- 개발 부식률이 정량화 및 시각화 알고리즘은 실제 교량에서 취득한 영상에 적용되어 실효성이 검증됨.



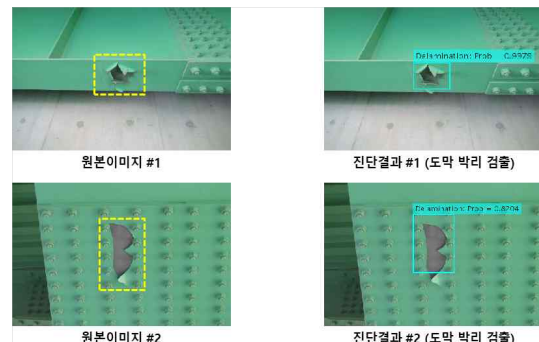
부식률이 정량화 및 시각화 알고리즘 상세



부식 진단을 위한 열화상 및 비전 영상 (이미지) 정합 상세



볼트 시공 영역에 대한 부식영역 자동 추적 결과



도막 탈락 영역 (육안 식별 가능한 부식의 초기 단계) 자동 추적 결과

(6) 진단시스템 및 알고리즘 무인체 적용 시험체 실험 및 성능검증

- 시험체를 등선교 교각에 부착한 상태로 진단시스템 및 부착형무인체 성능검증 실험 수행.

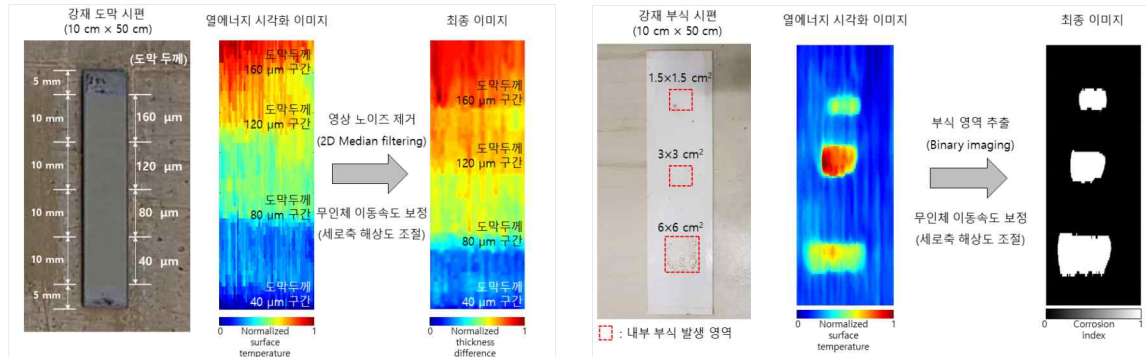


진단시스템 부착형무인체 활용 성능검증을 위한 검사방법

진단시스템 및 부착형무인체를 활용한 계측 열화상 이미지 및 검사 개요

- 진단시스템의 부착형무인체 활용 검사결과, 도막두께 및 부식영역 정량화 및 시각화 가능성 확인 및 연구과제 정량적 검사목표 수준 달성. (도막두께: 목표 250 μm / 달성 100 μm , 부식률: 목표 10 cm² / 달성 2.25 cm²)
- 부착형무인체 활용 진단시스템 도막두께 및 부식영역 검사성능은 진단시스템 단독활용 성능 (도막 두께 40

μm , 부식률이 1 cm^2 수준 정량화 가능) 대비 떨어지나, 추후 무인체 성능/운용기술 향상에 따른 개선 가능.



진단시스템 부착형무인체 활용 도막 두께 시험체 검사결과

진단시스템 부착형무인체 활용 부식 시험체 검사결과

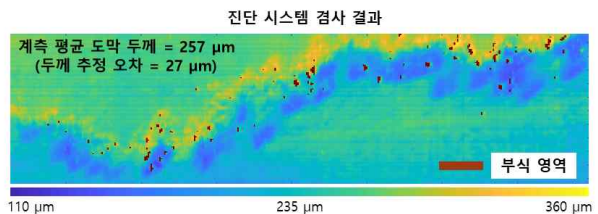
(7) 진단시스템 및 알고리즘 단독활용 실패량 적용 실험 및 성능검증



진단시스템 단독활용 성능검증을 위한 검사대상 교량 (진도대교) 및 검사방법



진단시스템의 교량 점검대차 (추가 검토 무인체) 통합을 통한 교량 바닥판 자동 검사 수행

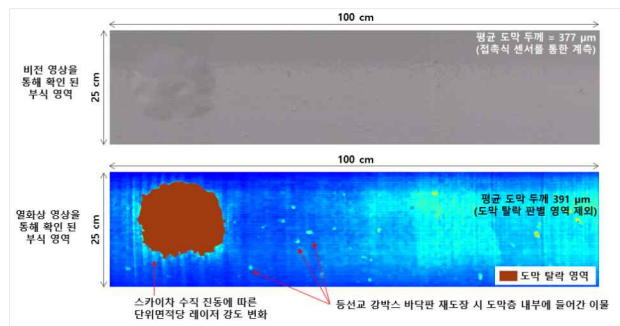


실 교량 볼트 시공영역에 대한 진단시스템 성능검증 결과

- 진단시스템 단독활용 실패량 성능 검증실험 수행을 위해 한국시설안전공단의 협조로 테스트 교량 섭외.
- 테스트교량 점검대차에 진단시스템 및 스캐닝장비를 설치하여 도막두께 및 부식률이 검사 수행.
- 점검대차는 기존 드론 이외 또 다른 무인체로써의 역할을 할 수 있으며, 설치가 쉬우며, 진단시스템 설치 및 상시 운용을 통해 교량 도막 상태변화 및 이력 관리에 유용하게 활용할 수 있음.
- 검사 결과, 볼트 시공 영역 근처에서 일반 영역 대비 도막이 두껍게 도포된 것을 실험적으로 확인하였으며, 일부 볼트 시공 영역에서 육안으로 확인이 가능한 녹을 부식영역으로 검출할 수 있음을 확인함.
- 더불어, 볼트 시공이 되지 않은 일반 바닥판 영역에서 도막 두께 변화와 부식이 존재하는 영역을 실험적으로 확인할 수 있었으며, 해당 영역은 과거 부식 발생 영역에 대한 보수가 진행된 영역임을 확인함.
- 부식이 존재하지 않고 도막 두께가 일정 수준으로 유지되는 영역 또한 검사를 수행하였으며, 도막 두께는 평균 $15\text{ }\mu\text{m}$ 이하의 수준으로 검사할 수 있었으며, 부식영역에 대한 오보는 없음을 확인할 수 있었음.



진단시스템 단독활용 성능검증을 위한 검사대상 교량 (등선교) 및 검사방법

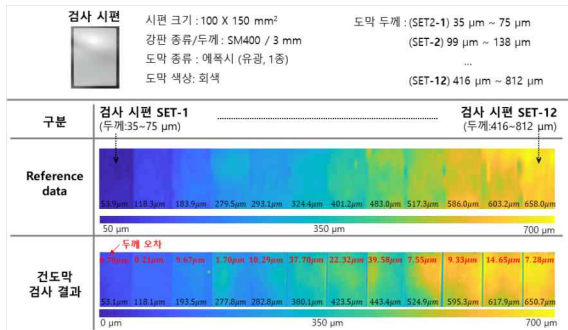


실 교량 도막 탈락 발생 영역에 대한 진단시스템 성능검증 결과

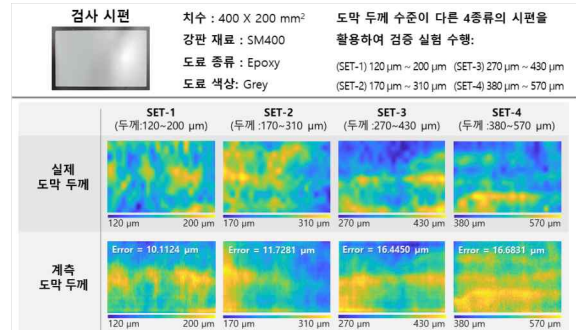
- 본 과제 타겟 교량인 춘천 등선교 강박스거터 바닥판 검사 수행을 위해 스카이라이프 대여 및 진단시스템 설치를 통해 도막두께 및 부식넓이 검사 수행.
- 검사 결과, 육안으로 확인이 어려운 도막과 강구조물간 접착력이 없거나 탈락된 영역 검출에 성공하였으며, 이외 도막 두께 정상 도포 구간에 대해 오차 50 μm 이하의 수준으로 도막 두께 정량화 및 시각화 완료.

(8) 진단시스템 및 알고리즘 단독활용 다수 시험체 적용 실험 및 성능검증

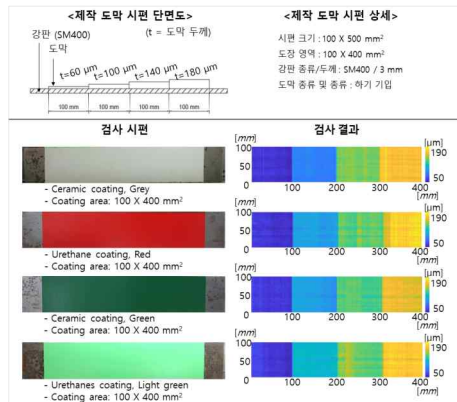
- 검증 실험 수행을 위해 다양한 도막 두께 및 부식 넓이 조건을 가진 검사 시편이 활용됨. 정밀한 도막 두께 시편 제작을 위하여, (주) KCC의 도료연구실과 (주) 현대중공업 도장연구실 및 자동화연구실에 시편 제작을 의뢰 하였으며, 제작된 시편을 통해 획득한 검증 결과는 아래 그림과 같이 요약됨. 검사 결과 40 μm 이상의 정밀도로 다양한 종류와 색상을 가진 도막 두께의 시각화와 정량화가 수행되었으며, 1 cm² 이상의 부식영역이 검출 될 수 있음을 실험적으로 확인됨.



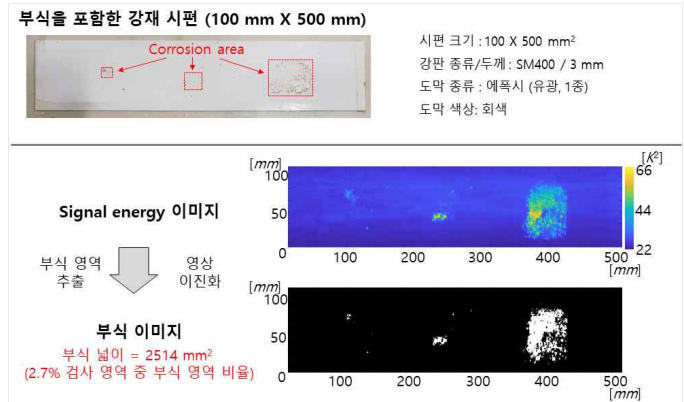
불연속적인 도막두께 분포/변화를 가진 시편의 도막두께 시각화



연속적인 도막두께 분포/변화를 가진 시편의 도막두께 시각화



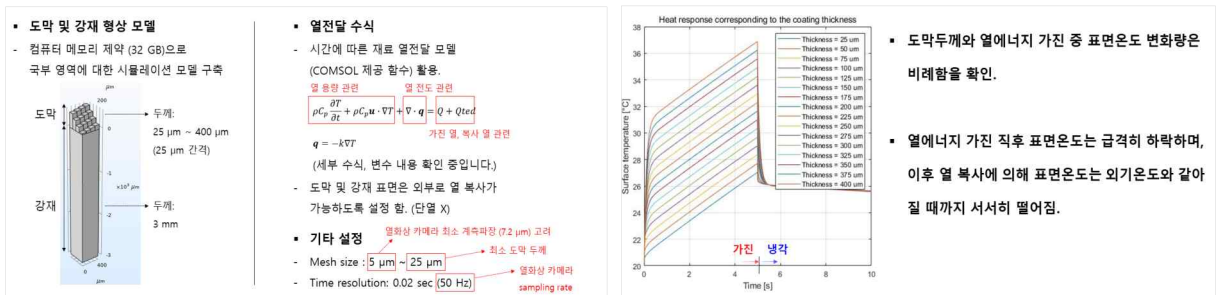
다양한 색상 및 재료의 도막이 시공된 강구조물 도막두께 분포/변화 시각화



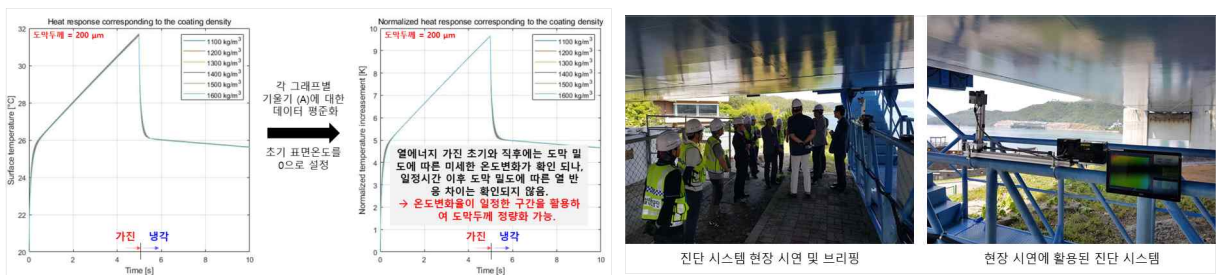
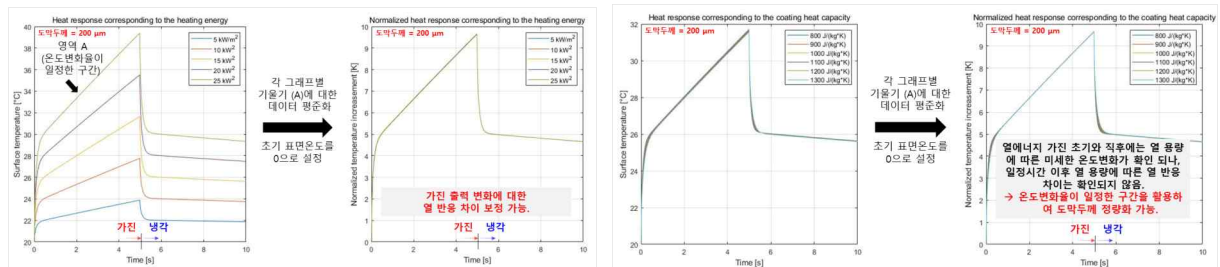
육안 식별이 불가능한 강구조물 부식영역 시각화 및 정량화 (도막층 내부 발생 부식)

(9) 시뮬레이션을 통한 다양한 구조 및 현장조건에 대한 적용성 평가

- 다양한 재료 특성을 가진 도막 구조물 (실제 실험적 검증을 위한 시편 준비가 현실적으로 불가능함)과 실험 조건에 대한 두께 정량화 성능검증을 위해 상용 프로그램 COMSOL 기반 열전달 시뮬레이션을 활용하여 열화상 데이터 획득 후 알고리즘 검증 수행.
- 실제 실험 데이터와 시뮬레이션 데이터와의 상관관계 확인을 통한 구축된 열 전달 시뮬레이션 모델의 타당성 검증 수행. (실제 계측 데이터와 동일하게 도막두께와 가진에 따른 표면온도 변화량이 비례함을 확인)
- 각진 시간 및 가진 출력을 조절하여 진단시스템의 검사속도 (무인체 이동속도)에 따른 시편 온도변화 패턴을 확인할 수 있어, 이후 검사 조건에 따른 데이터 변화 양상 예측 및 계측 데이터 보정이 가능함.
- 다양한 재료 특성 및 실험 조건에 따른 계측 데이터 확보 및 알고리즘 최적화 수행 완료 (다양한 시편 및 검사 조건 하에서 40 μm 수준의 도막두께 정량화 및 시각화 성능 확보가 가능함)



도막두께 검사를 위한 열화상 데이터 확보를 위한 COMSOL 활용 도막두께 검사를 위한 열화상 데이터 확보를 위한 COMSOL 활용 열 전달 시뮬레이션 모델 구축 열 전달 시뮬레이션 모델 구축



도막 밀도에 따른 가진 중 온도변화를 차이 확인 및 데이터 개발 진단시스템을 활용한 진도대교 바닥판 도막두께 및 부식 검사 현장시연 검사 현장시연

(10) 진단시스템 및 알고리즘 국토부 현장시연

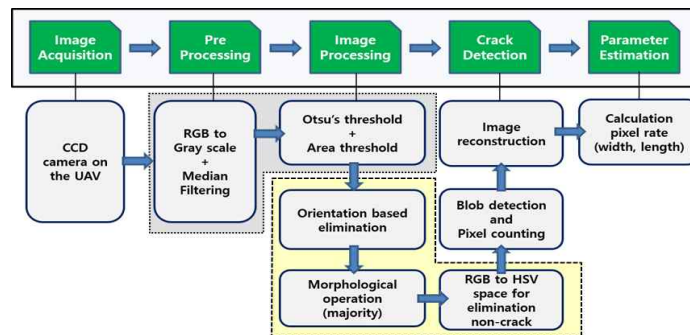
- 국토교통부 기술안전정책관, 시설안전과장 참관에 따른 진단시스템 현장시연 수행 및 우수성 입증.
- 사회기반시설물 (교량) 도막 두께 및 열화 관리 체계화를 위한 정책/제도 개선 필요성 제시.

(CTE 3-2) 강재, 콘크리트 균열 및 볼트 연결부 손상탐지 기술 개발 (KAIST)

성과 기준					
질적성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	
① 강재·콘크리트 균열폭 측정	300 μ m	300 μ m	실측 데이터와 비교	성능실험보고서	
② 볼트 연결부 손상을 검출 신뢰도	90%	90%	실측 데이터와 비교	성능실험보고서	
③ 검사 시스템 통합 기술 개발	1건	1건	검사시스템 통합 여부	성능실험보고서	
④ 개발 기술의 T/B 적용 및 피드백	1건	1건	적용결과의 적정성	전문가 평가 자문	

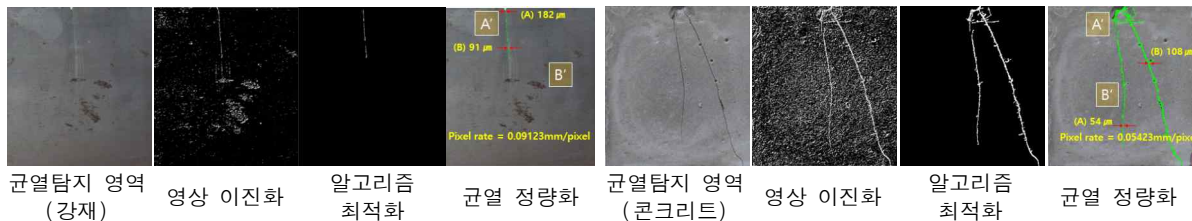
(1) 정적상태/동적상태 검사 수행을 위한 강재·콘크리트 균열 손상 탐지 알고리즘 개발/최적화

- 손상 이미지 검출을 위한 탐지 알고리즘 개발은 Morphological image Processing Technique 기반의 2D 영상 처리 기법을 사용하였음. 그레이 스케일 변환과 Median filtering을 통해 이미지에 발생한 Blurring과 Noise를 제거하고, 이후 형태학적 열림(Morphological opening) 기법을 이용한 균열 부위 검출을 수행함.



콘크리트 및 강재 균열 탐지 알고리즘 흐름도

- 동적환경에서 획득한 시편 이미지에 적용한 결과 아래와 같이 0.1mm ~ 0.3mm 수준의 균열 탐지가 가능함을 확인함.
- 그러나, 콘크리트 표면에 존재하는 기공의 경계선을 균열로 인식하여 탐지하는 False Positive 및 실제 균열을 인식하지 못하는 True Negative와 같은 False alarm이 발생함.

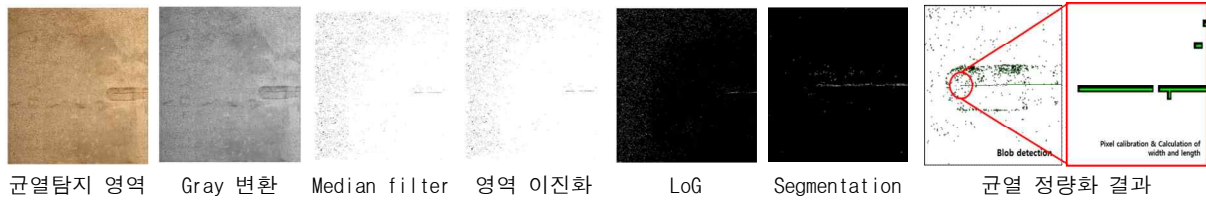


(2) 정적상태 검사 수행을 위한 강재·콘크리트 균열 손상 시편 제작 및 실험실 검증

- 정적인 상태에서 촬영된 강재 및 콘크리트 균열 손상 이미지를 확보하기 위하여, 우선 손상 시편을 제작하였음. 강재 균열 시편의 경우 SM490 재질로 0.03 ~ 0.1mm 수준의 균열폭을 지닌 각기 다른 형태(플레이트, 노치) 시편을 제작함.

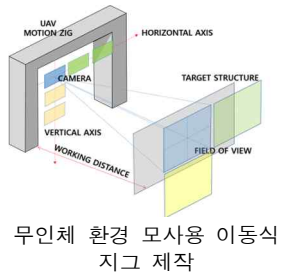


- 실제 강재균열 시편 이미지 획득을 위해 이격거리 1.5m 상태에서 실험을 수행하였으며, 앞서 제안한 균열 탐지 알고리즘을 적용하여 강재 균열 정량화를 수행함.



(3) 동적상태 균열 이미지 획득을 위한 손상 진단 시스템 구축

- 정적 상태 이미지를 이용한 실험실 수준 검증 후 동적 상태 이미지 획득을 위한 이동식 지그를 제작함.
- 드론의 수평, 수직방향 움직임을 모사한 이동식 지그를 활용하여 콘크리트 및 강재 시편에 대한 이미지 획득



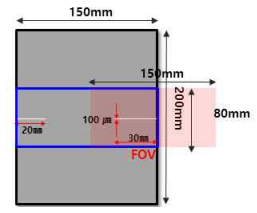
무인체 환경 모사용 이동식 지그 제작



무인체 환경 모사용 이동식 지그를 위한 실험

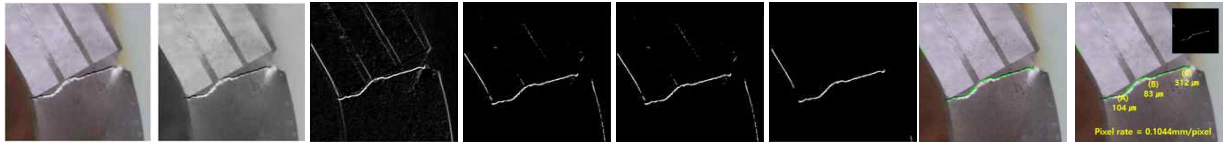


동적상태 검사 수행



대상 시편

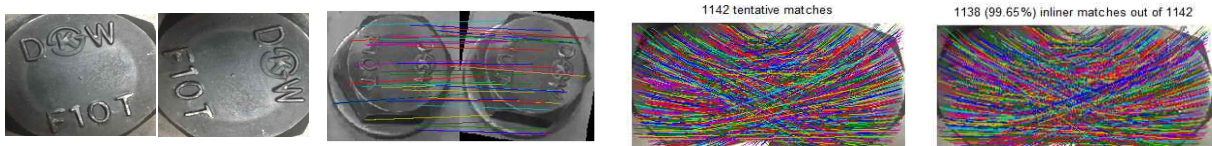
- 이동식 지그를 통해 동적상태에서 강재균열 정량화를 수행하였음.



균열탐지 영역 Gray 변환 영상 이진화 영역 이진화 형태학적 마스크 적용 HSV 임계값 재적용 이미지 재조합 균열 정량화

(4) 강재 볼트 연결부 손상 탐지 알고리즘 개발 및 실험실 검증

- 볼트폴림에 대한 회전변위를 측정하기 위해 앞서 SIFT 및 RANSAC 기반의 볼트 연결부 손상 탐지 알고리즘 검증을 위하여 가상 회전 변위에 대한 실험을 진행함.



가상변위(10°) 회전

SIFT 및 RANSAC 알고리즘 적용 결과



실제 볼트폴림 이미지로부터 SIFT 및 RANSAC 알고리즘을 적용한 결과

- 가상변위(10°)와 실제변위(90°)에 대한 변형 전후 이미지를 대상으로 볼트폴림을 추정한 결과, 추출된 특징점들의 평균 회전변위는 각각 8.9°와 88.9°로 모두 실제값보다 작은 값을 나타냄.
- 또한 평균값을 기준으로 10% 이하의 오차가 나는 점들을 추출한 결과 볼트폴림 추정 신뢰율이 90% 이상임을 확인함. 가상변위와 실제변위에 대한 SIFT 알고리즘 기반 검증 결과는 아래 표와 같음.

	추출된 특징점	추출된 특징점들의 평균 회전변위	볼트폴림 추정 신뢰율
가상변위 (10°)	56	9.8°	90% 이상
실제변위 (90°)	1138	89.9°	90% 이상

(5) 동적상태 볼트 손상 이미지 획득을 위한 손상 진단 시스템 구축 및 실험실 검증

- 이동식 스캐닝 시스템에 카메라를 장착하고 볼트 접합부 부재와의 이격거리를 2m 로 설정한 상태에서 스캐닝을 통한 이미지를 획득.
- 볼트 영역을 추출을 통해 검출된 선영역(edge) 이미지는 허프 변환을 적용하여 Hough Peaks으로 나타낼 수 있으며 아래 그림에서 결과를 확인할 수 있음.
- 볼트 부위에 대해 대조 보정을 수행하고, Canny 선 검출기를 적용하여 Hough line을 추출하고, 그 결과 검출된 볼트 외곽에 나타나는 Hough line 중 가장 긴 두 개의 선이 이루는 각도를 다음과 같이 계산하였음.

$$\theta'_j = 90 + \theta_j$$



이미지 전처리 결과

허프(Hough) 변환을 이용한 볼트 검출

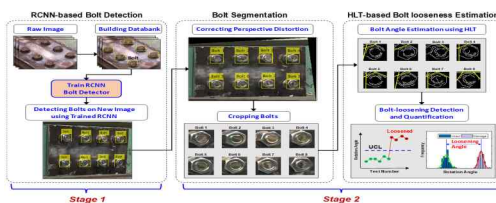
허프(Hough) 변환 결과

볼트 모서리 선 검출

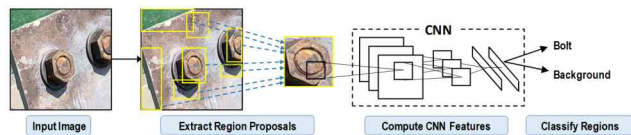
- 손상 확인 결과, 총 36개의 볼트 중 3개의 누락 영역을 모두 검출하였으며, 2개의 볼트를 제외한 34개의 볼트를 모두 정확하게 검출함. 본 연구에서 개발한 볼트 손상(폴림) 탐지 알고리즘은 90%의 신뢰도를 나타내며, 동적환경에서 얻은 이미지에 적용할 경우 0° ~ 60° 내의 볼트 폴림을 검출해 낼 수 있음을 검증함.

(6) 볼트 연결부 손상 탐지 알고리즘 검증을 위한 실험실 실증 테스트 수행

- 볼트 연결부 손상 탐지 알고리즘의 고도화 및 최적화를 위하여, 기존의 SIFT 및 RANSAC, HLT(Hough Line Transform) 기법에 딥러닝(R-CNN) 알고리즘을 추가함.
- 볼트 연결부 손상 탐지 기술은 R-CNN(Region based Convolutional Neural Network) 기반의 볼트 식별 단계와 HLT 기반 볼트 폴림 추정 단계로 구성됨. 볼트연결부 이미지를 수집하여 데이터뱅크(databank)를 구축하고, 전송학습(transfer learning)을 이용한 R-CNN 훈련(training)을 수행하여 볼트 연결부 식별 알고리즘을 완성함.

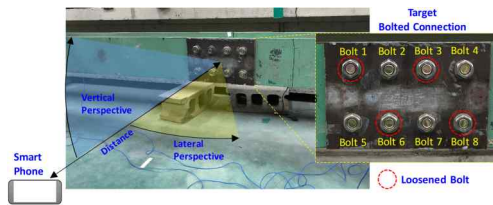


R-CNN/HLT를 이용한 영상 기반 볼트 연결부 손상 감지 체계



R-CNN 기반 볼트 식별 시스템

- 볼트 이미지로부터 k 모서리를 검출하기 위한 Hough 변환(HLT)과 Canny 모서리 식별 기법을 사용하였으며, 볼트 모서리를 검출 한 후 기준되는 수평선으로부터 볼트 폴림 각도를 추정함. 이러한 볼트 회전각 검출을 통해 볼트 폴림을 식별하여 손상 유무를 판단할 수 있음.
- 앞서 제안한 R-CNN/HLT 기반의 볼트 폴림 탐지 알고리즘 검증을 위하여 실험실 규모의 볼트 연결부에 대하여 볼트 폴림을 수행함. 대상 연결부는 8개의 육각볼트(M20)로 구성되어 있으며 1~8의 레이블을 지정하고, 8개의 볼트 중 1,3,6,8에 대하여 각각 5°, 16.5°, 10°, 30°의 폴림 조건을 재현함. 이격거리는 1.5m로 설정하고 Smartphone의 내장 카메라를 이용한 이미지 취득을 수행함. 원근 왜곡 이미지를 고려하기 위하여 0° ~ 50° 범위의 수평방향 및 수직방향 촬영각 차이를 고려하였고 총 176장의 이미지를 취득함.
- 앞서 촬영된 원근왜곡이 발생한 이미지를 대상으로 R-CNN 알고리즘을 적용하여 볼트 식별을 수행하였으며, 모든 촬영 각도에 따른 왜곡 이미지에서 볼트를 정확히 식별함.



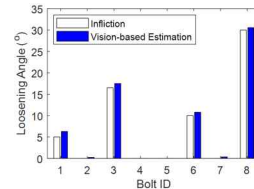
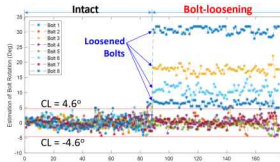
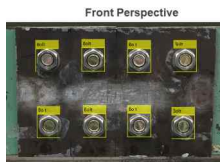
R-CNN/HLT를 이용한 영상기반 볼트 연결부 손상감지 실험(시편 대상)



촬영 각도에 따른 취득 이미지(Horiznotal perspective)



촬영 각도에 따른 취득 이미지(Vertical perspective)

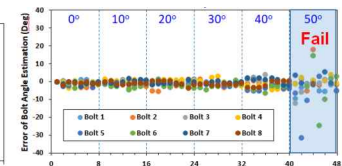
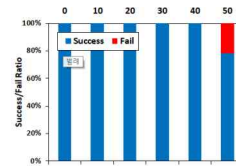
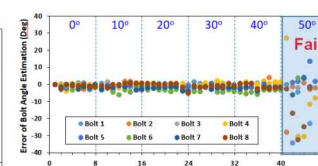
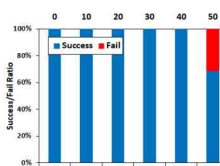


촬영 각도 및 부식상태에 따른 볼트 식별 결과

볼트 풀림 모니터링

볼트 풀림 모니터링 및 풀림량 식별 결과

- 여러 가지 촬영 각도에 대한 볼트 연결부 이미지를 확보하고, 볼트이미지 검출 및 볼트 풀림각도 식별과정을 수행한 결과 50° 경우에서만 볼트 이미지 검출 성공률이 약 70%로 급격히 감소하고 볼트 풀림각도 식별결과에서 또한 회전각 추정 오차가 급격히 증가하는 경향을 보임. 0° ~ 40°의 범위에서는 볼트 이미지 검출 100% 식별 완료.

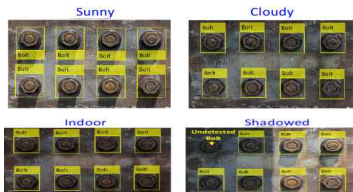


Horizontal perspective

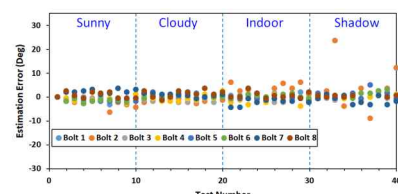
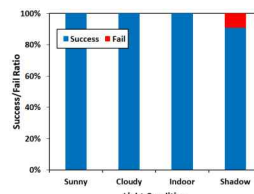
Vertical perspective

원근 왜곡 정도에 따른 볼트 풀림 모니터링 및 풀림 각도 식별 결과

- 일조 조건에 따른 성능 평가 결과, 맑음, 흐림 조건을 포함한 실내 조건에서는 모든 볼트를 정확히 검출하였으나, 그림자가 발생한 경우 볼트 이미지 검출 성공률은 약 90%로 나타남.



일조조건에 따른 볼트 연결부 볼트 식별

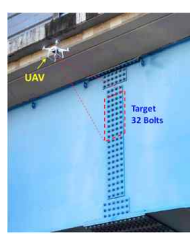


일조조건에 따른 볼트 풀림 식별 결과

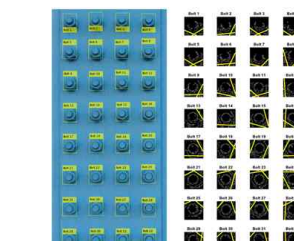
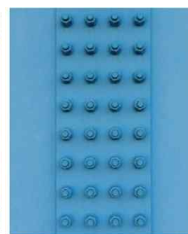
- 볼트 연결부 부분모형이 아닌 실제 교량 부재를 구성하는 볼트 연결부에 대한 드론 이미지를 촬영을 수행함. 고가도로의 박스 거더 표면에 대한 이미지 촬영 후, R-CNN 기반의 손상 탐지 알고리즘을 적용하여 관심영역 내의 32개의 볼트에 대한 볼트 연결부 손상 탐지를 수행함.



실험 대상 교량



드론을 이용한 볼트 연결부 촬영



볼트 탐지 및 볼트 회전각 추정

- 촬영각도 10° 이내로 총 30회의 영상자료를 활용하여 볼트 각도를 추정한 결과 오차범위 2.95°이며, 이 때 볼트의 각도별 오차범위가 매우 균등하게 나타남.(R2 of linear regression : 0.9964)

(7) 실교량 현장 시험 환경 구축 및 데이터 획득 - 하정육교(상,하) 및 등선교

- 요소기술의 현장 검증을 위한 시험을 위하여 STB(단일박스) 교량 중 하정육교를 선정함. 실험대상인 하정육교는 강상자형 교량형식으로 단일거더 및 총 3개의 경간으로 이루어져 있으며 총 길이는 140m에 해당함.
- 데이터 획득은 3경간에 대한 주형(강박스) 및 횡형, 종형 그리고 난간의 손상발생 여부를 드론을 이용하여 촬영하였으며, 동시에 열화상 영상장비를 이용하여 접근이 가능한 주형 내, 외부의 손상부위를 촬영하였음.



실외 시험 수행 (하정육교(상), (하))

- 동적환경에서 검증된 균열탐지 알고리즘을 현장 이미지에 적용하기 위한 실교량 현장 테스트 수행을 위하여 또 다른 T/B 교량 후보인 춘천 등선교에서 테스트 비행을 수행함.
- CTE 1-2에서 개발한 V-Type 무인검사장비에 180° 회전이 가능한 짐벌을 장착하여 바닥판 검사를 수행하였으며, 동시에 교각 외관에 발생한 콘크리트 백태 및 박락 탐지를 위한 실증 테스트가 동시에 진행되었음.

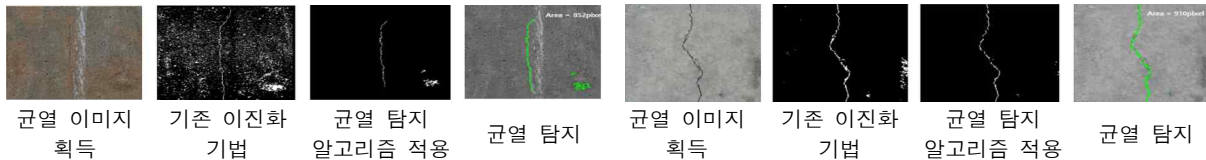


실외시험 수행 (춘천 등선교)

균열탐지 영역(1/2)

균열탐지 영역(2/2)

- 테스트 비행을 통해 획득한 콘크리트 교각 이미지에 대하여 개선된 균열 탐지 알고리즘을 적용하고, 픽셀단위의 정량화 값을 도출하여 동적환경에서 획득된 이미지에 대한 균열 탐지 알고리즘을 검증하였음.



