

| 최종보고서(일반과제용)       |                                      |                                                                                               |                      |                |                |                         |                   |                |               | 보안등급         |                   |    |
|--------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------|----------------|-------------------------|-------------------|----------------|---------------|--------------|-------------------|----|
|                    |                                      |                                                                                               |                      |                |                |                         |                   |                |               | 일반[✓], 보안[ ] |                   |    |
| 중앙행정기관명            | 국토교통부                                |                                                                                               |                      |                | 사업명            | 사업명                     |                   | 국토교통기술촉진연구사업   |               |              |                   |    |
| 전문기관명              | 국토교통과학기술진흥원                          |                                                                                               |                      |                |                | 내역사업명                   |                   | 글로벌 기술협력       |               |              |                   |    |
| 공고번호               | 공고-제2호                               |                                                                                               |                      |                | 연구개발과제번호       |                         | 21CTAP-C151784-03 |                |               |              |                   |    |
| 국가과학기술<br>표준분류     | EI0404                               |                                                                                               | 70%                  |                | EI0405         |                         | 30%               |                |               |              |                   |    |
| 연구주제               | (대분류) 건설 교통                          |                                                                                               | (중분류) 건설시공 재료        |                | (소분류) 건설시공관리기술 |                         |                   |                |               |              |                   |    |
| 연구개발과제명            | 국문                                   | 건설 생산성 20% 향상을 위한 DB-free 영상분석 기반<br>전주기 건설프로세스 통합관리 플랫폼 개발                                   |                      |                |                |                         |                   |                |               |              |                   |    |
|                    | 영문                                   | Automated DB-free Visual Analytics Platform for<br>Enhancing Construction Productivity by 20% |                      |                |                |                         |                   |                |               |              |                   |    |
| 주관연구개발기관           | 기관명                                  | 서울대학교 산학협력단                                                                                   |                      |                |                | 사업자등록번호                 |                   | 119-82-03684   |               |              |                   |    |
|                    | 주소                                   | (08826) 서울특별시 관악구 관악로 1<br>(신림동, 서울대학교 942동 5층)                                               |                      |                |                | 법인등록번호                  |                   | 114371-0009224 |               |              |                   |    |
| 연구책임자              | 성명                                   | 지석호                                                                                           |                      |                |                | 직위                      |                   | 교수             |               |              |                   |    |
|                    | 연락처                                  | 직장전화                                                                                          | 02-880-7344          |                |                |                         | 휴대전화              |                | 010-6366-9379 |              |                   |    |
|                    |                                      | 전자우편                                                                                          | shchi@snu.ac.kr      |                |                |                         | 국가연구자번호           |                | 10131353      |              |                   |    |
| 연구개발기간             | 전체                                   | 2019. 04. 05 - 2021. 12. 31(2년 9개월)                                                           |                      |                |                |                         |                   |                |               |              |                   |    |
|                    | 1년차                                  | 2019. 04. 05 - 2019. 12. 31(9개월)                                                              |                      |                |                |                         |                   |                |               |              |                   |    |
|                    | 2년차                                  | 2020. 01. 01 - 2020. 12. 31(12개월)                                                             |                      |                |                |                         |                   |                |               |              |                   |    |
|                    | 3년차                                  | 2021. 01. 01 - 2021. 12. 31(12개월)                                                             |                      |                |                |                         |                   |                |               |              |                   |    |
| 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             | 현금            | 현물           |                   | 합계 |
|                    | 총계                                   | 536,000                                                                                       | 0                    | 0              | 0              | 0                       | 0                 | 33,000         | 536,000       | 33,000       | 569,000           | 0  |
|                    | 1년차                                  | 132,000                                                                                       |                      |                |                |                         |                   | 9,000          | 132,000       | 9,000        | 141,000           |    |
|                    | 2년차                                  | 202,000                                                                                       |                      |                |                |                         |                   | 12,000         | 202,000       | 12,000       | 214,000           |    |
| 3년차                | 202,000                              |                                                                                               |                      |                |                |                         | 12,000            | 202,000        | 12,000        | 214,000      |                   |    |
| 공동연구개발기관 등         | 기관명                                  | 책임자                                                                                           | 직위                   | 휴대전화           |                | 전자우편                    |                   | 비고             |               |              |                   |    |
|                    | 역할                                   | 기관유형                                                                                          |                      |                |                |                         |                   |                |               |              |                   |    |
| 공동연구개발기관           | The Hong Kong Polytechnic University | JoonOh Seo                                                                                    | Associate Professor  | +852-2766-5823 |                | joonoh.seo@polyu.edu.hk |                   | 공동             | 대학            |              |                   |    |
| 연구개발담당자<br>실무담당자   | 성명                                   | 황정빈                                                                                           |                      |                |                | 직위                      |                   | 연구원(석박사통합과정)   |               |              |                   |    |
|                    | 연락처                                  | 직장전화                                                                                          | 02-888-1294          |                |                |                         | 휴대전화              |                | 010-4900-2847 |              |                   |    |
|                    |                                      | 전자우편                                                                                          | jb.hwang@hotmail.com |                |                |                         | 국가연구자번호           |                | 12428161      |              |                   |    |

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 : 지 석 호

주관연구개발기관의 장 : 서울대학교 산학협력단 최 해 천

공동연구개발기관의 장 : The Hong Kong Polytechnic University (성함) (직인)

국토교통과학기술진흥원장 귀하



## < 요약 문 >

|                           |       |                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                    |               |        |                              |     |
|---------------------------|-------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|--------|------------------------------|-----|
| 사업명                       |       | 국토교통기술촉진연구사업                                                |                                                                                                                                                                                                                                                    | 연구개발과제번호      |        | 21CTAP-C151784-03            |     |
| 내역사업명                     |       | 글로벌 기술협력                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                    |               |        |                              |     |
| 국가과학기술표준분류                |       | EI0404                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                    | 70%           | EI0405 |                              | 30% |
| 연구주제                      |       | (대분류) 건설 교통                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                    | (중분류) 건설시공 재료 |        | (소분류) 건설시공관리기술               |     |
| 연구개발과제명                   |       | 건설 생산성 20% 향상을 위한 DB-free 영상분석 기반<br>전주기 건설프로세스 통합관리 플랫폼 개발 |                                                                                                                                                                                                                                                    |               |        |                              |     |
| 전체 연구개발기간                 |       | 2019. 04. 05 - 2021. 12. 31(2년 9개월)                         |                                                                                                                                                                                                                                                    |               |        |                              |     |
| 총 연구개발비                   |       | 총 569,000천원<br>(정부지원연구개발비: 536,000천원, 상대국부담금: 33,000천원)     |                                                                                                                                                                                                                                                    |               |        |                              |     |
| 연구개발단계                    |       | 기초[ ] 응용[ ] 개발[ ✓ ]                                         |                                                                                                                                                                                                                                                    | 기술성숙도         |        | 착수시점 기준( 3 )<br>종료시점 목표( 7 ) |     |
| 연구개발과제 유형                 |       | 지정공모 [ ] 자유공모 [ ✓ ]                                         |                                                                                                                                                                                                                                                    |               |        |                              |     |
| 연구개발과제 특성                 |       | -                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                    |               |        |                              |     |
| 연구<br>개발<br>목표<br>및<br>내용 | 최종목표  |                                                             | 건설 생산성 20% 향상을 위한 DB-free 영상분석 기반<br>전주기 건설프로세스 통합관리 플랫폼 개발                                                                                                                                                                                        |               |        |                              |     |
|                           | 전체 내용 |                                                             | - 본 연구가 개발하는 통합관리 플랫폼은 건설현장 CCTV 영상 데이터로부터 작업유형, 투입자원 현황, 작업량 등의 현장 상황정보를 자동으로 추출하고, 시공과정 동안 작업시간, 시간당 작업량, 공사실적, 휴식시간, 생산성 저해요인 등의 작업 생산성을 자동으로 분석함으로써 공사비/공기 관리 및 예측, 인력 및 장비 투입계획 수립 등 프로젝트관리 업무를 지능적으로 지원하는 기술임.                               |               |        |                              |     |
|                           | 1년차   | 목표                                                          | 건설현장 맞춤형 DB-free 영상분석기술 개발                                                                                                                                                                                                                         |               |        |                              |     |
|                           |       | 내용                                                          | - 학습용 영상 DB 구축을 위해 현장에서 수만 장의 학습 데이터를 수집하여 행동 유형별로 분류하는 과정을 온라인, 가상현실 등 첨단기술을 활용하여 대신하는 기술을 개발함.<br>(1) 건설현장 맞춤형 Human-Computer Interactive Learning 알고리즘 개발<br>(2) 건설현장 영상 데이터 Web-Crawling 알고리즘 개발<br>(3) 건설현장 Cyber-Physical Simulation 알고리즘 개발 |               |        |                              |     |
|                           | 2년차   | 목표                                                          | DB-free 영상분석 기반 전주기 건설프로세스 통합관리 플랫폼 개발                                                                                                                                                                                                             |               |        |                              |     |
|                           |       | 내용                                                          | - 임의의 공중에서 실시간으로 수집되는 CCTV 영상과 자동으로 분석한 현장 상황정보를 연계 및 관리함으로써 생산성을 분석하고 사용자의 요구에 응답하는 통합 지식관리체계를 개발함.<br>(1) DB-free 영상분석 기반 현장 상황정보 자동 분석 알고리즘 개발<br>(2) 전주기 건설프로세스 통합관리 플랫폼 설계 및 구축<br>(3) 건설프로세스 생산성 자동 분석 알고리즘 개발                               |               |        |                              |     |
|                           | 3년차   | 목표                                                          | 국내외 현장실험을 통한 플랫폼의 실무적 제약조건 도출 및 보완                                                                                                                                                                                                                 |               |        |                              |     |
|                           |       | 내용                                                          | - 개발된 플랫폼을 건설현장(토공, 골조공, 마감공 등)에서 시험가동 해봄으로써 통합관리 플랫폼의 성능을 검증하고 기술적 개선점과 적용에 따르는 실무적 제약조건을 도출함.<br>(1) 국내외 현장실험을 통한 플랫폼 활용 제약조건 도출<br>(2) 개발 플랫폼 검증 및 보완                                                                                           |               |        |                              |     |

|                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |               |                         |                  |                                      |           |              |             |                  |                     |              |    |
|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-------------------------|------------------|--------------------------------------|-----------|--------------|-------------|------------------|---------------------|--------------|----|
| 연구개발성과                        | - 핵심 연구개발성과는 (1) 건설현장 맞춤형 DB-free 영상분석기술과 (2) 전주기 건설프로세스 통합관리 플랫폼이며, 이를 통해 SCI(E)/SSCI 논문게재 11편, 비SCI(E) 논문게재 3편, 국내외 학술대회 발표 16건, 국내 특허등록 1건 및 해외 특허등록 2건, 소프트웨어 등록 3건, 통합관리 플랫폼 시제품 제작 1건, 기술실시계약 1건, 인력양성 7건, 포상 3건을 계획대비 초과달성함.                                                                                                                                                                                                                                      |               |                         |                  |                                      |           |              |             |                  |                     |              |    |
| 연구개발성과<br>활용방안 및<br>기대효과      | - DB 구축에 많은 시간과 비용이 요구되던 기존 기술의 한계를 극복하고 건설현장의 다양성을 반영한 학습용 DB를 구축함으로써 높은 성능의 영상분석기술을 개발함.<br>- 정확한 생산성 분석 결과를 바탕으로 작업 생산성을 20% 향상하여 현장관리에 필요한 인력과 비용을 절감하고 기업의 수익성 제고에 기여함. 개발한 원천기술은 건설산업이 고부가가치 산업으로 도약할 수 있는 계기를 마련할 뿐만 아니라 조선산업, 제조업 등의 생산성 문제해결에도 활용될 수 있음.<br>- 생산성 향상이라는 손에 잡히는 이익을 발주자 및 시공사에게 제공함으로써 딥러닝, 영상분석 등 최신 IT 기술을 활용한 현장관리의 실효성을 입증하고 융복합 영역에 대한 산업계의 관심을 제고함.<br>- 국제기준에 부합하는 기술을 개발하여 세계 시장으로의 기술이전을 타진하고 대한민국을 대표하는 건설 스타트업을 창업할 수 있는 기술적 기반을 마련함. |               |                         |                  |                                      |           |              |             |                  |                     |              |    |
| 연구개발성과의<br>비공개여부 및 사유         | 해당없음                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |               |                         |                  |                                      |           |              |             |                  |                     |              |    |
| 연구개발성과의 등록 ·<br>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 |
|                               | 14                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 3             | -                       | -                | -                                    | 3         | -            | -           | -                | -                   | -            | -  |
| 연구시설 · 장비<br>종합정보시스템 등록<br>현황 | 구입<br>기관                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 연구시설 ·<br>장비명 |                         | 규격<br>(모델명)      | 수량                                   | 구입<br>연월일 | 구입가격<br>(천원) | 구입처<br>(전화) | 비고<br>(설치<br>장소) |                     | ZEUS<br>등록번호 |    |
|                               | -                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | -             |                         | -                | -                                    | -         | -            | -           | -                |                     | -            |    |
| 국문핵심어<br>(5개 이내)              | 건설 생산성                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |               | 건설프로세스                  |                  | 통합관리 플랫폼                             |           |              | DB-free     |                  | 영상분석                |              |    |
| 영문핵심어<br>(5개 이내)              | Construction<br>Productivity                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |               | Construction<br>Process |                  | Integrated<br>Management<br>Platform |           |              | DB-free     |                  | Visual<br>Analytics |              |    |

## < 목 차 >

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 1. 연구개발과제의 개요 .....               | 1   |
| 2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용 .....    | 4   |
| 3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도 ..... | 24  |
| 4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성) .....    | 102 |
| 5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도 ..... | 102 |
| 6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획 .....       | 103 |
| 7. 참고 문헌 .....                    | 105 |

# 1. 연구개발과제의 개요

## 1) 연구개발과제의 최종목표

### ○ 최종목표

- 현행 건설현장 생산성 분석체계의 한계를 극복하기 위해 본 연구는 “건설 생산성 20% 향상을 위한 DB-free 영상분석 기반 전주기 건설프로세스 통합관리 플랫폼 개발”을 최종목표로 수립함. 본 연구에서 건설 생산성은 작업구역별 건설작업을 완료하는 데 소요한 시간으로 정의하며 시간당 작업량, 작업 사이클타임, 평균 유휴시간 등의 지표로 확인할 수 있음. 생산성 20% 향상은 소요시간 20% 단축을 의미하며, 플랫폼이 파악한 작업별 생산성 저해요인을 해결하기 전과 후의 생산성을 시뮬레이션으로 비교·분석하여 검증함. “DB-free”의 개념은 현장에서 수만 장의 학습 데이터를 수집하여 행동유형별로 분류하는 과정을 온라인, 가상현실 등 첨단기술을 활용하여 대신하는 것을 의미함. 최종목표를 달성하기 위한 세부목표는 그림 1과 같음.



그림 1. DB-free 영상분석 기반 전주기 건설프로세스 통합관리 플랫폼 개념도.

### ○ 본 연구의 용도 및 적용 분야

- 본 연구에서 개발하는 DB-free 영상분석 기반 전주기 건설프로세스 통합관리 플랫폼은 임의 공종의 현장 상황정보를 자동으로 추출하고 건설프로젝트 전 시공과정 동안 작업 생산성을 지속적으로 측정하고 분석함으로써 공사계획 대비 실적 분석, 공사비/공기 관리 및 예측, 인력 및 장비 투입계획 수립 등 현장 프로젝트관리 업무를 지원함.

| 건설프로젝트 단계      | 시공단계                                                                                                                                                                                                |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 분석 대상          | 건설현장, 작업자, 장비, 건설생산물(토사, 골조 등)                                                                                                                                                                      |
| 데이터 및 생산 정보 유형 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 데이터: 건설현장 CCTV 영상 데이터, 공사계획 데이터</li> <li>• 정보: 작업유형, 투입자원 현황, 작업량 등의 현장 상황정보</li> </ul>                                                                    |
| 활용분야           | 전주기 건설프로세스 통합관리<br>(생산성 관리, 공사비/공기 예측, 공사계획 및 장비투입계획 수립 등)                                                                                                                                          |
| 플랫폼 요구사항       | DB-free 영상분석 기반 전주기 건설프로세스 통합관리 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 건설현장 맞춤형 DB-free 영상분석기술</li> <li>• DB-free 영상분석 기반 전주기 건설프로세스 통합관리 플랫폼</li> <li>• 국내외 현장실험을 통한 플랫폼의 실무적 제약조건 도출</li> </ul> |

### ○ 본 연구의 독창성 및 우수성

- **건설현장 맞춤형 영상분석기술 개발을 위한 학습용 DB 구축의 자동화:** 본 연구의 DB-free 영상분석기술은 Web-Crawling, Cyber-Physical Simulation 등 최신 기술을 이용하여 학습용 DB를 사전에 자동으로 구축하고, Human-Computer Interactive Learning 기술을 활용하여 실제로 분석하고자

---

하는 현장으로부터 영상 데이터를 추가적으로 손쉽게 수집하여 DB를 업데이트함. 특히, Cyber-Physical Simulation은 실제 상황에서 수집하기 어려운 영상정보를 가상 시뮬레이션을 통해 확보할 수 있다는 장점이 있음. 이를 통해 DB 구축에 많은 시간과 비용이 요구되던 기존 기술의 한계를 극복하고 건설현장의 다양성을 반영한 학습용 DB를 구축함으로써 높은 성능의 영상분석기술 개발이 가능함. 이 같은 접근방법은 건설분야에서는 첫 번째 시도이고 IT분야에서 또한 도로, 실내건물 등 일부 환경을 대상으로만 개발된 바 있어 기술적으로 매우 독창적이고 우수하다고 판단됨.

- **전주기 건설프로세스에 적용 가능한 일반화된 방법론 개발:** 본 연구는 Scene/Image Classification 알고리즘을 적용하여 건설현장에서 수집된 영상으로부터 건설공종을 자동으로 분류하는 기술을 개발함. 즉, 어떤 영상이 입력되었을 때 영상 내 공종이 토공사인지 골조공사인지 등을 자동으로 판단하고 적합한 생산성 분석 알고리즘을 선별하여 적용함. 이를 통해 특정 공종에만 적용 가능했던 기존 기술의 한계를 넘어 건설프로세스 전주기에 대한 통합관리가 가능함. Scene/Image Classification 알고리즘의 경우, 토공사, 골조공사 등 큰 단위 공종을 구분하는 것 외에도 추가적인 요소를 고려해야 함. 예를 들어 토공사 내에서도 굴삭기의 파기, 회전, 실펀, 이동 등 정확한 생산성 분석에 필수적인 세부작업 또한 구분해야 한다는 점에서 기술적으로 매우 도전적이라고 할 수 있음.
- **실무적 제약조건을 고려한 건설프로세스 통합관리 플랫폼 개발:** 기존의 관련 연구는 주로 성능 시험 위주의 개발을 진행하고 실제 현장 적용 시 발생 가능한 실무적 제약조건을 면밀하게 고려하지 못해 상용화에 한계가 있었음. 본 연구는 토공사, 골조공사, 마감공사 등 다양한 핵심 공종에 대한 실험을 국내외 현장에서 수행하며 카메라 및 분석 장비 설치와 관련된 현장 제약조건을 분석하는 등 현장에서 실제로 활용될 수 있는 플랫폼을 개발함. 특히, 국내 현장뿐만 아니라 해외 현장에서도 실험을 수행하여 다양한 현장 상황에도 적용 가능한 범용성을 띤 분석기술을 개발함.

#### ○ 국제공동연구의 필요성: DB-free 영상분석기술 역량, 해외 현장실험 및 기술이전

- 본 연구를 성공적으로 수행하기 위해서는 DB-free 영상분석기술이 필수적임. 특히 Web-Crawling은 온라인상의 기존 DB로부터 사진 및 영상정보를 수집하고, Human-Computer Interactive Learning 기술은 현장에서 데이터를 업데이트한다는 점을 고려할 때, 실제 데이터 수집이 어려운 정보에 대해서는 가상의 데이터를 활용하는 Cyber-Physical Simulation 기술이 필요함. 국내에서도 Cyber-Physical Simulation 기술을 연구한 바 있으나 주로 재난재해 상황의 재실자 대피, 건물 실내 유지관리에 초점을 맞추었을 뿐 작업자, 중장비, 구조물, 자재 등이 시시각각 변화하는 복잡한 건설현장을 모사한 사례는 매우 부족함.
- Hong Kong Polytechnic University의 JoonOh Seo 교수는 IT 기술을 활용한 건설현장 모니터링 및 프로세스관리 분야의 세계적인 권위자이며, CPS 기술을 이용하여 작업자 영상인식, 안전사고 위험요인 도출, 작업의 물리적 간섭 분석, 작업 생산성 분석 등 건설현장을 가상의 공간에 재현하여 건설프로세스 통합관리 지식을 도출하는 연구를 다수 수행함. 특히 본 연구의 핵심이 되는 가상의 학습 DB를 현장 작업자를 대상으로 행동 패턴을 분석하여 구축한 경험이 있음. 따라서 JoonOh Seo 교수와의 국제공동연구는 연구목표를 달성하기 위해 반드시 필요함.
- 또한, 세계적으로 통용될 수 있는 국제기준에 부합하는 플랫폼을 개발하기 위해서는 국내뿐만 아니라 해외 현장에서 실험을 수행하여 다양한 현장 여건을 고려한 실무적 제약조건을 도출하는 것이 필요함. JoonOh Seo 교수는 현장실험을 위한 해외 테스트베드를 확보하고 국제적 시각에서 개발된 기술을 검증하여 중국뿐만 아니라 동남아시아 개발도상국 시장으로의 기술이전을 위한 가교역할을 수행할 것임.

---

## 2) 연구개발과제의 연차별 목표

### ○ 연차별 목표

- **[1차년도] 건설현장 맞춤형 DB-free 영상분석기술 개발**
  - 본 연구는 영상분석기술 개발에 필요한 학습용 DB 구축의 어려움을 해결하기 위해서 건설현장 맞춤형 DB-free 영상분석기술을 개발함. DB-free 영상분석기술은 (1) 인터넷 영상을 자동으로 업데이트하는 Web-Crawling 기술, (2) 가상의 학습용 모델을 생산하는 Cyber-Physical Simulation

기술, (3) 실제 분석 대상 현장으로부터 영상 데이터를 실시간으로 업데이트하는 Human-Computer Interactive Learning 기술을 활용하여 학습용 DB를 효율적으로 구축하는 기술이며 학습에 필요한 시간과 노력을 최소화할 수 있고 DB의 다양성을 확보할 수 있음. 이는 정확도 높은 영상분석기술 개발을 가능하도록 함.

• [2차년도] DB-free 영상분석 기반 전주기 건설프로세스 통합관리 플랫폼 개발

- 본 연구는 단일 공종을 넘어 전 공종을 관리할 수 있는 전주기 건설프로세스 통합관리 플랫폼을 개발함. 전주기 건설프로세스 통합관리 플랫폼은 DB-free 영상분석기술을 활용하여 전체 시공과정 동안 임의의 공종에서 촬영된 영상 데이터를 수집, 자동으로 작업유형을 분석하여 투입자원 현황, 작업량, 작업상태 등의 현장 상황정보를 추출하고 시간당 작업량, 작업 사이클타임, 평균 유휴시간 등 건설 생산성을 측정하고 생산성 저해요인 등을 도출함.

