

| 최종보고서(일반과제용)       |                  |                                                                                                                                              |                         |                                  |                   |         |                   |                           |               | 보안등급         |                   |   |
|--------------------|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|-------------------|---------|-------------------|---------------------------|---------------|--------------|-------------------|---|
|                    |                  |                                                                                                                                              |                         |                                  |                   |         |                   |                           |               | 일반[✓], 보안[ ] |                   |   |
| 중정기관양행명            | 국토교통부            |                                                                                                                                              |                         |                                  | 사업명               | 사업명     |                   | 국토교통기술촉진연구사업              |               |              |                   |   |
| 전문기관명              | 국토교통과학기술진흥원      |                                                                                                                                              |                         |                                  |                   | 내역사업명   |                   | 국토교통기술혁신연구<br>(사회이슈해결 유형) |               |              |                   |   |
| 공고번호               | 공고-제2호           |                                                                                                                                              |                         |                                  | 연구개발과제번호          |         |                   | 21CTAP-C152129-03         |               |              |                   |   |
| 국가과학기술<br>표준분류     | EI1101           |                                                                                                                                              | 100%                    |                                  |                   |         |                   |                           |               |              |                   |   |
| 연구주제               | (대분류) 걱정 없는 안심사회 |                                                                                                                                              |                         | (중분류) 생활안전, 재난재해,<br>에너지, 주거, 교통 |                   |         | (소분류) 불량 주택 및 시설물 |                           |               |              |                   |   |
| 연구개발과제명            | 국문               | 강구조물 도막 상태 실시간 평가 (도막 열화 분류 신뢰도 95%, 두께 정량화 정확도 20μm)를 위한 인공지능 기반 열화상/비전 검사 로봇 개발                                                            |                         |                                  |                   |         |                   |                           |               |              |                   |   |
|                    | 영문               | Development of Artificial Intelligence-based Infrared/Vision Inspection Robot for Real-time Evaluation of Steel Structure Coating Conditions |                         |                                  |                   |         |                   |                           |               |              |                   |   |
| 주관연구기관             | 기관명              | 한국과학기술원                                                                                                                                      |                         |                                  |                   | 사업자등록번호 |                   | 314-82-01980              |               |              |                   |   |
|                    | 주소               | (우) 대전광역시 유성구 구성동                                                                                                                            |                         |                                  |                   | 법인등록번호  |                   | 114471-0000668            |               |              |                   |   |
| 주관연구책임자            | 성명               | 손 훈                                                                                                                                          |                         |                                  |                   | 직위      |                   | 교수                        |               |              |                   |   |
|                    | 연락처              | 직장전화                                                                                                                                         | 042-350-3625            |                                  |                   |         | 휴대전화              |                           | 010-3603-2547 |              |                   |   |
|                    |                  | 전자우편                                                                                                                                         | hoonsohn@kaist.ac.kr    |                                  |                   |         | 국가연구자번호           |                           | 1016 7378     |              |                   |   |
| 연구개발기간             | 전체               | 2019. 04. 19 - 2021. 12. 31( 2 년 9 개월)                                                                                                       |                         |                                  |                   |         |                   |                           |               |              |                   |   |
|                    | 1년차              | 2019. 04. 19 - 2019. 12. 31 ( 0 년 9 개월)                                                                                                      |                         |                                  |                   |         |                   |                           |               |              |                   |   |
|                    | 2년차              | 2020. 01. 01 - 2020. 12. 31( 1 년 0 개월)                                                                                                       |                         |                                  |                   |         |                   |                           |               |              |                   |   |
|                    | 3년차              | 2021. 01. 01 - 2021. 12. 31( 1 년 0 개월)                                                                                                       |                         |                                  |                   |         |                   |                           |               |              |                   |   |
| 연구개발비<br>(단위 : 천원) | 정부지원<br>연구개발비    | 기관부담<br>연구개발비                                                                                                                                |                         | 그 외 기관 등의 지원금                    |                   |         |                   | 합계                        |               |              | 연구개발비<br>외<br>지원금 |   |
|                    |                  |                                                                                                                                              |                         | 자비단체 기타( )                       |                   |         |                   |                           |               |              |                   |   |
|                    | 현금               | 현금                                                                                                                                           | 현물                      | 현금                               | 현물                | 현금      | 현물                | 현금                        | 현물            | 합계           |                   |   |
|                    | 총계               | 600,000                                                                                                                                      | 20,001                  | 180,000                          | -                 | -       | -                 | -                         | 620,001       | 180,000      | 800,001           | - |
|                    | 1년차              | 134,000                                                                                                                                      | 4,467                   | 40,200                           | -                 | -       | -                 | -                         | 138,467       | 40,200       | 178,667           | - |
| 2년차                | 135,000          | 4,500                                                                                                                                        | 40,500                  | -                                | -                 | -       | -                 | 139,500                   | 40,500        | 180,000      | -                 |   |
| 3년차                | 331,000          | 11,034                                                                                                                                       | 99,300                  | -                                | -                 | -       | -                 | 342,034                   | 99,300        | 441,334      | -                 |   |
| 공동연구기관 등           | 기관명              | 책임자                                                                                                                                          | 직위                      | 휴대전화                             | 전자우편              | 비고      |                   |                           |               |              |                   |   |
|                    |                  |                                                                                                                                              |                         |                                  |                   | 역할      | 기관유형              |                           |               |              |                   |   |
| 공동연구기관             | 에스큐엔지니어링         | 손호웅                                                                                                                                          | 사장                      | 010-3495-3838                    | hshon@hanmail.net | 공동      | 중소기업              |                           |               |              |                   |   |
| 위탁연구기관             |                  |                                                                                                                                              |                         |                                  |                   |         |                   |                           |               |              |                   |   |
| 연구기관 외 기관          |                  |                                                                                                                                              |                         |                                  |                   |         |                   |                           |               |              |                   |   |
| 연구개발담당자<br>실무담당자   | 성명               | 김현진                                                                                                                                          |                         |                                  |                   | 직위      |                   | 박사과정                      |               |              |                   |   |
|                    | 연락처              | 직장전화                                                                                                                                         | 042-350-3665            |                                  |                   |         | 휴대전화              |                           | 042-350-3665  |              |                   |   |
|                    |                  | 전자우편                                                                                                                                         | hyeonjin619@kaist.ac.kr |                                  |                   |         | 국가연구자번호           |                           | 1184 9735     |              |                   |   |

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

2022 년 3 월 18 일

연구책임자 :

손 훈



주관연구개발기관의 장 : 한국과학기술원 이 광 형



공동연구개발기관의 장 : 에스큐엔지니어링 이 래 철



국토교통과학기술진흥원장 귀하

| 최종보고서(일반과제용)       |                  |                                                                                                                                              |                                  |               |                   | 보안등급                      |              |                   |         |         |   |
|--------------------|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|---------------|-------------------|---------------------------|--------------|-------------------|---------|---------|---|
|                    |                  |                                                                                                                                              |                                  |               |                   | 일반[✓], 보안[ ]              |              |                   |         |         |   |
| 중정기관양행명            | 국토교통부            |                                                                                                                                              |                                  | 사업명           | 사업명               | 국토교통기술촉진연구사업              |              |                   |         |         |   |
| 전문기관명              | 국토교통과학기술진흥원      |                                                                                                                                              |                                  |               | 내역사업명             | 국토교통기술혁신연구<br>(사회이슈해결 유형) |              |                   |         |         |   |
| 공고번호               | 공고-제2호           |                                                                                                                                              |                                  | 연구개발과제번호      |                   | 21CTAP-C152129-03         |              |                   |         |         |   |
| 국가과학기술<br>표준분류     | ET1101           | 100%                                                                                                                                         |                                  |               |                   |                           |              |                   |         |         |   |
| 연구주제               | (대분류) 걱정 없는 안심사회 |                                                                                                                                              | (중분류) 생활안전, 재난재해,<br>에너지, 주거, 교통 |               | (소분류) 불량 주택 및 시설물 |                           |              |                   |         |         |   |
| 연구개발과제명            | 국문               | 강구조물 도막 상태 실시간 평가 (도막 열화 분류 신뢰도 95%, 두께 정량화 정확도 20μm)를 위한 인공지능 기반 열화상/비전 검사 로봇 개발                                                            |                                  |               |                   |                           |              |                   |         |         |   |
|                    | 영문               | Development of Artificial Intelligence-based Infrared/Vision Inspection Robot for Real-time Evaluation of Steel Structure Coating Conditions |                                  |               |                   |                           |              |                   |         |         |   |
| 주관연구기관             | 기관명              | 한국과학기술원                                                                                                                                      |                                  |               | 사업자등록번호           | 314-82-01980              |              |                   |         |         |   |
|                    | 주소               | (우) 대전광역시 유성구 구성동                                                                                                                            |                                  |               | 법인등록번호            | 114471-0000668            |              |                   |         |         |   |
| 주관연구책임자            | 성명               |                                                                                                                                              | 손 훈                              |               | 직위                | 교수                        |              |                   |         |         |   |
|                    | 연락처              | 직장전화                                                                                                                                         | 042-350-3625                     |               | 휴대전화              | 010-3603-2547             |              |                   |         |         |   |
|                    |                  | 전자우편                                                                                                                                         | hoonsohn@kaist.ac.kr             |               | 국가연구자번호           | 1016 7378                 |              |                   |         |         |   |
| 연구개발기간             | 전체               | 2019. 04. 19 - 2021. 12. 31( 2 년 9 개월)                                                                                                       |                                  |               |                   |                           |              |                   |         |         |   |
|                    | 1년차              | 2019. 04. 19 - 2019. 12. 31 ( 0 년 9 개월)                                                                                                      |                                  |               |                   |                           |              |                   |         |         |   |
|                    | 2년차              | 2020. 01. 01 - 2020. 12. 31( 1 년 0 개월)                                                                                                       |                                  |               |                   |                           |              |                   |         |         |   |
|                    | 3년차              | 2021. 01. 01 - 2021. 12. 31( 1 년 0 개월)                                                                                                       |                                  |               |                   |                           |              |                   |         |         |   |
| 연구개발비<br>(단위 : 천원) | 정부지원<br>연구개발비    | 기관부담<br>연구개발비                                                                                                                                |                                  | 그 외 기관 등의 지원금 |                   | 합계                        |              | 연구개발비<br>외<br>지원금 |         |         |   |
|                    | 현금               | 현금                                                                                                                                           | 현물                               | 현금            | 현물                | 현금                        | 현물           |                   | 합계      |         |   |
| 총계                 | 600,000          | 20,001                                                                                                                                       | 180,000                          | -             | -                 | -                         | -            | 620,001           | 180,000 | 800,001 | - |
| 1년차                | 134,000          | 4,467                                                                                                                                        | 40,200                           | -             | -                 | -                         | -            | 138,467           | 40,200  | 178,667 | - |
| 2년차                | 135,000          | 4,500                                                                                                                                        | 40,500                           | -             | -                 | -                         | -            | 139,500           | 40,500  | 180,000 | - |
| 3년차                | 331,000          | 11,034                                                                                                                                       | 99,300                           | -             | -                 | -                         | -            | 342,034           | 99,300  | 441,334 | - |
| 공동연구기관 등           | 기관명              |                                                                                                                                              | 책임자                              | 직위            | 휴대전화              | 전자우편                      |              | 비고                |         |         |   |
|                    |                  |                                                                                                                                              |                                  |               |                   |                           |              | 역할                | 기관유형    |         |   |
| 공동연구기관             | 에스큐엔지니어링         |                                                                                                                                              | 손호웅                              | 사장            | 010-3495-3838     | hshon@hanmail.net         |              | 공동                | 중소기업    |         |   |
| 위탁연구기관             |                  |                                                                                                                                              |                                  |               |                   |                           |              |                   |         |         |   |
| 연구기관 외 기관          |                  |                                                                                                                                              |                                  |               |                   |                           |              |                   |         |         |   |
| 연구개발담당자<br>실무담당자   | 성명               |                                                                                                                                              | 김현진                              |               | 직위                |                           | 박사과정         |                   |         |         |   |
|                    | 연락처              | 직장전화                                                                                                                                         | 042-350-3665                     |               | 휴대전화              |                           | 042-350-3665 |                   |         |         |   |
|                    |                  | 전자우편                                                                                                                                         | hyeonjin619@kaist.ac.kr          |               | 국가연구자번호           |                           | 1184 9735    |                   |         |         |   |

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

2022 년 3 월 18 일

연구책임자 : 손 훈 (직인)

주관연구개발기관의 장 : 한국과학기술원 이 광 형 (직인)

공동연구개발기관의 장 : 에스큐엔지니어링 이 래 철 (직인)

국토교통과학기술진흥원장 귀하

## < 요약 문 >

|                           |       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |  |                               |  |                              |  |
|---------------------------|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|-------------------------------|--|------------------------------|--|
| 사업명                       |       | 국토교통기술촉진연구사업                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |  | 연구개발과제번호                      |  | 21CTAP-C152129-03            |  |
| 내역사업명                     |       | 국토교통기술혁신연구                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |  |                               |  |                              |  |
| 국가과학기술표준분류                |       | EI1101                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |  | 100%                          |  |                              |  |
| 연구주제                      |       | (대분류) 걱정 없는 안심사회                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  | (중분류) 생활안전, 재난재해, 에너지, 주거, 교통 |  | (소분류) 불량 주택 및 시설물            |  |
| 연구개발과제명                   |       | 강구조물 도막 상태 실시간 평가 (도막 열화 분류 신뢰도 95%, 두께 정량화 정확도 20μm)를 위한 인공지능 기반 열화상/비전 검사 로봇 개발                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |                               |  |                              |  |
| 전체 연구개발기간                 |       | 2019. 04. 19 - 2021. 12. 31 ( 2 년 9 개월)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |  |                               |  |                              |  |
| 총 연구개발비                   |       | 총 800,001 천원<br>(정부지원연구개발비 : 600,000 천원, 기관부담연구개발비 : 200,001 천원)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  |                               |  |                              |  |
| 연구개발단계                    |       | 기초[ ] 응용[ ] 개발[ <input checked="" type="checkbox"/> ]<br>기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[ ]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |  | 기술성숙도                         |  | 착수시점 기준( 5 )<br>종료시점 목표( 8 ) |  |
| 연구개발과제 유형                 |       | 지정공모 [ ] 자유공모 [ <input checked="" type="checkbox"/> ]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |  |                               |  |                              |  |
| 연구개발과제 특성                 |       | 사회이슈 해결                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |  |                               |  |                              |  |
| 연구<br>개발<br>목표<br>및<br>내용 | 최종 목표 | 무인 로봇이 강구조물 표면에 부착 이동하며 계측한 열화상 및 비전 영상을 인공지능 기반 자동 분석을 통해 (1) 도막 열화 (부식, 박리, 체킹, 초킹) 영역과 종류를 1 cm <sup>2</sup> 정확도 및 95% 신뢰도로 분류하고, (2) 도막 두께 분포를 20 μm 정확도로 시각화하여, (3) 자동 및 실시간 강구조물 도막 상태 평가가 가능한 로봇 시제품 개발 및 상용화 (TRL 8, 세계 최초/최고 기술)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |  |                               |  |                              |  |
|                           | 전체 내용 | <div><div>■ 열화상 및 비전 기반 이중 영상계측시스템 개발 (세계 최초/최고)</div><div>- 레이저를 열원으로 사용하는 능동형 열화상 시스템 개발 (레이저 파워 30 W 급)</div><div>- 열화상/비전 영상 동기화, 왜곡 보정, 정합 가능한 이중 영상계측시스템 개발 (무게 2.61 kg, 부피 240x215x110 mm<sup>3</sup>)</div><div>- 고해상도(HD급) 및 고속(60Hz) 열화상 및 비전 영상 실시간 처리기술 개발 (열화상 및 비전 영상 실시간 재구성 알고리즘 처리 속도 6.04 sec)</div><div>■ 강구조물 부착이동 및 특수임무 수행용 무인 로봇 플랫폼 개발</div><div>- 강구조물 검사를 위한 영구자석기반 부착형 무인 주행 로봇 플랫폼 개발 (최대 이동속도 1.5 m/min, 2축 이동, 무게 6.67 kg, 부피 275x145x150 mm<sup>3</sup>)</div><div>- 특수 임무 수행을 위한 이중 영상계측시스템 탑재부 개발 (탑재 무게 10 kg 이상)</div><div>- 원거리 전력 및 영상 송수신 방안 마련 (전력 및 데이터 최대 송수신 거리 30 m)</div><div>■ 인공지능 기반 자동 도막 상태평가 기법 개발 (세계 최초/최고)</div><div>- 인공지능 기반 도막 열화 분류 (부식, 박리, 체킹, 초킹 대상 95% 이상 분류 신뢰도) 및 넓이 정량화 (1 cm<sup>2</sup> 정확도) 알고리즘 개발</div><div>- 인공지능 기반 도막 두께분포 시각화 및 정량화 (20 μm 정확도) 알고리즘 개발</div><div>- 산업별 강구조물 내구성능 평가 기준에 따른 도막 상태 자동 평가 알고리즘 개발</div><div>■ 자동 및 실시간 강구조물 도막 상태평가 로봇 시제품 개발 (세계 최초/최고)</div><div>- 이중 영상계측시스템, 무인 로봇 플랫폼, 도막 상태평가기법 통합 및 시제품 개발 (시제품 무게: 15.47 kg, 부피: 530x380x400 mm<sup>3</sup>, 1시간 이상 연속 구동 가능)</div><div>- 열화상 및 비전 영상계측 안정성 확보를 위한 진동 감소</div><div>- 장비 제어 및 도막 상태평가 결과 실시간 확인을 위한 포터블 컨트롤러 구축</div><div>■ 개발 시제품 현장 강구조물 성능검증</div><div>- 강교량 바닥판 및 측면부 도막 상태평가 (성산대교)</div><div>- 플랜트 및 배관 시설물 도막 상태평가 (SK인천석유화학)</div><div>- 선박 외판 및 평형수 탱크 도막 상태평가 (현대중공업, 삼성중공업)</div></div> |  |                               |  |                              |  |

|                          |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|--------------------------|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                          |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 개발 시제품 실용화 및 상용화 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 핵심원천기술 기술이전 및 개발 시제품 국가 공인인증 획득 (KOLAS 인증 1건)</li> <li>- 건설시장 판로 개척을 위한 건설 신기술인증 신청 (건설신기술 인증 신청 1건)</li> <li>- 시제품 홍보, 기술 시연, 전시회 참여로 국내외 판로확보 (시제품 홍보 5건)</li> </ul> </li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 연구개발성과                   |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 열화상/비전 이중 영상계측시스템을 이용한 강구조물 도막 상태평가 검사 시스템 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 검사 전면적에 대해 도막 두께 및 열화 동시 검사 가능</li> <li>- 도막 두께 정량화 및 시각화 가능 (정량화 정확도 20 <math>\mu\text{m}</math> 수준)</li> <li>- 도막 열화 탐지 및 분류 가능 (분류 신뢰도 95 % 이상, 넓이 정량화 1 <math>\text{cm}^2</math> 급)</li> <li>- 검사 시스템 무게: 15.47 kg (1시간 구동 배터리 포함), 부피: 530x380x400 <math>\text{mm}^3</math></li> </ul> </li> <li>■ 인공지능 기반 열화상 및 비전 정합 영상을 이용한 도막 열화 검사 알고리즘 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 4차원 (열화상+비전) 영상을 이용한 도막 열화 탐지 및 분류</li> <li>- 이미지 처리기법을 통해 탐지된 열화 영역 이미지 이진화 및 면적 정량화</li> <li>- 이미지 처리 관련 알고리즘인 YOLO 알고리즘을 이용하여 실시간 검사 가능</li> </ul> </li> <li>■ 강구조물 부착이동이 가능한 무인 로봇 플랫폼 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 영구자석을 이용하여 강구조물 부착 이동 가능한 이동 로봇 개발 (부착력 20 kgf)</li> <li>- 최대 이동속도 1.5 m/min, 2축 이동(전후좌우), 수직 및 도현 상태 이동 가능</li> <li>- 디자인 업체를 통해 미래 지향적인 외부 케이스 제작</li> </ul> </li> <li>■ 정량적 연구성과 <ul style="list-style-type: none"> <li>- SCI 논문 1건 게재, 1건 제출</li> <li>- 특허 출원 1건, 등록 1건, 해외 특허 출원 2건</li> <li>- 소프트웨어 등록 2건</li> <li>- 기술이전 2건 (기술이전료 150,000 천원, 부가세 미포함, 통상 실시권)</li> <li>- 현장적용 5건 (광안대교, 성산대교, SK인천석유화학, 현대중공업, 삼성중공업)</li> <li>- 성과 홍보 및 학술발표 8건 (토목학회 부스 참가(2019), 한국구조물진단유지관리공학회 학술발표회(2020, 2021), 대한토목학회 컨벤션(2020, 2021), EMI/PMC 국제학술대회(2021), 한국비파괴검사학회 학술발표회(2021) 대우건설 기술 미팅(2021))</li> <li>- 사업화 실적 9건 (총 2,523,816 천원, KNOC QHR(2020), 여수지사 입출하부두(2020), 울산대교(2020), 영종대교(2020), 신대구부산고속도로(2020), 광주제2순환도로(2020), 당진화력 제1연료하역부두(2020), 성산대교(2021), 삼성중공업(2021))</li> </ul> </li> </ul> |
| 연구개발성과<br>활용방안 및<br>기대효과 |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 기술적 기대 효과 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 실시간 및 자동 강구조물 도막 상태평가 원천기술 확보 (세계 최고/최초)</li> <li>- 기존 국부영역 표본 검사 대체가 가능한 비접촉 대면적 전수검사기술 개발로 대형 사회기반시설물 도막 상태평가 신뢰도 향상 및 안전사회 도약 (세계 최고/최초)</li> <li>- 최근 연구가 진행되고 있는 테라헤르츠 장비 대비 검사속도 (기존 0.04 <math>\text{cm}^2/\text{sec}</math> → 제안 31.2 <math>\text{cm}^2/\text{sec}</math>), 성능 (도막 열화 분류 가능), 취약 부위 접근성이 뛰어남.</li> <li>- 인공지능 및 기계학습 기법 활용으로 기존 노동집약적, 주관적 검사에서 데이터 기반 객관적 자동 검사 방법으로 전환 및 도막 상태평가 효율 극대화</li> <li>- 무인 이동 로봇 활용으로 강구조물 안전진단 수행을 위한 접근성 향상 및 기존 검사가 어려웠던 강구조물 취약 부위 검사 수행 가능</li> <li>- 다양한 산업 강구조물별 지속적인 도막 상태평가 수행을 바탕으로 빅데이터를 구축하여 구조물 장기 도막 열화 경향 파악 및 예측에 활용</li> <li>- 데이터 기반 강구조물 도막 상태평가로 노후 사회기반시설물 유지관리 기술 확보</li> </ul> </li> <li>■ 경제적 기대 효과 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 제안기술은 영상기반 다지점 (640X512 지점) 계측 기반 도막 상태평가로 기존 단일 지점 (1지점) 계측 평가 방법 대비 검사 시간 단축 및 효율 극대화 가능</li> <li>- 2019년 1월 개정된 시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침(교량) 내 허용 도막 두께 감소 비율, 부식 면적 등 도막 상태 평가 기준 개정으로 관련 국내 시장 규모 및 기술 수요 증가 예상</li> <li>- 전 세계적 강구조 시설물 노후화 가속화로 강구조물 도막 상태평가 분야 시장 형성 시 과제 종료 3년 후 연 매출 국내 1,300 백만 원, 해외 289 백만 달러 예상</li> </ul> </li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |

|                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |              |                                          |                 |                                     |              |                                             |                  |                                                |     |     |    |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|------------------------------------------|-----------------|-------------------------------------|--------------|---------------------------------------------|------------------|------------------------------------------------|-----|-----|----|
|                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 건설, 석유화학, 조선 등 주시장 내 도막 상태평가 시장 연간 성장률은 7.83%로 2023년에는 국내외 전체 약 3억 달러 규모 시장 형성 예정</li> <li>- 세계 최초/최고 원천기술 개발을 통한 신사업 창출 및 글로벌 시장 선점</li> <li>- 제안 기술 상용화를 통한 국내 중소 구조물 안전진단 업체 수익개선, 수주 경쟁력 향상 및 해외시장 개척 지원</li> </ul> <p>■ 사회적 기대 효과</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- “국토교통과학기술 연구개발 종합계획(‘18.6)” 내 세계 선도기술 개발, 노후화 시설물 관리를 통한 SOC 전 주기에 걸친 기술 개발, 사회문제 해결형 기술 개발로 새로운 부가가치 창출 및 사람 중심의 국토교통 기술 개발 요구 충족 가능</li> <li>- 객관적 도막 상태평가로 효과적인 강구조물 안전 규정 및 법령 개정 가능</li> <li>- 노동집약적, 저부가가치 국내 시설물 안전진단 산업을 기술집약적, 고부가가치 4차 산업으로 전환, 관련 인력양성, 및 고용 증대</li> <li>- 비정규직 안전진단 관련 근로자 안전성 확보를 통한 안전사고 방지 및 전문성 증대</li> <li>- 전 세계적으로 전무한 무인 실시간 강구조물 도막 상태 평가기술 및 장비 개발로 구조물 안전진단 분야 기술 혁신, 신산업 분야 개척 및 국가 기술 경쟁력 강화</li> <li>- 신속한 강구조물 도막 상태평가로 구조물 손상 조기진단이 가능하며, 국가 주요 강구조물 안전성을 향상시켜 대형사고 방지, 국가 이미지 쇄신, 국민 신뢰확보 가능</li> </ul> |              |                                          |                 |                                     |              |                                             |                  |                                                |     |     |    |
| 연구개발성과의 비공개여부 및 사유          | 해당없음                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |              |                                          |                 |                                     |              |                                             |                  |                                                |     |     |    |
| 연구개발성과의 등록·기탁 건수            | 논문                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 특허           | 보고서<br>원문                                | 연구<br>시설·<br>장비 | 기술<br>요약<br>정보                      | 소프트<br>웨어    | 표준                                          | 생명자원             |                                                | 화합물 | 신품종 |    |
|                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |              |                                          |                 |                                     |              |                                             | 생명<br>정보         | 생물<br>자원                                       |     | 정보  | 실물 |
|                             | 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 3            |                                          |                 |                                     | 2            |                                             |                  |                                                |     |     |    |
| 연구시설·장비<br>종합정보시스템 등록<br>현황 | 구입기관                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 연구시설·<br>장비명 | 규격<br>(모델명)                              | 수량              | 구입<br>연월일                           | 구입가격<br>(천원) | 구입처<br>(전화)                                 | 비고<br>(설치장<br>소) | ZEUS<br>등록번호                                   |     |     |    |
|                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |              |                                          |                 |                                     |              |                                             |                  |                                                |     |     |    |
| 국문핵심어<br>(5개 이내)            | 실시간 도막 상태<br>평가                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |              | 도막 열화 분류                                 |                 | 도막 두께<br>정량화                        |              | 비전 및 능동<br>열화상 장치                           |                  | 인공지능 검사<br>로봇                                  |     |     |    |
| 영문핵심어<br>(5개 이내)            | Real-time coating<br>thickness evaluation                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |              | Coating<br>degradation<br>classification |                 | Coating thickness<br>quantification |              | Vision and active<br>thermography<br>device |                  | Artificial<br>intelligence<br>inspection robot |     |     |    |

## < 목 차 >

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 1. 연구개발 필요성 .....              | 1  |
| 2. 연구개발 목표 및 내용 .....          | 12 |
| 3. 연구개발 결과 .....               | 20 |
| 4. 연구 성과 .....                 | 47 |
| 5. 연구개발성과의 관련 효과 및 효과 분석 ..... | 51 |
| 6. 연구개발성과 활용 및 추가연구 필요성 .....  | 52 |
| 7. 참고 문헌 .....                 | 53 |
| 별첨자료 (성과 증빙자료 등)               |    |

# 1. 연구개발 필요성

## 1.1. 연구개발 개요

- 연구목표: 강구조물에 영구자석을 이용해 부착해서 이동하는 무인 로봇 플랫폼을 개발하고, 로봇에 장착된 열화상 및 비전 시스템으로 계측된 이미지를 인공지능으로 분석하여 자동으로 강구조물 도막 상태를 평가하는 인공지능 기반 열화상/비전 검사 로봇 개발 및 상용화
- 연구내용
  - 열화상 및 비전 기반 이중 영상계측시스템 개발 (세계 최초/최고): (1) 레이저, LED, 램프 등을 열원으로 사용하는 열화상 시스템 개발; (2) 열화상 및 비전 영상 자동 동기화, 왜곡 보정, 정합이 가능한 이중 영상계측시스템 개발 (이중 영상계측시스템 무게 6 kg, 부피 250×250×200 mm<sup>3</sup> 이내); (3) 고해상도(HD급) 및 고속(60Hz) 열화상 및 비전 영상 실시간 처리기술 개발
  - 강구조물 부착이동 및 특수 임무 수행용 무인 로봇 플랫폼 개발: (1) 강구조물 검사용 영구자석 기반 부착형 무인 주행 로봇 플랫폼 개발 (플랫폼 무게 8 kg, 부피 300×250×200 mm<sup>3</sup>, 최대 이동 속도 1.5 m/min); (2) 특수 임무 수행을 위한 이중 영상계측시스템 탑재부 개발 (탑재 무게 10kg 이상); (3) 원거리 전력 및 영상 송수신 방안 마련 (전력/데이터 최대 송수신 거리 30m)
  - 인공지능 기반 자동 도막 상태평가 기법 (세계 최초/최고): (1) 인공지능 기반 도막 열화 분류 (부식, 박리, 체킹, 초킹 대상 95% 이상 분류 신뢰도) 및 넓이 정량화 (1 cm<sup>2</sup> 정확도) 알고리즘 개발; (2) 인공지능 기반 도막 두께분포 시각화 및 정량화 (20 μm 정확도) 알고리즘 개발; (3) 산업별 강구조물 내구성능 평가 기준에 따른 도막 상태 자동 평가 알고리즘 개발
  - 자동 및 실시간 강구조물 도막 상태평가 로봇 시제품 (세계 최초/최고): (1) 이중 영상계측시스템, 무인 로봇 플랫폼, 도막 상태평가기법 통합 및 시제품 개발 (최대 검사속도 0.5X1.5 m<sup>2</sup>/min, 시제품 무게 13 kg, 시제품 부피 300×250×350 mm<sup>3</sup>, 최대 연속 구동 시간 1시간); (2) 열화상 및 비전 영상계측 안정성 확보를 위한 진동 감소 (계측진동 1mm 이하); (3) 장비 제어 및 도막 상태평가 결과 실시간 확인을 위한 컨트롤러 구축
  - 개발 시제품 현장 성능검증 (한국지역난방공사, 현대중공업, 한국시설안전공단 등): (1) 강교량 바닥 판 및 측면부; (2) 플랜트 및 배관 시설물; (3) 선박 외판 및 평형수 탱크
  - 개발 시제품 실용화 및 상용화: (1) 국가 공인인증 획득 (KOLAS 인증 1건); (2) 건설시장 판로 개척을 위한 건설 신기술인증 신청 (건설신기술 신청 1건); (3) 시제품 홍보, 기술 시연, 전시회 참여로 국내외 판로확보 (시제품 홍보 5건); (4) 공동연구기관으로 핵심원천기술 기술이전 (1건)

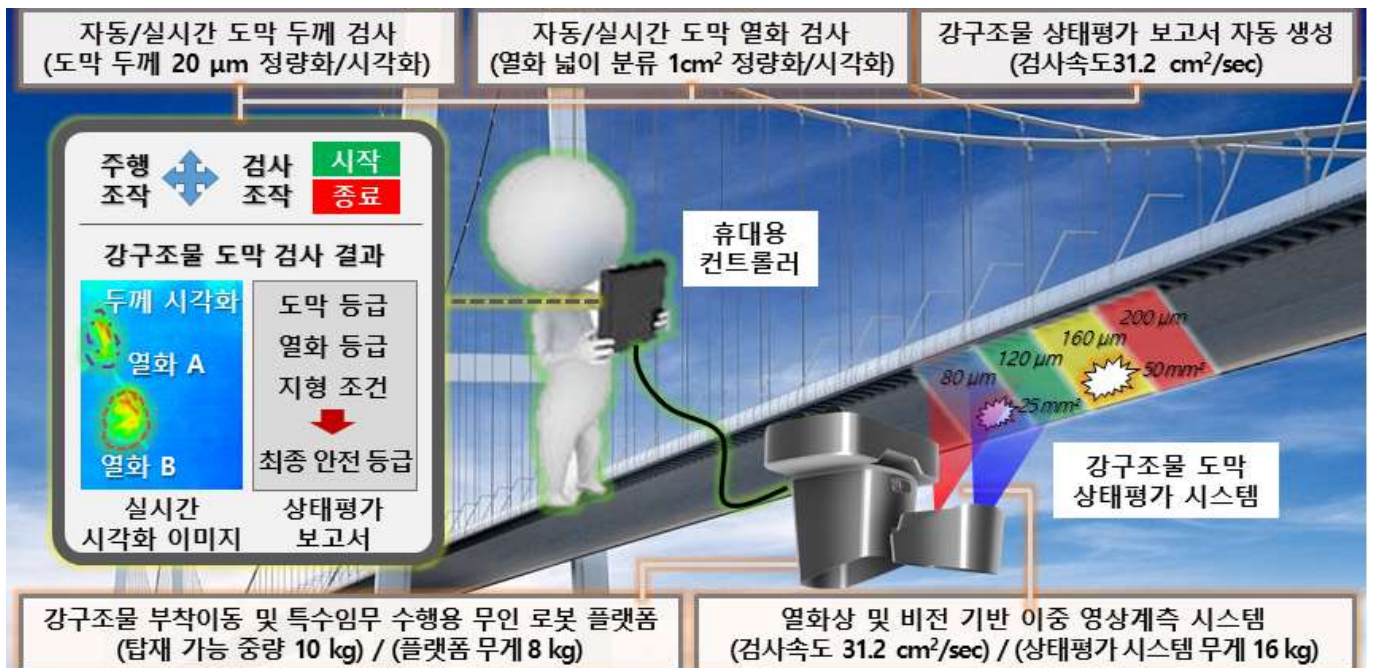


그림 1. 강구조물 도막 상태 실시간 평가를 위한 인공지능 기반 열화상/비전 검사 로봇 개발 개요도

■ 연구 배경 및 필요성

- 안전한 생활환경 조성 필요: 최근 상도 유치원 사고, 평택국제대교 붕괴사고 등 구조물 붕괴사고로 인해 안전에 대한 국민 불안감이 팽배하고 있다. 이에 대응하여 정부는 공공기관의 사회기반시설 안전실태에 대한 전수조사를 추진하고 있으며 사회기반시설물 재난·재해 사전예방을 위한 국토교통 기술 개발을 통한 국민의 생명과 재산이 보호되는 “안전한 생활환경” 조성이 필요하다.
- 유지관리 인력 안전 확보: 지난 2018년 5월과 9월에는 교량 점검 중 근로자 추락 사고가 발생하는 등 산업현장에서 교량 점검 대차 등을 이용한 검사 작업 수행 중 사망 사고가 빈번히 발생하고 있다. 검사자가 직접 현장에 접근하여 접촉식 장비를 이용해 검사하는 현재 도막 평가 방법은 작업자로 하여금 무리한 현장 접근을 요구하므로, 유지관리 인력의 안전 확보를 위해 검사자의 접근이 어려운 부분을 검사 할 수 있는 무인 이동 로봇 기술 개발이 요구된다.
- 노후화 강구조물 증가: 전 세계적으로 인프라 구조물 및 노후화 구조물이 급격히 증가하고 있다. 30년 이상 1, 2종 시설물 비율이 2015년도 4%에서 2030년에는 약 37%로 증가할 것으로 예상된다. 2018년 도로교량및터널현황조사에 따르면 강교량 5,095개 중 준공년도 30년 이상 교량은 167개로 약 3%를 차지한다. 2014년 인천 전통시장 지붕에서 노후화로 부식된 철골 구조물이 통행로로 떨어지는 사고 등 노후화 구조물 증가로 인한 복합 재난 및 사고 위험성이 증대하고 있다. 노후시설물 교체 및 수리 등 국민 안전과 직결되는 사회문제 해결형 기술개발이 필요하다.
- 도막 상태평가 중요성 증대: 도막 열화 및 도막 두께 등 도막 상태평가는 강구조물의 내구성과 직결되며, “시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침-성능평가 편”에서도 강재 내구성능 평가 항목의 내부적 요소로 “발청 및 도장 열화”와 “도장두께”로 지정했다. 2019년 1월에 강구조물 도막 상태평가 관련 규정이 신설 및 세분화 되어 도막 상태평가에 대한 중요성이 대두되었으며, 향후 도막 상태평가 기술 수요가 급증할 것으로 예상된다.
- 4차 산업혁명 기반 기술 필요: 급격하게 변하는 미래 시장 선점을 위해 스마트시티, 건설 자동화, 무인 로봇 개발, 인공지능 등 4차 산업혁명 기술 플랫폼 중요성이 증대되었다. 시설물 유지관리 분야에서도 인공지능과 빅데이터 분석 기반 구조물 최적 유지관리 기술과 무인 로봇을 통해 구조물 안전성 확보 및 스마트시티 공간정보 플랫폼과 연동 가능한 기술이 필요하다.