균열 이미지 획득

기존 이진화 기법

균열 탐지 알고리즘 적용

균열 탐지

균열 이미지 획득

기존 이진화 기법

균열 탐지 알고리즘 적용

균열 탐지

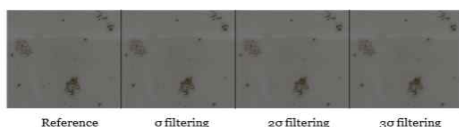
(8) 이미지 품질 평가(Quality Assessment) 및 품질 개선(Quality Enhancement) 기법 개발

- 드론을 이용한 촬영 이미지의 경우 진동 및 바람에 의한 모션 블러(Motion blur)에 취약하며, 이는 이미지 품질과 직결됨.
- 블러 발생의 정도는 이미지의 Sharpness와 관련된 Gray-Intensity의 그라디언트 값의 변화를 통해 추정 가능하며, 또한 노출 및 평균적인 Gray level의 정도에 따라 이미지의 품질을 평가하는 기준(Threshold)을 결정할 수 있음.
- 의미있는 기준값을 제시하기 위하여 평균값(Mean)과 평균-표준편차, 평균+표준편차로 구분되는 3개의 기준값을 제시함.

$$G(Horizontal, Vertical) = \frac{\sqrt{(G(i,j)-G(i,j+1))^2 + (G(i,j)-G(i+1,j))^2}}{\sqrt{Image\ size^2}}$$

이미지 품질평가를 위한 품질 기준(Measure)

- 제안한 Measure의 객관성을 검증하기 위하여 블러가 발생한 이미지를 인위적으로 생성하여 기존의 이미지와 비교 분석을 수행하였음.

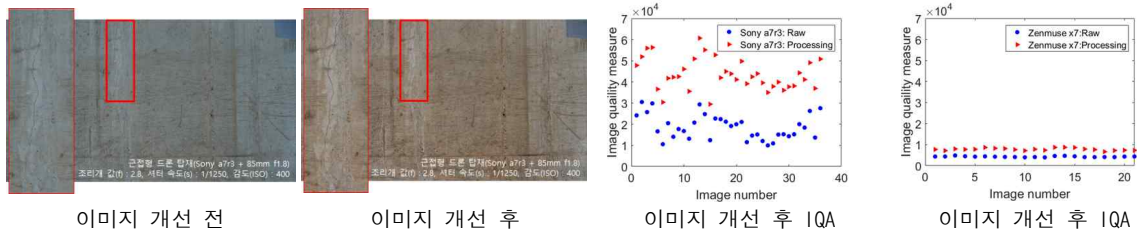


Reference 0 filtering 20 filtering 30 filtering
2-dimensional 가우시안 필터링을 통한
인공 블러 발생

IQA	Horizontal	Vertical	Total
Ref	1146	1184	1891
δ	537	549	909
2 δ	240	237	411
3 δ	150	142	254

표. 인공블러 발생 이미지와 원본 이미지의
IQA 비교 결과

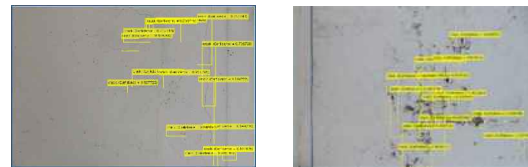
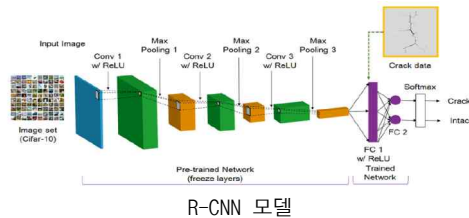
- 상용 S/W 인 Photoshop CC 및 Camera Raw 11.3을 활용하여 영상 품질 평가 이전 단계에서 데이터 전처리 과정을 수행하며, 이미지 개선 전, 후를 비교하여 앞서 제안한 IQA로 품질 평가를 수행함.



- 이미지 전처리 과정(Pre-Processing)의 성능 검증 결과 이미지 품질 향상 및 왜곡과 관련된 파라미터를 보정하여 얻은 이미지의 경우 최대 약 2.5배까지 Quality score가 향상됨을 확인함.

(9) 강재 및 콘크리트 손상 탐지를 위한 딥러닝 모델 개발 및 검증

- 영상처리기법(Image Processing Technique)을 이용한 균열 탐지기법은 고해상도 이미지(6000x3376) 처리에 많은 시간이 소요되며, 따라서 전체 이미지 내에서 빠르게 손상 부위를 탐지하기 위한 딥러닝 모델을 개발하고 이를 검증하는 연구를 수행함. 객체 검출에 좋은 성능을 나타내는 R-CNN(Regions with Convolutional Neural Network) 모델을 적용하였음.
- 실제 교량 콘크리트 균열 이미지 348장(256 x 256)의 이미지를 확보하고 학습 데이터(training set)로 활용하였으며, 전송학습(transfer learning) 기법을 적용하여 보유 데이터 셋이 부족한 점을 보완하기 위하여 rich 데이터 셋(Cifar-10, 5만개의 데이터셋)으로 미리 네트워크를 구성함.



딥러닝(R-CNN) 모델을 이용한 균열 검출

- 개발된 R-CNN 모델의 검증을 위하여, 소형 폐교량을 대상으로 이미지 획득 후 손상 탐지 실험을 수행하였음. 실험에 사용된 드론은 상용드론(Inspire2, DJI)이며, 정량화 단계에서 균열의 크기와 폭을 알 수 있도록 대상 구조물에 Maker를 부착하여 촬영함. 실험결과 GSD(Ground Sampling Distance)는 0.1cm/pix 이며, 총 277장의 이미지를 획득함.
- 손상을 포함한 탐지 영역에 대해 앞서 개발한 콘크리트 균열 탐지 알고리즘을 적용한 결과, 총 12개의 균열 중 10개의 균열에 대해 오차범위 1~2% 이내로 정량화가 가능하였으며, 결과는 표와 같음.

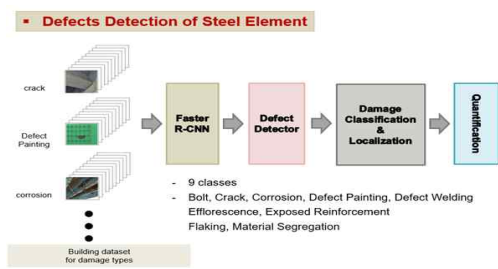
표. R-CNN 레이어 별 구동 정보

Layer	Height	Width	Depth	Operator	Height	Width	Stride	Padding
Input	32	32	3	Conv 1 w /ReLU	5	5	1	2
L1	32	32	32	pool 1	3	3	2	0
L2	16	16	32	Conv 2 /ReLU	5	5	1	2
L3	16	16	32	pool 2	3	3	2	0
L4	8	8	32	Conv 3 w /ReLU	5	5	1	2
L5	8	8	64	pool 3	3	3	2	0
L6	4	4	64	-	-	-	-	-
L7	1	1	64	Fully Connected 1	-	-	-	-
L8	1	1	2	Fully Connected 2	-	-	-	-
L9	1	1	2	Softmax	-	-	-	-

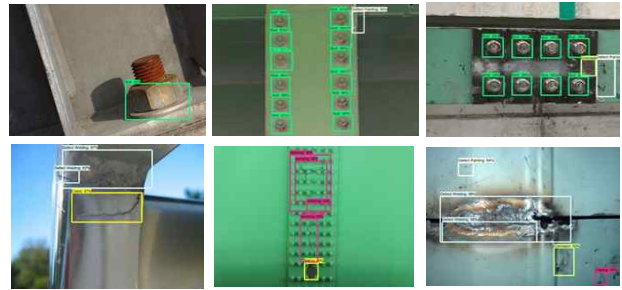
표. 균열 탐지 결과

Num	폭	길이	Num	폭	길이
1	1.92	48.68	7	2.47	78.43
2	1.10	60.09	8	1.59	6.60
3	1.10	27.94	9	1.10	35.01
4	1.37	48.59	10	0.53	30.79
5	1.37	17.08	11	0.55	19.96
6	1.92	63.56	12	0.55	8.32

- 강재 손상 유형을 분류 및 탐지 (균열, 도장, 탈락, 부식 등)하기 위한 기존 R-CNN 모델보다 강력한 faster R-CNN 모델을 개발함. 1300장의 학습 데이터 및 8개의 분류 유형으로 학습시킨 faster R-CNN 모델을 활용하여 강재 손상을 포함한 100장의 검증 데이터를 적용한 결과 4개의 유형을 탐지함.



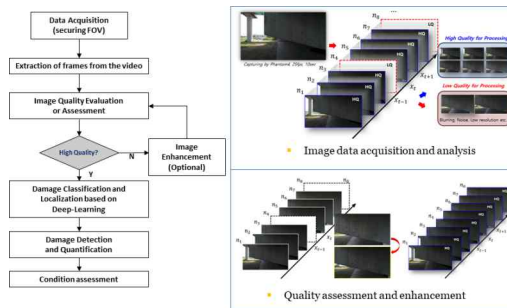
강재 손상 분류를 딥러닝 모델(faster R-CNN)



강재 손상 분류 결과

(10) 강재 및 콘크리트 균열 탐지 알고리즘 검증을 위한 실험량 실증 테스트 수행

- 2차년도에 선정된 T/B 교량인 춘천 등선교를 대상으로 점검 시나리오에 맞추어 데이터 획득, 이미지 품질 평가 및 개선, 딥러닝 기반의 손상 분류, 손상 탐지를 수행함.

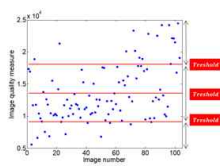


실험량 실증 테스트 수행 시나리오

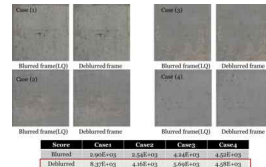


F.O.V. 설정 및 데이터 획득

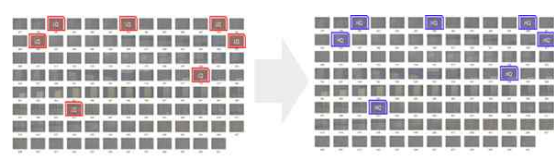
- 총 10분간 촬영된 영상에서 추출된 6,000장의 이미지 프레임을 중복도 20% ~ 30%를 고려하여 선별한 결과 총 103장의 이미지를 추출함.



이미지 품질 평가 수행

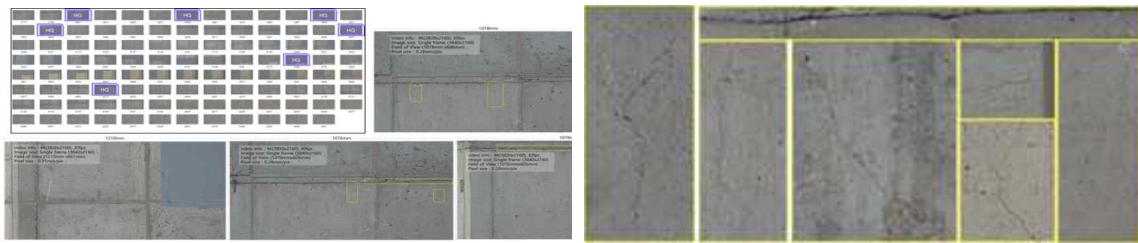


이미지 품질 개선 수행



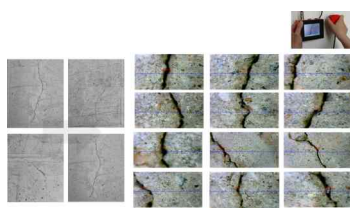
품질 평가 및 개선 후 전체 프레임

- 추출된 이미지의 품질을 평가하기 위하여 앞서 제안한 영상 품질 평가 기준(Image Quality Measure)을 적용하였으며, 그결과 총 103장의 이미지 중 7장의 이미지가 기준값(Threshold) 이하의 값으로 나타남.
- Low Quality 그룹으로 분류된 7장에 이미지를 대상으로 Deblurring 알고리즘 적용을 통해 모션 블러의 영향을 감소시켰으며, 다시 한번 이미지 품질평가 단계를 거쳐 피드백을 수행한 결과 7장의 이미지의 IQM 값이 Threshold 이상의 값을 나타냄.
- 총 103장의 이미지 프레임은 관심영역(Region of Interest)을 모두 커버함으로써 대상 부재의 검사영역을 빠짐없이 나타내며, 딥러닝(R-CNN)을 활용한 균열 탐지를 수행하였음. 균열을 포함하고 있는 이미지를 미리 학습된 딥러닝 모델을 활용하여 검사를 수행한 결과, 딥러닝 기반의 균열 위치 탐지 알고리즘은 빠른 연산속도와 높은 정확도를 보여줌.

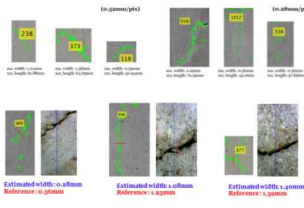


딥러닝 기반의 균열 탐지 알고리즘 적용

- 마지막 단계로, 딥러닝 기반의 균열 위치 탐지 결과 얻은 균열을 포함한 박스 영역에 대해 2차년도에서 개발한 균열 정량화 알고리즘을 적용하고 실제 균열의 크기를 측정한 값과 비교 분석을 수행함.



실제 균열 크기 측정을 통한
비교 데이터 셋 확보



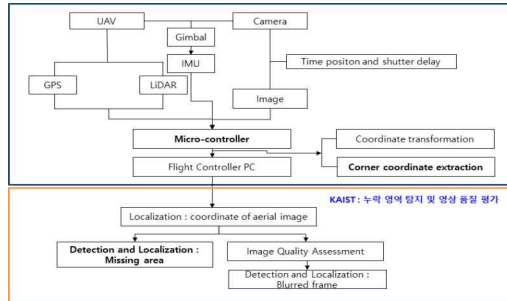
IPT를 이용한 균열 정량화
값과 비교 수행

Crack	1	2	3	4	5	6
Estimated	0.28	0.28	0.56	0.84	0.28	0.56
Measured	0.20	0.22	0.42	0.76	0.27	0.50
Error	0.08	0.06	0.14	0.08	0.01	0.06

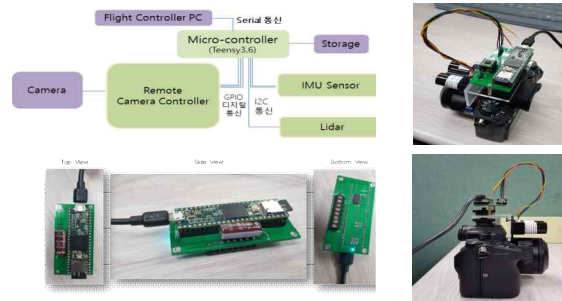
균열 정량화 비교 결과

(11) 영상정보 통합정보를 이용한 이미지 프레임의 좌표 추정 및 누락 영역 검출 기법 개발/검증

- 본 연구에서는 영상 및 드론의 로그정보(GPS, IMU, LiDAR distance)를 통합하는 MCU(Micro Control Unit)를 개발하고 이미지 프레임의 중심좌표 추정을 통한 누락영역 검출 기법을 연구함.



영상정보 통합 및 누락 영역 탐지 알고리즘



Micro controller(Teensy 3.6 기반) 및 지그제작

- 영상정보와 영상정보가 기록되는 순간의로그 데이터간 Sync통합을 위한 MCU기반 영상제어 장치(Teensy 3.6)를 설계함. MCU를 활용하여 영상정보와 계측된 데이터 셋(시간, GPS, IMU, LiDAR 정보)이 통합되어 함께 저장됨.



영상정보(이미지)

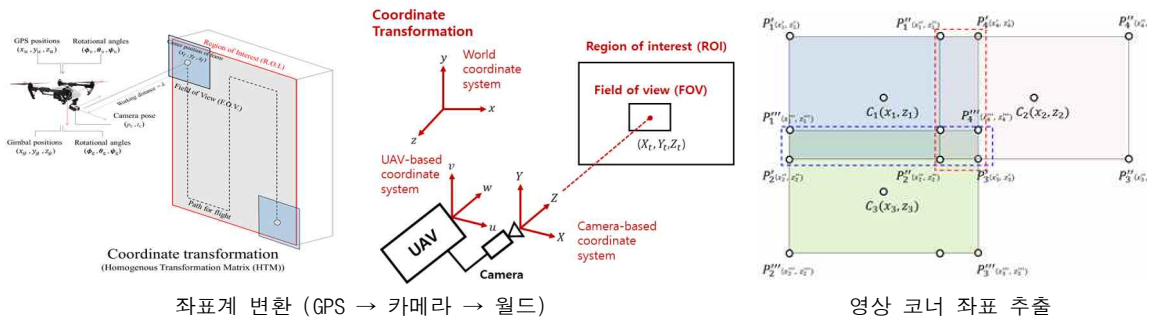


로그 데이터(GPS+IMU+LiDAR)

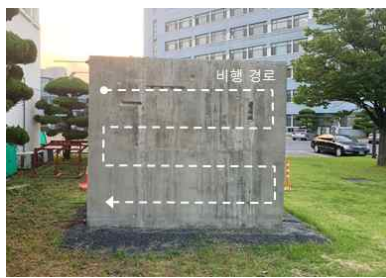
No	Date	Time	Distance	Longitude	Latitude	Altitude
1	2019-7-9	16:16:58	0.85	24.38	5.75	-4.56
2	2019-7-9	16:16:58	0.83	24.38	5.69	-4.56
3	2019-7-9	16:16:58	0.83	24.69	5.94	-4.38
4	2019-7-9	16:16:58	0.87	24.75	6.06	-4.44
5	2019-7-9	16:16:58	0.83	24.81	5.94	-4.38
6	2019-7-9	16:16:58	0.83	24.81	6.06	-4.25
7	2019-7-9	16:16:59	0.05	24.80	6.25	-4.06
8	2019-7-9	16:16:59	0.82	24.94	6.31	-4.12
9	2019-7-9	16:16:59	0.81	25.00	6.38	-4.00
10	2019-7-9	16:16:59	0.81	25.00	6.38	-4.00

통합정보 저장

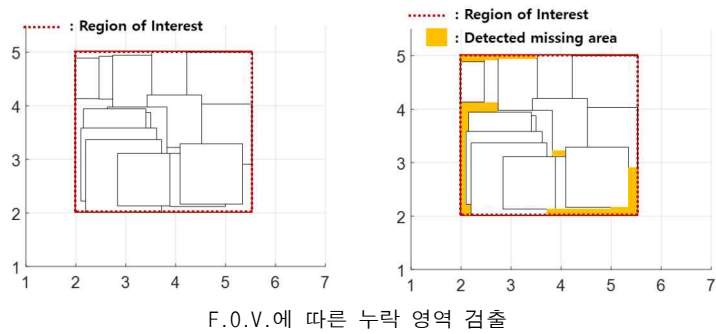
- MCU 제어를 통해 저장된 GPS 좌표값과 자세정보(IMU)를 이용하여 이미지 프레임의 중심 위치를 추정함. 이 때 1D LiDAR를 통해 계측된 거리, RGB 카메라의 센서 크기, 렌즈의 초점거리 등을 활용하여 F.O.V.(Feild of View)의 크기를 계산할 수 있고, 이미지 프레임의 중심 위치와 F.O.V.의 크기를 고려하여 이미지 프레임의 위치를 계산함.



- 가로 3.5m x 세로 3.0m 콘크리트 시험체 대상 수동비행으로 외벽면 이미지 획득 후, 상용 기체에 기록된 GPS 데이터 및 짐벌 자세 정보를 활용한 좌표 변환 및 영상 센터 좌표 추출 기법을 검증함.
- 상대좌표계를 도입하여 R.O.I. 영역에 Plot 후 누락된 영역을 탐지하는 과정을 수행함.



외부시험체 및 비행경로 설정

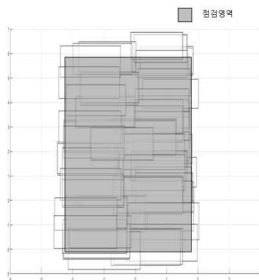


F.O.V.에 따른 누락 영역 검출

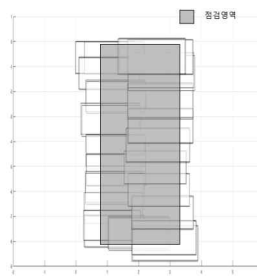
- 콘크리트 외부 시험체를 대상으로 누락영역 탐지 알고리즘의 검증 이후, 실제 T/B 교량인 등선교의 1개 교각 2면 및 1개 바닥판에 대한 실험을 수행함.



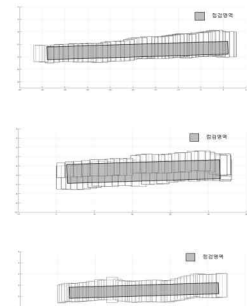
비행경로 설정



교각 앞면 누락영역 탐지



교각 옆면 누락영역 탐지



바닥판 누락영역탐지
(바닥판 좌측, 중앙, 우측)

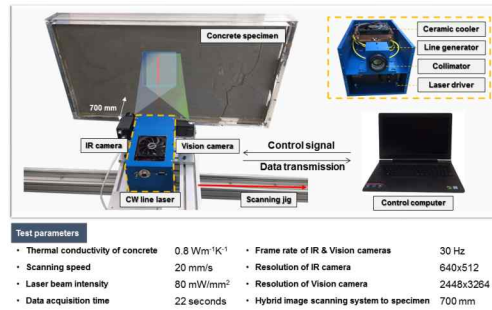
(CTE3-3) CCD/IR영상 기반 강재 · 콘크리트 균열평가 기술 개발 (세종대학교 산학협력단)

성과 기준					
질적성과지표		목표치	달성치	측정방법	검증방법
①	하이브리드 영상을 통한 측정 가능한 강재 · 콘크리트 균열 폭	100 μ m	100 μ m	실측 데이터와 비교	성능실험보고서
②	스캐닝을 통한 단위 면적당 균열 정량화 오차	3%	3%	실측 데이터와 비교	성능실험보고서
③	1m ² 단위면적당 조사시간	3분	3분	실측 데이터와 비교	성능실험보고서

(1) UAV 부착용 소형화 이중영상 시스템 구축

■ 무인체를 활용한 이중영상 테스트를 통한 알고리즘 고도화

- UAV에 하이브리드 이미지 스캐닝 시스템을 부착하기 위해, 소형화 및 경량화를 수행하여 소형화 하이브리드 이미지 스캐닝 시스템을 아래 그림과 같이 개발하였다. 약 10 kg의 무게를 차지하였던 CW line laser의 무게를 기존 알루미늄 쿨러에서 세라믹 쿨러로 대체하고 소형 드라이버를 활용하여 1.72 kg으로 대폭 감소시켰다. (레이저 콜리메이터 (410 g) + 레이저 드라이버 (730 g) + 레이저 다이오드 & 쿨러 (580 g)) 기존 CW line laser보다 Laser 출력은 25 W에서 20 W로 감소되었으나, Line beam width를 2~3 mm 수준에서 1 mm 수준으로 축소함으로써 Laser intensity는 기존보다 향상되어, 정밀한 균열 검출 결과를 보인다.



소형화 하이브리드 이미지 스캐닝 시스템

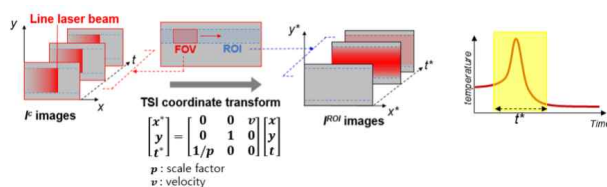
(2) CCD/IR 하이브리드 이미지 기반 균열평가 알고리즘 개발

■ CCD/IR 이미지 왜곡 보정 알고리즘 개발

- 하이브리드 이미지 스캐닝 시스템으로 취득된 CCD/IR 영상 (Raw CCD/IR images)은 카메라 렌즈로 인해 발생한 렌즈계 왜곡에 의해 실제 균열의 크기를 정확하게 반영하지 못한다. 왜곡 보정을 위해 대상 구조물의 표면에 교정 마커(Calibration marker)를 부착하고 여러 각도에서 촬영하여 카메라 내부 파라미터와 외부 파라미터를 추출하여 왜곡 보정을 수행한다. 해당 프로세스는 CCD/IR 카메라에 대해 각 파라미터를 추출하여 수행되며, 그 결과로 교정 CCD/IR 영상 (Calibrated CCD/IR image, C^C/I^C image)을 취득할 수 있다.

■ 시공간 축 변환 프로세스 (IR image)

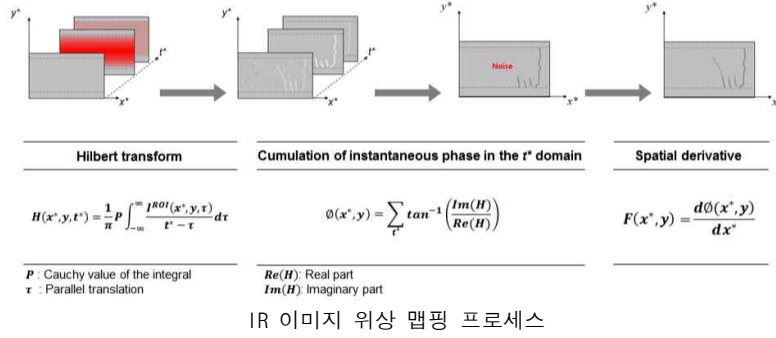
- IR 영상에 대해 축 변환 프로세스를 수행한다. 라인 레이저로 시편의 표면에 국부적으로 열파를 가진하고 이를 IR 영상으로 취득한다. 취득된 영상에 대해 축 변환 프로세스를 수행하면 열파를 전체 관심영역에 대해 동시에 균등한 열파가 발생하는 IR 통합 영상 (IR ROI images, I^{ROI} images)을 취득할 수 있으며, 해당 영상을 통해 균열 정보를 확인할 수 있다.



IR 이미지 시공간 축 변환 알고리즘

■ 위상 맵핑 프로세스 (IR image)

- IR 통합 영상은 큰 균열과 미세 균열 간 진폭의 차이로 인해 상대적으로 진폭이 작은 미세 균열이 가려져 부가적인 프로세스가 필요하다. 이와 같은 한계를 극복하기 위해 위상 맵핑 프로세스를 수행하며 해당 내용은 아래 그림에 나타낸 것과 같다. 첫째로, 힐버트 변환 (Hilbert transform)을 수행하여 픽셀값의 즉시적 위상 값을 추출하고, 이를 다시 영상에 매핑하는 과정이다. 해당 과정을 통해 각 픽셀의 값들이 $-\pi$ 에서 π 사이의 값으로 평준화되며, 미세 균열의 특성치가 이전보다 극대화되어 시각화된다. 하지만 해당 과정으로 인해 노이즈 역시 함께 증가하게 되어, 스캐닝 방향으로 공간 미분을 수행하여 제거하는 과정이 수행된다. 해당 과정을 통해 균열 요소만을 시각화할 수 있으며, 최종 IR 이미지 (Final IR image, I^{Final} image) 한 장을 취득할 수 있다.



■ Feature control 기반 CCD 영상 Stitching (CCD image)

- 이어서 부착형 무인체가 미리 정해진 경로를 따라 동작하는 제어 조건을 반영하여 이미지 정밀 스티칭을 수행한다. 두 이미지에 추출된 특징점 중 가장 유사한 특징점을 찾아 매칭을 수행한다. 제어 조건 없이 이미지 스티칭을 수행할 경우 콘크리트 표면의 불균질성으로 인해 특징 간 매칭이 정확하게 이루어지지 않는다. 제어 조건을 적용하기 위해 특징 매칭을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\widehat{M}_i^k(x, y) = f_i^n(x, y) - f_{(i+1)}^m(x, y) \quad \forall k \quad (1)$$

- $\widehat{M}_i^k(x, y)$ 는 매칭된 특징점간의 거리, $f_i^n(x, y)$ 는 i 번째 이미지의 매칭된 특징이고 $f_{(i+1)}^m(x, y)$ 는 $i+1$ 번째 이미지의 매칭된 특징이다. 이때, 부착형 무인체의 경로를 제어 조건으로 활용하면 보다 정밀한 스티칭이 가능한 특징만을 추출할 수 있다. 부착형 무인체는 정해진 경로를 따라 스캐닝을 수행하므로 매칭된 특징점간의 거리는 일정한 경향을 갖는다. 진동이나 표면 조건으로 인한 떨림 등으로 인해 발생하는 에러를 감안하여 Scale factor를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

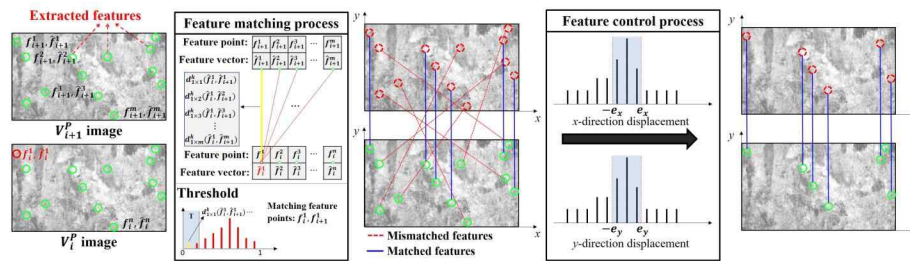
$$\widehat{C}_i^k(x, y) = \begin{cases} 1 & \left| \widehat{M}_i^k(x, 0) - \argmax(m_x) \right| \leq e_x \\ 1 & \left| \widehat{M}_i^k(0, y) - \argmax(m_y) \right| \leq e_y \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

- $\widehat{C}_i^k(x, y)$ 는 scale factor이고, m_x 와 m_y 는 각각 x , y 방향의 $\widehat{M}_i^k(x, y)$ 의 히스토그램이다. $\argmax(m_x)$ 와 $\argmax(m_y)$ 는 m_x 와 m_y 를 최대값으로 만들어주는 히스토그램 bin이다. e_x 와 e_y 는 진동에러이다. 수식 (2)를 통해 계산한 scale factor를 이용해 제어 조건을 적용하면 다음으로 이미지 정밀 스티칭을 위한 매칭점들만을 남길 수 있다. 이를 통해 정밀 스티칭을 수행한다.

$$\widehat{MC}_i^j(x, y) = \widehat{C}_i^k \cdot \widehat{M}_i^k \quad \forall k \quad (3)$$

- 마지막으로 각 프레임마다 매칭 feature의 x , y 방향 변위를 각각 계산하여 frame 별 displacement를 산출하

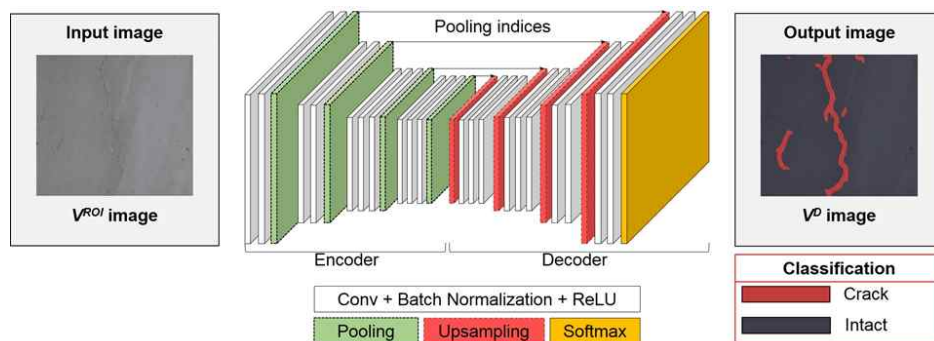
면, 속도 변화 및 스캐닝 방향 변화 등을 추출된 displacement vector를 추출할 수 있다. 추출된 vector를 통해 역방향 스캐닝 또는 경로 이탈 등의 경우를 제어할 수 있다.



이미지 정밀 스티칭을 위한 특징 매칭 및 특징 제어 절차

■ 균열 검출용 네트워크 및 이중영상 매칭

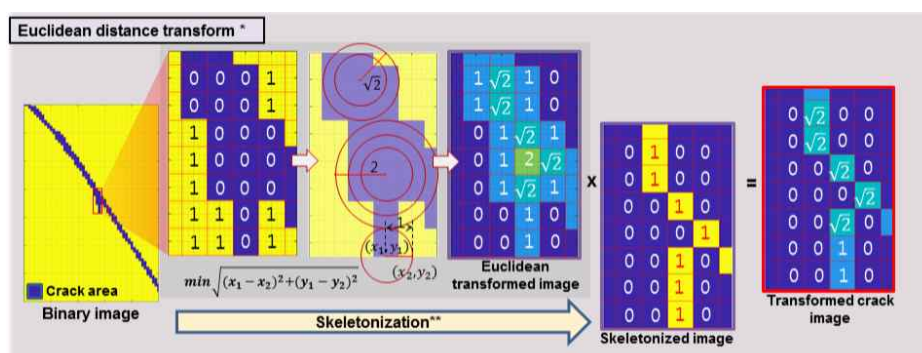
- 스티칭된 비전 이미지로부터 균열 검출을 수행하기 위해 아래 그림에 나타난 것과 같이 균열 검출용 semantic segmentation 네트워크를 구축하였다. 총 382 개의 균열 이미지를 학습시켰으며, 증강 기법을 통해 약 1528 개의 이미지를 활용하여 네트워크를 학습시켰다. 균열 검출 이후에 검출된 영역을 비전 이미지로부터 열화상 이미지에 맵핑하여 매칭한 뒤, CNN을 통해 오보 여부를 판단한다.



균열 검출용 딥러닝 아키텍처 Semantic segmentation network

■ Euclidean distance transform 기반 정량화

- Semantic segmentation network를 통해 취득한 이미지는 Crack의 영역이 segmentation되어 있으나 정밀한 크기를 반영하기 어려우므로, 이중영상을 통해 오보를 줄이고 남은 영역에 대해서만 정량화를 수행한다. 아래 그림에 나타난 것과 같이 Euclidean distance transform을 통해 인접한 픽셀 간 거리를 산정하여 해당 픽셀에 값을 부여하고, Skeletonization 결과와 곱하여 균열 폭에 대한 값으로 치환한다. 여기에 Scale factor를 곱하면 균열폭이 반영된 정량화 영상을 얻을 수 있다.

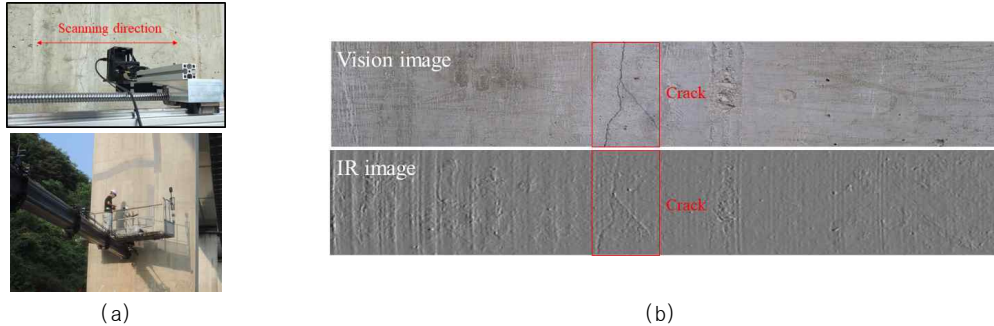


Euclidean distance transform 기반 정량화

(3) 무인체를 활용한 이중영상 테스트를 통한 실효성 검증 수행 실내 및 실교량 검증 테스트 수행

■ 실교량 검증 테스트 (사다리차 실험)

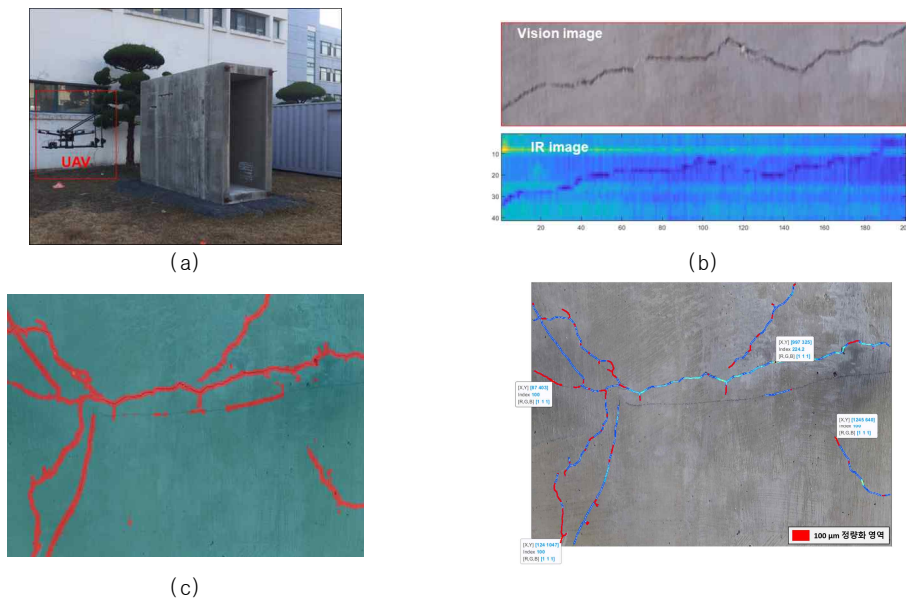
- 실내 검증 테스트에 이어 실교량 테스트를 수행하였다. 부착형 드론 환경 검증 이전에, 아래 그림과 같이 사다리차에 이중영상 시스템과 함께 스캐닝 지그를 부착하여 스캐닝을 수행하였다. 추출된 Feature를 스캐닝 지그의 작동 조건에 기반하여 제어 이미지 스티칭을 수행하여, 아래와 같이 정밀한 이미지 스티칭 결과를 확인할 수 있으며, 속도 파라미터를 산출하여 열화상 이미지도 성공적으로 균열이 성공적으로 이미징 되어 기 알고리즘을 성공적으로 검증하였다.