• [3차년도] 국내외 현장실험을 통한 플랫폼의 실무적 제약조건 도출 및 보완

- 본 연구는 실제 건설현장에 개발된 플랫폼을 적용하여 개발기술이 현장에서 활용되기에 앞서 해결되어야 하는 실무적 제약조건을 파악하고 이에 맞춰 플랫폼을 보완함. 특히, 건설프로젝트의 주요 공종인 토공사, 골조공사, 마감공사를 대상으로 국내외 건설현장에 개발기술을 적용하여 국제적으로 통용될 수 있는 범용성을 확보함.

| 구분            | 연구개발목표                                                | 핵심 연구개발성과<br>(연구개발성과물)                                     | 현재 국내·외<br>기술수준                                                                               | 연구개발<br>목표치                                                                        | 목표치<br>설정 근거                                                                                                               | 가중치<br>(%) |
|---------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 1년차<br>(2019) | 건설현장<br>맞춤형<br>DB-free<br>영상분석기술<br>개발                | 건설현장 맞춤형<br>Human-Computer<br>Interactive<br>Learning 알고리즘 | 생산성 분석<br>정확도 80%의<br>영상분석기술<br>개발을 위해<br>필요한 학습 DB<br>구축 소요시간<br>(매뉴얼, 이미지<br>1장당 평균<br>10초) | 생산성 분석<br>정확도 80%의<br>영상분석기술<br>개발을 위해<br>필요한 학습 DB<br>구축 소요시간<br>(매뉴얼 대비<br>1/10) | 80% 이상의 생산성 분석<br>정확도를 확보하는데<br>필요한 학습용 DB를<br>구축하기 위해서 사람에<br>의한 기존의 매뉴얼한<br>방법 대비 개발된<br>DB-free 방법의<br>소요시간을 평가하기<br>위함 | 7%         |
|               |                                                       | 건설현장 영상<br>데이터 Web-Crawling<br>알고리즘                        |                                                                                               |                                                                                    |                                                                                                                            | 10%        |
|               |                                                       | 건설현장<br>Cyber-Physical<br>Simulation<br>알고리즘               |                                                                                               |                                                                                    |                                                                                                                            | 10%        |
| 2년차<br>(2020) | DB-free<br>영상분석<br>기반 전주기<br>건설프로세스<br>통합관리<br>플랫폼 개발 | DB-free 영상분석<br>기반 전주기 건설<br>프로세스 통합관리<br>플랫폼 프로토타입        | 다공종에 적용한<br>생산성 자동<br>분석 모델 없음                                                                | 생산성 분석<br>정확도<br>(전문가 분석값<br>대비 80%)                                               | 3가지의 대표<br>공종(토공사, 골조공사,<br>마감공사)을 대상으로<br>자동 분석한 생산성<br>정보가 전문가가 분석한<br>생산성 정보 대비 몇<br>%의 정확도를 보이는지<br>평가하기 위함            | 37%        |
| 3년차<br>(2021) | 국내외<br>현장실험을<br>통한<br>플랫폼의<br>실무적<br>제약조건<br>도출 및 보완  | 국내외 현장실험을<br>통해 실무 검증용<br>마친 통합관리<br>플랫폼 시제품               | -                                                                                             | 제약조건 타당성<br>90%                                                                    | 플랫폼의 사용성과<br>관련한 제약조건 및<br>사용 만족도를 도출하여<br>실제 건설현장 적용<br>가능성을 평가하기 위함                                                      | 10%        |
|               |                                                       |                                                            | -                                                                                             | 플랫폼 만족도<br>90%                                                                     |                                                                                                                            | 10%        |
|               |                                                       |                                                            | -                                                                                             | 생산성 향상<br>평균값<br>(플랫폼 적용<br>전후 대비 평균<br>20%)                                       | 3가지의 대표 공종을<br>대상으로 개발 플랫폼이<br>적용되기 전과 후의<br>생산성을 측정하여 평균<br>생산성 향상도를<br>평가하기 위함                                           | 16%        |

## 2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

### 2-1. 연구개발과제의 수행 목표 및 내용

#### (1) 연구개발의 최종목표 및 최종성과물

| 구분   | 내용                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 최종목표 | 건설 생산성 20% 향상을 위한 DB-free 영상분석 기반<br>전주기 건설프로세스 통합관리 플랫폼 개발                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 세부목표 | <p>○ [연구목표 1] 건설현장 맞춤형 DB-free 영상분석기술 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 건설현장 맞춤형 Human-Computer Interactive Learning 알고리즘 개발</li> <li>• 건설현장 영상 데이터 Web-Crawling 알고리즘 개발</li> <li>• 건설현장 Cyber-Physical Simulation 알고리즘 개발</li> </ul> <p>○ [연구목표 2] DB-free 영상분석 기반 전주기 건설프로세스 통합관리 플랫폼 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• DB-free 영상분석 기반 현장 상황정보 자동 분석 알고리즘 개발</li> <li>• 전주기 건설프로세스 통합관리 플랫폼 설계 및 구축</li> <li>• 건설프로세스 생산성 자동 분석 알고리즘 개발</li> </ul> <p>○ [연구목표 3] 국내외 현장실험을 통한 플랫폼의 실무적 제약조건 도출 및 보완</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 국내외 현장실험을 통한 플랫폼 활용 제약조건 도출</li> <li>• 개발 플랫폼 검증 및 보완</li> </ul> |

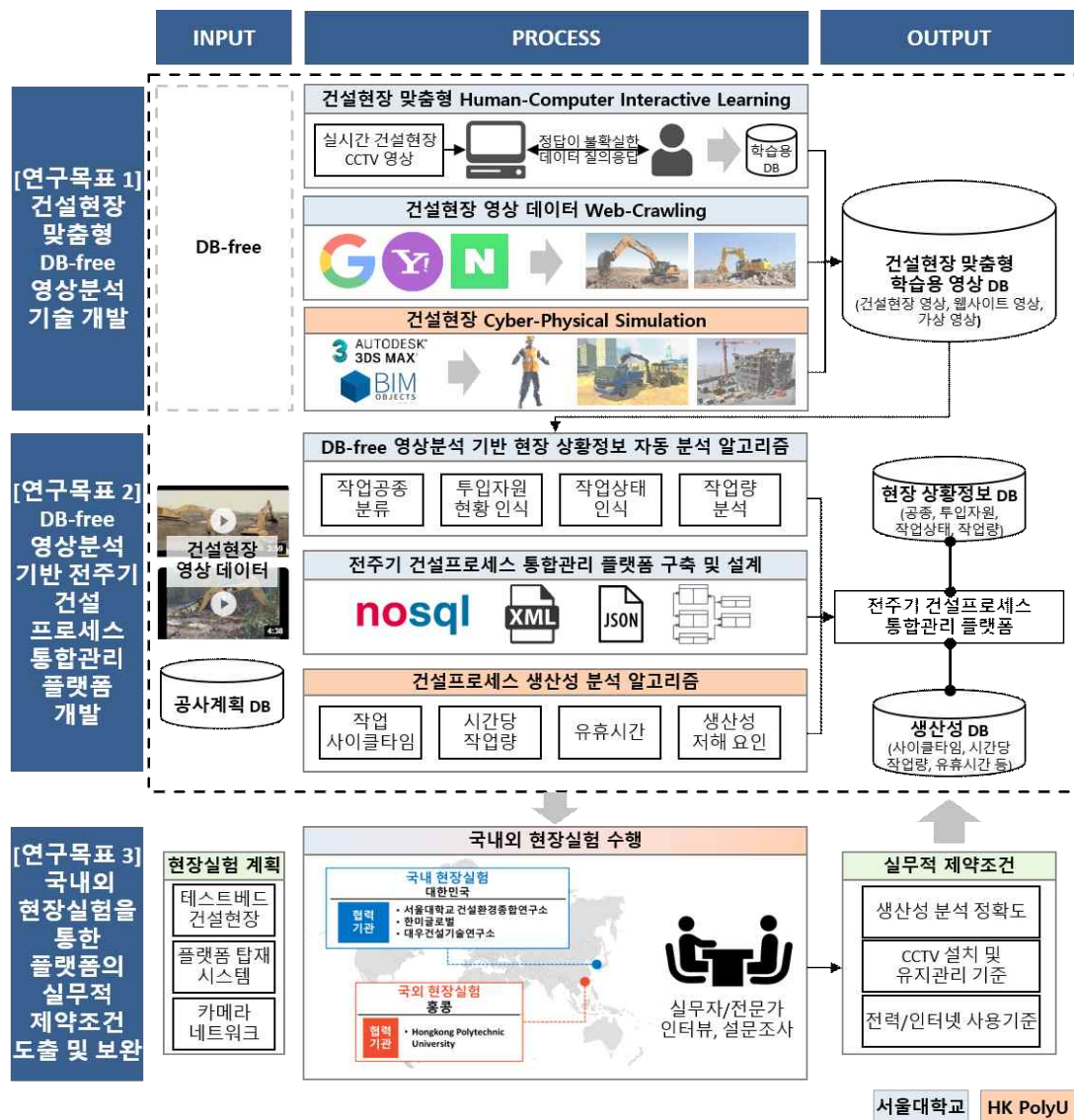


그림 2. 연구개발의 목표 및 개념도.

## 2) 최종성과물의 기술성숙도

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

| 최종성과물                                              | 기술성숙도(TRL) |       | 기술성숙도에 대한 근거                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|----------------------------------------------------|------------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                    | 연구시작시      | 연구종료시 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| DB-free<br>영상분석<br>기반 전주기<br>건설프로세스<br>통합관리<br>플랫폼 | 3 단계       | 7 단계  | <p>-(연구시작시) 국내외 연구동향을 분석한 결과, DB-free 영상분석기술은 보행자, 건물 재실자 인식 등 일부 분야에서 개발되어 적용 가능성이 실험환경에서 검증됨. 하지만 기존의 기술은 건설현장에는 적용되지 않아 실험적 증명 단계인 기술성숙도 3단계로 판단됨.</p> <p>-(연구종료시) 본 연구책임자와 공동연구책임자는 건설현장 영상분석 전문가로, 1차년도에 DB-free 영상분석기술을 건설현장에 맞춤 개발하고 실험실 환경에서 성능을 평가함. 2차년도에는 DB-free 영상분석 기반 전주기 건설프로세스 플랫폼을 개발하여 유사환경에서 성능을 시험함. 최종적으로 3차년도에는 토공사, 골조공사, 마감공사 등 다양한 공종에 대한 파일럿 테스트를 실제 건설현장에서 수행함으로써 개발 플랫폼을 활용함에 따른 실무적 제약사항을 도출하고 개발기술을 검증, 보완함(TRL 7단계 실제환경 시작품).</p> |

## (3) 연차별 연구개발 목표 및 내용

| 연차       | 핵심성과                                        | 주요 연구활동                                                                   | 세부 연구내용                                                                                                                                                                                                                                                           |
|----------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1차<br>년도 | [1]<br>건설현장<br>맞춤형<br>DB-free<br>영상분석<br>기술 | [1-1] 건설현장<br>맞춤형<br>Human-Computer<br>Interactive<br>Learning 알고리즘<br>개발 | <ul style="list-style-type: none"> <li>Active Learning, Reinforcement Learning, Online Learning 등 영상분석 기반 Human-Computer Interactive Learning 알고리즘 조사 및 분석</li> <li>건설현장 맞춤형 Human-Computer Interactive Learning 알고리즘 개발</li> <li>실험실 환경에서의 성능 시험 및 검증</li> </ul> |
|          |                                             | [1-2] 건설현장<br>영상 데이터<br>Web-Crawling<br>알고리즘 개발                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>Web-Crawling 알고리즘 조사 및 분석</li> <li>영상 데이터 자동 수집을 위한 건설분야 키워드 기반 Web-Crawling 알고리즘 개발</li> <li>Noise 데이터 필터링 알고리즘 개발</li> <li>실험실 환경에서의 성능 시험 및 검증</li> </ul>                                                               |

|          |                                                                  |                                              |                                                                                                                                                                                                                                               |
|----------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|          |                                                                  | [1-3] 건설현장 Cyber-Physical Simulation 알고리즘 개발 | <ul style="list-style-type: none"> <li>Cyber-Physical Simulation 소프트웨어 조사 및 분석</li> <li>작업자, 건설장비, 작업환경, 구조물 등 건설현장 맞춤형 CPS 기술 개발</li> <li>CPS 기반 영상 데이터 Rendering 알고리즘 개발</li> <li>실험실 환경에서의 성능 시험 및 검증</li> </ul>                           |
| 2차<br>년도 | [2]<br>DB-free<br>영상분석<br>기반<br>전주기<br>건설<br>프로세스<br>통합관리<br>플랫폼 | [2-1] DB-free 영상분석 기반 현장 상황정보 자동 분석 알고리즘 개발  | <ul style="list-style-type: none"> <li>DB-free 영상분석 기반 작업공종 자동 분류 모델 개발</li> <li>DB-free 영상분석 기반 투입자원 현황 자동 인식 모델 개발</li> <li>DB-free 영상분석 기반 작업상태 자동 인식 모델 개발</li> <li>DB-free 영상분석 기반 건설작업량 자동 분석 모델 개발</li> <li>유사환경에서의 시험 및 검증</li> </ul> |
|          |                                                                  | [2-2] 전주기 건설프로세스 통합관리 플랫폼 설계 및 구축            | <ul style="list-style-type: none"> <li>PostSQL, XML, JSON 등 플랫폼 설계/구축 기술 조사 및 분석</li> <li>전주기 건설프로세스 통합관리 플랫폼 설계 및 구축</li> <li>유사환경에서의 시험 및 검증</li> </ul>                                                                                     |
|          |                                                                  | [2-3] 건설프로세스 생산성 자동 분석 알고리즘 개발               | <ul style="list-style-type: none"> <li>시간당 작업량, 작업 사이클타임 등 건설프로세스 생산성 측정 알고리즘 개발</li> <li>생산성 저해요인 도출, 유휴시간 분석 등 건설프로세스 생산성 분석 알고리즘 개발</li> <li>유사환경에서의 시험 및 검증</li> </ul>                                                                    |
| 3차<br>년도 | [3]<br>국내외<br>현장실험<br>및 개발<br>플랫폼<br>보완                          | [3-1] 국내외 현장실험을 통한 플랫폼 활용 제약조건 도출            | <ul style="list-style-type: none"> <li>국내외 현장실험 계획 수립</li> <li>국내외 현장실험 수행</li> <li>플랫폼 활용 제약조건 도출</li> </ul>                                                                                                                                 |
|          |                                                                  | [3-2] 개발 플랫폼 검증 및 보완                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>분석 정확도 평가 및 보완</li> <li>생산성 향상도 및 만족도 조사</li> <li>생산성 자동 분석 알고리즘 보완</li> </ul>                                                                                                                         |

## 1) 1차년도

○ 1차년도는 본 연구의 최종목표인 “건설 생산성 20% 향상을 위한 DB-free 영상분석 기반 전주기 건설프로세스 통합관리 플랫폼 개발”을 위해 필요한 핵심 기반기술을 개발하는 단계임. 보다 구체적인 연구개발 목표와 개발내용 및 범위는 다음과 같음(그림 3).

### ① 개발 목표: 건설현장 맞춤형 DB-free 영상분석기술 개발

- 주관연구기관(서울대학교)과 공동연구기관(Hong Kong Polytechnic University, HK PolyU)은 국제협력을 통해 건설현장 맞춤형 DB-free 영상분석기술을 공동 개발함. 특히, 현장에서 수만 장의 학습 데이터를 수집하여 행동유형별로 분류하는 과정을 대신할 수 있도록 온라인, 가상현실 등 첨단기술을 활용하여 학습용 영상 DB를 자동으로 구축한 뒤, 실제 현장에서 분석을 수행하면서 새로운 학습 데이터를 실시간으로 생성하여 DB를 업데이트함으로써 DB 구축에 필요한 시간과 노력을 최소화하고 건설현장에 특화된 학습용 DB를 구축함.



그림 3. 건설현장 맞춤형 DB-free 영상분석기술 개발내용 및 범위.

## ② 개발내용 및 범위

### • 주관연구기관(서울대학교)

- **[연구목표 1-1] 건설현장 맞춤형 Human-Computer Interactive Learning 알고리즘 개발:** Human-Computer Interactive(HCI) Learning이란 사용자와 컴퓨터가 상호작용을 수행하면서 최적의 학습용 DB를 구축하는 기법임. 본 연구는 Active Learning(컴퓨터가 예측한 결과에 대해서 사용자가 정답 여부를 판단하는 것 또는 컴퓨터가 잘못 예측한 결과를 사용자가 보정하는 것), Reinforcement Learning(정확하게 예측한 결과와 부정확하게 예측한 결과에 대해 점수를 다르게 주어 모델의 성능을 높여가는 것), Online Learning(현장에서 사용자가 분석하고자 하는 대상에 대한 데이터를 직접 업데이트하는 것) 등 대표적인 HCI Learning 알고리즘을 조사, 분석하고 작업자, 장비, 자재 등이 혼재되어 있는 건설현장에서 작동할 수 있도록 맞춤화함. 또한, 개발 알고리즘에 대한 실험실 환경에서의 성능 시험 및 검증을 수행함.

- **[연구목표 1-2] 건설현장 영상 데이터 Web-Crawling 알고리즘 개발:** Web-Crawling이란 컴퓨터가 포털사이트, 블로그, 인터넷카페 등 임의의 웹사이트에서 이미지, 동영상, 텍스트, 문서 등 사용자가 원하는 데이터를 자동으로 검색 및 추출하여 저장하는 방법임. 예를 들어 구글 웹사이트에서 “굴삭기”라는 키워드로 이미지 검색을 수행하고 검색된 이미지를 자동으로 학습용 DB에 저장할 수 있음. 본 연구는 대표적인 Web-Crawling 방법을 조사 및 분석하고, 영상 데이터 수집을 위한 건설 키워드 기반의 Web-Crawling 알고리즘을 개발함. 또한, 웹사이트에서 무분별하게 수집되는 일부 Noise 데이터(예시: “굴삭기”로 키워드 검색을 수행하였으나 덤프트럭 이미지가 수집되는 경우)를 필터링하는 알고리즘을 개발함. 마지막으로, 실험실 환경에서 개발 알고리즘의 성능을 시험하고 검증함.

### • 공동연구기관(HK PolyU)

- **[연구목표 1-3] 건설현장 Cyber-Physical Simulation 알고리즘 개발:** Cyber-Physical Simulation(CPS)이란 가상의 물리적 시공간을 모사하는 기법으로 실제 상황뿐만 아니라 접근하기 어려운 물리적 공간 및 위험상황까지도 반복적으로 재현하여 사용자가 적은 비용으로 안전한 실험환경을 구축할 수 있음. 본 연구에서는 CPS 기술을 이용하여 가상의 공간에서 건설프로세스를 시뮬레이션하고 작업자, 장비, 작업환경, 구조물 등의 건설현장 구성요소를 모사함으로써 데이터 수집이 어려운 작업행동에 대한 학습 DB를 효과적으로 구축할 수 있음. 본 연구는 기존의 CPS 소프트웨어를 조사, 분석하여 건설현장의 구성요소와 다양한 건설작업을 모사할 수 있는 기술을 개발함. 또한, 3차원의 CPS 시공간에서 2차원의 학습 이미지 데이터를 자동 추출하는 Rendering 알고리즘을 개발하고, 실험실 환경에서 개발 알고리즘의 성능을 검증함.

## 2) 2차년도

- 2차년도의 연구목표는 1차년도에 개발한 건설현장 맞춤형 DB-free 영상분석기술을 기반으로 한 전주기 건설프로세스 통합관리 플랫폼을 개발하는 것임. 구체적인 연구개발 목표와 개발내용 및 범위는 다음과 같음(그림 4).

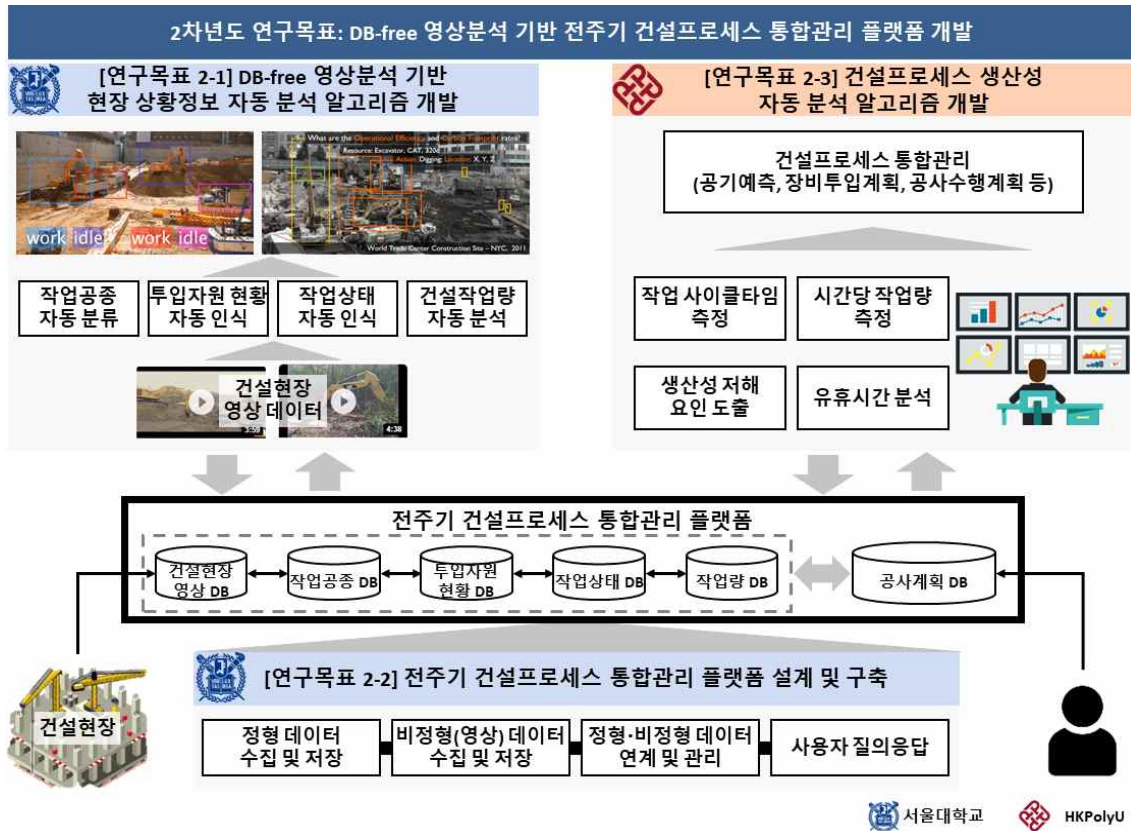


그림 4. DB-free 영상분석 기반 전주기 건설프로세스 통합관리 플랫폼 개발내용 및 범위.

### ① 개발 목표: DB-free 영상분석 기반 전주기 건설프로세스 통합관리 플랫폼 개발

- 주관연구기관(서울대학교)과 공동연구기관(HK PolyU)은 국제협력을 통해 전주기 건설프로세스 통합관리 플랫폼을 공동 개발함. 임의의 공중에서 촬영된 영상 데이터가 플랫폼에 입력되었을 때 1차년도에서 구축한 학습 DB를 활용하여 데이터를 분석함으로써 작업공종, 투입자원 현황, 작업상태, 작업량 등의 현장 상황정보를 자동으로 추출한 뒤 이에 근거하여 시간당 작업량, 작업 사이클타임, 평균 유휴시간, 공사계획 대비 실적 등 생산성을 분석하고 생산성 개선을 위한 저해요인을 평가하는 전주기 통합관리 플랫폼을 개발함. 플랫폼의 소프트웨어는 Linux 운영 체제를 기반으로 영상분석을 실시하며, Python·C언어 등의 소프트웨어 프레임워크를 활용하여 설계함. 본 플랫폼은 안드로이드·iOS·바다·Windows·Mac 운영 체제 기반의 기기에서 활용 가능함.

### ② 개발내용 및 범위

- 주관연구기관(서울대학교)
  - **[연구목표 2-1] DB-free 영상분석 기반 현장 상황정보 자동 분석 알고리즘 개발:** 건설현장에서 수집한 영상 데이터를 분석하여 작업공종, 투입자원 현황, 작업상태, 작업량 등의 현장 상황정보를 자동으로 추출함. 이를 위해서 본 연구는 이미지 분류(Image Classification), 객체 인식(Object Detection), 작업 인식(Action/Activity Recognition) 등 영상분석 알고리즘을 건설현장 영상 데이터의 특성을 반영하여 개발하고, 유사환경에서 개발 알고리즘의 성능을 검증함.
  - **[연구목표 2-2] 건설프로세스 통합관리 플랫폼 설계 및 구축:** 본 연구가 개발할 플랫폼은 앞서 자동 수집된 현장 상황정보(정형 데이터)와 관련 건설현장 영상(비정형) 데이터를 효율적으로 저장·연계·관리하고 사용자의 요청(예시: 현재 시간당 작업량에 대한 정보 요청)에 따라 정보를 가공하여 전달하는 지식정보 관리체계임. 이를 위해서 PostgreSQL, XML, JSON 등 기존의 플랫폼 설계

및 구축 기술을 조사, 분석하여 정형/비정형 데이터가 혼재되어 있는 건설프로세스 통합관리에 적합한 기술을 선별하여 플랫폼을 설계하고 구축함.

• 공동연구기관(HK PolyU)

- [연구목표 2-3] 건설프로세스 생산성 자동 분석 알고리즘 개발: 본 알고리즘은 플랫폼에 탑재되는 분석 알고리즘으로서 앞서 구축된 플랫폼의 현장 상황정보를 토대로 시간당 작업량, 작업 사이클타임, 평균 유휴시간, 공사계획 대비 실적 등 건설프로세스의 생산성을 자동으로 측정하고 분석함. 이를 위해서 Multi-Domain Convolutional Neural Networks 기반 객체 추적 알고리즘, Optical Flow 분석 알고리즘 등을 적용하여 생산성과 그 변화 양상을 진단하고, 유사환경에서 개발 알고리즘의 성능 시험 및 검증을 수행함.

### 3) 3차년도

- 3차년도의 연구목표는 실제 건설현장에서 개발된 플랫폼을 시험가동 해봄으로써 통합관리 플랫폼의 성능을 검증하고 기술적 개선점 및 실무적 제약조건을 도출하는 것임. 구체적인 연구개발 목표와 개발내용 및 범위는 다음과 같음(그림 5).



그림 5. 국내외 파일럿 테스트를 통한 플랫폼의 실무적 제약조건 도출 및 보완 내용과 범위.

#### ① 개발 목표: 국내외 현장실험을 통한 플랫폼의 실무적 제약조건 도출 및 보완

- 주관연구기관(서울대학교)과 공동연구기관(HK PolyU)은 국내외 현장(대한민국과 홍콩)을 대상으로 개발 플랫폼을 공동으로 적용하여 현장에서 발생 가능한 애로사항을 확인하고 이를 해소하기 위한 실무방안을 마련함.

#### ② 개발내용 및 범위

- 주관연구기관(서울대학교) 및 공동연구기관(HK PolyU)
  - [연구목표 3-1] 국내외 현장실험을 통한 플랫폼 활용 제약조건 도출: 현장실험을 위한 테스트베드로 토공사, 골조공사, 마감공사 등 다양한 공종을 포함한 국내외(대한민국 및 홍콩) 현장을 확보하고 현장의 고유한 특성정보를 우선 수집함. 현장 조사를 통해 카메라 네트워크 및 플랫폼 서버를 설치할 위치를 확인하고, 시공과정 동안 동영상을 촬영하고 관리하는 모니터링 방안을 마련함. 계획에 따라 실험을 수행하며 발생하는 실무적, 기술적 제약조건을 확인함.
  - [연구목표 3-2] 개발 플랫폼 검증 및 보완: 앞서 도출된 실무적, 기술적 제약조건을 토대로 개발 플랫폼을 보완함. 전주기에 걸친 생산성 정보를 통합관리하기 위해 각 공종에서 발생하는 생산성 정보를 플랫폼을 통해 지속적으로 관리하고 분석하며 입력-분석-출력-관리로 이어지는 플랫폼의 기술적 성능을 검증, 보완함.