■ 기존 기술 한계점

- 주관적, 경험적 도막 검사 문제점: 현재 도막 검사는 육안검사, 표본 검사 등 검사자가 직접 현장에 접근하여 검사자의 주관과 경험을 바탕으로 진행되고 있어 검사 결과의 객관성이 결여된다. 접촉식 센서를 이용해 3~5mm 이내의 전체 검사 면적 대비 매우 작은 국부영역을 측정하는 현행 도막 검사 방식은 검사 영역 사이의 도막 열화나 도막 두께 측정이 불가능해 낮은 검사 신뢰도를 가진다.
- 안전진단 작업자 안전 위협: 안전진단 업무는 비정규직 근로자에 상당수 의존하고 있으며 최근 “김용균법” 등 사회적으로 비정규직 안전진단 노동자의 안전에 대한 우려가 커지고 있다. 현재 도막 검사 방법은 검사자의 현장 접근을 요구해 안전사고 가능성이 높은 위험업무에 노출시키고 있다.
- 대형구조물 접근성 제한: 교량 점검 시 크레인과 교량 점검 대차 등을 사용하고 있지만, 주변 교통 체증을 유발하고 장대 교량의 경우 기존 장비로도 일부 영역은 제한적이다. 검사 가능 지역 확대를 위해 드론 등 이동식 점검 장비가 개발되고 있으나 비행 중 추락으로 인한 안전사고 위험이 있다.
- 수동식 검사 결과 보고서 작성: 유지관리 검사 보고서는 검사자의 주관적 판단을 바탕으로 수기 작성된다. 현재는 안전진단 작업자가 직접 구조물 내구성 평가기준에 따라 일일이 수기로 기재해야 하는 번거로움이 있어, 앞으로 계측 데이터를 평가기준에 따라 자동으로 도막 상태 평가 항목으로 입력하는 도막 상태평가 알고리즘 개발이 필요하다.
- 노동집약적/저부가가치 산업: 육안검사, 표본 검사 등 현행 도막 검사는 검사자가 직접 현장에 접근하는 인력 기반 검사로 단순 인력 소모가 큰 노동집약적, 저부가가치 산업이다. 인공지능, 무인 로봇 등 4차 산업혁명 기술을 활용한 기술집약적/고부가가치 산업으로의 전환이 필요하다.

■ 개발 기술 독창성

- 4차산업 기반 실시간 구조물 유지관리 원천기술: 대표 4차 산업 기술인 인공지능 및 기계학습을 기반으로 자동·실시간으로 강구조물 도막 열화를 분류하고 도막 두께를 정량화/시각화하는 강구조물 도막 상태평가 원천기술을 세계 최초로 개발한다.
- 열화상/비전 기반 도막 열화 분류: 기존 영상기반 도막 열화 기술은 내부 박리 감지가 불가능하며, 강재 부식으로 인한 색상, 경계 부분 특성을 기반으로 부식 영역을 추출했기 때문에 내부부식 탐지는 불가능했다. 제안된 열화상 및 비전 통합 계측시스템을 사용하여 도막 열화 (부식, 박리, 채킹, 초킹 등) 형태를 95% 신뢰도로 자동 분류하는 기술을 세계 최초로 개발하고자 한다.
- 열화상/비전 기반 도막 두께 시각화 및 정량화: 접촉식 도막 두께측정 센서는 검사 면적이 2~3mm 이내로 매우 좁아 표본 검사로 진행한다. 또한, 테라헤르츠 센서는 다양한 층을 갖는 도막의 각층 두께를 정량화할 수 있지만, 단일 지점의 도막 두께측정만 가능하며, 넓은 영역을 측정하려면 장시간 스캐닝이 필요하다. 열화상/비전 통합 시스템을 검사 로봇에 탑재하여 검사 전 영역 도막 두께를 20  $\mu\text{m}$ 급으로 시각화 및 정량화하는 기술은 현재 개발 사례가 전무하다.
- 뛰어난 접근성 및 활용 범위: 영구자석을 이용한 접착형 인공지능 무인 검사 로봇 개발로 기존 인력 검사 대비 접근성이 월등히 향상된다. 또한, 바람 영향을 많이 받는 드론형 무인체와 달리 부재에 직접 부착되어 이동하므로 장대교량 등 대형 사회기반시설물에 적용 가능하며 향후 교량, 원전 시설물, 풍력 발전기, 댐 등 다양한 강구조물에 활용할 수 있다.
- 건도막 및 습도막 도막 두께 측정: 이중 계측시스템을 통한 인공지능 기반 자동 도막 상태평가 핵심 원천기술은 별도 보정 작업이 불필요한 비접촉식 도막 상태평가 기술로 건도막 뿐만 아니라 습도막에도 적용 가능하다. 도막 도포 직후 도막 두께를 측정해 재도포 및 재건조 시간을 단축시킬 수 있다. 향후 무인체 등 비접촉식 장치 탑재를 통해 다양한 습도막 상태평가 분야에 활용할 수 있다.

■ 파급 효과

- 강구조물 도막 상태평가 신뢰성, 접근성, 속도 향상: 기존 인력 기반 검사는 주관적 검사, 인력 접근의 어려움, 검사 면적 당 느린 속도 등의 문제점을 갖고 있다. 제안기술을 통해 데이터를 기반으로 한 객관적 검사를 통해 검사 결과의 신뢰도를 향상시킬수 있으며, 무인 이동 로봇 탑재를 통해 접근성 및 검사속도 향상이 가능하다.
- 다양한 도막 손상감지에 활용: 제안 기술은 도막 열화, 도막 두께 기반 도막 상태평가 원천기술로 향후 습도막, 내부 결함, 피로 균열 등 다양한 손상감지에 활용 가능할 것으로 기대된다.
- 인공지능 기반 효율적인 구조물 유지관리: 인공지능 기반 비파괴 방식 구조물 손상감지·진단기술 개발로 강구조물 열화 거동 파악과 구조물 잔여 수명 예측이 가능하다. 기존 유지관리 데이터와 새로 진행되는 유지관리 데이터 분석을 통해 유지관리 최적 시점을 예측할 수 있다.
- 다양한 산업에 적용 가능: 제안 기술은 강교량 바닥 판(건설), 플랜트 배관 시설물(기계), 선박 외판(조선), 원전 시설물(원자력), 원유 저장 탱크(에너지) 등 다양한 산업 분야에서 사용되는 강구조물 도막 상태평가에 적용 가능하다.
- 기술집약적/고부가가치 산업 전환: 기존 노동집약적, 저부가가치 국내 시설물 안전진단 산업을 데이터 기반 기술집약적, 고부가가치 산업으로 전환할 수 있다. 또한, 단순노동 안전진단 직종을 데이터 분석, 인공지능 등 4차 산업 핵심기술을 요구하는 고보수 전문직종으로 전환이 예상된다.
- 근로자 안전사고 방지: 이동식 로봇을 이용한 안전진단을 통해 기존 위험 지역 검사 시 발생하는 추락, 낙상, 교통사고 등 안전사고를 감소할 수 있을 것으로 예상된다.
- 국민의 안전성 관련 이미지 제고: 여러 차례 발생한 붕괴사고로 인해 사회기반 시설물 전반에 대한 국민의 불안감이 형성되어 있다. 강구조물 도막 유지관리 기술 개발로 국민 삶과 직결된 사회기반시설물 품질 향상 및 국민이 체감하는 안전성 관련 이미지 제고가 가능하다.

## 1.2. 연구개발 대상 국내외 현황

- 과제 중복성 및 차별성
- 관련 과제 분석

| 부처명                | 사업명                                           | 과제명                                                            | 연구 내용                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 예산<br>(억원) |
|--------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 국토<br>교통부          | 건설 핵심 기술<br>연구개발사업<br>(2016)                  | 무인검사장비 기반<br>교량구조물 신속진단 및<br>평가기술 개발                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>교량 외관조사를 위한 무인검사장비 개발</li> <li>무인검사장비의 운영 및 원격제어 기술 개발</li> <li>이종영상 데이터 융·복합 기반 비접촉식 상태평가 기술 개발</li> <li>무인검사장비 수집데이터를 이용한 교량의 신속한 외관 상태 평가 기술 개발</li> </ul>                                                                                                           | 78.4       |
| 과학기술<br>정보<br>통신부  | 이공학개인지초<br>연구지원<br>(2016)                     | 펄스위상 광열파에 의한<br>도막 미세 두께 진단<br>비파괴 정량화 평가기술<br>개발              | <ul style="list-style-type: none"> <li>도막 미세 두께 측정 기술 개발</li> <li>고분해능 Lock-in Thermography 측정 기법 개발</li> <li>광열파 Pulse phase thermography 측정 기법 개발</li> <li>도막 종류/두께 및 매개 변수 평가를 위한 정량화 비파괴 검사/평가 기술개발</li> <li>도막 미세두께 검출 알고리즘 개발</li> <li>미세 탐상 기법 검증을 위한 CAE 모델러 개발</li> <li>불확도 및 신뢰성 기법 검증 연구</li> </ul> | 1.3        |
| 중소<br>기업청          | 연구장비활용<br>기술개발사업<br>(2012)                    | 자화도 분석기법을<br>활용한 0.1 $\mu\text{m}$ 분해능<br>포터블 도장막 두께<br>측정기 개발 | <ul style="list-style-type: none"> <li>온도센서 내장 기술 개발</li> <li>측정 대상 피도장 물질의 자기적 특성 반영기술 개발</li> <li>보정용 기준 시료 제작</li> <li>도장막 측정기 시제품 제작</li> </ul>                                                                                                                                                            | 6.0        |
| 과학기술<br>정보<br>통신부  | 이공학개인지초<br>연구지원사업-기<br>본연구<br>(2017)          | 전기화학적 열화속도<br>평가 방법을 통한 강재<br>내구한계성능 분석기법<br>개발                | <ul style="list-style-type: none"> <li>강구조물 설치 형태와 위치별 중량손실법에 따른 시간의 존적 열화속도 평가</li> <li>전기화학적 열화속도 평가방법을 통한 강구조물 설치한 경별 열화속도 평가기법 개발</li> <li>중량손실법과 전기화학적 열화속도 평가기법에 따른 강재 구조물의 부식 내구한계성능 분석기법 제안</li> </ul>                                                                                                 | 1.5        |
| 한국에너<br>지기술<br>평가원 | 신재생에너지<br>핵심<br>(2014)                        | 해상풍력 구조물의<br>설계수명 확보를 위한<br>최적 부식관리기술 개발                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>부식 모니터링 및 진단시스템 설계기술 개발</li> <li>강재 부식속도, 도막열화율, 음극방식 전위 측정용 설계 및 제작</li> <li>원격 상태감시를 위한 상태감시시스템 알고리즘 개발 및 네트워크 사양설계</li> </ul>                                                                                                                                        | 28.9       |
| 교육과학<br>기술부        | 이공분야기초<br>연구사업-신진연<br>구자<br>지원사업<br>(2015)    | 영상 시스템 및<br>무선헬기를 이용한<br>구조물 상태 평가 기술<br>개발                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>대형사회기반시설물 외관 균열 및 파손 모니터링 기술 및 유지관리 점검 비용 절감 기술 개발</li> <li>영상/열화상 카메라 적용방안 및 영상처리방법 연구</li> <li>무선헬기의 적용 성 연구 및 분석 프로그램 개발</li> <li>실 구조물 상태평가 적정성 및 적용성 연구</li> </ul>                                                                                                 | 1.5        |
| 교육과학<br>기술부        | 이공학개인지초<br>연구지원사업-지<br>역대학우수<br>과학자<br>(2018) | 구조물 상태 평가를<br>위한 비전센서 기반<br>동적 변위 해석 및 손상<br>탐지 기술 개발          | <ul style="list-style-type: none"> <li>비전센서 기반 동적 영상정보 수집을 통한 변위 계측, 손상 탐지(균열, 누수, 백화 등) 및 실시간 가속도 계측을 통한 구조물 내하력 평가 기술 개발</li> <li>비전센서를 이용한 구조물 표면의 자연적 타격을 실시간 멀티포인트로 측정 가능한 기술 개발</li> </ul>                                                                                                               | 1.5        |

- 대표 비교과제와의 차별성 분석

|                   |                                                                                                                                                                                                                                                |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>비교과제 #1</b>    | <b>무인검사장비 기반 교량구조물 신속진단 및 평가기술 개발</b>                                                                                                                                                                                                          |
| <b>소관기관(부처)</b>   | 국토교통과학기술진흥원                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>연구기간</b>       | 2016.08.29. ~ 2019.08.28.                                                                                                                                                                                                                      |
| <b>연구목표</b>       | 무인체 기술(무인비행체) 및 이종영상장비(RGB 카메라, 열화상 카메라, 초분광 카메라) 등 다양한 첨단기술의 융·복합을 통해 기존 교량 안전진단방법의 문제점들을 해결할 수 있는 ‘무인검사장비 기반 교량구조물 외관 상태 신속 진단 및 성능평가 기술’ 개발                                                                                                 |
| <b>연구내용</b>       | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 교량 외관조사를 위한 무인검사장비 개발</li> <li>▪ 무인검사장비의 운영 및 원격제어 기술개발</li> <li>▪ 이종영상 데이터 융·복합 기반 비접촉식 상태평가 기술개발 (도막 두께측정 포함)</li> <li>▪ 무인검사장비 수집데이터를 이용한 교량의 신속한 외관상태 평가기술 개발</li> </ul>                          |
| <b>제안 과제의 차별성</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 강구조물 자동 도막 두께 정량화/시각화 및 부식, 박리, 체킹, 초킹 등 다양한 도막 열화 분류/정량화 가능</li> <li>▪ 별도 보정이 불필요한 비접촉식 검사로 목표 수준에 따라 접촉식 센서 사용</li> <li>▪ 영구자석 바퀴형 이동 로봇 개발 및 활용으로 비교과제에서 이용하는 드론이 갖는 비행 조건에 따른 제약 극복 가능</li> </ul> |

|                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>비교과제 #2</b>    | <b>펄스위상 광열파에 의한 도막 미세 두께 진단 비파괴 정량화 평가기술 개발</b>                                                                                                                                                                                                                                     |
| <b>소관기관(부처)</b>   | 한국연구재단                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <b>연구기간</b>       | 2016.11.01. ~ 2019.10.31.                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <b>연구목표</b>       | 펄스 광열파 기법을 이용한 도막 미세두께 진단 및 평가기술 개발                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>연구 내용</b>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 도막 두께측정 기술 개발 (도막 두께 150 <math>\mu\text{m}</math> 내외 수준 목표)</li> <li>▪ 전자제품 대상 도막 두께 측정 기술 개발</li> <li>▪ 고분해능 Lock-in Thermography 측정 기법 개발</li> <li>▪ 광열파 Pulse phase thermography 측정 기법 개발</li> <li>▪ 시뮬레이션 검토 및 실험실 수준 성능 검토</li> </ul> |
| <b>제안 과제의 차별성</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 펄스 열화상 단일 시스템이 아닌 열화상/비전 이종 통합계측시스템을 이용한 실시간 도막 자동 상태평가 가능</li> <li>▪ 20 <math>\mu\text{m}</math> 수준 도막 두께 정량화 기술 개발로 미세 도막 두께측정 가능</li> <li>▪ 실험실 수준을 넘어선 실제 현장적용 가능한 도막 상태평가 기술 개발</li> <li>▪ 대형사회기반시설물을 목표로 한 대규모 검사 수행 가능</li> </ul>   |

■ 관련 분야 연구 현황

| 관련 기술 동향           |                                        |          |                                                                                    |
|--------------------|----------------------------------------|----------|------------------------------------------------------------------------------------|
| 주요 기술              | 기업/기관                                  | 국가       | 보유기술/수행연구                                                                          |
| 도막 열화<br>평가기술      | George Washington Univ.                | 미국       | 강재 내부 전기적 특성 분석을 통한 부식 진행 정도 평가<br>부식 위치 시각화 불가능                                   |
|                    | Ortiz                                  | 스페인      | 비전 영상기반 주변 도장과의 경계 부분 특성 추출을 이용한 표<br>면 부식 진단기술<br>내부부식 검사 불가능 및 표면 오염을 부식으로 판별 가능 |
|                    | Atha & Jahanshahi                      | 미국       | 합성곱 네트워크를 이용한 영상기반 부식 진단 기법 개발                                                     |
|                    | Cadelano                               | 이탈<br>리아 | 배관 방사 열 분석을 통한 배부 부식 모니터링 및 진단기술                                                   |
| 도막 두께<br>정량화<br>기술 | Nippon paint                           | 일본       | 도포된 도막 두께에 따라 색상이 변하는 도료 개발<br>도막 색상 선정에 한계 존재 및 적용 가능 범위 450μm 미만                 |
|                    | National Technical Information Service | 미국       | 레이저 분광기법을 이용한 강재 도막 두께 및 부식 정도 측정<br>파괴검사에 해당되며 손상 이전 초기 계측데이터 수집 필수               |
|                    | T.Sakagami                             | 일본       | 테라헤르츠파를 이용한 다층 도막 두께 시각화 장비                                                        |
| 무인체<br>기반 검사<br>기술 | GMTIB                                  | 독일       | 자율주행 항법을 사용한 건물 외관 및 다리 3D 모델링<br>구조물 외관 균열/손상 탐지 및 정량화                            |
|                    | 한국과학기술원                                | 한국       | 드론을 활용한 교량 손상 유형 탐지 기술 개발                                                          |
|                    | eXom                                   | 이탈<br>리아 | 교량 적외선 이미지 촬영 및 Point Cloud 기법을 이용한 교량 3D<br>모델링 기술                                |

■ 강재의 전기적 특성, 이미지 기반 딥러닝, 신경망 등 다양한 방법을 이용한 기술이 개발되고 있으나, 다양한 도막 열화 중 부식에 주로 한정되어 있으며, 내부부식 검출 불가, 부식 위치 시각화 불가 등 다양한 제한 요소를 지니고 있고 표면 오염에 의한 정확도 문제가 발생함.  
 ■ 도막 두께측정을 위해 분광 기법, 새로운 도료 사용 등 비접촉식 검사 방법이 개발되고 있으며, 최근 테라헤르츠파를 이용한 도막 두께 정량화 및 시각화 기술이 대두되고 있음. 테라헤르츠 장비는 일정한 국소 부위의 다층 도막 두께를 시각화 할 수 있는 장점을 지녔지만 넓은 범위를 측정해야 하는 현장에 적용하기엔 고가의 장비이고, 검사 속도, 장비 설치 조건 등의 제약이 있음.  
 ■ 교량 등 대형사회기반시설물 모델링을 위해 다양한 형태의 드론이 개발되었으며, 드론을 이용해 촬영한 비전 이미지를 활용한 교량 외부 손상 유형 탐지 기술이 개발됨. 하지만 교량 바람, 기온 등 주변 환경 조건 영향에 민감해 정밀 계측을 위한 일정 거리 유지가 힘들어 장대교량, 해상교량, 고층건물 구조물 내부 등에 적용하기 어려움.

| 전망 및 한계                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>■ 2019년 1월에 개정된 “시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침”에서 강재 내구성능 평가항목의 내부적 요소로 “발청 및 도장 열화”와 “도막 두께”로 정함. 도막 열화 요인을 5가지로 분류하고 각각 평가 및 중요도에 따라 가중치를 부여하는 형태로 평가 기준을 제시하여 다양한 도막 열화 종류를 분류하는 기술과 도막 두께 정량화 기술에 대한 수요가 증가할 것으로 전망됨.</p> <p>■ 4차 산업혁명으로 기존 촬영 이미지와 비전 카메라로 새로 촬영한 이미지를 활용하여 인공지능영상을 구축하여 인공지능 기반 도막 부식 진단 기법 개발이 활발히 진행되고 있으며, 향후 다양한 종류의 도막 열화 및 상태평가 기술 개발이 진행될 것으로 전망됨.</p> <p>■ 기존 접촉식 국부영역 검사 장비에서 테라헤르츠파, 레이저 등 비접촉식/전면적 검사 가능 기술 개발이 진행되고 있으며, 향후 검사 면적 확대, 검사속도 향상 등 검사 시간 단축에 관한 연구가 진행될 것으로 보임.</p> <p>■ 열화상 시스템과 비전 시스템이 독립적으로 사용되고 있으나 다양한 현장조건에의 적용 가능성을 향상시키기 위해 융합 시스템을 통한 도막 상태평가 기술이 요구될 것으로 판단됨.</p> <p>■ 무인체 기반 검사 기술의 대부분을 차지하는 드론은 바람 등 주변 환경, 배터리 작동 시간 등 제약조건이 있어, 대형구조물 전체 검사에 적용 가능한 새로운 형태의 무인 검사 장비 연구가 시급한 것으로 판단됨.</p> |

■ 관련 분야 특허 현황

| 관련 분야 특허 현황       |                              |     |                                                                                   |
|-------------------|------------------------------|-----|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 주요 기술             | 보유 기관                        | 국가  | 특허명                                                                               |
| 영상/열화상 계측 장비      | 대우건설                         | 한국  | 적외선 열화상 카메라를 이용한 구조물의 3차원 실시간 영상계측 모니터링 시스템                                       |
|                   | 한국도로공사                       | 한국  | 영상처리 기법을 이용한 강교의 도막검사 시스템의 처리방법                                                   |
|                   | 유키오 아카쉬                      | 국제  | 적외선 열화상 해석장치                                                                      |
|                   | 한국철도기술연구원                    | 한국  | 영상 기반 교량 관리 시스템                                                                   |
| 도막 상태평가           | 현대중공업                        | 한국  | 펄토초 레이저 발생장치 및 그와 연동하는 도막두께 측정장치                                                  |
|                   | 대우정밀산업                       | 한국  | 도막두께 측정 장치                                                                        |
|                   | Kernmetal Inc.               | 미국  | Method of non-destructive testing a cutting insert to determine coating thickness |
|                   | Elcomer Limited              | 미국  | Coating thickness measuring instrument and methods                                |
|                   | National Research Council    | 캐나다 | Method of on-line thickness measurement of applied coatings                       |
|                   | 포스코                          | 한국  | 부식깊이 측정장치 및 부식깊이 측정방법                                                             |
|                   | 현대중공업                        | 한국  | 도장상태 검사장치                                                                         |
|                   | 삼성중공업                        | 한국  | 도막 성능 평가장치/도막 내구성 평가 장치                                                           |
|                   | Aisin Seiki Kabushiki Kaisha | 일본  | Device for measuring thickness of paint film in non-contacting manner             |
| 영구자석 기반 부착형 무인 로봇 | STX조선해양                      | 한국  | 영구자석을 이용한 표면 부착 이동장치                                                              |
|                   | 대우조선해양                       | 한국  | 영구자석을 이용한 무인이송장치                                                                  |
|                   | 영남대학교                        | 한국  | 벽면 이동 보행로봇의 마그네트 휠 어셈블리                                                           |
|                   | 대우조선해양                       | 한국  | 자력과 진공압력의 부착력을 이용한 벽면 이동 작업용 로봇 플랫폼                                               |

■ 열화상 또는 비전 영상을 이용한 강구조물 및 교량 관리 시스템 기술 관련 특허가 등록되었으나, 열화상/영상 이중 융합계측시스템 개발을 통한 구조물 관리 시스템 관련 특허는 없는 것으로 조사됨. 본 과제에서는 이중 계측 시스템을 통해 각 기술의 장단점을 보완하여 보다 높은 정밀도(95% 열화 분류 신뢰도, 20μm급 도막 두께 정량화/시각화)를 갖는 기술을 개발하고자 함.

■ 다수의 국내 및 해외 기관에서 도막 상태평가 기술 관련 국내외 특허를 출원하였으나, 단일 검사로 넓은 영역 검사가 가능하고 검사 결과를 시각화/정량화 할 수 있는 기술을 개발한 기관은 전무한 것으로 확인됨.

■ 최근 테라헤르츠를 이용한 비접촉식 도막 두께 측정 기술이 대두되고 있으며, 단일 지점의 다층 도막 두께 시각화/정량화가 가능하나 검사 면적이 제한적이고, 넓은 면적 계측 시 로봇 팔을 이용한 장시간 지지가 요구되며 장비 가격이 고가임. 또한 금속성 물질이 포함된 도막 두께 측정이 불가능함.

■ 영구자석 기반 무인 로봇 관련 연구는 드론 등 무인체와 함께 활발히 진행되고 있으나, 대부분 이동 장치 개발에 집중되어 있음. 이동 목적 이외에 검사 기기 탑재 등을 통한 검사용 장비 개발 연구는 초기단계임.

| 본 연구 수행기관 관련 분야 보유 특허 현황 |                                       |
|--------------------------|---------------------------------------|
| 보유 기관                    | 특허 명                                  |
| 한국과학기술원(주관)              | 강구조물의 도막 상태 검사 및 평가 방법과 이를 위한 시스템     |
| 한국과학기술원(주관)              | 도막 두께 분포 시각화 방법 및 이를 위한 열화상 장치        |
| 한국과학기술원(주관)              | 비파괴 검사를 위한 레이저 위상 잠금 열화상 장치           |
| 한국과학기술원(주관)              | 검사 장치 및 그 제어 방법                       |
| 한국과학기술원(주관)              | 반도체 칩 표면검사 장치 및 이를 이용한 반도체 칩의 표면검사 방법 |
| SQ엔지니어링(공동)              | 레이저 이미지를 이용한 균열측정 장치 및 방법             |
| SQ엔지니어링(공동)              | 초소형 드론을 통한 열화 강제시설물 점검 시스템            |

■ 주관기관은 본 제안 기술과 가장 유사한 열화상 장비를 이용한 도막 두께분포 시각화 기술 특허를 보유하고 있으며, 향후 실용화 및 사업화 시 연구성과와 관련된 분쟁을 사전에 방지할 수 있음.

■ 도막 상태평가뿐만 아니라 반도체 칩 표면검사 등 미세 균열 탐지 관련 특허를 보유하고 있어 기술 개발 시 목표 도막 열화 분류 정확도 및 도막 두께 정량화 단위 달성에 도움이 될 것으로 판단됨.

■ 관련 분야 시장 분석

- 비파괴검사 시장 분석 및 동향: Mordor Intelligence(2020) 보고 자료에 따르면 전 세계 비파괴검사 시장은 2019년 148억 달러로 연평균 성장률 6.5%로 증가하여 2027년에는 245억 달러에 이를 것으로 전망된다. 국내 비파괴검사 시장 규모는 2019년 10억 3,690만 달러 규모로 세계 비파괴검사 시장의 약 7%를 차지하고 있으며 연평균 7.50%의 성장률로 발전하고 있다. 이 같은 추세로 다가올 2027년에는 18억 4,800만 달러 규모의 시장을 형성할 전망이다. 비파괴검사 시장은 유형에 따라 비파괴검사 기술(25.8%)과 비파괴검사 서비스(74.2%)로 분류되며, 본 과제를 통해 개발된 장비는 판매와 개발 장비를 활용한 비파괴검사 서비스 모두를 목표로 하고 있다.
- 비파괴검사 주 시장 분석: 비파괴검사 시장은 최종 적용 산업 분야에 따라 다양하게 나뉘며, 본 과제를 통해 개발될 장비의 대상 산업 분야는 석유화학, 조선, 건설 분야이며 각각 비파괴검사시장의 26.0%, 13.7%, 8.3%를 차지하고 있다. 주 시장으로 정의된 석유화학업, 조선업, 건설업 비파괴검사 시장은 전체 비파괴검사 시장의 48%를 차지하며, 이를 토대로 2019년 기준 해외 49억 7,280만 달러, 국내 4억 9,728만 달러의 시장 규모를 가진 것으로 산출되었다.
- 사업화 시장 분석: 사업화시장은 주 시장 중 도막 열화 및 두께를 포함하는 도막 상태평가 관련 시장을 말한다. 2017년 MarketandMarkets 보고 자료에 따르면, 여러 가지 비파괴 검사대상 중 도막 상태평가는 약 5%를 차지하고 있다. 이를 바탕으로 석유화학업, 조선업, 건설업 비파괴검사 시장에서 도막 상태평가 관련 시장 규모는 2019년 기준 해외시장 2억 4,864만 달러, 국내 시장 2,486만 달러 규모로 산출했다. 연구개발특구진흥재단의 비파괴검사시장 시장 동향 조사에 따르면 비파괴검사 시장의 연간 성장률은 해외 6.5%, 국내 7.5%이며, 이를 바탕으로 주 시장의 도막 상태평가 시장 규모는 2027년 기준 연평균 해외 41,150만 달러, 국내 4,434만 달러 규모로 예상된다.

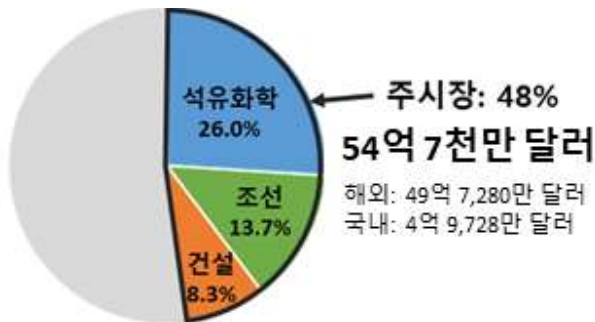


그림 2. 비파괴검사 시장 내 주 시장 규모

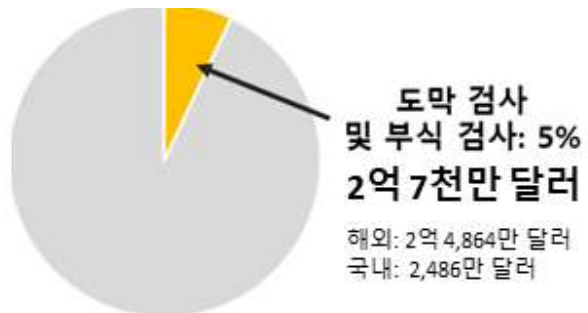


그림 3. 주 시장 내 목표 검사대상 시장 규모



그림 4. 도막 상태평가 해외 시장 규모 및 전망



그림 5. 도막 상태평가 국내 시장 규모 및 전망

- 개발 기술 관련 국내 주요 업체 및 대응 방안: Turner-Fairbank highway research center의 실시간 교량 내부부식 발생 유무 측정 시스템 등 현재 국내외로 강구조물 도막 두께 및 부식 영역 검사가 가능한 장비 개발업체는 존재하나 넓은 영역 검사에 있어 해당 기술 및 검사 시간에 한계가 존재한다. 또한, 도막 두께 및 열화 분류가 동시에 가능하고 이를 바탕으로 한 도막 상태평가 가능 기술 및 장비는 존재하지 않는다.
- 도막 상태평가 관련 표준화 및 공인인증 현황: 한국표준정보망 기반으로 도막 열화 (부식, 박리, 체킹, 초킹) 및 도막 두께 검사 관련 표준을 검색했다. “도료와 바니시”에서 도료의 밀착성 시험, 부착 박리 시험, 해수에 노출된 도막의 음극 박리 저항성 측정, 박리 및 부식 등급 평가, 표면 결함 평가, 건도 도막 두께측정 및 수용 기준 등의 세부 표준이 존재한다. 표준번호 KS M ISO 21227-3은 광 이미지 처리를 통한 흠집 주위의 박리와 부식을 평가하는 방법에 관해 규정했다. 하지만 본 제안 기술과 같이 영상/열화상 융합 기술 기반 검사 방법은 기준 대상에 포함되지 않아, 도막 상태평가와 직접적인 연관이 있는 표준화 기준은 없는 것으로 파악된다.
- 로봇 관련 표준화 및 공인인증 현황: 로봇 관련 국제 표준화 활동은 국제 표준기구 ISO TC299, IEC TC59, IEEE RAS, OMG Robotics-DTF 등에서 활발히 진행 중이며, 국내 지능형 로봇 산업기술(KS)표준은 기술표준원, 지능형 로봇표준포럼(KOROS) 등과 협력하여 표준화 작업을 진행하고 있다. 산업용 로봇 관련 KS 표준은 기호, 안전 통칙, 조작 장치에 관한 20여 가지 규격이 존재하며 로봇 분야 전체로는 43종의 표준이 존재한다.