사다리차 실험: (a) 이중영상 시스템 및 사다리차 (b) 균열 검출 및 매칭 결과

■ KAIST 공역 Mock-up 시편 검증 테스트 (부착형 무인체 실험)

- 부착형 무인체를 활용하여 아래 그림 (a)에 나타난 것과 같이 검증 테스트를 수행하여 Mock-up 시편에 존재하는 균열을 스캐닝하여 이중영상 데이터를 취득하였다. 기 구축한 알고리즘을 활용하여 아래 그림 (b)에 나타난 것과 같이 Mock-up 시편에 존재하는 균열에 대해 각 프로세싱 결과 비전 및 열화상 이미지에서 성공적으로 균열을 이미징하였으며, 그림 (c)에 나타난 것과 같이 성공적으로 균열을 검출하였다. 이중영상을 활용해 딥러닝 기반 균열 검출 이미지와의 열화상 이미지를 상호비교 검증을 수행하여 균열 검출 과정에서 발생할 수 있는 오보를 줄일 수 있다. 이어서 정량화 알고리즘을 활용하여 Mock-up 시편에 존재하는 100 μm 내의 미소 균열의 경우도 성공적으로 정량화하였으며, 각 검출 결과는 Mock-up 시편 제작 시 작성한 Ground truth와 상호 비교하여 성공적으로 균열을 정량화하였음을 확인하였다.



부착형 드론을 활용한 Mock-up 균열 검출 실험: (a) 부착형 드론 및 Mock-up 시편 (b) 비전 및 열화상 프로세싱 결과 및 (c) 균열 검출 결과 및 (d) 균열 정량화 결과(100 μm 단위 검출)

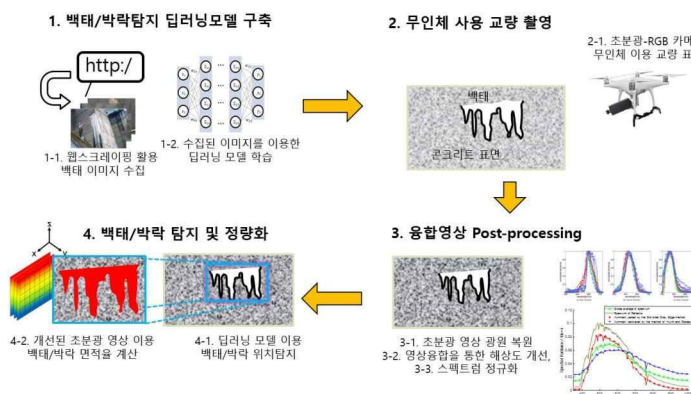
(CTE3-4) 딥러닝 기반 콘크리트 백태 및 박락 탐지 기술 (서울시립대학교 산학협력단)

성과 기준					
질적성과지표		목표치	달성치	측정방법	검증방법
①	백태유무 탐지율	95%	100%	실측 데이터와 비교	실제 교량에서 Mask R-CNN을 이용한 다중 콘크리트 손상 탐지 수행
②	박락유무 탐지율	95%	100%	실측 데이터와 비교	외부 콘크리트 시험체에서 Mask R-CNN을 이용한 다중 콘크리트 손상 탐지 수행
③	백태발생 면적율	2%	0.1%	실측 데이터와 비교	실제 교량에서 Mask R-CNN을 이용한 다중 콘크리트 손상 탐지 수행
④	박락 면적율	2%	0.16%	실측 데이터와 비교	외부 콘크리트 시험체에서 Mask R-CNN을 이용한 다중 콘크리트 손상 탐지 수행
⑤	계산속도	5분	2분 40초	시간 측정	외부 콘크리트 시험체에서 Mask R-CNN을 이용한 스캐닝 시간 측정

(1) 초분광 영상과 일반 영상 정보를 활용한 비접촉식 교량 상태 점검 기술 개발 개요

- 교량 안전점검의 효율화를 위한 초분광(Hyperspectral Image, HSI) 및 일반 영상을 융합한 신속한 백태/박락 탐지 기술 개발
- 개발된 HSI 및 RGB 영상 기반 백태/박락 탐지 알고리즘의 실내 및 실외 실험을 통한 실험적 검증
- 개발된 백태/박락 탐지 알고리즘이 무인체로 취득된 영상에서 높은 성능을 보이도록 추가적인 알고리즘 개발 및 검증
- HSI-RGB 융합 영상을 이용한 콘크리트 백태/박락 정량화 framework는 아래 그림처럼 총 4단계로 구성됨.
- 먼저 1단계에서 백태 및 박락의 위치를 신속하게 탐지하기 위한 딥러닝 모델을 구축함. 이 때 인터넷 및 실구조물에서 취득된 백태 및 박락 RGB 영상을 이용하여 딥러닝 모델을 학습시킴. 2단계에서는 무인체에 탑재된 초분광 및 RGB 카메라를 이용하여 교량의 표면을 촬영하며 3단계에서 촬영된 HSI에 post-processing을 수행하여(HSI 광원 복원, HSI 해상도 개선, 스펙트럼 정규화) 백태 및 박락 탐지에 최적화 시킴. 마지막 4단계에서는 학습된 딥러닝 모델을 이용하여 백태와 박락의 위치를 신속하게 추적한 후 HSI의 스펙트럼 데이터를 통하여 높은 수준의 손상 정량화를 수행함
- 본 보고서는 먼저 HSI-RGB 융합 영상 시스템 구축에 필요한 요소 기술 개발(초분광 영상 해상도 복원, 초분광 영상 광원 복원, HSI를 이용한 백태 정량화 기술, 백태 및 박락 탐지 딥러닝 모델)에 관한 내용을 서술하며, 최종적으로 실제 구조물에서 무인체를 이용하여 백태 및 박락 탐지를 수행한 내용을 수록하였음.

▶ 초분광 융합 영상 시스템을 이용한 콘크리트 백태/박락 정량화 Framework



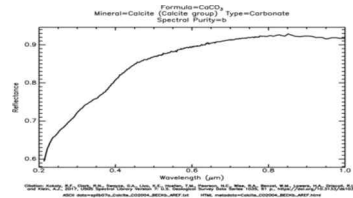
초분광 영상을 이용한 콘크리트 백태/박락 정량화 framework

(2) HSI을 이용한 백태탐지 및 정량화 기술 개발

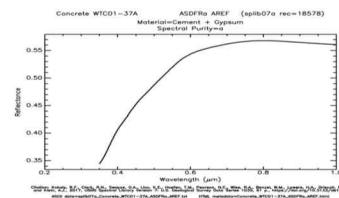
- HSI의 스펙트럼을 이용하여 실제 구조물에서 백태를 탐지하는 알고리즘을 개발 제안된 알고리즘은 실제 콘크리트 표면에서 백태의 주성분인 탄산칼슘의 스펙트럼을 백태로 판단
- 스펙트럼의 유사도를 판단하는 기법으로 Spectral Angle Mapper (SAM)를 선택
- SAM은 두 스펙트럼 사이의 유사성을 각도로 표현하여 스펙트럼을 분류하는 방법. SAM은 스펙트럼을 밴드의 개수와 동일한 차원을 가지는 공간내의 벡터의 형태로 나타내고 테스트 스펙트럼(test spectrum)과 기준 스

펙트럼(reference spectrum) 사이의 각도 (α)를 두 스펙트럼의 내적의 아코사인($\cos^{-1}$)으로 표현

- 백태의 주성분인 탄산칼슘의 스펙트럼과 높은 유사도를 보이는 스펙트럼을 SAM을 사용하여 추출하는 방식을 사용하였음.



(a)



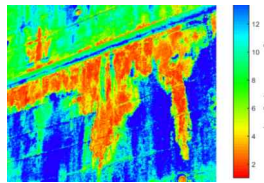
(b)

200-1000nm에서 (a) 방해석(Calcite) 및 (b)콘크리트 스펙트럼 (USGS Spectral Library Version 7)

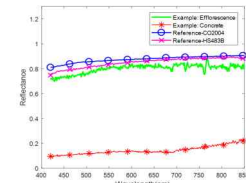
- SAM을 사용하여 제안된 접근법의 성능을 검증하기 위해 서울시립대 교내에 위치한 건물의 외벽과 강원도 춘천에 소재한 교량인 등선교의 교각에서 야외 실험을 실시. 아래 그림은 SAM을 사용한 백태를 탐지한 결과를 나타냄. 그림에서 (a)는 획득한 HSI에서 생성된 RGB 영상, (b)는 방해석 C02004의 기준 스펙트럼과 각 픽셀당 스펙트럼이 보이는 SAM 값, (c)는 HSI에서 추출한 백화, C02004 및 콘크리트 스펙트럼을 나타냄. 또한, (d)는 C02004와 5도 보다 SAM 값을 보이는 영역을 청록(cyan)색으로 나타낸 결과, (e)는 육안에 의하여 백태로 판단된 영역, (f) 색상으로 표현한 confusion matrix 임.
- (c)에서 420-850nm의 범위에서 두 개의 탄산칼슘 스펙트럼과 백화의 스펙트럼 예는 매우 유사하지만 콘크리트의 스펙트럼은 명확한 불일치를 보임. (f)에 나타났듯 False Negative를 나타내는 노란색 픽셀은 주로 경계에 있는 매우 얇은 백태를 따라 분포하며 False Positive를 나타내는 적색은 거의 검출되지 않았음. 따라서 실험 결과는 매우 얇은 백태 및 갈색으로 오염된 백태를 제외한 범위에서 제안된 접근법의 우수한 성능을 보여줌



(a) 초분광 영상에서 재구성된 RGB 영상



(b) 계산된 스펙트럼 각도 (Reference: Calcite C02004)



(c) 백태, 콘크리트 및 Reference 스펙트럼 예시



(d) 백태탐지 결과 임계값 5도 기준



(e) 일반 RGB 영상을 사용한 육안검사 결과 모사



(f) 정확도, 정밀도, 재현을 분포 시각화

제안된 기법을 사용한 백태탐지 결과 및 정확도 분석

(3) RGB 영상을 이용한 초분광 영상 해상도 개선

- 초분광 영상(Hyperspectral image, HSI)의 해상도가 일반 RGB 영상의 해상도보다 낮다는 단점을 극복하기 위하여, RGB 영상을 이용하여 HSI의 해상도를 개선하는 연구를 수행함. Lanaras 등 (2016)의 Spectral Unmixing 기법을 발전시켜 HSI의 낮은 해상도를 개선하는 기술을 개발하고 알고리즘 성능을 실내, 실외 실험을 통하여 검증
- 제안된 해상도 개선 절차는 (1) 고해상도 RGB 영상의 히스토그램을 HSI에서 재구성한 저해상도 RGB 영상의 히스토그램과 일치시키는 단계, (2) 고해상도 RGB 영상에 대해서만 고해상도 HSI의 내성분(endmember)의 존재비(abundance)를 최적화시키는 두 개의 단계로 구성
- 촬영 조건의 불일치가 큰 조건에서 제안된 알고리즘을 검증하기 위하여 공개된 HSI 데이터 셋인 Harvard 데이터 셋을 편집하여 실험을 진행함. 아래 표는 기하학적 변환이 없는 원본 이미지와 두 가지 기하학적 변환이

적용된 이미지를 사용하여 최적화를 수행한 평균 RMSE 및 SAM 값을 보여줌. 제안된 해상도 개선 방법은 Harvard 데이터 세트에서 상당히 낮은 RMSE와 SAM을 달성.

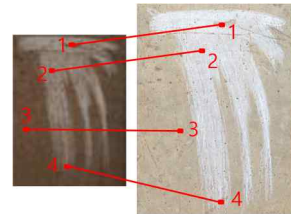
방법		RMSE		SAM	
		Aver.	Med.	Aver.	Med.
모두 일치		2.68	2.57	6.69	5.32
FOV 불일치 (Shear 변형) +색상분포 불일치	$C_x = 0.1$	3.64	2.96	6.73	6.03
	$C_x = 0.2$	4.4	3.56	6.9	6.26
	$C_x = 0.3$	5.19	4.30	7.2	6.18
FOV 불일치 (Translation 변형) +색상분포 불일치	$P_n = 20$	3.56	2.87	6.65	5.65
	$P_n = 40$	4.25	3.27	6.86	5.80
	$P_n = 60$	4.93	3.68	7.08	5.98
	$P_n = 80$	5.60	4.13	7.24	6.20

FOV와 색상분포가 불일치하는 환경에서 제안된 방법의 적용 결과

- 제안된 초분광 영상 해상도 개선 방법의 실제 구조물에서 평가하기 위해 실구조물 백태 영상에서 실험을 진행함.
- 아래 그림과 같이 백태의 4가지 초분광 영상 및 RGB 이미지를 취득. 저해상도 초분광 영상은 60×80의 해상도를 가지며 고해상도 RGB의 해상도는 저해상도 HSI의 16 배인 960 × 1280으로 설정. 해상도가 향상된 영상의 정확도를 평가하기 위해 위치가 동일하다 판단되는 픽셀을 선택하여 SAM을 계산
- 평균 2.57° 의 높은 일치율을 보여 제안한 방법이 현장 환경에서 촬영된 백태의 초분광 영상 해상도 향상에 적용이 될 수 있음을 보임.



아외에서 촬영된 백태 촬영 영상
(상단: 초분광 영상에서 복원된 RGB 영상, 하단: 일반 RGB 영상)



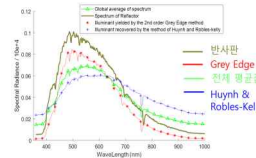
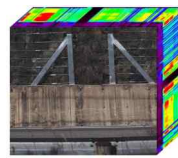
위치가 동일하다 판단되는 픽셀
선택 예시

위치	1	2	3	4	평균
SAM	2.15	1.87	2.59	3.70	2.57

추출된 픽셀간 SAM 비교

(4) 초분광 영상 내 광원 복원 수행

- HSI 분석을 위하여 정확한 광원(illuminant) 획득이 필수적이거나 토목구조물 환경에서 반사판을 설치하여 광원을 획득하는 것은 비효율적임. 이러한 불편함을 최소화하기 위하여 HSI 영상 내의 광원 복원 기술을 적용.
- 광원 복원 기술들 중 (1) 전체 영상의 스펙트럼을 평균 취한 후 일정 계수를 곱해 증폭시키는 방법, (2) 영상 내 물체간 평균 반사율 차이가 무채색이라 가정 후 광원을 Minkowsky norm으로 계산하는 Grey Edge method (van de Weijer & Gevers, 2005), (3) Huynh & Robles-Kelly (2010)이 제안한 영상의 스펙트럼을 shading factor, specularity, 반사율 그리고 광원의 조합으로 표현하는 방법까지 총 세 가지 방법을 검토하였고 실험적으로 가장 정확도가 높은 방법을 선택
- 조사된 방법들의 성능을 평가하기 위해 실제 현장 환경에서 촬영된 초분광 영상에서 각 방법을 사용하여 광원을 복원하였음. 아래 그림의 (b)는 각각의 방법으로 복원된 광원들과 99% 황산바름 반사판에서 획득한 광원을 비교한 그래프임. 그래프에 나타난 것처럼 조사된 방법들 중 Grey-Edge method가 반사판으로 측정된 광원과 가장 유사한 스펙트럼을 보여 추후 연구에 Grey-Edge method를 사용하기로 결정

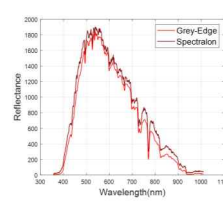
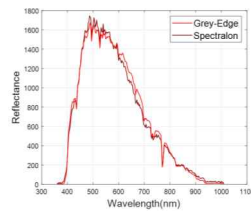


(a) 도로사면에서 취득된 초분광 영상 (b) 광원 복원법에 따른 광원 스펙트럼 비교 그래프

- 실험적으로 검토한 Grey-Edge method의 성능을 검토하기 위해 콘크리트 표면에서 초분광 영상의 광원을 복원하는 실험을 추가적으로 수행함. 아래 그림의 (a)는 촬영된 콘크리트 표면을 나타내며 그림 (b)는 각 콘크리트 표면에서 복원된 광원과 99% 황산바륨 반사판으로 취득된 광원을 비교한 결과임. 국부적인 불일치가 나타나지만 광원의 전체적인 형상을 성공적으로 복원하였음.



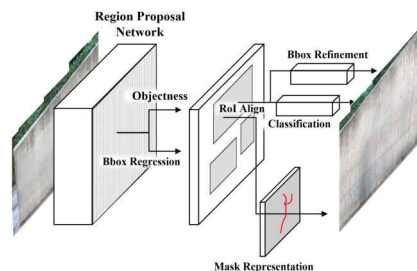
(a) 콘크리트 표면 RGB 영상



(b) 복원된 광원과 99% 황산바륨 반사판으로 취득된 광원 비교.
토목구조물 환경에서 광원 복원 수행 결과

(5) 딥러닝 모델을 이용한 백태/박락 평가 및 다중 손상 탐지

- HSI는 일반 RGB 영상보다 더 높은 스펙트럼 해상도(spectral resolution)를 가지므로 필연적으로 많은 양의 연산량이 요구되며 넓은 토목 구조물을 스캔할 때 가속을 통한 알고리즘 효율화가 필수적임. 따라서 딥러닝 기술을 이용하여 취득된 영상에서 손상부를 먼저 탐지한 후 HSI로 보강된 정량화를 수행함. 취득된 영상에서 손상을 탐지하기 위해 3단계 물체 탐지 딥러닝 프레임 워크, Mask and region-based convolutional neural network (Mask RCNN) (He, Gkioxari, Dollár, & Girshick, 2017)를 사용.



Mask RCNN의 모델 구성

- Mask RCNN을 다중 콘크리트 손상 탐지용으로 사용하기 위해 균열, 백태, 박락, 철근 노출을 인식할 수 있도록 학습시킴. 균열, 백태, 박락의 학습 데이터를 만들기 위해 인터넷에서 이미지를 수집하거나 실제 콘크리트 구조물에서 이미지를 촬영하여 총 806장의 이미지를 수집함.
- 각 조사단위 면적에서 육안을 통해 확인된 백태와 박락의 면적율을 계산한 뒤 학습된 Mask RCNN을 사용하여 확인된 백태와 박락의 면적율을 비교.
- 학습된 Mask RCNN은 5개의 조사면적에 발생한 백태 5개 중 5개를 모두 탐지하였고 1개의 false alarm을 보였음. 5개의 부재에서 육안으로 확인된 백태 면적율과 Mask RCNN이 확인한 면적율 오차의 평균은 0.54%.

- 아래 그림에서 (c)는 콘크리트 슬라브에 발생한 박락 영상이며 아래 그림에서 (d)는 학습된 Mask RCNN을 사용하여 박락을 평가한 뒤 보라색으로 박락부를, 철근 노출부를 파란색으로 나타낸 결과 학습된 Mask RCNN은 5개의 조사면적에 발생한 박락 7개 중 7개를 모두를 탐지하였고 false alarm은 없었음. 5개의 부재에서 육안으로 확인된 박락 면적율과 Mask RCNN이 확인한 면적율 오차의 평균은 1.12%로 나타남



표. 학습된 Mask RCNN의 실제 구조물 백태 및 박락 평가 결과

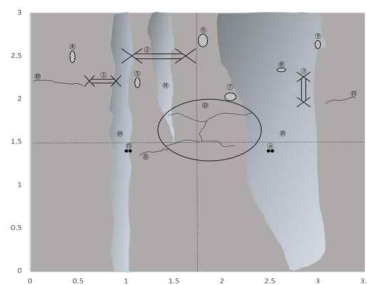
손상 유형	대상 구조물	조사 면적 (m) (높이 × 너비)	손상 면적 (m) (높이 × 너비)	손상 면적율 (%)	탐지 면적 (m) (높이 × 너비)	탐지 면적율 (%)	면적율 오차 (%)
백태	교량 코핑	1.5 × 2.6	0.68 × 0.46	8.0	0.71 × 0.42 0.13 × 0.17	8	0
	콘크리트 벽면-1	1.9 × 2.7	0.59 × 0.25	2.8	0.59 × 0.24	2.7	0.1
	콘크리트 벽면-2	1.0 × 1.8	0.54 × 0.49	14.7	0.58 × 0.50	16.1	1.4
	콘크리트 벽면-3	2.4 × 4.2	0.64 × 0.10	0.6	0.17 × 0.67	1.1	0.5
	콘크리트 벽면-4	4.3 × 11.0	3.40 × 0.49	3.5	3.1 × 0.64	4.2	0.7
	평균						0.54
박락	콘크리트 벽면-5	1.5 × 3.3	0.18 × 2.00	7.2	0.18 × 2.19	7.9	0.7
	콘크리트 슬라브-1	1.6 × 3.3	0.41 × 0.33 0.42 × 0.32	5.1	0.40 × 0.33 0.43 × 0.32	5.1	0
	콘크리트 슬라브-2	0.5 × 0.6	0.10 × 0.18 0.04 × 0.05	6	0.10 × 0.19 0.04 × 0.05	6.3	0.3
	콘크리트 난간	0.8 × 0.9	0.24 × 0.18	6	0.21 × 0.17	4.9	1.1
	벽돌 난간	1.1 × 2.5	0.55 × 0.92	18.4	0.57 × 0.72	14.9	3.5
	평균						1.12

(6) 무인체에서 취득된 이미지를 이용한 실구조물 백태 및 박락 탐지

- 최종적으로 본 기술에서 개발된 딥러닝 모델의 백태 및 박락 탐지 성능을 검증하기 위하여 무인체에서 취득된 RGB 영상을 이용하여 백태 및 박락 탐지를 수행하였음.
- 한국과학기술원에 설치된 콘크리트 외부 시험체에서 무인체(DJI Inspire)로 촬영한 이미지 10장 (해상도 6008 x 3368)에 대해 다중 손상 탐지 진행. 촬영된 이미지 10장을 photoshop의 자동 merge 기능을 사용하여 이미지 스티칭 수행 후 탐지(합성된 이미지 해상도 14218 x 10645). Mask R-CNN에 의한 다중손상 탐지 결과와 육안으로 조사된 손상 탐지 결과를 비교.



한국과학기술원에 설치된 콘크리트 외부 시험체



육안에 의한 콘크리트 손상 조사 결과



콘크리트 외부 시험체 전면부 이미지 및 손상 탐지 결과 (해상도 14218 x 10645)

- 철근 노출의 경우 정밀도 픽셀 단위의 정밀도는 100%, 재현율은 71.4%를 달성하였으며, 시험체 외부에 나타난 모든 철근 노출을 탐지하는데 성공하였음. 박락의 경우도 콘크리트 시험체 외부에 나타난 모든 박락을 검사하는데 성공하였으며, 픽셀단위 정밀도는 100%, 픽셀 단위 재현율은 88.8%를 달성하였음 추가적으로 박락 면적율은 육안 조사 결과(1.37%)와 Mask R-CNN의 결과(1.53%)의 차이가 0.16%로서, 목표인 2% 이내 오차 달성
- 실제 구조물에서 촬영된 영상에서 학습된 Mask R-CNN의 백태 탐지 성능을 검증하기 위하여 추가적인 실외 실험을 수행하였음. 드론 비행이 가능한 남양주시 덕소리에 위치한 폐 전철교량에서 백태 탐지 수행. DJI Mavic 으로 교량 양쪽 벽면에 발생한 백태를 촬영하고 하나의 이미지로 스티칭하여 백태 탐지
- 경의 중앙선 덕소 전철교의 콘크리트 다중 손상 탐지 결과를 정량적으로 평가하였음. 먼저 균열의 경우, 드론과 교각 표면과 거리가 멀어 이미지 상으로 탐지 가능한 균열이 발견되지 않음. 백태의 경우 교각 양쪽 벽면에 총 4군데 발생한 백태를 전부 탐지하여 100% 재현율을 달성하였음 양쪽 교각 벽면에 발생한 철근노출이나 박락은 없었음. 최종적으로 백태 면적율 육안 조사 결과(6.96%)와 Mask R-CNN의 결과(7.06%)의 차이는 0.1%로서, 목표인 2% 이내 오차 달성



덕소 전철교 서쪽부 교각
(해상도 3560 x 5669)



덕소 전철교 동쪽부 교각
(해상도 4652 x 6620)



덕소 전철교 서쪽부 교각
백태 탐지 결과
(해상도 3560 x 5669)



덕소 전철교 동쪽부 교각
백태 탐지 결과
(해상도 4652 x 6620)

(7) 딥러닝 기반 콘크리트 백태 및 박락 탐지 성능 검증을 위한 테스트베드 교량 실증 테스트 수행

- 2차년도에 선정된 T/B 교량인 춘천 등선교를 대상으로 개발된 딥러닝 모델의 백태 및 박락 탐지 성능 검증을 수행함.
- 검증을 위해, 점검영역인 등선교의 교각 및 바닥판을 대상으로 통합 무인검사장비를 이용하여 이미지를 획득하는 실외시험을 수행함.
- 백태 및 박락 탐지 성능 검증을 위해 촬영된 이미지를 대상으로 Mask R-CNN에 의한 다중손상 탐지를 수행함.

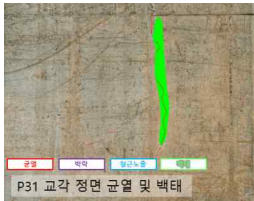


성능 검증을 위한 테스트베드 교량(등선교)



데이터 획득을 위한 실외시험 수행

- Mask R-CNN 기반 자동 손상 탐지 결과로 교각 및 바닥판에서 각각 형광색 및 보라색으로 마스킹하여 백태 및 박락을 검출하였음. 아래 그림과 같이 마스킹된 백태 및 박락에 대한 검출결과를 확인 할 수 있으며, 실제 이미지와 비교하여 확인한 결과 백태 및 박락이 성공적으로 마스킹되어 알고리즘을 검증함.
- 손상 정량화를 위해, 이미지에서 마스킹된 결과에서 손상 종류, 손상 크기, 손상 위치 등의 정량적 정보가 포함된 Excel 형식으로 저장됨.



자동 손상탐지 결과(교각)



자동 손상탐지 결과
(바닥판 거더 외부)



바닥판 원본 이미지



바닥판 손상 탐지 결과

	A	B	C	D	E	F
1	pixel resolution	0.223 mm				
2	number	damage_type	damage_info	damage_info	centroid_x	centroid_y
3	1	crack	1.0/130	0.22mm	1930	4486
4	2	crack	1.0/167	0.22mm	2843	334
5	3	crack	1.0/124	0.22mm	3173	513
6	4	efflorescence	1239911	0.061m ²	1710	2756
7	5	rebar_exposure	10265	0.005m ²	455	2535
8	6	spalling	34767	0.017m ²	2143	897

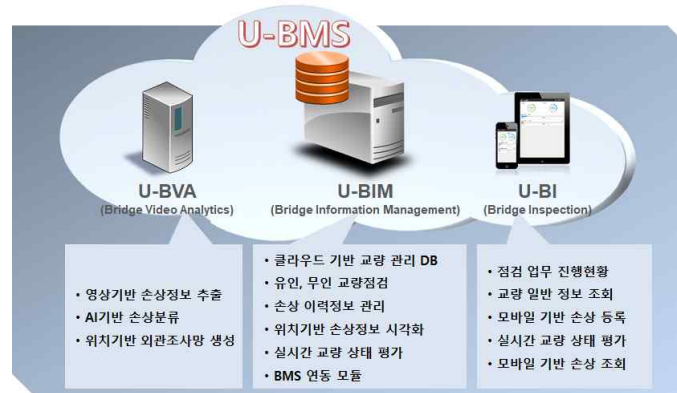
정량적 정보가 저장된 Excel 파일

(CTE4-1) 사용자 기반 교량관리 시스템 개발 ((주)브로드웨이브)

성과 기준					
질적성과지표		목표치	달성치	측정방법	검증방법
①	사용자 기반 무인 검사 장비 교량관리 테스트 베드 구축	100%	100%	시스템서비스구현	시연동영상
②	BMS 등 타 시스템 연동 구축 및 시험	100%	100%	시스템서비스구현	시연동영상

(1) 사용자 기반 교량관리 시스템 아키텍처 개발

- 무인체를 이용한 교량 안전점검 관련하여 교량 정보, 점검데이터, 손상정보, 상태평가정보 등을 클라우드기반으로 관리하며, 점검자 및 관리자 관점에서 쉽고, 빠르게 교량점검을 수행 할 수 있도록 지원하는 시스템 개발
- U-BMS는 영상기반 손상정보를 추출하고 AI기반 손상분류 및 위치기반 외관조사망을 생성하는 U-BVA(Bridge Video Analytic)시스템과 클라우드 기반 교량관리 및 손상이력, 위치기반 손상정보 시각화, 실시간 교량상태 평가, BMS 연동을 지원하는 U-BIM(Bridge Information Management), 점검자 및 관리자가 현장에서 모바일 기반으로 점검업무 진행현황을 조회하고, 손상정보 기록 및 관리, 실시간 상태평가를 지원하는 U-BI(Bridge Inspection)으로 구성 됨



U-BMS 시스템 구성도

(2) 사용자 기반 교량관리 시스템 주요 특징

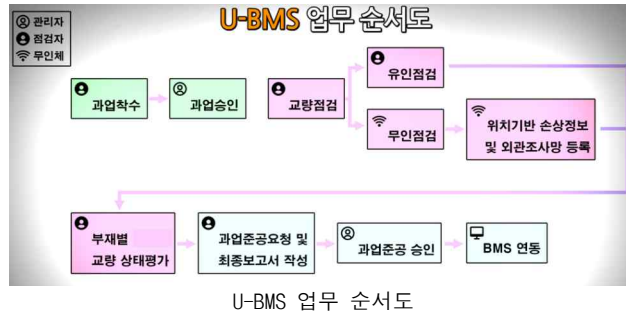
- U-BMS의 주요 특징은 무인체 영상을 통한 위치기반 손상정보가 가능하며, 사용자(관리자 및 점검자) 중심으로 유인 및 무인 교량점검 관리를 지원 함. 또한, 부재, 경간, 교량 별 실시간 교량 상태 평가가 가능하며, 반응형 웹기술을 통한 다양한 모바일 기기를 지원 함



U-BMS 시스템 주요 특징

(3) 사용자 기반 교량관리 시스템 업무 순서도

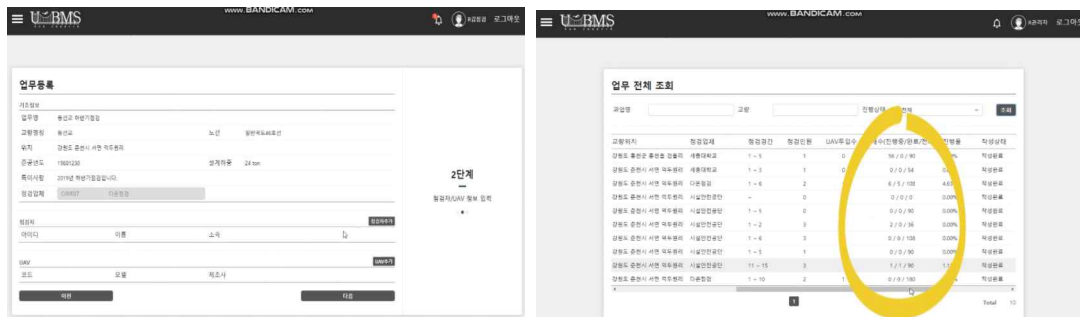
- U-BMS의 업무 순서도는 교량점검 과업지시서를 시점으로 시작하여, 과업착수를 접수(점검자)하고, 과업을 승인(관리자)하여, 교량점검 업무를 생성함. 교량점검은 인력이 점검하는 유인점검 및 무인체가 점검하는 무인 점검으로 분리되어 수행되며, 이때 부재별, 교량별 교량상태 등급을 조회 할 수 있음. 최종적으로 과업 준공 요청 및 최종보고서로 업무는 최종 승인 요청을 통해 마무리 되며, BMS 연동 필요시 연동기능을 지원 함



U-BMS 업무 순서도

(4) 사용자 기반 교량관리 시스템 업무 등록 및 조회 기능

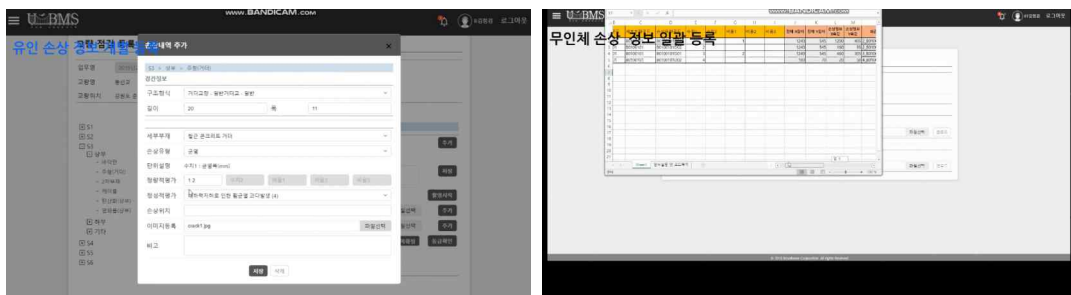
- U-BMS에서는 점검자가 과업 지시서를 기반으로 업무를 등록하며, 업무 등록 시 무인체 점검 구간을 구간별 부재를 선택하여 등록하게 함. 업무 등록 후 관리자는 업무를 승인하며, 업무 조회 기능을 통해 부재별 교량 점검 진행율을 실시간 조회 할 수 있음



U-BMS 업무 등록 및 승인, 조회 기능

(5) 사용자 기반 교량관리 시스템 교량 점검 등록 기능

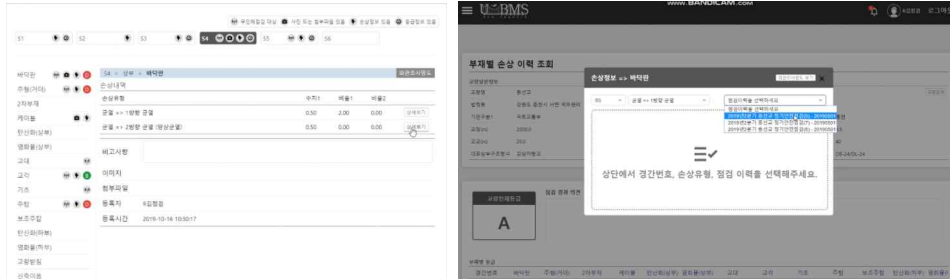
- U-BMS에서 점검자는 교량의 구간, 부재 별 손상 정보(손상유형, 정량적, 정성적 평가, 사진, 메모 등)를 입력하며, 무인체 점검의 등록은 개별 등록과 손상정보 파일(Excel)을 통한 일괄 등록을 지원 함



U-BMS 교량 점검 유인 및 무인 점검 등록 기능

(6) 사용자 기반 교량관리 시스템 위치기반 손상 이력 정보 기능

- U-BMS에서는 등록 된 손상 정보를 통해 구간 별 아이콘(무인체점검, 사진, 손상, 등급의 유무)를 통해 쉽게 교량 상태를 판단하게 하였으며, 부재 별 손상 이력 정보를 제공 함



U-BMS에서 손상 정보 조회 및 손상 이력 정보 조회 기능

(7) 사용자 기반 교량관리 시스템 위치기반 손상 정보 관리 기능

- CTE3에서 추출 된 정량적 손상정보를 CTE4-2에 생성된 외관조사망에 U-BMS에서 매핑하기 위해 손상정보 연동을 위한 inspecting_excel 파일을 통해 표준화 된 코드와 손상 위치 지정 방식을 이용 함

구간번호	부재코드	세부부재코드	손상유형코드	수치1	수치2	비율1	비율2	비율3	천재 X값	천재 Y값	손상정보 X값	손상정보 Y값	외관조사망파일	정량적평가코드	구조형식	길이	폭	손상위치	비고
4	B01001	B0100101	B0100101D01	1		1			1240	545	1200	-405	B01001_190712.jpg	B0100101D01N10	SG002	15	8	G01	첫 번째
5	B01001	B0100101	B0100101D02	2					1240	545	160	55	B01001_190712.jpg	B0100101D02N40	SG003	14	8	D02	두 번째
6	B01001	B0100101	B0100101D01	3		2			1240	545	460	305	B01001_190712.jpg						
7	B01001	B0100101	B0100101D02	4					100	70	20	50	B01001_190712.jpg						

U-BMS에서의 손상위치 매핑

1. 설명 본 표는 '외관조사망'에 '손상'을 나타내는 '손상'을 '손상'을 나타내는 '손상'을 '손상'을 나타내는 '손상'을		2. 코드 정보 구조형식코드 부재코드 세부부재코드 손상유형코드 수치1 수치2 비율1 비율2 비율3 천재 X값 천재 Y값 손상정보 X값 손상정보 Y값 외관조사망파일 정량적평가코드 구조형식 길이 폭 손상위치 비고		부재, 세부부재, 손상유형, 정량적평가 코드 부재코드 세부부재코드 세부부재코드 손상유형코드 손상정보 X값 손상정보 Y값 외관조사망파일 정량적평가코드 B01001 B0100101 B0100101D01 1 1240 545 1200 -405 B01001_190712.jpg B0100101D01N10 B01001 B0100101 B0100101D02 2 1240 545 160 55 B01001_190712.jpg B0100101D02N40 B01001 B0100101 B0100101D01 3 1240 545 460 305 B01001_190712.jpg B0100101D01N10 B01001 B0100101 B0100101D02 4 100 70 20 50 B01001_190712.jpg B0100101D02N40	
---	--	---	--	--	--