## 2-2. 연구개발과제의 수행 전략 및 과정

### 1) 연구개발 수행 전략

#### ○ 연구진 간 국제협력방안: 연구진 화상회의 및 국제협력워크숍 정례화

- 연구과제를 성공적으로 수행하기 위해서는 주관기관과 공동기관 간의 긴밀한 국제협력이 필수적임. 두 기관은 기본적으로 2주에 1회 연구진 화상회의를 실시하여 진도를 확인하고 연구계획을 논의함. 또한, 매년 상반기에는 온라인 플랫폼(Skype, Zoom)을 활용한 비대면 국제협력워크숍을, 하반기에는 서울대학교에서 대면 국제협력워크숍을 개최하여 연구성과물을 공유하고 방법론과 실험방법에 대한 심도 있는 논의를 진행함.

#### ○ 연구책임자 및 공동연구책임자의 연구 역량: 영상분석, 건설프로세스 통합관리 및 플랫폼 구축 역량

- 연구책임자 지석호 교수 연구실은 연구원 18명이 최근 3년간 19개의 빅데이터 관련 연구과제를 수행한 건설분야 빅데이터 분석 및 플랫폼 개발 특화 연구실임. 지석호 교수는 “건설현장 CCTV 영상분석을 통한 작업자 위험상황 및 불안정한 행동 모니터링 시스템(서울대학교)”, “교량유지관리시스템 데이터 및 비정형 안전진단보고서 자동분석을 통한 교량 부재단위의 손상발생패턴 도출 모델 개발(한국연구재단)”, “건설/시설 안전분야 정보 기반 통계 및 활용방안 기획연구(한국시설안전공단)”, “건설 프로젝트 전주기 위험요인 관리 및 대응을 위한 딥러닝 기반 맞춤형 지식정보 서비스 시스템(국토교통과학기술진흥원)” 등 본 연구와 관련된 건설현장 영상 데이터 분석, 건설 생산성 및 안전성 분석, DB 구조화, 플랫폼 기반 건설 경험정보 추출 등 다수의 건설 IT 및 빅데이터 연구를 연구책임자로서 성공적으로 수행하였음. 연구성과로는 최근 5년간 SCI(E)/SSCI급 논문 게재 38편, 특허등록 10건 및 소프트웨어 등록 8건, 저서 출간 4편, 석박사 전문인력 배출 25명을 달성함.
- 공동연구책임자 JoonOh Seo 교수는 건설프로세스 통합관리, 건설 IT 및 자동화 분야의 세계적인 권위자이며, 본 연구개발에 필요한 핵심기술인 건설현장 Cyber-Physical Simulation 및 영상분석에 대한 선진역량을 갖추었고 현재 8개의 관련 연구과제를 수행 중임. 특히, 작업자의 인체공학적 특성, 건설장비의 작업 메커니즘, 작업자/건설장비-작업환경 간의 상호작용 등 건설프로세스 통합관리에 관한 전문지식을 바탕으로 최근 5년간 SCI(E)/SSCI급 국제저명학술지 논문 게재 33편, 특허등록 3건을 달성함. JoonOh Seo 교수는 국제저명학술지 2018 Journal of Computing in Civil Engineering에서 우수논문상을 수상하였으며, Automation in Construction(2017)과 Advanced Engineering Informatics(2018)의 우수심사자로 선정되었음. 현재 Journal of Management in Engineering(2020 IF 2.867)의 Special Collection(“Re-thinking the Benefits of Adopting Digital Technologies in the AEC Industry”)의 Guest Editor를 맡고 있음.

#### ○ 연구진의 국내외 인적·물적 네트워크 활용

- 연구의 성공적인 수행에 필요한 기술적/제도적/정책적 자문, 연구 결과물 검증, 데이터 수집 및 국내외 현장실험 수행을 위해 서울대학교 건설환경종합연구소, 서울대학교 빅데이터연구원, 서울대학교 엔지니어링개발연구센터, 한국건설기술연구원, 한국건설산업연구원, 대우건설기술연구소 등 연구진이 구축하고 있는 산학협력 네트워크를 적극 활용함.
- 해외 전문연구기관(미국 Construction Industry Institute, 호주 Sustainable Built Environment National Research Centre) 해외 전문학회(유럽 International Council for Research and Innovation in Building and Construction), 해외 유수대학(National University of Singapore, National Taiwan University of Science and Technology, University of Texas at Austin, Texas A&M University, University of Michigan, Rutgers University, University of Technology Sydney)과의 연구 협조를 통해 연구 성과물의 현장 활용 가능성을 검토하고 국제적으로 통용 가능한 기술을 개발함.

#### ○ 연구성과의 실용화 전략: 기술이전 계약 체결 및 국내외 특허등록, 기업 참여 검토

- 연구진이 보유한 대우건설, GS건설, 현대건설 등 대기업뿐만 아니라 태영건설, 대보건설, 한미글로벌 등 중견기업과의 산학 네트워크를 적극적으로 활용하여 연구개발에 필요한 테스트베드를 확보함. 3차년도 현장실험을 통해 TRL 7의 기술을 개발하고 현장 실무자와 개발기술에 대한 현장적용 가능성을 끊임없이

논의하여 본 연구과제 3차년도 종료 후 6개월 이내에 협력기업과 기술실시계약을 체결할 수 있도록 함. 이를 위해 본격적인 개발기술의 성능 시험, 현장실험이 진행되는 3차년도에서는 실용화 대상(기업) 참여 여부를 연구관리기관과 협의함.

- 국제연구협력을 통해 세계적으로 통용될 수 있는 국제기준에 부합하는 플랫폼을 개발함으로써 홍콩 및 중국뿐만 아니라 동남아시아 개발도상국 시장으로의 기술이전을 추진함. 특히 연구성과를 국내외 특허로 등록함으로써 4차 산업혁명 시대를 대표하는 건설 스타트업으로 발전할 수 있는 기술적 기반을 마련함.

## ○ 기존의 CCTV 영상분석기술 활용

- 최근 기술의 빠른 발전에 따라 다양하게 개발되고 있는 CCTV 영상 내 객체 인식, 행동 인식 등 기존 CCTV 영상분석기술을 본 연구과제 수행에 적극 활용함. 기존의 기술은 영상분석모델의 학습을 위한 DB 구축에 많은 시간과 비용이 요구되고 건설현장의 다양성을 반영하기 어렵다는 한계가 존재함. 이에, HCI Learning, Web-Crawling, CPS 등 최신 기술을 이용하여 기존 영상분석기술의 한계를 해결하기 위한 알고리즘을 개발하고, 이를 통해 건설현장 맞춤형 DB-free 영상분석기술을 개발할 계획임.

## 2) 연구개발 방법 및 수행체계

- 최종 연구목표를 달성하기 위한 주요 연구개발 방법론 및 분석 도구, 그리고 단계별 연구성과물 간 연계 프로세스는 다음 그림 6과 같음.

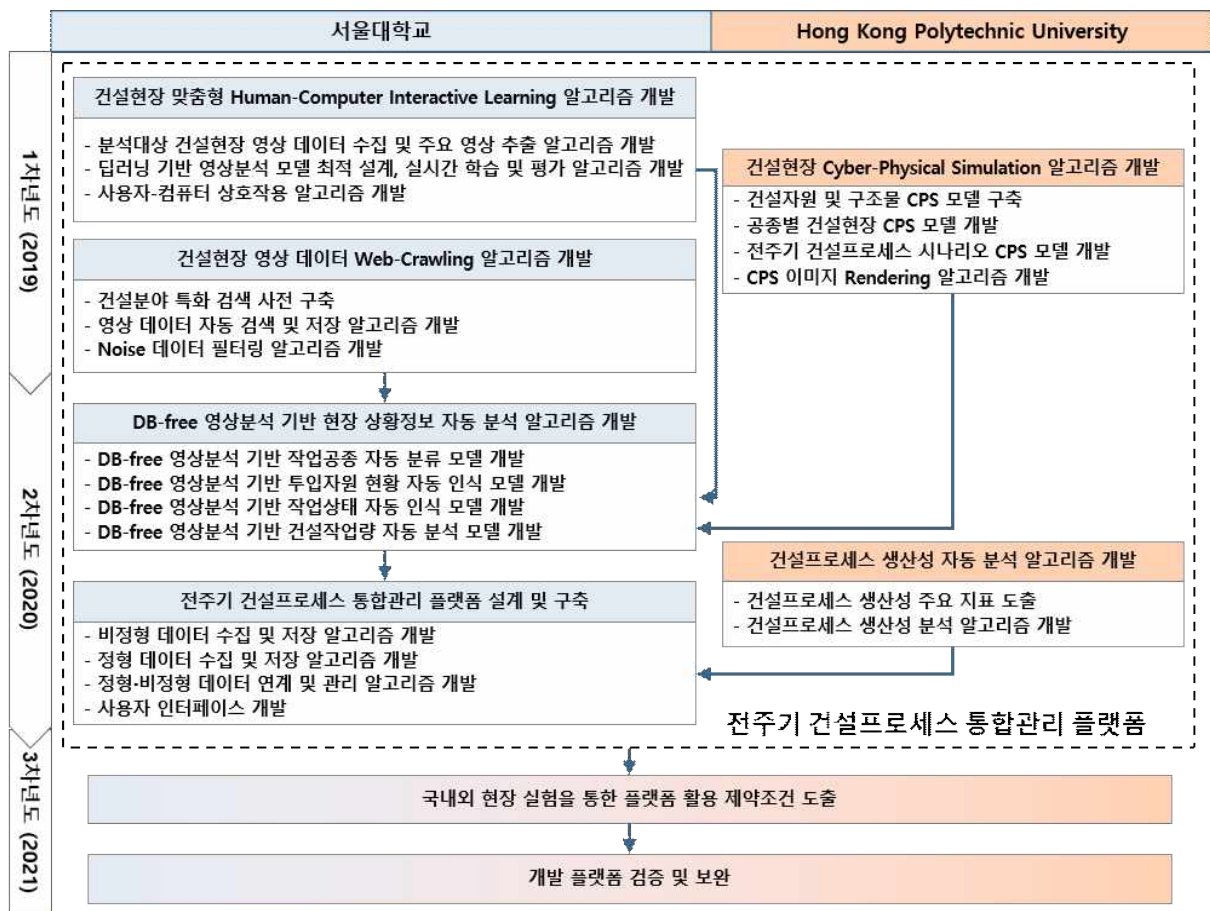


그림 6. 전주기 건설프로세스 통합관리 플랫폼 개발 방법 및 수행체계.

## ○ [연구목표 1] 건설현장 맞춤형 DB-free 영상분석기술 개발

- 현장 맞춤형 DB-free 영상분석기술을 개발하기 위해서 건설현장 맞춤형 Human-Computer Interactive Learning, 건설현장 영상 데이터 Web-Crawling, 현장 Cyber-Physical Simulation 알고리즘을 개발함(그림 7).

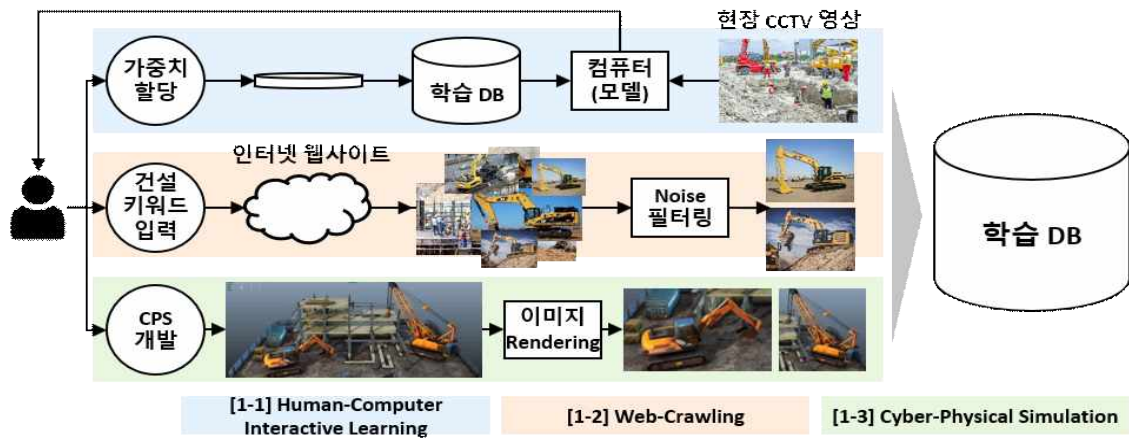


그림 7. 건설현장 맞춤형 DB-free 영상분석기술 개발.

• [연구목표 1-1] 건설현장 맞춤형 Human-Computer Interactive Learning 알고리즘 개발

|      |                                                                                                                       |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 목적   | 건설현장 CCTV 영상에서 학습 데이터를 실시간으로 생성하고 업데이트함으로써 분석 대상에 최적화된 학습 DB 자동 구축                                                    |
| 연구방법 | ① 효과적인 학습 DB 구축 및 모델 생성을 위한 주요 영상 추출 알고리즘 개발<br>② 딥러닝 기반의 영상분석모델 최적 설계, 실시간 학습 및 평가 알고리즘 개발<br>③ 사용자-컴퓨터 상호작용 알고리즘 개발 |
| 산출물  | HCI Learning 알고리즘 및 학습 DB                                                                                             |

- Human-Computer Interactive(HCI) Learning이란 Active/Reinforcement/Online Learning 기술을 활용하여 사용자와 컴퓨터가 상호작용을 수행하면서 최적의 학습용 DB를 구축하는 기법임. 보다 구체적으로, 기계학습 모델을 생성하는 과정에서 컴퓨터가 사용자에게 예측 신뢰도가 낮은 학습 데이터에 대한 정답을 질문하고 사용자가 이에 대해 실시간으로 응답함으로써, 컴퓨터가 예측하기 어려운 데이터에 대한 학습을 우선 수행하여 최소한의 DB로 영상분석기술의 성능을 최대화하고 DB 구축에 필요한 시간과 노력을 최소화함. 본 연구는 다음 3가지 과정을 거쳐 HCI Learning 알고리즘을 개발함.
- (1) 분석 대상 건설현장 영상 데이터 수집 및 주요 영상 추출 알고리즘 개발: 건설현장에 설치된 CCTV로부터 실시간으로 수집되는 대량의 동영상 중 유의미한 영상 데이터를 선별하고 불필요한 사진을 걸러내기 위해서 주요 영상 프레임 추출(Key image frame extraction) 알고리즘을 개발함. RGB 모델 기반 검출, 차영상(Image differencing), Scene Classification 등 가장 적합한 시공간적 특징(Spatio-temporal Feature)을 선별하고 주요 영상 프레임을 추출하는 알고리즘을 개발함.
- (2) 딥러닝 기반 영상분석모델 최적 설계, 실시간 학습 및 평가 알고리즘 개발: 영상분석 분야에서 가장 높은 분석성능을 보이는 Convolutional Neural Networks, Recurrent Neural Networks 등 딥러닝 기반의 모델 구성요소를 설계함. 학습 알고리즘(Stochastic Gradient Descent, Genetic Algorithm 등)을 구현하여 모델을 생성하고 그 성능(정밀도, 재현율)을 평가하는 알고리즘을 개발함. 이를 통해 모델 설계-학습-평가를 반복하는 경험론적 실험을 통해 모델을 점진적으로 개선하여 건설현장에 최적화된 딥러닝 기반 영상분석모델을 설계함.
- (3) 사용자-컴퓨터 상호작용 알고리즘 개발: 본 알고리즘은 3가지 기술로 구성됨. (가) 앞서 수행한 모델 평가 결과 중 예측 신뢰도가 한계치(예시: 50%)보다 낮은 영상 데이터를 추출하여 사용자에게 정답을 질의하고 사용자가 알려준 정답셋을 이용하여 모델을 학습하는 Active Learning, (나) 분석 모델이 정확하게 예측한 결과와 부정확하게 예측한 결과에 대해 사용자가 가중치를 할당하여 모델을 점진적으로 학습하는 Reinforcement Learning, (다) 건설현장 CCTV 영상에서 분석하고자 하는 대상에 대한 데이터를 사용자가 직접 업데이트하고 이를 통해 분석 대상에 최적화된 모델을 학습하는 Online Learning을 개발함.

• [연구목표 1-2] 건설현장 영상 데이터 Web-Crawling 알고리즘 개발

|      |                                                                              |
|------|------------------------------------------------------------------------------|
| 목적   | 인터넷에 산재된 건설현장 영상 데이터를 자동으로 검색하고 저장하여 학습 DB를 자동 구축                            |
| 연구방법 | ① 건설분야 특화 검색 사전 구축<br>② 영상 데이터 자동 검색 및 저장 알고리즘 개발<br>③ Noise 데이터 필터링 알고리즘 개발 |
| 산출물  | Web-Crawling 알고리즘 및 학습 DB                                                    |

- Web-Crawling이란 컴퓨터가 포털사이트, 블로그, 인터넷카페 등 임의의 웹사이트에서 이미지, 동영상, 텍스트, 문서 등 사용자가 원하는 데이터를 자동으로 검색 및 추출하여 저장하는 방법임. Web-Crawling 기술을 활용하면 기존에 “건설현장 직접방문→카메라 설치→동영상 촬영→정답셋 생성”을 통해 학습 DB를 구축하는 방법을 웹사이트를 통해 수집한 이미지 및 영상 데이터로 대체할 수 있음. 본 연구는 다음의 과정을 통해 건설현장 영상 데이터 수집 Web-Crawling 기술을 개발함.
- (1) 건설분야 특화 검색 사전 구축: 사용자가 입력하는 검색 키워드(예시: “토공작업”)뿐만 아니라 유의어(예시: “토공”, “토공사”, “earthmoving”, “earthmoving operations”, “earthworks” 등)를 동시에 적용하여 관련 영상 데이터를 검색하기 위해서 주요 단어 간 관계(상위어, 하위어, 동의어, 유의어 등)를 정의하는 건설분야 특화 검색 사전(시소러스, Thesaurus)을 구축함.
- (2) 영상 데이터 자동 검색 및 저장 알고리즘 개발: 웹사이트의 HTML 구조를 분석하여 사용자가 검색 키워드를 입력하면 해당 웹사이트의 Uniform Resource Locator(URL) 리스트를 자동으로 받아오는 Parse List Page 알고리즘을 구현하고, 추출된 모든 URL에 접근하여 원하는 영상 데이터를 자동으로 추출하고 저장하는 Parse Target Page 알고리즘을 개발함.
- (3) Noise 데이터 필터링 알고리즘 개발: 저장된 영상 데이터 중 일부 Noise 데이터(예시: “굴삭기”라고 검색했으나 덤프트럭 이미지가 수집된 경우)를 제거하기 위해서 이미지에 나타난 색상(RGB, HSV), 형태(Edge, Histogram-of-Oriented Gradients, LBP) 등의 시각적 특성(Visual Feature)을 기준으로 유사한 영상을 자동으로 군집화하는 Image Clustering 알고리즘을 개발함. 즉, “굴삭기”로 검색했을 때 “굴삭기 영상 데이터”와 “굴삭기가 아닌 영상 데이터”를 분류하여 굴삭기에 관한 학습 데이터만 자동 추출하는 알고리즘을 개발함.

• [연구목표 1-3] 건설현장 Cyber-Physical Simulation 알고리즘 개발

|      |                                                                                                               |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 목적   | Cyber-Physical Simulation을 통해 건설현장을 3차원의 가상공간(Cyber-Physical Simulation)에 재현하고 2차원의 영상 데이터를 추출하여 학습 DB를 자동 구축 |
| 연구방법 | ① 건설자원 및 구조물 CPS 모델 구축<br>② 공종별 건설현장 CPS 모델 개발<br>③ 전주기 건설프로세스 시나리오 CPS 모델 개발<br>④ CPS 이미지 Rendering 알고리즘 개발  |
| 산출물  | Cyber-Physical Simulation 알고리즘 및 학습 DB                                                                        |

- Cyber-Physical Simulation(CPS)이란 가상의 물리적 시공간을 모사하는 기법으로, 실제 환경뿐만 아니라 접근하기 어려운 물리적 공간과 실제 상황에서는 재현하기 어려운 위험상황을 가상의 공간에서 반복적으로 재현함으로써 사용자가 적은 비용으로 안전한 실험환경을 구축할 수 있음. 본 연구는 CPS 기술을 이용하여 작업자, 장비, 작업환경, 구조물 등의 건설현장 구성요소를 모사함으로써 학습 DB를 효율적으로 구축할 수 있음. 또한, CPS를 통해 사용자가 원하는 시나리오(토공작업, 골조작업 등)를 재현함으로써 보다 다양하고 효과적인 학습 DB를 자동으로 구축할 수 있음. 본 연구에서 개발하는 건설현장 CPS 알고리즘은 다음과 같이 구성됨.
- (1) 건설자원 및 구조물 CPS 모델 구축: 작업자, 건설장비 등 대표적인 건설자원과 철근, 콘크리트 등의 자재에 대한 학습 DB를 구축하기 위해서 기존의 오픈소스 3D 객체 모델(예시:

<http://www.cadnav.com/3d/Excavator.html>)을 Autodesk 3ds Max와 같은 상용 소프트웨어를 이용하여 가공함. 3D 객체 모델을 확보하기 어려운 경우에는 Autodesk 또는 Building Information Modeling 상에서 3D 모델을 직접 구현함.

- (2) 공종별 건설현장 CPS 모델 개발: 토공사, 골조공사, 마감공사에 대한 가상의 건설현장을 Autodesk에서 직접 구현하거나 Construction Simulator Pro 2017, SimCity BuildIt, City Builder 17 Federal Prison 등 기존의 상용 소프트웨어를 활용하여 구현함.
- (3) 전주기 건설프로세스 시나리오 CPS 모델 개발: 시간(공정)에 따라 변화하는 전주기의 건설프로세스를 모사하기 위해서 프로젝트의 공정정보(시기별 작업유형, 구조물 위치 및 크기 등)와 연계하여 CPS 모델을 자동 업데이트하는 기술을 개발함.
- (4) CPS 이미지 Rendering 알고리즘 개발: 이미지 Rendering 알고리즘은 3차원 공간에서 2차원 영상 데이터를 촬영하고 추출하는 역할을 수행함. 이를 위해서 카메라의 촬영 위치, 각도, 시야, 초점거리 등을 고려하여 3차원 가상공간을 2차원 평면에 투영하는 3D-2D Projection 알고리즘을 개발함. 이는 3차원 현실 세계를 카메라로 촬영할 때 2차원 평면에 그려지는 형상을 수학적으로 모사하는 것임.

#### ○ [연구목표 2] DB-free 영상분석 기반 전주기 건설프로세스 통합관리 플랫폼 개발

- [연구목표 1]이 구축한 학습용 DB는 [연구목표 2] 통합관리 플랫폼의 입력값으로 활용됨.
- 전주기 건설프로세스 통합관리 플랫폼은 DB-free 영상분석 기반 현장 상황정보 자동 분석 알고리즘, 플랫폼 설계 및 구축, 생산성 자동 분석 알고리즘으로 구성됨(그림 8).

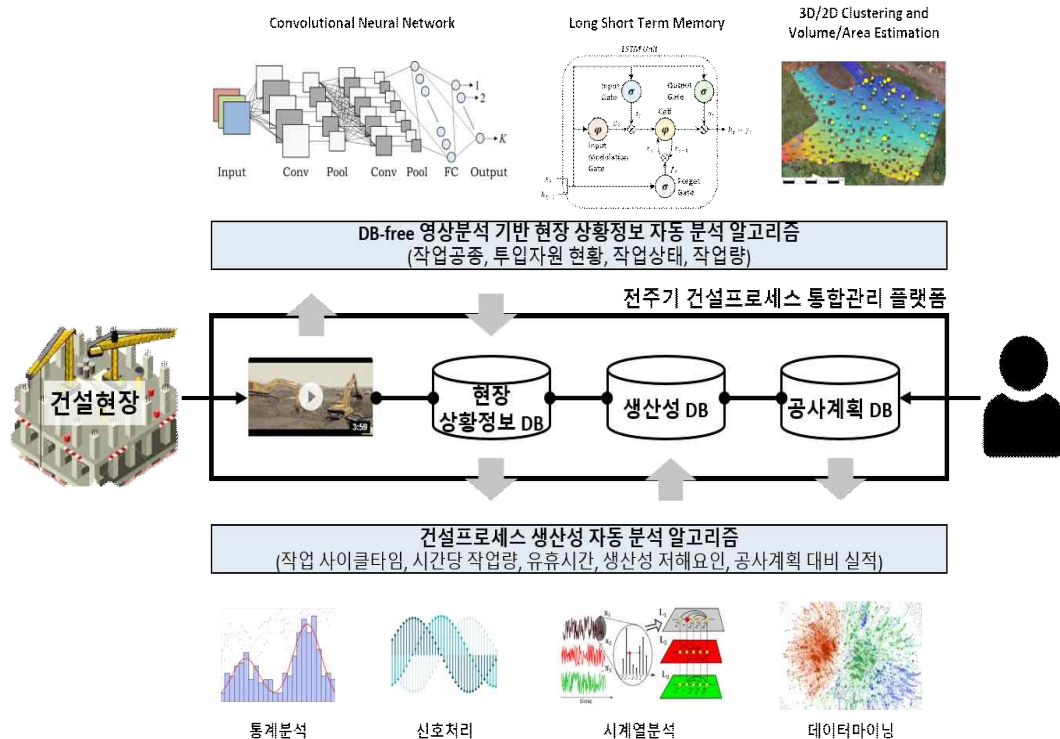


그림 8. DB-free 영상분석 기반 전주기 건설프로세스 통합관리 플랫폼.