#### ■ 관련 규정 분석

- 시설물 안전에 대한 중요도가 점차적으로 높아짐에 따라 관련 기준들이 엄격해지고 세분화되고 있다. 2018년 1월 시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침 내용에 도막 두께 및 열화 등 도막 상태평가 관련 규정 개정으로, 기준 세분화 및 엄격화되어 등 도막 상태평가의 중요성이 강화되었다.
- 강화된 지침에 따라 발청 및 도막 열화(박리, 균열, 부품, 백아화)와 도막 두께를 기준으로 강구조물 내구성능 평가가 진행되어야 한다.
- 개정된 도막 상태평가 등급산정 기준은 각 내부적 요인(발청 및 도막 열화, 도막 두께)을 a~e 단계로 등급을 산정한 후 세부 지표간 중요도에 따라 합산하는 방식으로 진행된다.
- 발청 및 도막 열화는 열화 면적과 표준사진의 비교를 통해서 각 열화별 등급을 산정하고 이를 중요도에 따라 합산하는 방식으로 진행하며, 도막 두께 등급은 접촉식 장비를 이용한 표본 검사 결과의 허용두께 불만족 비율을 산정하여 등급을 산정한다.
- 산정된 도막 열화 및 도막 두께 등급과 대기 및 환경 등 외부적 요인으로 별도 산정된 등급을 합하여 강구조물 내구성능 등급이 산정된다. 향후 부재별 가중치를 적용하여 강구조물 전체 내구성능 등급을 산정하는 것이 가능하다.

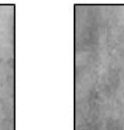
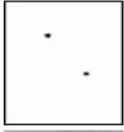
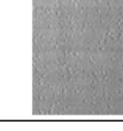
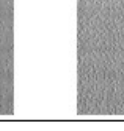
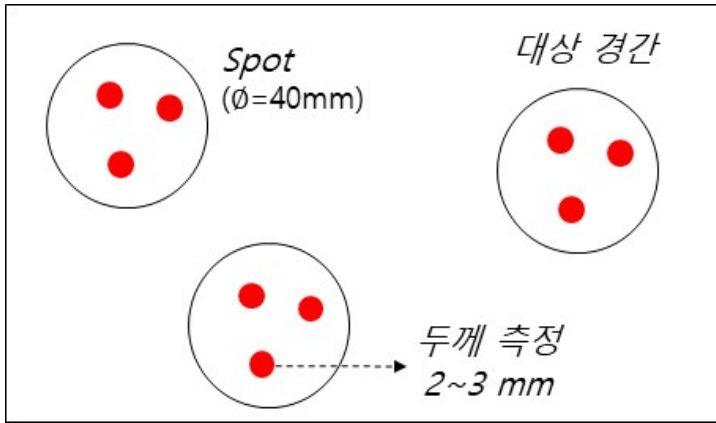
|    | a                                                                                   | b                                                                                   | c                                                                                   | d,e                                                                                 | 등급 | 열화 면적 비율                 |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----|--------------------------|
| 발청 |  |  |  |  | A  | 0 %                      |
| 박리 |  |  |  |  | B  | < 2%                     |
| 부품 |  |  |  |  | C  | <10%                     |
|    |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     | D  | > 10%<br>< 2% (단면 손실 면적) |
|    |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     | E  | > 10% (단면 손실 면적)         |

그림 6. 도막 열화 등급 산정 기준



| 등급 | 허용두께 불만족 비율 |
|----|-------------|
| a  | < 5%        |
| b  | 5% ~ 30%    |
| c  | 30% ~ 70%   |
| d  | > 70%       |
| e  | 도장 박리       |

그림 7. 도막 두께 등급 산정 기준

- 또한, 2018년부터 1,2종 시설물 외에 3종 시설물이 시설물안전법 대상 시설물로 추가되어 전체 안전점검 대상 시설물 수가 증가하여 2019년 말 기준 시설물안전법 대상 시설물은 147,651개소로 대폭 증가했다. 2018년도부터 3종 시설물에 대한 정기안전점검이 본격적으로 시행되어 추가되어 도막 상태평가뿐만 아니라 전체 시설물 안전진단 관련 수요가 급증하고 있어 개발 기술의 수요가 증가할 것으로 전망된다.

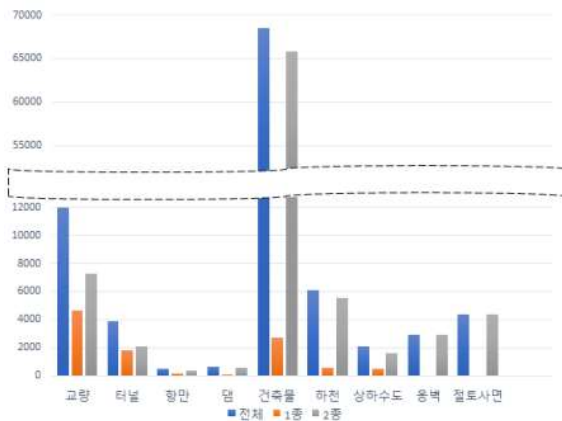


그림 8. 1, 2종 시설물 현황

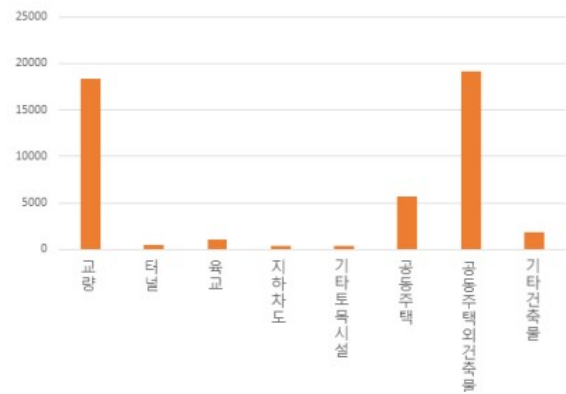


그림 9. 3종 시설물 현황

- 첨단 검사 장비가 구조물 안전진단에 활용될 수 있도록 2020년 3월, 시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법 시행령 22조에 “하도급 가능한 전문기술”에 첨단기술(점검 로봇) 항목이 추가되었다. 개발 기술뿐만 아니라 다양한 첨단기술이 구조물 안전진단에 활용 가능하게 되어 새로운 검사 기술에 대한 수요가 늘어나고 있다.

|             | 현행                                                                                                                                                                                                                           | 개정안                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 시설물 안전법 시행령 | <p>■ 시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법 시행령 [별표 10]</p> <p>하도급 가능한 전문기술(제22조 제1항 관련)</p> <p>&lt; 생 략 &gt;</p> <p>11. 강재 시료채취 및 시험</p> <p>12. 전기 및 기계설비(부속시설을 포함한다)에 대한 조사·시험(건축물은 제외한다)</p> <p>13. 토양부식환경 조사·시험</p> <p>&lt; 신 설 &gt;</p> | <p>■ 시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법 시행령 [별표 10]</p> <p>하도급 가능한 전문기술(제22조 제1항 관련)</p> <p>1. 비파괴검사기술의 진흥 및 관리에 관한 법률 제2조에 따른 비파괴검사</p> <p>&lt;중간 생략&gt;</p> <p>11. 강재 시료 채취 및 시험</p> <p>12. 전기 및 기계설비(부속시설을 포함한다)에 대한 조사·시험(건축물은 제외한다.)</p> <p>13. 토양 부식환경조사·시험</p> <p>14. 건설기술 진흥법 제14조에 따라 지정·고시된 신기술 또는 점검 로봇 등을 활용한 외관 조사 및 영상분석</p> |

그림 10. 시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법 시행령 신규대비표

■ 현황 분석 종합결론

- 도막 상태평가는 국부영역, 육안검사 위주로 진행되고 있으며, 4차 산업혁명과 더불어 데이터 기반 객관적인 상태평가 기술이 필요하다. 특히 초음파, 와전류 등 접촉식 센서를 이용한 검사 방식에서 비전 및 열화상 등 비접촉식 방식으로 신속하게 전면적 검사가 가능한 기술이 필요하다.
- 세계적으로 구조물 및 노후화 구조물이 급격히 증가하는 추세다. 미국, 일본 등 선진국 사회기반시설물은 이미 노후화 단계에 진입하고 있으며, 이를 효율적으로 관리하기 위한 구조물 유지관리 기술개발은 불가피하다. 도막 상태는 교량, 플랜트 등 사회기반 강구조물 유지관리에 필수 요소이며 최근 국내 도막 상태평가 관련 규정 개정으로 관련 기술 및 장비의 필요성이 증가할 것으로 보인다.

|                  | Positive                                                                                        | Negative                                                                               |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Internal factors | <b>Strengths S</b><br>인공지능 기반 이동식 도막 상태평가 기술로 다양한 도장 결함 및 두께를 한번의 검사로 검출하고 시각화 가능한 세계 최초/최고 기술  | <b>Weaknesses W</b><br>현재 대중적으로 사용되고 있는 와전류 및 초음파 기반 도막 두께 측정 기기 대비 개발 검사 기기의 휴대성이 떨어짐 |
| External factors | <b>Opportunities O</b><br>전 세계적 노후구조물 증가 및 시설물 수 증가 및 도막 관련 유지관리 규정 신설로 강구조물 도막 상태평가에 대한 필요성 증대 | <b>Threats T</b><br>신속한 도막 상태 평가 기술 개발이 진행되지 않아 국내외 도막 상태 평가 시장 선점 기회가 상실될 위협요인 존재     |

그림 11. 제안과제의 SWOT 분석 결과

## 2. 연구개발 목표 및 내용

### 2.1. 연구개발 목표

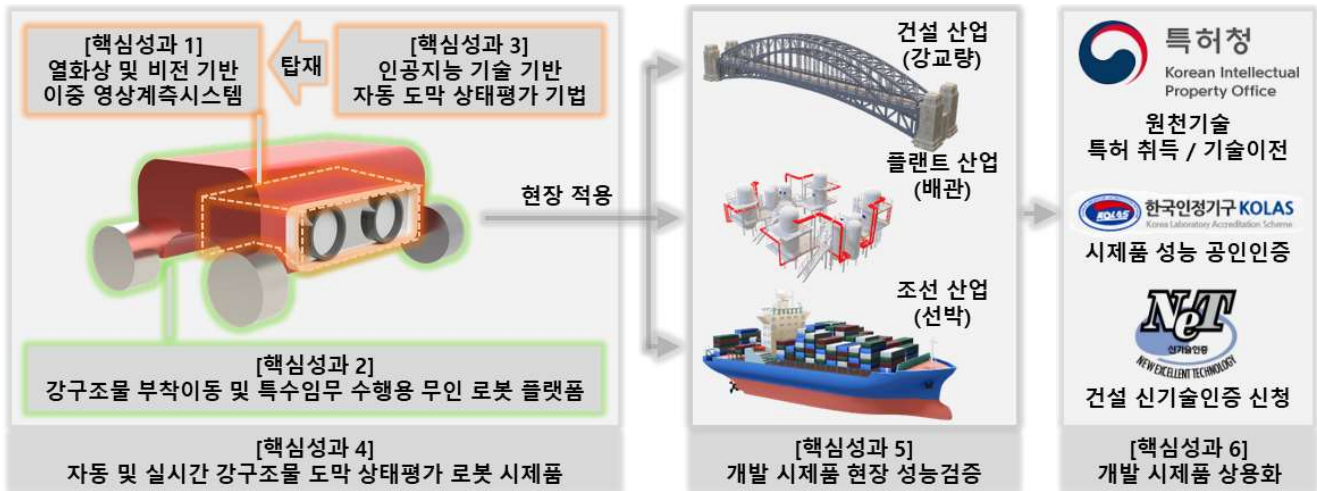


그림 12. 강구조물 도막 상태 자동 및 실시간 평가 로봇 시제품 개발 및 상용화

#### ■ 최종목표

- 무인 로봇이 강구조물 표면에 부착 이동하며 계측한 열화상 및 비전 영상을 인공지능 기반 자동 분석으로 (1) 도막 열화 (부식, 박리, 체킹, 초킹) 영역과 종류를 1 cm<sup>2</sup> 정확도 및 95% 신뢰도로 분류하고, (2) 도막 두께 분포를 20μm 정확도로 시각화하여, (3) 자동 및 실시간 강구조물 도막 상태평가가 가능한 로봇 시제품 개발 및 상용화 (TRL 8, 세계 최초/최고 기술)

#### ■ 최종성과물

- 강구조물 도막 상태 자동 및 실시간 평가 로봇 시제품 (1건) 및 소프트웨어 (1건)
- 원천기술 특허 출원/등록 (1건) 및 기술이전 (기술이전료 5,000 만원, 경상기술로 3%)
- 개발 시제품 관련 SCI/E급 논문 게재 (3건) 및 기술홍보 (5건)
- 개발 시제품의 국가 공인인증 (KOLAS 등록 1건, 건설신기술 신청 1건)
- 다양한 산업의 강구조물에 대한 성능검증 수행 (3건) 및 이를 기반으로 한 실용화 추진 (TRL 8)

#### ■ 최종성과물 설정 근거

- 주관기관 (한국과학기술원)은 국토교통과학기술진흥원의 연구과제로부터 도막 두께 분포 시각화를 수행하는 원천기술을 개발하였고, 자체적인 추가연구를 통해 도막 열화로 분류되는 박리, 체킹, 초킹 그리고 부식을 자동으로 분류하는 기술을 개발하였다. 해당 기술은 다수의 국내 교량에 적용하여 그 성능이 검증되었고, 최근 개정된 ‘시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침’을 근거로 추후 상용화 및 시장진입 가능성이 매우 클 것으로 사료 된다.
- 공동연구기관 (SQ엔지니어링)은 시설물 안전진단 관련 20건 이상의 특허와 건설신기술 1건을 보유하고 있으며, 40% 이상 시장점유율과 매년 500건 이상 안전진단 실적 자랑하는 업계 1위 기업이다. 이를 토대로 공동연구기관은 자석 바퀴형 무인 이동 로봇 플랫폼을 강구조물 안전진단 목적에 맞게 최적설계하여 자동 및 실시간 도막 상태평가 진단 효율을 극대화할 수 있을 것으로 예상된다.
- 주관기관은 제안기술에 대하여 1차년도에 지식재산권 (국내 특허)를 획득하고, 2차년도에 공동연구기관인 SQ엔지니어링에 기술이전 (정액기술료 5,000만원 + 3% 경상기술료)을 추진할 계획이다.
- 주관기관은 제안기술에 대한 예상 수요기관인 현대중공업, 수자원공사 및 SQ엔지니어링과 다수의 연구과제 진행을 통해 현업에서 발생하는 다양한 난제 극복이 가능한 장비개발 및 납품을 진행 한 바 있다. 동시에, 예상 수요기관의 지속적인 피드백을 통한 맞춤형 기술개발로 추후 상용화 제품의 납품 가능성이 매우 클 것으로 판단된다.

## 2.2. 연구개발 핵심성과물 및 연차별 연구내용

### ■ 연차별 핵심성과 및 연차별 달성 계획

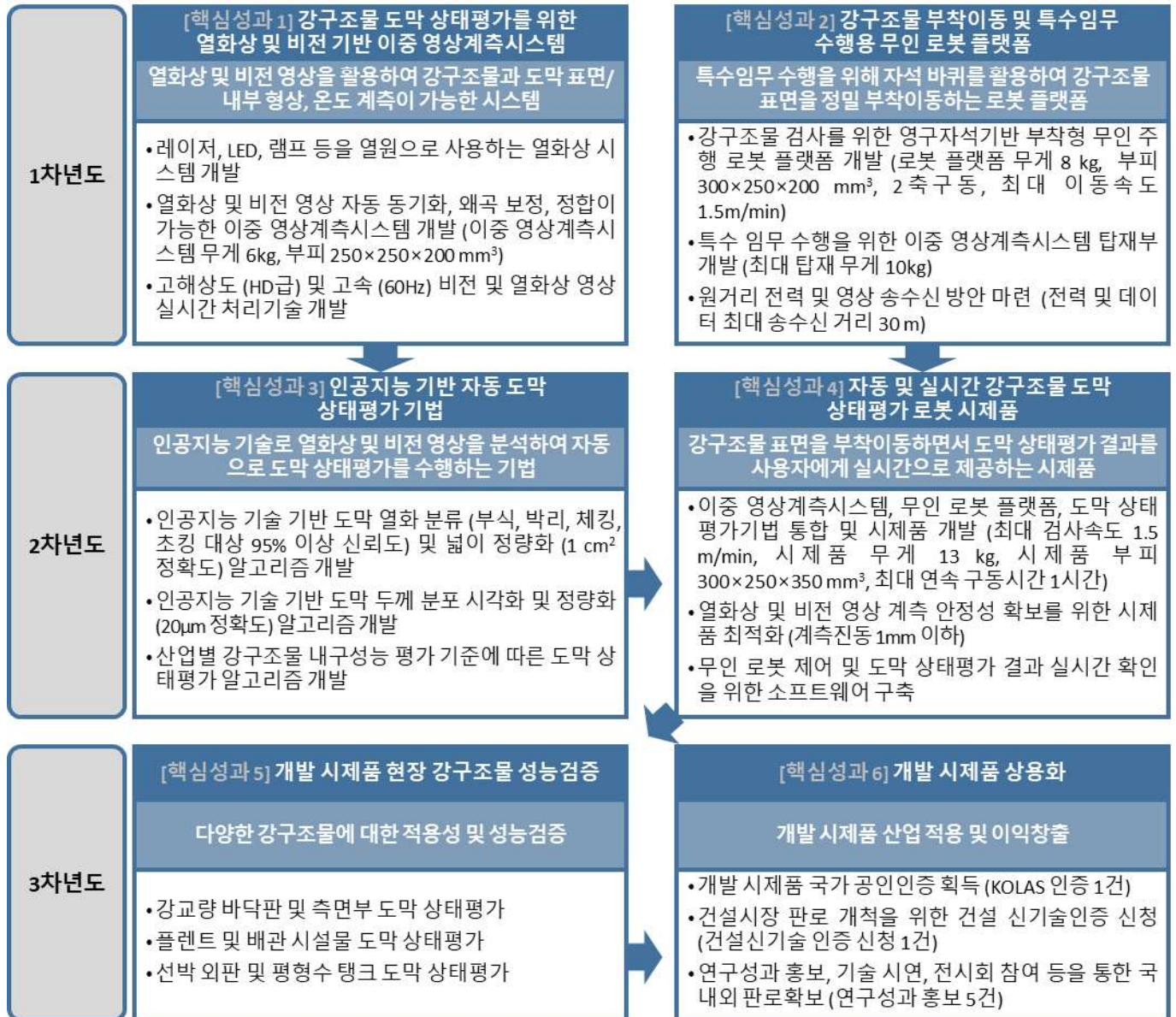


그림 13. 연차별 연구목표 및 핵심성과

### ■ 기술개발 성숙도

| 구분      |       | (1)차년도                              | (2)차년도                              | (3)차년도                              | 단계별 설명 |                  |
|---------|-------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------|------------------|
| 기초연구 단계 | TRL 1 | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | TRL 1  | 이론적 연구단계         |
|         | TRL 2 | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | TRL 2  | 기술적 개념정립 단계      |
| 실험 단계   | TRL 3 | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | TRL 3  | 실험적 증명 단계        |
|         | TRL 4 | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | TRL 4  | 실험실 성능평가 단계      |
| 시작품 단계  | TRL 5 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | TRL 5  | 유사환경 시험 단계       |
|         | TRL 6 | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | TRL 6  | 유사환경 기술시험 단계     |
| 실용화 단계  | TRL 7 | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | TRL 7  | 실제환경 시작품 데모 단계   |
|         | TRL 8 | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | TRL 8  | 시제품 설치 및 성능시험 단계 |
| 사업화 단계  | TRL 9 | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | TRL 9  | 현장적용/사업화 단계      |

## 1차 연도

### ■ 핵심성과 1: 강구조물 도막 상태평가를 위한 열화상/비전 기반 이중 영상계측시스템 개발

- 레이저, LED, 램프 등을 열원으로 사용하는 열화상 시스템 개발: 열화상 기법은 강구조물 표면에 열에너지 주입 후 이에 따른 강구조물 표면 온도변화를 계측하여 비파괴검사를 수행한다. 강구조물 표면 열에너지 주입을 위해 다양한 열원(레이저, LED, 램프)이 사용될 수 있으며, 검사 대상 강구조물, 검사 영역, 검사 수행 시간, 장비 이격거리 등 검사 조건에 따라 최적 열원을 선택하여 검사 효율을 극대화할 수 있다. 레이저와 LED의 경우, 제어 신호에 따른 광 출력이 민감하고 신속하게 반응하기 때문에 정밀 검사 수행에 적합하게 활용될 수 있으며, 이 중 레이저는 LED 대비 열원이 조사되는 영역이 국부적인 반면 1 m 급 원거리 검사에 활용될 수 있다. 반면, 램프는 레이저와 LED 대비 제어 신호에 따른 반응 속도는 느지만 kW 수준의 고출력 열에너지를 방출하여 내부 결함 및 물성 분석에 효과적으로 활용될 수 있다. 본 과제에서는 산업에 따라 활용되는 도막 시공 특성을 파악하여 산업별 도막 상태평가에 최적화된 열원 선정 및 열화상 시스템을 개발할 것이다.
- 열화상 및 비전 영상 자동 동기화, 왜곡 보정, 정합이 가능한 이중 영상계측시스템 개발 (이중 영상계측시스템 무게 6kg, 부피 250×250×200 mm<sup>3</sup>): 한국과학기술원에서 수행한 선행연구과제인 “무인검사장비 기반 교량 강구조물 신속진단 및 평가기술”에서 개발된 하이브리드 영상시스템을 개량하여 이중 영상계측시스템을 개발할 계획이다. 기존 하이브리드 영상시스템은 드론에 탑재되는 것을 목표로 하여 검사 수행에 수반된 공간제약은 극복할 수 있지만, 운용 진동과 외부 바람에 의해 정밀 장비 위치 조정이 불가능하였다. 따라서 데이터 취득 이후 별도의 계측 영상의 위치 오차 보정 작업이 필요하여 자동/실시간 검사 수행이 어려운 한계점이 있었다. 개발 예정인 이중 영상계측시스템은 자석 바퀴형 시스템을 활용하여 고정밀 장비 위치 조정 및 진동 제어가 가능하여, 계측 열화상 및 비전 영상 간의 동기화, 왜곡 보정, 정합을 실시간 및 자동으로 수행할 수 있다. 특히, 개발 이중영상계측시스템은 광영역 영상계측과 동시에 국부영역 고정밀 두께 데이터도 함께 계측하여, 검사 수행에 있어 별도의 장비 Calibration 작업이 필요 없다는 장점이 있다. 무인 로봇 플랫폼에 장착될 이중 영상계측시스템은 무게 6 kg, 부피 250×250×200 mm<sup>3</sup> 이내로 예상된다.
- 고해상도 및 고속 열화상 및 비전 영상 실시간 처리기술 개발: 본 연구진은 고해상도/고속 열화상 및 비전 영상을 동시에 계측함과 실시간으로 처리할 수 있는 기술을 개발할 계획이다. 영상 해상도와 계측 속도가 높을수록 강구조물 도막 상태평가 정밀도 및 신뢰도가 향상되기 때문에 고해상도 (열화상 영상: SD급, 비전 영상: HD급) 및 고속 (60 Hz) 이미지 계측은 필수적이다. 이를 위해 10Gbps로 데이터를 전송할 수 있는 GigE Vision, Thunderbolt 인터페이스를 적용한 영상 계측시스템을 활용하여 고해상도/고속 영상의 실시간 전송을 실현할 수 있고, 전송된 고해상도/고속 영상은 (1) NVIDIA사의 GPU 시스템으로 구성된 하드웨어와 CUDA 병렬처리 라이브러리, (2) OpenCV 영상처리 라이브러리, (3) MicroSoft사의 Visual Studio 개발툴 등 다양한 고속 프로세싱 기법을 활용하여 실시간 분석이 가능하다.



그림 14. 열화상 및 비전 기반 이중 영상계측시스템 개요

■ **핵심성과 2: 강구조물 부착이동 및 특수임무 수행용 무인 로봇 플랫폼 개발**

- 강구조물 검사를 위한 영구자석기반 부착형 무인 주행 로봇 플랫폼 개발 (로봇 플랫폼 무게 8 kg, 부피 300×250×200 mm<sup>3</sup>이내, 2축 구동, 최대 이동 속도 1.5m/min): 이중 영상 자동계측 수행을 위해 강구조물 부착 주행이 가능한 로봇 플랫폼을 개발할 예정이다. 개발 예정 로봇 플랫폼은 주행 기능 구현을 위한 바퀴가 영구자석으로 구성되어 강구조물 표면에 부착된 상태로 이동할 수 있다. 특히, 영구자석으로 구성된 바퀴는 우레탄 소재로 마감처리하여 이동시 접촉으로 인한 구조물 표면 손상을 사전에 방지 할 계획이다. 대형 강구조물 검사 수행에 이동형 장비를 구현할 경우 강구조물 상부뿐만 아닌 부식 취약부위가 밀집한 하부와 측면부 검사 수행이 가능하다. 이처럼 접근성 제약된 부위 안전진단을 효율적으로 수행함으로써 강구조물 안전진단 시장 파급효과가 매우 클 것으로 예상된다. 개발 예정 로봇 플랫폼은 부착식으로 이동이 구현되기 때문에 1 mm 이하 정밀 위치 제어와 1.5m/min 수준 전/후/좌/우 방향 주행이 가능하며, 무인 주행 로봇 플랫폼의 중량은 8 kg, 부피는 300×250×200 mm<sup>3</sup> 수준으로 개발될 예정이다.
- 특수 임무 수행을 위한 이중 영상계측시스템 탑재부 개발 (최대 탑재 무게 10kg): 개발 로봇 플랫폼은 강구조물 부착 주행과 동시에 도막 상태평가를 위한 열화상 및 비전 영상계측 임무 수행이 필요하다. 이에 무인 로봇 플랫폼에 이중 영상계측시스템을 포함한 다양한 계측 장비 탑재를 위한 탑재부가 개발될 예정이다. 특히 탑재부는 이중 영상계측시스템과 계측 구조물 사이의 이격거리를 정밀하게 제어/유지할 수 있도록 설계되어 다양한 표면 형상을 가진 구조물에서도 정확하고 정밀한 영상 계측 수행이 가능하도록 할 것이다. 탑재부에 탑재 가능한 최대 무게는 10kg 수준으로 개발될 계획이다.
- 원거리 전력 및 영상 송수신 방안 마련 (전력 및 데이터 최대 송수신 거리 30 m): 개발 로봇 플랫폼은 별도로 구비된 휴대용 컨트롤러로부터 유선으로 전력 및 영상을 송수신하며 구동된다. 하지만, 송수신 거리가 멀어질수록 영상 잡음과 전력 손실이 발생하여 도막 상태평가 신뢰도와 장비 운용 효율이 떨어질 수 있다. 또한, 열화상 및 비전 이미지 데이터 전송을 위한 통신선과 로봇 구동을 위한 전력선을 동시에 한 다발로 묶는 경우 영상 잡음 및 왜곡이 예상된다. 이를 방지하기 위해 광섬유 통신을 사용할 경우 전력선, 근처 고압선 혹은 원거리 통신에 의한 영상 잡음 및 왜곡을 최소화할 수 있을 것으로 예상된다. 본 과제에서 목표로 하는 최대 전력 및 데이터 송수신 거리는 30 m (무인 로봇 플랫폼은 컨트롤러로부터 좌/우 30 m를 이동하여 총 60 m 이동 가능)로 정의한다.

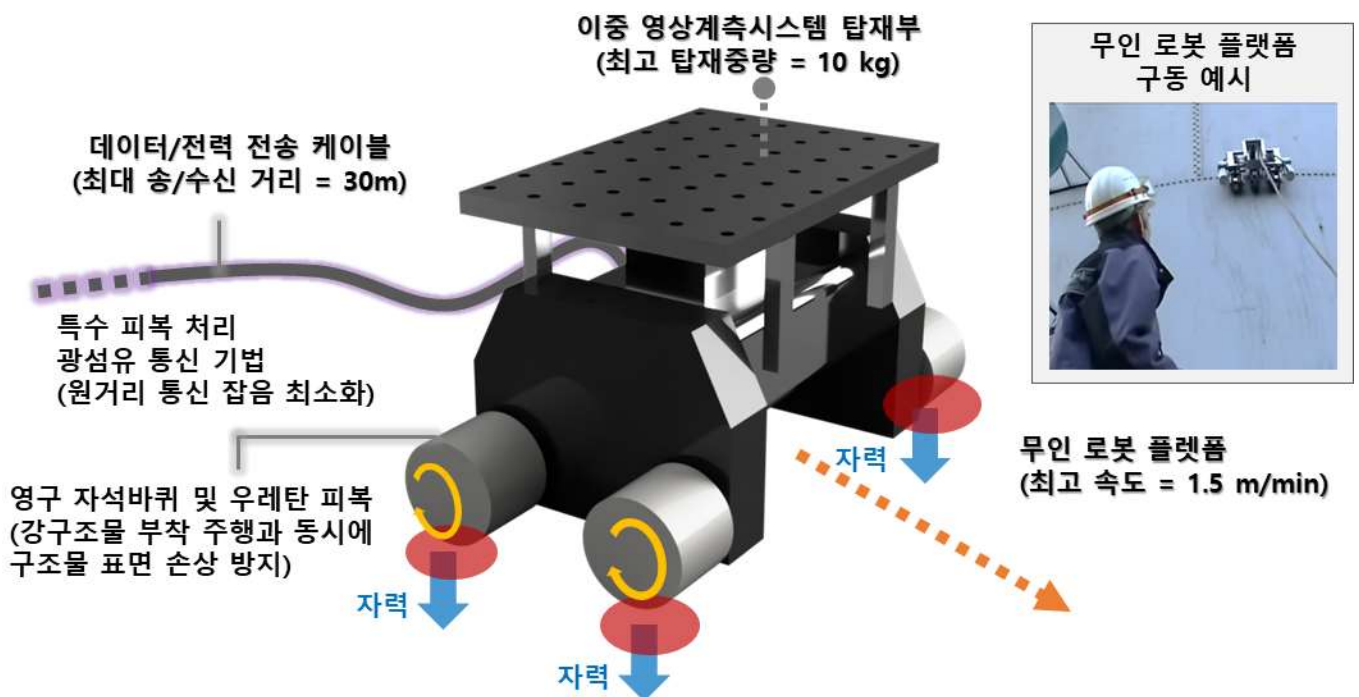


그림 15. 무인 로봇 플랫폼 구성 및 개요

## 2차 연도

### ■ 핵심성과 3: 인공지능 기반 도막 상태평가 기법 개발

- 인공지능 기반 도막 열화 분류 (부식, 박리, 체킹, 초킹 대상 95% 이상 신뢰도) 및 넓이 정량화 (1 cm<sup>2</sup> 정확도) 알고리즘 개발: 1차연도에 개발된 열화상 및 비전 기반 이중 영상계측시스템으로 계측된 데이터에 기계학습 및 딥러닝 기술을 적용하여 도장 열화 형태를 부식, 박리, 체킹, 초킹 등으로 95% 이상 신뢰도로 분류하고 열화 면적을 1 cm<sup>2</sup> 정확도로 정량화하는 것을 목표로 한다. 기계학습을 이용한 열화 분류 기술 개발은 학습에 사용되는 데이터 축적량이 많아질수록 진단 성능이 향상된다. 따라서 본 연구진은 안전진단 업체인 공동연구기관이 보유한 다양한 산업군의 강구조물에서 획득된 열화상 및 비전 이미지를 다량 확보하여 열화 분류 알고리즘을 개발할 예정이다. 더불어, 열화 분류 검사 수행을 통해 누적된 데이터는 열화 분류 알고리즘의 지속적인 개선에 활용되어 시간이 지남에 따라 열화 분류 알고리즘 신뢰도는 더욱 높아질 것으로 기대한다. 최종적으로 도막 열화 검사 결과는 1 cm<sup>2</sup> 공간분해능으로 시각적으로 표출될 예정이다.
- 인공지능 기반 도막 두께분포 시각화 및 정량화 (20μm 정확도) 알고리즘 개발: 열화상은 레이저나 할로겐 램프로 도막 표면에 열에너지를 가진하고 이에 따른 도막 표면 온도변화 경향을 분석하여 도막 두께 변화를 정성적으로 시각화할 수 있다. 추가적으로 도막 두께를 정량화하기 위해서는 도막 색상, 표면 거칠기, 두께 등을 고려한 추가 보정 작업이 필요하다. 따라서 실제 현장에서 사용되는 다양한 도막 두께를 실시간 및 자동으로 정량화하기에는 많은 제약이 있다. 이러한 한계점을 극복하기 위해 본 연구진은 열화상/비전 영상 계측과 동시에 일부 지점에 국한하여 고정밀 접촉식 도막 두께 계측을 수행하여 도막 표면 색상 및 거칠기 변화를 고려한 실시간 자동 도막 두께 정량화 기술을 개발할 계획이다. 더불어 계측된 열화상 영상과 접촉식 센서로 계측된 도막 두께 상관관계를 인공지능 기술을 활용하여 분석하여 도막 두께 정량화 정확도를 기존 40 μm 수준에서 20 μm 수준으로 향상시킬 계획이다. 최종적으로 강구조물 도막 두께 분포를 1 cm<sup>2</sup> 공간분해능으로 시각화할 예정이다.
- 산업별 강구조물 내구성능 평가 기준에 따른 도막 상태평가 알고리즘 개발: 교량, 플랜트 등 강구조물은 도막 두께, 열화 종류(부식, 박리, 체킹, 초킹)별 넓이 정보와 구조형식, 건설 지형조건 등을 고려하여 내구성능 등급(A~E등급)이 산정된다. 내구성능 등급은 검사대상 강구조물 유지관리 매뉴얼에 정의된 산정식을 통해 도출되는데, 본 연구에서는 해당 산정식을 이중영상계측 시스템에 내장하여 열화상 및 비전 영상계측 직후 자동 및 실시간으로 내구성능 등급 산정이 가능하도록 할 계획이다. 이를 위해, 열화상 및 비전 이미지에서 추출된 도막 두께와 열화 종류별 넓이 정보를 강구조물 내구성 등급 산정식에 자동으로 대입하는 프로토콜을 구축하고, 추후 강구조물 내구성 등급산정에 필요할 수 있는 기상 정보, 검사 수행 위치 정보 등을 자동으로 수집하도록 하여 안전진단 수행자가 검사 결과를 일일이 수기로 기재해야 하는 번거로움을 최소화하고자 한다. 추가로, 구조물 관리자가 검사 영역에 대한 열화 위치 및 크기와 도막 두께분포를 시각적으로 확인할 수 있도록 하여 보다 직관적인 구조물 상태 확인이 가능하도록 할 계획이다.