손상정보 연동을 위한 코드 파일

- 손상위치 연동을 위해 부재별 스케일에 대한 비례를 고려하여, 손상위치를 매핑 하며, inspecting_excel 파일을 통한 손상위치, 손상 이미지, 손상코드 등 정보를 연동 함
- 손상정보 연동 기능을 통해 U-BMS에서 부재별 손상 위치 및 손상 정보를 쉽게 확인 할 수 있음



<등선교 바닥판>

<등선교 교각>

U-BMS에서의 손상부재별 위치기반 손상정보 표출

(8) 사용자 기반 교량관리 시스템의 실시간 상태평가 기능

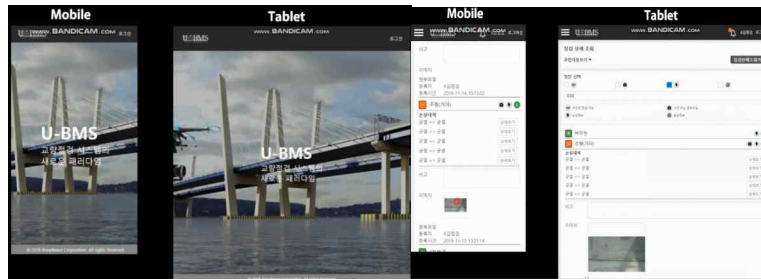
- U-BMS는 현장 및 사무실에서 교량 상태(부재, 교량) 평가를 실시간으로 확인 할 수 있도록 시스템을 구성 함
- CTE4-3에서 개발 된 교량상태 평가 모듈과 CTE4-1에서 개발 된 API를 통해 실시간으로 신뢰성 있는 교량 상태 등급을 조회 할 수 있으며, 조회 된 정보는 U-BIM에 다양한 형태로 표출됨



U-BMS에서 실시간 교량상태 등급 조회 기능

(9) 사용자 기반 교량관리 시스템의 실시간 상태평가 기능

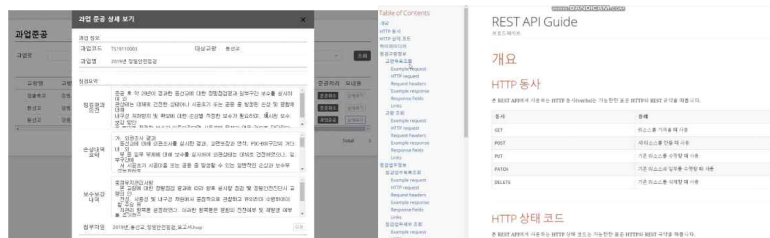
- U-BMS에서는 현장 점검자의 스마트 폰, 태블릿 등 다양한 모바일 기기 지원을 반응형 웹 기술을 활용함
- 다양한 모바일을 통한 업무 진행 현황, 점검 등록, 점검 조회, 상태평가 조회 등을 제공함



모바일 U-BMS 실시간 교량상태 등급 조회 기능

(10) 사용자 기반 교량관리 시스템의 과업 준공 및 BMS 연동 기능

- 점검자는 교량 상태 평가 완료 후 최종보고서 작성을 하여 과업준공 신청을 관리자에게 요청
- 관리자는 과업 준공을 승인 함. BMS 연동 필요시 BMS API Server를 통해 연동 함



U-BMS 과업 준공 및 BMS 연동 기능

(11) 사용자 기반 교량관리 시스템의 과업 준공 및 BMS 연동 기능

- 2019년 11월 등선교 29~31번 경간에 대한 인력 점검 및 무인체 점검 결과 비교 함
- U-BMS에 인력점검 및 무인체 점검 정보를 입력한 결과 교량 상태 등급은 동일하게 나옴



무인체 및 인력 점검 비교

(12) U-BMS 기능 고도화

- 전문가 자문(시설안전공단)을 통한 U-BMS 기능 고도화
- 2018년 5월 U-BMS 서비스 오픈 및 시범운영(www.U-BMS.CO.KR)

	자문내용		조치내역
1	책임기술자 판단 하에 등급 조정 가능하도록 설정		무인제 적용 불가 / 인력 감사는 조정 가능(조건)
2	교량 정보 관리 체계 개선 필요		FMS와 데이터베이스 공유가 가능하면 적용 가능 / 추후 상용화 시 고려 개발
3	정밀 점검 및 진단 수행 시 경간 선택		현재 기능 적용 되어 있음
4	출역 대상 시설물 선택		개선 완료
5	U-BMS UI 및 명칭 모호		메뉴 명칭은 향후 전문가 의견을 통해 수정 가능
6	점검등록 / 교량 점검 등록	손상 플랑 중복 입력	개선 완료
7		손상 사진 등록 개선 필요	개선 완료
8		필요없는 부재 표출	향후 고도화할 때 적용
9	점검등록 / 무인제 교량 점검 등록, 손상 정보 등록, 일괄 등록		무인제로 부분 점검 문제로 해 놓았으며, 향후 상용화 시 불필요 하다면 수정 가능함
10	점검 조회 / 점검 전체 조회 : 실행버튼 스크롤 가림		개선 완료
11	점검 조회 / 점검 상세 조회 : 정보 표출		개선 완료
12	손상 이력 조회 : 정보 표출		개선 완료
13	점검 조회 / 점검이력 조회 : 권한 부여		개선 완료
14	점검 조회 / 상태평가 조회 : 메뉴 이동		개선 완료

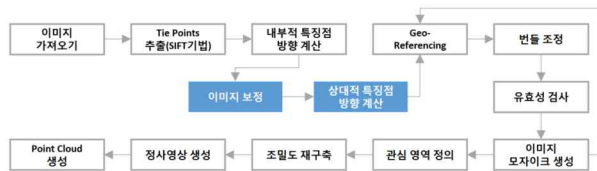
전문가 자문단을 통한 U-BMS 기능 고도화 조치

(CTE4-2) 무인검사장비 측정정보 기반 외관조사망도 표출 기술 개발 (경북대학교 산학협력단)

성과 기준					
질적성과지표		목표치	달성치	측정방법	검증방법
①	측정정보 기반 외관조사망도 표출기술 시스템 구축	100%	100%	외관조사망도 생성 여부	성능 평가 보고서
②	무인제 비행경로 계획을 위한 메시(Mesh) 모델 생성 기술 개발	100%	100%	3차원 위치정보를 가진 Mesh 모델 생성 S/W	성능 평가 보고서

(1) 외관조사망도 표출을 위한 배경 모델 생성 기술 개발

- Point Cloud는 영상 처리를 수행하며 추출된 Point들을 점군으로 집합시킨 다수의 3차원 점 좌표이다. Point Cloud기법에는 다수의 2D(이미지) 영상 기반으로 3차원 모델을 추출하는 방법과 스테레오 이미지 기반 3차원 모델을 추출하는 방법이 존재함. 본 기술 개발에서는 다수의 2D(이미지)를 기반으로 추출 방법을 통하여 내부적으로 이미지의 특징점 추출, 이미지 간 특징점 매칭 기법을 활용하여 외관조사망도 배경 모델을 생성하였음.
- 경북 경산시 대구한의대학교 한의학관, 경북 영천시 폐 건축물, 단양군 폐교량, 등선교(테스트베드 교량) 등 다양한 형태의 구조물을 대상으로 2D이미지 확보를 위한 촬영 및 3차원 모델을 생성하였음.



Point Cloud 기반 객체 3D 모델링 과정

	Photocan		PixMapper	MicroMac
특성	Professional	Standard		
삼각 사진 측정	o	o	o	o
Dense Point Cloud 편집	o	o	o	o
3D 모델 생성	o	o	o	o
이미지 자동 보정	o	x	o	o
Dense Point Cloud 분류	o	x	o	x
DIM/DTM 내보내기	o	x	o	o
정사영상 내보내기	o	x	o	o
측정 (거리, 지역, 볼륨)	o	x	o	o
자양기운형 지원	o	x	o	o
다중 스케트랩 이미지 처리	o	x	o	o

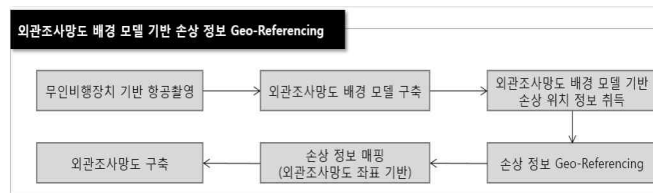
Point Cloud 기반 상용 S/W 및 Open Source의 특성

(2) 정량화 된 손상정보 맵핑 기술 개발

- 손상정보 맵핑 시스템 구축 : 교량의 외관조사시 점검자는 손상부위를 확인하고 외관조사망도를 통해 정보를 기록하고 DB화 함. 하지만 기존의 외관조사망도 작성 방법은 점검자의 주관적인 견해에 따라 손상정보의 위치

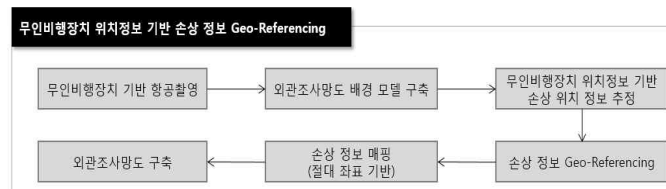
를 추정함으로써, 데이터의 신뢰성, 객관성 측면에서 큰 한계점이 있음. 이에, ‘무인검사장비 측정정보 기반 외관조사망도 표출 기술 개발’에서는 정량화 된 손상정보 맵핑 기술을 개발하고자 함.

- 정량화된 손상정보를 정확한 위치에 맵핑하기 위해서는 신뢰성 있는 손상의 위치 정보와 동일 좌표 체계를 가진 배경 모델 DB 구축이 선행되어야 함. 절대 좌표 기반 배경 모델 DB의 경우 앞서 제시한 외관조사망도 배경 모델 구축 기술로 구축이 가능함. 그러나 손상의 위치 정보의 경우 무인비행장치의 위치정보와 센서의 위치 정보를 통해 추정가능하나, Raw Data(무인비행장치의 위치 정보)의 위치 오차로 인해 부정확한 위치 추정의 가능성이 있음. 또한 손상의 위치 정보는 절대좌표 기반의 외관조사망도 배경 모델을 통해 추정 가능하나, Point Cloud 기반 이미지 정합 과정에서 노이즈 발생의 가능성, 미세 손상 탐사의 불확실성이 존재함. 이에 ‘무인검사장비 측정정보 기반 외관조사망도 표출 기술 개발’에서는 절대좌표 기반 손상정보 맵핑 기술을 ‘외관조사망도 배경 모델 기반 손상정보 Geo-Referencing’과 ‘무인비행장치 위치정보 기반 손상정보 Geo-Referencing’으로 개발하고자 함. 또한 무인비행장치 위치정보 기반 손상정보 Geo-Referencing의 경우 Raw Data(무인비행장치의 위치 정보)의 위치 오차로 인한 오차를 줄이고자, 무인비행장치 위치정보 기반 객체 위치정보 추정 기술을 개발(통계적 추정 기법 활용)하고자 하였음.
- 외관조사망도 배경 모델 기반 손상정보 Geo-Referencing (외관조사망도 배경 모델 상에서 손상정보의 구분 여부에 따라)



외관조사망도 배경 모델 기반 손상정보 Geo-Referencing 시스템

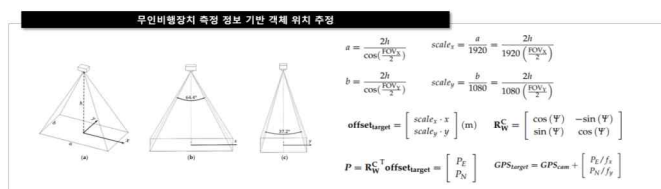
- 무인비행장치 위치정보 기반 손상정보 Geo-Referencing (외관조사망도 배경 모델 상에서 손상정보의 구분 여부에 따라)



무인비행장치 위치정보 기반 손상정보 Geo-Referencing 시스템

■ 무인비행장치 위치정보 기반 객체 위치정보 추정 기술 개발 및 정확도 검증(통계적 추정)

- 적용 알고리즘 개요 (A Camera-Based Target Detection and Positioning UAV System for Search and Rescue (SAR) Purposes)
- 무인비행장치의 위치정보와 센서의 위치정보를 활용하여 촬영 객체의 위치정보를 도출하기 위해 아래 그림의 알고리즘을 적용하였다. 또한, 객체 위치 추정 알고리즘과 통계적 점 추정을 통해 추정된 위치 정보의 RMSE 오차를 비교 분석함.

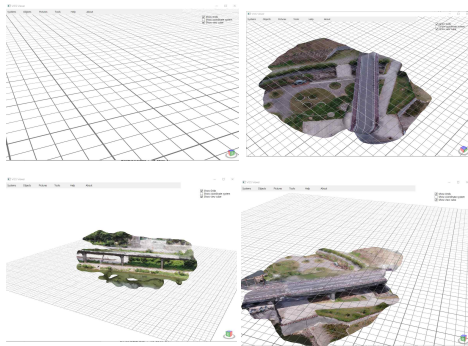


무인비행장치 측정정보 기반 객체 위치 추정 알고리즘

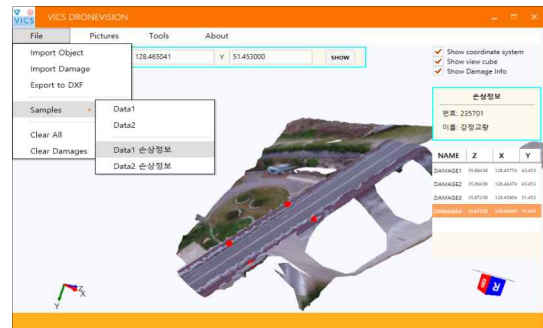
(3) 무인검사장비 기반 배경모델 생성을 위한 Mesh모델 생성 시스템 구축 및 S/W 개발

■ 외관조사망도 배경모델 생성 및 손상정보 매핑 S/W Tool 개발

- Point Cloud는 군집된 3차원 점들의 집합을 의미하며, 본 기술 개발에서는 다수의 2D(이미지) 영상 기반으로 3차원 모델을 추출하는 방법을 활용하였음. 다수의 2D이미지를 대상으로 SIFT기법 기반 Tie Points를 추출하고 내부적 특징점 및 방향 계산을 통해 이미지를 보정함. 다음으로 상대적 특징점 방향을 계산하고 Geo-Referencing을 수행함. 번들 조정, 유효성 검사 뒤에 이미지의 모자이크가 생성되며 관심영역을 지정하여 조밀도를 재구축한 뒤 Point Cloud가 생성된다. 본 기술 개발에서는 이러한 과정을 통해 Point Cloud를 형성하고 Mesh모델을 구축한 뒤 외관조사망도 배경 모델을 생성하였음
- 무인검사장비를 통해 계측 및 수집된 다양한 데이터를 기반으로 계측정보를 매핑하고 외관조사망도로 가시화하는 기술개발을 목적으로 함
- Point Cloud 기반 배경모델 생성 및 위치정보를 갖는 손상정보 DB 불러오기 기능 개발을 목적으로 함
- 3D 모델링 및 배경모델 생성 S/W 개발을 위한 요소 기술 고도화



자체 개발 S/W 구동



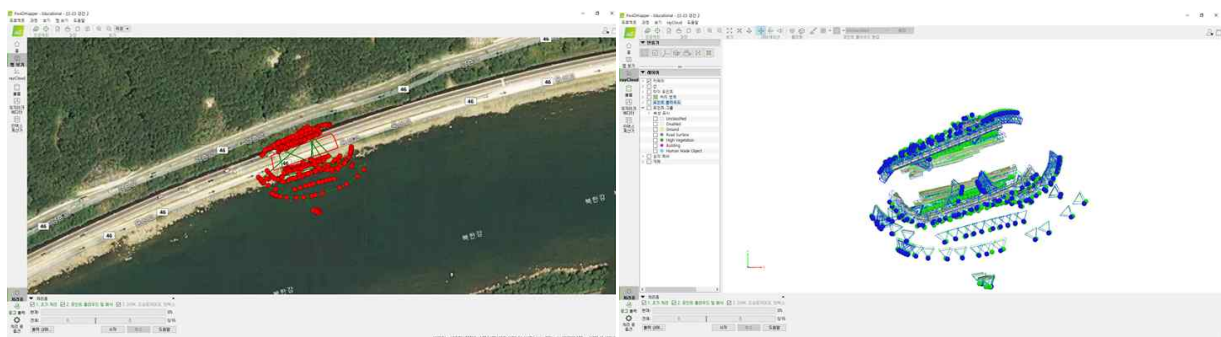
자체 개발 S/W를 활용한 교량 모델링

(4) 외관조사망도 표출 플랫폼 구축을 위한 요소 선정

■ 외관조사망도 표출요소 도출

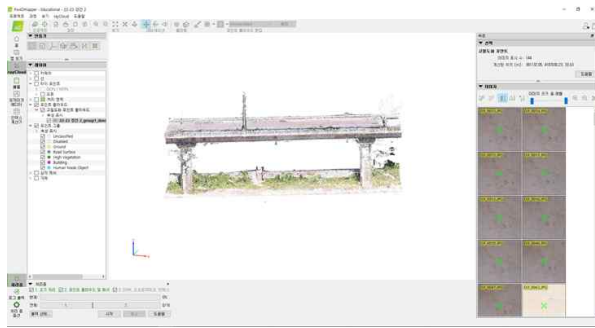
- ‘무인검사장비 측정정보 기반 외관조사망도 표출 기술 개발’에서는 현재 활용되고 있는 외관조사망도의 필수 표출요소를 선정하기 위해 델파이 기법을 활용하여 전문가를 대상으로 설문을 진행하였음. 설문을 통해 외관조사망도 상에 필수로 표출되어야 할 요소들은 손상의 물리적 크기, 손상의 위치, 손상의 형상, 손상의 유형, 손상 진행여부, 전차(前次) 손상 정보, 신규(新舊) 손상 구분 표시, 재료 별 손상 정보, 전체 구조물의 키맵, 축척 표시, 보수 및 보강의 중요도 표현이 이상 총 11개로 도출되었음

(5) 테스트베드 교량 대상 부재별 외관조사망도 구축

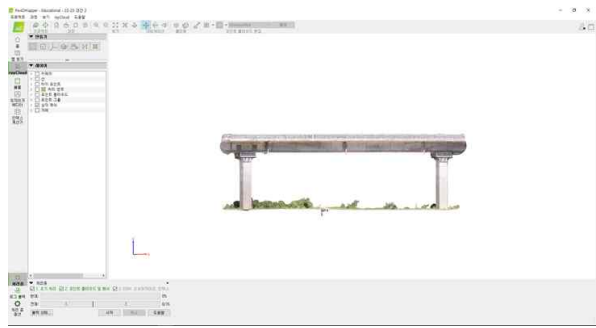


T/B 교량 대상 3D 모델 및 디지털 외관조사망도 구축

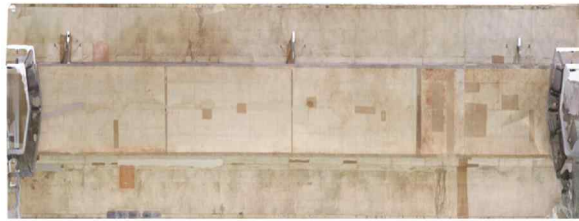
지도 상 대상 구조물 및 촬영 위치 활성화



point cloud 및 mesh 생성



DSM, 정사투영이미지 생성 및 3D 모델 구축



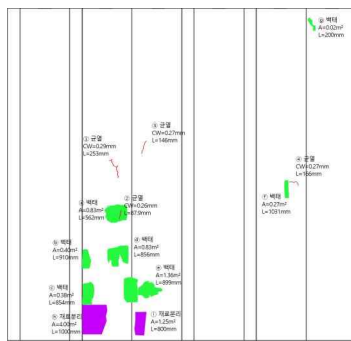
25-26 경간 교량하부 외관조사망도 배경모델



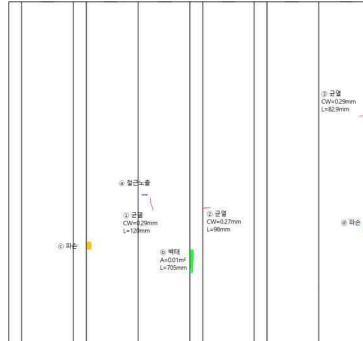
29번 교각의 정사투영이미지 기반 배경모델

(6) 테스트베드 교량 대상 외관조사망도 손상정보 표출 가시화

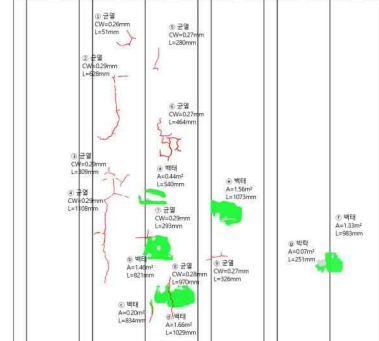
- 앞서 생성된 정사투영이미지 기반 배경모델을 기반으로 손상의 유형, 크기 및 형태 데이터를 CTE3 세부에서 받아 각 손상정보들을 가시화 하는 작업 수행



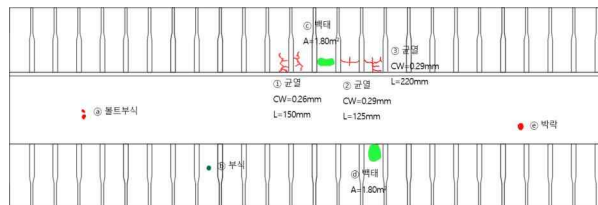
등선교 29 교각 손상정보 표출



등선교 30 교각 손상정보 표출



등선교 31 교각 손상정보 표출



등선교 30-31 경간 바닥판 하부 손상정보 표출



구축 데이터 기반 손상의 상대위치 추정

손상 정보 X좌표	손상 정보 Y좌표	손상 번호
13.10682	2329.85268	1번
969.90468	2388.75345	2번
1526.21126	2912.31585	3번
2603.88824	2787.96978	4번
2848.54888	2519.64405	5번
729.61298	2068.07148	6번
965.53574	373.03821	7번
2088.35332	2061.52695	8번
554.85538	2814.1479	9번

→ Excel 형태 양식 제공

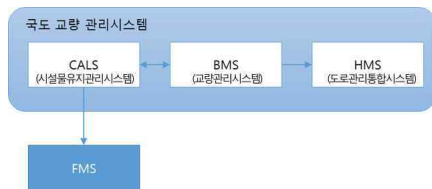
(CTE4-3) 무인검사장비 수집데이터를 이용한 교량 평가체계 개발 (한국시설안전공단)

성과 기준					
질적성과지표		목표치	달성치	측정방법	검증방법
①	무인검사장비 관련 교량 운영지침 동향 파악 및 관련 분야 규제 조사	1건	1건	조사보고서의 충실성	전문가 평가 자문
②	(가칭)교량 상태평가를 위한 드론 활용 가이드라인	1건	1건	가이드라인의 타당성	전문가 평가 자문

(1) 무인검사장비 관련 교량 운영 지침 동향 파악 및 관련 분야 규제 조사

■ 국내 교량시설물 유지관리 체계 조사/분석

- 일반국도 관리시스템에는 건설CALS, BMS, HMS가 있으며, 담당자가 건설CALS를 통해 보수보강이력, 점검진단 이력을 입력하면, BMS와 FMS와 연계되어 전달되고 HMS에서는 이들 정보를 통합적으로 서비스하는 체계로 구성
- 고속도로 교량관련해서는 한국도로공사에서 운영 중인 HBMS가 도로공사 내부에서 운영되고 있으며, 서울시에서는 한강상 교량 중 육안으로는 안전상태를 직접 확인하기 어려운 특수구조로 된 6개 교량의 주요 부재에 첨단 센서 및 장비를 부착하여 실시간으로 교량의 안전상태를 모니터링하는 한강교량 On-line 안전감시 시스템을 운영 중임



국도 교량 관리시스템 체계



BMS 객체기반 DB 일례

- 기존 시스템 분석결과, 정보를 객체화하여 관리하는 BMS를 벤치마킹하는 것이 본과제의 목적에 부합될 것으로 판단되며, 나아가 무인검사장비 기반 손상 정보의 가시화를 고려한 통합관리코드 체계를 구축하는 것이 바람직할 것으로 판단됨

■ 무인검사장비 기반 교량 운영지침 동향 조사 및 관련 분야 규제 조사

- 무인검사장비 기반 시설물 점검에 대한 국내외 정책동향 조사
- 무인검사장비 기반 교량 점검 실증연구에 대한 국내외 사례조사
- 무인검사장비 관련 산업분야 법규제 조사 및 규제와의 상충성 조사
- 국내외 시설물 관리주체별 무인검사장비 운영지침 동향 조사
- 시설물 점검 외 타 분야의 무인 검사 장비 운영지침 동향조사
- 무인검사장비 관련 법규 제·개정 사항 조사

■ 무인검사장비 관련 교량 운영지침 동향 파악 및 관련 분야 규제 조사(결론)

- 교량 안전점검 시 무인검사장비를 운용하기 위해서 무인검사장비의 기준, 조종자의 자격, 해당지역의 비행조건, 비행승인절차 등에 대한 법규를 파악함. 해외의 사례를 조사, 분석하여 국내 제도와 비교함으로써 향후 개발될 무인검사장비 기반 교량 안전점검 등을 위한 운영체계 및 제도에 활용하고자 함
- 무인검사장비에 대한 관심과 수요가 증가하고 있는 상황에서 관련 법 규정이 활발히 개정되고 있기 때문에 향후에도 이에 대한 지속적인 조사가 필요할 것으로 판단됨
- 무인검사장비 활용 인프라 유지관리 적용 현황 및 정책 관련 제언 조사를 통해 첨단 인프라 유지관리의 조속한 구현을 위한 융·복합적 첨단기술 연구개발 노력에 대한 수요를 파악했으며, 시설물 유지관리에 관한 구조물 데이터의 공공성 요구 및 정부와 민간의 협력을 통한 민자투자사업(PPP) 모델 등이 꾸준히 제시될 것으로 판단됨

(2) 무인검사장비 수집 데이터의 관리코드 체계 설계

- 손상정보 기록을 위해 4개 세션으로 구성된 정보 체계의 코드를 제안

구분	내용	정의	비고
섹션 ①	교량 고유 식별번호	3자리 숫자	
섹션 ②	점검단위 객체 정의	점검단위의 부재 및 위치	구조적 구분
섹션 ③	손상형태 및 단위 정의	손상부재, 타입, 상세	재질 포함
섹션 ④	점검일자	년 월 일	

- 코드번호는 구조물의 종류나 특성에 따라 유연하게 적용되고, 3차원 객체 기반을 고려해서 내부와 외부를 별도로 정의하여 9개 세부항목으로 구성

940-SG04ITUR-
E02D01SD01AS05-161228

구분	내용	상세	비고
항 ①	940	제 2 진도대교	-
항 ②	SG04	4번 보강거더	참조 3
항 ③	IT	내부상면	참조 2
항 ④	UR	U형 Rib	참조 2
항 ⑤	E02	강재 거더	참조 8
항 ⑥	D01	모재 및 연결부 손상	참조 8
항 ⑦	SD01	부재균열	참조 8
항 ⑧	AS05	주부재의 전반적 균열	참조 11
항 ⑨	161228	2016년12월28일 점검	-

- 손상항목에 대한 분류체계 및 코드규약은 부재분류, 손상분류, 세부손상분류, 평가기준에 따라 규정하였음
- 부재분류는 구조물을 구성하는 부재로서 위치 및 기능에 따라 분류한 체계를 의미함
- 손상분류는 외관조사시 발생하는 손상을 부재 유형에 따라 발생 가능한 손상에 대해 분류한 체계를 의미함
- 세부손상분류는 손상분류 하위에 손상의 형태 및 부재의 특성을 고려한 손상에 대해 분류한 체계를 의미함

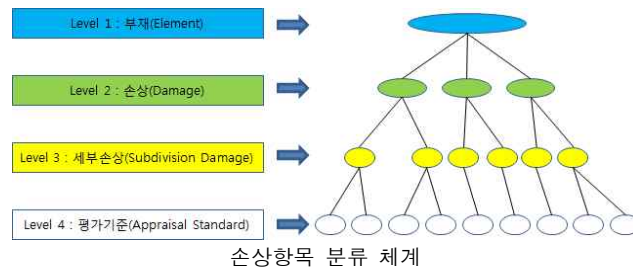


표. 손상항목 코드 일례

부재	코드	손상	코드	세부손상	코드	손상유형코드
콘크리트 바닥판	E01	균열	D01	1방향 균열	SD01	E01D01SD01
		열화 및 손상	D02	2방향 균열	SD02	E01D01SD02
				-	SD03	E01D02SD03
강바닥판, 강거더 및 강교각 (강주탑)	E02	모재 및 연결부 손상	D01	부재균열	SD01	E02D01SD01
				변형, 파단	SD02	E02D01SD02
				연결볼트 이완, 탈락	SD03	E02D01SD03
				용접연결부 결함	SD04	E02D01SD04
				-	SD05	E02D02SD05
철근 콘크리트 거더	E03	균열	D01	-	SD01	E03D01SD01
		열화 및 손상	D02	-	SD02	E03D02SD02
프리스트레스 콘크리트 거더	E04	균열	D01	-	SD01	E04D01SD01
		열화 및 손상	D02	-	SD02	E04D02SD02
콘크리트 가로보	E05	균열	D01	-	SD01	E05D01SD01
		열화 및 손상, 철근부식	D02	-	SD02	E05D02SD02
강 가로보와 세로보	E06	모재 및 연결부 손상	D01	부재균열	SD01	E06D01SD01
				변형, 파단	SD02	E06D01SD02
				연결볼트 이완, 탈락	SD03	E06D01SD03
				용접연결부 결함	SD04	E06D01SD04
				-	SD05	E06D02SD05
케이블	E07	케이블 부재	D01	부식	SD01	E07D01SD01
				손상, 단선	SD02	E07D01SD02
				보호관	SD03	E07D01SD03
				-	SD04	E07D02SD04
				-	SD05	E07D03SD05
교대	E08	균열, 변위	D01	-	SD01	E08D01SD01
		열화 및 손상	D02	-	SD02	E08D02SD02

예시 : E01D01SD01 손상유형코드는 콘크리트 바닥판에 발생한 1방향 균열을 의미함.

1방향 균열 (E01D01SD01)			평가기준코드
질의문	A	균열폭 0.1mm미만	E01D01SD01AS01
	B	균열폭 0.1mm이상 ~ 0.3mm미만	E01D01SD01AS02
	B	균열을 2%미만	E01D01SD01AS03
	C	균열폭 0.3mm이상 ~ 0.5mm미만	E01D01SD01AS04
	C	균열을 2%이상 ~ 10%미만	E01D01SD01AS05
	D	균열폭 0.5mm이상 ~ 1.0mm미만	E01D01SD01AS06
	D	균열을 10%이상 ~ 20%미만	E01D01SD01AS07
	E	균열폭 1.0mm이상	E01D01SD01AS08
균열길이	L(m)	균열을 20%이상	E01D01SD01AS09
균열폭	T(m)	123456789 m	E01D01SD01AS10
		123456789 m	E01D01SD01AS11
2방향 균열 (E01D01SD02)			평가기준코드
질의문	A	망상균열폭 0.1mm미만	E01D01SD02AS01
	B	망상균열폭0.1mm이상 ~ 0.3mm미만	E01D01SD02AS02
	C	망상균열폭 0.3mm이상	E01D01SD02AS03
	D	망상균열의 진전으로 인한 콘크리트 박리 발생	E01D01SD02AS04
	E	망상균열에 인한 박리가 심하여 편치파괴 발생 가능성 있음	E01D01SD02AS05
균열길이	L(m)	123456789 m	E01D01SD02AS06
	T(m)	123456789 m	E01D01SD02AS07
열화 및 손상 (E01D02SD03)			평가기준코드
질의문	A	없음	E01D02SD03AS01
	B	표면 손상면적 2%미만	E01D02SD03AS02
	C	표면 손상면적 2%이상 ~ 10%미만	E01D02SD03AS03
	C	철근부식 손상면적 2%미만	E01D02SD03AS04
	C	데크플레이트 박리 및 누수 발생	E01D02SD03AS05
	D	표면 손상면적 10%이상	E01D02SD03AS06
	D	철근부식 손상면적 2%이상	E01D02SD03AS07
표면손상	L(m)	123456789 m	E01D02SD03AS10
	T(m)	123456789 m	E01D02SD03AS11
철근부식	L(m)	123456789 m	E01D02SD03AS12

■ BMS 연계를 위한 보안체계 검토

-

```

graph LR
    A[자료 검색  
(시설물 목록, 시설물별 기본·상세제원, BMS 데이터를 검색)] --> B[검색된 자료 제공]
    B --> C[BMS 자료수집  
(주기적으로 자료수집 후 비교 저장)]
  
```

자료 검색
(시설물 목록, 시설물별 기본·상세제원, BMS 데이터를 검색)

검색된 자료 제공

BMS 자료수집
(주기적으로 자료수집 후 비교 저장)

■ BMS 연계를 위한 정보 제공 범위 설정

- | BMS, 고객정보 | | | | | |
|-----------|----------------------|-----------------------------|--|---|--|
| 기본정보 | | 교양기본정보 | | 교양번호, 학생여부 | |
| | | 교양공간정보 | | 교양번호, 학생여부, 공간번호 | |
| | | 교양지점정보 | | 교양번호, 학생여부, 지점번호 | |
| | | 점권단련 | | 점권단련순번, 년도, 점역정보 | |
| | | 교양별 점권단련자료 | | 점권단련순번, 년도, 점권유무, 교양번호, 학생여부 | |
| 점권점권 | 교양별, 공간지점별, 부재별 등급관리 | | 점권단련순번, 년도, 점권유무, 교양번호, 학생여부, 공간지점번호, 부재코드, 운영유무 | | |
| | 점권단련개부 | | 점권단련순번, 년도, 점권유무, 교양번호, 학생여부, 공간지점번호, 부재코드, 운영유무 | | |
| | | | | | |
| 공통코드 | | 제출코드 | | - BMS 교양 기본 제원, 점권, 지정정보 자료 연계
- 교양별 점권단련 자료, 부재별 등급관리 자료 등 연계
- 교양제원코드, 부재별 관리코드 등 연계 | |
| | | 노선코드, 방문종료코드, 관리종료코드 | | | |
| | | 부재관리코드, 운영유형관리코드, 보수및공공관리코드 | | | |
| | | 부재별, 운영별 공통유역 | | | |

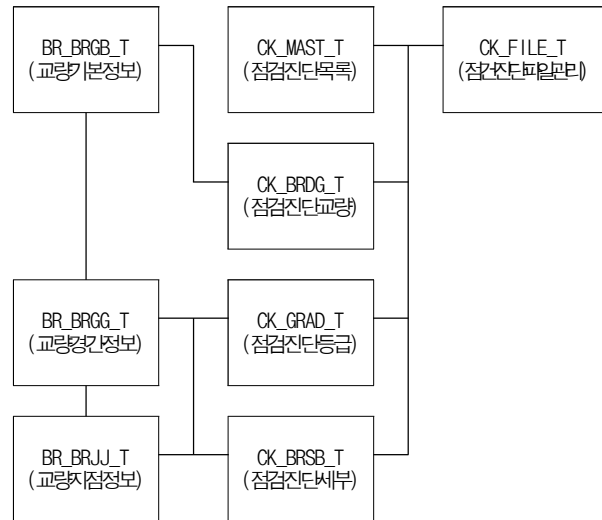
– 60 –

■ BMS 연계 알고리즘 및 프레임워크 설계

- UBMS는 BMS의 테이블 정의와 연계하여 제원을 관리하는 테이블과 점검을 관리하는 테이블로 분리하여 관리함. 또한 교량 상세제원의 경간 및 지점번호에 따라 세부적으로 점검할 수 있도록 설계

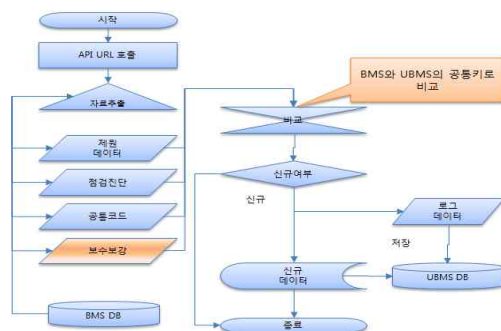
분류	테이블명	테이블 설명
공통코드	CD_MAST_T	공통코드관리
	CD_ROAD_T	노선관리
	CD_ORGM_T	관리기관
	CD_BJDN_T	법정동관리
	CD_MACE_T	세부부재
	CD_BBDM_T	손상코드관리
	CD_BBGC_T	보수보강공법
교량제원	BR_BRGB_T	교량 기본 정보
	BR_BRGG_T	교량 경간정보
	BR_BRJJ_T	교량 지점정보
교량 점검	CK_MAST_T	점검진단 목록
	CK_BRDG_T	점검진단 교량
	CK_GRAD_T	점검진단 등급
	CK_BRSB_T	점검진단 세부
	CK_FILE_T	점검진단 파일관리