#### • [연구목표 2-1] DB-free 영상분석 기반 현장 상황정보 자동 분석 알고리즘 개발

|      |                                                                                          |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| 목적   | 실시간 수집되는 건설현장 CCTV 영상 데이터로부터 현장 상황정보를 자동 분석                                              |
| 연구방법 | ① 작업공종 자동 분류 모델 개발<br>② 투입자원 현황 자동 인식 모델 개발<br>③ 작업상태 자동 분석 모델 개발<br>④ 건설작업량 자동 분석 모델 개발 |
| 산출물  | DB-free 영상분석 기반 현장 상황정보 자동 분석 알고리즘                                                       |

- 현장 상황정보 자동 분석 알고리즘은 실시간으로 수집되는 건설현장 CCTV 영상으로부터 작업공종, 투입자원 현황, 작업상태, 작업량 등 건설프로세스 생산성 정보를 자동으로 분석하는 기술이며, 다음 4가지 세부 모델로 구성됨.
- (1) 작업공종 자동 분류 모델 개발: 건설현장에서 수집된 임의의 영상 데이터가 어떤 작업공종(토공사, 골조공사, 마감공사 등)에 관한 것인지 자동으로 분류하는 모델을 개발함. 이를 위해서 이미지 분류(Scene/Image Classification) 알고리즘을 개발하며, 보다 구체적으로 딥러닝 기법 중 이미지 분류에 최적화된 모델인 Convolutional Neural Networks(CNN)를 공종 특성을 구분할 수 있도록 설계함.
- (2) 투입자원 현황 자동 인식 모델 개발: 건설현장에 투입된 작업자 및 중장비의 유형, 수, 위치를 파악하기 위하여 객체 인식(Object Detection) 알고리즘 중 가장 많이 활용되고 좋은 성능을 보이는 Faster Regional CNN(Faster R-CNN) 모델을 투입자원 맞춤형으로 개발함. Faster R-CNN 모델은 이미지에 존재하는 다양한 종류의 객체를 동시에 정확히 인식할 수 있어, 건설현장과 같이 다수의 작업자, 건설장비가 동시다발적으로 투입되는 경우에 높은 성능을 보임.
- (3) 작업상태 자동 인식 모델 개발: 인식된 건설자원의 작업상태(생산, 준비, 대기, 이동작업 등)를 자동으로 파악하기 위해서 건설자원별 작업상태/작업유형/행동 등의 분류체계를 구축하고 이를 기반으로 각 건설자원에 특화된 영상분석모델을 개발함.
- (4) 건설작업량 자동 분석 모델 개발: 건설작업량을 자동으로 분석하기 위해서 복수의 CCTV로부터 수집한 영상을 주요 특이점, Edge, 색상 등의 시각적 특성을 토대로 병합하는 알고리즘(2D Image Stitching 또는 3D Point Cloud Modeling)을 개발함. 병합된 영상으로부터 토공량과 같은 작업량을 자동으로 산출하기 위해서는 하나의 흠더미를 자동으로 군집화하는 2D/3D Clustering 알고리즘이나 사용자가 흠더미의 공간적 경계를 직접 지정하여 군집화하는 반자동 알고리즘이 필요함. 군집화된 작업량은 병합된 영상이 3D Point Cloud로 구성되어 있고 각 CCTV의 위치가 기준점을 설명하기 때문에 2D 면적 혹은 3D 부피로도 계산될 수 있음. 즉, 작업량 자동 분석 모델은 벽재 마감량, 도로 포장량과 같이 작업량이 2차원 면적으로 표현되는 경우와 토공량, 콘크리트 타설량과 같이 3차원 부피로 표현되는 경우 모두 고려할 수 있음.

• [연구목표 2-2] 전주기 건설프로세스 통합관리 플랫폼 설계 및 구축

|      |                                                                                                         |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 목적   | 건설현장 CCTV 영상, 현장 상황정보, 건설프로세스 생산성 분석 정보를 통합 연계 및 관리하고 사용자의 요구에 응답하는 플랫폼 설계 및 구축                         |
| 연구방법 | ① 비정형 데이터 수집 및 저장 알고리즘 개발<br>② 정형 데이터 수집 및 저장 알고리즘 개발<br>③ 정형·비정형 데이터 연계 및 관리 알고리즘 개발<br>④ 사용자 인터페이스 개발 |
| 산출물  | 전주기 건설프로세스 통합관리 플랫폼                                                                                     |

- 전주기 건설프로세스 통합관리 플랫폼은 건설현장 시공단계 임의의 공종에서 실시간으로 수집되는 CCTV 영상(비정형 데이터)과 자동으로 분석한 현장 상황정보(정형 데이터)를 저장, 연계, 관리함으로써 건설프로세스의 생산성을 측정하여 분석하고 사용자의 요구(예시: 시간당 작업량)에 응답하는 통합 지식관리체계임. 이 같은 통합관리 플랫폼을 개발하기 위해서 다음과 같은 과정을 수행함.
- (1) 비정형 데이터 수집 및 저장 알고리즘 개발: 본 알고리즘은 비정형 영상 데이터(건설현장 CCTV 영상 데이터, DB-free 영상분석기술로 구축한 학습 DB)를 분석 가능하고 효율적인 형태로 자동 변환하여 플랫폼에 저장함. 비정형 데이터 저장에 용이한 PostgreSQL 등의 사용언어를 정의하고 JSON, XML과 같이 시시각각 분석, 수집되는 정보를 실시간으로 업데이트할 수 있는 동적 스키마형 포맷의 알고리즘을 개발함.

- (2) 정형 데이터 수집 및 저장 알고리즘 개발: 정형 데이터를 효과적으로 수집하고 저장하기 위해서는 데이터 간 포함관계, 연관관계 등의 속성정보를 구조화한 메타데이터 구축이 필수적임. 개발할 플랫폼에 저장되는 정형 데이터(작업계획, 작업공종, 투입자원 현황, 작업상태, 작업량 등) 간의 관계를 규명하고 데이터 종류, 명칭, 형식 등 사전에 정의된 데이터 속성 정보와 연계하여 데이터를 수집 및 저장하는 알고리즘을 개발함.
- (3) 정형·비정형 데이터 연계 및 관리 알고리즘 개발: 현장 상황정보를 자동으로 추출하고 생산성을 자동 분석하기 위해서는 앞서 설명한 정형 및 비정형 데이터를 상호 호환이 가능하도록 연계하고 통합관리하는 것이 중요함. 이를 위해서 비정형 영상 데이터와 정형 데이터를 연계하고 관리하는 대표적인 영상분석 방법인 PASCAL VOC, ImageNet, ActivityNet, TensorRecord 등을 검토하고 선별하여 데이터 간의 관계를 구조화함.
- (4) 사용자 인터페이스 개발: 사용자가 플랫폼이 생산하는 모든 생산성 관련 지식정보를 확인하고 필요할 경우 검색 및 질의응답을 할 수 있는 플랫폼 인터페이스를 대표적인 인터페이스 개발 언어/환경인 TypeScript, Next.js, React.js, ant.design 등을 활용하여 개발함.

• [연구목표 2-3] 건설프로세스 생산성 자동 분석 알고리즘 개발

|      |                                                     |
|------|-----------------------------------------------------|
| 목적   | 플랫폼에 저장된 현장 상황정보를 활용하여 건설프로세스의 생산성을 자동 분석           |
| 연구방법 | ① 건설프로세스 생산성 주요 지표 도출<br>② 건설프로세스 생산성 자동 분석 알고리즘 개발 |
| 산출물  | 건설프로세스 생산성 주요 지표 및 자동 분석 알고리즘                       |

- 건설프로세스 생산성 자동 분석 알고리즘은 통계분석, 시계열 분석 등의 데이터 분석 방법론을 이용하여 시간당 작업량, 작업 사이클타임, 평균 유휴시간, 생산성 저해요인 등을 분석하는 기술임.
- (1) 건설프로세스 생산성 주요 지표 도출: 건설산업에서 통용되는 표준품셈 외에도 50건 이상의 국내외 문헌조사, 10명 이상의 실무 전문가 인터뷰 등을 통해 건설프로세스, 특히 토공사, 골조공사, 마감공사에 대한 생산성 분석을 위한 주요 지표(시간당 작업량, 작업 사이클타임, 평균 유휴시간 등)를 도출함.
- (2) 건설프로세스 생산성 분석 알고리즘 개발: 신호처리, 통계분석 기법을 이용하여 작업 사이클타임 및 유휴시간을 산출하고 작업유형별 소요시간에 대한 확률분포를 추정하는 등 주요 생산성 지표를 측정하는 알고리즘을 개발함. 또한, 시계열 분석, 데이터마이닝 기법을 활용하여 시간에 따른 건설작업량 변화 파악, 공사계획 대비 실적 현황, 자원투입에 따른 생산성 저해요인 도출 등 건설프로세스 생산성을 분석하는 알고리즘을 개발함.

○ [연구목표 3] 국내외 현장실험을 통한 플랫폼의 실무적 제약조건 도출 및 보완

- 플랫폼의 실무적 활용에 따른 제약조건을 도출하고 플랫폼 성능을 검증 및 보완하기 위해서 국내외 현장실험을 실시함(그림 9).

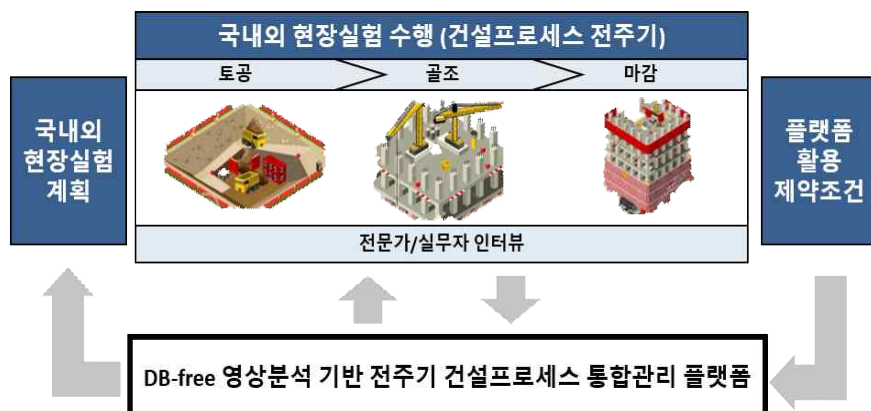


그림 9. 국내외 현장실험을 통한 플랫폼의 실무적 제약조건 도출 및 보완.

• [연구목표 3-1] 국내외 현장실험을 통한 플랫폼 활용 제약조건 도출

|      |                                                       |
|------|-------------------------------------------------------|
| 목적   | 실제 건설현장에 플랫폼을 적용하여 기술적 개선점 및 실무적 제약조건 도출              |
| 연구방법 | ① 국내외 현장실험 계획 수립<br>② 국내외 현장실험 수행<br>③ 플랫폼 활용 제약조건 도출 |
| 산출물  | 플랫폼의 기술적 개선점 및 실무적 제약조건                               |

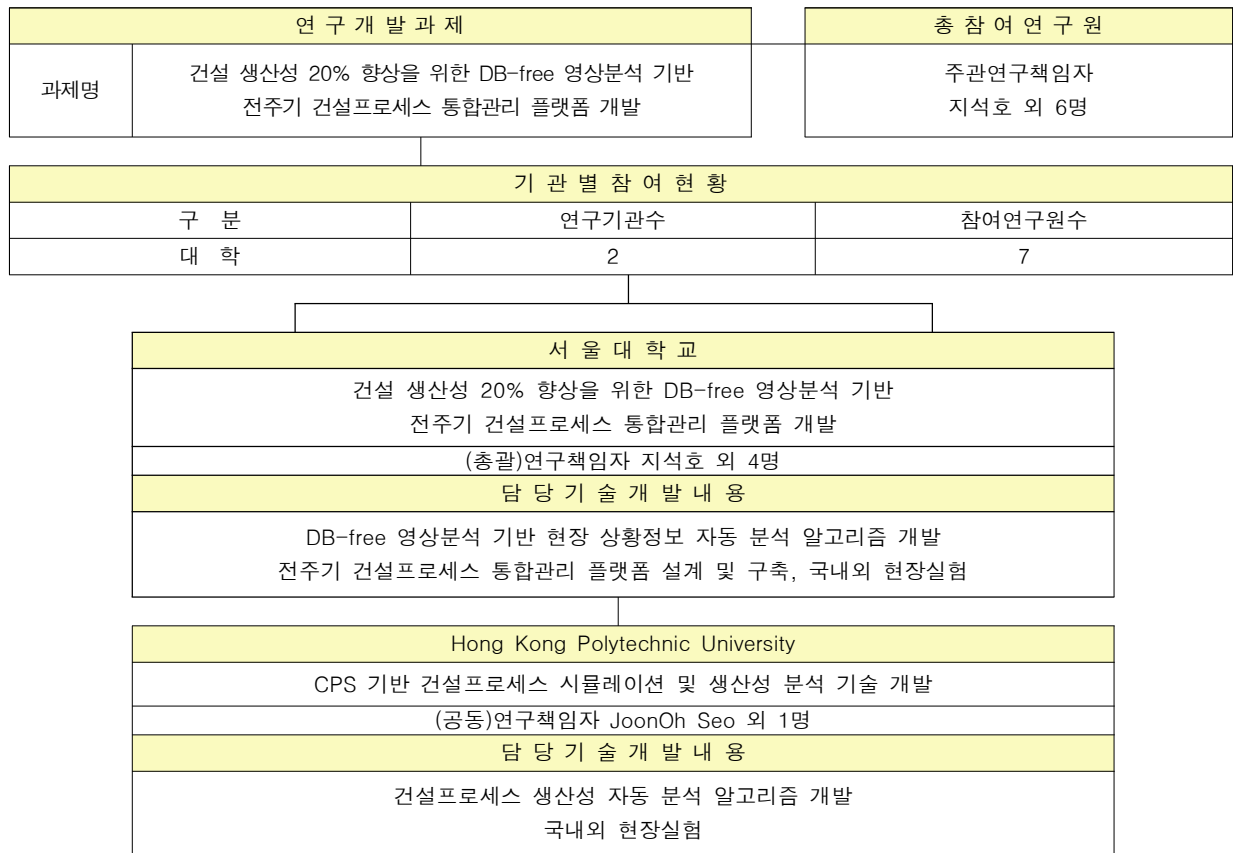
- 실제 건설현장에서 활용 가능한 형태의 통합관리 플랫폼을 개발하기 위해서 국내외 현장실험을 수행하고 플랫폼의 실무적 제약조건을 도출하여 개발된 플랫폼을 보완함.
- (1) 국내외 현장실험 계획 수립: 현장실험을 위해 2차년도에 분당 네이버 그린팩토리 현장(대한민국), To Fan 현장(홍콩)과 협의하여 토공사, 골조공사, 마감공사 등의 다양한 공종을 포함한 국내외 현장을 테스트베드로 확보하고, 이외에도 다수의 국내외 현장에서 데이터를 수집하여 분석함. 테스트베드 현장에 직접 방문하여 기초조사를 함으로써 카메라 네트워크 및 플랫폼 서버를 설치할 위치를 확인하고, 특히, 공정계획표를 분석하여 시공과정 동안 시시각각 변화할 현장 상황을 반영하여 동영상을 촬영하고 관리하는 모니터링 계획을 구체적으로 수립함.
- (2) 국내외 현장실험 수행: 카메라 설치 전문업체와 논의하여 테스트베드 건설현장에 카메라 네트워크 시스템(CCTV, 데이터 송수신선 등)을 구축하고 개발된 플랫폼을 탑재한 데스크톱 컴퓨터와 연결하여 실시간으로 수집되는 영상 데이터를 수집, 저장, 분석, 관리함. 또한, 플랫폼의 성능 평가를 목적으로 직접 관찰, 사용자와의 인터뷰 등을 통해 작업공종, 시간당 작업량 등 생산성 관련 정보를 수집함.
- (3) 플랫폼 활용 제약조건 도출: 계획에 따라 실험을 수행하며 발생하는 실무적, 기술적 제약조건을 확인함. 또한, 현장 실무자에게 인터뷰를 진행하여 개발 플랫폼을 활용함에 있어 불편한 점, 개선이 필요한 점, 추가 분석이 필요한 지표 등을 조사함.

• [연구목표 3-2] 개발 플랫폼 검증 및 보완

|      |                                                               |
|------|---------------------------------------------------------------|
| 목적   | 현장실험 결과를 기반으로 개발 플랫폼을 검증 및 보완                                 |
| 연구방법 | ① 분석 정확도 평가 및 보완<br>② 생산성 향상도 및 만족도 조사<br>③ 생산성 자동 분석 알고리즘 보완 |
| 산출물  | 전주기 건설프로세스의 성능검증 결과 및 기술적/실무적 개선                              |

- (1) 분석 정확도 평가 및 보완: 전주기에 걸친 생산성 정보를 통합관리하기 위해 각 공종에서 발생하는 생산성 정보를 플랫폼을 통해 지속적으로 관리하고 분석하며 입력-분석-출력-관리로 이어지는 플랫폼의 기술적 성능을 검증, 보완함. 분석 정확도를 평가하기 위해 자동 분석한 생산성 정보(분석값)와 전문가가 분석한 생산성 정보(정답값)를 비교 분석함. 분석 정확도가 낮을 경우 학습 DB를 보완하거나 특정 상황에 대한 학습 DB에 높은 가중치를 부여하는 강화학습을 수행함.
- (2) 생산성 향상도 및 만족도 조사: AnyLogic, Symphony 등의 소프트웨어를 활용한 시뮬레이션을 통해 생산성 관련 개선사항이 반영되기 전과 후의 생산성을 비교·분석하고 이에 따른 생산성 향상 정도를 평가하며, 기준을 만족하지 못했을 경우 시뮬레이션의 입력변수, 알고리즘, 플랫폼 연계구조 등을 지속해서 보완함. 또한, 전문가를 대상으로 플랫폼 사용성 관련 만족도 평가를 수행하여 플랫폼을 정성적으로 검증하고 보완함. 현장 실무자와의 지속적인 인터뷰를 통해 현장에서 발생하는 생산성 저해요인(일부 작업자의 작업능력 미숙 등)을 파악함. 특히, 2차년도 평가 의견을 반영하여 현장 여건에 맞는 플랫폼의 활용 범위를 한정하고 플랫폼이 분석할 수 없으나 생산성 분석에 꼭 필요한 현장 정보를 파악하여 분석 알고리즘을 고도화하여 플랫폼의 완성도와 범용성을 높임
- (3) 생산성 자동 분석 알고리즘 보완: 현장실험을 통해 생산성 분석에 활용된 장비 및 작업자의 작업유형/행동 분류체계를 검증함. 작업유형/행동 분류체계를 공중에 맞춰 표준화하여 DB를 구축함.

## 2-3. 연구개발과제 수행 체계



## 2-4. 연구개발과제 수행 일정

| 1차년도     |                                    |       |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |                    |                                          |
|----------|------------------------------------|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|--------------------|------------------------------------------|
| 일련<br>번호 | 연구내용                               | 추진 일정 |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 연구 개발비<br>(단위: 천원) | 책임자<br>(소속기관)                            |
|          |                                    | 1     | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |                    |                                          |
| 1        | HCI Learning 알고리즘 조사<br>및 분석       |       |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 12,000             | 지석호<br>(서울대)                             |
| 2        | HCI Learning 알고리즘 개발               |       |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 20,000             | 지석호<br>(서울대)                             |
| 3        | Web-Crawling 알고리즘 조사<br>및 분석       |       |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 12,000             | 지석호<br>(서울대)                             |
| 4        | Web-Crawling 알고리즘 개발               |       |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 20,000             | 지석호<br>(서울대)                             |
| 5        | Noise 데이터 필터링<br>알고리즘 개발           |       |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 20,000             | 지석호<br>(서울대)                             |
| 6        | CPS 소프트웨어 조사 및<br>분석               |       |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 12,000             | JoonOh Seo<br>(HK PolyU)                 |
| 7        | 건설현장 맞춤형 CPS 기술<br>개발              |       |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 20,000             | JoonOh Seo<br>(HK PolyU)                 |
| 8        | CPS 기반 영상 데이터<br>Rendering 알고리즘 개발 |       |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 20,000             | JoonOh Seo<br>(HK PolyU)                 |
| 9        | 실험실 환경에서의 성능 시험<br>및 검증            |       |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 10,000             | 지석호<br>(서울대)<br>JoonOh Seo<br>(HK PolyU) |

| 2차년도 |                                       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |        |                                    |
|------|---------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--------|------------------------------------|
| 1    | 영상분석 기반 현장 상황정보 자동 분석 알고리즘 조사 및 분석    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 20,000 | 지석호 (서울대)                          |
| 2    | DB-free 영상분석 기반 현장 상황정보 자동 분석 알고리즘 개발 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 35,000 | 지석호 (서울대)                          |
| 3    | 플랫폼 설계/구축 기술 조사 및 분석                  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 20,000 | 지석호 (서울대)                          |
| 4    | 전주기 건설프로세스 통합관리 플랫폼 설계 및 구축           |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 50,000 | 지석호 (서울대)                          |
| 5    | 건설프로세스 생산성 측정 알고리즘 개발                 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 20,000 | JoonOh Seo (HK PolyU)              |
| 6    | 건설프로세스 생산성 분석 알고리즘 개발                 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 27,000 | JoonOh Seo (HK PolyU)              |
| 7    | 유사환경에서의 성능 시험 및 검증                    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 30,000 | 지석호 (서울대)<br>JoonOh Seo (HK PolyU) |
| 3차년도 |                                       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |        |                                    |
| 1    | 국내 현장실험 계획 수립                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 20,000 | 지석호 (서울대)<br>JoonOh Seo (HK PolyU) |
| 2    | 국내 현장실험 수행                            |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 50,000 | 지석호 (서울대)<br>JoonOh Seo (HK PolyU) |
| 3    | 플랫폼 활용 제약조건 도출                        |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 22,000 | 지석호 (서울대)<br>JoonOh Seo (HK PolyU) |
| 4    | 분석 정확도 평가 및 보완                        |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 60,000 | 지석호 (서울대)<br>JoonOh Seo (HK PolyU) |
| 5    | 생산성 향상도 및 만족도 조사                      |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 15,000 | 지석호 (서울대)<br>JoonOh Seo (HK PolyU) |
| 6    | 생산성 자동 분석 알고리즘 보완                     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 35,000 | 지석호 (서울대)<br>JoonOh Seo (HK PolyU) |

## 2-5. 국제공동연구 현황

### ○ 추진 배경 및 성공 가능성

- 본 연구를 성공적으로 수행하기 위해서는 Hong Kong Polytechnic University의 JoonOh Seo 교수와의 국제공동연구가 필수적임. JoonOh Seo 교수는 IT 기술을 활용한 건설현장 모니터링 및 프로세스관리 분야의 세계적인 권위자이며, CPS 기술을 이용하여 작업자 영상인식, 안전사고 위험요인 도출, 작업의 물리적 간섭 분석, 작업 생산성 분석 등 건설현장을 가상의 공간에 재현하여 건설프로세스 통합관리 지식을 도출하는 연구를 다수 수행함.
- 건설현장 Cyber-Physical Simulation 관련 연구 역량
  - [연구목표 1-3] “건설현장 Cyber-Physical Simulation 알고리즘”을 개발하기 위해서는 JoonOh Seo 교수의 연구 역량이 반드시 필요함. JoonOh Seo 교수는 “On-site Marker-less Motion Capture and Activity Analysis(미국 NSF)”, “Safe Human Robot Collaboration in Construction(미국 NSF)”, “Automated Ergonomic Risk Assessment for Construction Workers(홍콩 RGC)”와 같이 가상현실, 증강현실, Building Information Modeling 등 건설 CPS 기술을 이용하여 건설프로세스, 작업환경, 작업자를 모사하고 이를 영상 데이터와 연계하여 작업자의 생산성과 안전성을 평가하는 연구를 다수

수행하였으며(그림 10), 연구결과를 국제저명학술지에 5편 게재함.

- **대표논문(1):** Seo, J., Starbuck, R., Han, S., Lee, S., and Armstrong, T. (2015) "Motion-Data-driven Biomechanical Analysis during Construction Tasks on Sites." Journal of Computing in Civil Engineering, 29(4), B4014005.
- **대표논문(2):** Golabchi, A., Han, S., Seo, J., Han, S., Lee, S., and Al-Hussein, M. (2015) "An Automated Biomechanical Simulation Application to Ergonomic Job Analysis for Workplace Design." Journal of Construction Engineering and Management, 141(8), 04015020.
- **대표논문(3):** Seo, J., Alwasel, A., Lee, S., Abdel-Rahman, E., and Hass, C. (2017) "A Comparative Study of In-field Motion Capture Approaches for Body Kinematics Measurement in Construction." Robotica, Cambridge Univ. Press. Published Online.