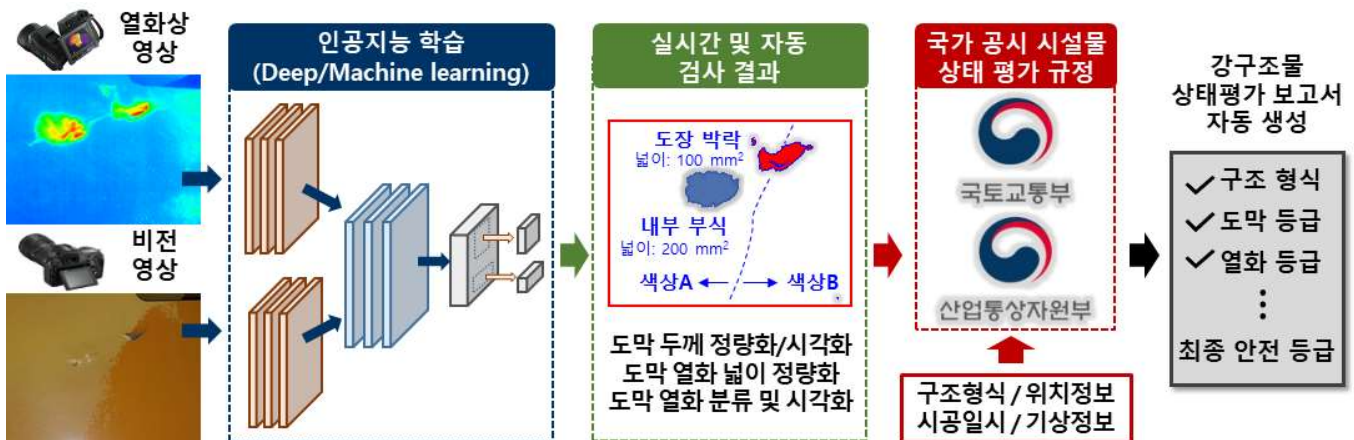


그림 16. 도막 열화 및 두께 검사 정보를 활용한 강구조물 도막 상태 자동 평가

▪ **핵심성과 4: 자동 및 실시간 강구조물 도막 상태평가 로봇 시제품 개발**

- 이중 영상계측시스템, 무인 로봇 플랫폼, 도막 상태 평가 기법 통합 및 시제품 개발 (최대 검사속도 1.5 m/min, 시제품 무게 13 kg, 시제품 부피 300×250×350 mm<sup>3</sup>, 최대 연속 구동시간 1시간) : 1차연도에 개발된 이중 영상계측시스템과 무인 로봇 플랫폼을 통합하여 자동 및 실시간 강구조물 도막 상태평가 로봇 시제품을 개발하고, 2차연도에 개발된 도막 상태평가 알고리즘을 로봇 시제품에 적용해 강구조물 부착 주행과 동시에 대형 강구조물 도막 상태평가 결과를 실시간으로 확인할 수 있도록 할 계획이다. 이 과정에서, 이중 영상계측시스템과 무인 로봇 플랫폼의 구동 간 작동 프로토콜 및 통신 규약 설정이 선행되어 자동 운용 중 제어 오류가 발생 되지 않도록 구축되어야 한다. 개발 시제품은 13 kg 무게, 300×250×350 mm<sup>3</sup> 부피 구현을 목표로 한다. 개발 시제품은 실내외 실험실 수준 도막 열화 및 두께 시편 및 본 연구진이 보유하고 있는 야외 테스트베드에서 성능검증 시험을 진행할 예정이다.
- 열화상 및 비전 영상 계측 안정성 확보를 위한 시제품 최적화 (계측 진동 1mm 이하): 무인 로봇 플랫폼이 강구조물 표면을 부착이동 할 경우, 강구조물 표면 상태가 고르지 못하면 주행에 따른 진동이 계측된 열화상 및 비전 영상에 반영될 수 있다. 따라서 이중 영상계측시스템 탑재부에 별도 진동 감쇠 장치를 설치하여 강구조물 표면 조건 및 무인 로봇 작동에 따른 영상 품질 저하를 최소화하고 계측 영상의 정밀도/정확도를 확보하고자 한다. 하지만, 이중 영상계측시스템 탑재부에 진동 감소 장치가 과도하게 설치된다면 계측 위치 제어 반응 속도가 느려져 검사 신뢰도가 낮아지거나, 무인 로봇 플랫폼의 이동 패턴이 제약될 수 있어 장비 활용도가 떨어질 수 있다. 따라서 시제품 성능 향상을 위한 시제품 설계 최적화 수행이 필요하다. 본 과제에서는 영상에서 확인되는 계측 진동 수준을 1 mm 이하로 제어하는 것을 목표로 한다.
- 장비 제어 및 도막 상태평가 결과 실시간 확인을 위한 휴대용 컨트롤러 제작: 무인 로봇과 개발된 이중 영상계측시스템을 제어함과 동시에 이를 통해 획득된 도막 열화 및 두께 정보를 자동 및 실시간으로 사용자에게 제공하는 휴대용 컨트롤러를 제작하고자 한다. 더불어, 강구조물에 발생 된 도막 열화 영역과 도막 두께 분포를 시각적으로 표출하여 안전진단 작업자가 직관적으로 도막 상태를 확인할 수 있도록 컨트롤러를 구성하여 시제품 사용성을 극대화할 예정이다.

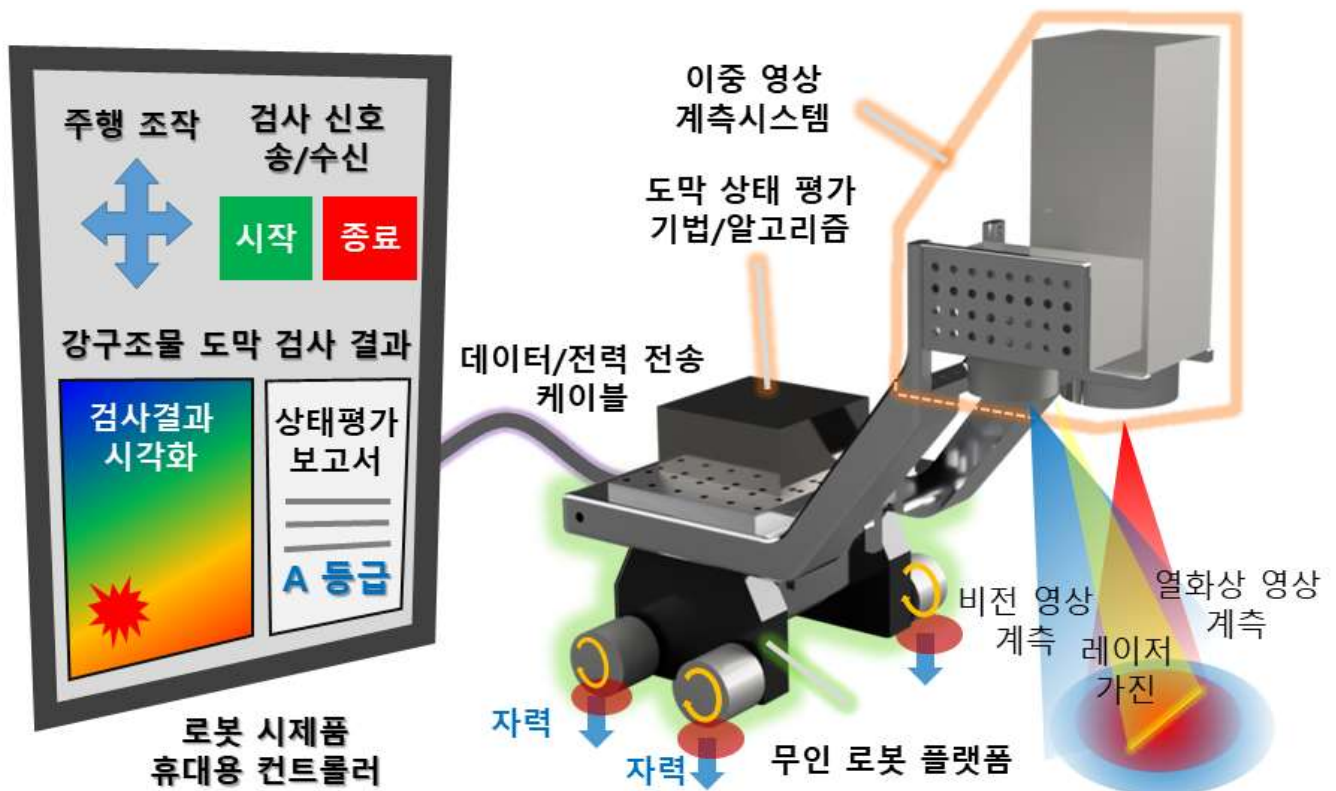


그림 17. 강구조물 도막 상태 자동 및 실시간 평가 로봇 시제품

### 3차 연도

#### ■ 핵심성과 5: 개발 시제품 현장 성능검증

- 강교량 바닥판 및 측면부 도막 상태평가: 강교량 안전진단 수행 시 접근성의 제약으로 거더 하부 및 측면부 검사가 원활하게 이루어지지 않고 있는 실정이다. 특히, 강교량의 도막관리 취약 부위는 상대적으로 접근이 어려운 강교량 거더 하부와 측면부에 밀집되어 있어 강교량 도막 검사 효율을 개선할 수 있는 기술이 필요하다. 본 과제를 통해 개발된 시제품을 실제 강교량에 적용할 경우, 기존 검사 인력 접근이 어려웠던 강교량 거더 하부 및 측면부 검사 수행이 원활이 이루어질 수 있다. 따라서 개발 시제품을 활용한 도막 상태평가를 실제 강교량에 시연하고, 강교량 내구성능 평가를 수행하여 기존 평가 방법 대비 제안 시제품의 검사 신뢰도와 효율 개선 정도를 정량적으로 평가할 예정이다. 개발 시제품의 시연은 국가 사회기반시설물 안전관리 주체인 한국시설안전공단과의 협업으로 수행될 예정이며 이로 인한 시제품 홍보 및 현장적용 가능성을 높일 수 있을 것으로 기대한다.
- 플랜트 및 배관 시설물 도막 상태평가: 플랜트 및 배관 시설물은 규모가 방대하여 기존 육안검사 및 접촉식 검사방법으로는 전수검사 수행이 어려운 실정이다. 특히 배관 시설물은 배관을 통해 흐르는 유체 온도에 의해 수축/팽창하는데, 이때 배관을 구성하는 강재 및 도막 간의 열 팽창율이 달라 도막 열화를 가속할 수 있다. 제안 시제품을 플랜트 및 배관 시설물 검사에 활용하면 무인로봇 플랫폼이 플랜트 및 배관 시설물 부착 이동과 동시에 이동영역에 대한 전수적인 도막 상태평가 결과를 자동 및 실시간으로 시각화할 수 있어 플랜트 및 배관 시설물 관리 효율을 극대화 시킬 것으로 예상된다. 개발 시제품의 시연은 국내 최대 플랜트 및 배관 시설물 보유기관인 한국지역난방공사와의 협업으로 수행될 예정이며 이로 인한 시제품 홍보 및 현장적용 가능성을 높일 수 있을 것으로 기대한다.
- 선박 외판 및 평형수 탱크 도막 상태평가: 강재로 구성되어있는 선박 외판 및 평형수 탱크는 실제 선박운행 시 부식을 유발하는 바닷물과 접촉하고 있어 강구조물 부식 관리가 특히 중요한 부재이다. 선박을 외부 바닷물 및 염해 환경으로부터 보호하는 것은 도막 층으로 도막 상태평가 및 시공 품질 관리는 선박 건조에 필수 항목이다. 특히, 평형수 탱크는 협소하고 밀폐된 공간으로 구성되어 열악한 도막 시공 환경을 가지며 시방서 기준을 만족하는 도막 시공이 어렵다. 하지만 현존 도막 두께 기술은 국부 지점의 도막 두께만 계측할 수 있어 표본 검사 수행에 의한 검사 신뢰도가 매우 낮은 단점이 있다. 따라서 선박 품질 확보를 위해 도막 시공이 올바르게 수행되었는지에 대한 관리하는 기술 개발이 시급한 실정이다. 개발 시제품을 선박 외판 및 평형수 탱크 도막 상태평가에 활용할 경우, 대영역 강구조물에 대한 전수검사 수행으로 신뢰도 있는 도막 상태평가 결과를 제공할 수 있어 그 효용성이 부각 될 것을 기대하고 있다. 개발 시제품의 시연은 세계 최대/최고 선박 시공 기업인 현대중공업과의 협업으로 수행될 예정이다. 특히, 본 연구진은 현재 현대중공업과의 지속적인 산학협력 연구를 진행 중이므로 추후 개발 시제품의 현장적용 및 최적화를 통해 시제품 판매 및 안전진단 용역 수행 가능성이 클 것으로 판단한다.



강교량 바닥판 및 측면부



플랜트 배관



선박 외판 및 평형수 탱크

그림 18. 개발 시제품 현장 적용 예시

■ **핵심성과 6: 개발 시제품 상용화**

- 건설시장 판로 개척을 위한 건설 신기술인증 신청 (건설신기술 인증 신청 1건): 본 과제 수행 중 주관기관은 개발 시제품의 핵심 원천기술과 관련한 특허를 취득할 계획이며, 이를 공동연구기관에 기술이전 (기술이전료 5,000만 원, 경상기술료 3%) 할 계획이다. 공동연구기관은 다수 시설물 안전진단 과업 수행을 통한 노하우와 기술이전을 통한 기술력 확보로 보다 산업 적용이 수월한 시제품을 개발할 계획이다. 이후 개발된 시제품은 최소 2~3개소 현장적용 실적을 토대로 성능 및 품질 관련 공인인증을 획득할 계획이다. 이를 토대로 개발 시제품에 대한 효율성 및 경제성 분석을 통해 산업 파급효과 정도를 파악하고 건설 신기술인증 신청을 진행할 계획이다. 건설 신기술인증을 확보할 경우, 추후 개발 시제품 판매 및 개발 시제품을 활용한 안전진단 용역 수주 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 기대한다.
- 개발 시제품 국가 공인인증 획득 (KOLAS 인증 1건): 무인 로봇 시제품이 본 과제에서 목표로 하는 도막 열화 및 두께 검사 성능목표를 만족하는지 공인인증기관을 통해 검증할 예정이다. 예상되는 인증 항목은 (1) 도막 두께 추정 정확도, (2) 도막 열화 넓이 추정 및 분류 정확도, (3) 강구조물 내구성 평가 신뢰도, (4) 특수임무 수행용 무인 로봇 플랫폼 운행 안정성이며, 개발 시제품의 현장성능 검증 및 예상 수요업체의 요구사항에 따라 항목을 추가/수정할 계획이다. 개발 시제품의 성능검증을 공인인증 기관의 참관을 통해 수행할 경우 더욱 신뢰도 있는 검증 결과를 기술 수요자에게 제공할 수 있다. 이에, 본 연구진은 KOLAS 인증기관을 통해 개발 시제품의 품질평가를 시행할 계획이며 개발 시스템의 공인 시험성적서를 확보, 향후 시장진입을 위한 기틀을 마련할 계획이다.
- 연구성과 홍보, 기술 시연, 전시회 참여 등을 통한 국내외 판로확보 (연구성과 홍보 5건): 현장시험을 통한 기존 도막 검사 장비와의 비교분석 결과, 공인인증서, 현장적용사례를 바탕으로 홍보자료를 제작하고, 대한토목학회, 비파괴검사학회, 한국구조물진단유지관리공학회, 소음진동공학회 등 주요 관련 학회에 홍보부스를 설치해 산학계에 기술 우수성을 적극적으로 홍보할 예정이다. 또한, 한국시설안전공단, 한국수자원공사, SK석유화학 등 국내 대형 강구조물 관리 주체, 현대중공업과 같은 대형 강구조물 시공 기업, KOSECO과 같은 비파괴검사장비 판매 기관에 연구성과 우수성을 홍보하고 기술 시연을 통해 향후 현장적용 가능성을 높이는 등 개발 로봇 시제품의 다양한 홍보를 통해 국내외 판로를 확보할 계획이다.



그림 19. 개발 시제품의 상용화 추진 개요

### 3. 연구개발 결과

#### 3.1. 최종 연구개발 결과

##### ■ 강구조물 도막 상태평가 시제품



그림 20. 강구조물 도막 상태평가 시제품 개요

##### ■ 강구조물 도막 상태평가 시제품 주요 정량적 성능

| 항목           | 개발 성능                  | 항목                           | 개발 성능                     |
|--------------|------------------------|------------------------------|---------------------------|
| 열화분류 신뢰도     | 95 % 이상                | 영상 계측 소요 시간                  | 30 sec                    |
| 면적 정량화 정확도   | 1.1338 cm <sup>2</sup> | 검사 속도 (cm <sup>2</sup> /sec) | 31.2 cm <sup>2</sup> /sec |
| 도막 두께 검사 해상도 | 17.2575 μm             | 시스템 구동시간                     | 유선 전력 공급                  |

##### ■ 강구조물 도막 상태평가 시제품 주요 성과

- 강구조물 도막 상태 자동 및 실시간 평가 로봇 시제품 (1건)
- 강구조물 도막 두께 및 열화 검사 소프트웨어 (2건)
- 원천기술 국내 특허 등록 (1건), 국내 출원 (1건), 해외 출원 (2건)
- 원천기술 기술이전 2건 (기술이전료 15,000만 원, 경상기술료 3%, 발생 기술료 2,494,181 원)
- 강구조물 도막 상태평가 기술 관련 SCI/E급 논문 게재 (3건, 1건 게재, 2건 제출완료)
- 원천기술 홍보 및 학술발표 참가 (8건, 홍보활동 2건, 학술발표 6건)
- 개발 시제품 국가 공인인증 (KOLAS 등록 1건, 건설신기술 신청 1건: 2차 심사 통과)
- 다양한 산업의 강구조물에 대한 성능검증 수행 (4건)

### 3.2. 연도별 개발 결과

#### ■ 1차연도 연구 결과 요약

| 세부 과제명                                                                  | 세부 연구 목표                                      | 연구개발 수행 내용                                                                                                                                                                                  | 연구 결과                                                                                                                                                                                                                                           |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [핵심성과 1]<br>인공지능 기반<br>강구조물 도막 상태<br>실시간 평가를 위한<br>열화상/비전 검사<br>알고리즘 개발 | 열화상 및 비전<br>기반 이중<br>영상계측시스템<br>개발            | <ul style="list-style-type: none"> <li>레이저, LED, 램프 등을 열원으로 사용하는 열화상 시스템 개발</li> <li>열화상 및 비전 영상 자동 동기화, 왜곡 보정, 정합이 가능한 이중 영상계측시스템 개발</li> <li>고해상도 및 고속 열화상 및 비전 영상 실시간 처리기술 개발</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>연속 레이저를 열원으로 사용하는 열화상 시스템 개발</li> <li>Checkerboard를 이용한 열화상 및 비전 영상 왜곡 보정 및 정합 알고리즘 개발</li> <li>고해상도 및 60Hz 이상 고속 촬영이 가능한 열화상 카메라 및 비전 카메라 선정 완료</li> <li>전처리 영상에 사용 가능한 왜곡 보정, 영상 정합 알고리즘 개발</li> </ul> |
| [핵심성과 2]<br>강구조물 도막 상태<br>실시간 평가를 위한<br>이동 로봇 및 현장<br>적용 기술 개발          | 강구조물<br>부착이동 및<br>특수임무 수행용<br>무인 로봇<br>플랫폼 개발 | <ul style="list-style-type: none"> <li>강구조물 검사를 위한 영구자석 기반 부착형 무인 주행 로봇 플랫폼 개발</li> <li>특수 임무 수행을 위한 이중 영상계측시스템 탑재부 개발</li> <li>원거리 전력 및 영상 송수신 방안 마련</li> </ul>                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>전후좌우 이동 가능한 2축 이동 가능한 영구자석 기반 주행 로봇 제작 완료</li> <li>최대 1.5m/min 등속 이동 가능</li> <li>이중 영상계측시스템 탑재를 위해 상단부를 optical table 형태로 제작</li> <li>원거리용 (30 m) 케이블을 이용하여 이동 로봇 원격 이동 제어 가능</li> </ul>                 |

#### ■ 2차연도 연구 결과 요약

| 세부 과제명                                                                  | 세부 연구 목표                                 | 연구개발 수행 내용                                                                                                                                                                                 | 연구 결과                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [핵심성과 3]<br>인공지능 기반<br>강구조물 도막 상태<br>실시간 평가를 위한<br>열화상/비전 검사<br>알고리즘 개발 | 인공지능 기반<br>자동 도막<br>상태평가 기법<br>개발        | <ul style="list-style-type: none"> <li>인공지능 기반 도막 열화 분류 및 넓이 정량화 알고리즘 개발</li> <li>인공지능 기반 도막 두께분포 시각화 및 정량화 알고리즘 개발</li> <li>산업별 강구조물 내구성능 평가 기준에 따른 도막 상태평가 알고리즘 개발</li> </ul>            | <ul style="list-style-type: none"> <li>YOLO(You Only Look Once) 기법을 이용한 열화 탐지 및 분류 인공지능 알고리즘 개발</li> <li>이미지 프로세싱을 통해 탐지된 열화 정량화</li> <li>20 <math>\mu</math>m 급 도막 두께분포 시각화 및 정량화 알고리즘 개선 완료 (목표 20 <math>\mu</math>m)</li> <li>건설업 내구성능 평가 기준에 따른 도막 상태평가 알고리즘 개발</li> </ul>                                  |
| [핵심성과 4]<br>강구조물 도막 상태<br>실시간 평가를 위한<br>이동 로봇 및 현장<br>적용 기술 개발          | 자동 및 실시간<br>강구조물 도막<br>상태평가 로봇<br>시제품 개발 | <ul style="list-style-type: none"> <li>이중 영상계측시스템, 무인 로봇 플랫폼, 도막 상태 평가기법 통합 및 시제품 개발</li> <li>열화상 및 비전 영상 계측 안정성 확보를 위한 시제품 최적화</li> <li>장비 제어 및 도막 상태평가 결과 실시간 확인을 위한 소프트웨어 구축</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>시제품 무게 12.1 kg, 부피 300x250x350 mm<sup>3</sup> (목표 13 kg, 300x250x350 mm<sup>3</sup>)</li> <li>220 mT 네오디움 영구자석을 이용하여 검사 대상 표면과의 부착력 확보 (20 kgf)</li> <li>주문제작 프레임을 이용하여 이동 로봇과 사용 하드웨어간 볼트 고정</li> <li>열화상/비전 카메라 및 열원 제어, 도막 두께 검사, 열화 검사 수행 가능한 소프트웨어 구축 완료</li> </ul> |

#### ■ 3차연도 연구 결과 요약

| 세부 과제명                        | 세부 연구 목표                            | 연구개발 수행 내용                                                                                                                                                                               | 연구 결과                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [핵심성과 5]<br>개발 시제품 현장<br>성능검증 | 목표 산업군 별<br>1개소 이상 현장<br>실험 수행      | <ul style="list-style-type: none"> <li>강교량 바닥판 및 측면부 도막 상태평가</li> <li>플랜트 및 배관 시설물 도막 상태평가</li> <li>선박 외판 및 평형수 탱크 도막 상태평가</li> </ul>                                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>성산대교 남단 접속부 재도장 영역 대상 실험 수행 (2021.01.25.~27)</li> <li>SK인천석유화학 플랜트 시설물 하단 재도장부 대상 실험 수행 (2021.09.15.~16)</li> <li>현대중공업 선박부 실물 모형 대상 실험 수행 (2021.09.09.~10)</li> <li>삼성중공업 선박부 실물 모형 대상 실험 수행 (2021.12.29.~30)</li> </ul>                                                                                        |
| [핵심성과 6]<br>개발 시제품 상용화        | 공인인증 획득,<br>건설신기술<br>신청, 연구성과<br>홍보 | <ul style="list-style-type: none"> <li>개발 시제품 국가 공인인증 획득</li> <li>건설시장 판로 개척을 위한 건설신기술인증 신청</li> <li>연구성과 홍보, 기술 시연, 전시회 참여 등을 통한 국내외 판로 확보</li> <li>시제품 외관 디자인 개선을 통한 상용성 증대</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>건설품기술연구원(KOLAS 인증기관) 인증 실험 수행 (2021.01.21)</li> <li>건설신기술 신청 완료 및 1,2차 심사 통과 (1차 심사: 2021.12.14., 2차 심사: 2022.03.31)</li> <li>학술발표 4회 (EMI/PMC, 한국구조물유지관리공학회, 대한토목학회, 한국비파괴검사학회)</li> <li>대우건설 기술 홍보 및 미팅 (2021.04.02.)</li> <li>시제품 외부 케이스 별도 디자인 작업 수행 (무게 15.47 kg, 부피 530x380x400 mm<sup>3</sup>)</li> </ul> |

### 3.3. 연도별 개발 내용

- 핵심성과 1-1: 레이저, LED, 램프 등을 열원으로 사용하는 열화상 시스템 개발
  - 본 과제 최종 목표는 강구조물에 부착 이동하는 제품으로 열화상 열원 및 카메라와 검사 대상 (강구조물 표면)과의 거리가 일정하게 유지됨.
  - 본 연구진은 다양한 열원을 고려하였으며, 할로겐 램프는 가진 범위가 넓어, 단위 면적 당 검사 시간이 가장 빠르나, 단시간 고출력 에너지가 필요하므로 실제 현장에서 전력 문제 등으로 사용에 제한적임. 할로겐 램프를 이용한 열화상 시스템을 실교량 현장에서 사용하기 위해서는 3W 발전기가 필요하며 발전기의 무게는 50 kg에 육박하므로 현장 사용성이 제한됨.
  - 반면, 연속 레이저는 단위 면적당 검사 소요 시간은 할로겐 램프에 비해 느리나, 할로겐 램프에 비해 저출력 에너지로도 구조물 표면을 가열시키기에 충분한 열에너지 가진이 가능함. 연속 레이저를 사용하기 위해선 스캐닝 장비가 필요하며, 본 연구에서 개발되는 이동 로봇 플랫폼을 레이저 열원 채택시 요구되는 스캐닝 장비로 활용 가능함을 확인하였으며, 열원과 검사 대상과의 이격거리가 일정하게 유지된다는 장점을 살려 연속 레이저를 열화상 시스템 열원으로 선정함.
  - 선정 열원의 타당성을 검증하기 위해 기존 주관연구기관이 보유하고 있는 도막 두께 측정 기술을 적용한 도막 두께 정량화를 질적 성과 지표로 설정하였으며, 연구 초기 단계로 현장 조건이 파악되어 있지 않으므로 추후 발생 가능한 현장 변수를 사전에 방지하기 위해 최대 이격거리 1 m에서 도막 두께 정량화 가능성을 확인함.
  - 본 연구진은 개발한 열화상 시스템과 실험실 수준 도막 두께 시편과의 이격거리를 1 m로 설정하고 실험을 수행하였음. 사용 시편 색상은 밝은 녹색, 회색, 적색 등이며, 세라믹계와 우레탄계 도료를 사용하였음. 도막 두께는 도장 전문기관에 의뢰하여 60~180  $\mu\text{m}$ 를 40  $\mu\text{m}$ 차로 도포함.
  - 실험 결과 세가지 시편 모두에 대해 40  $\mu\text{m}$ 급 도막 두께 변화를 탐지하였으며, 시편 전면적에 대한 도막 두께를 정량화 및 시각화함.

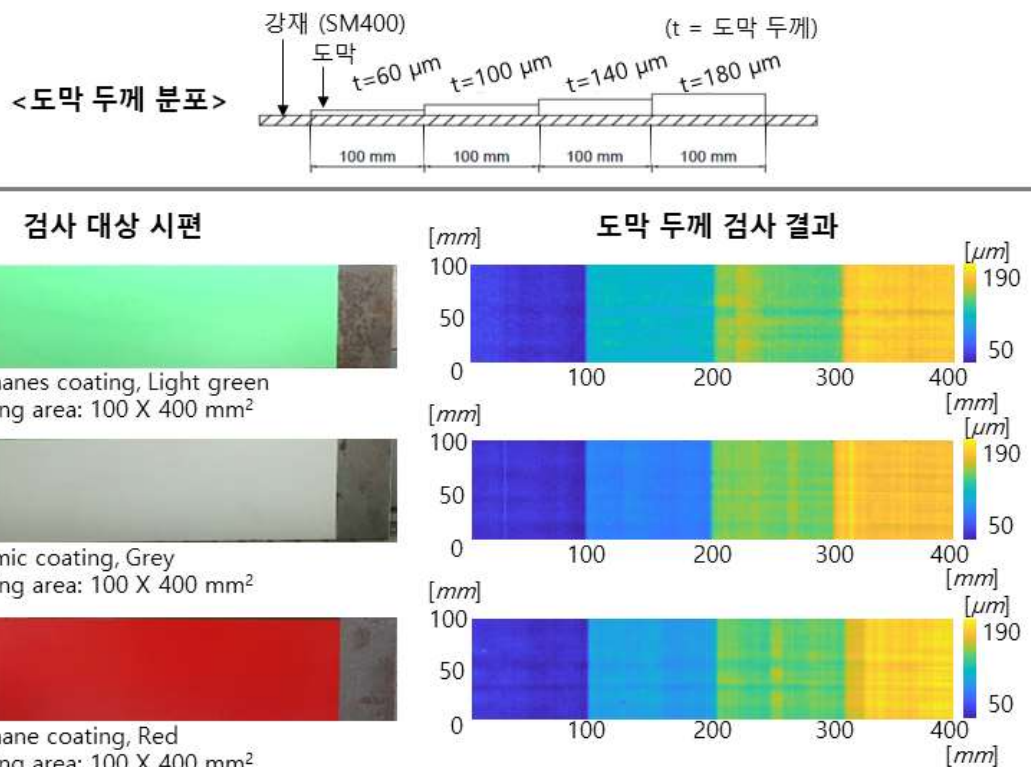
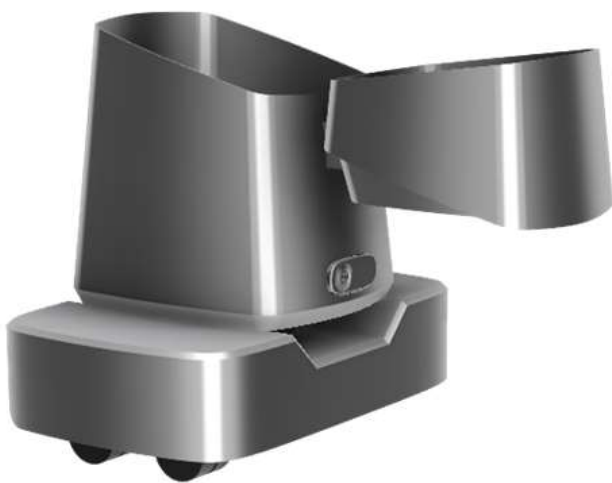


그림 21. 개발 열화상 시스템을 이용한 도막 두께 검사 결과

- 핵심성과 1-2: 열화상/비전 영상 동기화, 왜곡 보정, 정합 가능한 이중 영상계측시스템 개발
- 열화상 시스템을 이용한 도막 결함 검사는 도막 내외부에 발생한 결함을 탐지할 수 있지만 결함 종류를 구분할 수 없음. 이와 반대로 비전 시스템은 일정 수준의 결함 분류가 가능하지만, 도막 표면에 발생한 결함만 탐지 가능함. 본 연구에서는 각 시스템의 단점을 보완하여 도막 내외부 결함 탐지 및 분류 가능한 이중 영상계측시스템을 개발함.
- 이중 영상시스템은 열화상 카메라, 레이저(열원), 비전 카메라로 구성되어 있으며 optical plate를 이용하여 장비를 정렬하고 연결시켰음.
- 최초 개발한 이중 영상시스템의 무게는 2.61 kg이며, 이는 구성품을 연결하는 optical plate를 포함하는 무게임. 또한 부피는 240x215x110 mm<sup>3</sup>로 측정됨.
- 이중 영상계측시스템은 과제 수행 중 현장 적용성 향상을 위해 열화상 및 비전 카메라 경량/소형 모델로 교체하였으며, 개발 시제품 상용화를 위한 외관 케이스를 별도 디자인 및 제작하여 최종 시제품 (무게: 15.47 kg (1시간 구동 가능 배터리 포함), 부피: 530x380x400 mm<sup>3</sup>)을 개발 완료함.