테이블 목록



테이블 관계도

- BMS와 UBMS의 연동 검토 및 알고리즘 수립
- BMS와 UBMS 연계 알고리즘에 대한 프레임워크 설계 및 검증



BMS와 U-BMS 연계 알고리즘



BMS에서 U-BMS로의 연계방안

■ 무인검사장비 기반 교량 상태등급 산정 프로그램 개발

- 교량 형식, 부재, 상세 제원에 따른 부재별 가중치 산정 및 분배 자동화 알고리즘 개발
- 시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침(2018)에 따른 교량의 상태 등급 평가 및 내구성 평가 알고리즘 도입
- 웹 기반 사용자 인터페이스(U-BMS) 탑재 모듈 구현 및 검증
- API 개발을 이용한 U-BMS 서버와의 연동 및 부재별 데이터 및 교량 상태등급 결과 송수신 기능 구현

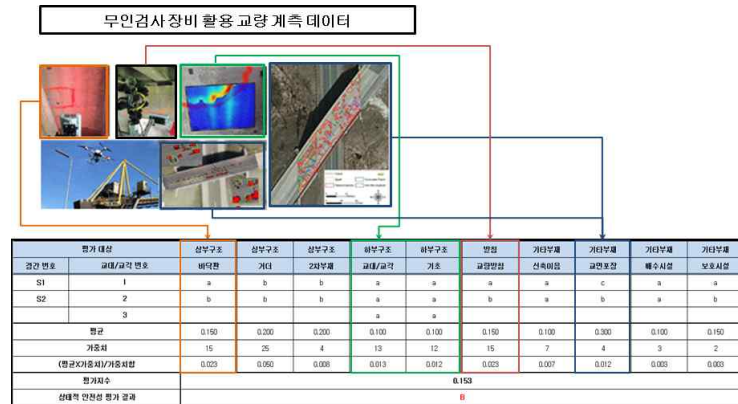


U-BMS 내부 교량 상태등급 산정 개요



U-BMS 내부 교량 상태등급 표출 화면

- 엑셀 VBA기반 교량 상태등급 산정 프로그램(Stand-Alone 지원) 설계



교량 상태평가자동화 프로그램

무인검사장비 계측 데이터 기반 교량 상태평가 자동화 프로그램

[illegible]

교량 상부구조 형식별 상태평가 예시

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	상태평가 - 종합							
2	초기화	상태평가-성부구조형식 종합 결과표 추가						
3	교량성부구조형식	완선결함도점수	평가등급	연장(m)	자선	연장 X 자선	연장비	완선결함도점수 X 연장비
4	거더교량 - 비약판거더 일체형 - PSC 박스	0.141	B	40	4	160	0.400	0.056
5	거더교량 - 일반거더교 - 일반	0.167	B	60	4	240	0.600	0.100
6	합계(x)			100		400	1.000	0.157
7	평가지수							
8	상태평가 등급							

최종 교량 상태평가 등급 산출 예시

■ 무인검사장비 수집데이터 기반 교량평가체계 구축을 위한 가이드라인(안) 구축

- 무인검사장비 기반 점검 가능 대상 및 불가능 대상 범위 구체화

표. 무인검사장비 활용 영역에 대한 가이드라인(안)

현 과제 이후 점검 가능 부위	접근성 개선이후 점검 가능범위	대체 불가능 항목
▪ 박스형 교량 하부 바닥판 ▪ 주탑 표면 손상 ▪ 콘크리트 균열 반발 배태	▪ 거더내부 ▪ 케이ابل ▪ 2차구조(가로부 및 세로부)	▪ 내부 철근부식 ▪ 강재 변형 및 파단 ▪ 강서 정착부 파손

- 강재 균열 및 부식 - 연결부 균열 및 볼트 손상 - 강재 부식 및 도장두께	- 교대 - 교량받침 - 신축이음 - 배수시설 - 누수	- 케이블 정착구 내부 - 교대 구체, 날개벽 기울음 - 교각 부등 침하 - 앵커블록 내부 결로 및 체수 - 기초 세굴, (부등)침하, 측방유동 - 기초 - 교각내부(중공단면)
--	--	--

- 무인체 기반 교량 점검 환경조건, 대상교량 우선순위, 점검부위, 부재점검 시나리오 및 기존 BMS상 활용범위에 대한 가이드라인(안) 제시

■ 무인검사장비 병행을 고려한 교량 상태점검 시나리오 설정 및 시범적용 대상교량 선정

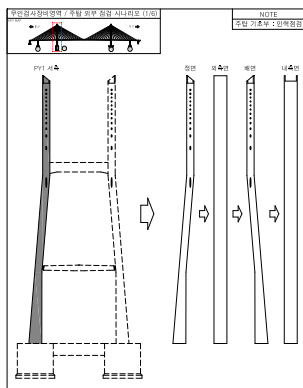
- 시범적용 대상교량 선정
- 시범적용 대상교량 선정을 위한 기준 설정
- BMS상 교량 6,600여 개 교량 중 단일박스 교량 85개와 특수교량(한국시설안전공단 위탁관리) 15개에 대해 선정기준 검토
- 최종적으로 해상 케이블교량(거북선대교)과 내륙 거더교량(등선교)을 선정

교량명	거북선대교	상판형식	Con'c Edge 거더보강형
교량형식	사장교	주탑형식	H형Con'c주탑
교량전경			
			

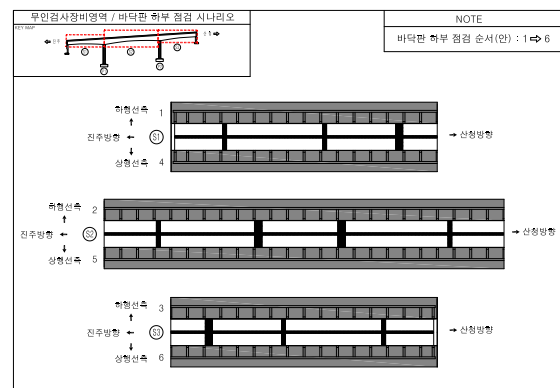
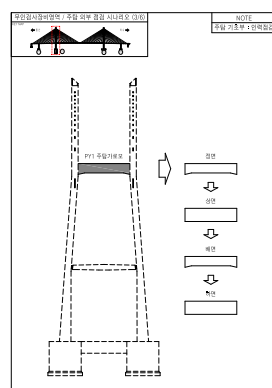
교량명	등선교	경간구성	강상형교(4(5@50)+ PS C박스거더교(2(10@50))
교량형식	강박스거더교+ PSC박스거더교	교각형식	직접기초, 우물통기초
교량전경			
			

■ 교량 상태점검 시나리오 개발

- 무인검사장비 점검영역 및 인력 점검영역 구분 정의
- 무인검사장비는 케이블교량에서는 주탑외부, 바닥판하부, 거더외부, 교각외부 점검에 활용하고, 거더교량에서는 바닥판하부, 거더외부, 교각외부 점검에 활용도가 높은 것으로 분석되었음
- 점검영역별 시나리오 작성 및 전문가 자문을 통한 미비점 보완



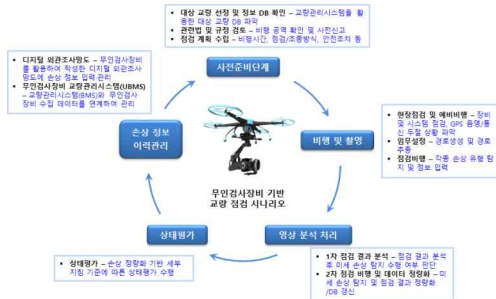
주탑 점검 시나리오 일례



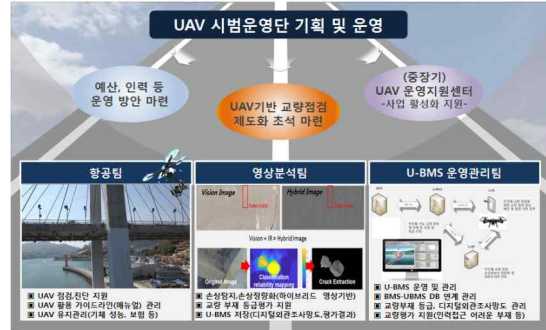
바닥판하부 점검 시나리오 일례

■ 무인검사장비를 활용한 교량 점검 시나리오 및 실무활용방안 마련

- 무인검사장비를 활용한 교량 점검 시나리오 작성
- 사전준비단계 → 비행 및 촬영 → 영상 분석 처리 → 상태평가 → 손상정보 이력관리
- 실무활용방안 마련-기술개발 완료 후 무인검사장비를 실무에 활용하기 위한 운영체계 기획



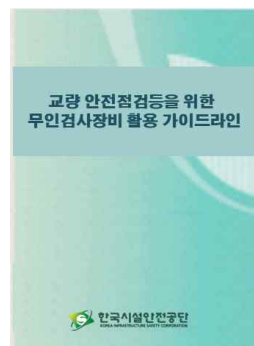
무인검사장비를 활용한 교량 점검 시나리오 작성



무인검사장비 실무활용방안 마련

■ 교량 안전점검등을 위한 무인검사장비 활용 가이드라인 개발

- 무인검사장비(드론+영상장비)를 활용한 교량 시설물 안전점검 시 필요한 제반 요건 및 점검체계 제시
- 관련법 규정 및 준수 사항 제시를 통한 안전성 확보
- 무인검사장비 기반 시설물 점검에 필요한 기초 정보 및 토대 제공



- 가이드라인 일반사항
- 무인검사장비의 시스템 구성 및 기본 요건
- 안전점검유형
- 무인검사장비 운용을 위한 환경 요건
- 무인검사장비 기반 교량 안전점검등 절차
- 점검 효율성을 위한 무인검사장비 활용 우선순위 제시
- 관련 법 규정 개요
- 부록. 1. 관련 법규 원문
2. 무인비행장치 조종자의 준수사항 및 안전수칙
3. 무인검사장비 사고조치요령
4. 무인검사장비 비행 전 점검일지
5. 보험제도 및 보험상품 현황
6. 공역확인 정보 소스(어플리케이션 등)
7. 무인검사장비를 활용한 교량 안전점검 등에 적용 가능한 전문기술
8. 비행자가 관련 행정서식

무인검사장비 활용 가이드라인 목차

■ 교량 안전점검등을 위한 무인검사장비 활용 가이드라인 실증 기반 고도화(한강철교C선 정밀안전진단 현장)

- 실제 점검 현장 기반 무인검사장비 활용 가이드라인 검토(환경조건, 획득 데이터 품질, 시나리오, 활용방안 등)
- 환경조건 검토
 - (근접촬영) 기차 및 차량 등에 의해 주변 공기압이 낮아지며 와류가 발생-실제 현장 검토 후 이격거리 설정하여 비행 및 촬영
 - (인공지능 비행) 근접촬영 환경에서는 무인검사장비의 위치를 파악하며 비행하기 어려움. 이에 조종자는 1)촬영할 대상 면과의 거리를 일정하게 유지하고, 2)전체 면을 빠짐없이 찍을 수 있는 자율비행 보조기능이 필요하다.
 - (전자기 간섭) 무인검사장비의 지자기센서가 금속 주변에서 측정성능에 문제 발생 가능성 큼. 강교량 점검 시 유의하여 이격거리 설정 후 비행
 - (비행 이착륙) 무인검사장비를 활용하여 교량 점검 시 선박을 이용하여 운영 지원이 가능해야 함

(CTE4-4) 성능중심 평가방식을 활용한 무인체 기반 내구성요소 평가 프로세스 개발 (한국건설기술연구원)

성과 기준					
질적성과지표		목표치	달성치	측정방법	검증방법
①	무인체 기반 성능중심 평가 방식 내구성요소 평가 매뉴얼	1건	1건	매뉴얼 작성 여부	매뉴얼 작성 여부 확인

(1) 무인체 기반 진단/평가를 위한 성능중심평가 방식을 활용한 내구성 요소 평가기술 개발

■ 고고도 교량의 대기중 비래염분 분포 조사

- 여기서는, 구조물이 처한 열화환경 중 고고도 교량의 대기중 비래염분 분포를 조사하여 무인체 기반의 영상 데이터로서 내구성을 평가하는 환경자료로 삼고자 하였음
- 해상에서부터 높이에 대한 염해환경 평가를 위하여 서·남해안 9개 해상교량 39개소에서 '17년 3월부터 높이 별 대기중 염분량을 12개월간 측정하였음

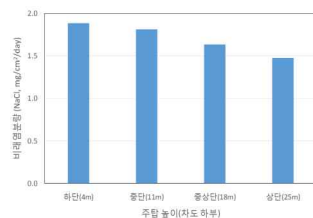
■ 고고도 해상교량의 높이별 대기중 염분량 분석

거북선대교

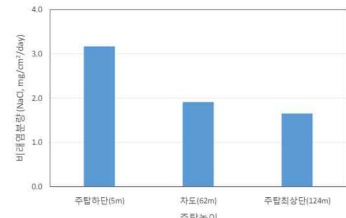
- 교각의 하단부 기준 4m, 11m, 18m 및 25m 지점에 4개의 비래염분 포집장치를 설치
- 남해안의 거북선 대교에서 측정한 높이별 대기중의 염분량으로서, 전반적인 비래염분량의 분포는 1.5~1.9 mdd를 보이고 있으며, 높이에 따른 비래염분량의 감소는 비교적 크지 않게 나타남



거북선대교 비래염분 측정장면



<거북선대교 높이별 비래염분 분포>



<서해대교 높이별 비래염분 분포>

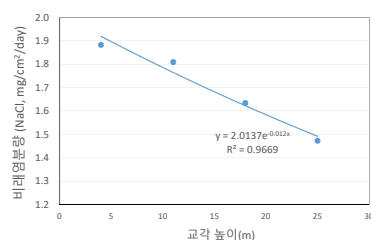
서해대교

- 주탑 하단부(5m), 주탑의 차도부분(62m), 주탑 최상단(124m)의 3개소에서 측정을 실시
- 서해대교의 경우, 아래 그림과 같이 전반적으로 1.7~3.1 mdd로서 제2남해대교에 비하여 높은 비래염분량을 나타내었으며, 높이에 따른 감소경향도 뚜렷이 나타남

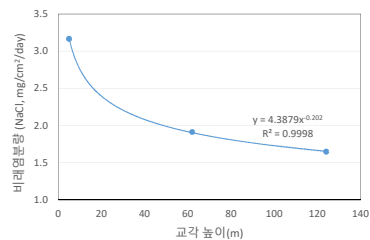
■ 서/남해안 교량의 높이별 비래염분 분포 모델식 도출

- 측정결과와 분석결과, 대기중의 비래염분량을 기준으로 2 mdd 미만 환경의 교량과 2 mdd 이상 염해 환경의 교량을 구분하는 것이 타당하다고 판단됨

→ 비래염분 전국조사에 따르면 대부분의 남해안의 비래염분량이 2 mdd 미만을 보임에 따라 2 mdd 미만의 비래염분 추정식을 적용하는 것이 바람직하며, 동/서해안의 지역은 대부분 2 mdd 이상의 비래염분을 보임에 따라 2 mdd 이상의 비래염분 추정식을 사용하는 것이 적절함. 다만, 지역별로 해역별 특성과 상관없이 높은 혹은 낮은 비래염분량을 보이는 경우나 실측값이 있는 경우에는 지역적 특성에 따라 선택적으로 사용할 수 있음



<비래염분 2 mdd 미만, 높이별 대기중 염분분포>



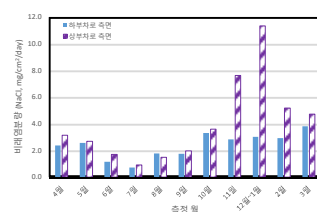
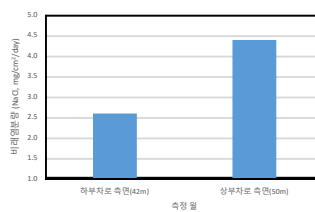
<비래염분 2 mdd 이상, 높이별 대기중 염분분포>

<해상교량의 높이별 비래염분 추정식>

비래염분량	높이별 비래염분 감소량 추정식(y_d)	적용 교량
2 mdd 미만	$y_d = 4.3879x^{-0.202}$	대부분의 남해안 교량
2 mdd 이상	$y_d = 2.0137e^{-0.012x}$	대부분의 동/서해안 교량
여기서, x : 높이(m), y_d : 높이 x 에서의 비래염분량 (mdd, mg/100cm ² /day)		

■ 고고도 교량의 바닥판에 살포되는 제설제에 의한 염해환경 평가

- 대상 교량은 서해안에 위치한 고속도로상 해상교량으로서 상/하부 복층 교량으로 구성되어 있는 교량으로 선정하여 상부와 하부 교량 측면에서 12개월간 대기중 염분을 측정
- 상부교량(해수면으로부터 약 50m)은 강설에 노출되어 제설제를 살포하고, 하부교량(해수면으로부터 약 42m)은 강설에 노출되어 있지 않아 제설제의 살포에 영향이 없는 환경으로 제설제 살포에 따른 대기중 염분량(비래염분량)을 비교하는데 효과적임



<대상교량의 상부도로/하부도로부 포집장치 설치> <위차별 12개월간의 평균 비래염분량> <측정위치에 따른 월별 비래염분량 비교>

- 상기 오른쪽 그림에서 제설제가 가장 많이 뿌려진 12월~1월의 경우 하부차로가 약 3mdd를 보인 반면, 제설제가 살포된 상부차로는 11mdd가 넘는 염분량을 보여 거의 4배에 달하는 차이가 나타남
- 따라서, 제설제가 뿌려지는 교량의 경우 염해환경이 제설제의 살포에 크게 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있었으며, 제설제에 의해 녹은 눈(염수)의 누수는 내구성 평가에 반드시 평가해야할 요소로 판단됨

(2) 무인체 기반 내구성 평가 프로세스 개발

무인체 기반의 내구성 요소 평가 방안에 따라 아래와 같은 무인체 데이터 기반 내구성 평가 알고리즘을 개발함

■ 내구손상 면적 산정

- 무인검사 데이터(누수 면적, 백태 면적)에 대하여 공용연수 및 제설제 환경에 따른 가중치 평가를 수행한 후 내구손상 면적 산정
 - 제설제 환경에서는 누수와 백태는 시간 및 제설제 환경의 열악성에 따라 내구성 저하가 차이가 나는 것으로 판단(주탑상부는 해당되지 않음)
- 무인검사 데이터(철근노출 면적, 박리/박락 면적)에 대한 손상 면적을 산정하여 내구손상 면적에 합산
 - 철근노출, 박리/박락은 내구성이 이미 소실된 요소로 판단

■ 제설제 환경 가중치 도출

- 참고자료(* 이병덕(한국도로공사) 외, 한국구조물진단유지관리공학회(2016.7))
- 고속도로 공용중 46개 노선의 59개 지역을 일반환경 노출지역/특수환경 노출지역으로 구분
- 도로공사 자료의 일반환경은 제설제 염해환경 b등급, 특수환경은 c등급과 유사함

제설제 환경에 따른 가중치

제설제 환경	a 등급	b 등급	c 등급
가중치	0	0.35	1.0

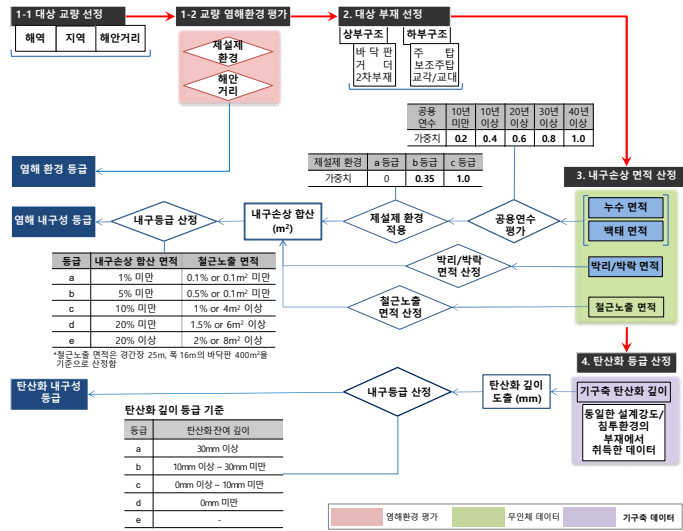
→ 일반환경에 비해 특수환경이 침투염분량이 3배 정도 높은 것으로 나타났기 때문에 아래표의 제설제 환경에 따른 가중치에 있어서 b등급과 c등급은 3배의 차이를 둠

■ 공용연수 가중치 도출

- 참고자료(* 이일근(한국도로공사) 외, 한국구조물진단유지관리공학회 2015. 5)
- 고속도로 교량 746개소의 바닥판 손상정보 및 교량 환경정보를 조사(공용연수 1~44년, 평균 17.4년)
- 바닥판 손상에 있어 40년을 기준 1.0으로 가정할 경우, 30년에 약 0.8, 20년에 약 0.6, 10년에 약 0.4정도로 나타남

<공용연수에 따른 가중치>

공용연수	10년 미만	10년 이상	20년 이상	30년 이상	40년 이상
가중치	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0



<무인체 기반 내구성 평가 알고리즘>

■ 열해 내구손상 면적에 따른 내구성 등급

- 한국시설안전공단 정밀안전진단 세부지침의 바닥판/거더 상태평가 기준(열화 및 손상)과 한국도로공사 교면 상태등급 기준을 참고하여 산정하였으며 아래 표와 같음

■ 탄산화 등급 산정

- 탄산화 등급 산정의 경우 앞서 기본적으로 점검인력에 의해 조사된 기구측 데이터를 활용함
- 다만, 기구측 데이터를 얻는 부재의 경우는 무인체 점검대상 부재와 동일한 설계강도 및 침투환경(수분접촉 여부, 표면부 도장 여부 등)을 가지고 있어야 함
 - 기구측 데이터를 제공하는 부재의 설계강도와 환경(수분접촉 여부)은 무인체 대상 부재와 같아야 함
 - 기구측 데이터는 1개 지점이 아니라, 가능한 많은 데이터를 확보하여 평균적인 값을 사용하여 활용함
- 탄산화의 내구등급 산정은 정밀안전진단 세부지침을 따를 경우, 아래 왼쪽 표를 성능평가 점검체계를 따를 경우 오른쪽 표를 따름

<탄산화 깊이 등급 평가 1>

등급	탄산화잔여 깊이
a	30mm 이상
b	10mm 이상 ~ 30mm 미만
c	0mm 이상 ~ 10mm 미만
d	0mm 미만

<탄산화 깊이 등급 평가 2>

등급	잔여피복두께가 모두 탄산화 되는 시간 T	비고
a	30년 이상	$A = \frac{D}{\sqrt{t}}$ $T = \left[\frac{\text{설계피복두께}}{\text{탄산화속도계수}} \right]^2 - t$ (D: 탄산화 깊이, t: 공용연수)
b	20년 < T ≤ 30년	
c	10년 < T ≤ 20년	
d	5년 < T ≤ 10년	
e	5년 이하	

■ 최종 등급 산정

- 3단계에서 도출된 염해등급과 4단계에서 도출된 탄산화 등급을 그대로 적용하거나(정밀안전진단 세부지침) 그 중 낮은 등급을 대상 부재의 최종 내구성 등급(성능평가 점검체계)으로 도출

(3) 테스트베드에 의한 무인체 기반 내구성 평가

■ 교량 현장 조사

- 무인체 기반 내구성 평가를 실험교량에 적용하기 위하여 포천, 구리, 가평, 속초, 고성 5개 교량에서 현장 조사를 실시하였음.
- 대상 교량은 서울지방국토관리청 관할 3개소, 원주지방국토관리청 관할 1개소, 고성군 관할 1개소로서 공용 연수는 최고 42년, 최저 27년이었으며 평균 34년이었음
- 현장에서는 내구성 평가의 적용만을 목적으로 하기 때문에 드론을 사용할 필요는 없었으며, 점검인력이 접근하여 조사가 용이한 교량 위주로 선정함

■ 교량 현장 조사 결과 및 내구성 평가 시뮬레이션

RC T형교	준공년	형식	총연장	폭	유효폭	높이	경간	최대경간장	설계하중
	1987	RC T	200m	10m	8.5m	12.1m	10	20m	DB-24

- : 대상 교량의 열화환경을 평가한 결과,
· 제설제 염해환경 B등급, 비래염분 염해환경 A등급



<철근노출, 백태 및 누수 영역>

- : 대상 교량의 육안점검에 따른 손상에 있어 균열은
· (S5)바닥판에서 망상균열 발생 → 내구성 평가의 항목이 아님
- : 대상 교량의 육안점검에 따른 손상에 있어 백태 및 누수는
· (S5)바닥판에서 넓은 면적의 백태 및 누수 발생(30m²) → 제설제 환경이 B등급이므로 평가의 대상이 됨
- : 대상 교량의 육안점검에 따른 손상에 있어 철근노출은
· (S5)바닥판에서 철근노출 발생(4.5m²) → 열화환경과 상관없이 내구성 평가의 대상이 됨
- : 상기 조사 결과를 토대로 본 연구의 무인체 기반 내구성 평가로 시뮬레이션 한 결과는 아래와 같음

<영상자료에 의한 S2 바닥판 염해 내구등급>

내구손상 면적	조사 값(m ²)	공용연수 지수	제설제 환경 지수	합계(m ²)	내구손상면적(%)	내구등급
누수/백태 면적	30	0.8	0.35	8.4	(8.4+4.5)/120=10.75%	D
철근노출/박락면적	4.5	-	-	4.5	3.8%	E

- 내구성 평가 결과, 누수/백태에 의한 내구등급은 C등급으로 나타났으나, 철근노출/박리·박락면적에 있어 E등급으로 평가되어 염해 내구등급은 E등급으로 평가됨
- 철근노출 및 박리·박락면적은 내구성 평가의 측면에서 철근노출이나 박리·박락면적은 이미 내구성이 완전히 소실된 면적으로 판단하므로 이들 면적의 평가는 다른 항목의 평가에 우선함
- 또한, 철근노출이나 박리·박락면적의 합은 항상 누수/백태 면적에 합산되어 평가함

(4) 무인체 기반 내구성 평가 매뉴얼

- 상기 무인체 기반 데이터로서 점검인력이 접근하기 어려운 부재의 내구성을 평가하는 절차를 내구성 평가 매뉴얼로 작성함
- 매뉴얼은 성능평가 점검체계의 매뉴얼을 참

<무인체 기반 내구성 평가 매뉴얼 목차>

1. 대상 부재
2. 내구손상 면적에 의한 염해 평가
 - 가. 대상 무인검사 데이터
 - 나. 내구손상 면적 산정
 - 다. 염해 내구손상 면적에 따른 내구성 등급
3. 탄산화 등급 산정
4. 최종 등급 산정

2-3. 통합 시스템 현장검증 내용 및 결과

(1) 요소기술 통합 무인검사시스템 활용 현장검증 실험 개요

■ 현장검증실험 목적

- 개발 완료된, 개별요소기술을 통합 적용한 점검시스템을 활용하여 실 교량 대상으로 현장검증 수행 후 문제점 (개선점) 파악 및 점검시나리오 수립 목적
- 한국과학기술원 내 시험체 대상으로 예비테스트를 수행한 후 문제점을 보완하여 테스트베드 교량을 대상으로 진행

■ 현장 검증 대상 구조물



예비검증용 시험체



T/B 교량: 춘천 등선교

	구분	내용	구분	내용
외부시험체	시설물명	콘크리트 외부 시험체	교각형식	-
	구조물형식	Con' c 벽체	소재지	한국과학기술원 교내
T/B	시설물명	등선교	교각형식	구주식
교량	교량형식	STB+PSCB	소재지	강원도 춘천시 덕두원

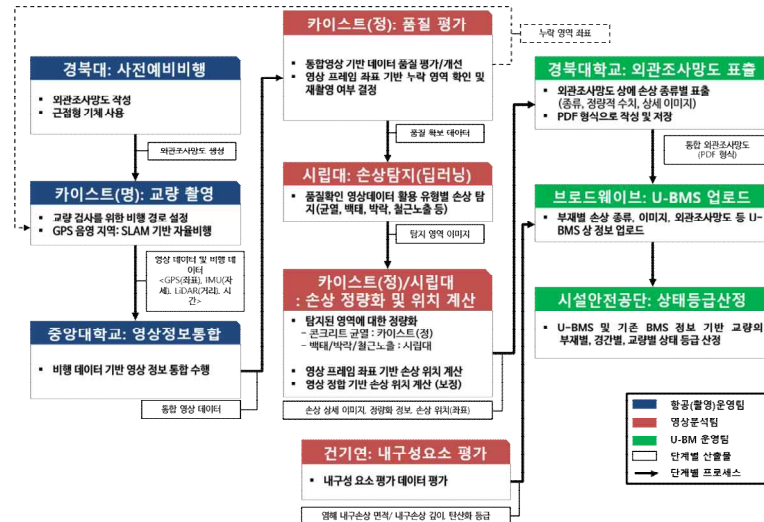
■ 외부시험체 및 T/B 교량을 활용한 현장검증 내용 및 절차

- GCS 현장 설치 및 기체 셋팅
- 외관조사망도 활용 점검 경로 설정 및 비행
- 근접형 통합기체 활용 등선교 1경간(콘크리트) 바닥판 및 교각 촬영
- 근접형 통합기체 활용 등선교 1경간(강재) 바닥판 및 교각 촬영
- 점검영상 저장 및 확인, 영상품질 평가 및 개선 작업 수행

■ 주요 기대 성과 및 점검 항목

- 주요 임무별 항공운영, 영상분석, U-BMS 운영팀으로 구성, 참석
- 근접형 통합기체 현장(해상교량) 비행 안정성 확인
- 예비 사전 비행을 통한 외관조사망도 작성 및 점검 경로 설정
- 점검경로 기반 교량 촬영 및 영상 확보
- 현장데이터의 품질 평가 및 개선 작업 수행 (원격PC 활용)
- (점검 이후) 현장데이터 대상 딥러닝(AI) 기술을 활용한 손상 탐지
- (점검 이후) 손상 정량화 데이터 및 손상 위치 등을 기 작성된 외관조사망도 상에 표출 수행
- (점검 이후) 외관조사망도를 포함한 점검 결과를 U-BMS상에 업로드
- 점검손상항목 : 균열, 박락, 백태, 철근노출 등





임무별 현장검증실험 수행 흐름도

(2) 점검시나리오 기반 통합기체 활용 현장 실증 내용: 콘크리트 외부시험체 활용

시험 내용

■ Step 0 : 임무정의

- 대상 구조물: 콘크리트 외부 시험체 (가로 3m x 높이 3.5m 영역)
- 점검 유형: 정밀 점검(손상 유형 : 균열, 철근노출, 박락, 백태)

■ Step 1 : 사전조사 및 준비

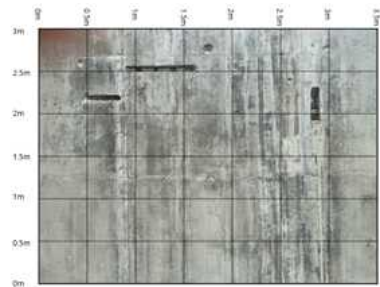
- 대상구조물과의 이격거리 3m 및 이미지 프레임 간 중복률: 30% ~ 40%
- 조리개(f): 2.8, 노출시간(s/p): 1/1000
- 예비비행을 통한 외관조사망도(2D CAD) 확보



대상구조물 및 점검 영역



교량점검을 위한 근접형 통합기체



외부시험체의 디지털 외관 조사망도

■ Step 2 : 이미지 데이터 확보

- 검사영역 및 드론의 이동속도(1m/sec ~ 2m/sec)를 고려한 이미지 획득



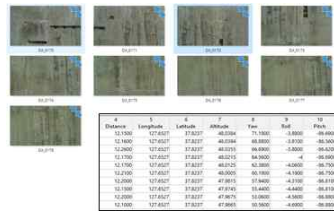
대상 구조물 점검 경로



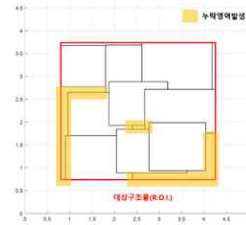
이미지 획득(Raw image)

■ Step 3 : 이미지 데이터 통합 및 누락영역 탐지

- 이미지 및 드론 로그데이터 확보 후 누락영역 탐지 알고리즘 적용



영상통합정보 저장



이미지 좌표 추정 및 누락영역 탐지

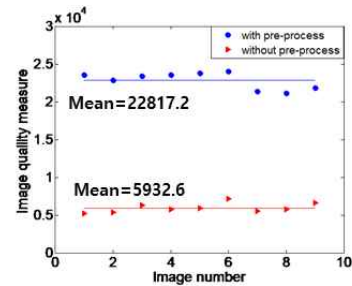
■ Step 4 : 영상 품질 평가

- 이미지 품질 향상 및 왜곡 억제에 위한 전처리 단계 적용
- Image Quality Measure 적용을 통한 품질 평가 수행



원본 이미지

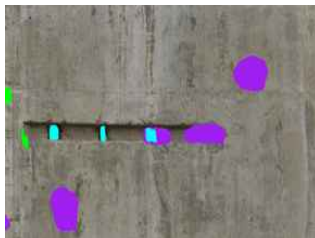
전처리 이미지



이미지 품질 평가 결과

■ Step 5 : 딥러닝 기반 자동 손상 탐지

- 딥러닝(mask R-CNN) 모델을 활용한 손상 유형 분류 및 탐지



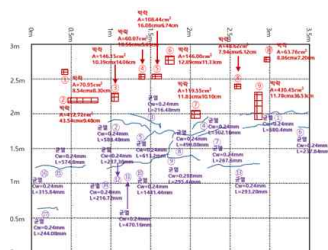
균열, 박락, 철근노출 및 백태 탐지 결과

■ Step 6 : 데이터 가시화 및 관리

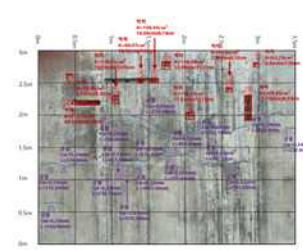
- 손상 표출된 디지털 외관 조사망도

■ Step 7 : 부재 상태 평가

- 1~17번 균열 폭: 0.24mm ~ 0.288 이내 존재
- 전체면적 대비 박락 면적율: 1.53% (0.1606m²)



손상 정량화 및 가시화 표출



(3) 점검시나리오 기반 통합기체 활용 현장 실증 내용: T/B 교량(등선교) 활용

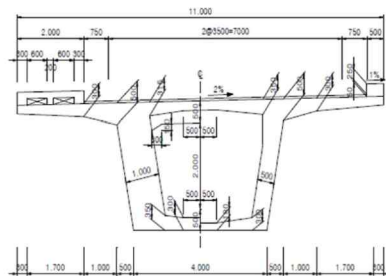
시험 내용

■ Step 0 : 임무(과업) 정의

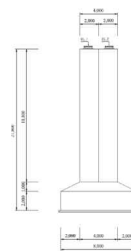
- 대상 구조물: T/B 교량인 등선교 교각 2개소(29번 및 30번 교각) 및 콘크리트 바닥판(29번-30번) 1경간을 대상으로 점검 수행
- 점검 유형: 정밀 점검 수행(손상 유형 : 균열, 철근노출, 박락, 백태 등)

■ Step 1 : 사전조사 및 준비

- 기존 교량 정보 및 이전 점검보고서 분석 유/무 : 기존 2D 카드 도면을 분석하여 Box 거더의 단면 크기 및 길, 교각의 폭과 높이 등을 사전정보를 활용하여 점검영역 확인.