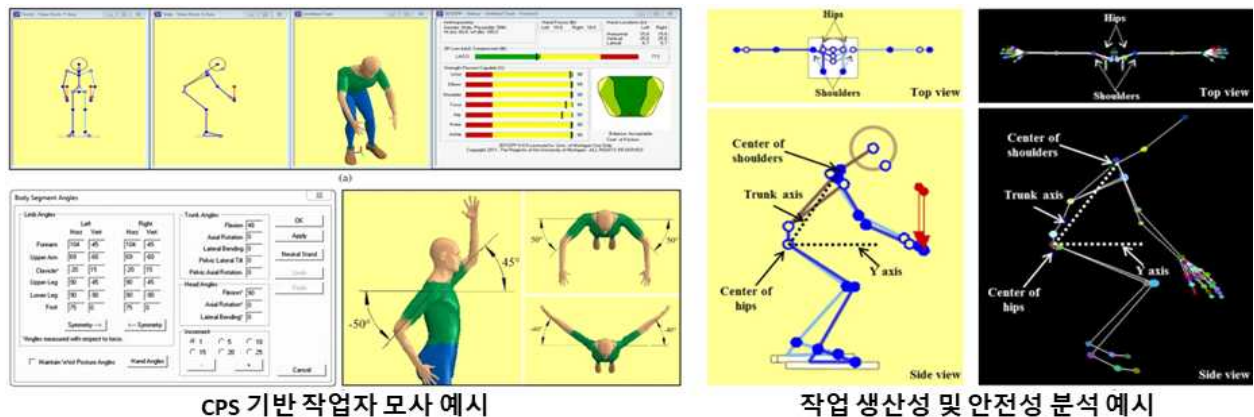


그림 10. JoonOh Seo 교수의 건설현장 CPS 기술 개발 예시.

#### • 건설프로세스 시뮬레이션 및 통합관리에 관한 전문 역량

- [연구목표 2-3] “건설프로세스 생산성 자동 분석 알고리즘”을 개발하기 위해서는 JoonOh Seo 교수의 건설프로세스 시뮬레이션 및 정보 통합관리에 관한 전문지식이 필요하였음. JoonOh Seo 교수는 “Wearable System for Workers’ Productivity, Safety, and Health Monitoring(홍콩 UGI)”, “Social Influence in Temporary Organization(미국 NSF)”과 같이 Discrete Event Simulation, Agent-Based Modeling, System Dynamics 등을 이용하여 건설프로세스를 모델링하고 생산성 및 안전성을 분석하는 연구를 다수 수행하였으며(그림 11), 연구결과를 국제저명학술지에 4편 게재함.
- **대표논문(1):** Seo, J., Lee, S., and Seo, J. (2016) “Simulation-based Assessment of Workers’ Muscle Fatigue and Its Impact on Construction Operations” Journal of Construction Engineering and Management, 142(11), 04016063.
- **대표논문(2):** Antwi-Afari, M.F., Li, H., Edwards, D.J., Pärn, E.A., Seo, J., and Wong, A.Y.L. (2017) “Biomechanical Analysis of Risk Factors for Work-related Musculoskeletal Disorders During Repetitive Lifting Task in Construction Workers” Automation in Construction, 83, 41-47.
- **대표논문(3):** Antwi-Afari, M.F., Li, H., Edwards, D.J., Pärn, E.A., Seo, J., and Wong, A.Y.L. (2017) “Effects of Different Weights and Lifting Postures on Balance Control Following Repetitive Lifting Tasks in Construction Workers” International Journal of Building Pathology and Adaptation, 35(3), 247-263.

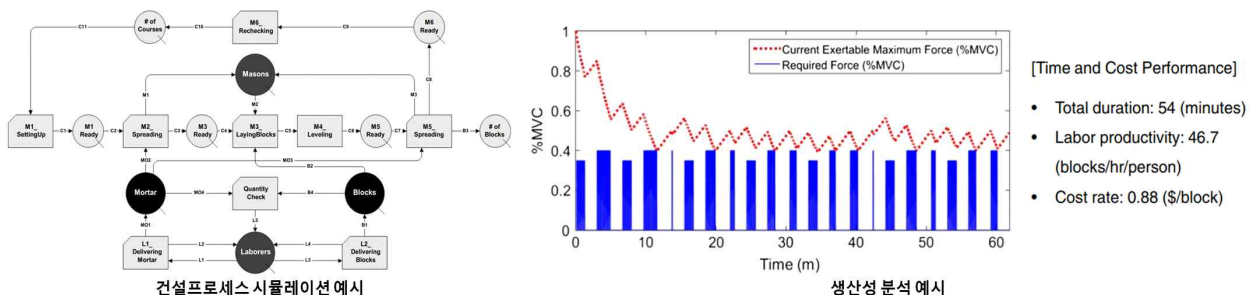


그림 11. JoonOh Seo 교수의 건설프로세스 통합관리 연구개발 예시.

- 개발 플랫폼의 성능 평가 및 타당성 검증을 위한 국제 인적 네트워크
  - 세계적으로 통용될 수 있는 국제기준에 부합하는 플랫폼을 개발하기 위해서는 국내뿐만 아니라 해외 현장에서 실험을 수행하여 다양한 현장 여건을 고려한 실무적 제약조건을 도출하는 것이 필요함. JoonOh Seo 교수는 현장실험을 위한 해외 테스트베드를 확보하고 국제적 시각에서 개발된 기술을 검증하여 해외 시장으로의 기술이전을 위한 가교역할을 수행할 것임.
  - 또한, JoonOh Seo 교수는 건설분야의 세계적인 석학과 공동연구를 활발히 수행해왔으며 긴밀한 인적 네트워크를 보유하고 있음(그림 12). 동일 학과 소속의 Heng Li 교수는 건설 IT 및 자동화, 가상현실, 영상분석 분야의 대가이며, 지속적인 협력관계에 있는 University of Michigan의 SangHyun Lee 교수는 건설프로세스 모델링 및 시뮬레이션, 건설프로세스 생산성 분석 분야에서 세계적인 석학임. 본 연구진은 정기적인 해외 전문가 자문을 통해 개발 플랫폼의 성능 및 현장적용 가능성을 평가하고 국제적으로 통용 가능한 기술을 개발함.

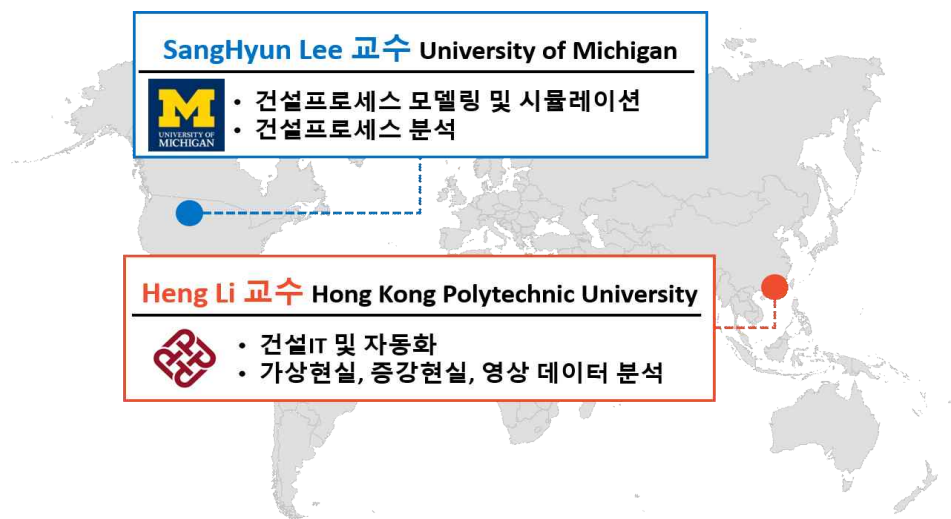


그림 12. JoonOh Seo 교수의 인적 네트워크.

- 본 연구진의 국제공동연구 경험
  - 연구책임자 지석호 교수는 University of Texas at Austin(Carlos Caldas 교수), Texas A&M University(Youngjib Ham 교수), Queensland University of Technology(Herbert Biggs 교수), National University of Singapore(Bon-Gang Hwang 교수)와 국제공동연구를 수행함. 그 외에도 지석호 교수는 미국 Construction Industry Institute, Center for Transportation Research, 호주 Sustainable Built Environment National Research Centre와 다수의 국제공동연구를 수행했으며, University of Michigan(Jinwoo Kim 박사)과도 밀접한 국제협력네트워크를 갖추고 있음. 지석호 교수는 최근 5년 동안 국제공동연구를 통해 총 16편의 SCI(E)/SSCI급 국제저명학술지 논문을 게재하였음.
  - 공동연구책임자 JoonOh Seo 교수는 HK PolyU에 재직하면서 서울대학교(박문서 교수), 연세대학교(홍태훈 교수), University of Michigan(SangHyun Lee 교수), University of South Australia(Seungjun Ahn 교수)와 국제공동연구를 다수 수행한 경험이 있음.
- 이 같은 JoonOh Seo 교수의 연구역량과 전문지식, 인적 네트워크뿐만 아니라 연구진 전체의 풍부한 국제공동연구 경험을 볼 때 본 연구과제를 성공적으로 수행할 수 있을 것으로 확신함.

#### ○ 상대국의 공동연구기관 및 공동연구책임자의 실적·연구 능력

- 공동연구기관 Hong Kong Polytechnic University는 건설분야(토목 및 구조)에서 2018년도 QS 세계 대학 순위 10위를 차지한 세계적인 연구중심 대학으로 특히 연구성과를 설명하는 QS 세부평가항목인 H-index citations(세계 1위), Citations per paper(세계 4위)에서 괄목할만한 성과를 보임.

공동연구책임자가 소속된 Building and Real Estate 학과에는 건설 IT 및 자동화, 건설프로세스 모델링 및 시뮬레이션, 영상분석 기반 건설프로세스 성과분석, 플랫폼 설계 및 구축 등 본 연구과제 수행을 위한 핵심역량을 갖춘 연구진을 다수 보유함. 특히, 앞서 언급한 세계적인 석학 Heng Li 교수는 스마트 건설 연구실(Smart Construction Laboratory)을 지도하고 있으며, 총 200편 이상의 국제저명학술지 논문 게재 실적과 함께 논문인용 15,649건, h-index 69, i10-index 211(Google Scholar 기준)을 달성함.

- 공동연구책임자 JoonOh Seo 교수는 건설프로세스 모델링 및 시뮬레이션, 건설프로세스 생산성 및 안전성 분석 분야의 전문가로 현재 6개의 연구과제를 수행하면서 최근 5년 동안 SCI(E)/SSCI/SCOPUS급 논문 30편, 국제학술발표 23건 등의 연구성과를 달성하였으며 2017년/2018년 국제저명학술지 우수 심사위원, 2014년 University of Michigan 최우수 학생논문, 2015년 미국 Construction Industry Institute 최우수 학술논문 수상자로 선정됨. 특히, 본 연구과제의 핵심기술 중 하나인 건설현장 Cyber-Physical Simulation 기술 개발을 통해 미국 Kineticalabs와 기술이전 성과를 달성하였으며, 현재 해당기업의 외부 컨설턴트를 역임하고 있어(<http://kineticalabs.com/>) 본 연구개발 결과물의 사업화에 큰 도움이 될 것임.

## ○ 연구개발 인력 및 연구시설

- 연구개발 인력: 지속적인 연구개발과 국제적 수준의 연구 역량을 갖춘 인력을 다수 양성하기 위해 박사/석사급 연구인력을 상시 투입함.
- 연구시설: 연구개발을 수행하기 위해 활용 예정인 주요 연구시설과 연구장비는 다음과 같음.
- 연구개발에 필요한 모델링, 주요 분석 및 실험을 위해서, 그리고 연구진 간 정기 화상회의 및 세미나를 위해서 서울대학교와 HK PolyU의 연구실/회의실 및 실험실을 활용함. 또한 각 기관의 대형회의실 또는 온라인 화상회의 플랫폼 등을 활용하여 국제협력워크숍을 개최함.
  - 특히, 서울대학교 건설혁신연구실 실험실은 연구개발에 필요한 건설현장용 고사양 CCTV 카메라(AXIS P1354-E Outdoor 6대), 야간분석용 적외선카메라(Flir TG 750D 1대), GPS-카메라 장착 무인항공기(DJ Inspire 1 V2 1대, K-mapper X4 1대), 영상분석기술 개발용 서버컴퓨터(Intel Core i7 3.4GHz, GeForce GTX1080 Ti 11GB 및 Intel Xeon Gold 6150 2.7GHz, GeForce Titan Xp), 레이저스캐너(Faro Focus M70)를 보유하고 있음.
  - 또한, 서울대/HK PolyU 내 건설현장과 연구진이 보유한 산학 네트워크를 적극적으로 활용하여 연구개발에 필요한 테스트베드 현장을 확보함.

| 구분         | 위치                                        | 용도                                    | 보유 장비                                                                         | 확보 여부 |
|------------|-------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 연구실        | 서울대 35동 427호, 429호                        | 데이터 분석, 시뮬레이션 모델 구축, 플랫폼 개발을 위한 연구 수행 | • 고사양 데스크톱 20여 대                                                              | 확보    |
|            | 서울대 건설환경종합연구소 전용연구실                       |                                       | • 고사양 데스크톱 10여 대                                                              | 확보    |
|            | HK PolyU ZN742                            |                                       | • 고사양 데스크톱 5여 대                                                               | 확보    |
| 회의실        | 서울대 35동 301호, 401호                        | 연구진 간 정기 화상회의 및 세미나                   | • 화상회의 장비                                                                     | 확보    |
|            | 서울대 건설환경종합연구소 다목적회의실                      | 국제협력워크숍 개최                            | • 컨퍼런스 장비                                                                     | 확보    |
|            | HK PolyU Multi-media Communication Center |                                       | • 컨퍼런스 장비                                                                     | 확보    |
| 실험실        | 서울대 35동 건설혁신연구실 실험실                       | 개발기술의 실험환경 검증                         | • 건설현장용 고사양 CCTV 카메라<br>• 적외선카메라<br>• GPS-카메라 장착 무인항공기<br>• 서버컴퓨터<br>• 레이저스캐너 | 확보    |
|            | HK PolyU Smart Construction Laboratory    | 개발기술의 실험환경 검증                         | • 고사양 데스크톱 10여 대                                                              | 확보    |
| 건설현장 테스트베드 | 서울대/HK PolyU 내 건설현장                       | 개발기술의 유사환경 검증                         | -                                                                             | 확보    |
|            | 협력기업의 건설현장                                | 개발기술의 실제환경 검증                         | -                                                                             | 확보    |

---

## ○ 국제공동연구 추진일정 및 국내외 워크숍 일정

- 본 연차실적계획서의 “2-2. 연구개발과제의 수행 전략 및 과정”과 같이 국제공동연구를 수행하며, 구체적인 연도별 국제공동연구 일정은 다음과 같음.
  - 1차년도: 건설현장 맞춤형 DB-free 영상분석기술 개발
    - 1차년도 연구목표를 성공적으로 달성하기 위해 각 연구진(서울대학교, HK PolyU)이 개발한 DB-free 영상분석기술을 통합하여 학습용 영상 DB를 구축하는 것이 매우 중요함. 프로그래밍 포맷, 영상 데이터 저장 방식 등의 연구내용을 조율하고 진도를 점검하기 위해서 2주에 1회 연구진 화상회의를 실시함. 또한, 중간 연구성과를 공유하고 방법론에 대한 심도 있는 논의를 위해서 2019년 10월 서울대학교에서 국제협력워크숍을 개최함.
  - 2차년도: DB-free 영상분석 기반 전주기 건설프로세스 통합관리 플랫폼 개발
    - 2차년도에는 상황정보 자동분석 알고리즘(서울대)-생산성 자동 분석 알고리즘(HK PolyU)-전주기 건설프로세스 통합관리 플랫폼(서울대) 간 유기적인 연계가 매우 중요함. 이를 위해서 2주에 1회 연구진 화상회의를 실시함. 중간검토를 위해서 7월에는 서울대학교에서, 2차년도 최종성과 검토와 3차년도 연구계획 수립을 위해서 11월에는 온라인 화상회의 플랫폼을 통해서 연 2회 국제협력워크숍을 개최함.
  - 3차년도: 국내외 현장실험을 통한 플랫폼의 실무적 제약조건 도출 및 보완
    - 최종 단계인 3차년도는 무엇보다 국제협력이 중요한 시기임. 전 세계적인 코로나바이러스 감염증(COVID-19) 사태에 대응하고 안전한 현장실험 계획을 수립하기 위해 연구책임자와 공동연구책임자는 비대면 회의를 주기적으로 실시함.
    - 또한, 현장 테스트 중간결과를 협의하기 위해 2021년 7월 비대면 국제협력워크숍을 추가로 실시하며, 최종 실험 결과를 점검하고 연구과제를 성공적으로 마무리하기 위해 2021년 10월 온라인 화상회의 플랫폼을 활용하여 국제협력워크숍을 개최함.
-

### 3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

#### 3-1. 연구수행 결과

##### (1) 정성적 연구개발성과

###### 1) 1차년도

- 1차년도 연구목표인 건설현장 맞춤형 DB-free 영상분석기술의 개념도는 그림 13과 같으며, 세부 연구목표별 구체적인 연구수행 결과는 다음과 같음.

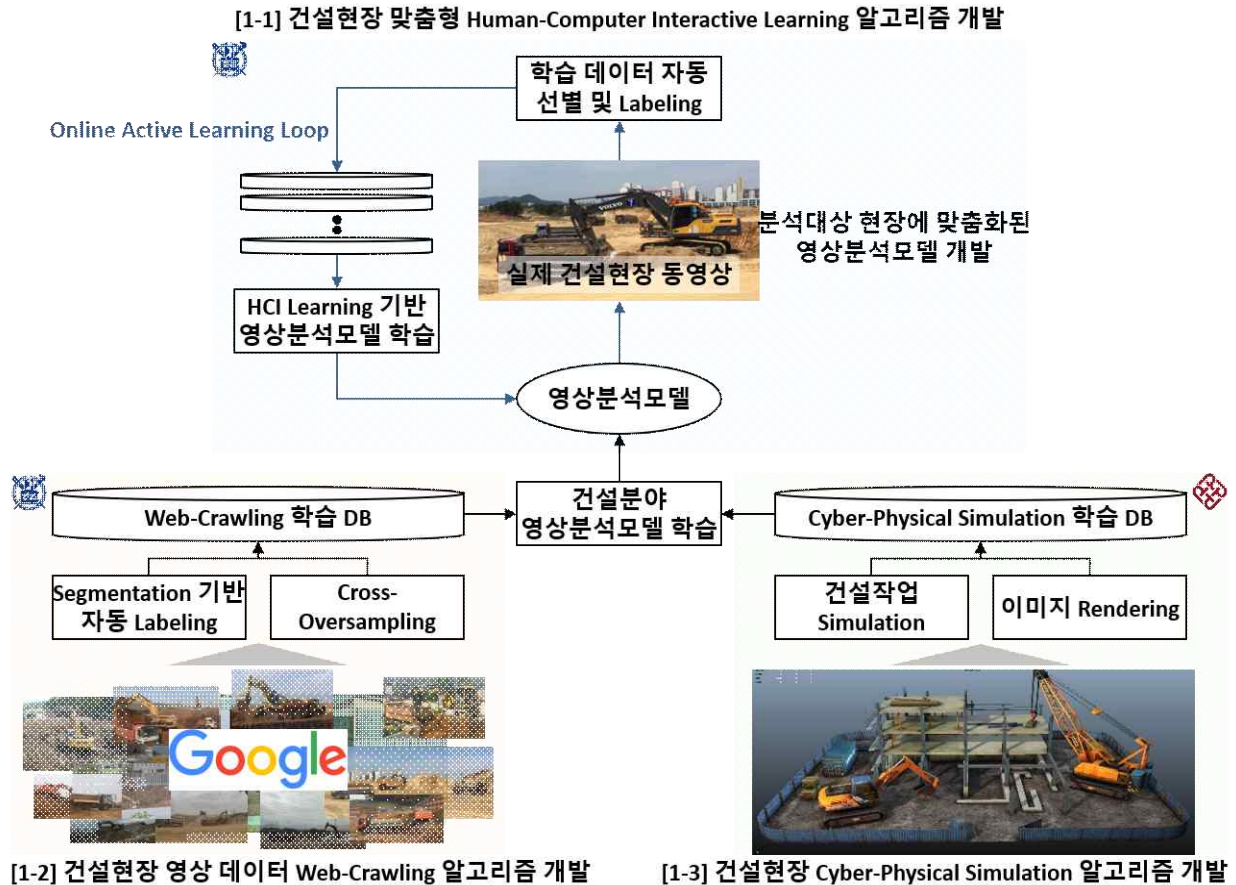


그림 13. 건설현장 DB-free 영상분석기술 개념도.

##### ○ [1-1] 건설현장 맞춤형 Human-Computer Interactive Learning 알고리즘 개발

건설현장 맞춤형 Human-Computer Interactive Learning 알고리즘은 사용자와 컴퓨터가 상호작용을 수행하면서 최적의 학습용 DB를 구축하는 기법으로, Active Learning(컴퓨터가 예측한 결과에 대해서 사용자가 정답 여부를 판단하는 것 또는 컴퓨터가 잘못 예측한 결과를 사용자가 보정하는 것), Reinforcement Learning(정확하게 예측한 결과와 부정확하게 예측한 결과에 대해 점수를 다르게 주어 모델의 성능을 높여가는 것), Online Learning(현장에서 사용자가 분석하고자 하는 대상에 대한 데이터를 직접 업데이트하는 것)으로 구성됨.

###### 1. Active Learning, Reinforcement Learning, Online Learning 등 영상분석 기반 Human-Computer Interactive Learning 알고리즘 조사 및 분석

- 기존의 Human-Computer Interactive Learning 알고리즘을 탐구하기 위해서 관련 문헌, 블로그, 논문 등 다수의 자료를 수집 및 분석함. 그 결과, Active Learning, Reinforcement Learning, Online Learning의 3가지 세부 알고리즘으로 분류할 수 있었고 알고리즘별 자세한 내용은 아래와 같음.
  - **Active Learning:** 대표적인 반지도 학습(Semi-supervised Learning) 기법 중 하나이며, 수많은 학습 데이터 중 가장 유의미한 데이터를 우선적으로 선별하고 학습하여 분석 모델의 성능을 점진적으로 최대화하는 과정임(Chung 2018, 김진우 외 2019). 주로 정보이론(Information Theory)에서 자주

사용되는 엔트로피(Entropy)를 계산하여 학습 데이터에 대한 모델 예측값의 불확실성을 평가하고, 그 불확실성이 높은 데이터를 우선 선택함(Settles 2010). 이를 통해 기존의 ‘얼마나 많은 수의 데이터를 학습할 것인가’라는 양적 중심이 아닌 ‘무엇을 먼저 배울 것인가’라는 질적 중심의 학습 데이터베이스(Database, DB) 구축이 가능함. Active Learning은 학습 데이터의 양을 줄임으로써 DB 구축에 필요한 시간과 노력을 최소화하면서 모델의 성능을 최대화할 수 있음.

- **Reinforcement Learning:** 컴퓨터가 정확하게 예측한 결과와 부정확하게 예측한 결과에 대해 보상(Reward)을 다르게 주어 모델의 성능을 점진적으로 강화하는 기법임(Francois-Lavet et al. 2018). Reinforcement Learning은 행위자(Agent), 환경(Environment), 보상(Reward), 상태(State), 행동(Action)으로 구현됨. 행위자(모델)가 주어진 환경(데이터)에서 다양한 행동(예측)을 수행하고 그 행동에 대한 보상(정확도)을 받음으로써 행위자의 상태(예측/판단 규칙)를 강화하는 학습 DB를 구축함. 특히, 영상분석 분야에서는 모델이 틀린 결과(잘 못 맞추는 결과)에 대한 데이터의 양을 증가하는 방법을 주로 사용함.
- **Online Learning:** Active Learning과 마찬가지로 반지도 학습 기법 중 하나이며, 실제 시험 데이터에서 학습 데이터를 생성함으로써 시험환경에 최적화된 DB 구축 및 모델 학습을 진행함(Dekel 2008, Kim and Chi 2017). 즉, 데이터를 순차적으로 처리·학습하기 때문에 비디오, 음성 등과 같이 스트림 데이터를 분석하는 데 적합함. 일반적으로 Self-training과 Co-training 2가지 접근방법이 있으며, Self-training은 1개의 모델이 예측한 결과 중 신뢰성이 가장 높은 데이터를 학습하면서 모델 성능을 높여가는 기법임(Yarowsky 1995). 반면 Co-training은 여러 개의 모델을 동시에 학습하여 그 예측 결과를 비교·분석하면서 DB를 구축하기 때문에 Self-training 기법에 비해 연산량이 많으나 DB 구축 및 모델 학습에 더 높은 성능을 보임(Blum and Mitchell 1998).

## 2. 건설현장 맞춤형 Human-Computer Interactive Learning 알고리즘 개발

- 앞서 조사한 결과를 토대로 본 연구목표에 적합한 Human-Computer Interactive Learning 알고리즘을 구현함(그림 14). 본 알고리즘은 (1) Unlabeled 데이터의 불확실성 평가, (2) 학습 데이터 선정 및 Labeling, (3) 딥러닝 기반 영상분석모델 설계 및 학습으로 구성되며, 단계별 세부내용은 다음과 같음.
- **(1) Unlabeled 데이터의 불확실성 평가:** 본 단계는 Active Learning의 핵심과정으로 Unlabeled 학습 데이터에 대한 모델 예측값의 불확실성을 평가하는 것이 목적임. 이를 위해 먼저 랜덤 샘플링(Random Sampling)을 통해 전체 Unlabeled 이미지 데이터 중 일부 데이터를 추출함. 추출된 이미지 데이터에 학습된 객체 인식 모델을 적용하고 예측결과의 신뢰도를 계산한 뒤 각 이미지에 대한 엔트로피의 총합을 산출함. 여기서 엔트로피가 높다는 것은 딥러닝 모델이 이미지에 나타난 객체의 유형과 위치를 파악하기 어렵다는 것을 의미하고, 반대로 엔트로피가 낮다는 것은 모델의 결과를 신뢰할 수 있음을 나타냄.