그림 22. 개발 이중 영상 시스템 개요 및 추후 프레임 부착 예시도



- 무게 = 15.47 kg (배터리 포함)
- 부피 = 530 x 380 x 400 mm<sup>3</sup>

| 열화상 카메라<br>(FLIR, A65SC)                                                                                                                                                           | 비전 카메라<br>(Intel, Realsense D435i)                                                                                                                               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>계측범위= LWIR (7.5 ~ 13 <math>\mu</math>m)<br/>온도분해능 = 30 mK<br/>픽셀해상도 = 640 X 512 pixels</p> |  <p>픽셀해상도 = 1280x720pixels<br/>초점거리 = 1.88 mm<br/>FOV = 69.4°x42.5°x77°</p> |
| 제어 컴퓨터<br>(Intel NUC)                                                                                                                                                              | 연속 레이저 장비                                                                                                                                                        |
|  <p>연산장치 = i7-8559U<br/>네트워크 = Gigabit Ethernet<br/>메모리 = 16 GB<br/>SSD 저장 공간 = 512 GB</p>     |  <p>파형 = 연속 레이저<br/>레이저 파워 = 30 W<br/>파장 = 968 nm<br/>빔 폭 = 25 cm</p>       |

그림 23. 최종 시제품 및 사용 하드웨어

■ 핵심성과 1-3: 고해상도 및 고속 열화상 비전 영상 실시간 처리기술 개발

- 비전 영상과 열화상 영상은 촬영 면적 및 영상 해상도 등 차이가 있으며, 영상 정합을 위해서는 RoI (Region of Interest)를 맞추는 것이 중요함. 본 연구진은 스테레오 타입 영상 정합에 널리 쓰이는 Checkerboard 이미지를 이용한 영상 정합 알고리즘을 개발함. 사전 촬영된 Checkerboard 이미지를 이용해 도출된 변환행렬을 이용하여 열화상 및 비전 검사 결과 이미지 정합이 가능함.
- Raw 열화상 파일 등 전처리된 영상에 적용 가능한 비전 및 열화상 영상 왜곡 보정 및 정합 알고리즘을 개발하였으며, 개발 영상 처리 알고리즘은 전처리된 영상에 모두 사용 가능함.
- 알고리즘 검증은 30 Hz, 고해상도 열화상 카메라 (512x640) 및 비전 카메라 (1920x2560)를 이용하여 수행하였으며, 60 Hz 고속 계측 영상과 비교하여 전처리 영상의 파일 크기 차이만 있어 개발 알고리즘을 향후 고속 촬영 영상에도 적용 가능함.
- Checkerboard 이미지를 이용한 왜곡 보정, 변환행렬 생성 소요시간은 1.67 초이며, 도출된 변환행렬을 이용하여 3개의 검사 시편 이미지를 정합하는데 소요된 시간은 4.37 초임. (Matlab 2017b 기준)

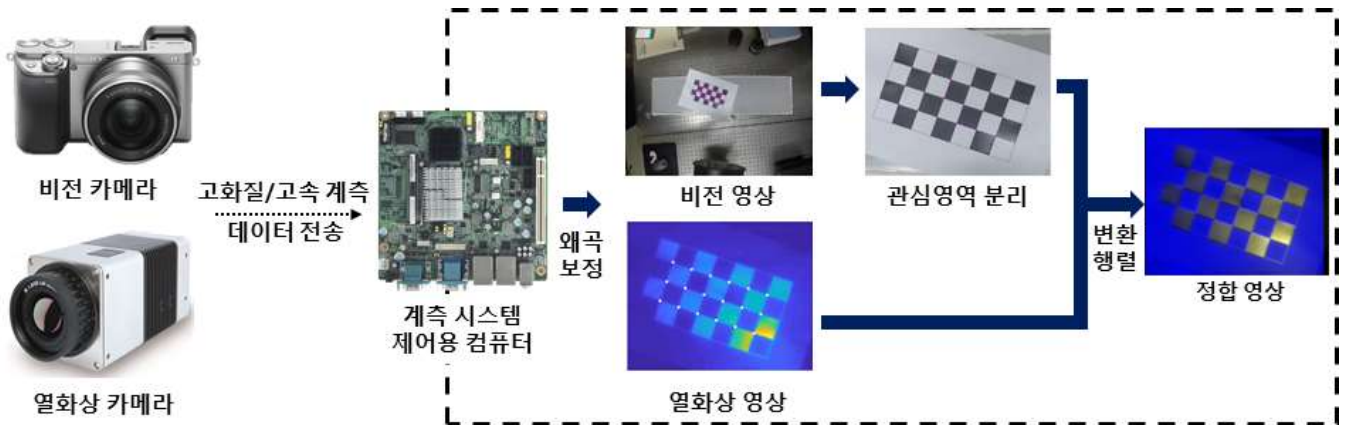


그림 24. 개발 영상 정합 알고리즘 개요

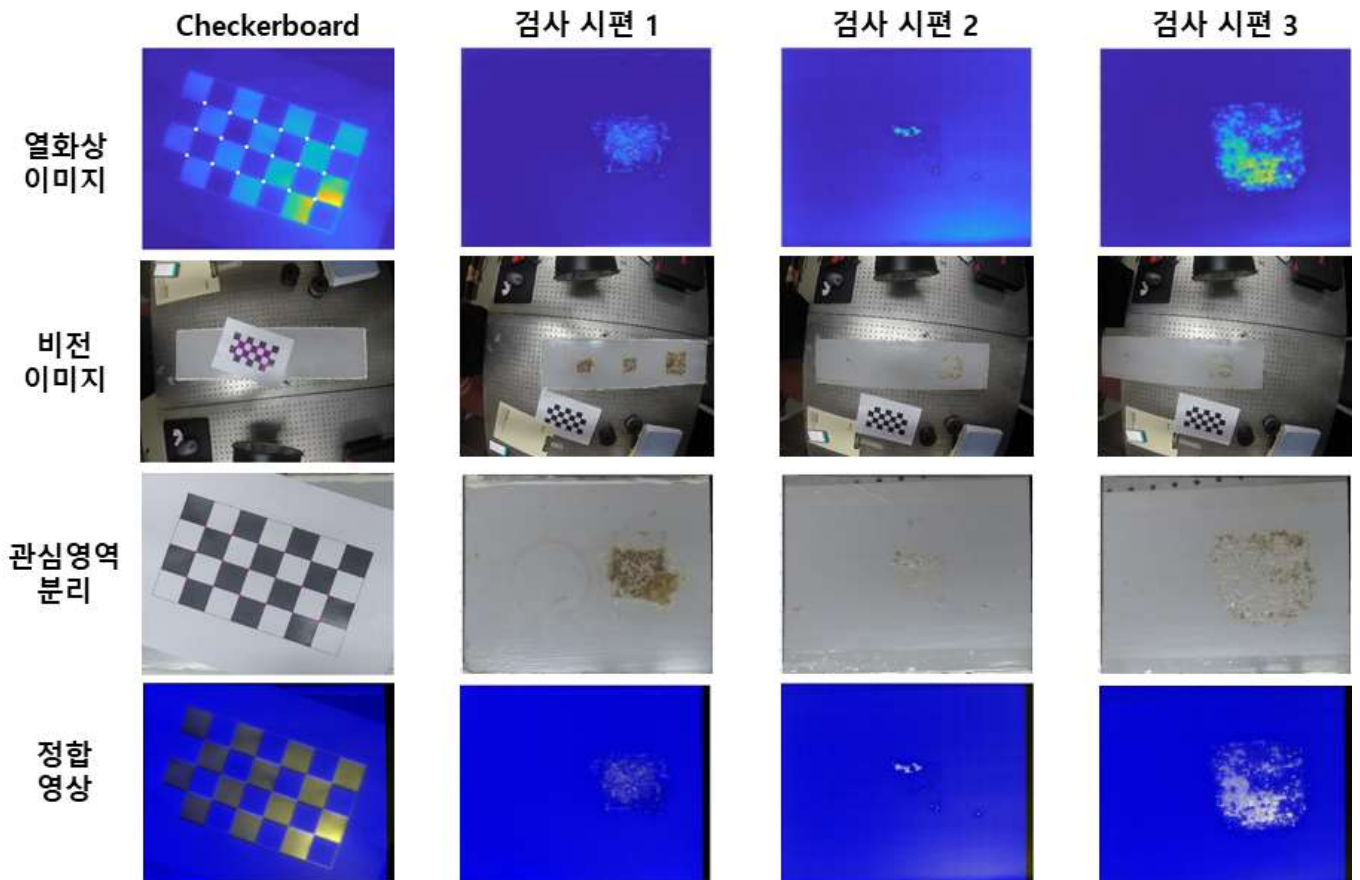


그림 25. 열화상 및 비전 영상 정합 결과

- 핵심성과 2-1: 강구조물 검사를 위한 영구자석기반 부착형 무인 주행 로봇 플랫폼 개발
  - 강구조물 부착이동을 위해 영구자석을 이용한 무인 로봇 플랫폼을 개발함.
  - 기존 영구자석 기반 이동 장비는 강한 자력으로 인해 강구조물 표면 도막을 벗겨내는 등 결함을 발생시켰으나, 본 연구진은 단위 면적 당 자력을 감소시키고, 영구자석과 도막의 직접적인 접촉을 방지하는 우레탄 케이싱된 광폭 바퀴를 사용하여 이를 사전에 방지함.
  - 이동 로봇은 0~1.5 m/min 속도로 이동 가능하며 등속 주행이 가능함. 또한, 전후, 좌우 2축 이동이 가능함. 플랫폼 상단을 optical plate로 제작하여 계측 장비 부착에 용이하도록 하였으며, 140~190 mm 사이로 높이 조절이 가능함. 로봇 플랫폼 무게는 6.67 kg, 부피는 275x145x150 mm<sup>3</sup> 로 측정됨.
  - 무인 주행 로봇 플랫폼은 24V-DC 전원, 바퀴당 부착력 20 kgf, 정격 허용 토크 30 kg·cm이며, 지름 150 mm 이상 곡면과 두께 3 mm 이하 돌출부 주행이 가능함. 컨트롤러에는 이동 로봇 배터리가 내장되어있어 220V-2A/400W 충전기로 충전 가능 및 10 시간 이상 운행이 가능함.

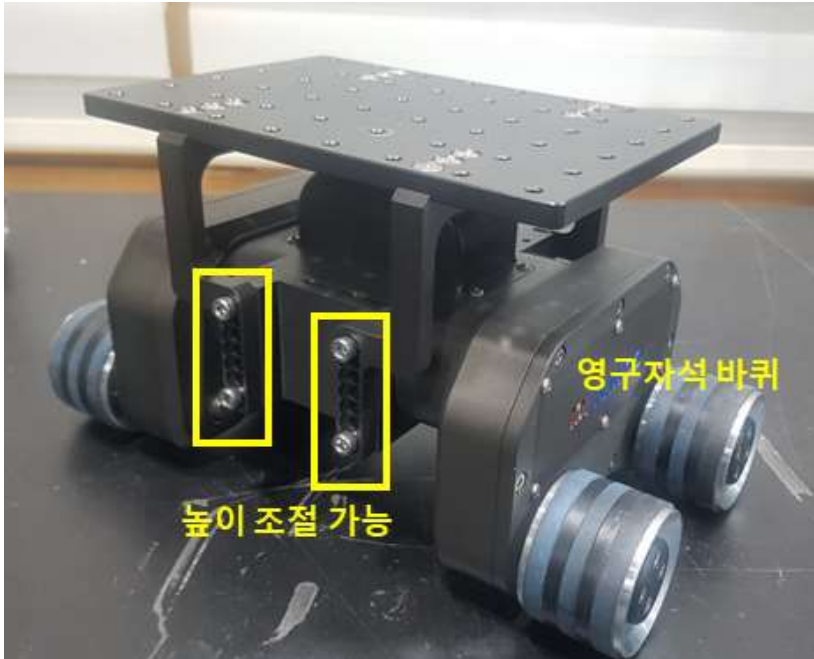


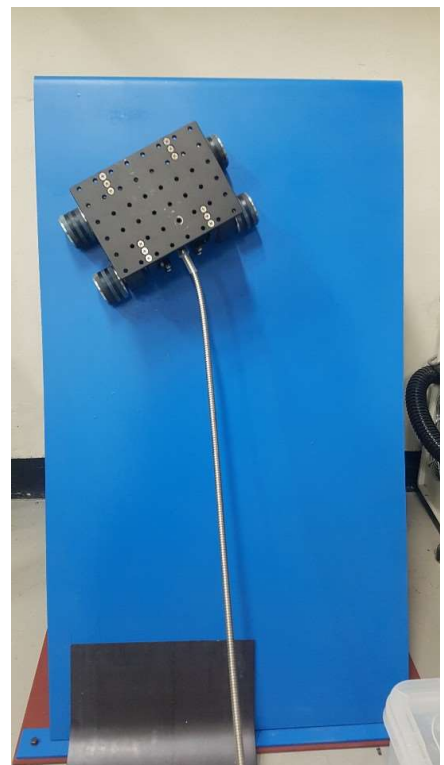
그림 26. 이동 로봇 플랫폼 및 컨트롤러



<전후이동>



<우측 이동>



<좌측 이동>

그림 27. 이동 로봇 플랫폼 주행 성능 확인

- 핵심성과 2-2: 특수 임무 수행을 위한 이중 영상계측시스템 탑재부 개발
  - 이중 영상시스템 탑재를 위해 이동 로봇 플랫폼 상부를 optical plate로 구성하였음.
  - 개발 이동 로봇 플랫폼의 부착력은 20 kg·f이며, 14.4 kg 무게를 탑재하고, 60도 경사면 부착이동이 가능함.
  - 강구조물 시편에 200 ml 수돗물을 부어 비 온 직후 상황을 모사하였으며, 물기가 있는 경사면에서도 14.4 kg 무게를 탑재한 후 부착이동이 가능함.



<건조한 구조물 표면 이동>

<물기가 있는 표면 이동>

<탑재물 무게>

그림 28. 다양한 환경조건에서의 이동 로봇 플랫폼 부착력 실험 결과

- 핵심성과 2-3: 원거리 전력 및 영상 송수신 방안 마련
  - 이동 로봇 플랫폼의 작업 범위 확대를 위해 30 m 길이의 케이블을 제작함.
  - 제작된 케이블은 특수 케이싱 작업을 통해 영구자석에 부착되지 않고, 컨트롤러로부터 이동 로봇 플랫폼 본체까지 전력을 전달함. 또한 특수 케이싱으로 계속 장비와 간섭이 발생하지 않도록 제작함.
  - 사용자의 편의성을 위해 당해연도에 개발한 이동 로봇 플랫폼 작동 매뉴얼을 제작함.



그림 29. 이동 로봇 플랫폼 작동 매뉴얼

■ 핵심성과 3-1: 인공지능 기반 도막 열화 분류 및 넓이 정량화 알고리즘 개발

- 열화 검출/분류 및 넓이 정량화를 수행하기 위해 다양한 객체 인식 관련 인공지능 알고리즘을 고려하였음. 픽셀 단위로 객체를 검출 및 분류하는 Mask R-CNN 기법이 소개되었으나, 검사 정확도에 중점이 맞춰져 있는 기법으로 연산속도가 매우 느림. 본 연구진은 보다 신속한 검사를 위해 사각형 형태로 열화를 검출하는 인공지능 알고리즘과 이를 분류하는 분류 알고리즘을 각각 구성하여 검사속도를 향상시킴.
- 열화 검출 알고리즘으로 1-stage 형태의 YOLO (You Only Look Once) 기법을 적용하였으며 이미지 1장 당 약 0.4초의 연산시간을 보임. 2-stage 형태의 Faster R-CNN 기법(3.2초/이미지)대비 약 8배 이상 빠름.
- YOLO 기법 기반 열화 검출 알고리즘을 통해 검출된 열화 영역을 VGG 네트워크 CNN 기법 기반 인공지능 알고리즘을 이용하여 부식, 박리, 체킹, 초킹으로 분류를 진행함. 동시에 검출된 열화 영역은 이미지 이진화, 필터링 등 이미지 프로세싱을 통해 그 영역이 정량화됨.
- 학습 훈련 데이터는 한국시설안전공단에서 제공받아 주관연구기관이 보유하고 있는 열화 이미지, 공동연구기관이 보유하고 있는 열화 이미지, 인터넷에서 검색된 이미지를 사용하였으며, 열화 검출 알고리즘에는 총 264장 이미지를 사용하였고, 열화 분류 알고리즘에는 부식, 박리, 체킹, 초킹 각각 42, 48, 13, 24장 (총 127장) 이미지를 사용함. 열화 분류 정확도는 총 30장의 테스트 이미지를 사용했으며, 30장 중 25장을 랜덤하게 선택하여 테스트를 진행함. 이 과정을 2회 반복하여 열화 분류 정확도를 산출함.

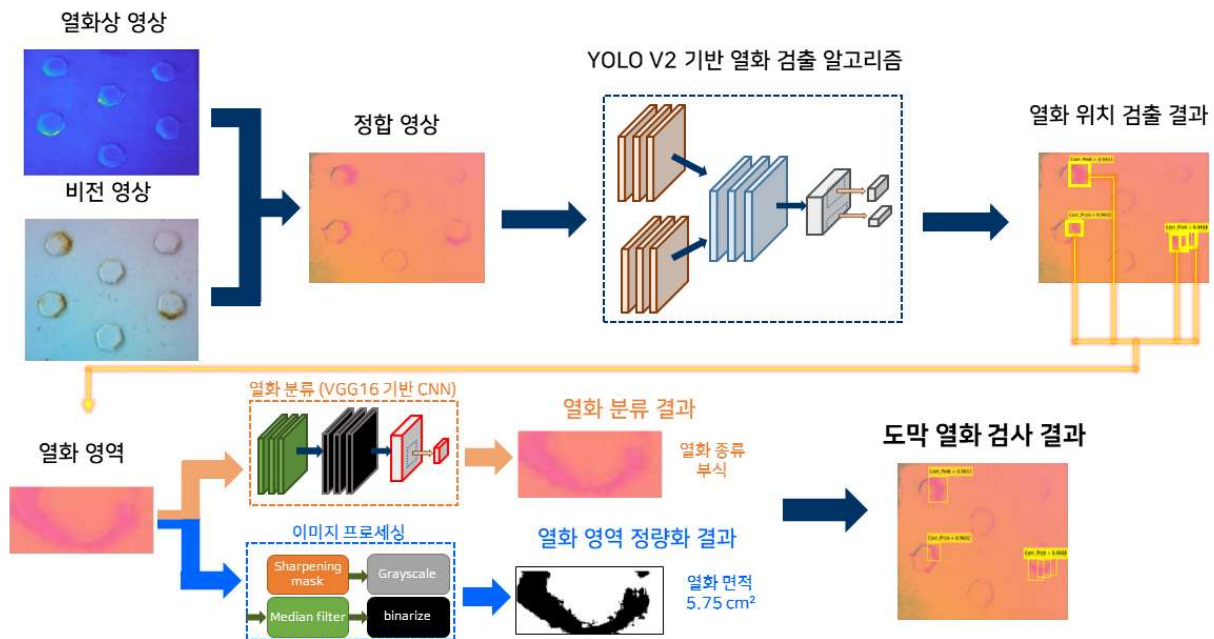


그림 30. 도막 열화 검사 알고리즘 개요도

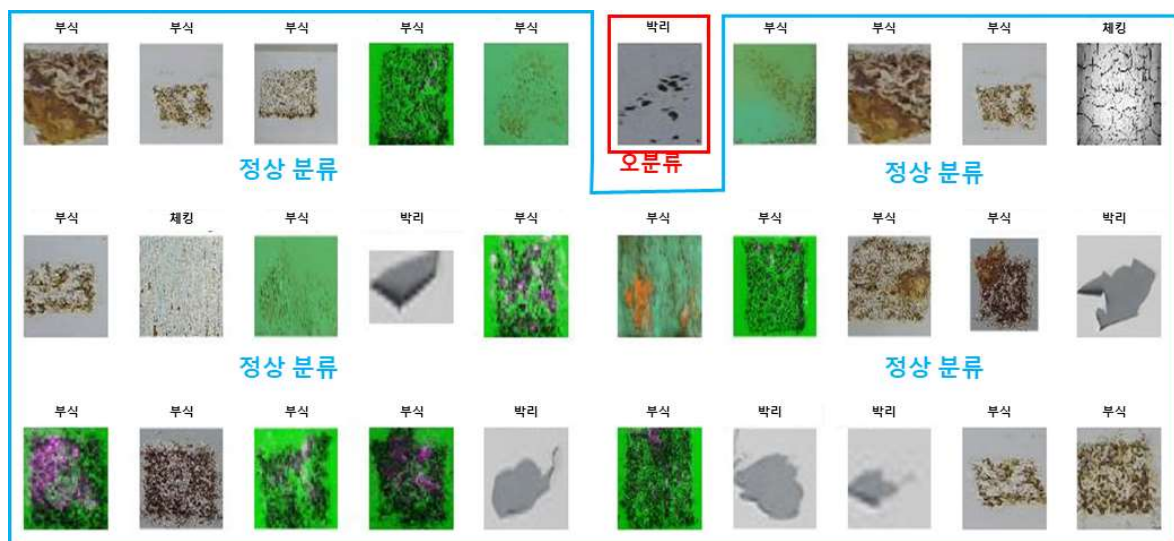


그림 31. 여러 비전 이미지에 대한 열화 분류 신뢰도 검사 결과

- YOLO 기법 기반 열화 검출 알고리즘 학습과 CNN 기법 기반 열화 분류 알고리즘 학습은 CPU Intel i7-9700, GPU NVIDIA GeForce RTX 2070 Super, Memory 16GB 환경에서 MATLAB 2019b를 이용함, MATLAB에서 제공되는 YOLO v2 toolbox와 VGG Network를 열화 검출 알고리즘과 열화 분류 알고리즘에 각각 사용함.
- 열화 검출 알고리즘은 총 28개의 레이어로 구성되어있으며 총 234개 학습 이미지를 이용하여 알고리즘을 학습시킴. 학습 이미지의 크기는 다양하나 Input layer에서 일괄적으로 200 x 200 x 3 크기로 일치시키도록 함. Convolution, Batch Normalization, ReLU(활성화 함수), Pooling 레이어를 이용하여 학습 이미지 내 특성을 추출하고 이를 YOLO Transformation 레이어를 이용해 열화 영역을 탐지함. 학습에 사용된 변수로 학습률 0.0003, 미니 배치 크기 16, 최대 Epoch 50을 사용함.
- 열화 분류 알고리즘은 VGG 네트워크를 기반으로 개발되었으며 필터 크기, 개수 등 여러 변수를 수정하여 최적화 변수를 찾음. 총 41개 레이어로 구성되어있으며, 총 127장 학습데이터를 이용함. Convolution, ReLU, ReLU, Pooling 레이어를 이용하여 학습 이미지의 특성을 추출하고, 추출된 이미지 특성을 Fully Connected (FC) 레이어를 통해 4개의 Node 결과값을 갖도록 함. 4개의 Node는 각각 학습 이미지가 4가지 열화 종류 (부식, 박리, 체킹, 초킹) 중 어느 열화에 해당 되는지 나타냄. 학습에 사용된 변수로 학습률 0.00005, 미니 배치 크기 16, 최대 Epoch 100, ReLU 정규화인자 0.0001, 경사하강법 파라미터 모멘트 0.7을 사용함.

| YOLO Network (Defect Detection) |                                                        | CNN Network (Defect Classification) |                                                        |
|---------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Input layer                     | Size: 200 x 200 x 3                                    | Input layer                         | Size: 200 x 200 x 3                                    |
| Conv+BN+ReLU layer              | Filter size: 3 x 3<br>No. of filters: 16<br>Stride: 1  | 2 x Conv + ReLu layer               | Filter size: 3 x 3<br>No. of filters: 16<br>Stride: 1  |
| Max pooling layer               | Filter size: 2 x 2<br>Stride: 1                        | Max pooling layer                   | Filter size: 2 x 2<br>Stride: 2                        |
| Conv+BN+ReLU layer              | Filter size: 3 x 3<br>No. of filters: 32<br>Stride: 1  | Conv + ReLu layer                   | Filter size: 3 x 3<br>No. of filters: 64<br>Stride: 1  |
| Max pooling layer               | Filter size: 2 x 2<br>Stride: 1                        | Max pooling layer                   | Filter size: 2 x 2<br>Stride: 2                        |
| Conv+BN+ReLU layer              | Filter size: 3 x 3<br>No. of filters: 64<br>Stride: 1  | 2 x Conv + ReLu layer               | Filter size: 3 x 3<br>No. of filters: 128<br>Stride: 1 |
| Max pooling layer               | Filter size: 2 x 2<br>Stride: 1                        | Max pooling layer                   | Filter size: 2 x 2<br>Stride: 2                        |
| Conv+BN+ReLU layer              | Filter size: 3 x 3<br>No. of filters: 128<br>Stride: 1 | Conv + ReLu layer                   | Filter size: 3 x 3<br>No. of filters: 128<br>Stride: 1 |
| Conv+BN+ReLU layer              | Filter size: 3 x 3<br>No. of filters: 128<br>Stride: 1 | 2 x Conv + ReLu layer               | Filter size: 3 x 3<br>No. of filters: 256<br>Stride: 1 |
| Conv+BN+ReLU layer              | Filter size: 3 x 3<br>No. of filters: 128<br>Stride: 1 | Max pooling layer                   | Filter size: 2 x 2<br>Stride: 2                        |
| Conv+BN+ReLU layer              | Filter size: 3 x 3<br>No. of filters: 128<br>Stride: 1 | Conv + ReLu layer                   | Filter size: 3 x 3<br>No. of filters: 256<br>Stride: 1 |
| Fully connected layer           | 24 Nodes                                               | 2 x Conv + ReLu layer               | Filter size: 3 x 3<br>No. of filters: 512<br>Stride: 1 |
| YOLO Transform layer            | No. of Anchor box: 4                                   | Max pooling layer                   | Filter size: 2 x 2<br>Stride: 2                        |
| YOLO Output layer               | Anchor box: 8 8; 32 48;<br>40 24; 72 48                | 3 x Conv + ReLu layer               | Filter size: 3 x 3<br>No. of filters: 512<br>Stride: 1 |
|                                 |                                                        | Max pooling layer                   | Filter size: 2 x 2<br>Stride: 2                        |
|                                 |                                                        | 2 x FC + ReLU + Dropout layer       | 4096 Nodes<br>Dropout: 50%                             |
|                                 |                                                        | Fully connected layer               | 4 Nodes                                                |
|                                 |                                                        | Softmax layer + Regression layer    | No. of outputs: 4                                      |

- 실험실 수준 검증 실험 결과, 열화 분류 신뢰도 96% 이상, 열화 면적 영역 정량화 정확도 1 cm<sup>2</sup> 수준, (시각화 분해능 가로 0.375 mm/pixel, 세로 0.267 mm/pixel)으로 산출됨. (목표 분류 신뢰도 95%, 정량화 정확도 1 cm<sup>2</sup>, 시각화 분해능 1 cm<sup>2</sup>)
- 열화 분류 신뢰도 산출은 다양한 열화 종류에 대한 열화상/비전 융합 데이터 획득의 한계로 1) 실험실 보유 부식 시편에 대한 오검출률, 2) 비전 이미지에 대한 오검출률을 이용하여 산출함. 실험실 보유 부식 시편에 대한 오검출은 없었으며, 36장의 비전 이미지에 대한 테스트 결과 오검출률 3.7 %로 산출됨. 따라서 본 인공지능 열화 검사 알고리즘의 열화 분류 신뢰도는 96.7% (목표 95%)로 산출됨.
- 도막 열화 및 두께 시각화 분해능 산출은 열화상 카메라 ROI와 스캐닝 속도를 이용하여 가로 분해능, 세로 분해능을 각각 산출하였으며, 가로 분해능은 실제 계측 영역 폭 24 cm을 열화상 카메라 가로 픽셀 수 640 pixel로 나누어 산출함. 세로 분해능은 스캐닝 속도를 열화상 카메라 계측 주파수 30 Hz로 나누어 산출함.

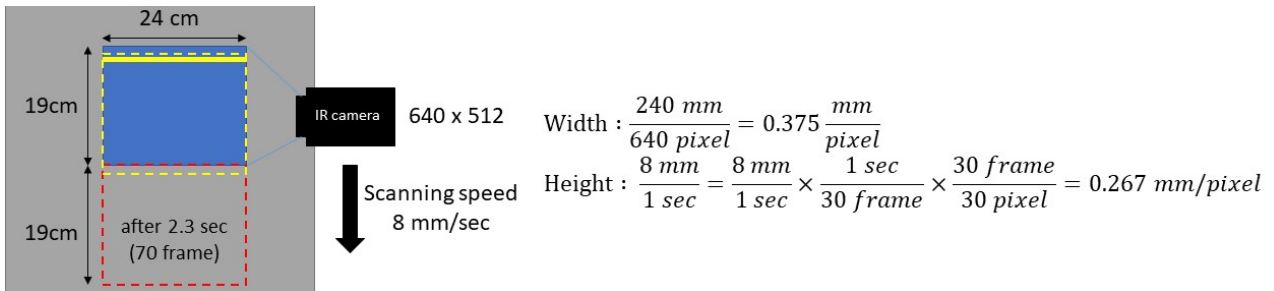


그림 32. 도막 두께 및 열화 분해능 산출 방법

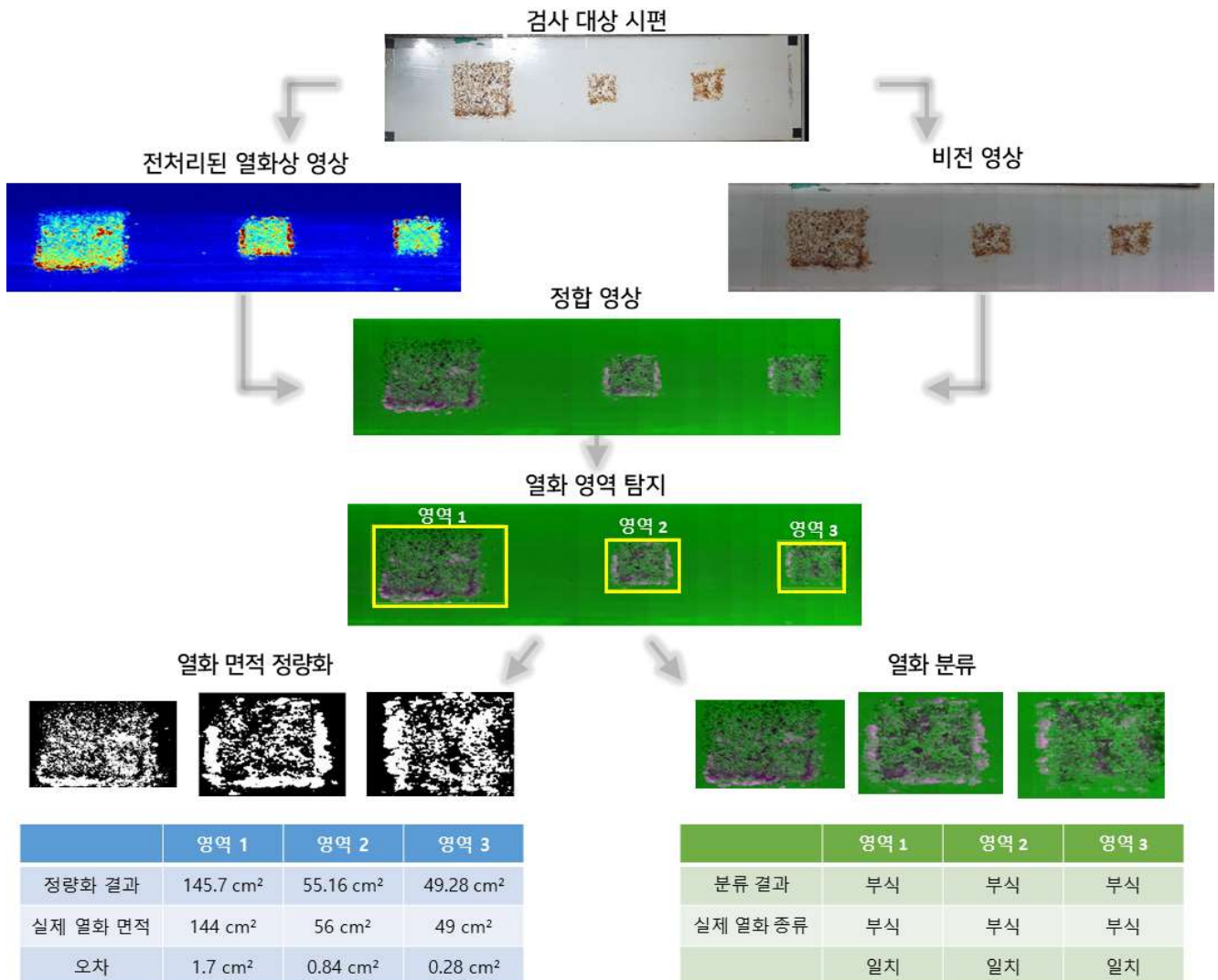


그림 33. 부식 시편에 대한 열화 검사 결과

- 열화 검사 알고리즘은 YOLO v2 모델을 YOLO v5 모델로 변경하고, 각각 존재하던 열화 검출 알고리즘과 열화 분류 알고리즘을 하나로 통합하여 모델 경량화를 수행하였으며 이를 통해 도막 열화 검사속도 및 현장 적용성을 향상시킴.
- 개선된 열화 검사 알고리즘은 YOLO v2 모델 대비 적은 시스템 메모리 용량을 필요로하는 YOLO v5 모델을 적용하여 모델이 경량화되었으며, 독립적으로 존재하던 열화 검출 및 분류 알고리즘을 하나로 통일하여 검사속도가 증가함.
- 개선된 열화 검사 알고리즘의 학습 데이터는 열화상-비전 융합된 4차원 이미지만 사용되었으며, 총 학습 데이터 184장 중 train/validation 비율은 8:2임.
- 부식 및 박리 열화 대상 도막 열화 검사 결과 1 cm<sup>2</sup> 미만 결함 검출 및 분류가 가능함을 확인하였으며, 개발 기술의 검출 정확도는 개발 기술의 현장 적용성 실험 및 실제 현장 용역 수행시 계측한 데이터를 추가하여 모델을 학습할 경우 점진적으로 높아질 것으로 기대됨.