기존 교량 도면 (Box 거더)



기존 교량 도면 (교각)



T/B교량(등선교) 점검 영역



교량점검을 위한 근접형 통합기체

■ Step 2 : 사전답사(예비 비행 실시) 및 장비점검

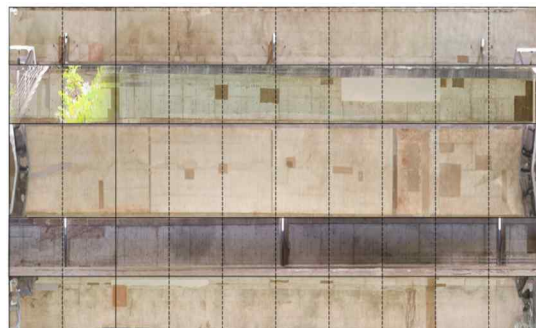
- 교량의 3D 모델 및 부재의 디지털외관조사망도 작성을 위한 사전비행 실시→ 상용기체 활용



3D 디지털 외관조사망도 (2경간)



2D 디지털 외관조사망도 (교각)



2D 디지털 외관조사망도 (바닥판)

- 목적관측이 가능한 장소에 GCS(지상관측장치)를 설치하고, 비행에 앞서 무인검사장비 및 영상장비의 기능 점검 수행



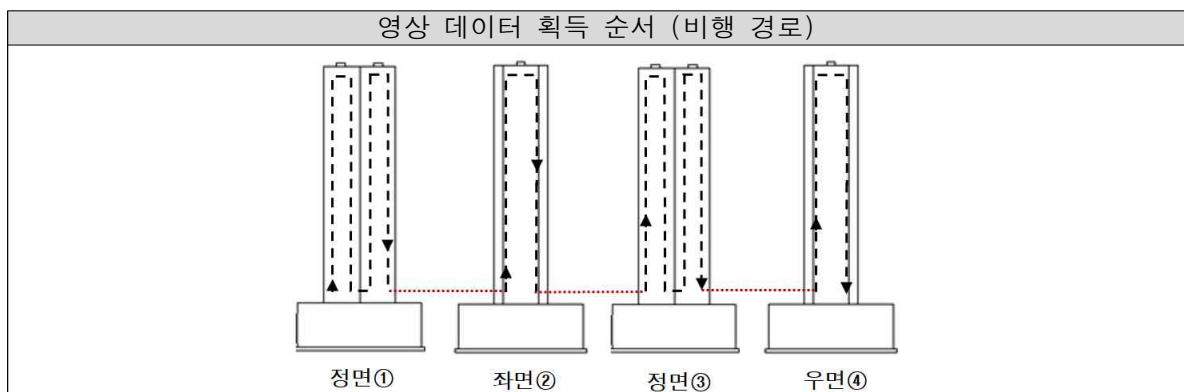
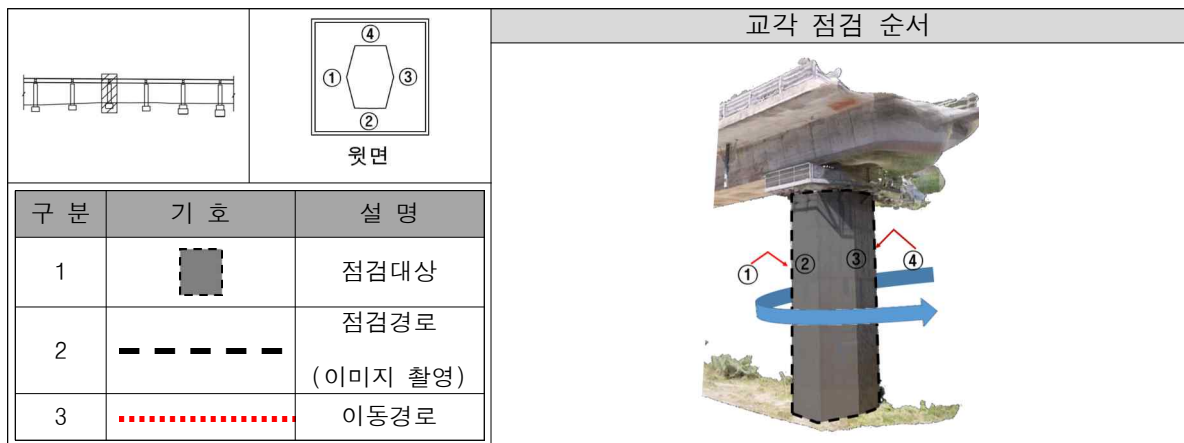
GCS 설치장소 선정



장비점검

■ Step 3 : 점검 시나리오(비행경로) 설정 (교각)

- 현장 주변 상황을 분석한 결과 30번 교각의 4번째 면은 장애물로 인한 비행 불가로 판단하여 점검 영역은 30번 교각의 3면 및 29번 교각의 1면으로 설정함
- 비행경로의 경우 교각의 4면을 반시계 방향으로 점검하며, 정면 1,3번 교각면은 중복률이 50%가 되도록 총 2번의 왕복 비행을 실시하며, 좌,우면 2,4번 교각면은 중복률 50%가 되도록 1번의 왕복 비행을 실시함.



■ Step 3 : 점검 시나리오(비행경로) 설정 (바닥판)

- 콘크리트 바닥판의 경우 중앙 하부를 기준으로 서늘 → 춘천 방향으로 점검을 실시하며, 좌측 바닥판 및 박스거더 하부, 우측 바닥판 순서대로 점검 비행을 실시함.
- 박스거더 측면부는 무인검사장비의 짐벌을 조정하여, 정사 위치에서 점검 비행을 실시함.
- 바닥판의 점검순서는 첨부된 'CTE3-2 보고서'에 설명되어있음.

■ Step 4 : 점검 비행 및 영상 데이터 획득

- 점검 비행에 소요된 시간은 교각 1개소당 10분 및 바닥판 1경간당 15분으로 총 40분간 비행을 수행함.
- 점검 비행을 통해 획득된 영상 데이터는 JPG + Raw 형식으로 저장하며, 총 2,177장의 이미지 데이터를 확보함.
- 총 2,177장의 이미지 데이터 중 중복률 50%를 고려하여 선별한 결과, 551장의 유효 이미지 데이터를 추출함.



점검 사진(교각)



점검 사진(바닥판 및 거더 외부)



획득 데이터 일부 (교각)



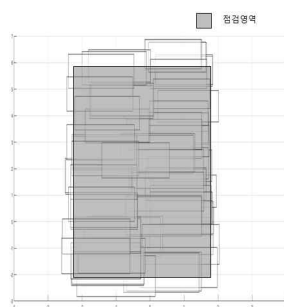
획득 데이터(거더 외부)



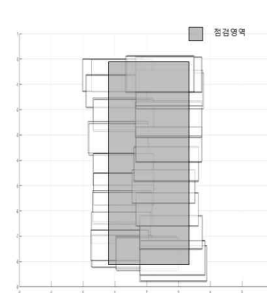
획득 데이터(바닥판)

■ Step 5 : 이미지 위치 좌표 기반 누락 영역 검사 수행

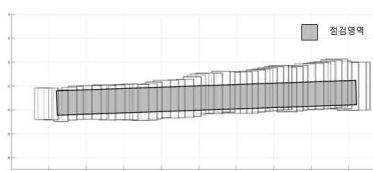
- 30번 교각 1면: 총 376장의 획득 데이터 중 중복률 50%를 고려하여 데이터 추출 후, 이미지 좌표 추정을 통한 누락영역 확인 결과 → 누락된 영역 미발생
- 30번 교각 2면: 총 213장의 획득 데이터 중 중복률 50%를 고려하여 데이터 추출 후, 이미지 좌표 추정을 통한 누락영역 확인 결과 → 누락된 영역 미발생
- 29-30번 경간 콘크리트 바닥판 : 총 1,588장 중 획득 데이터 중 중복률 50%를 고려하여 데이터 추출 후, 이미지 좌표 추정을 통한 누락영역 확인 결과 → 누락된 영역 미발생



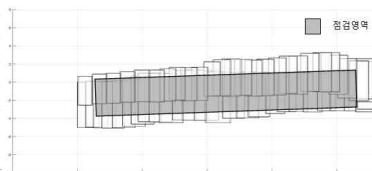
29번 교각 앞면



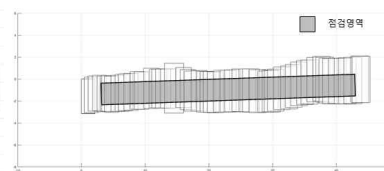
29번 교각 옆면



29-30번 경간 바닥판 좌측



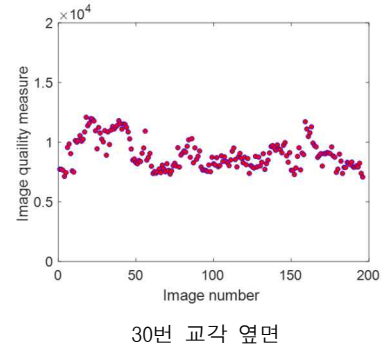
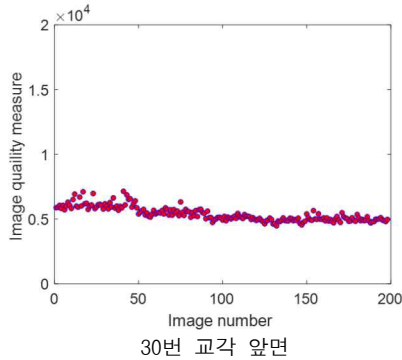
29-30번 경간 바닥판 중앙



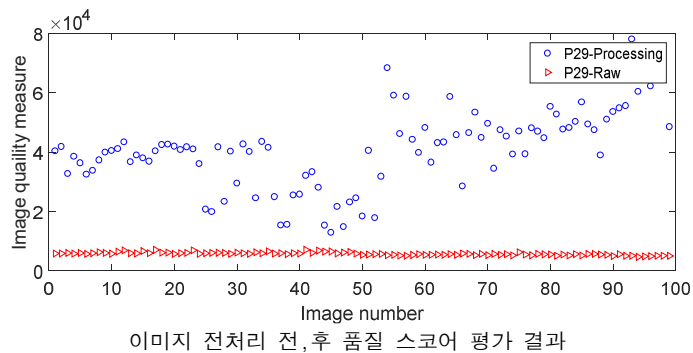
29-30번 경간 바닥판 우측

■ Step 6 : 영상 품질 평가 수행 (이미지 전처리와 전,후 비교 포함)

- 촬영된 데이터에 대한 영상 품질 평가를 수행하였으며, 교각 및 바닥판을 촬영한 데이터의 품질이 블러 발생에 영향을 받지 않음을 확인할 수 있음.



- 또한, 30번 교각 데이터에 대해서는 영상처리기법을 활용한 이미지 개선 처리를 수행하였으며 전처리 전, 후 품질 평가 결과 최대 4배 이상의 품질 개선을 확인할 수 있었음.



이미지 전처리 전(30번 교각)



이미지 전처리 후(30번 교각)

■ Step 7 : 딥러닝 기반 자동 손상 탐지 수행

Mask R-CNN 기반 균열 탐지

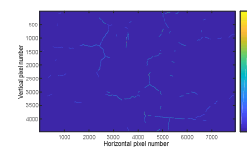


균열 탐지 일부 (30번 교각)

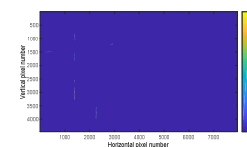


균열 탐지 일부 (바닥판 및 거더외부)

영상처리기법을 활용한 균열 가시화

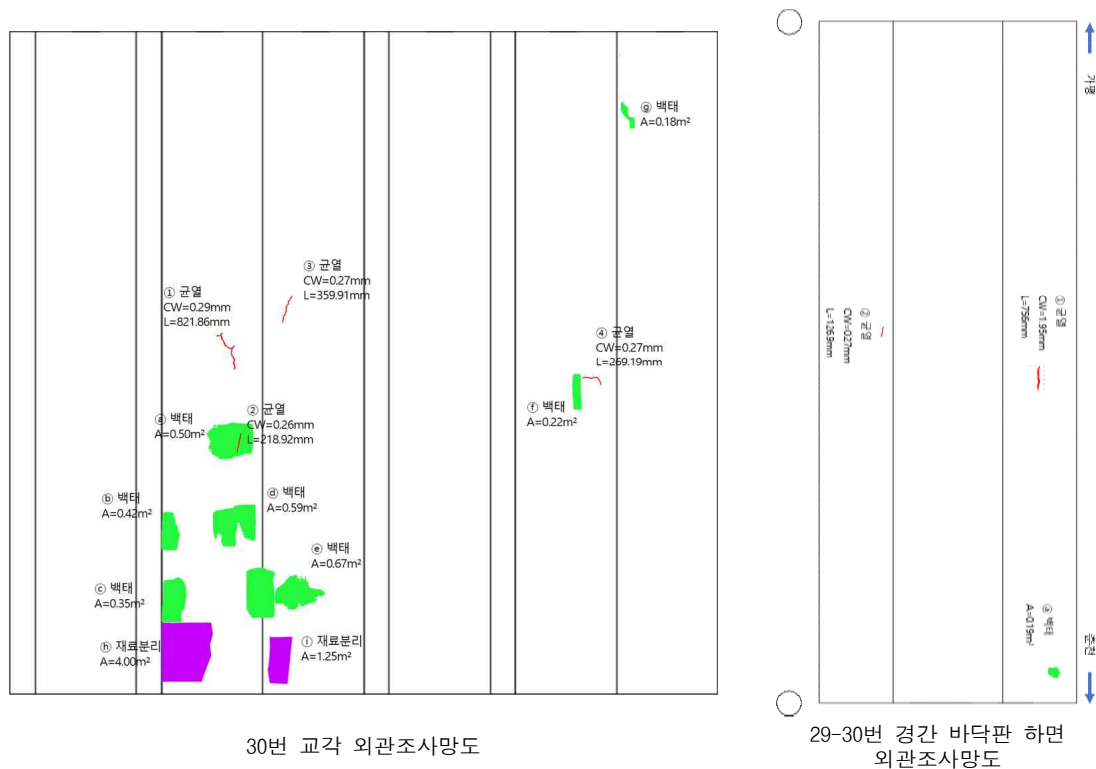


정량화를 위한 가시화 과정(Color map)



정량화를 위한 가시화 과정(Color map)

■ Step 8 : 데이터 가시화 및 외관조사망도 표출



■ Step 9 : 부재 상태 평가

- 실험 수행 결과 30번 교각의 앞면 및 배면에 콘크리트 균열, 재료분리, 백태가 탐지 되었으며, 정량화된 결과를 바탕으로 부재별 상태 평가를 실시함.
- 기존 교량 상태평가 지침서인 ‘안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(2017)’ 에 따르면 부재별 상태평가는 부재의 중요도를 감안하여 차등화 하고 있음.
- 30번 콘크리트 교각의 손상 탐지 결과는 아래와 같음.

표. 교각 손상 탐지 및 정량화 결과(균열)

번호	손상 종류	균열폭(CW)	균열 길이(L)
1	1방향 균열	0.29 mm	821.86mm
2	1방향 균열	0.26 mm	218.92mm
3	1방향 균열	0.27 mm	359.91mm
4	1방향 균열	0.27 mm	269.19mm

- 30번 교각에서 백태 면적 2.93m² 및 재료분리 면적 5.25m² 가 검출되었음.
- 정량화된 손상 탐지 결과를 바탕으로 아래와 같이 교각의 상태평가 순서도에 준하여 부재의 상태등급을 산정함.
- 콘크리트 교각 상태등급 산정 과정은 ‘무인검사장비 교량 점검 매뉴얼’ 에서 제시하였음.

※ 개별부재 평가결과는 항목1(균열, 변위)과 항목2(열화 및 손상) 중에서 최소등급으로 산정한다.

따라서, 30번 콘크리트 교각의 개별부재 평가 결과는 아래와 같음.

• 균열, 변위 : B

• 열화 및 손상 : C

▪ 개별부재 평가 결과 : C

- 바닥판의 경우 1경간(40m)에 대해 손상탐지를 수행하였으며, 29-30번 경간에 해당하는 콘크리트 바닥판 및 거더 외부의 손상 탐지 결과는 아래와 같음.

개별부재	번호	균열종류	균열폭(CW)	균열 길이(L)
바닥판	1	1방향 균열	1.95 mm	756mm
바닥판	2	1방향 균열	0.27 mm	126.9mm

- ※ 개별부재 평가결과는 항목1(균열)과 항목2(열화 및 손상) 중에서 최소등급으로 산정한다.

- 균열평가결과 : B

• 열화 및 손상 평가결과 : B

■ 개별부재 평가 결과 : B

연간 번호	부지번호	개발목적지역	소유자명(주거)	구역제	비율1	비율2	비율3	전체 X축길이	전체 Y축길이	순차정점 X좌표	순차정점 Y좌표	면적소유권 과목	장성현물기	구조형식	집터 면적	특	순차위치	순차정보	순차정보 (층)	순차정보 (굴입)	순차정보 (수위)	순차정보 (단위)	순차정보 (개소)
30	R02002	R0200201	R0200201001					5766.667	3233.333	1761.935	1672.786	R0200201	G0002	027.98	0.28	P30교량-1	DSCC08843						
30	R02002	R0200201	R0200201001					5766.667	3233.333	1872.054	1236.307	R0200201	G0002		0.18.83	0.28	P30교량-2	DSCC08849					
30	R02002	R0200201	R0200201001					5766.667	3233.333	2257.479	1877.837	R0200201	G0002		159.91	0.27	P30교량-3	DSCC09083					
30	R02002	R0200201	R0200201001					5766.667	3233.333	4735.201	1528.171	R0200201	G0002		269.19	0.27	P30교량-4	DSCC09899					
30	R02002	R0200201	R0200201001					5766.667	3233.333	1796.642	1219.515	R0200201	G0002				P30교량-5	DSCC08889	책대			0.30	m ²
30	R02002	R0200201	R0200201001					5766.667	3233.333	1321.451	1877.862	R0200201	G0002				P30교량-6	DSCC08757	책대			0.45	m ²
30	R02002	R0200201	R0200201001					5766.667	3233.333	1358.156	474.6554	R0200201	G0002				P30교량-7	DSCC08740	책대			0.35	m ²
30	R02002	R0200201	R0200201001					5766.667	3233.333	1835.349	820.2047	R0200201	G0002				P30교량-8	DSCC08962	책대			0.59	m ²
30	R02002	R0200201	R0200201001					5766.667	3233.333	2239.126	539.0084	R0200201	G0002				P30교량-9	DSCC09046	책대			0.67	m ²
30	R02002	R0200201	R0200201001					5766.667	3233.333	4625.08	1478.527	R0200201	G0002				P30교량-10	DSCC09899	책대			0.22	m ²
30	R02002	R0200201	R0200201001					5766.667	3233.333	5026.894	3380.085	R0200201	G0002				P30교량-11	DSCC09046	책대			0.16	m ²
30	R02002	R0200201	R0200201001					5766.667	3233.333	1431.572	205.0512	R0200201	G0002				P30교량-12	차로 분포				4.00	m ²
30	R02002	R0200201	R0200201001					5766.667	3233.333	2202.419	172.6747	R0200201	G0002				P30교량-13	차로 분포				1.25	m ²
																		총 순차면적		표준순차상승			
																		(m²)		%			
																		8.18		3.11			
																		교대		상행방향 기준		P30	

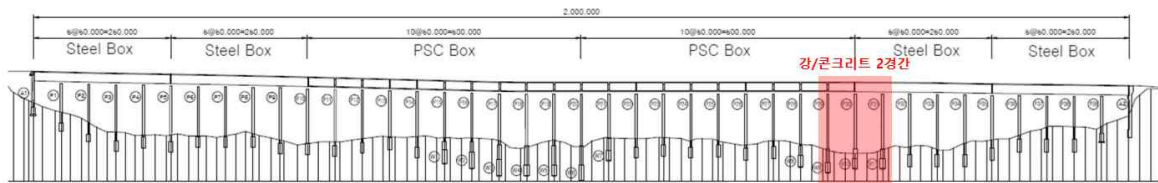
[illegible]

– 77 –

3(4) 인력점검과 무인검사장비 기반 교량 점검 비교

■ 인력 점검

- 개요: 무인검사장비의 성능 검증을 위해 교량 유지관리 전문가의 입회하에 인력 기반의 교량 점검을 수행
(인력 점검과 무인검사장비 기반 교량 점검에 대한 전문가의 의견서 첨부)
- 대상 구조물: T/B 교량인 등선교 교각 2개소(29번-31번 교각) 및 바닥판(29번-30번: PSC교량, 30번-31번: 강교량) 2경간을 대상으로 점검 수행
- 일시: 2019년 11월 8일
- 점검 인력: 고소차 운전자 1인, 교량 점검 전문가 2인
- 점검 유형: 정밀 점검 수행(손상 유형 : 균열, 철근노출, 박락, 백태 등)



등선교 종단면도

- 대상 구조물의 인력 점검을 위해 고소차를 하상 도로에 전개 후, 교량 점검 전문가들이 바스켓에 탑승하고 근접하여 손상 촬영 및 외관조사망도 작성
- 일반적인 정밀 점검은 교량 바닥판 내부도 점검하지만 무인검사장비 기반 점검 결과와 비교를 위해 외부에 대해서만 점검 수행

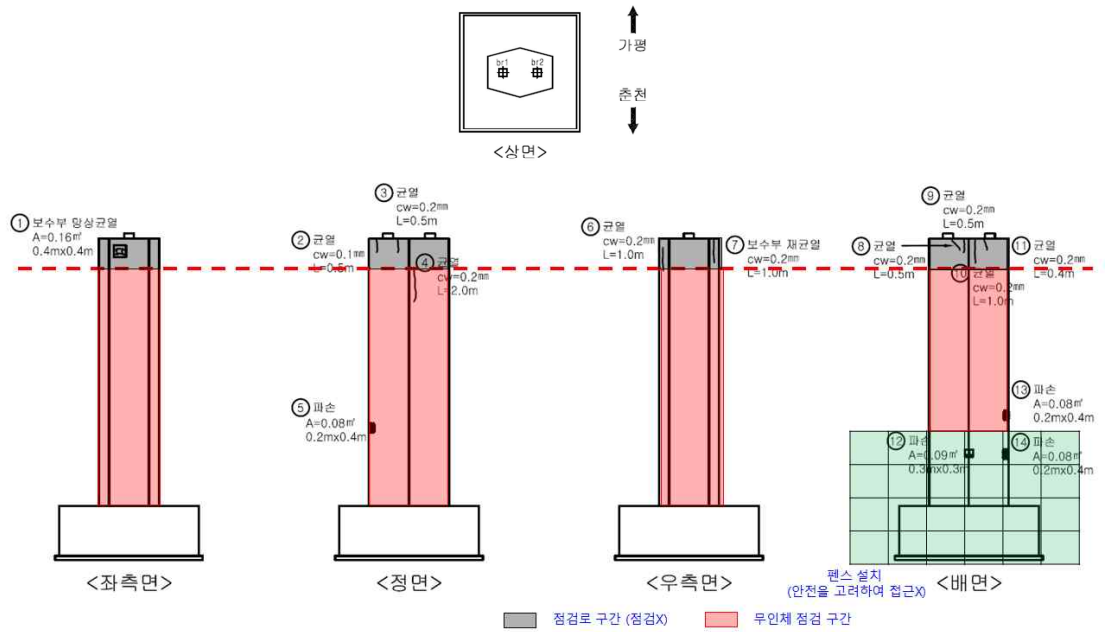


고소차를 이용한 교량 점검

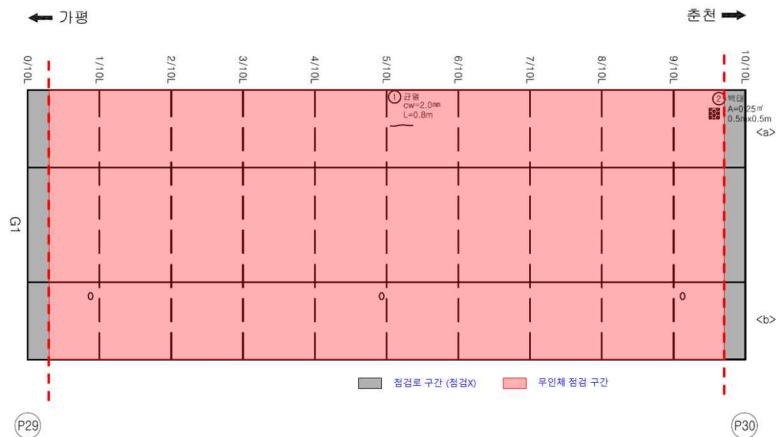


인력 점검에 의한 손상 탐지 사진

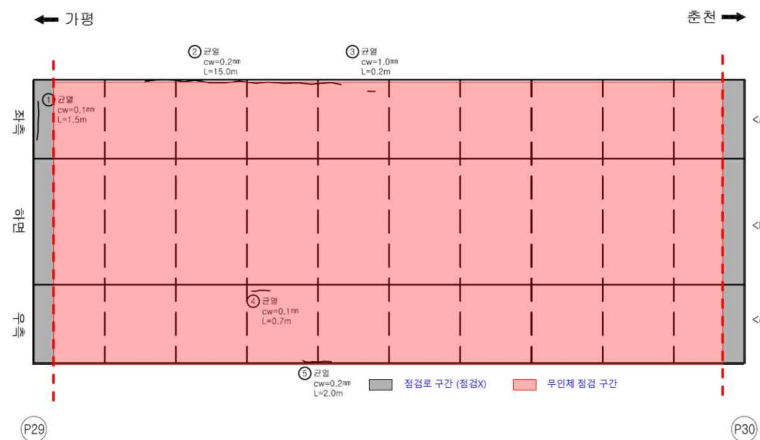
- 외관조사망도 - 하부구조 교각 (29번 교각)



- 외관조사망도 - 바닥판 하면 (S30)



- 외관조사망도 - 거더외부 (S30)

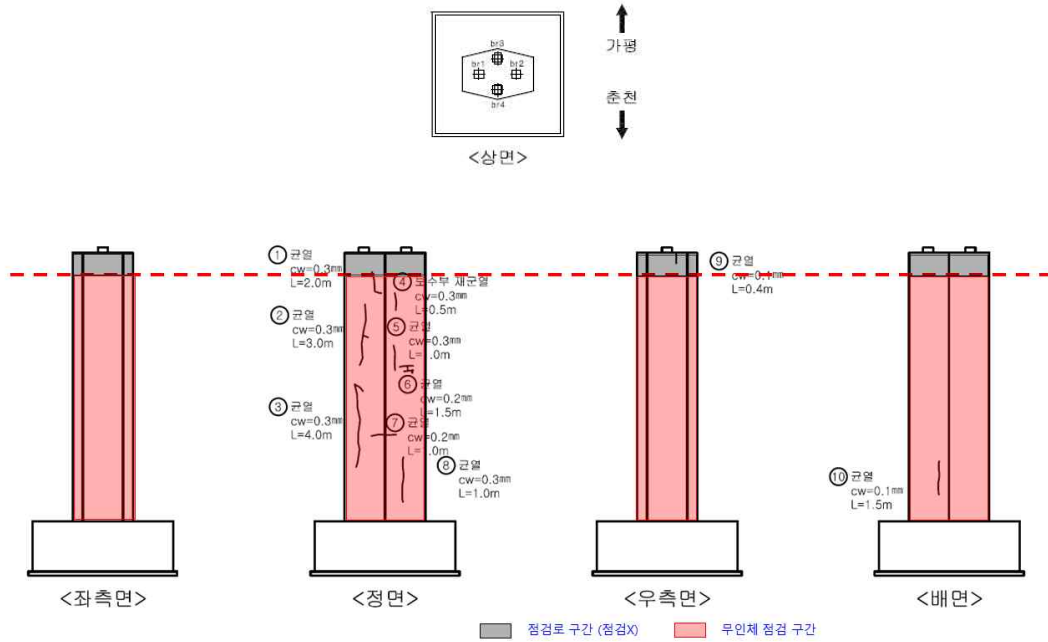


-
- 가평
춘천
- <상면>
- ③ 보수부 재균열
 $CW=0.2$
 $L=1.0m$
- 재료보리
 $A=1.25m^2$
 $0.5m \times 2.5m$
- <우측면>
- <배면>
- 점점로 구간 (점점X) 무연체 점점 구간

-
- Figure 1 is a schematic diagram of a three-story building showing the layout of fire alarm devices. The diagram includes a north arrow at the top right. The building is divided into three horizontal sections. The top section contains a fire alarm control panel (150EA) and two fire alarm devices (A=0.50㎡, 0.01m x 0.01m). The middle section contains a fire alarm control panel (600EA) and two fire alarm devices (A=1.50㎡, 1.0m x 1.0m). The bottom section contains a fire alarm control panel (150EA) and two fire alarm devices (A=0.50㎡, 0.01m x 0.01m). A legend at the bottom indicates that the grey area represents the fire alarm control panel (검검로 구간) and the pink area represents the fire alarm device area (무연계 검검 구간).

-
- Figure 3 is a schematic diagram of the layout of the experimental facility. The diagram shows a rectangular facility divided into three horizontal lanes labeled '전선' (Front), '중심' (Center), and '후선' (Back). The lanes are separated by dashed lines. The '전선' lane contains a starting area with a red dashed line and a starting signal. The '중심' lane contains a starting area with a red dashed line and a starting signal. The '후선' lane contains a starting area with a red dashed line and a starting signal. The diagram also shows a '출발' (Start) line on the right side. A legend at the bottom indicates that the grey area represents the '점점포 구간 (점점포)' and the red area represents the '무연체 점점포 구간'.

- 외관조사망도 - 하부구조 교각 (31번 교각)



■ 무인검사장비 기반 교량 점검

- 개요: 인력 점검 결과와의 비교를 위해 동일한 대상 구조물을 고려하여 교량 점검 실시
- 점검 인력: 무인검사장비 운용자 2인
- 점검 유형: 정밀 점검 수행(손상 유형 : 균열, 철근노출, 박락, 백태 등)



근접형 무인검사기체



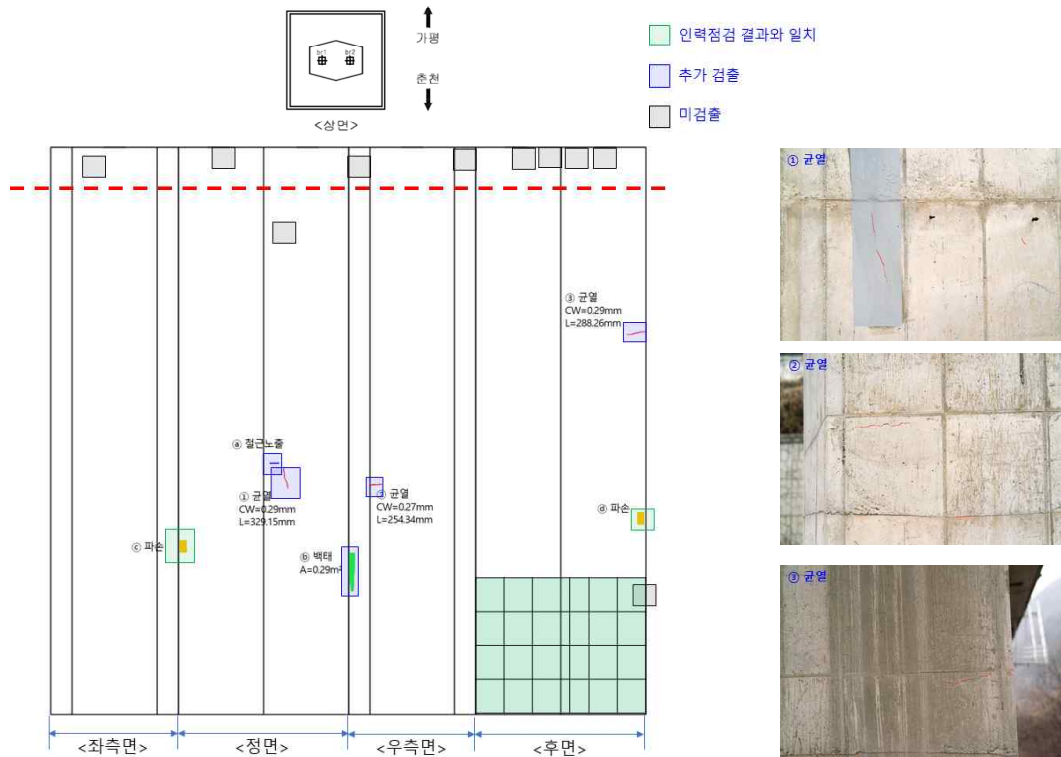
GCS 설치 및 비행 준비



장비 점검

- 무인검사장비를 이용한 교량 점검은 사전 비행을 통해 포인트 클라우드 기반의 3D 모델을 생성하고, 이를 토대로 2D 외관조사망도를 제작함
- 본 비행에서 수집된 이미지는 품질 평가 및 개선, 좌표 추정을 통한 누락영역 검출 및 손상 위치 좌표 획득 등의 과정이 수행됨
- 마지막으로 딥러닝을 활용하여 손상 이미지의 검출 및 위치 추정, 그리고 분할하여 2D 외관 조사망도에 표출
- 외관조사망도에서는 손상의 분류 및 위치 추정뿐 아니라 형태까지 나타낼 수 있으며, 가시성을 높이기 위해 자세한 손상 정보 (손상 유형, 손상 크기, 손상 위치 등)는 U-BMS 상에서 클릭식 별도의 팝업을 통해 확인할 수 있음

- 외관조사망도 - 하부구조 교각 (29번 교각)



- 외관조사망도 - 바닥판 하면 (S30)



- 외관조사망도 - 거더외부 (S30)

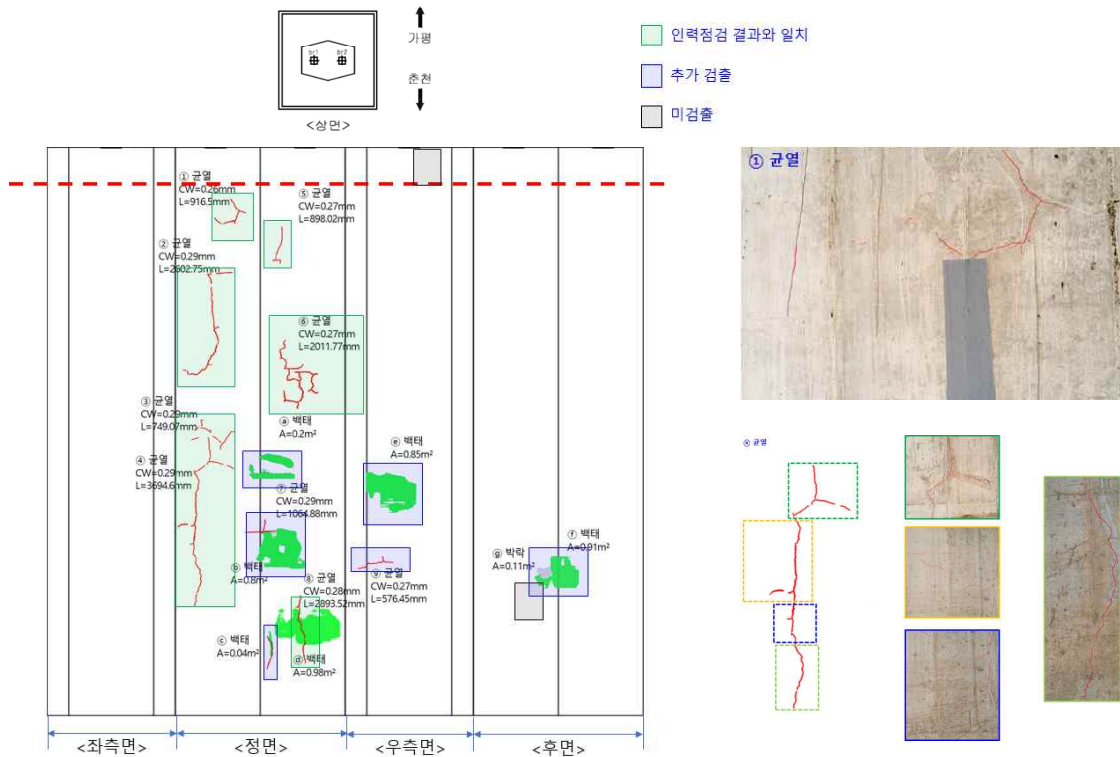


-
- 5 공정
- 6 배치

-

-
- 가평
- 준천
- ① 강재부식
 $A=0.01\text{m}^2$
- ② 도장박리
 $A=0.15\text{m}^2$
- ③ 도장박리
 $A=0.04\text{m}^2$
- ④ 볼트부식
- 강재 변형 성과 지표 X
- 원격진공결과와 일치
- 추가 검증
- 미검출
- P29

- 외관조사망도 - 하부구조 교각 (31번 교각)



■ 인력점검과 무인검사장비를 이용한 교량점검 소요시간 비교

항 목	기존 교량점검(육안 점검)	무인검사장비 기반 교량점검
점검시간	총 8시간(점검 4시간)	총 4시간(점검 1시간)
데이터 처리 시간	약 8시간 소요 (외관조사망도 및 상세점검 수준에 따라 변동 가능)	(이미지 200장 기준) • 손상탐지(딥러닝) : 약 3시간 • 손상표출 및 U-BMS 업로드 : 약 3시간 (병렬연산을 수행할 경우 시간 단축 가능)
점검오차	-	• 강재변형 및 미소균열(cw 0.2mm 미만) 등 일부 손상 미검출 • 점검로 등 교량 주변의 장애물 위치에 존재하는 손상 미검출

- 소결: 무인검사장비를 이용한 교량 점검에서 손상에 대한 정량화 수치 및 상세 이미지는 U-BMS의 외관조사망도를 통해 확인할 수 있으며, 본 외관조사망도는 이해를 돕기위해 손상 정량화 데이터를 추가로 나타내어 기존 인력 점검 기반 외관조사망도와 비교하였음. 비교를 위해 인력점검결과와 일치하는 손상, 미검출된 손상, 추가로 검출된 손상으로 구분하였으며, 실제 균열은 인력점검결과와는 달리 길게 연결되지 않은 부분도 있었지만, 비교를 위해 균열을 연결하여 길이를 합산하였음. 따라서, 보고서상에 나타난 균열 길이의 오차가 발생할 수 있지만, 세부적인 정량화 결과는 U-BMS에 저장하기 때문에 신뢰성을 확인할 수 있음. 또한, 상태 등급 산정시 대상 부재 및 구조물의 총 면적 대비 손상률을 확인할 때 더욱 높은 신뢰성을 기대할 수 있음. 외관조사망도에서 볼 수 있듯이 장애물(점검로)이 있는 구간에서 미검출된 손상이 있지만 균열 정량화 목표 (0.3mm) 보다 낮은 값으로 확인되었으며, 점검 구간에서 미검출된 손상도 정량화 목표보다 낮은 값으로 확인되어 무인검사장비를 이용한 교량 점검의 신뢰성을 확인할 수 있었음. 무인검사장비를 이용한 외관조사망도에서 특이 사항으로 생각되는 곳은 별도로 표시하여 교량 유지관리 전문가가 확인할 수 있도록 하였음. 특히, 31번 교각의 경우 무인검사장비 기반 점검에서 인력점검에서 검출되지 않은 백태가 다수 검출되었는데 전문가 확인 결과 콘크리트 표면의 열화로 인한 변색으로 백태 이전의 단계라 볼 수 있음을 알 수 있었음.