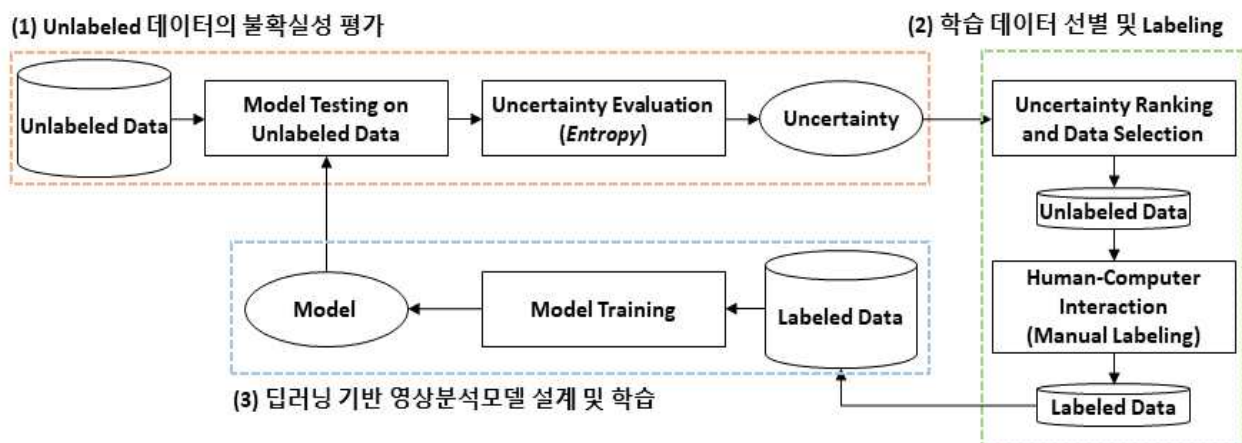


그림 14. Human-Computer Interactive Learning 알고리즘 순서도.

- (2) **학습 데이터 선정 및 Labeling:** 앞 단계의 결과를 토대로 모델의 불확실성(엔트로피의 총합)이 가장 높은 이미지 데이터 N개를 선정하고, 사용자는 “Labellmg” 소프트웨어를 사용하여 선정된 학습용 이미지 데이터의 Labeling 작업을 수행함(그림 15). 이미지 1장당 Labeling 작업을 수행하는 데 평균 약 2분의 시간이 요구됨. 이 과정을 통해 모델이 가장 예측하기 어려운 데이터를 선별하고 우선 학습함으로써 Labeling 작업을 최소화하고 모델의 성능을 빠르게 높일 수 있음.



그림 15. Labellmg 소프트웨어를 활용한 이미지 데이터 Labeling 작업 예시.

- (3) **딥러닝 기반 영상분석모델 설계 및 학습:** 본 단계의 목적은 Labeling된 이미지 데이터를 활용하여 딥러닝 기반 영상분석모델을 설계하고 학습하는 것임. 본 과제에서는 Convolutional Neural Network, Recurrent Neural Network 등 주요 딥러닝 네트워크를 설계함(그림 16). 특히, 해당 모델을 학습하기 위해서 Stochastic Gradient Descent 최적화 알고리즘을 이용하였고 1회당 100번의 학습을 진행함.

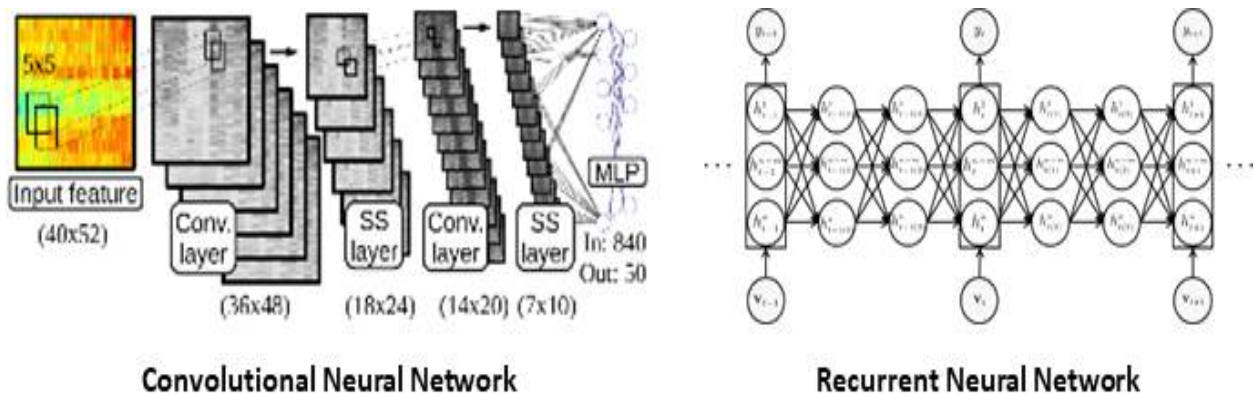


그림 16. 딥러닝 기반 영상분석모델 설계도.

### 3. 실험실 환경에서의 성능 시험 및 검증

- 개발 알고리즘의 성능을 실험실 환경에서 시험하였고, 그 결과 평균 정확도 93.0%로 상당히 높은 성능의 영상분석모델이 학습됨. 그림 17은 이미지 데이터에서 건설자원의 유형과 위치를 분석한 결과 예시이며, 굴삭기와 덤프트럭이 다양한 시각적 특성(형태, 색상, 기하학적 구조 등)을 지닐 경우에도 성공적으로 인식하는 것을 볼 수 있음.



그림 17. 영상분석모델 성능 평가 결과 예시.

- 또한, 본 알고리즘의 효과를 확인하기 위해서 기존의 학습 DB 구축 방식인 Random Learning 기법과 비교·분석을 실시함. 그림 18은 학습 데이터 수에 따른 영상분석모델의 정확도를 나타냄. 여기서 정확도란, 영상분석모델의 성능을 설명하는 지표 중 전체 예측결과 대비 올바르게 예측한 결과값의 비율을 나타내는 accuracy를 의미함. 학습 데이터 수가 동일한 조건에서는 기존 방식보다 본 연구과제에서 개발한 Human-Computer Interactive Learning을 사용할 경우 모델의 성능이 높은 것을 알 수 있음. 특히, 본 연구과제의 질적 성과목표인 “생산성 분석 정확도 80%의 영상분석기술 개발을 위한 학습 DB 구축 소요시간”을 살펴보면 Random Learning 기법의 경우 80%의 성능을 확보하기 위해서 1,830개의 학습 이미지 데이터가 요구되었으며, 이때 소요되는 시간은 약 905분임. 반면 Human-Computer Interactive Learning 알고리즘을 사용할 경우 80%의 성능을 확보하는 데 단 180개의 학습 데이터가 필요했으며, 이에 소요되는 시간은 약 90분으로 학습 DB 구축 소요시간을 기존 방식 대비 1/10로 절감할 수 있었음. 더불어, Learning 기법별 영상분석모델의 최종 정확도를 살펴보면 기존 방식으로는 약 85.2%에 머물렀던 반면 Human-Computer Interactive Learning을 통해 89.4%까지 약 4% 성능을 향상할 수 있었음(그림 18). 이는 본 연구결과를 통해 훨씬 더 적은 수의 데이터와 반복학습으로도 높은 성능을 가지는 영상분석모델을 개발할 수 있음을 의미하며, 결과적으로 기존에 학습 DB 구축에 요구되던 Labeling 작업을 줄일 뿐만 아니라 총 시간과 비용을 절감함(표 1).

표 1. Human-Computer Interactive Learning 및 Random Learning 결과 비교.

|               | Human-Computer Interactive Learning | Random Learning |
|---------------|-------------------------------------|-----------------|
| 학습 DB 구축 소요시간 | 90분                                 | 905분            |
| 영상분석모델의 최종 성능 | 89.4%                               | 85.2%           |

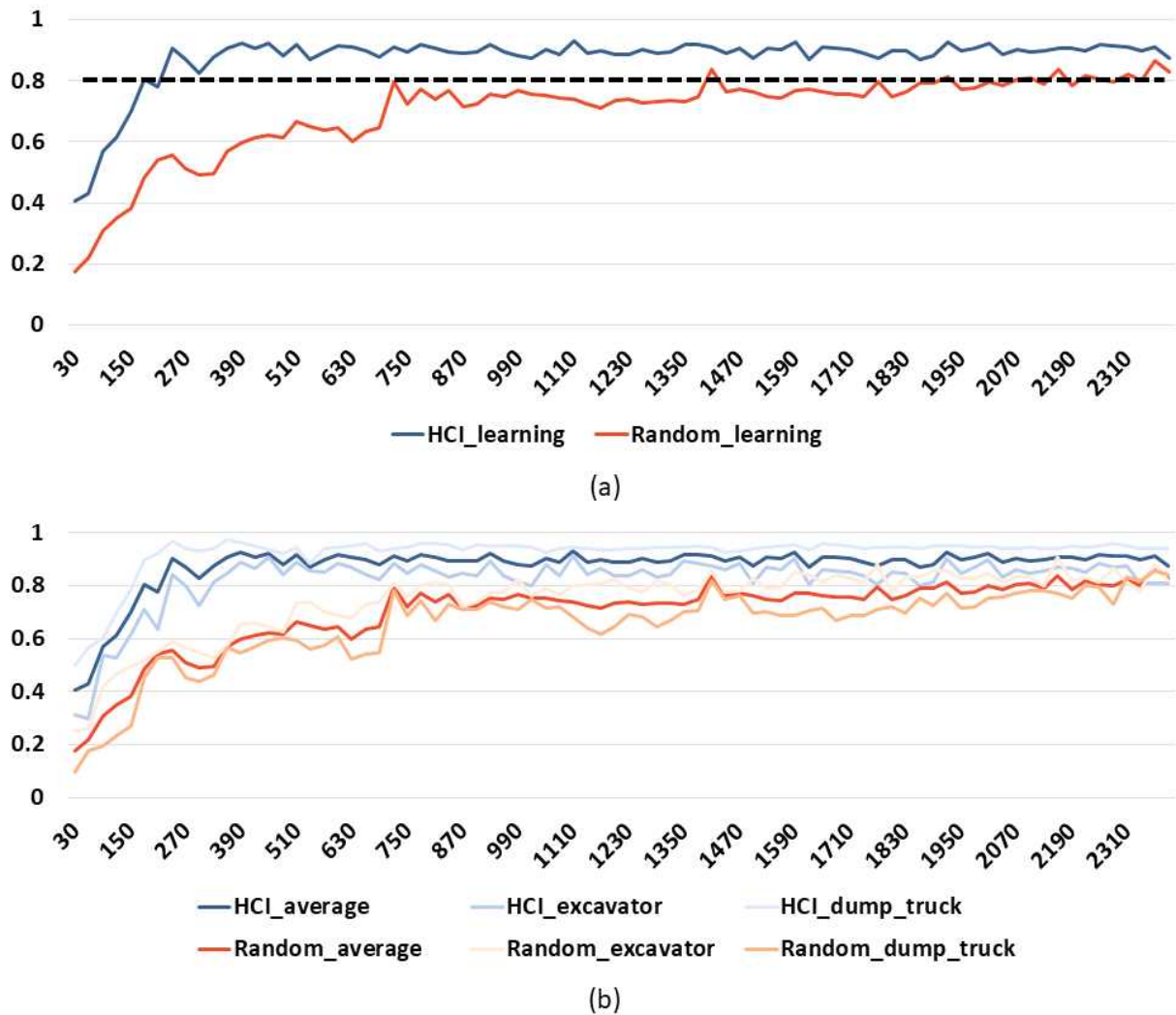


그림 18. 학습 데이터 수에 따른 영상분석모델 정확도. (a) 알고리즘별 평균 정확도 그래프.  
(b) 알고리즘의 객체유형별 평균 정확도 그래프.

#### ○ [1-2] 건설현장 영상 데이터 Web-Crawling 알고리즘 개발

건설현장 영상 데이터 Web-Crawling 알고리즘은 컴퓨터가 인터넷 웹사이트에서 사용자가 원하는 데이터를 자동으로 수집하여 학습용 DB를 구축하는 기법으로, (1) 건설분야 키워드 기반 Web-Crawling 알고리즘, (2) Noise 데이터 필터링 알고리즘, (3) 영상 데이터의 공간적 특성 다양화를 위한 Cross-Oversampling 단계로 구성됨(그림 19).

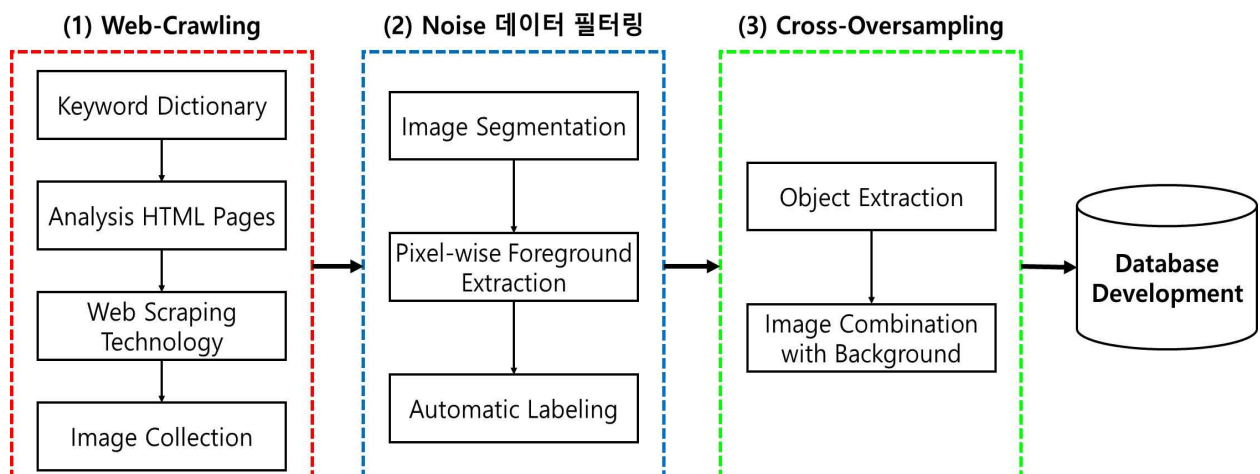


그림 19. 건설현장 영상 데이터 Web-Crawling 알고리즘 순서도.

## 1. Web-Crawling 알고리즘 조사 및 분석

- Web-Crawling 알고리즘 개발을 위한 예비적 연구로써, 본 연구진은 문헌, 블로그, 논문 등 다수의 자료를 분석하여 기존의 영상 데이터 Web-Crawling 알고리즘을 조사함. 그 결과, Hypertext Markup Language(HTML) 페이지 선별 및 분석, 파싱(Parsing), 데이터 저장의 3가지 세부 알고리즘으로 분류할 수 있었고 알고리즘별 자세한 내용은 아래와 같음.
  - **HTML 페이지 선별 및 분석:** HTML은 웹 페이지를 생성하기 위한 언어의 한 종류로서 대부분의 웹 페이지들이 HTML로 구현됨. HTML은 글자크기, 글자모양, 글자색, 그래픽, 문서이동(하이퍼링크) 등 웹 페이지의 모든 정보를 구조화하여 포함함. 따라서 웹 페이지 내에서 원하는 데이터를 자동으로 추출하기 위해서는 HTML을 선별하고 분석하는 작업을 수행해야 함.
  - **파싱:** 앞서 설명한 HTML은 일종의 문자열이라 볼 수 있음. 문자열을 의미 있는 토큰(token, 어휘 분석의 단위)으로 분해하고 이들로 이루어진 파스 트리(parse tree, 토큰 간의 관계를 트리 구조로 나타낸 것)를 만드는 과정을 파싱이라 하며, 이를 통해 HTML 페이지 내에서 원하는 데이터(영상 데이터 등)들의 Uniform Resource Locator(URL)를 추출함.
  - **데이터 저장:** HTML 페이지 파싱으로 추출한 각 데이터의 URL을 토대로 원하는 데이터를 수집하여 저장함.

## 2. 영상 데이터 자동 수집을 위한 건설분야 키워드 기반 Web-Crawling 알고리즘 개발

- 앞서 조사한 결과를 토대로 본 연구목표에 적합한 Web-Crawling 알고리즘을 고안하고 이를 구현함. 본 알고리즘은 ① 검색 키워드 사전 구축, ② HTML 페이지 자동 선별 및 분석, ③ Web Scraping Technology를 활용한 파싱, ④ 영상 데이터 자동 수집으로 구성되며, 단계별 세부내용은 다음과 같음.
  - ① **검색 키워드 사전 구축:** 인터넷 검색 시 웹사이트에 입력하는 키워드에 따라 검색 결과가 매우 다름. 이에 따라 본 연구진은 MasterFormat, UniFormat 등 대표적인 건설공사 표준분류체계를 토대로 건설분야 영상 데이터 검색에 최적화된 키워드 사전을 구축하였음. 예를 들어, 표 2와 3은 건설공종, 건설장비에 대한 키워드 사전을 나타냄. 건설공종의 경우 ‘earthwork’, ‘earthwork construction’, ‘earthmoving construction’ 등과 같이 동일한 작업에 대한 동의어를 키워드 사전에 포함함으로써 개별 공종에 대한 다량의 데이터를 인터넷에서 검색할 수 있도록 함(표 2). 건설장비의 경우 다양한 제조모델에 대한 영상 데이터를 수집하기 위해서 ‘Volvo excavator’, ‘Kubota excavator’, ‘Komatsu excavator’, ‘JCB excavator’, ‘Caterpillar excavator’ 등과 같이 제조사명을 키워드에 포함했음(표 3). 이를 통해 웹사이트에서 다양한 영상 데이터를 검색할 수 있고, 최종적으로 양질의 학습용 영상 DB 구축이 가능함.

표 2. 건설공종 검색 키워드 사전.

| 토공사                      | 골조공사                       | 마감공사                      |
|--------------------------|----------------------------|---------------------------|
| earthwork                | reinforcement construction | curtain wall installation |
| earthwork construction   | framing construction       | curtain wall progress     |
| earthmoving construction | frame construction         | curtain wall worker       |

표 3. 건설장비 검색 키워드 사전.

| 덤프트럭                     | 굴삭기                   | 로더             |
|--------------------------|-----------------------|----------------|
| Ashok Layland dump truck | Caterpillar excavator | XCMG loader    |
| Ford dump truck          | Komatsu excavator     | SANY loader    |
| GMC dump truck           | Volvo excavator       | Sandvik loader |
| Mercedes Benz dump truck | Kubota excavator      | Doosan loader  |
| Chevy dump truck         | JCB excavator         | Komatsu loader |

- ② **HTML 페이지 자동 선별 및 분석:** 웹 크롤러(Web Crawler)가 인터넷 웹사이트에 ①에서 구축한 검색 키워드를 입력하여 검색을 진행함. 검색 결과 HTML 페이지의 URL을 자동으로 선별하고

분석하여 URL을 수집함(그림 20).

```
<div jscontroller="Q7Rsec" data-ri="9" class="rg_bx rg_di rg_el ivg-i"
data-ved="0ahUKEwjxt7bKvM_1AhVSE4gKHVtMAU4QMwhIKAKwCQ" data-row="2" style=
"width: 275px; height: 227px; padding-top: 0px; padding-bottom: 0px;">
  <a jsname="hSRGPd" href="/imgres?imgurl=https%3A%2F%2Fccmodels.com%2Fwp-
content%2Fuploads%2F2016%2F...
  @excavator&ved=0ahUKEwjxt7bKvM_1AhVSE4gKHVtMAU4QMwhIKAKwCQ&iact=mrcauact=
8" jsaction="fire.ivg_o;mouseover:str.hmov;mouseout:str.hmou" class=
"rg_l" rel="noopener" style="width: 275px; height: 185px; left: 0px;
background: rgb(255, 255, 255);">
  <div class="THL21"></div>
   == $0
  <div class="rg_ilmbg"> 1000&nbsp;>&nbsp;>667 </div>
</a>
  <a class="iKjWaf irc-nic isr-rtc a-no-hover-decoration" href="https://
  ccmodels.com/shop/187-cat-349f1-hydraulic-excavator-brass/" jsaction=
  "mouseover:m8Yy5c;mousedown:QEDpme;focus:QEDpme;" rel="noopener" target=
  "_blank">...</a>
  <div class="rg_meta notranslate">...</div>
  <div class="irc_rmdm">...</div>
  <div class="1l0QOb"></div>
</div>
```

그림 20. 수집된 URL의 예시.

- ③ Web Scraping Technology를 활용한 파싱: 선별 및 분석된 HTML 페이지에서 파싱을 통해 검색 키워드에 해당되는 영상 데이터들의 URL을 추출하고 영상들의 URL을 따로 저장함(그림 21).

```
##searching on Google
def url_from_Google(object_s):
    url_img = "https://www.google.co.kr/search?q="+object_s+"&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjQkqWorcThAhWRM4dKHW66BR0Q_AUIDigB&biw=1920&bih=969"
    browser.get(url_img)
    time.sleep(3)
    elem = browser.find_element_by_tag_name("body")
    no = 100
    while no:
        elem.send_keys(Keys.PAGE_DOWN)
        time.sleep(1)
        no -= 1
    browser.find_element_by_xpath("//input[@class='ksb' and @id='smb']").click()

    number = 200
    while number:
        elem.send_keys(Keys.PAGE_DOWN)
        time.sleep(1)
        number -= 1
    html = browser.page_source
    soup = BeautifulSoup(html, 'html5lib')
    return soup

##save img from google
def save_img(object_f,url,count):
    name = "Google_" + object_f + "_" + str(count).zfill(4)
    folder = "/data/jb/DB-free/test_data/test_equipment_190919_0_img/"
    filename = folder + name + ".jpg"
    change_dir = os.path.join(folder, filename)
    try:
        with urllib.request.urlopen(url) as u, \
            open(change_dir, 'wb') as f:
            f.write(u.read())
        print('INFO: Downloaded ' + name + ".jpg")
    except:
        print('ERROR: Failed to download ' + name + ".jpg")
```

그림 21. 파싱을 위한 프로그램 언어 예시.

- ④ 영상 데이터 자동 수집: 저장한 URL을 토대로 영상 데이터를 원하는 만큼 컴퓨터에 저장하는 과정임. 이 같은 과정을 통해 데이터를 자동 수집할 경우, 사람이 데이터를 직접 수집하는 것에 비해 약 80배 빠른 것으로 알려져 있음.

### 3. Noise 데이터 필터링 알고리즘 개발

- Web-Crawling 알고리즘을 통해 웹사이트에서 무분별하게 수집되는 일부 Noise 데이터(예시: “굴삭기”로 키워드 검색을 수행하였으나 덤프트럭 영상이 수집되는 경우 또는 건설요소가 아닌 데이터가 수집되는 경우)를 필터링하는 알고리즘을 개발함. 본 알고리즘은 ① Image Segmentation(이미지 분할) 기반 자동 Labeling, ② 객체-배경 상대적 비율 기반 학습 영상 데이터 선별로 구성됨.

- ① **Image Segmentation 기반 자동 Labeling**: 영상 데이터를 픽셀 단위로 분할하는 기법으로써 다음과 같이 3단계로 진행됨(그림 22). 첫 번째, Downsampling 단계는 영상 데이터 내 특정 구역의 픽셀(pixel) 대푯값을 뽑아내는 절차이며, 데이터 크기는 줄이면서 위치정보 손실을 최소화할 수 있음. 그 다음, Downsampling 단계의 결과물인 특성맵(Feature Map)에서 분석 대상 객체의 유형과 위치를 파악하는 Pixel-wise Prediction 단계가 수행됨. 마지막으로, Upsampling 단계는 Downsampling 절차와는 달리 기존에 축소된 영상 데이터를 다시 복원하는 동시에 Pixel-wise Prediction 단계에서 추출한 객체의 유형 및 위치 정보를 유지함. 이와 같이 구성된 Image Segmentation 기법을 활용하여 각 영상 데이터 내의 foreground(배경이 아닌 분석 대상 객체)와 background(배경)를 구분할 수 있음. 또한, 기존에 open benchmark datasets(ImageNet, MNIST, MS COCO 등)로 사전 학습된 모델을 사용함으로써 추가적인 학습 DB 구축 및 모델 개발을 진행하지 않고 Web-Crawling된 건설현장 영상 데이터에 적용할 수 있음. 예를 들어, 그림 23과 같이 건설장비와 배경을 자동 구분할 수 있음.

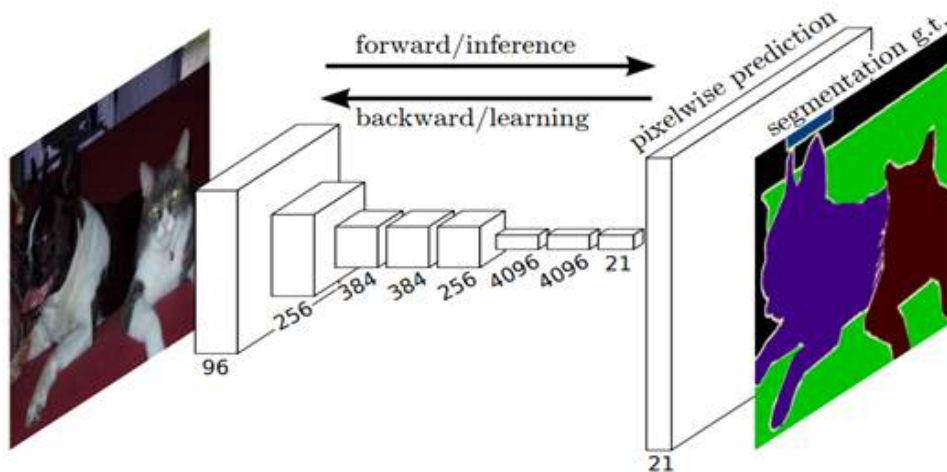


그림 22. Image Segmentation 순서도.