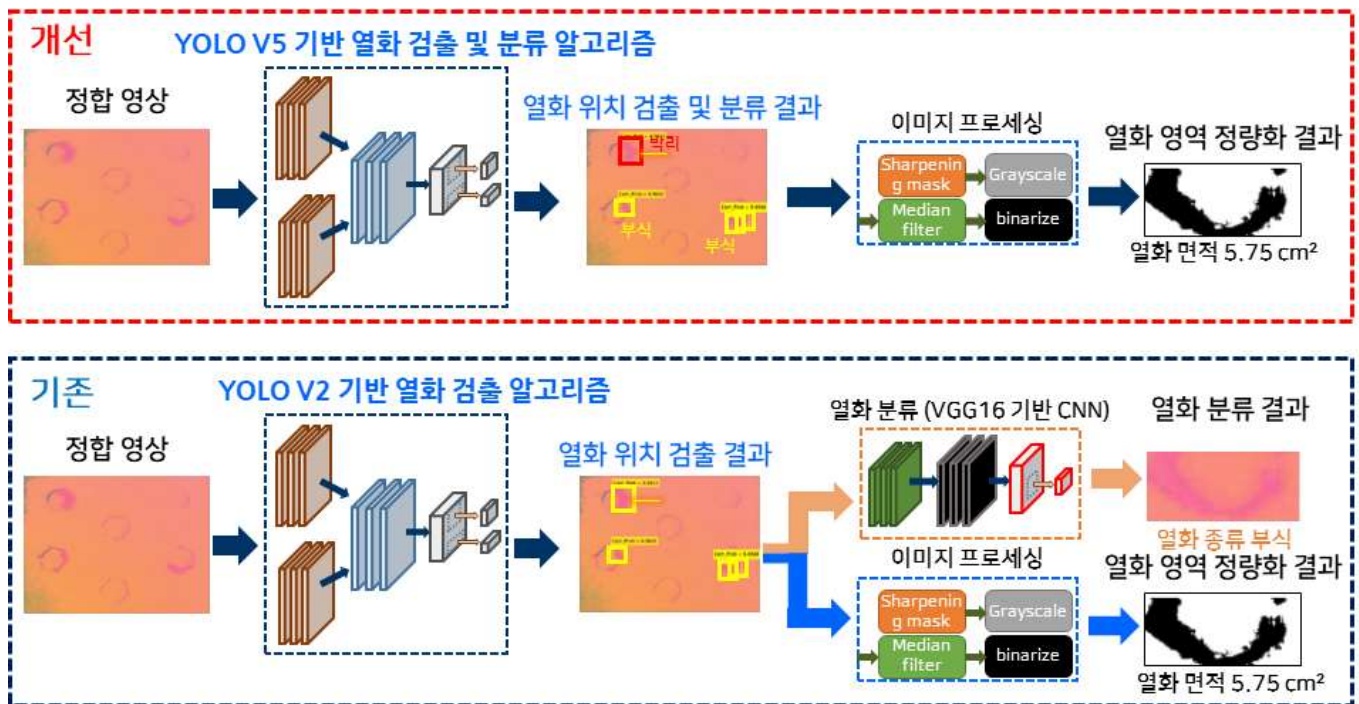


그림 34. 기존 열화 검사 알고리즘과 개선된 열화 검사 알고리즘 비교

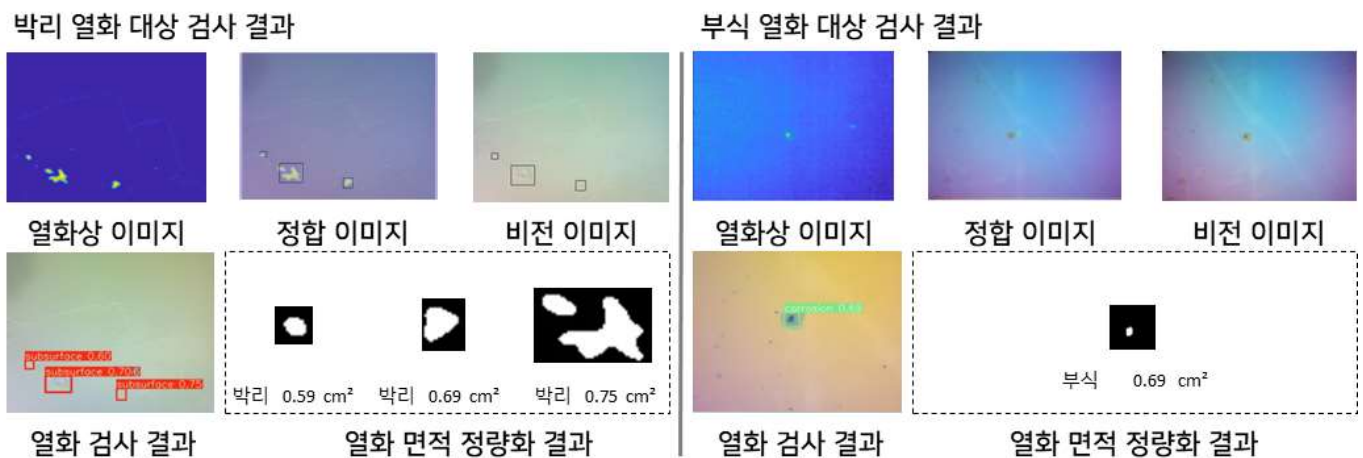


그림 35. 개선된 열화 검사 알고리즘을 이용한 도막 열화 검사 결과

- 핵심성과 3-2: 인공지능 기반 도막 두께 분포 시각화 및 정량화 알고리즘 개발
  - 1차연도에서 개발한 열화상 시스템은 약 40  $\mu\text{m}$  수준의 도막 두께 분포 시각화 및 정량화가 가능하였으며, 본 연구진은 당해연도에 이를 20  $\mu\text{m}$  수준으로 향상시킴.
  - 기존 대비 1.5배 출력이 높은 30 W 레이저를 이용하여 단위 시간당 검사표면에 주입되는 열에너지량을 증가시켜 고속 이동(최대 1.5m/min) 조건에서도 두께 정량화 정확도 수준을 유지할 수 있음.
  - 계측 시 발생 가능한 노이즈는 median filter, high-pass filter를 이용해 제거하였으며, 3 mm SM400 강재 시편에 대해 실험한 결과 평균 제곱근 오차(RSME, root square mean error) 13.81  $\mu\text{m}$ , 평균 절대 오차 (MAE, mean absolute error) 9.64  $\mu\text{m}$  수준을 보임 (과제 목표 20  $\mu\text{m}$ ).
  - 도막 두께 분해능은 가로 0.375 mm/pixel, 세로 0.267 mm/pixel로 산출됨 (과제 목표 1  $\text{cm}^2$ ).



그림 36. 사용 하드웨어 구성



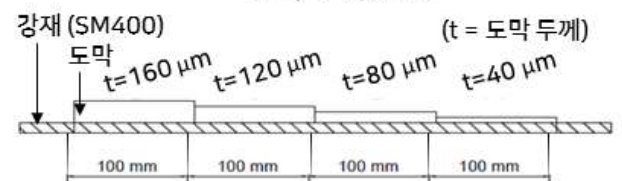
그림 37. 계측부/가진부 구성

### 검사 대상 시편

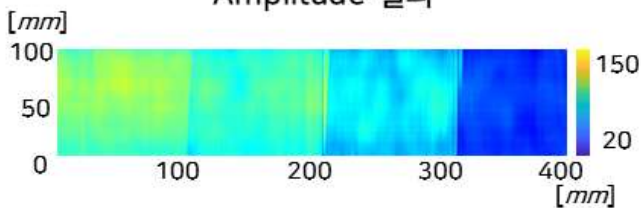


- Ceramic coating, Grey
- Coating area: 100 X 400  $\text{mm}^2$
- Specimen thickness: 3 mm

### 도막 두께 분포



### Amplitude 결과



### 도막 두께 검사 결과

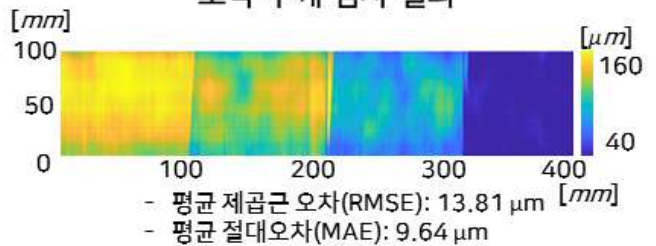


그림 38. 도막 두께 분포 시각화 및 정량화 결과

- 핵심성과 3-3: 산업별 강구조물 내구성능 평가 기준에 따른 도막 상태평가 알고리즘 개발
- 본 연구진은 목표 산업군인 건설업, 조선업, 석유화학업 중 건설업에 대해 우선적으로 내구성능 평가 기준에 따른 도막 상태평가 알고리즘을 개발함. 앞서 개발한 인공지능 기반 도막 열화 검사 결과와 도막 두께 검사 결과를 각 항목 별 등급 산정식에 대입하여 열화 등급과 두께 등급을 산출하고, 도막 내구성능의 내부적 요인에 대한 등급을 산정함. 외부적 요인인 대기조건은 사용자가 직접 입력하여 전체 도막 상태 등급을 산정함.

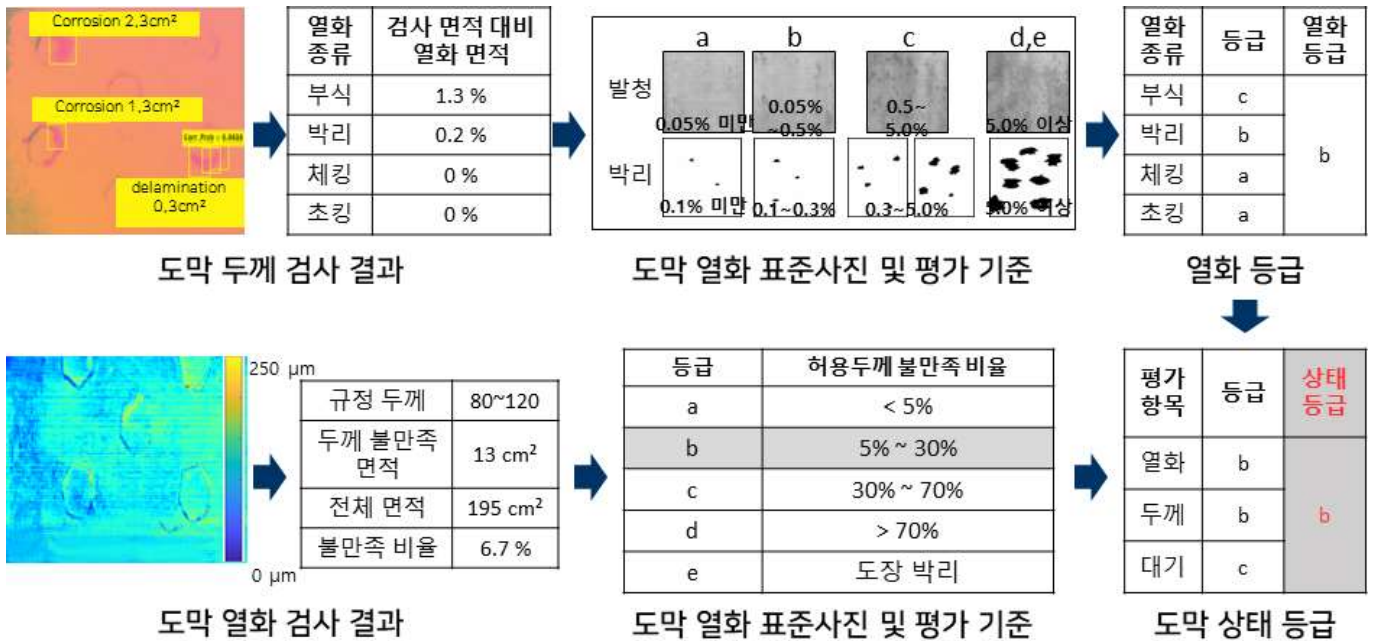


그림 39. 도막 검사 결과를 이용한 내구성능 등급 산정 개요도

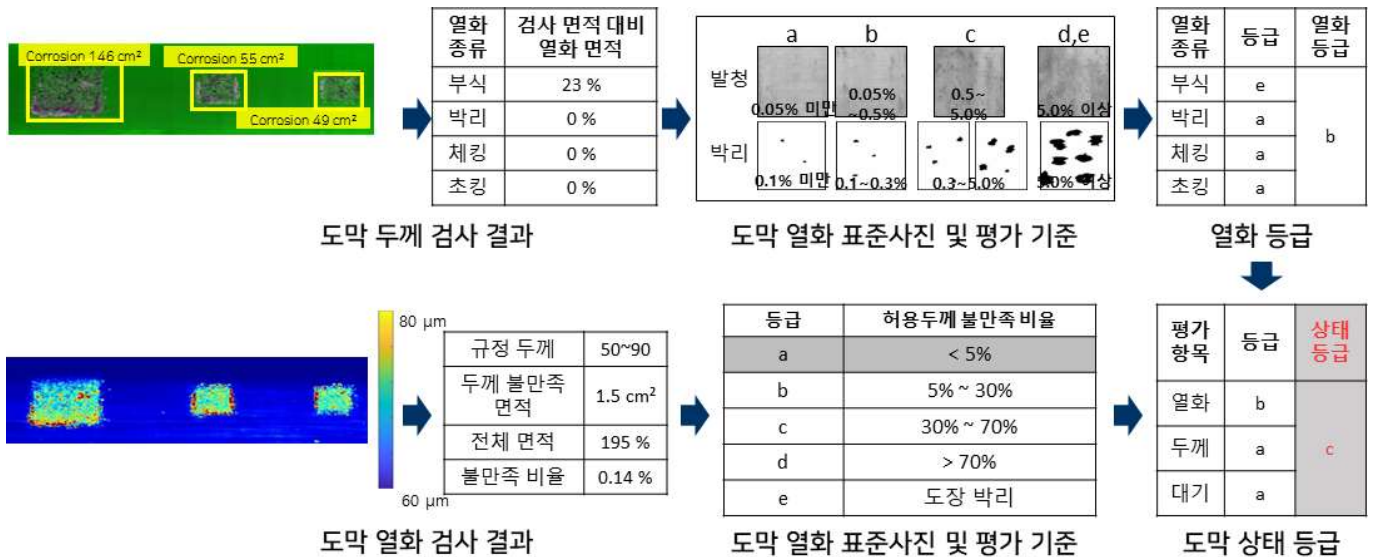


그림 40. 도막 상태평가 등급 산정 결과

- 핵심성과 4-1: 이중 영상계측시스템, 무인 로봇 플랫폼, 도막 상태평가기법 통합 및 시제품 개발
  - 열화상/비전 영상계측시스템과 제어부를 1차연도에 개발한 무인 로봇 플랫폼에 탑재한 시제품을 개발함. 계측 대상 구조물과 열화상 카메라/비전 카메라 간 최소 이격거리와 이동로봇의 영구자석 바퀴로부터의 노이즈 영향을 고려하여 설계 및 디자인하였음.
  - 금속 절곡 및 용접을 이용한 시제품 케이스를 제작하였으며, 최종 시제품 무게는 12.1 kg (전체 하드웨어 무게: 8.5 kg, 케이스 무게: 3.6 kg), 부피는 300x250x350 mm<sup>3</sup>으로 측정됨 (과제 목표 무게 13 kg, 부피 300x250x350 mm<sup>3</sup>)
  - 시제품의 상품성 향상을 위해 디자인적 요소를 고려한 케이스를 제작할 계획임. 유선형 형태를 사용하여 미래지향적 디자인을 설계하였음. 해당 디자인은 금속 절곡과 3D 프린팅을 이용하여 제작할 계획이며, 부피는 약 310x435x360 mm<sup>3</sup> (구동시) 310x310x410 mm<sup>3</sup> (보관시)로 예상됨.

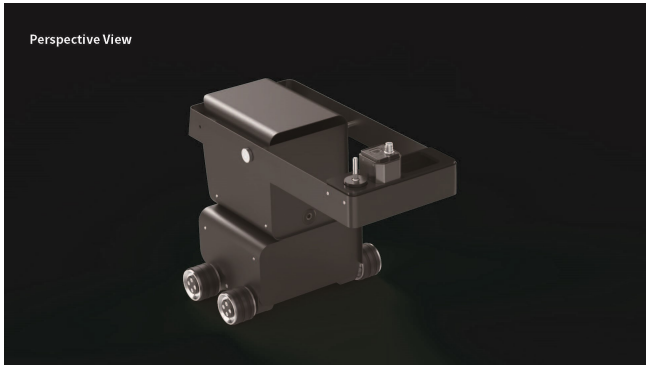


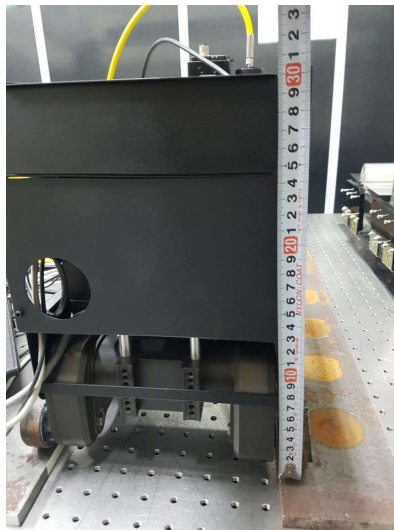
그림 41. 시제품 컨셉도



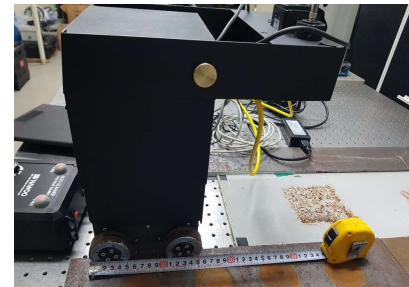
그림 42. 시제품 실물



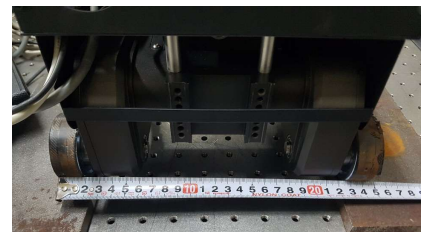
<전체 무게>



<높이>



<세로>



<가로>

그림 43. 시제품 실측 치수



구동시



보관시

그림 44. 유선형 디자인 케이스 컨셉도

- 핵심성과 4-2: 열화상 및 비전 영상 계측 안정성 확보를 위한 시제품 최적화
  - 계측 안정성을 위해 우선적으로 이동 로봇 프레임과 검사 대상 구조물간 부착력을 고려하였으며, 220 mT 이상 (2,200 가우스) 영구자석 바퀴 4개를 사용하여 부착력 20 kgf를 확보함. 또한 이동 로봇 플랫폼과 이중영상계측시스템 고정을 위해 시제품 케이스와 이동로봇 사이에 4개의 M3 사이즈 볼트체결을 하여 전체 시스템 및 케이스가 강제 운동을 할 수 있도록 설계함. 개발 시제품을 영종대교와 광안대교에서 현장시험을 수행했으며, 90도 경사 벽면에 안정적으로 부착했으며, 등속 주행이 가능함을 확인함. 개발 시제품을 이용해 계측한 영상 또한 안정적임을 확인함.
  - 안정적인 영상 송수신을 위해 열화상/비전 카메라와 제어 컴퓨터를 유선으로 연결하였으며, 전체 장비 구동 시 전력 안정성을 위해 유선 전력 공급방식을 채택함. 현재 개발 시제품 사용 전력은 30 m 길이의 리드선과 멀티탭을 이용하여 공급되고 있으며, 핵심성과 2에서 달성한 이동 로봇 플랫폼 30 m 유선 전력 공급에 맞추어 30 m 전선을 이용한 전원 공급 가능 여부를 자체적으로 추가 검증을 진행할 계획임. 추가 검증에서는 최대 30 m 이동 시 작용하는 전력 케이블 하중으로 인한 인장력 등을 고려해야 하며, 개발 시제품이 수직, 수평, 상하 반전 이동할 때 표면 미끄러짐 없이 정상 주행이 가능한지, 전력 공급이 안정적인지 검증할 계획임.
  - 본연구 로봇개발 연구범위는 강구조물 평판 부분 이동이 가능한 로봇개발로 국한됨. 추후 별도연구 개발을 통한 볼트 체결부 및 격막 등이 이동 가능한 로봇개발이 요구됨.



그림 45. 이동바퀴 자력 측정



그림 46. 이동 로봇 플랫폼과 이중 영상계측장치 연결부

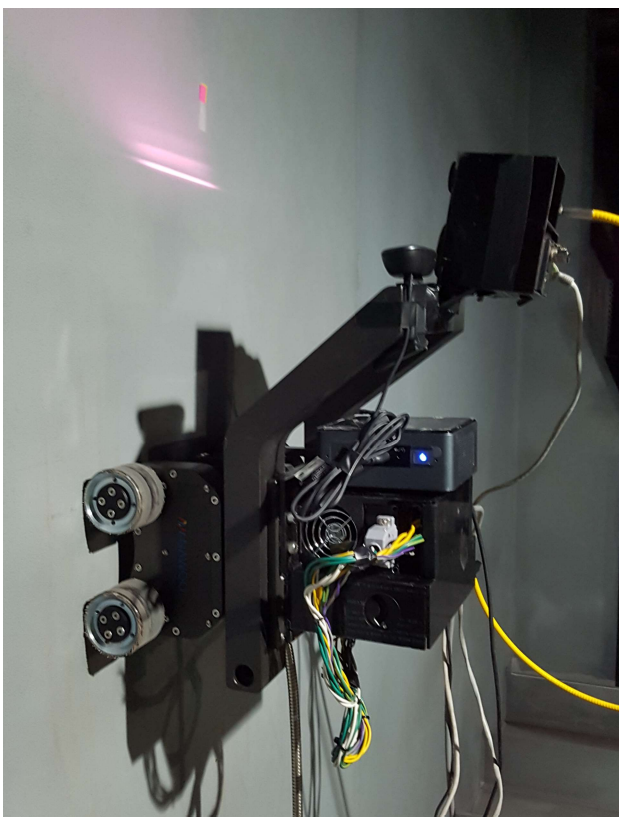


그림 47. 영종대교 박스 내부 벽면 이동



그림 48. 광안대교 박스 외부 벽면 이동

- 핵심성과 4-3: 장비 제어 및 도막 상태평가 결과 실시간 확인을 위한 소프트웨어 구축
  - 이중 계측시스템(열화상 카메라, 비전 카메라, 선형 레이저) 하드웨어와 계측 컴퓨터, 주행확인용 웹캠 제어 및 실시간 데이터 계측/저장이 가능한 소프트웨어를 구축함. MATLAB으로 개발된 도막 상태평가 알고리즘을 dll 형식으로 변환하여 C# 기반 GUI에 탑재시켰으며, 또한 이중 계측시스템 내 카메라 제어 및 실시간 데이터 저장을 위해 C++ 언어 및 Open CV library를 사용함.
  - 도막 상태평가가 보고서 작성을 위한 사용자 입력 정보 입력창을 별도 설정하였으며, 현장별로 상이한 도막 등급 평가 기준(허용 도막 두께, 부재별 가중치) 입력을 가능하도록 GUI를 제작함.
  - 소프트웨어를 활용하여 광안대교 현장 실험을 수행하였으며, 열화상/비전 카메라, 레이저 열원 제어가 가능하며, 실시간으로 30 Hz 열화상 및 비전 영상 계측 가능함.
  - 1분 간 영상 계측 후 도막 상태평가 소요 시간 58 초 소요 (열화상 이미지 전처리 및 도막 두께 정량화/시각화 35초, 비전 이미지 전처리 및 영상 정합 18초, 도막 열화 탐지/분류/정량화 5초)

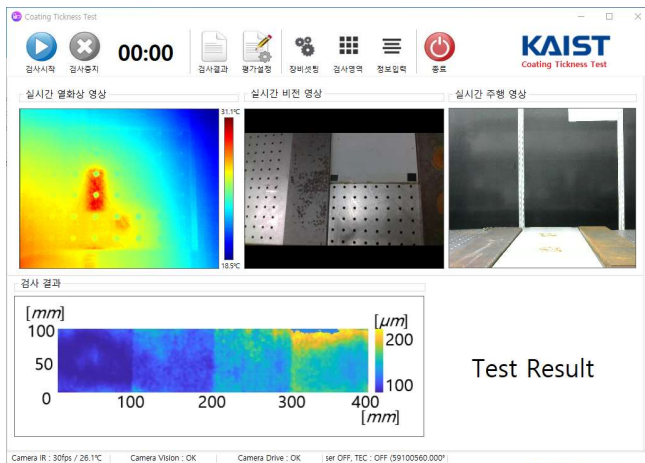


그림 49. 소프트웨어 메인 화면

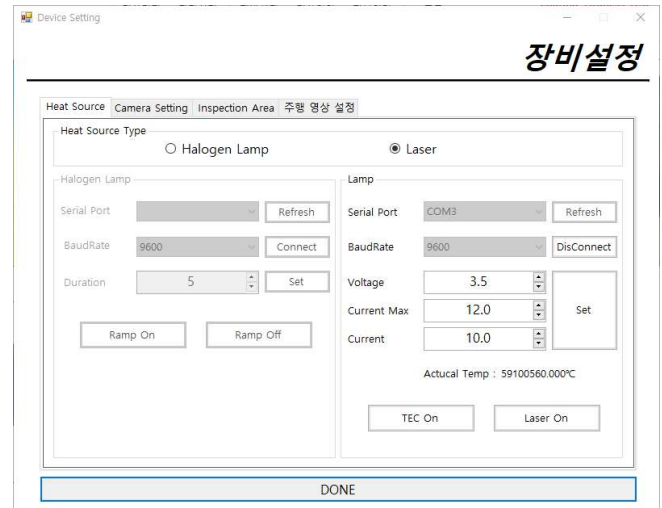


그림 50. 열원(레이저 및 할로겐) 제어 화면

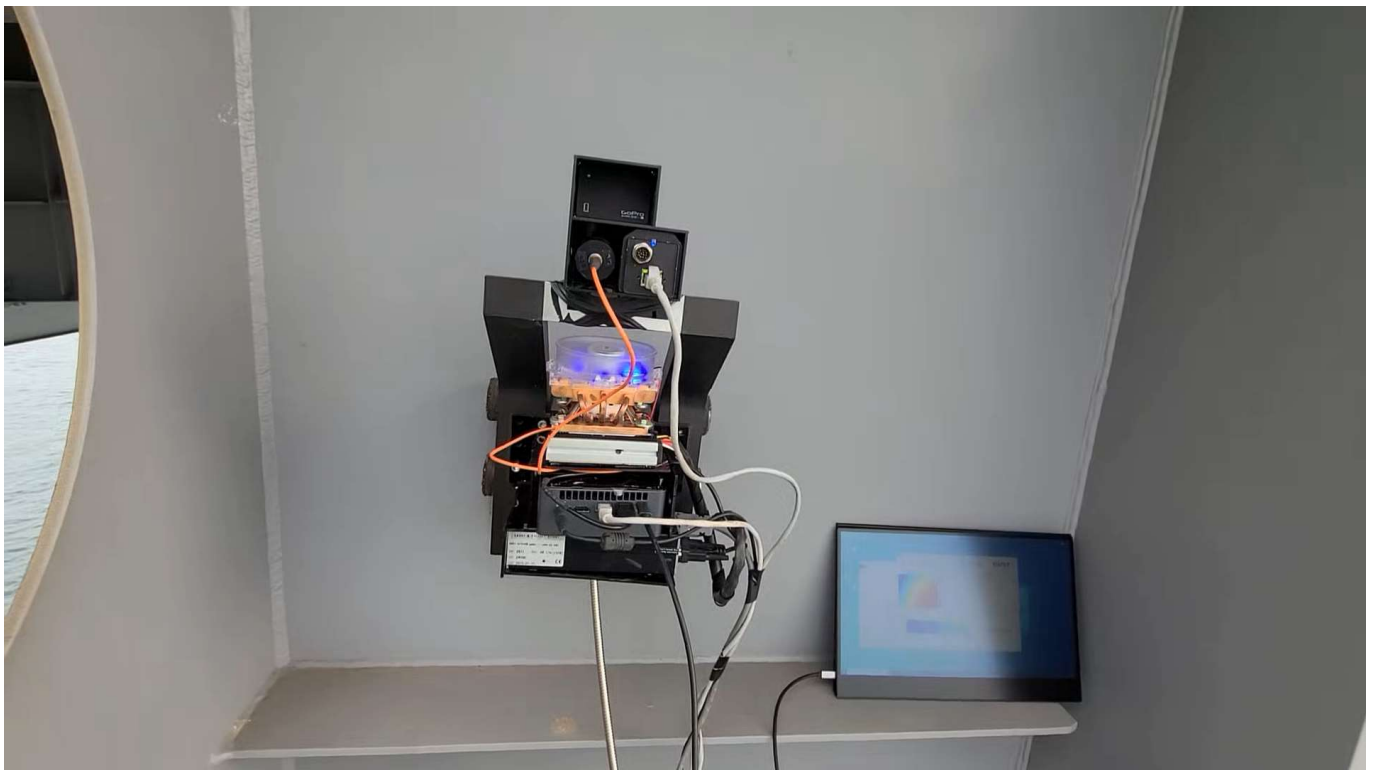


그림 51. 개발 소프트웨어를 이용한 광안대교 현장 실험 수행

■ 핵심성과 5: 개발 시제품 현장 성능검증

- 목표 산업군인 건설업, 석유화학업, 조선업에 맞춰 각 산업별 1개소 이상에 대해 현장실험을 수행함. 건설업은 성산대교(2021.01), 석유화학업은 SK인천석유화학(2021.09), 조선업은 현대중공업(2021.09)과 삼성중공업(2021.12)에서 실험을 수행함.
- 성산대교는 1주 이내 재도장된 성산대교 남단 접속부의 정상 영역에 대해 현장검증을 수행함. 표면에 불균일한 영역을 개발 알고리즘 결과를 통해 확인할 수 있었으며, 검사 영역의 도막 두께가 모두 허용 범위 내에 있음을 확인하여 정상적으로 재도장 되었음을 확인함.
- SK인천석유화학은 플랜트 시설물 하단 재도장부에 대해 현장검증을 수행하였으며, 해당 영역은 수차례 시설물 검사로 인해 재도장되어 박리와 부식이 발생한 영역임. 개발 알고리즘을 통해 검사한 결과 내부 박리를 탐지할 수 있었으며, 기존 표면 박리가 발생한 부위에 재도장한 영역을 열화상 이미지를 통해 탐지할 수 있음. 도막 두께 변화 영역 탐지가 가능하였으며, 표면 오염이 이중 영상계측시스템을 통해 결함으로 오탐지 되지 않음을 확인함.
- 현대중공업은 울산 현대중공업 내에 위치한 선박 실사 모형에 대해 현장검증을 수행함. 도막 두께 변화 영역을 확인할 수 있으며, 육안 확인이 불가능한 내부부식을 탐지함. 또한, 기존 부식 발생 영역 내에서도 부식 발생 정도가 심한 영역을 개발 알고리즘으로 확인함.
- 삼성중공업은 평균 도막두께 750  $\mu\text{m}$  이상의 두꺼운 도막 두께에 대해 검사를 수행하였으며, 동일 검사 영역에 대해 검사 속도를 구분하여 시험을 수행함. 검사 시간이 증가할수록 도막 두께 정량화 정확도는 향상되었으며, 검사 영역 전체를 15, 20, 25, 60 min동안 스캐닝할 경우, 평균 도막두께 대비 도막 두께 오차는 6.5 %로 나타났으며, 스캐닝 시간이 증가할 경우 오차율이 낮아지는 경향을 보임.



성산대교 (2021.01.25~27)



SK인천석유화학 (2021.09.15~16)



현대중공업(2021.09.09.~10)



삼성중공업 (2021.12.29.~30)

그림 52. 현장 및 시험 일시

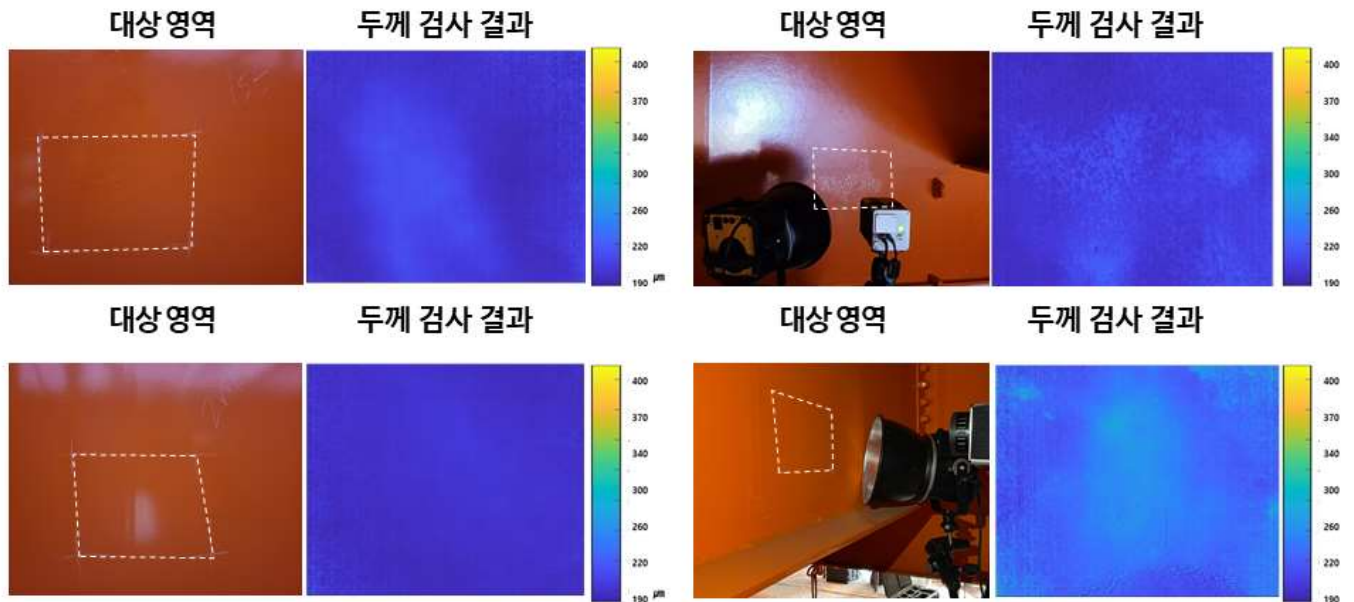


그림 53. 성산대학교 현장실험 결과

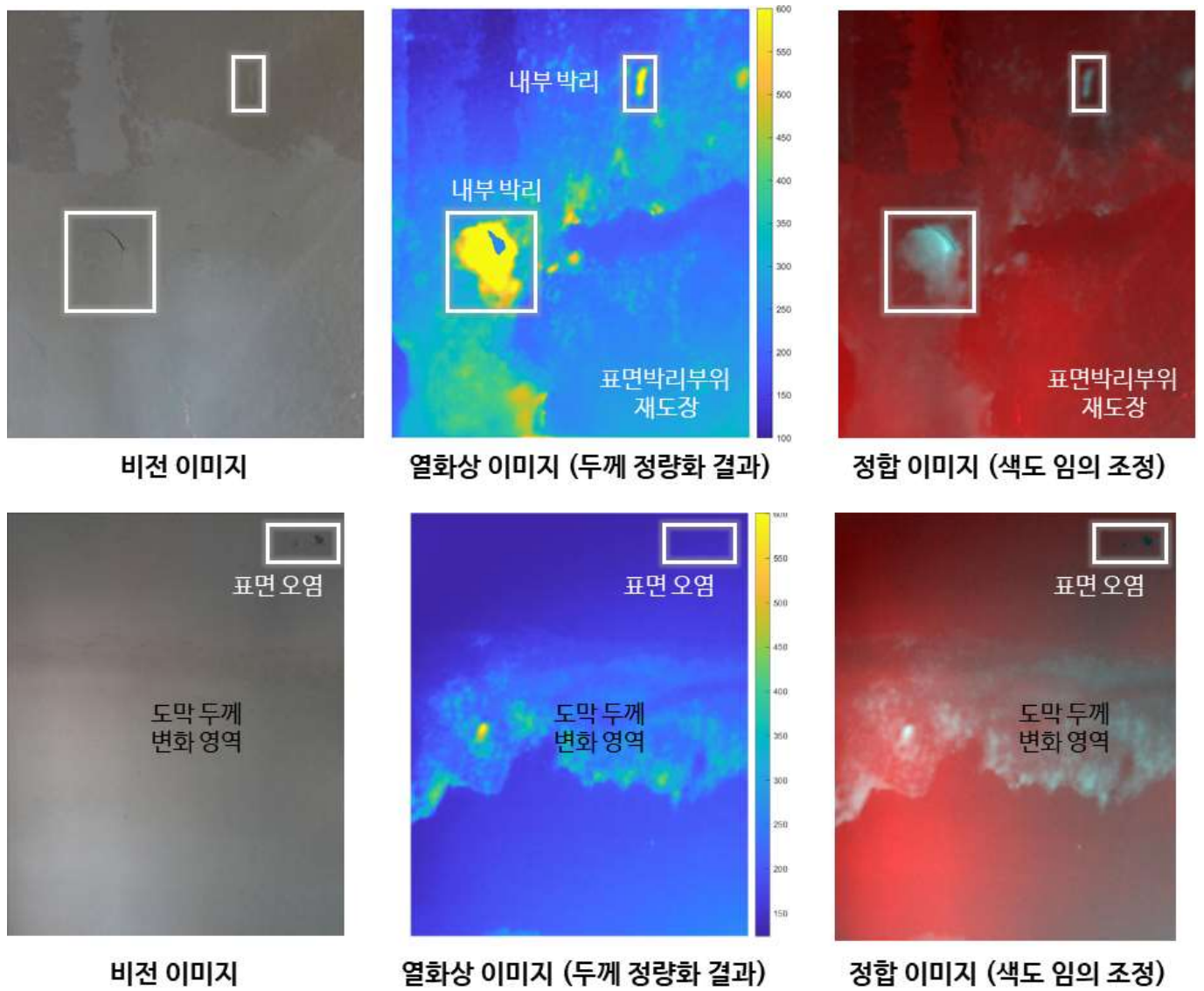
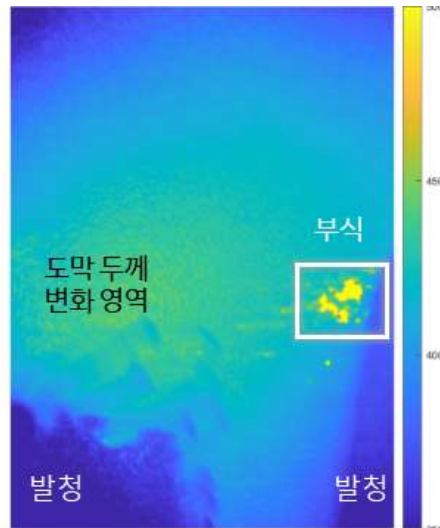