의견서

연구기관명 (부서명)	한국과학기술원 (건설 및 환경공학과)
과 제 명	무인검사장비 기반 교량구조물 신속진단 및 평가기술 개발

--

제 목	무인검사장비를 활용한 교량 점검 의견			
점검 기간	2019.11.-2019.12	테스트베드(T/B) 대상지	강원도 춘천, 등선교 (P29-P31 경간)	
의견 제출자	이 름	이 영 일	소 속	씨티씨(주)
	직 책	상무	연락처	010-4739-0891
	주 소	경기도 고양시 일산동구 강송로 156 강촌마을2단지		
의견 내용	◇ 강재변형이나 미소 균열(cw0.2mm 미만) 등 성과지표 외의 손상을 제외하면, 무인 체 검사장비를 이용하여 검출된 손상의 규모와 발생 위치 등 필수 정보가 인력점검 과 동등 이상의 수준인 것으로 나타나서 무인검사장비를 이용한 교량 점검의 신뢰 성을 확보하는 것으로 판단됩니다. ◇ 교각부에서는 무인검사장비를 이용하여 추가 검출된 손상이 일부 확인되었는데, 인 력점검에서는 현장여건이나 접근장비의 특성상 교각 전 부위를 근접하여 면밀하게 점검하는데 한계가 있음에 기인하는 것으로서, 무인검사장비는 상대적으로 이러한 제약이 없으므로 교량 점검의 효율성을 높일 수 있을 것으로 판단됩니다. ◇ 점검로 등의 장애물 설치 위치는 손상이 미검출되었으나 인력점검이 가능한 부위이 므로, 상호 보완하는 조건으로 활용 시 실제 점검에서의 활용도는 충분할 것으로 판 단됩니다. ◇ 백태와 같이 육안상 판별이 쉽지 않은 손상이나 균열폭 0.5mm 이상의 주요 손상에 대해서는 인력점검을 병행하여 점검결과의 신뢰성을 향상시키는 방안이 효율적일 것으로 판단됩니다.			

2020 . 01 . 29

의견 제출자 : 이 영 일

01891 (인)

(5) 무인검사장비 기반 교량점검 시스템 실증시험 및 주요 성과홍보

■ 무인검사장비를 활용한 교량 외관 신속진단 실증실험(무인검사장비 과제 성능평가 공개시연)

- 개요: 국토부, 진흥원 및 교량 유지관리 전문가의 입회하에 무인검사장비 기반 신속진단 및 평가기술 활용 현장검증 시연 수행
- 장소: T/B 교량인 등선교 (강원도 춘천 소재)
- 일시: 2019년 11월 15일 (14:00 ~ 15:30)
- 개발 완료된 개별요소기술을 통합 적용한 점검시스템을 활용하여 실 교량 대상으로 안전점검을 시행, 무인검사장비 기반 교량 구조물 상태평가를 진행
- 본 연구과제에서 개발한 U-BMS를 활용하여 교량 점검 비행, 손상 탐지 및 손상 표출 등 일련의 구조물 상태평가를 위한 시나리오에 따른 점검 프로세스를 구현



무인검사장비 과제 현장검증 시연

■ 무인검사장비 기반 교량구조물 신속진단 및 평가기술 개발 관련 주요 홍보실적

- “2018 The 7th World Conference on Structural Control and Monitoring” 등 국제컨퍼런스 초청 강연
- ‘17 ~ ‘19 국토교통기술대전 및 ‘19 스마트건설기술엑스포 등 주요행사의 부스 참가 및 성과홍보
- ‘2019년 드론을 활용한 시설물 안전·유지 관리 토론회’ 에서 과제성과 발표



7WCSCM 초청강연



국토교통기술대전 홍보



드론토론회 발표

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

3-1. 목표 달성도

가. 정성적 연구목표 달성도

CTE	핵심성과 (level1)	단위성과 (level2)		성과 목표				해당 기관
				질적 성과지표	목표치	달성치	검증방법	
				측정방법				
CTE1	교량 외부 외관조사를 위한 무인검사장 비 개발	CTE 1-1	자율운행 플랫폼 요소 기술 개발	무인체의위치오차	0.5m 이내	0.5 m	RTK-GPS 위치와 알고리 즘으로 부터 추정위치 비교	한국과학 기술원
				무인체의 구조물 접근 거리 측정 및 오차 범위 계산				
				3차원 최단 경로 오차율	5% 이내	1.4%	알고리즘으로 부터 생성된 경로와 최단경로 비교	
				개발 알고리즘 경로와 ground truth간 백분율 차이				
				자율운행 시스템 구동 작업성공률	95% 이상	95%	알고리즘 전체수행횟수 대비 알고리즘 성능횟수 비교	
		통합 자율운행 시스템 구동에 의한 작업 성공 확률 계산						
		CTE 1-2	교량 외부 외관조사 를 위한 무인검사 장비 개발	비행시간	최소 30분 이상	33분 10초	시험공역 실증 (참관인 입회)	(주)엑스드론
				실외시간 측정 (payload 4.2kg (±0.4kg), 평균 풍속 2m/s, 평균온도 1 5℃~25℃, 기본적인 통신 및 영상 장비 사용 조건)				
				풍속극복능력	10m/s	10m/s	공인시험성적 서 발급	
				실외풍속측정 (풍동시험장)				
실외풍속측정 (풍동시험장)								
CTE2	무인검사장 비운영 및 원격제어기 술개발		무인검사 장비운영 및 원격제어 기술개발	통신거리	3km	3km	인정기관 확인 비행 동영상 GCS Data	
				실외거리측정 (Testbed비행)				
CTE3	이중영상 데이터 융합 기반 교량 비접촉식 상태검사 기술 개발	CTE 3-1	강재표면 도막두께 및 부식깊이 정량화 기술 개발	도막 두께 측정	250 μm (현장실험)	40 μm (현장실험)	달성 수치 확인	한국과학 기술원
				실측데이터와 비교				
				부식 깊이 측정	10 cm ² (현장실험)	2.25 cm ² (현장실험)	달성 수치 확인	
				실측데이터와 비교				
		CTE 3-2	강재 · 콘크리트 균열 및 볼트 연결부 손상 평가 기술 개발	강재 · 콘크리트 균열 측정	300 μm	300 μm	성능실험 보고서	
				실측데이터와 비교 (T/B 적용 시 기존 DB와 비교로 신뢰성 확보)				
				볼트 연결부 손상을 검출 신뢰도	90%	90%	성능실험 보고서	
				실측데이터와 비교 (T/B 적용 시 기존 DB와 비교로 신뢰성 확보)				
				검사 시스템 통합 기술 개발	1건	1건	성능실험 보고서	
				검사시스템의 통합 여부				
				개발 기술의 T/B 적용 및 피드백	1건	1건	전문가 평가자문	
				적용결과의 적정성				
		CTE 3-3	COD/IR 하이브리 드 영상 기반 강 재 · 콘크리트 균열평가 기술 개발	하이브리드 영상을 통한 측정 가능한 강재 · 콘크리트 균열 폭	100μm	100μm	성능실험 보고서	세종대학교 산학협력단
				실측데이터와 비교				
				스캐닝을 통한 단위 면적당 균열 정량화 오차	3%	3%	성능실험 보고서	
				실측 데이터와 비교				
				1m ² 단위면적당 조사시간	3분	3분	성능실험	

		CTE 3-4	초분광영상(딥러닝 기반) 이용 백태 및 박락 평가 기술 개발	시간측정			보고서	서울 시립대학교 신학협력단		
				백태유무탐지율	95%	100%	실제 교량에서 Mask R-CNN을 이용한 다중 콘크리트 손상 탐지 수행			
				시험을 통한 실측값과의 비교						
				박락유무탐지율	95%	100%	외부 콘크리트 시험체에서 Mask R-CNN을 이용한 다중 콘크리트 손상 탐지 수행			
				시험을 통한 실측값과의 비교						
				백태발생 면적율	2%	0.1%	실제 교량에서 Mask R-CNN을 이용한 다중 콘크리트 손상 탐지 수행			
				시험을 통한 실측값과의 비교						
				박락 면적율	2%	0.16%	외부 콘크리트 시험체에서 Mask R-CNN을 이용한 다중 콘크리트 손상 탐지 수행			
				시험을 통한 실측값과의 비교						
				계산 속도	5분	2분 40초	외부 콘크리트 시험체에서 Mask R-CNN을 이용한 스캐닝 시간 측정			
				시간측정						
CTE4	무인검사장비 수집데이터를 이용한 교량의 신속한 외관상태 평가 기술 개발	CTE 4-1	사용자기반 무인검사 장비 교량관리 시스템 개발	신속하고 정확한 교량관리 점검을 위한 사용자 중심의 기능 제공	100	100	시연 동영상	브로드 웨이브		
				시스템서비스구현			시연 동영상			
			무인검사 장비 외관조사 망 및 타 시스템 통합 연동 기술 개발	외관조사망, 교량상태평가, BMS 등 타 시스템과 연동체계 구축	100	100				
				시스템서비스구현						
		CTE 4-2	무인검사 장비 측정정보 기반 외관조사 망도 표출 기술 개발	측정정보 기반 외관조사망도 표출기술 시스템 구축	100%	100%	성능평가 보고서	경북대 신학협력단		
				외관조사망도 생성 여부						
				무인체 비행경로 계획을 위한 메시(Mesh) 모델 생성 기술 개발	100%	100%				
				3차원 위치정보를 가진 Mesh 모델 생성 S/W						
		CTE 4-3	무인검사 장비 수집 데이터를 이용한 교량 평가체계 개발	무인검사장비 관련 교량 운영지침 동향 파악 및 관련 분야 규제 조사	1건	1건	전문가 평가 자문	한국시설 안전공단		
				조사보고서의 충실성						
				(가칭)교량 안전점검등을 위한 무인검사장비 활용 가이드라인	1건	1건	전문가 평가 자문	한국시설 안전공단		
				가이드라인의 타당성						
		CTE 4-4	성능중심 평가방식을 활용한 무인체 기반 내구성요소 평가 프로세스 개발	무인검사 기반 성능중심 평가방식 내구성요소 평가 매뉴얼	1건	1건	매뉴얼 작성 여부 확인	한국건설 기술연구원		
				매뉴얼 작성 여부						
		계								

나. 정량적 연구목표 달성도

성과지표		목표	달성	달성률(%)	비고
논문	국외논문	15	18(SCI : 15)	120	-
	국내논문	8	5	62.5	* 3건은 비SCI급 국외논문으로 대체 (총 논문성과는 100% 달성)
학술발표	국내	14	36	257	-
	국외	26	71	273	-
특허	출원	12	16	133	-
	등록	4	9	225	-
기술이전		2	2	100	-
기술홍보		7	27	386	-
실증비행자료		2	2	100	-
연구시설장비		1	1	100	-
시제품		6	7	117	-
보고서(기술문서)		6	7	117	-
소프트웨어		5	9	180	-
인력양성		25	28	112	-

■ 주요 성과실적

Electronic Acknowledgement Receipt	
EPF ID:	24050895
Application Number:	1637040
International Application Number:	PCT/KR2018/013294
Confirmation Number:	4653
Title of Invention:	METHOD OF PERFORMING VISUALIZED MEASUREMENT ON THICKNESS DISTRIBUTION OF PAINT FILM AND APPARATUS THEREFOR
First Named Inventor/Applicant Name:	Hoon Sohn
Customer Number:	22494
Filer:	Paul Clara Durkin/Willem Hafferty
Filer Authorized By:	Paul Clara Durkin
Attorney Docket Number:	21C286-148PUS
Receipt Date:	06-DEC-2018
Filing Date:	
Time Stamp:	13:08:05
Application Types:	U.S. National Stage under 35 USC 371

해외 특허출원 (미국)

国际申请进入中国国家阶段声明 (发明)	
① 专利代理机构名称	② 国家知识产权局公告号
③ 国际申请号	④ 国际申请日
⑤ 优先权日	⑥ 优先权国
⑦ 国际公布号	⑧ 国际公布日
⑨ 发明名称	⑩ 发明人姓名
⑪ 发明人	⑫ 发明人地址
⑬ 第一发明人	⑭ 发明人姓名
⑮ 发明人地址	⑯ 发明人姓名
⑰ 发明人姓名	⑱ 发明人姓名
⑲ 发明人姓名	⑳ 发明人姓名
㉑ 发明人姓名	㉒ 发明人姓名
㉓ 发明人姓名	㉔ 发明人姓名
㉕ 发明人姓名	㉖ 发明人姓名
㉗ 发明人姓名	㉘ 发明人姓名
㉙ 发明人姓名	㉚ 发明人姓名
㉛ 发明人姓名	㉜ 发明人姓名
㉝ 发明人姓名	㉞ 发明人姓名
㉟ 发明人姓名	㊱ 发明人姓名
㊲ 发明人姓名	㊳ 发明人姓名
㊴ 发明人姓名	㊵ 发明人姓名
㊶ 发明人姓名	㊷ 发明人姓名
㊸ 发明人姓名	㊹ 发明人姓名
㊺ 发明人姓名	㊻ 发明人姓名
㊼ 发明人姓名	㊽ 发明人姓名
㊾ 发明人姓名	㊿ 发明人姓名

해외 특허출원 (중국)



최종시제품
(교량점검용 근접형/부착형 무인비행체)

3-2. 관련 분야 기여도

가. 연구 개발 성과의 검증 및 현장 적용을 위한 법제도 개선안 마련

○ 4차산업혁명 기술 관련 시설물안전법 개선 시 반영 관련 정책 제안

- 국무조정실 규제기획과제과 요청으로 「'18년 포괄적 네거티브 전환 발굴 과제」에 대해서 시설물 안전법(전부개정, 2018.01.18.) 시행령 중 하도급이 가능한 전문기술 조정(안)으로 드론 등 최신 장비/기술의 현장 적용이 가능하도록 하도급 가능 전문기술에 포함하도록 하는 법령 개정안을 제안함, 현재 관련 부처(시설안전과)에서 법령 개정 위한 준비 및 검토 중(시설안전공단 경영혁신실에서 대응 중)

■ 현장의 목소리

- 최근 ICT 기술 기반의 첨단 조사 기법들이 개발되고 있음에도 불구하고, 기존 법령에는 하도급이 가능한 전문기술이 한정적으로 규정되어 있어, 시설물 점검분야에서 드론 등의 신기술 및 신제품의 활용이 불가능하고 인력위주의 업무 수행으로 추락사고 등 점검·진단 수행자의 안전사고 우려 및 시설물의 효율적 점검·진단에 애로사항 발생

■ 개선으로 인한 수치 변화

- 산업적 측면 - 신기술, 신제품 등 전문기술을 시설물 점검분야에 광범위하게 적용 가능하도록 함으로써 신기술, 신제품의 조속한 시장출시 및 신기술 개발의 활성화 유도 가능
- 수혜자 측면 - 신기술·신제품을 전체 시설물에 적용할 경우 약 149.4억/년, 50%의 시설물에 적용한다면 74.7억/년의 비용절감 효과 기대되는 한편, 점검·진단기술자의 산업재해 예방효과 기대

■ 제도개선의 정성적 의미

- 신기술, 신제품 등 전문기술을 시설물 점검분야에 광범위하게 적용 가능하도록 함으로써 신기술, 신제품의 조속한 시장출시 및 신기술 개발의 활성화가 예상
- 접근하기 어려운 곳이나 정밀조사가 필요한 부분들을 보다 상세하게 조사 할 수 있어 점검·진단의 정확성과 효율성 제고되고 이를 통해 시설물 안전성 확보 용이
- 터널상부, 교량, 고층건물 등 접근이 어려운 부분을 드론 등을 활용하여 수행하게 되어 점검·진단 기술자의 산업재해 예방

표. 드론 신기술 활용 시 비용 절감 산출근거

연도	1,2종 시설물 (개소)*	'17년 점검비용 (백만원)*	절감율 (%)**	절감금액 (백만원)
'15년	20,982	116,229	12	13,947
'16년	21,498	113,243	12	13,589
'17년	26,992	144,037	12	17,284
평 균	23,157	124,503	12	14,940
*한국시설안전공단 시설물정보관리종합시스템(fms.or.kr)에서 발췌				
** 절감율 산출근거				
① 시설물 중 터널(연장 1,000m)을 대표로 선정				
② 기준인원수 20%절감에 따른 전체 안전점검 비용의 절감내역 추정				
③ 추정결과 → 약 12%절감				
- (기준) 26.7백만원_부가세 포함				
: 5.6백만원(직접인건비)+6.7백만원(제경비)+4.9백만원(기술료)+7백만원(직접비)				
- (절감) 23.5백만원_부가세 포함				
: 4.9백만원(직접인건비)+5.9백만원(제경비)+4.3백만원(기술료)+6.2백만원(직접비)				

○ 4차산업혁명 기술 관련 시설물안전법 개선 시 반영 관련 정책 제안 현재 진행 상황

→ 이후 국토부 시설안전과에서 시설물안전법 시행령 개정안에 대해 ‘수용’의견 회신(‘19.09)

■ 시설물 안전 및 유지관리에 관한 특별법 일부 개정(‘20.01.07) → 시행(‘20.04.08)예정

개 정 안	[별표 10] 14. 「건설기술 진흥법」 제14조에 따라 지정·고시된 신기술
수 정 안	[별표 10] 14. 「건설기술 진흥법」 제14조에 따라 지정·고시된 신기술과 무인체, 점검로봇 등을 활용한 외관조사 및 영상분석
사 유	- 「건설기술진흥법」 제14조에 따라 지정·고시된신기술은 주로 시공쪽에 한정되어 있어 「시설물안전법」에 의한 안전점검등에 활용에는한계가 있음 -드론, 점검로봇 등의 첨단기술을 활용한 외관조사의 실시 및 터널스캐너 등 영상분석에 관한 하도급 항목을추가하여 4차산업혁명 관련 기술활용을 통해 기술·안전산업 육성, 일자리 창출, 민간기업성장동력 마련 등의 효과를 기대할 수있을 것으로 사료됨

■ 시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법 시행령 [별표 10]<개정 2020. 1. 7> 하도급 가능한 전문기술(제22조 1항 관련)	
1. 「비파괴검사기술의 진흥 및 관리에 관한 법률」 제2조에 따른 비파괴검사	
2. 비파괴재하시험: 정적 또는 동적 재하시험, 반발경도법, 초음파법, 레이더비파괴검사, 자연전위측정법에 의한 비파괴검사, 페놀프탈레인에탄올 용액에 의한 탄산화 깊이 측정시험, 염화물함유량시험, 콘크리트 및 강재의 결함 또는 성능 평가를 위한 비파괴시험	
3. 지반조사 및 탐사: 지표지질조사, 페이스맵핑, 시추 또는 오거보링, 시험굴, 공내시험, 시료채취, 토질 및 암반시험, G.P.R 탐사, 지하공동, 지층분석, 탄성파탐사, 전기탐사, 전자탐사, 시추공 토모그래피탐사, 물리검층 등	
4. 지형, 지질조사 및 토질시험	
5. 수리·수충격·수문 조사	
6. 계측 및 분석: 시설물 및 시설물 주변의 지반에 대한 침하, 변위, 거동 등의 계측 (경사계, 로드셀, 지하수위계, 소음 및 진동 등) 및 계측 데이터의 분석, 계측시설에 대한 조사·시험	
7. 수중조사: 조사선, 잠수부 등에 의한 교대·교각기초, 댐, 항만, 해저송유관 등의 수중조사	
8. 누수탐사 또는 전위측정 및 분석	
9. 콘크리트 제체 시추조사: 시추, 공내시험, 시편채취, 강도시험, 물성시험 등	
10. 콘크리트 재료시험: 코어 채취, 강도시험, 성분분석, 공기량시험, 염분함유량시험 등	
11. 강재 시료채취 및 시험	
12. 전기 및 기계설비(부속시설 포함)에 대한 조사·시험(건축물 제외)	
13. 토양부식환경 조사·시험	
14. 「건설기술 진흥법」 제14조에 따라 지정·고시된 신기술 또는 점검 로봇 등을 활용한 외관조사 및 영상분석	

나. 개발기술의 우수성 및 차별성, 경제적 파급효과

개발기술 독창성/우수성

■ 개발기술 독창성/우수성

- CTE 1-1에서는 독자적인 그래프 구조를 가진 SLAM 구조로 다양한 환경의 교량 (육지교량, 강교량, 해상교량)에 구애받지 않고 자율 무인체 운용이 가능할뿐만 아니라, 정밀한 3차원 점군 지도 작성 (1% 내외)과 정확한 위치 추정 (0.5m 내) 기술로 다양한 어플리케이션으로의 확장 가능성을 가짐.
- CTE 1-2 및 2에서는 500g 이상의 중량을 장착하고 30분 이상 비행을 할 수 있는 무인기체는 전문적 형상 설계와 추력 구성의 기술을 개발하여 본 과제와 같이 데이터 수집용 센서와 데이터 전송용 미니PC, 영상수집용 카메라 등 3000g 이상의 payload를 탑재 및 장착하고 30분 이상의 비행시간을 확보하는 기술은 기본적인 무인기에 대한 보유기술을 바탕으로 최적의 기체 형상 설계와 기체의 안정화 기술을 확보함
- CTE 3-1에서는 무인체 적용이 가능한 능동열화상-비전 영상 시스템 및 통합 진단 시스템을 개발하여 무인체에 탑재 가능한 수준으로 소형화하고 이를 위한 최적화 알고리즘을 구현을 위해 개발된 세부 기술들은, 추후 다양한 검사기술을 무인체에 적용하기 위한 기반 기술이 될 수 있으며, 능동열화상의 장점 (재료분석 활용성 및 비가시 영역 시각화 성능)과, 비전 영상의 장점 (고해상도 구조물 형상 및 패턴 시각화 성능)을 아우를 수 있도록 통합 진단시스템을 개발함. 개발 통합 진단시스템은 도막두께 및 부식영역 진단 분야뿐만 아닌 다양한 구조물 결함 감지 및 재료분석 분야에서 유용하게 활용되리라 판단됨.
- CTE 3-2에서는 무인체를 활용한 강재 및 콘크리트 균열 탐지 시스템 개발을 통하여 드론 하드웨어의 한계 및 영상 장비의 한계 등으로 교량 점검을 수행하는데 있어 매우 제한적인 상황에서 다양한 센서들로 구성된 탑재장비를 활용하여 300 μ m 단위의 균열을 정량화 할 수 있는 장점이 있음. 또한 이미지 좌표 추정을 통한 누락영역 탐지 알고리즘 개발을 통하여 기존의 정확성 및 신속성이 떨어지는 특징점 매칭 방법을 대체할 수 있음. 본 연구에서 개발한 이미지 좌표 추정을 통한 누락영역 탐지 알고리즘은 동차좌표계 변환과 무인기의 위치(GPS), 자세(IMU), 거리(1D LiDAR) 정보를 활용하여 쉽고 빠르게 이미지 좌표 추정과 누락영역 탐지가 가능하다는 점에서 매우 효율적임. 특히 영상 및 메타정보 통합을 위해 개발한 마이크로 컨트롤러와 결합하여 점군 이미지의 위치 좌표를 도출하는 방법은 교량 구조물을 신속하게 진단 및 평가할 수 있다는 장점을 가지며, 현재 상표권 확보를 위한 특허 출원 단계에 있음.
- CTE 3-3에서는 딥러닝 기반의 CCD 이미지 균열 검출 알고리즘 및 하이브리드 매칭 기술 개발함. 딥러닝 기반의 균열 검출 수행 시, 균열로 오인 가능한 펜으로 그린 마커나, 나뭇가지, 시공 줄눈 등을 균열로 검출하는 오보가 많이 발생하는 문제가 발생하였기 때문에, CCD 이미지 기반의 딥러닝 네트워크 구축과 함께, 균열에 대한 검출능이 높은 능동 열화상 기법을 활용하여 강재 및 콘크리트에 발생한 균열을 효과적으로 검출하여 CCD/IR 하이브리드 매칭을 통해 CCD 이미지에서 균열로 잘못 검출한 오보 케이스를 보완할 수 있는 기술을 개발하였음. 이를 통해 신뢰도 높은 검출 결과를 얻을 수 있음.
- CTE 3-4에서는 초분광 영상(딥러닝 기반) 이용 백태 및 박락 평가 기술을 개발함. 최근 영상 인식 분야에서 빠른 발전을 보이고 있는 딥러닝 기술과 초분광 영상을 결합한 독특한 외관 손상 기법으로 추후 기술개발로 이어질 수 있는 세부내용이 많음.
- CTE 4-1에서는 교량 점검 업무 프로세스 관점에서 교량 점검 업무 관리자(지자체) 및 교량 점검 업무 실무자(점검업체)의 UI/UX를 고려한 사용자 중심의 교량관리 시스템 개발하여 실시간으로 교량의 부재 및 교량 전체에 대한 상태평가를 수행할 수 있는 기능을 통해 점검 시간의 효율성을 제공함.
- CTE 4-2에서는 무인검사장비 측정정보 기반 외관조사망도 표출 기술을 개발하여 기존 인력 중심의 비효율적이며 주관적 기술과 비교하여 객관성 및 효율성 측면에서 경쟁력을 가짐. 또한, 본 연구를 통해 개발된

측정정보 기반 외관조사망도 표출 기술은 교량의 설계정보 유무와 관계없이 실 이미지 기반 무인체 측정정보를 활용하여 외관조사망도를 표출함

- CTE 4-3에서는 무인검사장비 수집 데이터를 이용한 교량 평가체계를 개발하여 기존 교량 관리 시스템과 무인검사장비 수집데이터 관리 시스템(본 과제에서 U-BMS)을 연계함으로써 기존 유지관리 DB의 활용도를 높이고 무인검사장비 기반 수집 정보의 신속한 제공 등을 가능하도록 한 점은 독창적 성과라고 판단됨. 또한, 교량 부재 단위의 손상정량화 정보가 입력되면 자동으로 각 경간 및 교량 전체의 상태등급이 자동으로 산정되는 프로그램으로 U-BMS 내에 모듈 형태로 탑재하여 실시간으로 교량의 상태등급을 확인할 수 있도록 개발하여 시스템 상의 평가 결과를 사용자가 쉽게 검증할 수 있도록 프로그램을 개발하여 편의를 고려하였음.

경제적 파급효과

■ 유지관리비용 비교분석 (무인기 기술적용 시 비용 절감 효과 예측)

- 무인검사장비 개발에 따른 경제적 파급효과를 예상하기 위하여 “무인검사장비를 활용한 대형구조물 진단 및 원격관리 시스템 개발 기획”(국토교통부, 2016) 보고서를 참고하였음.
- 유지관리비용 분석은 일반교량 및 특수교량을 대상으로 기존 유지관리체계 대비 무인검사장비를 이용한 구조물 유지관리 기술을 적용하였을 때의 결과를 비교 분석하고, 생애주기비용 분석에 대한 분석기간은 50년, 할인율은 3%를 적용하였음.
- 본문에서 테스트베드 후보 교량으로 추천받은 일반교량인 지정교(PC 박스 거더 교량, 영동고속도로), 금당교(강 박스 거더 교량, 중부내륙고속도로), 특수교량인 남해대교(현수교, 국도 19호선), 거북선대교(사장교, 국도17호선)를 분석 대상으로 함.
- 일반교량과 특수교량의 무인검사장비 시스템 적용 비용은 2억 원, 기존 점검방식을 위한 굴절식 점검차량 비용은 5억 원으로 가정, 무인검사장비를 이용한 정밀점검과 정밀안전진단은 기존 방식 대비 20% 인력 절감 효과를 적용함.
- 구조물 보수/보강/교체에 대한 사후 및 예방 유지보수비용은 기존 방식과 무인검사장비 적용 시스템의 차이점이 나타나는 상부 거더, 하부구조, 교량받침에 대해서만 비용을 산정함.
- 일반교량 (지정교, 금당교)에 무인검사장비를 이용한 유지관리 시스템을 적용하였을 때, 약 7.5억원(할인율 고려)의 유지관리비용이 절감될 것으로 예상함.
- 특수교량(남해대교, 거북선대교)에 무인검사장비를 이용한 유지관리 시스템을 적용하였을 때, 약 11.82억원 (할인율 고려)의 유지관리 비용이 절감될 것으로 예상함.

일반교량 및 특수교량 유지관리비용 분석 결과

비용 항목	As-Is		To-Be		절감액 (절감율)	
	할인율 적용	할인율 미적용	할인율 적용	할인율 미적용	할인율 적용	할인율 미적용
일반교량 (지정교, 금당교)	41.3억원	86.0억원	33.8억원	66.9억원	7.5억원 (18.2%)	19.1억원 (22.2%)
특수교량 (남해대교, 거북선대교)	57.1억원	113.3억원	45.3억원	94.3억원	11.82억원 (20.7%)	18.96억원 (16.8%)

- 결론적으로, 본 연구에서 개발된 무인검사장비 기반 교량구조물 신속진단 및 평가 기술 적용 시 구조물의 상태 평가를 위한 점검비용의 효율화 뿐만 아니라 구조물의 상태 저하를 사전에 예측하여 예방유지보수를 실시함에 따라 비용 효과를 극대화 할 수 있는 것으로 판단됨

4. 연구개발성과의 활용 계획

가. 연구개발성과 목록

연번	연구기관	핵심성과물	성과유형	설명
1	주관- KAIST	외부 환경에서의 자율운행 플랫폼 개발 (CTE1-1)	시스템	- 구조물 정밀 접근 가능한 3차원 위치 인식 기술: 0.5m 이내 3차원 최단 경로 생성 기술: 오차율 5% 이내 - 무인기 자율 주행 통합 시스템: 시스템 신뢰도 95% 이상
		강제 표면 도막두께 및 부식 정량화 기술 (CTE3-1)	시스템 및 알고리즘	- 무인 검사 장비 활용기반 강제 도막 두께를 250 μm 단위로 정량화 할 수 있는 시스템 및 알고리즘 개발 - 무인 검사 장비 활용기반 강제 부식 넓이를 10 cm^2 단위로 정량화 할 수 있는 시스템 및 알고리즘 개발
		강제·콘크리트 균열 및 볼트 연결부 손상 평가 기술 개발(CTE3-2)	시스템	- 진단시스템 무인체 탑재 강제·콘크리트 균열폭 300μm 단위 탐지 및 정량화 알고리즘 개발 및 적용 - 진단시스템 무인체 탑재 환경에서 볼트 연결부 손상 탐지 및 손상을 추정 신뢰도 90% 이상
2	위탁- 세종대학교 산학협력단	CCD/IR 스캐닝 기반의 강제·콘크리트 균열폭 정량화 시스템(CTE3-3)	시스템	- CCD/IR 하이브리드 영상 계측 시스템 구축 및 강제·콘크리트 균열 평가 요소기술 개발 - 이동식 스캐닝 기반의 하이브리드 영상 시스템 개발 및 실험적 성능검증 (100 μm 균열폭, 3분이내, 95% 이상 신뢰도)
3	위탁- 서울시립대 산학협력단	비접촉식 콘크리트 백태, 박락 탐지 및 정량화 장비 시스템 (CTE3-4)	시스템	- 일반영상과 초분광영상을 이용한 백태 및 박락 정량화 시스템 개발 (무인체탑재) 백태 탐지 오차 5%, 백태 발생 면적을 오차 2% (무인체탑재) 박락 탐지 오차 5%, 박락 면적을 오차 2% - 계산 속도 1m^2당 5분
4	위탁- 한국건설 기술연구원	무인검사장비 계측 데이터를 활용한 성능중심평가방식 내구성요소 평가 기술 (CTE4-4)	시스템	- 성능중심평가방식을 활용한 무인체 기반 내구성요소(탄산화, 염화물) 평가 기술 신뢰도 90% - 무인검사 기반 성능중심 평가방식 내구성요소 평가 매뉴얼 개발
5	공동- 경북대학교 산학협력단	측정정보 기반 외관조사망도 표출 기술 개발(CTE4-2)	시스템	- 무인체 비행경로 계획을 위한 메시(Mesh) 모델 생성 시스템 구축 - 측정정보 기반 외관조사망도 표출 시스템 개발
6	공동- (주)엑스드론	교량 외부 검사용 무인검사장비 시제품 (CTE1-2)	제품	- 교량검사에 최적화된 무인 비행체 개발 및 고도화 - 이종데이터 영상 취득 장비 탑재 이후 통합 비행 성능 검증
		무인검사장비 통제 및 운영을 위한 지상관제센터 개발 (CTE2)	시스템	- 무인 비행체 지상 제어 시스템 개발 - 영상정보 지원을 위한 GCS 시스템 개발 - GCS 시나리오 기반 최적의 운영시스템 개발
7	공동- 브로드 웹	사용자 기반 무인검사 장비 교량관리 테스트 베드 구축(CTE4-1)	시스템	사용자 기반 교량 관리 어플리케이션 S/W (APP & WEB)
		BMS 등 타 시스템 구축 및 시험 (CTE4-1)	시스템	교량상태평가, 외관조사망, BMS 연동 시연 동영상
8	공동- 한국시설 안전공단	무인검사장비 관련 교량 운영지침 동향 파악 및 관련 분야 규제 조사(CTE4-3)	보고서	무인검사장비 기반 교량 운영지침 동향 조사 및 관련 산업분야 규제와의 상충성 조사 보고서
		무인검사장비 기반 교량 상태등급 산정 프로그램(안) 개발 (CTE4-3)	시스템	무인검사장비 기반 교량 상태등급 산정 프로그램(안)
		무인검사장비를 활용한 교량 안전점검 운영지침(안) 개발 (CTE4-3)	정책·제도 (지침)	무인검사장비 활용을 위한 교량 안전점검 운영지침(초안) 작성

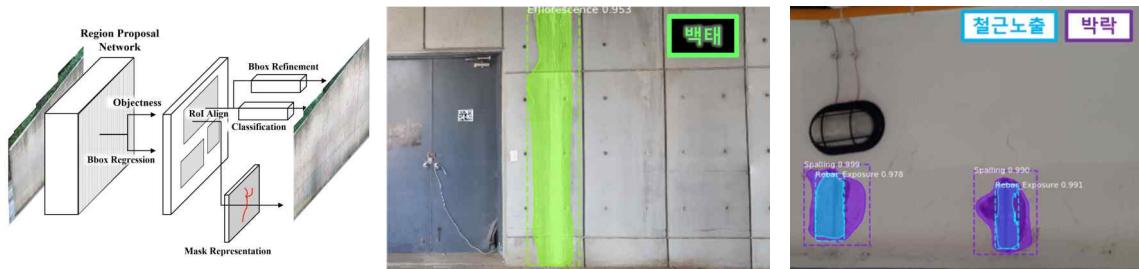
■ 추가 현장실험 및 성능검증을 통한 건설신기술 출원 신청

- 한국시설안전공단 및 한국도로공사의 협조를 통해 추후 국내 강재 교량 및 강재 기반 대형 구조물의 광역 역 도막 두께 분포 정량화 및 시각화 시연 및 시범운행을 실시로 기술홍보 및 현장 데이터수집 가능.
- 해당 기술의 지적재산권, 현장실험데이터, 기술이전 및 이익창출의 성과를 달성하고 이를 바탕으로 건설신 기술을 획득 가능함.

딥러닝 모델을 활용한 손상 탐지 기술

■ 인공지능(딥러닝모델) 기술 개발을 통한 다양한 플랫폼으로의 적용 확대 가능

- 개발된 Mask RCNN 모델을 활용할 경우, 드론에서 촬영된 이미지 뿐만 아니라, 각종 영상데이터(관측용 CCTV, 실시간 모니터링 등)에 적용이 가능하며 손상 탐지 및 정량화, 객체 인식 및 분류 등 다양한 목적으로 확대 적용이 가능함.
- 대규모의 학습 데이터를 기반으로, 손상 분류 및 탐지 정확도를 높일 수 있고 지속적인 연구개발을 통해 대형 구조물 모니터링에 적극 활용할 수 있음.



Mask RCNN 기반 다중 콘크리트 손상 탐지 기술

U-BMS 기능 고도화 및 외관조사망 연동기능

■ U-BMS 기능 고도화

- U-BMS의 교량점검 시스템을 통해 점검자는 무인체 영상을 통한 위치기반 손상정보가 가능하며, 사용자(관리자 및 점검자) 중심으로 유인 및 무인 교량점검 관리를 지원 함. 또한 FMS 및 데이터 베이스 공유를 통해 체계적인 교량 정보 관리가 가능함.
- U-BMS를 통해 얻어지는 교량상태등급을 전문 책임기술자 판단 하에 등급 조정 가능하도록 하여 인력이나 기계의 오류로 발생하는 오차를 최소화함.