- ② **객체-배경 상대적 비율 기반 학습 영상 데이터 선별**: 앞의 ①단계에서 추출한 pixel-wise foreground 정보를 활용해 영상 데이터 내 객체의 위치를 자동으로 파악할 수 있음. 구체적으로, 추출된 foreground의 가로, 세로의 최댓값 및 최솟값을 추출하여 자동으로 labeling(영상 내 객체의 위치 정보를 입력하는 행위)을 진행함(그림 23).

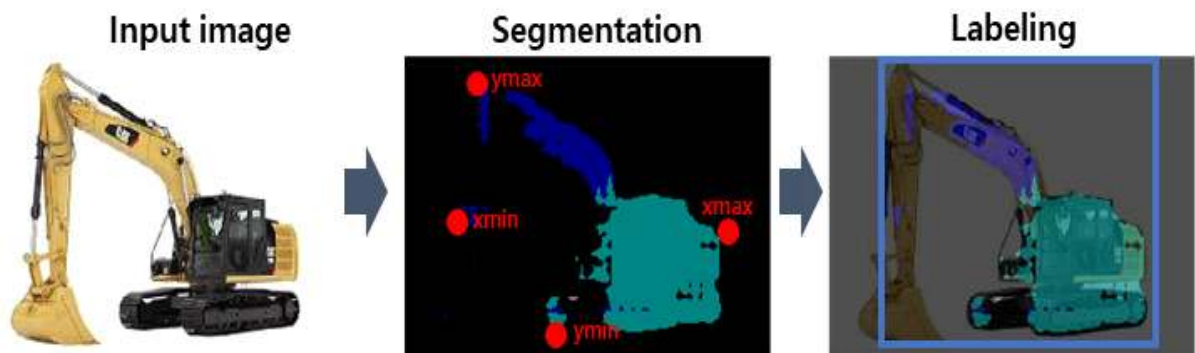


그림 23. 객체-배경 상대적 비율 기반 학습 영상 데이터 선별.

#### 4. 건설현장 맞춤형 영상 데이터 Cross-Oversampling 알고리즘 개발(추가 연구개발 내용)

- 앞서 개발한 알고리즘들을 활용하여 구축된 학습용 DB는 그림 24와 같으며, 대부분의 객체(건설장비)가 데이터 중앙에 위치하며 그 공간적 크기가 매우 크다는 것을 알 수 있음. 반면, 실제 건설현장 영상 데이터의 경우 객체(건설장비)의 크기와 위치가 매우 다양하기 때문에, Web-Crawling 및 Noise 데이터 필터링만으로 구축한 DB를 활용하면 영상분석기술의 성능이 저하됨.

이 같은 한계를 해결하기 위해서 본 연구진은 건설현장 맞춤형 영상 데이터 Cross-Oversampling 알고리즘을 추가 개발함. 본 알고리즘은 앞서 추출한 객체의 공간적 특성(크기 및 위치)을 임의로 변경하고 실제 현장 배경 영상 데이터에 삽입함으로써, 다양한 공간적/시각적 특성을 지닌 영상 데이터를 샘플링하여 학습 DB를 구축함(그림 25).

Web-Crawling & Noise 필터링 알고리즘 데이터



실제 건설현장 영상 데이터



그림 24. Web-Crawling & Noise 필터링 알고리즘을 활용하여 구축한 영상 데이터 및 실제 현장 영상 데이터 내의 객체 크기 비교.



그림 25. Cross-Oversampling의 순서도.

## 5. 실험실 환경에서의 성능 시험 및 검증

- 개발 알고리즘의 성능을 실험실 환경(모델의 성능을 평가를 위해 웹사이트에서 수집 및 매뉴얼 Labeling을 진행한 이미지 데이터)에서 시험하였고(Object Detection Model: faster\_rcnn\_resnet101, Class: 덤프트럭, 굴삭기, Training Steps: 100,000), 그 결과 평균 정확도 86.5%로 상당히 높은 성능의 영상분석모델을 개발함. 그림 26은 영상 데이터에서 건설자원의 유형과 위치를 자동으로 파악한 결과 예시이며, 다양한 시각적 특성(형태, 색상, 기하학적 구조 등)의 덤프트럭 및 굴삭기를 인식하는 것을 볼 수 있음.



그림 26. 영상분석모델 실험실 환경에서의 성능 시험 결과 예시.

- 본 알고리즘의 학습 DB 구축 소요시간 단축 효과를 확인하기 위해서 기존의 학습 DB 구축 방식인 영상 데이터 직접 수집 및 매뉴얼 Labeling 방식과 비교·분석함. 사람이 직접 Labeling을 진행할 경우 이미지 1장당 평균 10초가 소요되는 반면, 본 알고리즘을 활용하면 Labeling 시간을 이미지 1장당

0.3초로 단축함. 또한, 현장에서 사람이 영상 데이터를 직접 촬영할 경우 카메라 설치시간 등 추가적인 시간과 노력이 요구되나. 본 연구는 Web-Crawling 알고리즘을 통해 웹사이트에 산재한 영상 데이터를 자동 수집함으로써 이 같은 시간과 노력을 절감함. 최종적으로 본 알고리즘은 기존 방식 대비 학습 DB 구축 소요시간을 1/30 이상 절감하였음.

## 6. 유사 환경에서의 예비적 성능 시험 및 검증(추가 연구개발 내용)

- 본 연구과제의 2차년도 연구목표 중 하나인 “건설프로세스 생산성 분석 알고리즘”을 성공적으로 개발하기 위해서 Web-Crawling 알고리즘을 유사 환경(일부 건설현장 영상 데이터)에서 예비적 성능 시험을 우선 수행함(Object Detection Model: faster\_rcnn\_resnet101, Class: 덤프트럭, 굴삭기, 로더, Training Steps: 100,000). 그 결과 평균 정확도 54.5%(덤프트럭: 62.7%, 굴삭기: 43.6%, 로더: 57.1%)의 성능을 가진 영상분석모델을 개발하였고, 그림 27은 영상 데이터에서 건설자원의 유형과 위치를 분석한 결과 예시임. 본 결과는 도시인프라환경에 일반화된 모델의 성능(보행자, 자전거, 자동차 등 객체 인식 정확도: 32%)과 비교할 때 정확도가 20% 이상 높음. 이 같은 결과는 Web-Crawling 알고리즘으로 수집한 영상 데이터가 실제 현장에서 활용될 수 있는 가능성을 보여줌.



그림 27. 영상분석모델 유사 환경에서의 예비적 성능 시험 결과 예시.

## ○ [1-3] 건설현장 Cyber-Physical Simulation 알고리즘 개발

### 1. Cyber-Physical Simulation 소프트웨어 조사 및 분석

- Cyber-Physical Simulation(CPS)이란 사이버 공간의 디지털 환경에서 물리적인 실제 현실을 통합하는 개념 아래 가상의 물리적 시공간을 구현하는 기법을 의미함. 건설산업에서 CPS 기술을 활용하여 향후 시공되는 실제 건물/구조물을 구현할 뿐만 아니라 접근하기 어려운 물리적 공간 및 위험 상황 등 목적에 맞는 건설현장을 재현할 수 있음. 본 연구에서는 CPS 기술을 이용하여 작업자, 장비, 작업환경, 구조물 등 가상의 건설현장 구성요소를 모델링하고 건설 프로세스를 시뮬레이션함으로써 데이터 수집이 어려운 건설현장 구성요소 및 건설프로세스에 대한 학습 DB를 효과적으로 구축할 수 있음.
- 이에 따라 본 연구진은 CPS 기술을 지원하는 소프트웨어를 조사함(표 4). CPS 기술 사용 목적에 따라 건설현장 구성요소 모델링 및 건설프로세스 시뮬레이션 관련 소프트웨어로 분류할 수 있었으며, 제공하는 기능에 따라 건설현장 정보를 3D로 모델링하는 Building Information Modeling(BIM) 기반의 소프트웨어와 실시간 그래픽 표시 기능을 갖춘 상호작용 응용 프로그램을 구현하는 게임엔진 소프트웨어로 구분할 수 있음.
- Building Information Modeling(BIM)은 3차원 모델을 기반으로 시설물의 생애주기에 걸쳐 발생하는 모든 정보를 통합하여 활용이 가능하도록 시설물의 형상, 속성 등을 정보로 표현하는 디지털 모델링을 말하며, 본 연구에서는 건설장비 및 작업자 모델링에 활용됨. 대표적인 BIM 모델링 소프트웨어는 Revit, ArchiCAD 등이 있으며, BIM기반 건설공정 시뮬레이션 소프트웨어로는 Navisworks, Synchro, VICO Software, Bentley Navigator 등이 있음. 본 연구에서는 Autodesk사의 Revit과 Navisworks를 활용함(그림 28).
- 게임 엔진은 3D 및 2D 비디오 게임, 3D 애니메이션과 건설 시각화, 가상현실(VR) 등 인터랙티브 콘텐츠 제작을 위한 통합 개발환경을 제공하는 소프트웨어로 본 연구과제에서 건설현장 및 건설프로세스 시뮬레이션, 학습 데이터 생성에 활용될 수 있음. 대표적인 게임엔진으로는 Unity,

Unreal Engine 등이 있으며, 본 연구에서는 Asset store를 통해 다양한 건설현장 구성요소를 제공하고 사용자의 목적에 맞추어 건설 작업을 시뮬레이션할 수 있는 Unity를 활용함.

표 4. Cyber-Physical Simulation 주요 기능 및 소프트웨어.

| 활용목적          | 구분     | BIM기반 소프트웨어                                           | 게임엔진 소프트웨어                           |
|---------------|--------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| 건설현장 구성요소 모델링 | 주요 기능  | 건축, 토목 건설현장 시설 관련 구성요소 모델링                            | 작업자, 건설장비 등 건설현장 구성요소 모델링            |
|               | 주요 S/W | Revit, ArchiCAD, Sketchup                             | Unity, Unreal Engine                 |
| 건설작업 시뮬레이션    | 주요 기능  | 공정정보 연계 건설공정 시뮬레이션 3D 시각화 Rendering                   | 건설현장 구성요소(시설, 작업자, 장비 등) 통합 시뮬레이션 구현 |
|               | 주요 S/W | Navisworks, Synchro, VICO Software, Bentley Navigator | Unity, Unreal Engine                 |



그림 28. 건설현장 맞춤형 CPS 구성 객체 예시(위:Unity, 아래:Revit).

## 2. 작업자, 건설장비, 작업환경, 구조물 등 건설현장 맞춤형 CPS 기술 개발

- 본 연구과제의 분석 대상인 토공사, 골조공사, 마감공사 건설현장을 구현하기 위해서 공종별로 투입되는 건설자원(작업자, 장비, 자재 등)과 환경(흙, 구조물 등)을 표 5와 같이 정의함. 이를 토대로 공종별 모델링 대상 및 소프트웨어를 선정하였고 CPS를 다음과 같이 구현함.

표 5. 공종별 모델링 대상 및 모델링 개요.

| 구분     | 토공사                                          | 골조공사                                                       | 마감공사                                                       |
|--------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| 모델링 대상 | 토공사 현장 및 장비                                  | 골조공사 현장(건물),<br>골조객체(철근, 거푸집 등),<br>장비, 작업자                | 마감공사 현장(건물),<br>마감객체(커튼월, 창문 등),<br>장비, 작업자                |
| 모델링 개요 | 현장: BIM, Unity, 사진<br>장비: Unity<br>작업자: None | 현장: BIM, Unity, 사진<br>골조객체: BIM<br>장비: Unity<br>작업자: Unity | 현장: BIM, Unity, 사진<br>마감객체: BIM<br>장비: Unity<br>작업자: Unity |

- **토공사 건설현장 모델링:** BIM 객체, Unity Asset Store에서 제공하는 객체, 건설현장 사진 등을 Unity 게임엔진으로 import하여 활용할 수 있음.
  - (1) **토공사 장비:** Unity Asset Store에서 제공하는 굴삭기(excavator)와 덤프트럭(dump truck) 등의 객체를 활용하였으며, 장비의 움직임을 건설 작업 프로세스에 맞추어 작동하도록 모델링함(그림 29).



그림 29. 굴삭기(excavator) 토공사 작업 움직임 모델링(Unity).

- (2) **골조공사 및 마감공사:** 토공사와 마찬가지로 BIM 객체, Unity Asset Store에서 제공하는 객체, 건설현장 사진을 활용할 수 있으며, 또한 테스트 현장 맞춤형 학습 데이터 생성에 필요한 건물 객체를 BIM 소프트웨어를 활용하여 상세하게 모델링 할 수 있음.
- (3) **골조공사 및 마감공사:** 철근, 거푸집 등의 골조객체, 커튼월, 창문 등의 마감객체가 존재하며 건물 이외에 타워크레인, 호이스트 등의 장비가 함께 존재함. 이에 대해서는 BIM 소프트웨어로 모델링한 객체와 Unity Asset Store에서 제공하는 객체를 활용함(그림 30, 31).

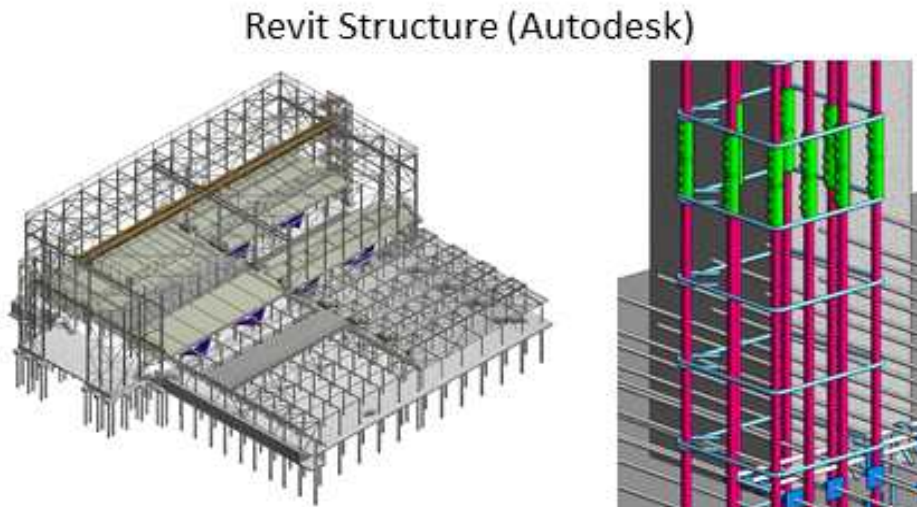


그림 30. 골조공사 건설현장 모델링 예시(Autodesk Revit 활용).

## Revit Architecture (Autodesk)



그림 31. 마감공사 건설현장 모델링 예시(Autodesk Revit 활용).

- (4) 골조공사 및 마감공사 현장 작업자: Unity Asset Store에서 제공하는 객체를 활용하며, Unity 게임 캐릭터를 활용하여 실제 작업자의 상세 움직임을 구현할 수 있음(그림 32).



그림 32. 건설 작업자 모델링 예시(Unity).

### 3. CPS 기반 영상 데이터 Rendering 알고리즘 개발

- 기계학습 알고리즘을 활용하여 영상 및 이미지를 분석하기 위해서는, 이미지 데이터에서 분석하고자 하는 객체의 정보(종류, 위치 등)를 표시하는 Labeling 작업을 수행해야 함. 이에 따라 CPS 기반 학습 데이터를 (1) 건설현장 모델링(construction site modeling), (2) 레이어기반 이미지 분할(layer-based image segmentation) (3) 라벨링 이미지 자동 생성(automatic labelled image generation)의 과정으로 생성함.
- 공종별 표준분류체계 및 검색 키워드 사전을 바탕으로 배경(건설현장 및 건물), 객체(장비 및 작업자), 작업(객체의 움직임)을 모델링함. 공종별 표준분류체계는 2차년도 건설 생산성 분석을 위한 추가 연구개발 내용으로 아래의 [추가 연구개발 내용(38쪽-40쪽)]에서 설명함. 건설현장 배경 및 객체 모델링 과정에서 객체별로 다른 레이어 속성을 추가하여 이미지 분할(image segmentation)시 객체별 고유 색상 값(RGB)을 갖도록 함. 또한, 건설현장 내 장비 또는 작업자의 움직임까지 모델링한 후 해당 움직임을 포함한 영상에서 이미지 데이터를 생성함. 이때 가상의 카메라 위치, 각도 등을 조정하여 사용자가 원하는 영상을 얻을 수 있으며, 영상에서 원하는 만큼 이미지 데이터를 생성할 수 있음(그림 33).

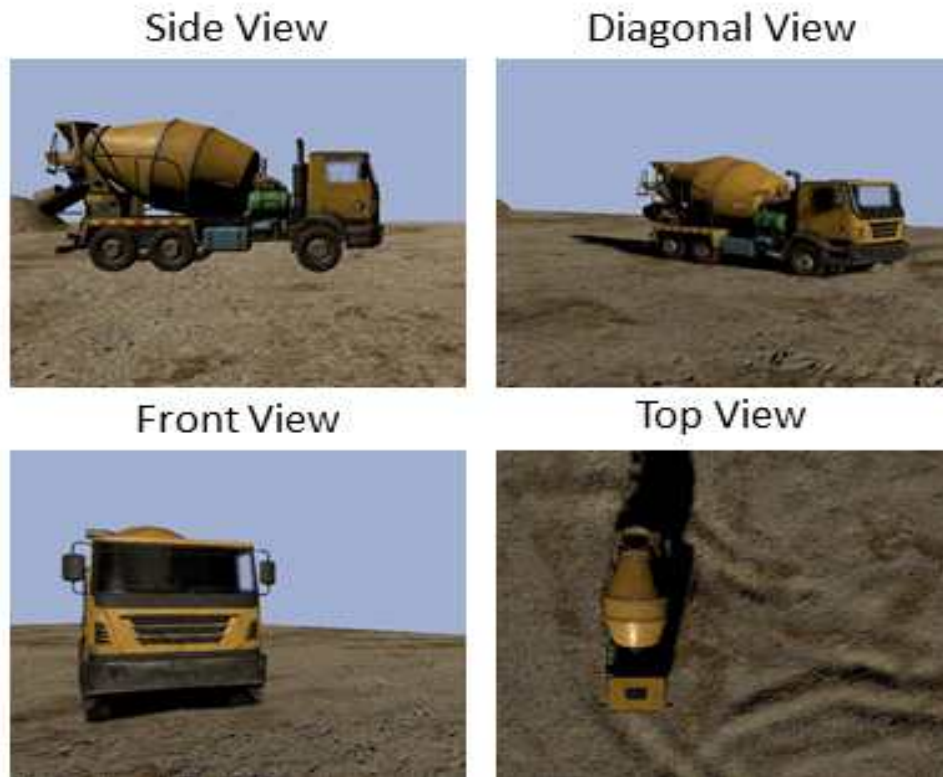


그림 33. 카메라 각도에 따른 덤프트럭 데이터 생성 예시(Unity).

- 이때 원본 이미지와 분할된 이미지(segmented image)를 동시에 생성하고, 분할된 이미지를 활용하여 색상별 픽셀 위치를 기반으로 자동 Labeling 작업을 수행하여 학습 데이터를 생성함. 특히, 실제 영상 또는 사진을 대상으로 한 이미지 분할의 경우 이미지 처리 과정에서 불확실성에 의한 오차를 가지는 반면 CPS 기술을 활용할 경우 해당 오차가 존재하지 않음. 더불어 CPS 기술은 객체별로 수작업 Labeling을 진행하는 데 필요한 시간과 노력을 절감함(그림 34).

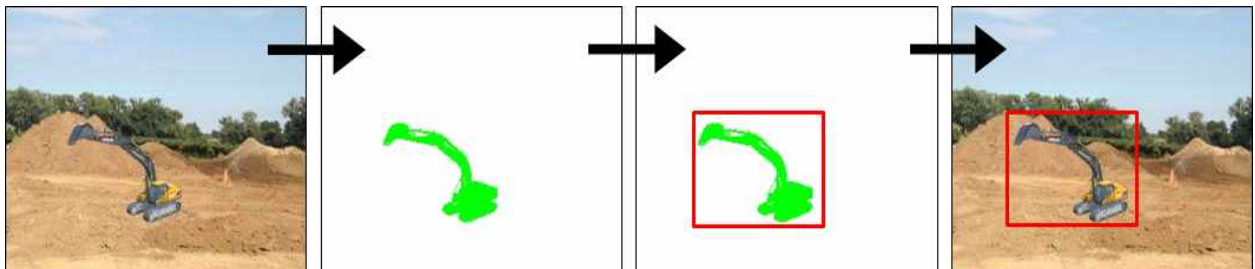


그림 34. CPS기반 학습 데이터 생성 프로세스(토공사 현장).

#### 4. 실험실 환경에서의 성능 시험 및 검증

- 건설현장 Cyber-Physical Simulation 알고리즘에 대한 기술 성능을 테스트하기 위하여, CPS기반으로 학습 데이터를 생성한 뒤, 해당 학습 데이터 학습한 영상분석모델의 성능을 실험실 환경에서 검증함.
  - 토공사의 장비(굴삭기), 골조공사의 작업자를 대상으로 실험을 진행하였으며, CPS 환경에서 해당 객체를 모델링하고 현장 사진을 활용하여 학습 이미지를 생성함. 현장 사진의 유무에 따른 모델 성능 시험도 함께 수행함(그림 35).

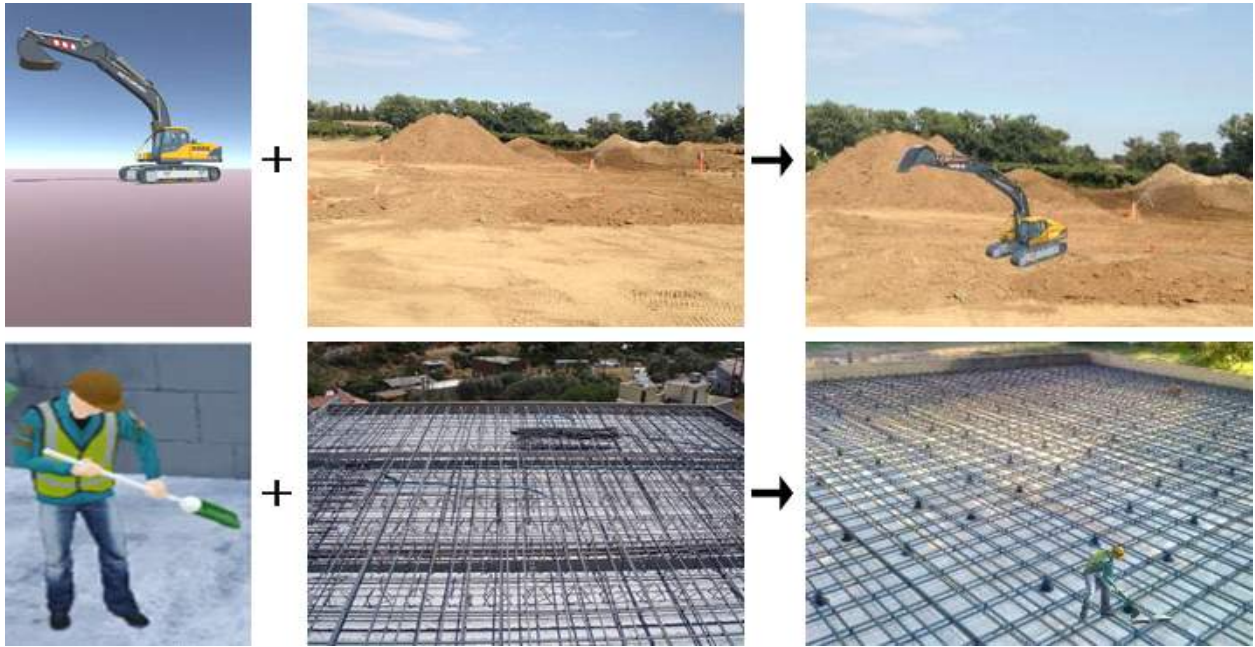


그림 35. Unity 객체 및 현장 배경을 활용한 토공사 및 골조공사 현장 데이터 생성.

- 토공사 및 골조공사를 대상으로 실제 건설현장에서 수집한 데이터를 테스트셋으로 시험을 진행하였으며, 그 내용 및 결과는 아래 표 6과 같음.

표 6. Cyber-Physical Simulation 영상분석모델 성능 테스트 시험 결과.

| 학습 데이터     |        | 테스트 데이터     | 모델 성능  |
|------------|--------|-------------|--------|
| 공종(모델링 대상) | 구분     |             |        |
| 토공사(굴삭기)   | 배경 미사용 | 토공사 현장 이미지  | 48.01% |
|            | 배경 사용  | 토공사 현장 이미지  | 65.89% |
| 골조공사(작업자)  | 배경 사용  | 골조공사 현장 이미지 | 74.09% |

- 시험 결과, 배경을 모델링하지 않을 경우 낮은 성능을 보였으며, 배경을 함께 모델링한 데이터를 학습할 시 높은 정확도 향상을 보임. 이에 BIM을 활용하여 대상 현장에 맞춤 모델링한 학습 데이터를 활용할 경우 높은 성능을 확보할 수 있을 것으로 기대됨.
- 이외에도 추가적인 토목 장비 인식, 건설 작업자의 다양한 동작 구분, 타 기술과의 연계(아래 추가 연구개발 내용 1 참고) 등을 목적으로 시험을 위해 건설현장 Cyber-Physical Simulation 알고리즘을 활용함.