그림 54. SK인천석유화학 현장실험 결과



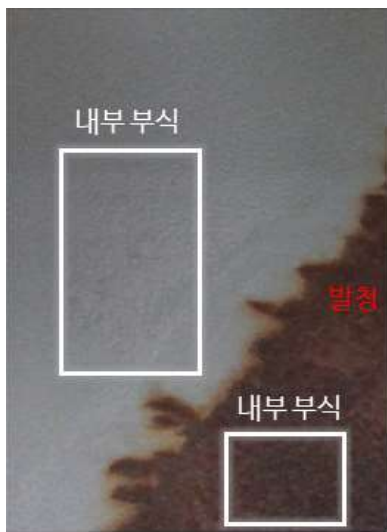
비전 이미지



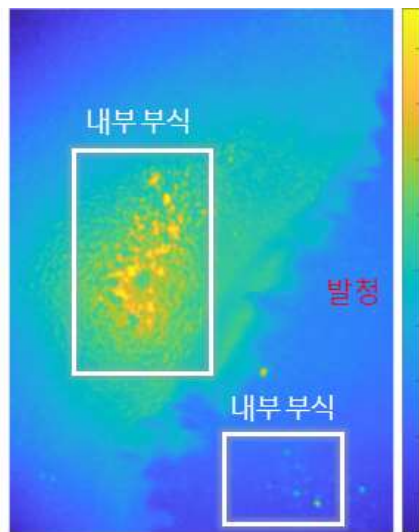
열화상 이미지 (두께 정량화 결과)



정합 이미지 (색도 임의 조정)



비전 이미지



열화상 이미지 (두께 정량화 결과)



정합 이미지 (색도 임의 조정)

그림 55. 현대중공업 현장실험 결과

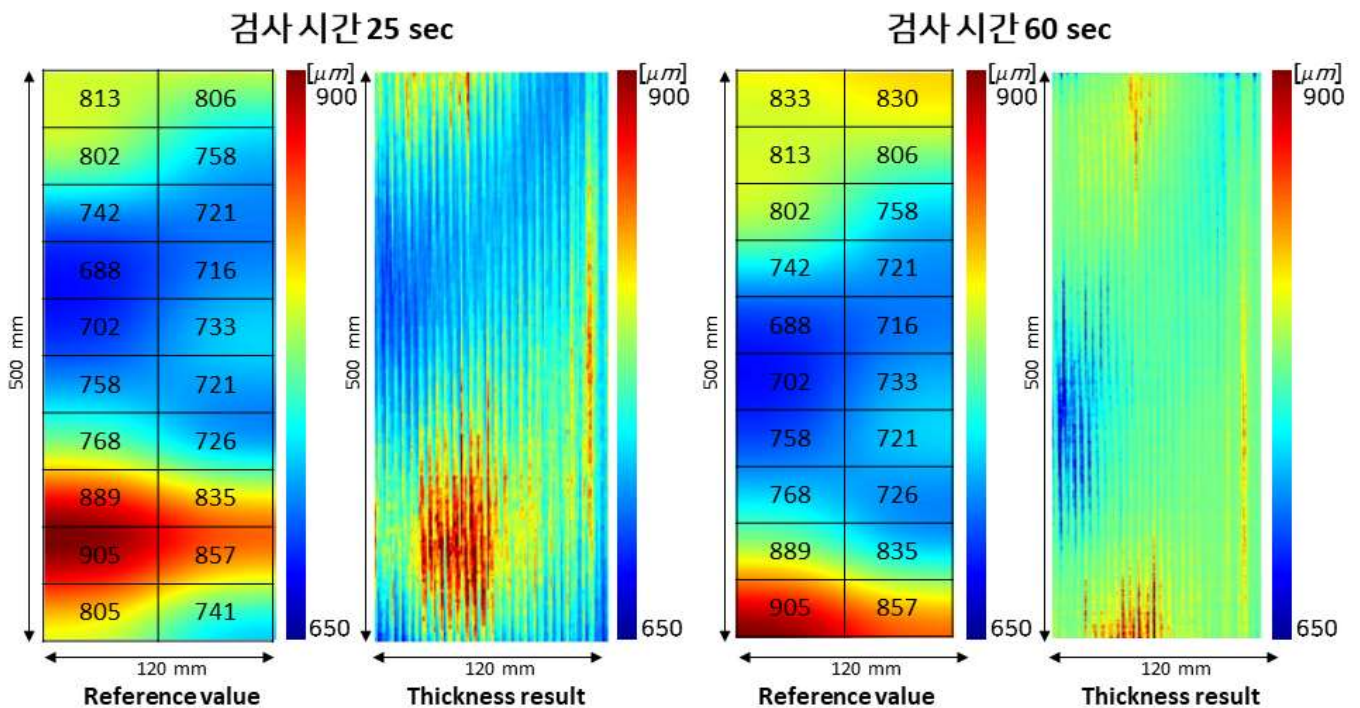


그림 56. 삼성중공업 현장실험 결과

■ 핵심성과 6: 개발 시제품 상용화

- 개발 시제품 성능 인증을 위해 KOLAS 인증기관인 건설품질연구원(ICQT)에 의뢰하여 도막 두께 정량화 정확도, 열화 분류 신뢰도, 열화 영역 정량화 정확도 항목에 대해 성능 시험을 수행함(인증서 발급일자: 21.01.21). 성능검사 결과 도막 두께 해상도는 17.2575  $\mu\text{m}$ , 열화 분류 신뢰도 95 % 이상, 열화 면적 정량화 정확도 1  $\text{cm}^2$  급으로 개발 기술의 성능을 검증받음.
- 개발 시제품의 판로를 개척하기 위해 건설신기술 신청을 완료하였으며, 2021년 12월에 1차 심사를 통과함. 2022년 1월 25일 현장 실사 예정이며, 실사 대상은 3차년도 현장 적용 실적이 있는 성산대교임.
- 연구성과 홍보를 위해 대우건설 실무진과의 미팅을 통해 개발 기술 및 시제품을 홍보함 (2021.04.02.). 또한, 국제학회인 EMI/PMC를 비롯하여 한국구조물유지관리공학회 가을 학술발표회, 대한토목학회 2021 CONVENTION, 한국비파괴검사학회 추계학술대회 등 관련 학회에 참가하여 구두발표로 연구성과를 홍보함.
- 2차년도 개발한 시제품의 외관 및 사용성을 높이기 위해 별도 디자인 업체를 통해 외부 케이스 디자인 개선을 수행하였으며, 수행한 결과 무게 15.47 kg, 부피 530x380x400  $\text{mm}^3$  로 기존에 비해 외관상 케이블 노출이 최소화 되었으며, 내부 하드웨어 고정성이 향상되어 보다 안정적으로 시제품을 운용할 수 있게 됨.

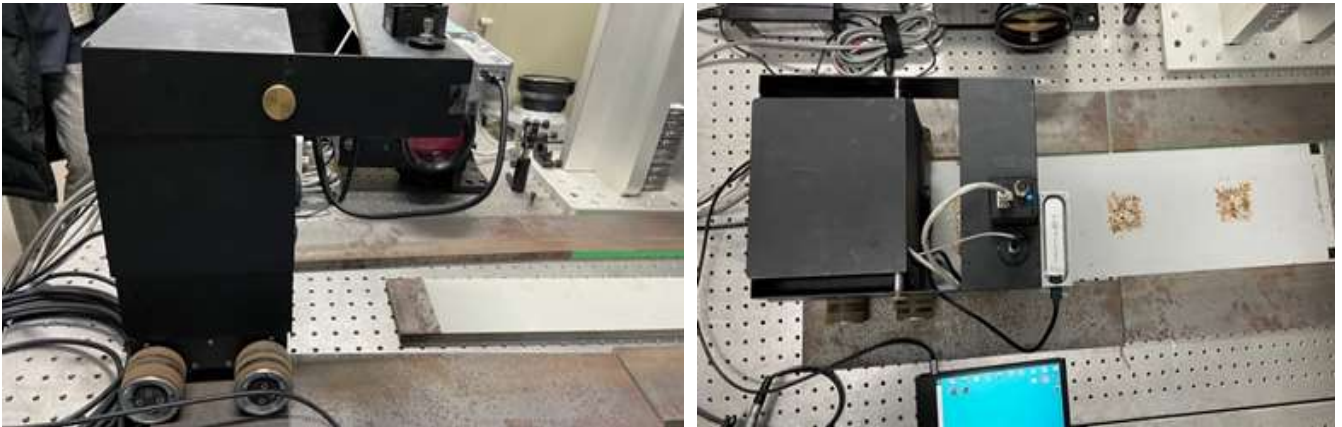


그림 57. 성능시험 현장 사진

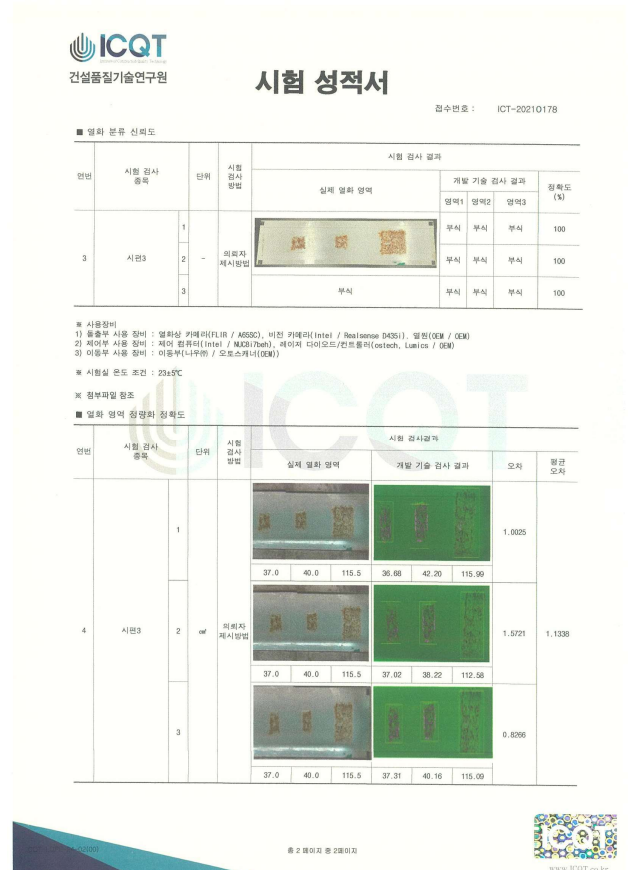
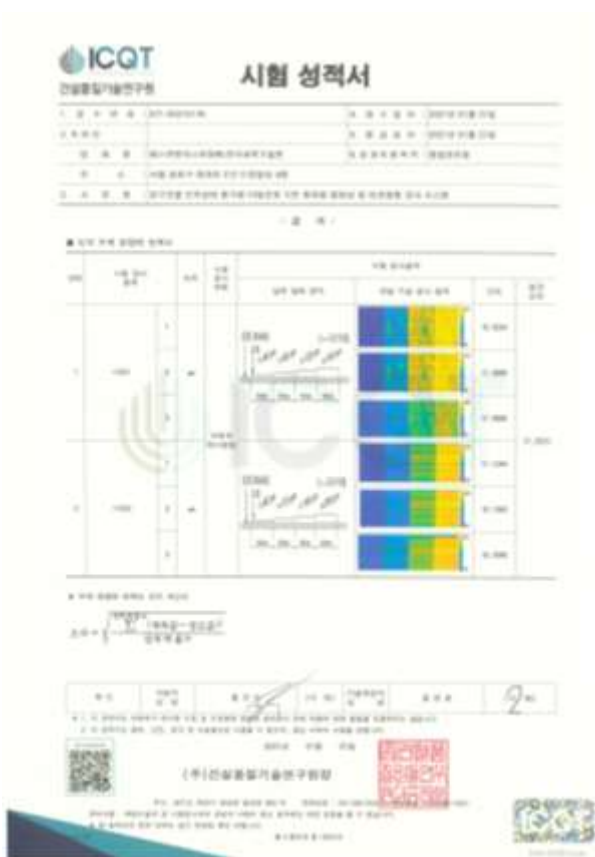


그림 58. 성능시험 시험성적서 (발급기관: 건설품질기술연구원)

## 신기술 지정신청서

| 유형번호                  | 중요도                                                                                                                                                                | 실적현황                                            | 제정연도 | 조성액           |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------|---------------|
| 신기술<br>융합             | 강구조철근 도막 상태평가기 위한 알고리즘 기반의 실시간 열화상 및 비선형 동특성측정시스템                                                                                                                  |                                                 |      |               |
| 기술을<br>개발 또는<br>개량한 자 | 심호 또는 연평 한국과학기술원                                                                                                                                                   | 사업자등록번호(법인등록번호)<br>314-82-01098(114471-000068)  | 연건월일 | 1954년 11월 15일 |
| 기술을<br>개발 또는<br>개량한 자 | 심영태/최지우 /이희준                                                                                                                                                       | 전화번호 02-3450-3625                               |      |               |
| 기술을<br>개발 또는<br>개량한 자 | 송수 태권식 송규 태권보                                                                                                                                                      | 251 한국과학기술원 WVI -2번 4201호                       |      |               |
| 기술을<br>개발 또는<br>개량한 자 | 심호 또는 연평 에스케이아이연구원                                                                                                                                                 | 사업자등록번호(법인등록번호)<br>320-81-01042(110111-1554729) | 연건월일 | 1967년 1월 5일   |
| 기술을<br>개발 또는<br>개량한 자 | 심영태/최지우 /이희준                                                                                                                                                       | 전화번호 02-400-5200                                |      |               |
| 기술을<br>개발 또는<br>개량한 자 | 송수 서울시 송구로 중로터 212가동, 드림빌딩 4층                                                                                                                                      |                                                 |      |               |
| 신기술<br>내용             | 에 신기술은 열화상 및 비선 카메라를 융합한 계측 오검출 특화된 강구조철근 도막 평가 이미지 처리 도막 상태평가 알고리즘으로 설계된 분석처리 소프트웨어 플랫폼(하드웨어, 제어, 통신) 플랫폼, 데이터, 유무선 수직형 시뮬레이션 도구와 도막 및 강구조철근의 상태평가용으로 평가되는 시스템이다. |                                                 |      |               |
| 신기술의<br>발전            | 열화상 및 비선 카메라를 융합한 계측 오검출 강구조철근 도막 평가 이미지 처리 특화된 알고리즘으로 분석처리 도막 및 강구조철근의 상태평가 및 자동화로 설계하는 시스템                                                                       |                                                 |      |               |

「간접기술 진흥법」 제14조, 같은 법 시행령 제31조 및 같은 법 시행규칙 제7조에 따라  
선기술 지장을 신청합니다.

신정인 한국과학기술원  
에스앤엠지니어링과

국토교통부장관 귀하

[illegible]

## ○ 신청기술관련 국가연구개발사업 참여 내역

표 11. 선행기술관련 국가연구개발사업 총액 내역

[illegible]

## ○ 기술개발 관계자

- 선택형

표 12. 신기술 개발자의 주요 역할

| 신원인  | 개발자 | 주요 역할내용         | 출발자료    |
|------|-----|-----------------|---------|
| 신원인1 | 손 흥 | -기밀자료 송출 책임자    | 별표 555쪽 |
|      | 황순광 | -업고리류 개발        | 별표 555쪽 |
|      | 김관진 | -업고리류 개발        | 별표 555쪽 |
|      | 이종우 | -업고리류 개발        | 별표 555쪽 |
| 신원인2 | 손호윤 | -기밀자료 책임자       | 별표 556쪽 |
|      | 전재권 | -합비개발 및 현상자료 송출 | 별표 556쪽 |
|      | 김관진 | -합비개발 및 현상 자료   | 별표 556쪽 |

- 10 -

그림 59. 신기술 신청서 및 신청서 내 연구과제 내용



그림 60. 대우건설 기술 홍보 및 미팅 (2021.04.02)

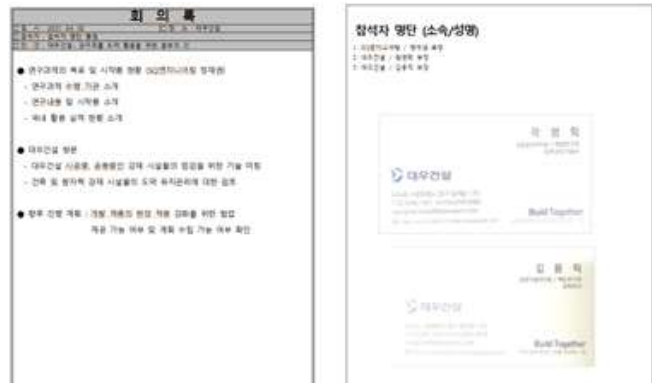


그림 60. 대우건설 기술 홍보 및 미팅 (2021.04.02)



그림 61. EMI/PMC 제출 초록 및 발표자료 (Virtual Event, 2021.05.26)

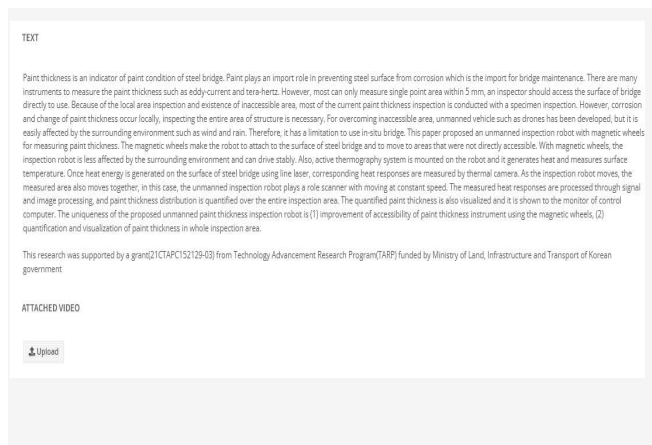




그림 62. 한국비파괴검사학회 추계학술대회 (2021.10.29)

| 시 간                |                                                                                                                             | 논문 제목 및 저자                |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| <b>적외선열화상 (I)</b>  |                                                                                                                             | <b>좌장: 최만용(한국표준과학연구원)</b> |
| 09:00-09:25        | [초청강연]<br>적외선 융합센싱을 이용한 AI기반 지능형 화재감시 기술<br>김수연(한신여대교수)                                                                     |                           |
| 09:25-09:40        | 강구조물 도막 상태평가를 위한 휴대용 능동 열화상 및 비전 결합 시스템 개발<br>김현진(한국과학기술원)                                                                  |                           |
| 09:40-09:55        | 수력발전 급수관의 이종금속 용접부에 대한 위상잠금 적외선열화상 탐상 기법 연구<br>김준영(남에네스지)                                                                   |                           |
| <b>적외선열화상 (II)</b> |                                                                                                                             | <b>좌장: 강기수(한국폴리텍대학)</b>   |
| 10:20-10:45        | [초청강연]<br>인체의 체온 조절<br>김정호(한국대학교)                                                                                           |                           |
| 10:45-11:00        | Wavelet Transform Applied to Active Thermography Signal for Detection of Wall Thinning in Aluminum Structures<br>정윤호(공주대학교) |                           |
| 11:00-11:15        | 발전용 증기터빈의 Titanium LSB에 대한 위상잠금 적외선열화상 탐상에서 인공결함의 열적 반응 고찰<br>김창선(남에네스지)                                                    |                           |
| 11:15-11:30        | 능동 적외선열화상을 활용한 열 일개값 기반 자동화 결함 검출<br>이승우(공주대학교)                                                                             |                           |
| <b>방사선 (III)</b>   |                                                                                                                             | <b>좌장: 심철무(한국원자력연구원)</b>  |
| 11:40-12:05        | [초청강연]<br>DRT의 국제 규제 고찰<br>이윤호(나우퍼)                                                                                         |                           |
| 12:05-12:20        | DRT ISO 9712 Level II Certification for 위한 Interactive 토론<br>심철무(한국원자력연구원)                                                  |                           |
| 12:20-12:35        | DRT ISO 9712 Level II Certification for 위한 Interactive 토론<br>이영석(한국핵융합에너지연구원), 박형근(DNV-GU)                                  |                           |
| 12:35-12:50        | DRT ISO 9712 Level II Certification for 위한 Interactive 토론<br>이윤호(나우퍼), 오호숙(원광대학교)                                           |                           |



그림 63. 대한토목학회 2021 convention (2021.10.21.)

[illegible]

그림 64. 한국구조물진단유지관리공학회 (2021.11.18)

### 3.4. 연도별 정량적 연구성과 목표 및 달성도

| 구분              |           | 1차연도 |              | 2차연도   |              | 3차연도 |              | 계      |                  |
|-----------------|-----------|------|--------------|--------|--------------|------|--------------|--------|------------------|
|                 |           | 목표   | 달성           | 목표     | 달성           | 목표   | 달성           | 목표     | 달성               |
| 국외 논문<br>게재     | SCI       | 0    | 1            | 1      | (초기 달성)      | 2    | 2건<br>심사 중   | 3      | 3<br>(2건<br>심사중) |
|                 | 비SCI      |      |              |        |              |      |              |        |                  |
|                 | 계         | 0    | 1            | 1      | 0            | 2    | 2            | 3      | 3                |
| 국내 논문<br>게재     | SCI       |      |              |        |              |      |              |        |                  |
|                 | 비SCI      |      |              |        |              |      |              |        |                  |
|                 | 계         |      |              |        |              |      |              |        |                  |
| 특허출원            | 국내        | 1    | 1            | 0      | 1<br>(추가 달성) |      |              | 1      | 2<br>(추가 달성)     |
|                 | 국외        |      |              | 0      | 2<br>(추가 달성) |      |              |        | 2<br>(추가 달성)     |
|                 | 계         | 1    | 1            | 0      | 3<br>(추가 달성) |      |              | 1      | 3<br>(추가 달성)     |
| 특허등록            | 국내        |      |              | 1      | 1            |      |              | 1      | 1                |
|                 | 국외        |      |              |        |              |      |              |        |                  |
|                 | 계         |      |              | 1      | 1            |      |              | 1      | 1                |
| 인력양성            | 석사        |      |              | 1      | 1            |      |              | 2      | 1                |
|                 | 박사        |      |              | 1      | 1            |      |              | 1      | 1                |
|                 | 계         |      |              | 2      | 2            |      |              | 3      | 2                |
| 기술이전            | 계약건수      | 0    | 1<br>(추가 달성) | 1      | 1            |      |              | 1      | 2<br>(추가 달성)     |
|                 | 계약액       | 0    | 100,000      | 50,000 | 50,000       |      |              | 50,000 | 150,000          |
|                 | 징수액       | 0    | 100,000      | 50,000 | 50,000       |      |              | 50,000 | 150,000          |
| 국제 표준화          | 기고서 제출    |      |              |        |              |      |              |        |                  |
|                 | 기고서 채택    |      |              |        |              |      |              |        |                  |
|                 | 표준안 채택    |      |              |        |              |      |              |        |                  |
| 국내 표준화          | 기고서 제출    |      |              |        |              |      |              |        |                  |
|                 | 기고서 채택    |      |              |        |              |      |              |        |                  |
|                 | 표준안 채택    |      |              |        |              |      |              |        |                  |
| 등록·기탁<br>대상 성과물 | 보고서 원문    |      |              |        |              |      |              |        |                  |
|                 | 연구시설·장비   |      |              |        |              |      |              |        |                  |
|                 | 기술요약정보    |      |              |        |              |      |              |        |                  |
|                 | 생명<br>자원  | 생명정보 |              |        |              |      |              |        |                  |
|                 |           | 생물자원 |              |        |              |      |              |        |                  |
|                 |           | 신품종  |              |        |              |      |              |        |                  |
|                 | 소프트웨어     |      |              | 1      | 2<br>(추가 달성) |      |              | 1      | 2<br>(추가 달성)     |
|                 | 화학물       |      |              |        |              |      |              |        |                  |
|                 | 시제품 국가인증  |      |              |        |              | 1    | 1            | 1      | 1                |
|                 | 건설 신기술 신청 |      |              |        |              | 1    | 1            | 1      | 1                |
| 기타              | 시제품       |      |              | 1      | 1            |      |              | 1      | 1                |
|                 | 현장 시연/적용  |      |              |        | 1<br>(초기 달성) | 3    | 4<br>(추가 달성) | 3      | 5<br>(추가 달성)     |
|                 | 성과 홍보     |      | 1<br>(추가 달성) |        | 2<br>(추가 달성) | 5    | 5            | 5      | 8<br>(추가 달성)     |
|                 | 사업화       |      |              |        | 8<br>(추가 달성) |      | 1<br>(추가 달성) | 0      | 9<br>(추가 달성)     |

### 3.5. 연도별 성과 목표 및 자체 평가

#### ■ 1차연도 성과 목표에 대한 자체 평가

|            | 단위성과                                             | 성과지표                              | 목표                          | 달성                          | 달성도   | 내용                                                                                                                |
|------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 질적<br>성과목표 | 레이저, LED, 램프 등을 열원으로 사용하는 열화상 시스템 개발             | 최대 장비 이격거리                        | 1 m                         | 1 m                         | 달성    | 두께 차 40 $\mu$ m로 도포된 시편에 대해 레이저 열화상 시스템을 이용한 실험 수행<br>장비 이격거리 1 m에서 실험 수행<br>3가지 색상 시편 대해 도막 두께 변화 탐지 및 정량화 가능 확인 |
|            | 열화상 및 비전 영상 자동 동기화, 왜곡 보정, 정합이 가능한 이중 영상계측시스템 개발 | 이중 영상시스템 무게                       | 6 kg                        | 2.61 kg                     | 달성    | 비전 카메라, 열원(선형 레이저), 열화상 카메라를 포함한 이중 영상시스템 무게 측정                                                                   |
|            |                                                  | 이중 영상시스템 부피                       | 250×250×200 mm <sup>3</sup> | 240×215×110 mm <sup>3</sup> | 달성    | 이중 영상시스템의 가로, 세로, 높이 측정                                                                                           |
|            | 고해상도 (HD급) 및 고속 (60Hz) 열화상 및 비전 영상 실시간 처리기술 개발   | 비전 및 열화상 영상 자동/실시간 재구축 알고리즘 처리 속도 | 20 sec                      | 6.04 sec                    | 달성    | 데이터 로드 및 Checkerboard 촬영 이미지를 이용한 왜곡 보정, 변환행렬 생성 소요시간 1.67초와 3개의 검사시편 이미지 정합 소요 시간 4.37초 합 (Matlab 2017b 기준)      |
|            | 강구조물 검사를 위한 연구자석기반 부착형 무인 주행 로봇 플랫폼 개발           | 로봇 플랫폼 최대 이동속도                    | 1.5 m/min                   | 1.5 m/min                   | 달성    | 최대 이동속도 1.5 m/min 및 등속 주행 가능                                                                                      |
|            |                                                  | 로봇 플랫폼 이동 축                       | 2축                          | 2축                          | 달성    | 전후, 좌우 2축 이동 가능                                                                                                   |
|            |                                                  | 로봇 플랫폼 무게                         | 8 kg                        | 6.67 kg                     | 달성    | 연구자석을 포함한 이동 로봇 플랫폼 무게 측정                                                                                         |
|            |                                                  | 로봇 플랫폼 부피                         | 300×250×200 mm <sup>3</sup> | 275×145×150 mm <sup>3</sup> | 달성    | 이동 로봇 플랫폼 가로, 세로, 높이 측정                                                                                           |
|            | 특수 임무 수행을 위한 이중 영상계측시스템 탑재부 개발                   | 최대 탑재 가능 무게                       | 10 kg                       | 11.23 kg                    | 달성    | 목표 하중에 해당하는 물체를 시제품 위에 올리고 평지 주행가능 여부 확인                                                                          |
|            | 원거리 전력 및 영상 송수신 방안 마련                            | 전력 및 영상 송수신 거리                    | 30 m                        | 30 m                        | 달성    | 별도 케이싱된 30 m 케이블을 이용하여 이동 로봇 플랫폼 주행 조작 가능                                                                         |
| 양적<br>성과목표 | 강구조물 도막 상태평가를 위한 열화상 및 비전 기반 이중 영상계측시스템 개발       | 국내 특허 출원 건수                       | 1                           | 1                           | 달성    | 국내 특허 출원 완료                                                                                                       |
|            | 추가 달성                                            | SCI급 논문 게재                        | 0                           | 1                           | 조기 달성 | Smart Structure and System (SCI급) 저널에 논문 게재 (2019년 12월)                                                           |
|            |                                                  | 기술이전                              | 0                           | 1                           | 추가 달성 | 기술료 1억원 (부가세 별도)로 주관연구기관 보유 특허를 공동연구기관에 기술이전                                                                      |
|            |                                                  | 성과 홍보                             | 0                           | 1                           | 추가 달성 | 토목학회 부스 참가 및 개발 이동 로봇 플랫폼 시연                                                                                      |
|            |                                                  |                                   |                             |                             |       |                                                                                                                   |

■ 2차연도 성과 목표에 대한 자체 평가

|           | 단위성과                                                           | 성과지표                                   | 목표                              | 달성                                            | 달성도           | 내용                                                                                                        |
|-----------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 질적<br>성과표 | 인공지능 기반 도막<br>열화 분류 (부식,<br>박리, 채킹, 초킹) 및<br>넓이 정량화<br>알고리즘 개발 | 열화 영역 정량화 정확도                          | 1 cm <sup>2</sup>               | 1 cm <sup>2</sup>                             | 달성            | 실험실 보유 부식시편에 대해<br>열화 검사 수행                                                                               |
|           |                                                                | 열화 분류 신뢰도                              | 95 %                            | 96 %                                          | 달성            | 실험실 보유 부식시편 및<br>비전이미지를 이용한 검사 수행                                                                         |
|           |                                                                | 열화 영역 시각화 분해능                          | 1 cm <sup>2</sup>               | 가로 0.375<br>mm/pixel,<br>세로 0.267<br>mm/pixel | 달성            | 실험실 보유 부식시편에 대해<br>열화 검사 수행                                                                               |
|           | 인공지능 기반 도막<br>두께 분포<br>시각화 및 정량화<br>알고리즘 개발                    | 도막 두께 정량화 정확도                          | 20 μm                           | 13.81 μm                                      | 달성            | 30 W 선형 레이저 시스템을<br>이용하여 두께 차 40 μm로<br>정밀하게 도포된 시편에 대해<br>실험 수행                                          |
|           |                                                                | 도막 두께 시각화 분해능                          | 1 cm <sup>2</sup>               | 가로 0.375<br>mm/pixel,<br>세로 0.267<br>mm/pixel | 달성            | 전처리 이미지 pixel 수와 실제<br>계측 영역을 이용하여 산출                                                                     |
|           | 산업별 강구조물<br>내구성능 평가<br>기준에 따른 도막<br>상태평가 알고리즘<br>개발            | 도막 상태평가 알고리즘<br>개발 건수 (기준 적용<br>산업 건수) | 1 건                             | 1 건                                           | 달성            | 건설업(교량)에 대한 상태평가<br>알고리즘 개발 완료<br>전체 안전진단 보고서 자동<br>작성 알고리즘 개발 진행 중                                       |
|           | 이중<br>영상계측시스템,<br>무인 로봇 플랫폼,<br>도막 상태 평가기법<br>통합 및 시제품 개발      | 시제품 무게                                 | 13 kg                           | 12.1 kg                                       | 달성            | 최대 이동속도 1.5 m/min 및<br>등속 주행 가능                                                                           |
|           |                                                                | 시제품 부피                                 | 300×250<br>×350 mm <sup>3</sup> | 300×250×350<br>mm <sup>3</sup>                | 달성            | 영구자석을 포함한 이동 로봇<br>플랫폼 무게 측정                                                                              |
|           |                                                                | 배터리 최대 구동 시간                           | 1 hr                            | 유선 공급                                         | 달성            | 장시간 구동 및 전원 안전성을<br>위해 유선 전원 채택                                                                           |
|           | 열화상 및 비전 영상<br>계측 안정성 확보를<br>위한 시제품 최적화                        | 계측 안정성 수준<br>(영상 내 발생 진동 폭)            | 1 mm                            | < 1 mm                                        | 달성            | 220 mT 자력 영구자석을 이용한<br>20 kgf의 부착력 확보 및<br>볼트고정을 통한 고정                                                    |
|           | 장비 제어 및 도막<br>상태평가 결과<br>실시간 확인을 위한<br>소프트웨어 구축                | 실시간 도막 상태평가<br>시간                      | 1 min                           | < 1 min                                       | 달성            | 1분간 데이터 계측 후 도막<br>상태평가 결과 표출까지 시간<br>계측 (도막 두께 및 열화 검사)                                                  |
|           | 핵심성과                                                           | 성과지표                                   | 목표                              | 달성                                            | 달성도           | 내용                                                                                                        |
| 양적<br>성과표 | 인공지능 기반 자동<br>도막 상태평가 기법                                       | 국내 특허 등록                               | 1                               | 1                                             | 달성            | 국내 특허 등록<br>(번호: 10-2256181)                                                                              |
|           |                                                                | 기술이전                                   | 1                               | 1                                             | 달성            | 기술료 5,000만원 (부가세<br>별도, 경상기술료 3 %)로<br>주관연구기관 보유 특허를<br>공동연구기관에 기술이전                                      |
|           |                                                                | 논문(SCI)                                | 1                               | 0                                             | 1차연도<br>조기 달성 | Smart Structure and System<br>(SCI급) 저널에 논문 게재<br>(2019년 12월)                                             |
|           | 자동 및 실시간<br>강구조물 도막<br>상태평가 로봇<br>시제품                          | 시제품                                    | 1                               | 1                                             | 달성            | 무게 12.1 kg,<br>부피 300x250x350 mm <sup>3</sup><br>시제품 제작                                                   |
|           |                                                                | 소프트웨어                                  | 1                               | 2                                             | 달성            | 메인 GUI 및 장비 제어/실시간<br>계측 및 분석 기능 개발 완료<br>세부 알고리즘 수정 중                                                    |
|           | 추가 달성                                                          | 국내 특허 출원                               | 0                               | 1                                             | 추가 달성         | 1차연도에 기술 이전한 특허를<br>활용한 도막 두께 검사 시스템<br>특허 출원                                                             |
|           |                                                                | 사업화                                    | 0                               | 8                                             | 추가 달성         | KNOC QNOC, 한국석유공사<br>여수지사 입찰하부두,<br>울산대교,<br>인천 영종대교,<br>신대구부산고속도로,<br>광주제2순환도로, 성산대교,<br>당진화력발전소 안전진단 용역 |
|           |                                                                | 현장 시연 (기술 홍보)                          | 0                               | 1                                             | 추가 달성         | 부산 광안대교 현장 적용 실험<br>수행 및 기술 현장 시연                                                                         |
|           |                                                                | 성과 홍보                                  | 0                               | 2                                             | 추가 달성         | 한국구조물진단유지관리공학회<br>여름 학술발표회<br>대한토목학회 2020 CONVENTION                                                      |