■ U-BMS 외관조사망 손상 매핑 및 연동기능

- 생성된 외관조사망에서 표준화 된 코드와 손상 위치 지정 방식을 이용한 U-BMS에서 매핑하기 위한 기술을 통해. 손상위치, 손상 이미지, 손상코드 등 정보를 연동 하며, 손상정보 연동 기능을 통해 U-BMS에서 부재 별 손상 위치 및 손상 정보를 쉽게 확인할 수 있음



손상정보 연동을 위한 코드 파일

(2) 시설물 관리 주체의 연구개발성과 활용계획 - 한국시설안전공단

연구 개발 성과 활용을 위한 시설물 관리주체 협력 단기 및 중장기 계획(안) 마련

■ 배경 및 필요성

- 4차 산업혁명(Industry 4.0)의 영향으로 UAV(Unmanned Aerial Vehicle) 응용 산업분야에 대한 관심이 전 세계적으로 고조됨 - SOC 유지관리, 항공/물류 분야, 교통 및 농업 관리, 인공지능(AI) 분야 등
- 시설물 유지관리 분야에서도 인력 중심의 유지관리에서 장비 중심의 유지관리로의 패러다임 전환을 위한 도전이 증대됨 - UAV, 로봇 등을 활용한 SOC시설물 유지관리 기술개발 진행(Minnesota DOT, 국토교통부 등)
- 대형 케이블교량의 주탑 등 인력접근이 어려운 부재의 효율적인 점검을 위한 무인검사장비 기반 점검 필요성이 대두됨

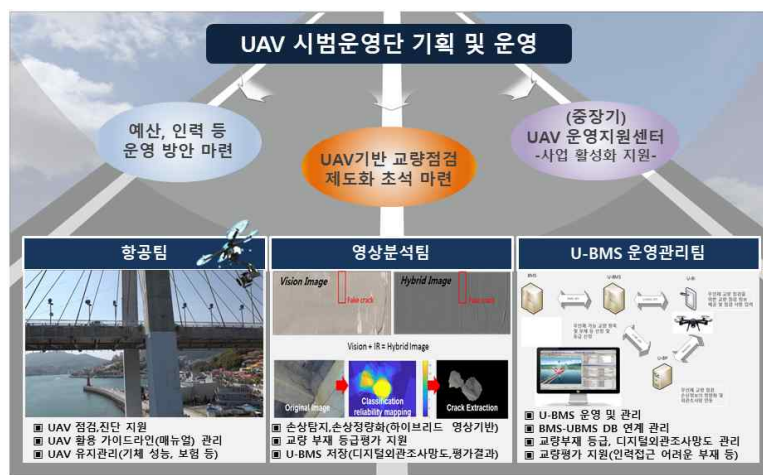
■ 시설물 관리주체(시설안전공단)에서 활용이 가능한 핵심성과

- (무인검사장비) 풍속 저항능력, GPS응용지역 점검, 하이브리드 스캐닝 시스템 등 교량 점검에 특화된 무인 검사장비 (2019.8 개발 완료 예정)
- (U-BMS*) 무인검사장비를 활용한 교량 점검 정보를 효율적으로 수집 및 관리하여 교량 점검 및 진단 시 효과적으로 활용하기 위한 교량관리시스템
- (가이드라인**) 무인검사장비를 활용한 교량 점검 시 안전에 대한 제반사항, 교량 점검 시나리오 및 관련 법규 등에 대한 가이드라인을 제공함

* "UAV-Bridge Management System", ** "교량 안전점검등을 위한 무인검사장비 활용 가이드라인"

■ 추진계획

- (단기계획) 세부기술 신뢰성 검증이 완료된 상기 핵심성과를 활용하기 위해 UAV시범운영단을 기획하여 예산 및 인력 운영 방안 마련
 - 실제 교량 점검 시 시범적용을 통해 무인검사장비 기반 교량 점검 제도화 및 사업화 초석 마련
- (중장기계획) 무인검사장비 기반 교량 점검을 제도화하고 UAV 운영지원센터를 개설하여 유관 기관 및 업체의 사업 활성화 지원



실무활용방안(UAV 시범운영단 개요도)

■ 기대효과

- 교량 건전도 정보 수집을 자동화하고, 정량화된 계측 데이터베이스 기반의 시설물 관리를 수행함으로써 구조물의 유지관리 신뢰성 및 안전성 향상
- 육안점검 결과를 객관화하여 대체할 수 있는 기술을 활용한 유지관리분야의 새로운 기술 창출 가능
- 교량 구조물뿐만 아니라 댐, 항만, 하굿둑, 옹벽 및 건축물 등 다양한 SOC시설물로 개발 기술 확대 가능

(3) 무인검사장비 개발 주체와의 연구개발성과 활용계획 - (주) 엑스드론

근접형 무인검사장비의 추가 개발 및 상품화 계획

1. 상품화 계획

- 드론을 활용한 임무장비 중 일반적으로 많이 사용하는 영상취득용 장비를 본 과제에서 개발한 짐벌시스템 기술을 기반으로 소형화하여 카메라 포함 1kg 이하로 추가 개발할 계획임.
- 임무장비의 개발이 완료되면 본 과제의 성과물인 근접형 무인검사장비의 설계를 초안으로 크기를 축소하여 600mm급으로 개발 및 제작하여 임무장비 장착 후 시험을 거쳐 상품화 할 예정임
- 현재 수요 기관으로는 발전소와 공간정보 기업, 국토정보공사, 소방청, 경찰청, 연구소, 조선소, 건설사, 생산공장 등으로 예상함.
- 본 과제를 통해 기본적인 기술 및 설계가 확보되어 추가적인 무인검사장비의 개발 기간은 1년으로 단축할 수 있으며, 상품화를 위한 투자 및 매출 발생 예상 기간은 아래 표와 같음.

(단위: 원)

항목	2020	2021	2022	2023
단가	-	15,000,000	13,000,000	12,000,000
수량	-	20	100	200
예상매출	-	300,000,000	1,300,000,000	2,400,000,000
자체 투자	100,000,000	200,000,000	500,000,000	1,000,000,000
외부 투자	200,000,000	100,000,000	-	-

2. 활용방안 및 기대성과

- 본 과제의 성과물인 근접형 무인검사장비는 고중량의 임무장비를 장착하고 전방, 상부, 하부의 영상 데이터를 수집할 수 있고 GPS 음영 지역에서의 자율운행 기능을 보유하고 있으므로 교량 외에 산업 전반에 적용될 수 있음.
- 본 연구개발 성과는 기본적으로 교각 및 교량 하부의 점검 시 안전성을 확보할 수 있고 인력이 투입되는 방법과 비교하여 시간단축이 가능함. 특히 교량 하부는 인력만으로 점검이 어려워 크레인 등의 장비를 추가로 적용해야 점검이 가능하다는 한계가 있음. GPS가 수신되지 않는 공간으로 일반적인 드론으로도 영상을 수집할 수 없기 때문에. 본 연구과제의 CTE1-1에서 개발한 자율운행 기술이 적용된 근접형 무인검사장비는 GPS 음영지역 내에서도 3D 맵을 구축하고, 좌표기반의 자율비행이 가능하여 교량 하부의 영상데이터를 확보할 수 있는 장점이 있음.
- 본 연구에서 개발된 근접형 무인검사장비는 정량적 목표인 풍속10m/s와 비행시간 30분을 달성하여 임무수행을 하기에 충분한 성과물로 기본적인 영상취득 장비를 장착할 경우 공간 데이터 수집에 최적화됨.
- 수요 예상 기관중 하나인 발전소는 태양광발전소의 태양광패널 점검, 풍력발전설비 점검, 수력발전 댐 점검 등에 무인검사장비를 활용할 수 있고, 현재 서부발전 및 남동발전에서는 일반 드론을 도입하여 시범사업을 추진하고 있으나 임무장비 장착무게의 한계성, 드론 비행시간 등의 문제가 도출되어 확대 도입을 추진하지 못하고 있는 실정임.
- 건설현장이나 공장에서도 고중량의 영상취득용 임무장비를 장착하고 오래 비행하는 드론을 요구하고 있는 실정이며, 현재 약 1kg~2kg의 임무장비를 장착하고 30분 비행 성능의 드론을 적용하고 있으나 본 과제의 성과물인 근접형 무인검사장비는 4.2kg의 임무장비를 장착하고 30분 이상의 비행시간을 확보하는 등 기술적 우수성을 입증하였음. 또한, 임무장비의 무게를 일반적인 2kg 이하로 장착할 경우 비행시간은 40분 이상이므로 기존 상용 드론을 대체할 수 있을것으로 예상함.

다. 최종 개발된 무인검사시스템 활용방안

- 무인검사장비를 활용한 교량 구조물의 신속 진단 및 평가 기술 개발을 통하여 단기적으로 검사자가 접근하기 어려운 교량 외부에 대한 개략적인 외관 점검 시스템으로 활용이 가능하며 교량 성능 평가 및 손상 정량화에 있어서 검사자의 정량적 판단과 유지관리 계획 수립에 참고 자료로 사용이 가능함

성과유형	활용 방안
근접형 및 부착형 무인검사장비 기체	기체 소형화 및 안정화를 통한 기체 상품화 추진 개발 기술 실용화를 위한 장비 표준 규격, 성능 수준 및 평가 기준 마련
GPS 음영지역 내의 자율운행 플랫폼 요소기술(SLAM 알고리즘)	교량 거더 내부, 터널 등 협소 공간(GPS 음영지역)을 점검하기 위한 필수 요소기술로, 다른 형태의 무인검사장비에 활용 가능
딥러닝 기반의 손상 탐지 기술	영상처리 기술과 접목하여, 다양한 시설물의 모니터링에 적극적으로 활용이 가능하며, 추가적인 손상 유형 학습을 통해 누수, 변형 등을 탐지할 수 있을것으로 예상
무인체 탑재용영상장비 (부착형기체 검사장비)	탑재용 영상장비의 소형화 및 모듈화에 대한 후속 연구 진행 드론 뿐만 아니라 로봇, 매니플레이터 등을 활용한 시스템에 적용 가능



협소공간 점검을 위한 매니플레이터 및 벽면 부착기능을 보유한 무인검사장비 (예시)

- 개발 시스템의 기술 수준이 실용화 단계를 목표로 하고 있지만 육안 점검 인력 즉각적으로 대체하기에는 한계가 존재함. 단기적으로 정량적 평가 및 육안검사의 보조적인 시스템으로 활용함으로써 시스템의 실구조물에 대한 적응성을 향상시키고 교량 진단 및 평가 정확성 향상을 도모 할 수 있음
- 지속적인 현장적용과 고도화를 통하여 무인검사장비와 교량 평가 시스템의 신뢰도를 확보가 가능하며 최종적으로는 교량 외관 조사에 주도적인 역할을 수행 할 수 있음. 검사자의 육안검사로 이루어지는 검사 항목을 무인검사장비가 대체함으로써 교량 외관 조사의 효율성과 정확성을 동시에 확보 할 수 있을 것으로 기대됨
- 자동화된 유지관리 시스템과 체계화된 유지관리 지침을 통하여 교량 구조물 수명 연장이 기대되며 기술 개발을 통하여 교량 구조물뿐만 아니라 대형 토목 구조물의 유지관리를 위한 기반기술로 자리매김이 가능함.
- 무인검사장비 기반 교량 구조물 신속진단 및 평가기술 개발과제를 통해 인력으로 접근하기 어려운 교량 외부에 대한 영상을 획득하여 분석/처리하는 과정을 통해 시설물의 외관의 손상을 파악할 수 있지만, 교량을 포함한 포괄적인 기반시설물(터널, 도로 등)의 정밀검사를 할 수 있는 수준의 기술개발 및 고도화가 필요함. 따라서, 개발된 연구성과를 통해 고도화된 정밀점검과 구조물의 손상범위 95% 이상을 감지할 수 있는 기술개발에 활용할 수 있을 것으로 기대됨.
- 무인검사장비 시스템 및 하드웨어 기술 연구성과를 활용하여 무인검사장비의 접근이 어렵거나 불가능한 부재를 위한 정밀점검용 매니플레이터를 장착하고 부착가능한 무인검사장비를 개발하여 협소 공간에 대한 영상정보 획득을 통해 다양한 부재/부위의 손상에 대한 국부적인 탐지가 가능함.

붙임1. 참고문헌

1. 이병덕 외 4인, “동결응해 및 제설제에 노출된 고속도로 소구조물 콘크리트의 내구성 개선 연구”, 한국구조물진단유지관리공학회 논문집, Vol.20, No.4, 2016.7, pp.128-135
2. 이일근 외 3인, “고속도로 교량 바닥판 열화분석 및 추정”, 한국구조물진단유지관리공학회 논문집, Vol.19, No.2, 2015. 5, pp.68-75
3. 한국시설안전공단, 시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침-성능평가편, 2018
4. 한국시설안전공단, 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침, 2017
5. Zhang, Ji, and Sanjiv Singh. "LOAM: Lidar Odometry and Mapping in Real-time." *Robotics: Science and Systems*. Vol. 2. 2014.
6. Kaess M, Ranganathan A, Dellaert F. (2008). iSAM: Incremental Smoothing and Mapping. *IEEE Transactions on Robotics*. 24(6), 1365-1378.
7. Engel, Jakob, Thomas Schöps, and Daniel Cremers. "LSD-SLAM: Large-scale direct monocular SLAM." *European Conference on Computer Vision*. Springer International Publishing, 2014.
8. Engel, Jakob, Vladlen Koltun, and Daniel Cremers. "Direct sparse odometry." *arXiv preprint arXiv:1607.02565*, 2016.
9. Scaramuzza, Davide, and Friedrich Fraundorfer. "Visual odometry [tutorial]." *IEEE robotics & automation magazine* 18.4: 80-92, 2011.
10. S. Behnken, "Local multiresolution path planning," in *RoboCup Int. Symposium, Robot Soccer World Cup VII*, LNCS 3020. Springer, 2004, pp. 332-343.
11. Segal, Aleksandr, Dirk Haehnel, and Sebastian Thrun. "Generalized-ICP." *Robotics: science and systems*. Vol. 1. 2. No. 4. 2009.
12. Biber, Peter, and Wolfgang Straßer. "The normal distributions transform: A new approach to laser scan matching." *IROS*, pp. 2743-2748, 2003.
13. 김희찬, 이수현, 정용진, 강철호, VGA 영상에서의 실시간 얼굴검출을 위한 FPGA 구현, 2010년도 대한전자공학회 하계종합학술대회, 2010.6, 1603-1606
14. 윤희진, FPGA로 구현 한 실시간 평균 영상 생성기, 2015년도 대한전자공학회 정기총회 및 추계학술대회, 2015.11, 448-450
15. 정성혁, 김정태, FPGA를 이용한 영상처리 구동을 위한 정합모듈 설계, 한국해양정보통신학회논문지, 2010, 2071-2077
16. G. Y. Tian, Y. He, L. Cheng and P. Jackson, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* 39 (1-4), 269-276 (2012).
17. T. Sakagami and S. Kubo, *Infrared Physics & Technology* 43 (3), 211-218 (2002).
18. D. P. Almond and P. Patel, *Photothermal science and techniques*. (Springer Science & Business Media, 1996).
19. S. Lau, D. Almond and P. Patel, *Journal of Physics D: Applied Physics* 24 (3), 428 (1991).
20. H. Balzer, M. Hoehne, V. Sturm and R. Noll, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 60 (7), 1172-1178 (2005).
21. R. K. May, M. J. Evans, S. Zhong, I. Warr, L. F. Gladden, Y. Shen and J. A. Zeitler, *Journal of Pharmaceutical Sciences* 100 (4), 1535-1544 (2011).
22. 경갑수, 이성진, 류성진 and 박찬희, *대한토목학회 학술대회*, 741-742 (2014).
23. 조선규, 한상철 and 김은겸, *Journal of the KIIS* 17 (2), 64 (2002).
24. 박창호, 이일근 and 이일용, presented at the 2016 한국구조물진단유지관리공학회 봄 학술발표 논문집, 2016 (unpublished).
25. 장동휘, 박창호, *대한토목학회 학술대회*, 1337-1338 (2014).
26. 신상민, 주민관, 박창호, 김지원, 이동현 and 박철우, presented at the 2014 년도 봄학술대회 논문집, 2014 (unpublished).
27. S. M. Shepard, Y. Hou, J. R. Lhota, D. Wang and T. Ahmed, presented at the *Proc. SPIE*, 2005 (unpublished).
28. E. Grinzato, V. Vavilov, P. Bison and S. Marinetti, *Infrared physics & technology* 49 (3), 234-238 (2007).

29. ASCE (American Society of Civil Engineers). (2017), 2017 Report card for America' s infrastructure.
30. Agarwal, A., Jawahar, C. V. & Narayanan, P. J. (2005), A survey of planar homography estimation techniques, Centre for Visual Information Technology, Technical Report IIIT/TR/2005/12, 1-15.
31. Agdas, D., Rice, H. A., Martinez, J. R. & Lasa I. R. (2016), Comparison of visual inspection and structural-health monitoring as bridge condition assessment methods, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30(3), 04015049.
32. An, Y-K., Kwon, Y. & Sohn, H. (2013), Noncontact laser ultrasonic crack detection for plates with additional structural complexities, *Structural Health Monitoring-An International Journal*, 12(5-6), 522-538.
33. An, Y-K., Yang, J., Hwang, S. & Sohn, H. (2015), Line laser lock-in thermography for instantaneous imaging of cracks in semiconductor chips, *Optics and Lasers in Engineering*, 73, 128-136.
34. Attard, L., Debono, C. J., Valentino, G. & Castro, M. D. (2018), Vision-based change detection for inspection of tunnel liners, *Automation in Construction*, 91, 142-154.
35. Badrinarayanan, V., Kendall, A. & Cipolla, R. (2017), SegNet: A deep convolutional encoder-decoder architecture for image segmentation, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 39(12), 2481-2495.
36. Bay, H., Ess, A., Tuytelaars, T. & Gool, L. V. (2008), Speeded-up robust features (SURF), *Computer Vision and Image Understanding*, 24(24), 346-359.
37. Belongie, S. (2002), Shape matching and object recognition using shape objects, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 24(4), 509-522.
38. Brown, M. & Lowe, D. G. (2007), Automatic panoramic image stitching using invariant features, *International Journal of Computer Vision*, 47(1), 59-73.
39. Cha, Y-J., Choi, W. & Büyüköztürk, O. (2017), Deep learning-based crack damage detection using convolutional neural network, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 32, 361-378.
40. Chen, S. E. (1995), QuickTime VR - an image-based approach to virtual environment navigation, *Computer Graphics (SIGGRAPH' 95)*, pp. 29-38.
41. Fabbri, R., Costa, L. D. F., Torelli, J. C. & Bruno, O. M. (2008), 2d Euclidean distance transform algorithms: a comparative survey, *ACM Computing Surveys*, 40(1), 1-44.
42. Gattulli, V. & Chiaramonte, L. (2005), Condition assessment by visual inspection for a bridge management system, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 20(2), 95-107.
43. Jang, K. & An, Y-K. (2018), Multiple crack evaluation on concrete using a line laser thermography scanning system, *Smart Structures and Systems*, 22(2), 201-207.
44. Jang, K., Kim, N. & An, Y-K. (2019), Deep learning-based autonomous concrete crack evaluation through hybrid image scanning, *Structural Health Monitoring*, 1-16.
45. 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, 2052.
46. Lam, L., Lee, S.-W. & Suen, C. Y. (1992), Thinning methodologies-a comprehensive survey, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(9), 869-885.
47. Lei, B., Wang, N., Xu, P. & Song, G. (2018), New crack detection method for bridge inspection using UAV image processing, *Journal of Aerospace Engineering*, 31(5), 04018058.
48. Metni, N. & Hamel, T. (2007), A UAV for bridge inspection: visual servoing control law with orientation limits, *Automation in Construction*, 17, 3-10.
49. Xie, R., Yao, J., Liu, K., Lu, X., Liu, Y., Xia, M. & Zeng, Q. (2018), Automatic multi-image stitching for concrete bridge inspection by combining point and line features, *Automation in Construction*, 90, 265-280.
50. Yeum, C. M. & Dyke, S. J. (2015), Vision-based automated crack detection for bridge inspection, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 30(10), 759-770.

51. Zhang, Z. (2010), A flexible new technique for camera calibration, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22(11), 1330-1334.
52. Zuiderveld, K. (1994), Contrast limited adaptive histogram equalization, in Heckbert, P.S. (ed.), Graphics Gems IV, Academic Press Professional, San Diego, pp. 474-485.
53. 문한영, 이종석, “해안가 콘크리트 구조물에 비래하는 염분 포집장치 성능에 대한 연구” , 대한토목학회논문집, 제24권 제2A호, 2004, pp.417 ~ 422.
54. 이종석 외, “비래염분 특성 및 해사사용 콘크리트의 내구특성 장기조사” , 한국건설기술연구원, 2006

주관연구기관의 자체평가의견서

1. 과제 현황

		과제번호		19SCIP-C116873-03		
사업 구분		국토교통연구개발사업				
연구 분야		재난·재해 대비 시설물 유지관리 및 건설안전 기술		과제 구분		단위
사업명		건설기술연구사업				주관
주관과제		무인검사장비 기반 교량구조물 신속진단 및 평가기술 개발		주관연구책임자		정형조
세부과제명		무인검사장비 기반 교량구조물 신속진단 및 평가기술 개발		과제 유형		개발
연구기관		한국과학기술원		연구책임자		정형조
연구 기간 연구개발비 (천원)	연차	연구개발기간	정부출연금	기업부담금	정부 외 출연금	계
	1차 연도	2016-08-29 ~ 2017-02-28	1,015,500	338,500		1,354,000
	2차 연도	2017-03-01 ~ 2018-12-31	1,183,000	400,000		1,583,000
	3차 연도	2018-01-01 ~ 2018-12-31	2,391,000	917,000		3,308,000
	4차 연도	2019-01-31 ~ 2019-11-30	1,159,000	443,500		1,602,500
	계	2016-08-29 ~ 2019-11-30	5,748,500	2,099,000		7,847,500
참여기업		(주)브로드웨이브, 에스큐엔지니어링(주), (주)안전융합기술원, (주)엑스드론, (주)티이솔루션				
상대국		상대국 연구기관				

※ 총 연구기간이 5차 연도 이상인 경우 셀을 추가하여 작성

2. 평가일: 2019. 11. 30

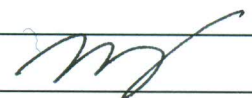
3. 평가자(연구책임자):

소속	직위	성명
한국과학기술원	교수	정형조

4. 평가자(연구책임자) 확인:

본인은 평가 대상 과제에 대한 연구개발성과에 대하여 객관적으로 기술하였으며, 공정하게 평가하였음을 확약하며, 이 자료가 전문가 및 전문기관 평가 시에 기초 자료로 활용되기를 바랍니다.

확 약



I. 연구개발 실적

※ 다음 각 평가 항목에 따라 자체 평가한 등급 및 실적을 간략하게 기술(200자 이내)

1. 연구개발성과의 우수성/창의성

■ 등급: (아주 우수, 우수, 보통, 미흡, 불량)

4차년도에서는 교량구조물 진단 및 평가에 필수적인 요소기술들을 통합하여 하나의 시스템을 구축하고, 통합기술을 테스트베드 교량에 적용하여 성능검증을 수행하였다. 뿐만 아니라, 통합된 무인검사 시스템을 운영하기 위한 무인검사장비 활용 매뉴얼 및 운영지침을 확립하고 교량 유지관리 전략을 수립하는데 노력을 기울였다. 본 연구개발에서 최종 목표로 하는 교량 검사에 적합한 무인비행체 시제품 설계 및 제작을 완료하였으며, 여기에 GPS 음영지역에서의 위치 추정 및 자율비행 기술을 적용하여 설정된 경로를 따라 비행 및 촬영 임무를 차질없이 수행하였다. 또한, 취득된 영상데이터를 활용하여 인공지능기술(딥러닝 기법) 및 영상처리기법 기반의 다양한 손상 유형(균열, 백태, 박락, 부식, 볼트풀림 등) 탐지 및 정량화를 수행하고, 탐지된 손상정보 데이터를 사용자 기반 교량 관리 시스템(U-BMS) 상에 저장하고 표출하는 성과를 얻을 수 있었다. 본 연구에서 최종개발된 무인검사장비 기반 교량 구조물 신속진단 및 평가 기술은 체계적인 검증을 통해 기술적 측면에서의 완성도를 높였다. 본 연구를 통해 개발된 무인검사장비 시스템은 기존 방법과 비교하면 매우 우수하고 창의적이다.

2. 연구개발성과의 파급 효과

■ 등급: (아주 우수, 우수, 보통, 미흡, 불량)

교량을 비롯한 다양한 사회기반시설 점검에 무인체를 활용한 사례는 최근 몇 년간 국내·외 연구 동향에서 쉽게 확인할 수 있다. 무인검사장비를 이용한 교량의 유지관리 기술은 비용과 시간 절약 및 안전성 측면에서 우수함이 증명되었고 미국, 영국, 일본 등 선진국에서는 국가적으로 정책 마련과 예산지원을 지속적으로 수행하고 있는 실정이다. 그러나 여전히 관련 기술의 상용화를 위해서는 해결해야 할 기술적 문제들이 많이 남아 있으며, 해당 분야는 전 세계적으로 도입기에 해당하기 때문에 본 연구개발과제에 관한 결과의 수요가 많을 것으로 판단된다. 또한, 최종 개발된 무인검사장비 기반 신속진단 및 평가기술은 실제 현장에 적용 가능한 수준의 실용적 기술로써 교량 구조물뿐만 아니라 다른 사회기반시설(댐, 원전구조물 등)의 진단 및 평가에 활용할 수 있으므로 연구개발성과의 파급효과가 매우 크다고 할 수 있다.

3. 연구개발성과에 대한 활용 가능성

■ 등급: (아주 우수, 우수, 보통, 미흡, 불량)

최종 개발된 무인검사장비 기반 교량구조물 신속진단 및 평가기술은 관련 시장의 국내외 환경변화를 감안할 때 잠재력이 매우 높고 더욱 활성화될 기술로 판단된다. 본 과제의 연구성과 중 일부(2건)가 시설물 유지관리 분야 및 드론 개발 분야로의 기술이전이 완료되었으며, 나아가 관계 부처 협의와 실무검증을 통해 실제 현장에 적용될 수 있을 것으로 예상한다. 본 연구 기술은 교량 구조물 이외에도 댐, 원전구조물, 관제탑 등 다양한 다른 사회기반시설의 상태검사에 즉각 활용될 가능성이 매우 큰 기술이며, 재난·재해가 발생했을 때 구조물 외관상태 진단, 인명 구조 등 다양하게 활용이 가능할 것으로 판단된다. 무인검사장비에 적용되는 기술의 최적화와 탑재 센서의 소형화를 통해 다양한 산업 분야에 활용될 수 있으며, 새로운 기술 및 시장을 창출할 수 있을 것이다.

4. 연구개발 수행의 성실도

■ 등급: (아주 우수, 우수, 보통, 미흡, 불량)

연구개발 목표달성을 위해 주관기관과 공동기관 및 참여기업이 긴밀하게 협력하면 연구를 수행하였으며, 4차년도 연구개발 기간 동안 워크숍 1회, 월간 정례회의 3회, 현장시연 1회 등 최소 한 달에 한번 이상씩 전체 참여 연구진이 모여서 연구성과를 발표하고 토의하며 의견을 나누는 시간을 가졌으며, 연구 진행상의 문제점을 보완하였다. 또한 4차년도 주요 연구내용인 무인체 통합 시스템 안전성 확보 및 테스트베드 현장적용을 위해 수십 차례 실교량 현장실험 (춘천 등선교, 대전 적문교 등)과 비행 구역(대구 공역, 화성 공역 등)에서의 성능검증을 수행하는 등 많은 노력을 기울였다.

5. 공개 발표된 연구개발성과(논문, 지적소유권, 발표회 개최 등)

■ 등급: (아주 우수, 우수, 보통, 미흡, 불량)

본 연구개발과 관련하여 다음과 같은 최종 연구성과를 달성하였다. 연구개발성과는 질적으로 우수하고, 선도적인 연구를 수행하고 있어 국제 학술대회에서 초청되어 수차례 기조강연(plenary talk) 발표를 하였다. 또한, 본과제의 연구성과의 우수성을 인정받아 “드론을 활용한 시설물 안전·유지관리 국회토론회”, “스마트건설기술 안전엑스포” 등에 연구성과를 발표하였다. 4차년도 종료 시점을 기준으로 아래와 같이 기존 목표 이상의 성과를 달성함으로써 양적으로도 우수한 결과를 나타내었다.

- (1) 국외 논문 : 18건 (SCI(E) 15건, 비SCI(E) 3건)
- (2) 국내 논문 : 5건 (비SCI(E) 5건)
- (3) 학술대회발표: 36건 (국내), 71건 (국외)
- (4) 특허출원: 16건 (국내14건, 해외2건)
- (5) 특허등록: 9건
- (6) 기타 : 기술요약정보 7건, 소프트웨어 9건, 시제품 7건, 성과홍보 27건, 인력양성 28명

II. 연구 목표 달성도

세부 연구 목표 (연구계획서의 목표)	비중 (%)	달성도 (%)	자체평가
자율운행 플랫폼 요소기술 개발	15	100	- 무인체의 위치오차를 0.5m 오차로 추정하여 당해 연도 목표치 (0.5m 이내)를 달성함 (3차원 위치 RMSE 기준) 3차원 최단 경로 오차율을 환산 경로 오차 기준 1.4%로 구현하여 당해 연도 목표치 (5%)를 초과 달성함 - 자율운행 시스템 구동 작업성공률은 위치추정알고리즘 수행 결과 성공률에 따른 자율운행시스템 구동 작업 성공률 95% 이상 달성함
교량 외부 외관검사를 위한 무인검사장비 개발	15	100%	4차년도 최종목표인 비행시간 최소 30분 (Pay load: 4.2kg(±0.4kg), 평균풍속 2m/s, 평균온도 15℃~25℃, 기본적인 통신 및 영상 장비 사용조건), 풍속 극복 능력 10m/s에 대하여 비행시간 33분 10초, 풍속 극복능력 10m/s의 성능으로 성과목표를 달성하였음 - 근접형 무인체의 최적화 및 통합기체의 안전성능을 검증하고, 부착형 무인체의 시제품을 제작하여 비행성능을 검증하였음
무인검사장비 운영 및 원격통제 기술 개발	5	100	지상 관제 통합시스템의 시험 및 보완을 통해 자동비행송수신거리와 영상송수신거리를 3.0km까지 달성함
강재 도막 두께 및 부식깊이 정량화 기술 개발	10	100	부착형 기체에 개발된 시스템을 탑재하여 이를 통해 40μm의 도막두께를 판단하고, 2.25cm² 이하 단위의 부식 깊이 구분을 완료함
강재·콘크리트 균열 및 볼트 연결부 손상 평가 기술 개발	10	100	- 근접형 기체에 영상장비를 탑재하여 현장실험을 통해 손상 균열폭 300μm이하 손상 검출을 완료함 - 무인체 탑재상태에서의 현장실험을 통한 볼트 연결부 손상에 대한 검출 신뢰도 90 % 달성함
CCD/IR 영상 기반 균열평가 기술 개발	10	100	부착형 기체에 영상장비를 탑재하여현장 실험을 통한 개발 시스템의 성능 검증 완료 (균열폭 100μm, 균열정량화 오차 3%, 1m² 단위면적당 조사 시간 3분 달성)
초분광영상을 이용한 백태 및 박락 인식 기술 개발	10	100	- Mask R-CNN 알고리즘 기술을 개발하여 백태/박락/철근노출/균열 등 다양한 손상유형 검출을 수행함 - 백태/박락 유무 탐지율 100%, 백태/박락 면적률 오차 각각 0.1%, 0.16%의 성능으로 목표대비 초과 달성함
사용자 기반 교량 관리 시스템 개발	10	100	사용자기반 무인검사장비 교량관리 테스트

			트베드 구축 완료 • BMS 등 타 시스템 연동 구축 및 시험 완료
무인검사장비 측정정보 기반 외관조사망도 표출 기술 개발	5	100	• 측정정보 기반 외관조사망도 표출 기술 시스템 구축 100% 완료 • 무인체 비행경로 계획을 위한 메시 (Mesh)모델 생성 기술 100% 완료
무인검사장비 수집 데이터를 이용한 교량 평가체계 개발	5	100	• 무인검사장비 활용 교량점검 시나리오 구축 및 교량 안전점검등을 위한 무인검사장비 활용 가이드라인 개발 • ‘시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법 시행령’ 개정 요청 완료
성능중심 평가방식을 활용한 무인체 기반 내구성요소 평가 프로세스 개발	5	100	• 성능중심평가방식을 활용한 무인체기반 내구성(탄산화, 염화물) 평가 기술에 대한 당해연도 목표(90%)에 대해 기존 점검보고서 데이터로 비교 평가한 결과 기존 평가와 무인체 기반 평가가 동일한 a 등급으로 나타나 90%를 달성 • 무인검사 기반 성능중심 평가방식 내구성 요소 평가 매뉴얼 작성 완료
합계	100%	100%	

Ⅲ. 종합 의견

1. 연구개발성과에 대한 종합의견

○ 지난 1~3차년도 연구를 통해, 무인검사장비 기반 교량구조물 신속진단 및 평가에 필수적인 요소기술 개발 및 고도화, 시스템 통합을 수행하였다. 또한, 최종개발된 무인검사기체의 자율비행을 위한 센서와 알고리즘들을 무인체에 통합하였으며, 탑재용 센서 및 짐벌에 대한 최적화 작업을 수행하였다. 4차년도에는 테스트베드 현장적용을 통해 최종개발된 무인검사기체 및 시스템의 성능을 검증하는 것에 중점을 두고 연구를 수행하였으며, 나아가 기존 인력점검 결과와 무인검사기체를 활용한 점검 결과를 비교·분석하여 무인검사장비 기반 교량구조물 신속진단 및 평가기술의 완성도를 객관적으로 확보하였다. (최종보고서 참조)

○ 본 연구개발에서는 무인검사장비를 활용하여 여러 손상정보(부식, 균열, 백태, 박락 등)에 대해 높은 수준의 신뢰성과 정량화를 목표로 하고 있으며, 최근에 많이 활용되고 있는 인공지능(딥러닝 기법)기술 등의 활용을 통해 손상의 정확한 분류, 손상 위치의 추정, 손상 평가 및 표출과 같은 연구를 수행 완료하여 기존 방법과 질적으로 차별성을 가지고 있다. 또한, 연구결과의 실용화를 위해 해결해야 할 다양한 문제들을 해결하며 각 단계별 연구 목표를 빠짐없이 달성하였다. 해당 기술은 국내외 잠재력 및 경제성이 매우 높으며, 많은 관심을 받고 있기때문에 파급효과가 클 것으로 예상된다.

○ 1,2차년도에는 무인검사장비 기반 교량구조물 신속진단 및 평가에 필요한 필수 요소기술들을 실험실 환경에서 정·동적으로 검증하였고, 3차년도에서는 무인체 시스템과 각 요소 기술 및 센서를 통합하는 연구를 수행하였다. 4차년도에는 통합된 시스템의 성능검증을 위하여 현장실험을 수행하고, 무인검사장비 활용 교량 점검 시나리오와 시스템 매뉴얼을 구축하였다. 이를 토대로 4차년도 최종 연구개발 성과는 매우 우수하다고 판단된다.

2. 평가 시 고려할 사항 또는 요구사항

○ 국내외 관련 분야의 환경변화 분석에 따르면, 무인체를 이용한 교량 외관상태 검사 기술에 대한 국내외적 관심이 크게 증가하고 있으며, 특히 미국, 일본 등에서는 정부 차원에서 이를 적극 지원하고 활용하려고 하고 있다. 따라서, 본 연구개발과제가 성공적으로 수행될 경우에 파급효과와 활용가능성이 매우 클 것으로 기대된다.

○ 본 연구개발성과 현장 검증을 위해 지난 11월 국토부, 진흥원 및 교량 유지관리 전문가 입회하에 연구개발기술에 대한 실증실험 (성능평가 공개시연)을 진행하였고, T/B 교량에 대한 무인검사장비 기반 점검 결과와 인력점검 결과를 비교 분석하여 전문가 의견을 수렴하는 등 연구결과의 객관성을 확보하는 노력을 기울였다.

3. 연구개발성과의 활용방안 및 향후 조치에 대한 의견

○ 4차년도 연구개발성과는 교량 점검용 무인검사기체 통합시스템 및 운영 매뉴얼 개발을 통해 무인검사장비 기반 구조물 손상 점검 기술의 실용화를 위해 향후 현장 적용시 고려해야할 문제에 대한 방안을 제시하였다. 이러한 기술 개발은 무인체 적용에 어려움을 겪고 있는 다양한 산업 분야에 활용이 될 수 있을 것이다.

○ 본 과제의 최종 연구개발성과는 단기적으로는 검사자의 접근이 어려운 교량 외관상태 검사에 활용 가능하며, 육안 점검 방법과 상호보완하는 방식으로 사용될 것이다. 장기적으로는, 기술의 고도화를 통해 교량 외관상태 검사에 주도적인 역할을 수행함으로써, 조사의 효율성과 정확성을 크게 향상시킬 수 있을 것이다. 또한, 댐이나 터널 등 다른 사회기반시설의 진단에도 활용이 가능할 것이다.

Ⅳ. 보안성 검토 (※ 보안성이 필요하다고 판단되는 경우 작성)

1. 연구책임자의 의견

해당사항 없음

2. 연구기관 자체의 검토 결과

해당사항 없음

주 의

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