■ 3차연도 성과 목표에 대한 자체 평가

|                            | 단위성과                                  | 성과지표                      | 목표  | 달성   | 달성도   | 내용                                                                                                                                               |
|----------------------------|---------------------------------------|---------------------------|-----|------|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 전<br>년<br>성<br>과<br>목<br>표 | 강교량 바닥판 및 측면부 도막 상태평가                 | 강교량 부재 대상 성능검증            | 1 건 | 1 건  | 달성    | 도막 상태평가 두께 정량화 정확도 20 $\mu$ m, 도막 열화분류 신뢰도 95% 달성 여부 확인                                                                                          |
|                            | 플랜트 및 배관 시설물 도막 상태평가                  | 플랜트 및 배관 시편 대상 성능검증       | 1 건 | 1 건  | 달성    |                                                                                                                                                  |
|                            | 선박 외판 및 평형수 탱크 도막 상태평가                | 선박 외판 및 평형수 탱크 시편 대상 성능검증 | 1 건 | 1 건  | 달성    |                                                                                                                                                  |
|                            | 개발 시제품 국가 공인인증 획득                     | 시제품 국가 공인인증 획득 건수         | 1 건 | 1 건  | 달성    | 시제품의 도막 상태평가 성능에 대한 국가 공인인증 획득 여부 확인                                                                                                             |
|                            | 건설시장 판로 개척을 위한 건설 신기술인증 신청            | 건설 신기술 신청 건수              | 1 건 | 1 건  | 달성    | 시제품 건설 신기술인증 신청 여부 확인                                                                                                                            |
|                            | 연구성과 홍보, 기술 시연, 전시회 참여 등을 통한 국내외 판로확보 | 연구 성과 홍보 건수               | 5 건 | 5 건  | 달성    | 시제품 홍보 여부 확인                                                                                                                                     |
|                            | 핵심성과                                  | 성과지표                      | 목표  | 달성   | 달성도   | 내용                                                                                                                                               |
| 중<br>간<br>성<br>과<br>목<br>표 | 개발 시제품 현장 강구조물 성능검증                   | 논문(SCI)                   | 2   | 심사 중 | 심사 중  | 2건 심사 중 (Automation in Construction, IF 7.7)<br>논문1 제출일자: 21.05.10 (revision 22.02.01)<br>논문2 제출일자: 21.12.29                                     |
|                            |                                       | 현장 적용                     | 3   | 4    | 추가 달성 | 성산대학교 남단 접속부 (21.01)<br>울산 현대중공업 (21.09)<br>SK인천석유화학 (21.09)<br>거제 삼성중공업 (21.12)                                                                 |
|                            | 개발 시제품 상용화                            | 공인인증                      | 1   | 1    | 달성    | 건설품질연구원 (KOLAS인증기관) 성능 인증 완료 (발급일자: 2021.01.21.)                                                                                                 |
|                            |                                       | 기술 홍보                     | 5   | 5    | 달성    | 대우건설 기술 미팅 (21.04)<br>EMI/PMC 학술 발표 (21.05)<br>대한토목학회 2021 컨벤션 학술 발표 (21.10)<br>한국비파괴검사학회 추계학술대회 발표 (21.10)<br>한국구조물진단유지관리공학회 가을학술발표회 발표 (21.11) |
|                            | 추가 달성                                 | 사업화                       | 0   | 1    | 추가 달성 | 삼성중공업                                                                                                                                            |

### 3.6. 목표 미달 시 원인분석

#### ■ 목표 미달 사유

- 양적 성과지표인 SCI 논문 3건 중 1건은 조기달성하였으며 2건이 현재 심사 진행 중임. 1건은 revision 제출 완료이며, 다른 1건은 revision 진행 중임.
- 2건 모두 재심사 진행 중이므로 성과지표 달성에 문제는 없는 것으로 자체분석함.
- 개발 기술에 맞는 reviewer의 수가 적어 저널에서 reviewer를 구하는 것이 어려웠다는 답변을 받음. 실제로 1건의 경우 5월에 논문을 제출하였으나 reviewer가 구해지지 않아 심사가 지연됨.

#### ■ 자체 보완 활동

- 학술적으로 국외 1건, 국내 5건의 학술 발표(구두)를 수행하여 기존 목표보다 초과 수행함.
- 지적재산권 확보를 위한 보완활동으로 특허 출원 및 소프트웨어 성과를 초과 달성함.

#### ■ 연구개발 과정의 성실성

- 본 연구진은 진행 중인 성과 외에 모든 성과를 달성하였으며, 특허, 현장적용, 사업화, 기술 시연 등 다양한 활동으로 연구개발 성과를 이루어냄.
- 연구목표에 없는 사업화 실적을 수행하여 개발 기술의 사업화 가능성을 보였으며, 이를 통해 기술 개발 과정에 있어 본 연구진의 성실성을 확인할 수 있음.

#### 4. 연구 성과

##### □ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

| 번호 | 논문명                                                                                                                  | 학술지명                         | 주저자명          | 호      | 국명          | 발행기관         | SCIE 여부         | 게재일       | 등록번호 (ISSN) |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|---------------|--------|-------------|--------------|-----------------|-----------|-------------|
| 1  | Visualization and classification of hidden defects in triplex composites used in LNG carriers by active thermography | Smart Structures and Systems | Soonkyu Hwang | 24 (6) | South Korea | TECHNO-PRESS | SCI (IF: 3.557) | 2019년 12월 | 1738-1584   |
| 2  | Automated Visualization of Steel Structure Coating Thickness using Line Laser Scanning Thermography                  | Automation in Construction   | Soonkyu Hwang | 심사 중   | Netherlands | ELSEVIER     | SCI (IF: 7.7)   | 심사 중      | 0926-5805   |
| 3  | Automatic weld crack detection and quantification using laser thermography, Mask R-CNN, and CycleGAN                 | Automation in Construction   | Chisung Kim   | 심사 중   | Netherlands | ELSEVIER     | SCI (IF: 7.7)   | 심사 중      | 0926-5805   |

##### □ 국내 및 국제 학술회의 발표

| 번호 | 회의 명칭                        | 발표자 | 발표 일시       | 장소            | 국명   |
|----|------------------------------|-----|-------------|---------------|------|
| 1  | 한국구조물진단유지관리공학회 여름 학술발표회      | 김현진 | 20.07.06~08 | 라마다프라자 제주     | 대한민국 |
| 2  | 대한토목학회 2020 CONVENTION       | 황순규 | 20.10.21~23 | 제주 신화월드       | 대한민국 |
| 3  | EMI/PMC 2021                 | 김현진 | 21.05.25~28 | Virtual Event | 미국   |
| 4  | 대한토목학회 2021 CONVENTION       | 김현진 | 21.10.20~22 | 광주            | 대한민국 |
| 5  | 한국비파괴검사학회 2021 추계학술대회        | 김현진 | 21.10.28~29 | 여수            | 대한민국 |
| 6  | 한국구조물진단유지관리공학회 2021 가을 학술발표회 | 김현진 | 21.11.17~19 | 제주            | 대한민국 |

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

| 번호 | 구분 | 지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)                                                                    | 국명   | 출원          |          |                 | 등록      |          |            | 기여율 |
|----|----|------------------------------------------------------------------------------------------|------|-------------|----------|-----------------|---------|----------|------------|-----|
|    |    |                                                                                          |      | 출원인         | 출원일      | 출원번호            | 등록인     | 등록일      | 등록번호       |     |
| 1  | 특허 | 강구조물의 도막 상태 검사 및 평가 방법과 이를 위한 시스템                                                        | 대한민국 | 한국과학기술원     | 20.10.13 | 10-2020-0133248 | 한국과학기술원 | 20.05.20 | 10-2256181 | 100 |
| 2  | 특허 | 강구조물 상태 평가를 위한 실시간 도막 두께 측정 드론 시스템                                                       | 대한민국 | 에스큐엔지니어링(주) | 20.10.26 | 10-2020-0139257 |         |          |            | 100 |
| 3  | 특허 | METHOD OF INSPECTING AND EVALUATING COATING STATE OF STEEL STRUCTURE AND SYSTEM THEREFOR | 미국   | 한국과학기술원     | 20.12.29 | 17128680        |         |          |            | 100 |
| 4  | 특허 | 钢结构涂层状态的检查与评估方法及系统                                                                       | 중국   | 한국과학기술원     | 20.12.29 | 202011592461.4  |         |          |            | 100 |

##### ○ 지식재산권 활용 유형

| 번호 | 제품화 | 방어 | 전용실시 | 통상실시 | 무상실시 | 매매/양도 | 상호실시 | 담보대출 | 투자 | 활용 예정 | 기타 |
|----|-----|----|------|------|------|-------|------|------|----|-------|----|
| 1  |     |    |      | √    |      |       |      |      |    |       |    |

## □ 저작권(소프트웨어, 서적 등)

| 번호 | 저작권명                             | 창작일      | 저작자명    | 등록일      | 등록번호          | 저작권자명   | 기여율 |
|----|----------------------------------|----------|---------|----------|---------------|---------|-----|
| 1  | 강구조물 도막 열화 탐지 및 분류 프로그램          | 20.12.18 | 한국과학기술원 | 21.01.05 | C-2021-000370 | 한국과학기술원 | 100 |
| 2  | 실시간 열화상 및 비전 영상 계측 및 열파 시각화 프로그램 | 20.12.18 | 한국과학기술원 | 21.01.05 | C-2021-000371 | 한국과학기술원 | 100 |

## □ 신기술 신청

| 번호 | 명칭                                              | 신청일      | 관리번호        |
|----|-------------------------------------------------|----------|-------------|
| 1  | 강구조물의 도막 상태평가를 위한 알고리즘 기반의 실시간 열화상 및 비전 융합계측시스템 | 21.11.24 | 기술인증센터-2560 |

## □ 기술 및 제품 인증

| 번호 | 인증 분야 | 인증기관      | 인증 내용                                       |              | 인증 획득일   | 국가명  |
|----|-------|-----------|---------------------------------------------|--------------|----------|------|
|    |       |           | 인증명                                         | 인증번호         |          |      |
| 1  | 성능 인증 | 건설품질기술연구원 | 강구조물 도막상태 평가용 이동로봇 기반 휴대용 열화상 및 비전융합 검사 시스템 | ICT-20210178 | 21.01.21 | 대한민국 |

## □ 시제품 제작

| 번호 | 시제품명                             | 출시/제작일   | 제작업체명   | 설치장소    | 이용분야                                                                                    |
|----|----------------------------------|----------|---------|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | 열화상 및 비전 시스템 융합 강구조물 도막 상태 검사 장비 | 20.11.01 | 한국과학기술원 | 한국과학기술원 | 열화상 카메라, 비전 카메라, 열원으로 이루어진 열화상 및 비전 융합 시스템을 이용하여 강교량 등 강구조물 표면의 도막 두께 검사 및 도막 내외부 열화 검사 |

## □ 현장적용

| 번호 | 적용기술명                                | 적용일         | 발주기관명    | 적용 연구개발기관명 | 적용현장명(장소)   |
|----|--------------------------------------|-------------|----------|------------|-------------|
| 1  | 인공지능 기반 열화상/비전 검사 로봇                 | 20.10.13~14 | 부산시설공단   |            | 부산 광안대교     |
| 2  | 열화상/비전 통합 계측을 이용한 도막 상태평가 시스템        | 21.01.25~27 | 성산대교     |            | 서울 성산대교     |
| 3  | 열화상/비전 통합 계측을 이용한 도막 상태평가 시스템        | 21.09.15~16 | SK인천석유화학 |            | 인천 SK인천석유화학 |
| 4  | 열화상/비전 통합 계측을 이용한 도막 상태평가 시스템        | 21.09.09~10 | 현대중공업    |            | 울산 현대중공업    |
| 5  | 열화상분석법을 이용한 선박용 도장의 도막두께 측정기술 적용성 검토 | 21.12.29~30 | 삼성중공업    |            | 거제 삼성중공업    |

## □ 기술 실시(이전)

| 번호 | 기술 이전 유형 | 기술 실시 계약명                          | 기술 실시 대상 기관 | 기술 실시 발생일 | 기술료   |         |
|----|----------|------------------------------------|-------------|-----------|-------|---------|
|    |          |                                    |             |           | 발생 연도 | 발생액(천원) |
| 1  | 통상실시권    | 도막 두께 분포 시각화 방법 및 이를 위한 능동형 열화상 장치 | 에스큐엔지니어링    | 2019.05   | 2019  | 1억 원    |
| 2  | 통상실시권    | 강구조물의 도막 상태 평가 시스템 및 방법            | 에스큐엔지니어링    | 2020.06   | 2020  | 5천만 원   |

## □ 사업화 현황

| 번호 | 사업화 방식 | 사업화 형태 | 지역 | 사업화명                                 | 내용                                   | 업체명             | 매출액       | 매출 발생 연도 | 기술 수명 |
|----|--------|--------|----|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------|-----------|----------|-------|
|    |        |        |    |                                      |                                      |                 | 국내 (천원)   |          |       |
| 1  | 자가 실시  | 용역     | 여수 | KNOC 여수 지사 QHR 추가 설치 구조해석            | KNOC 여수지사 QRH 추가 설치를 위한 열화상/비전 도막 검사 | KNOC 여수 지사      | 5,000     | 2020     |       |
| 2  | 자가 실시  | 용역     | 여수 | 2020년도 여수지사 입출하부두 정밀안전진단 및 성능평가 용역   | 여수지사 입출하부두 강구조물 도막 손상 평가             | 한국 석유 공사        | 211,726   | 2020     |       |
| 3  | 자가 실시  | 용역     | 울산 | 선발 폭발사고에 따른 울산대교 외관조사 용역             | 공용중인 울산대교 내 강구조물 도막 손상 평가를 위한 점검     | 한국교량및구조공학회      | 90,000    | 2020     |       |
| 4  | 자가 실시  | 용역     | 인천 | 영종대교 선형레이저 열화상 기반 강재 균열 검출           | 공용중인 교량의 미세 피로균열 검출                  | 한국시설안전공단        | 23,150    | 2020     |       |
| 5  | 자가 실시  | 용역     | 청도 | 신대구부산고속도로 진단점검                       | 동대구 송읍교 도막 손상 평가                     | 신대구부산고속도로(주)    | 1,864,309 | 2020     |       |
| 6  | 자가 실시  | 용역     | 광주 | 광주제2순환도로 점검용역                        | 순환도로 신가대교 도막 평가                      | 천안논산고속도로(주)     | 157,544   | 2020     |       |
| 7  | 자가 실시  | 용역     | 서울 | 성산대교 "도장공사 도막내부 열화판정 용역"             | 교량(본교+램프) 도장 및 열화 판정 검사              | 서울시 (홍용중합건설(주)) | 12,500    | 2021     |       |
| 8  | 자가 실시  | 용역     | 당진 | "당진화력 제1연료하역부두 진입도교" 정밀점검            | 하역부두 시설물 도막 두께 검사                    | 한국동서발전 당진화력본부   | 149,587   | 2020     |       |
| 9  | 자가 실시  | 용역     | 거제 | 열화상분석법을 이용한 선박용 도장의 도막두께 측정기술 적용성 검토 | 건도막 및 습도막 대상 검증실험 수행                 | 삼성중공업(주)        | 10,000    | 2021     |       |

## □ 매출 실적(누적)

| 번호 | 사업화명           | 발생 연도     | 매출액       |        | 합계        | 산정 방법 |
|----|----------------|-----------|-----------|--------|-----------|-------|
|    |                |           | 국내(천원)    | 국외(달러) |           |       |
| 1  | 인공지능 기반 열화상 로봇 | 2020~2021 | 2,491,181 |        | 2,494,181 | 세금계산서 |
| 합계 |                |           |           |        | 2,494,181 |       |

## □ 사업화 계획 및 무역 수지 개선 효과

| 성과                             |             |                               | 강제 시설물 (교량 및 항만 등) 안전진단 용역 수행 |           |           |
|--------------------------------|-------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------|-----------|
| 사업화 계획                         | 사업화 소요기간(년) |                               | 2.5                           |           |           |
|                                | 소요예산(천원)    |                               | 300,000                       |           |           |
|                                | 예상 매출규모(천원) |                               | 현재까지                          | 3년 후      | 5년 후      |
|                                |             |                               | 2,491,181                     | 4,000,000 | 6,000,000 |
|                                | 시장 점유율      | 단위(%)                         | 현재까지                          | 3년 후      | 5년 후      |
|                                |             | 국내                            | 1                             | 2         | 4         |
|                                |             | 국외                            | -                             | 1         | 2         |
| 향후 관련기술, 제품을 응용한 타 모델, 제품 개발계획 |             | 드론 및 4차 산업을 연계한 시설물의 점검 장비 개발 |                               |           |           |
| 무역 수지 개선 효과(천원)                | 수입대체(내수)    |                               | 현재                            | 3년 후      | 5년 후      |
|                                |             |                               | 30,000                        | 80,000    | 150,000   |
|                                | 수 출         |                               | -                             | 50,000    | 10,000    |

## □ 고용 창출

| 번호 | 사업화명       | 사업화 업체명     | 고용창출 인원(명) |       | 합계(명) |
|----|------------|-------------|------------|-------|-------|
|    |            |             | 2020년      | 2021년 |       |
| 1  | 강제시설물 안전진단 | 에스큐엔지니어링(주) | 20         | 48    | 68    |
| 합계 |            |             | 20         | 48    | 68    |

## □ 고용 효과

| 구분    |      |      |  | 고용 효과(명) |
|-------|------|------|--|----------|
| 고용 효과 | 개발 전 | 연구인력 |  | 0        |
|       |      | 생산인력 |  | 0        |
|       | 개발 후 | 연구인력 |  | 7        |
|       |      | 생산인력 |  | 41       |

## □ 비용 절감(누적)

| 번호 | 사업화명       | 발생 연도     | 산정방법                        | 비용 절감액(천원) |
|----|------------|-----------|-----------------------------|------------|
| 1  | 강제시설물 안전진단 | 2020~2021 | 용역수행 세금계산서 반영<br>(해당기술 10%) | 249,110    |
| 합계 |            |           |                             | 249,110    |

## □ 경제적 파급 효과

(단위 : 천원/년)

| 구분    | 사업화명       | 수입 대체  | 수출 증대 | 매출 증대   | 생산성 향상 | 고용 창출<br>(인력 양성 수, 명) | 기타 |
|-------|------------|--------|-------|---------|--------|-----------------------|----|
| 해당 연도 | 강제시설물 안전진단 | 30,000 | -     | 250,000 |        | 7                     |    |
| 기대 목표 |            |        |       |         |        |                       |    |

## □ 전문 연구 인력 양성

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

## □ 홍보 실적

| 번호 | 홍보 유형 | 매체명    | 제목         | 홍보일            |
|----|-------|--------|------------|----------------|
| 1  | 학회 부스 | 대한토목학회 | 토목학회 부스 참가 | 2019.10.16.~18 |
| 2  | 기술 미팅 | 대우건설   | 대우건설 기술 미팅 | 2021.04.02     |

## 5. 연구개발성과의 관련 분야 효과 분석

### 5.1. 기술적 효과 분석

- 실시간 및 자동 강구조물 도막 상태평가 원천기술 확보 (세계 최고/최초) : 개발 기술은 현장에서 바로 검사 결과가 표출되는 실시간 도막 상태평가 기술로, 열화상 및 비전 이중계측시스템을 이용하여 도막 두께와 도막 열화를 동시에 검사하는 기술은 세계 최고 및 최초 기술임.
- 기존 국부영역 표본 검사 대체가 가능한 비접촉 대면적 전수검사기술 개발로 대형사회기반시설물 도막 상태평가 신뢰도 향상 및 안전사회 도약 (세계 최고/최초) : 검사 영역 전면적에 대해 도막 두께 정량화 및 열화 검사가 가능한 기술로 기존 접촉식 검사 장비가 2~3 mm의 좁은 계측 영역에 비해 국부적으로 발생하는 도막 두께 탐지가 가능하여, 검사 신뢰도 향상이 가능함.
- 인공지능 및 기계학습 기법 활용으로 기존 노동집약적, 주관적 검사에서 데이터 기반 객관적 자동 검사방법으로 전환 및 도막 상태평가 효율 극대화 : 접촉식 센서의 민감도 및 작업자의 숙련도에 따라 검사가 수행되는 기존 주관적 검사 방식에서 계측 데이터 및 개발 알고리즘을 이용한 분석을 통해 객관적인 검사가 가능함. 또한, 인공지능 및 기계학습 중 객체 탐지 및 분류 알고리즘인 YOLO 기법을 이용한 검사 알고리즘 개발로 신속한 검사 수행이 가능함.
- 무인 이동 로봇 활용으로 강구조물 안전진단 수행을 위한 접근성 향상 및 기존 검사 취약 부위 검사 수행 가능: 교량 바닥판이나 측면은 인력이 접근이 어려워 교량 대차나, 굴절 사다리를 이용하여 검사를 수행해야 함. 개발 기술은 영구자석을 이용하여 강구조물 표면을 부착 및 이동하는 시스템으로 인력이 접근하기 어렵거나 접근 시 위험도가 높은 위치의 검사 수행이 가능함.
- 다양한 산업 강구조물별 지속적인 도막 상태평가 수행을 바탕으로 빅데이터를 구축하여 구조물 장기 도막 열화 경향 파악 및 예측에 활용 : 인공지능 알고리즘의 정확도를 높이기 위해서는 빅데이터를 이용한 다량의 학습데이터 확보가 필수적임. 개발 기술을 지속적으로 도막 상태평가에 활용하여 데이터를 수집 및 학습시켜 향후 구조물 장기 도막 상태 파악 및 예측에 활용 가능함.

### 5.2. 경제적 효과 분석

- 영상기반 다지점 (640X512지점) 계측 기반 도막 상태평가로 기존 단일 지점 (1지점) 계측 평가 방법 대비 검사 시간 단축 및 효율 극대화 가능
- 2019년 1월 개정된 시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침(교량) 내 허용 도막 두께 감소 비율, 부식 면적 등 도막 상태 평가 기준 개정으로 관련 국내 시장 규모 및 기술 수요 증가 예상
- 건설, 석유화학, 조선 등 주시장 내 도막 상태평가 시장 연간 성장률은 7.83%로 2023년에는 국내외 전체 약 3억 달러 규모 시장 형성 예정
- 세계 최초/최고 원천기술 개발을 통한 신사업 창출 및 글로벌 시장 선점
- 상용화를 통한 국내 중소 구조물 안전진단 업체 수익개선, 수주 경쟁력 향상 및 해외시장 개척

### 6.3. 사회적 효과 분석

- “국토교통과학기술 연구개발 종합계획” 내 세계 선도기술 개발, 노후화 시설물 관리를 통한 SOC 전 주기에 걸친 기술 개발, 사회문제 해결형 기술 개발로 새로운 부가가치 창출 및 사람 중심의 국토교통 기술 개발 요구 충족 가능
- 노동집약적, 저부가가치 국내 시설물 안전진단 산업을 기술집약적, 고부가가치 4차 산업으로 전환, 관련 인력양성, 및 고용 증대
- 비정규직 안전진단 관련 근로자 안전성 확보를 통한 안전사고 방지 및 전문성 증대
- 전 세계적으로 전무한 무인 실시간 강구조물 도막 상태 평가기술 및 장비 개발로 구조물 안전진단 분야 기술 혁신, 신산업 분야 개척 및 국가 기술 경쟁력 강화
- 신속한 강구조물 도막 상태평가로 구조물 손상 조기진단이 가능하며, 국가 주요 강구조물 안전성을 향상시켜 대형사고 방지, 국가 이미지 쇄신, 국민 신뢰확보 가능

## 6. 연구개발성과 활용 및 추가연구 필요성

### 6.1. 연구성과 향후 활용방안

- 핵심 원천기술 개발을 통한 지적재산권 확보
  - 핵심 원천기술 국내 특허를 등록하였으며, 중국과 미국 등 해외 특허 출원으로 국내외 지적재산권을 확보함
  - KOLAS인증기관에서 수행한 성능검증 시험을 통해 공인인증기관의 시험성적서를 확보함
  - 신청한 건설신기술 심사를 통과하여 지적재산권을 확보할 예정임
  - 4족로봇 등 다양한 스캐닝 장비와의 결합을 고려하여 관련 지적재산권을 확보할 수 있음
- 개발 시제품 고도화 및 상용화
  - 지속적인 실구조물 성능 실험을 통해 개발 시제품의 사용성을 지속적으로 향상시킬 수 있음
  - 다양한 구조물과 환경에서 작동시험을 통하여 개발 시제품의 내구성을 높이고, 사용자의 편리함을 높일 수 있도록 GUI 등을 개선하고 있음
  - 현재 리튬이온 배터리팩을 이용한 경량화 및 무선화 작업을 진행 중이며, 차후 배터리팩 내 회로 개선을 통해 개발 시제품을 고도화할 예정임
  - 핵심 부품 가격의 하락으로 개발 시제품의 제조 원가가 낮아져 가격경쟁력을 확보할 예정임
- 해외 시장 개척
  - 국내 특허 뿐만 아니라 미국과 중국 등 해외 특허를 출원하여 지적재산권을 사전에 확보함
  - 국제 특허 취득으로 해외 기업으로의 기술이전 가능함
  - 해외 현장 성능 검증 등 유지관리 업체와의 협력을 통해 국제 공동연구 수행이 가능함

### 6.2. 향후 연구방향

- 지속적인 빅데이터 수집을 통한 도막 상태평가 알고리즘 개선
  - 부식, 박리, 체킹, 초킹 등 4가지 도막 열화에 대한 학습데이터셋 구축을 위해 지속적으로 데이터를 수집하여 빅데이터화하여 관리할 예정임
  - 지속적인 인공지능 기반 객체 탐지 및 분류 알고리즘 개선으로 연산 처리 속도를 높이고 검출 및 분류 정확도를 향상시킬 예정임
- 강구조물 장기 열화 경향 파악 및 예측 알고리즘 개발
  - 빅데이터를 이용하여 열화 검출뿐만 아니라 초기 단계부터 열화를 관리하여 열화 진전 경향 파악을 통해 적절한 보수시기를 알려주는 알고리즘을 개발할 계획임
  - 열화 진전속도 데이터를 이용하여 외기 온도 등 외부 요인을 고려한 열화 예측 알고리즘을 개발할 수 있으며, 추후 강구조물 유지관리에 도움을 줄 수 있음
- 관련 규정 개정 및 새로운 산업 분야 개척
  - 현행 강구조물 검사 규정은 기존 접촉식 검사 방법에 기초하여 제정되어 있으며, 최근 첨단기술을 활용하고자 관련 규정이 개정되고 있어, 해당 기술을 적용하기 위해 필요한 품셈, 원가계산 등의 자료에 기초가 될 수 있음
  - 목표 산업군인 건설, 석유화학, 조선업뿐만 아니라 강재를 사용하는 다양한 구조 시스템으로 적용 분야를 확장 가능함
  - 도막 상태평가 데이터를 클라우드 기반 데이터 관리 서비스로 제공하는 방식으로 변환하여 사용자가 데이터 관리 시스템 설치/관리를 직접하는 것이 아니라 데이터 관리 서비스만 구독하는 형태로 이동할 수 있는 사업모델을 제시할 수 있음

## 7. 참고 문헌

- 1) Ortiz, Alberto, Francisco Bonnin-Pascual, Emilio Garcia-Fidalgo, and Joan P. Company-Corcoles. 2016. "Vision-Based Corrosion Detection Assisted by a Micro-Aerial Vehicle in a Vessel Inspection Application" Sensors 16, no. 12: 2118. <https://doi.org/10.3390/s16122118>
- 2) Atha, Deegan J, and Mohammad R Jahanshahi. "Evaluation of Deep Learning Approaches Based on Convolutional Neural Networks for Corrosion Detection." Structural Health Monitoring 17, no. 5 (September 2018): 1110-28.
- 3) Cadelano, G., Bortolin, A., Ferrarini, G. et al. 2016. "Corrosion Detection in Pipelines Using Infrared Thermography: Experiments and Data Processing Methods" J Nondestruct Eval 35, no. 49. <https://doi.org/10.1007/s10921-016-0365-5>.
- 4) Kondameedi et al. Method of non-destructive testing a cutting insert to determine coating thickness, US patent 10/502550, filed Dec. 21, 2016, issued Dec. 10, 2019.
- 5) MarketandMarkets (2017), NDT and Inspection Market.
- 6) Mordor Intelligence (2020), Market research reports.
- 7) Moreau et al. Method of on-line thickness measurement of applied coatings, US patent 7,758,910, filed Apr. 28, 2006, issued Jul. 20, 2010.
- 8) Ohtake et al. Device for measuring thickness of paint film in non-contacting manner, US patent 2010/0195090, filed Dec. 30, 2009.
- 9) Sellars et al. Coating thickness measuring instrument and methods, US patent 2014/0195187, filed Jan. 10, 2013.
- 10) STX조선해양, 영구자석을 이용한 표면 부착 이동장치, 특허 출원번호 10-2009-0120298, 출원일 2009년 12월 7일, 공개일 2011년 6월 15일.
- 11) Yukio Akashi, Infrared-ray thermal image analyzer, PCT/JP2008/069033, filed Oct. 21, 2008, published Apr. 29, 2010.
- 12) 건설연구인프라운영원 (2016), 노후(철거)교량의 성능평가를 통한 공용중 교량의 장수명화 연구기반 구축 최종보고서, 국토교통부 국토교통과학기술진흥원.
- 13) 국토교통부 (2018), 도로교량및터널현황조사.
- 14) 국토교통부 (2021), 시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침.
- 15) 김도형 (2017), 해상풍력 구조물의 설계수명 확보를 위한 최적 부식관리기술 개발, 산업통상자원부
- 16) 김원태 (2019), 펄스위상 광열파에 의한 도막 미세 두께 진단 비파괴 정량화 평가기술 개발, 과학기술정보통신부.
- 17) 대우건설, 적외선 열화상 카메라를 이용한 구조물의 3차원 실시간 영상계측 모니터링 시스템, 특허 등록번호 10-1283413, 출원일 2013년 1월 4일, 등록일 2013년 7월 2일.
- 18) 박승영 (2014), 자화도 분석기법을 활용한 0.1  $\mu\text{m}$  분해능 포터블 도장막 두께 측정기 개발, 중소기업청.
- 19) 삼성중공업, 도막 측정 장치, 특허 등록번호 10-1138757, 출원일 2010년 8월 10일, 등록일 2012년 4월 16일.
- 20) 손훈 (2016), 무인 검사 장비를 활용한 대형구조물 진단 및 원격 관리 시스템 개발 기획, 국토교통부.
- 21) 안진희 (2020), 전기화학적 열화속도 평가 방법을 통한 강재 내구한계성능 분석기법 개발, 과학기술정보통신부

- 
- 22) 영남대학교, 벽면 이동 보행로봇의 마그네트 휠 어셈블리, 특허 등록번호 10-0925109, 출원일 2008년 1월 4일, 등록일 2009년 10월 28일.
- 23) 정형조 (2020), 무인검사장비 기반 교량구조물 신속진단 및 평가기술개발, 국토교통부.
- 24) 조두용 (2018), 영상 시스템 및 무선헬기를 이용한 구조물 상태 평가 기술 개발, 과학기술정보통신부
- 25) 포스코, 부식깊이 측정장치 및 부식깊이 측정방법, 특허 등록번호 10-1940910, 출원일 2017년 6월 22일, 등록일 2019년 1월 15일.
- 26) 한국건설산업연구원 (2016), 국내 교통 인프라 유지보수 투자의 향후 변화 추이.
- 27) 한국도로공사 (2013), 정부 3.0 세부 추진계획.
- 28) 한국도로공사, 영상처리 기법을 이용한 강교의 도막검사 시스템의 처리방법, 특허 출원번호 10-2007-0088807, 출원일 2007년 9월 3일.
- 29) 한국철도기술연구원, 영상 기반 교량 관리 시스템, 특허 등록번호 10-178541, 출원일 2017년 10월 19일, 등록일 2017년 9월 29일.
- 30) 현대중공업, 펄토초 레이저 발생장치 및 그와 연동하는 도막두께 측정장치, 특허 등록번호 10-1540541, 출원일 2014년 8월 20일, 등록일 2015년 7월 23일.
-

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업 ‘국토교통기술촉진연구사업’ 연구개발과제 최종보고서이다.
2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 국토교통부(국토교통과학기술진흥원)에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업의 결과임을 밝혀야 한다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 된다.