#### ○ [추가 연구개발 내용 1] 건설현장 맞춤형 DB-free 영상분석기술 연계 및 통합

- 본 연구진은 연구개발계획서상 세부 연구목표 외 추가적인 연구개발을 수행함. 구체적으로, 개발한 알고리즘(Human-Computer Interactive Learning, HCIL; Web-Crawling, WC; Cyber-Physical Simulation, CPS)을 연계-통합함으로써, 개별 기술의 단점을 보완하고 DB-free 영상분석기술의 성능과 활용 가능성을 극대화함. 자세한 연구수행 내용 및 결과는 다음과 같음.
  - WC와 CPS 기술을 활용하여 건설분야에 일반화된 학습용 이미지 DB를 자동 구축하고 이를 토대로 영상분석모델을 개발한 뒤, HCIL 기술을 통해 실제 분석 대상 건설현장의 영상 데이터에 맞춤화하는 과정을 나타냄. 이 같은 과정을 통해 학습한 영상분석모델의 성능을 실험실 환경에서 검증함.
  - 그 결과 평균 정확도 93.0%로 상당히 높은 성능의 영상분석모델을 개발할 수 있었으며, 그림 36은 이미지 데이터에서 건설자원의 유형과 위치를 파악한 예시임. 굴삭기, 덤프트럭, 로더의 시각적 특성(형태, 색상, 기하학적 구조 등)을 지닌 경우에도 성공적으로 인식하는 것을 볼 수 있음.



그림 36. HCIL-WC-CPS 연계-통합 분석 결과 예시.

- 영상분석모델의 성능과 학습 DB 구축 소요시간을 개별 기술을 독립적으로 활용할 때와 비교한 결과는 표 7과 같음. 가장 높은 성능의 영상분석모델을 학습한 HCI Learning과 비교할 때보다 정확도 3.6%를 향상할 수 있었고, 특히 사람이 수동으로 학습 DB를 구축하는 데 걸리는 시간을 90분에서 30분으로 절감할 수 있었음. 이 같은 결과는 개발 알고리즘을 연계-통합함으로써 DB-free 영상분석기술의 성능을 향상하고 학습 DB 구축에 소요되는 시간과 노력을 절감할 수 있을 뿐만 아니라, 개별 분석 대상의 현장에 맞춤형 영상분석모델을 학습할 수 있다는 것을 의미함.

표 7. 접근 방식별 영상분석모델의 성능 및 학습 DB 구축 소요시간.

| 알고리즘                      | 영상분석모델의 성능 | 학습 DB 구축 소요시간      |
|---------------------------|------------|--------------------|
| HCI Learning              | 89.4%      | 90분(수동)            |
| Web-Crawling              | 86.5%      | 60분(자동)            |
| Cyber-Physical Simulation | 70.0%      | 45분(자동)            |
| 연계-통합                     | 93.0%      | 135분(자동) + 30분(수동) |

#### ○ [추가 연구개발 내용 2] 건설프로세스 생산성 분석 알고리즘 개발을 위한 공종별 표준분류체계 구축

- 본 연구과제의 2차년도 연구목표 중 하나인 “건설프로세스 생산성 분석 알고리즘 개발”을 위해서는 공종별 표준분류체계를 개발하는 것이 필요함. 이를 위해 토공사를 대상으로 표준분류체계를 우선 개발하였고, 국토교통부와 한국건설기술연구원에서 매년 발간하는 건설공사 표준품셈과 기존의 건설프로세스 생산성에 관한 연구결과(Halpin and Riggs 1992, Jung et al. 2018, Smith et al. 1995)를 토대로 건설자원별 생산상태, 작업유형, 개별적인 행동, 건설자원 간 상호작용으로 구성함(표 8-10).
- 표 8은 굴삭기의 표준분류체계를 보여줌. 구체적으로, 굴삭기는 비생산적/반생산적/생산적 3가지의 생산상태가 있으며, 유회/주행/흙고르기/상차 4가지의 작업유형, 정지/이동/파기/옮기기/내리기/회전 6가지의 개별적인 행동을 수행함. 특히, 상차작업을 수행할 경우 정지하고 있는 덤프트럭과 상호작용을 통해 흙을 주고받는다라는 특성이 있음.

표 8. 토공사 표준분류체계 예시(굴삭기).

| 굴삭기                       |                   |           |      |          |
|---------------------------|-------------------|-----------|------|----------|
| 생산상태                      | 작업유형              | 개별적인 행동   | 상호작용 |          |
|                           |                   |           | 건설자원 | 상태       |
| 비생산적<br>(Non-productive)  | 유휴(Idle)          | 정지(Stop)  | -    |          |
| 반생산적<br>(Semi-productive) | 주행(Travel)        | 이동(Move)  | -    |          |
|                           | 흙고르기(Soil-manage) | 파기(Dig)   |      |          |
|                           |                   | 옮기기(Haul) |      |          |
|                           |                   | 내리기(Dump) |      |          |
|                           |                   | 회전(Swing) |      |          |
| 생산적<br>(Productive)       | 상차(Load)          | 파기(Dig)   | 덤프트럭 | 정지(Stop) |
|                           |                   | 옮기기(Haul) |      |          |
|                           |                   | 내리기(Dump) |      |          |
|                           |                   | 회전(Swing) |      |          |

- 표 9는 덤프트럭의 표준분류체계이며, 장비의 투입목적(임의의 현장에서 흙을 싣고 다른 현장으로 운반)에 따라 비생산적/생산적 2가지의 생산상태, 유휴/주행/상차/하차 4가지의 작업, 정지/이동 2가지의 개별행동을 취함. 덤프트럭은 정지라는 동일한 행동을 하면서도 비생산적인 유휴작업을 진행하거나 굴삭기와의 상호작용을 통해 생산적인 상차작업을 수행한다는 특성이 있음.

표 9. 토공사 표준분류체계 예시(덤프트럭).

| 덤프트럭                     |            |          |      |           |
|--------------------------|------------|----------|------|-----------|
| 생산상태                     | 작업유형       | 개별적인 행동  | 상호작용 |           |
|                          |            |          | 건설자원 | 상태        |
| 비생산적<br>(Non-productive) | 유휴(Idle)   | 정지(Stop) | -    |           |
| 생산적<br>(Productive)      | 주행(Travel) | 이동(Move) | -    |           |
|                          | 상차(Load)   | 정지(Stop) | 굴삭기  | 파기(Dig)   |
|                          |            |          |      | 옮기기(Haul) |
|                          |            |          |      | 내리기(Dump) |
|                          |            |          |      | 회전(Swing) |
|                          | 하차(Unload) | 정지(Stop) | -    |           |

- 표 10은 로더의 표준분류체계를 나타내며, 굴삭기와 투입목적(흙을 파고 덤프트럭에게 적재)이 동일하기 때문에 생산상태, 작업유형이 유사함. 마찬가지로 덤프트럭과 상호작용을 통해 상차작업을 취한다는 점도 동일하나, 굴삭기와의 기계적 특성이 달라 개별적인 행동이 다르다는 것이 특징임(굴삭기: 파기/옮기기/내리기/회전, 로더: 파기/이동/내리기).

표 10. 토공사 표준분류체계 예시(로더).

| 로더                        |                   |           |      |          |
|---------------------------|-------------------|-----------|------|----------|
| 생산상태                      | 작업유형              | 개별적인 행동   | 상호작용 |          |
|                           |                   |           | 건설자원 | 상태       |
| 비생산적<br>(Non-productive)  | 유휴(Idle)          | 정지(Stop)  | -    |          |
| 반생산적<br>(Semi-productive) | 주행(Travel)        | 이동(Move)  | -    |          |
|                           | 흙고르기(Soil-manage) | 파기(Dig)   | -    |          |
|                           |                   | 이동(Move)  |      |          |
|                           |                   | 내리기(Dump) |      |          |
| 생산적<br>(Productive)       | 상차(Load)          | 파기(Dig)   | 덤프트럭 | 정지(Stop) |
|                           |                   | 이동(Move)  |      |          |
|                           |                   | 내리기(Dump) |      |          |

## 2) 2차년도

- 2차년도 연구목표인 DB-free 영상분석 기반 전주기 건설프로세스 통합관리 플랫폼의 개념도는 그림 37과 같으며, 세부 연구목표별 구체적인 세부 연구수행 결과는 다음과 같음.

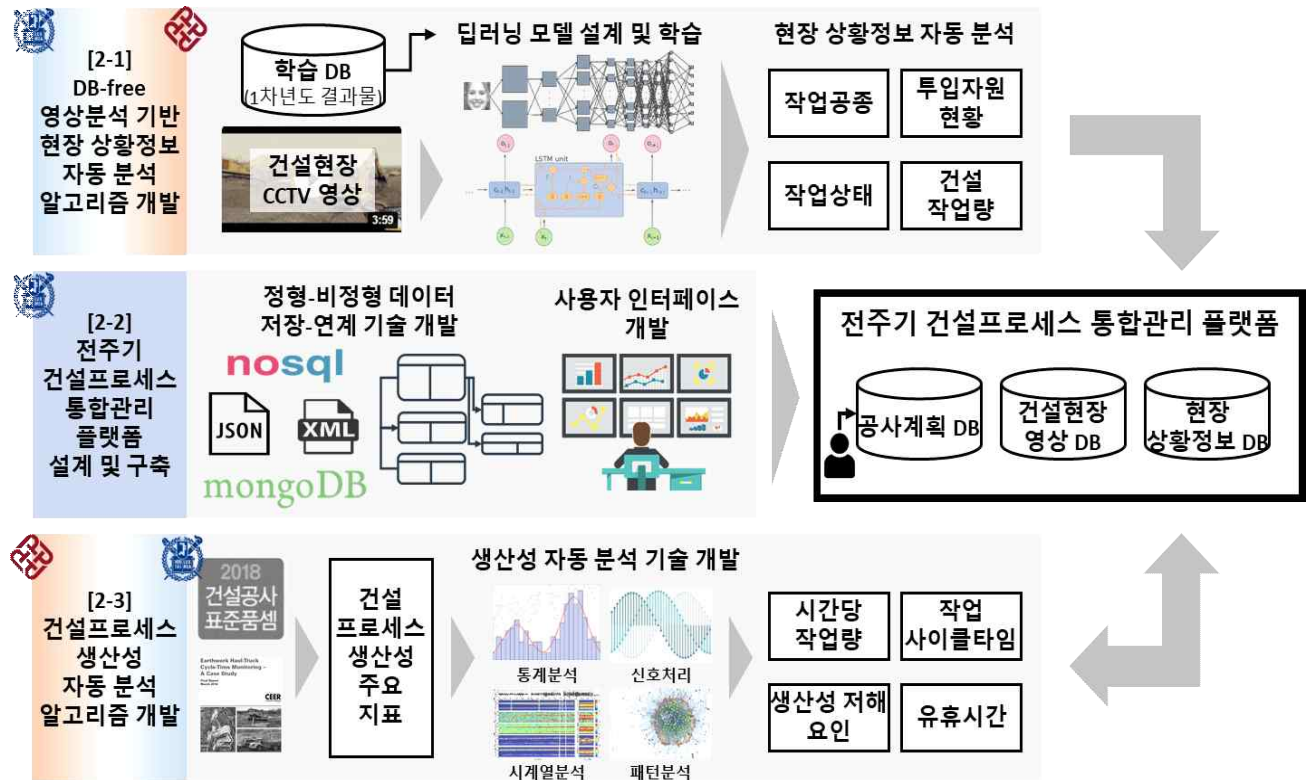


그림 37. DB-free 영상분석 기반 전주기 건설프로세스 통합관리 플랫폼 개념도.

### ○ [2-1] DB-free 영상분석 기반 현장 상황정보 자동 분석 알고리즘 개발

본 알고리즘은 1차년도에 개발한 DB-free 영상분석기술을 활용하여 실시간 수집되는 CCTV 영상 데이터로부터 현장 상황정보를 자동으로 분석하는 기법으로, 1. 작업공종 자동 분류 모델, 2. 투입자원 현황 자동 인식 모델, 3. 작업상태 자동 인식 모델, 4. 건설작업량 자동 분석 모델로 구성됨. 모델별 자세한 연구내용은 다음과 같음.

#### 1. 작업공종 자동 분류 모델 개발

- 작업공종 자동 분류 모델은 건설현장에서 수집된 임의의 영상 데이터가 어떤 작업공종(토공사, 골조공사, 마감공사 등)에 관한 것인지를 자동으로 분류하는 모델로, Computer Vision 분야에서 활발히 이용되는 이미지 분류(Image Classification) 기법과 1차년도 연구성과인 Web-Crawling 알고리즘을 통합하여 개발함.
  - **이미지 분류(Image Classification):** 이미지 분류는 대표적인 딥러닝(Deep Learning) 연구분야 중 하나이며, 입력된 이미지 데이터의 유형을 자동으로 분류하는 기법임(LeCun et al. 1995). 대부분의 이미지 분류 모델은 Convolutional Neural Networks(CNN)로 구성되며, 주로 사용되는 CNN 네트워크는 AlexNet, ZFNet, VGG, ResNet, InceptionV3임. 특히, 기존의 CNN 네트워크는 동일한 크기의 컨볼루션 필터(Convolution Filter)를 사용하여 이미지 데이터로부터 시각적 특성을 추출-분석하는 반면에, InceptionV3는 다양한 크기의 필터를 동시에 사용하는 네트워크임(그림 38). 이러한 InceptionV3의 연산 방법은 이미지 데이터로부터 다양한 시각적 특징들을 추출하고 분석할 수 있으므로 다른 네트워크 대비 이미지 분류 성능이 높음.

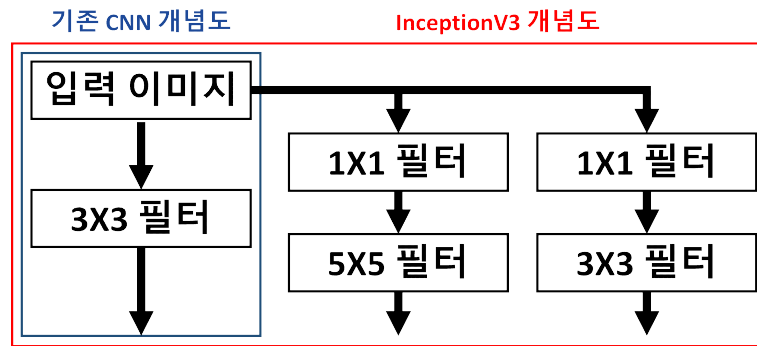


그림 38. 기존 CNN과 InceptionV3의 개념도.

- CNN기반 InceptionV3 이미지 분류기법과 1차년도 연구결과를 활용하여 작업공종 자동 분류 모델을 개발함(그림 39). 보다 구체적으로, 개발 알고리즘은 (a) 검색 키워드 사전 구축, (b) 웹 크롤링 기법을 활용한 학습 DB 구축, (c) 건설현장 이미지 분류 모델 개발의 단계로 진행하였으며, 단계별 세부내용은 다음과 같음.



그림 39. 작업공종 자동 분류 모델 알고리즘 순서도.

- (1) **검색 키워드 사전 구축:** Google, Naver 등 인터넷 검색엔진에서 다량의 이미지 데이터를 자동으로 검색하고 수집할 수 있는 키워드 사전을 구축함. 연구진은 작업공종에 따른 검색 키워드 사전을 표 11과 같이 구축하였으며, 이를 활용하여 검색엔진으로부터 양질의 학습 이미지 데이터를 수집함.

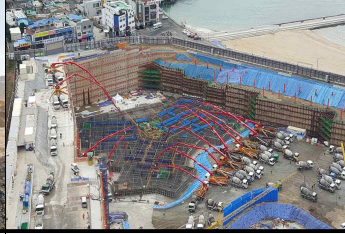
표 11. 작업공종 분류를 위한 검색 키워드 사전.

| Earthwork                | Framing                    | Finishing                 |
|--------------------------|----------------------------|---------------------------|
| earthwork                | reinforcement construction | curtain wall installation |
| earthwork construction   | framing construction       | curtain wall progress     |
| earthmoving construction | frame construction         | curtain wall worker       |

- (2) **웹 크롤링 기법을 활용한 학습 DB 구축:** 웹 크롤링 기법을 활용하여 인터넷 검색엔진으로부터 다량의 학습용 이미지 데이터베이스를 자동 구축함. 이를 위해 앞서 개발한 검색 키워드 사전과 1차년도 연구성과(HTML 페이지 자동 선별 및 분석, Web Scraping Technology를 활용한 파싱, 이미지 데이터 자동 수집 기술)를 활용함. 그 결과, 인터넷 검색엔진에서 자동으로 수집된 공종별 이미지 데이터는 토공사 3,862장, 골조공사 3,726장, 마감공사 3,693장으로 총 11,281장임.
- (3) **건설현장 이미지 분류 모델 개발:** 구축된 학습 DB를 이용하여 CNN기반 건설현장 이미지 분류 모델을 개발함. 본 연구진은 이미지 분류를 위한 네트워크 중 가장 높은 성능을 보이는 InceptionV3를 활용하여 작업공종 분류 모델을 개발함. 해당 모델을 개발하기 위해서 Stochastic Gradient Descent 최적화 알고리즘을 이용하였으며 50,000회의 학습을 진행함. 모델 학습을 위한 Hyperparameter는 TensorFlow 패키지에서 제공하는 값들을 활용함. 구체적으로, batch size는 32, learning rate는 초깃값 0.01 및 최종값 0.0001을 활용함.

- 개발한 작업공종 분류 모델을 검증하기 위해서 연구진은 자동 구축된 DB를 활용하였으며 그 결과 예시와 성능은 표 12와 같음. 모델의 평균 정확도는 88.78%로 상당히 높은 수준의 성능을 보였으며, 공종별 정확도는 토공사 94.23%, 골조공사 88.97%, 마감공사 83.14%로 도출됨. 이는 본 연구에서 개발된 모델이 다양한 공종을 정확하게 분류할 수 있다는 것을 의미함. 다만, 골조공사와 마감공사 간의 혼동률(9%, 12%)이 다른 공종 간의 혼동률에 비해 비교적 높게 분석됨. 이는 골조공사와 마감공사의 경우 작업자, 크레인, 철근, 콘크리트 등 유사한 건설자원이 투입되어 그 시각적 특성이 비슷하기 때문인 것으로 판단됨.

표 12. 작업공종 분류 예시.

|                |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 작업공종<br>이미지 예시 |  |  |  |
| 결과 및 신뢰도       | 토공사 (94.23%)                                                                      | 골조공사 (88.97%)                                                                      | 마감공사 (83.14%)                                                                       |

## 2. 투입자원 현황 자동 인식 모델 개발

- 투입자원 현황 자동 인식 모델은 건설현장 내 투입자원의 유형과 위치를 자동으로 파악하는 영상분석기술로, 객체 탐지(Object Detection)와 객체 추적(Object Tracking) 단계로 구성됨. 단계별 구체적인 개발내용은 아래와 같음.
  - **객체 탐지(Object Detection):** Computer Vision 분야에서 널리 활용되는 기법으로, 이미지 데이터 내에 존재하는 모든 객체의 유형을 분류(Classification)하고 위치를 추정(Localization)하는 기법이며, 경계 상자(Bounding Box)를 활용하여 탐지한 객체들의 위치를 시각화함. 객체 탐지 모델을 개발하기 위해서 본 연구진은 1차년도 연구성과인 DB-free 영상분석기술(Web-Crawling 알고리즘, Cyber-Physical Simulation 알고리즘, Human-Computer Interactive Learning 알고리즘)을 통합하여 활용함(그림 40).

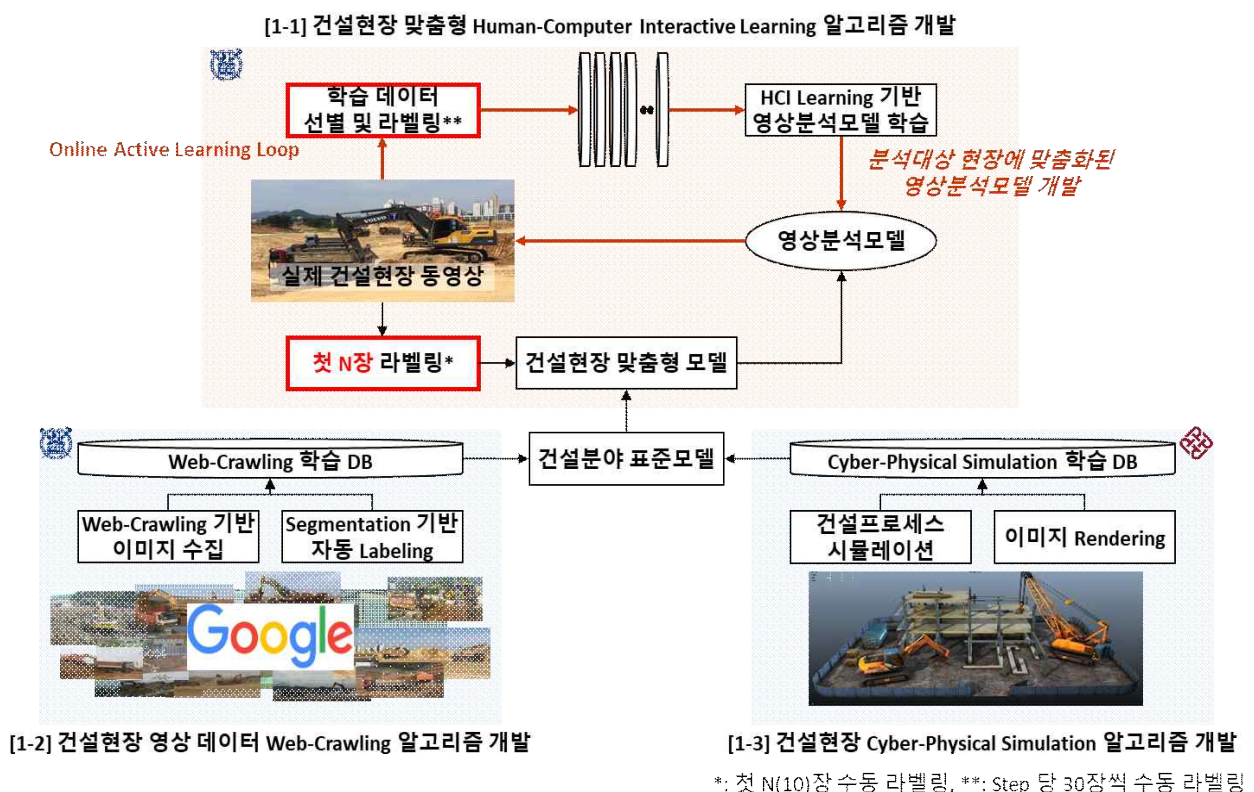


그림 40. 건설현장 DB-free 영상분석기술 개념도.

- 먼저 Web-Crawling 및 CPS 알고리즘을 활용하여 건설분야에 일반화된 학습 DB를 자동으로 구축함으로써 표준모델을 개발한 뒤, 표준모델을 HCI Learning을 통해 분석 대상 건설현장에 맞춤화하는 과정을 수행함. 특히, HCI Learning 알고리즘은 실제 건설현장 CCTV 동영상으로부터 영상분석모델이 예측하기 어려운 이미지를 자동으로 선별·학습함으로써, 표준모델을 해당 현장에 특화하고 모델의 성능을 지속적으로 향상할 수 있음(그림 41, 42). 예를 들어, Web-Crawling 및 CPS 이미지를 실제 건설현장 CCTV의 이미지 데이터와 합성하여 해당 현장에 특화된 학습 DB를 구축하고 영상분석모델을 개발함.

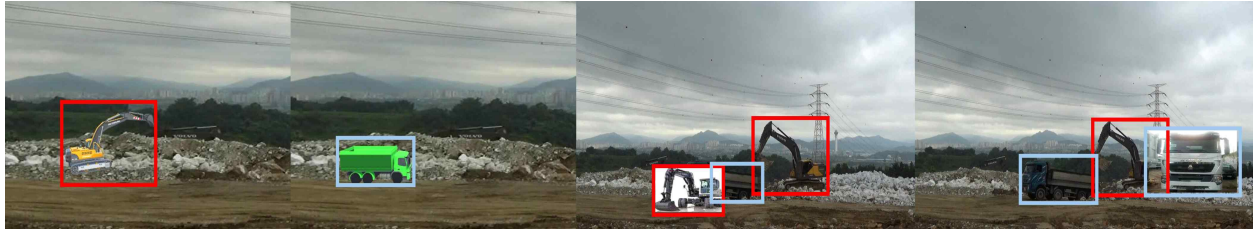


그림 41. HCI Learning기반 DB 구축 예시(1).



그림 42. HCI Learning기반 DB 구축 예시(2).

- **객체 추적(Object Tracking):** 영상 데이터 내에 나타난 모든 객체들의 시간에 따른 위치와 ID를 파악하고 경계 상자를 활용해 추적 결과를 시각화하는 과정임. 대표적인 객체 추적 알고리즘으로는 중심점기반 객체 추적(Centroid Tracking)과 Intersection over Union기반 객체 추적(IoU Tracking) 등이 있음. 그 중 IoU기반 객체 추적은 시간에 따라 이동·변화하는 경계 상자 간의 교집합 구역과 합집합 구역의 비율을 고려하여 객체를 추적하는 기법으로, 중심점기반 객체 추적과 달리 객체의 위치뿐만 아니라 객체의 크기 등 다양한 시공간적 정보를 종합적으로 고려함. 이에 따라 본 연구진은 IoU기반 객체 추적 알고리즘을 건설현장에 맞춤 개발함.
- 개발한 투입자원 현황 자동 인식 모델(객체 탐지-추적 통합 모델)을 검증하기 위해서 유사환경(토공사, 골조공사, 마감공사를 진행하는 소규모 현장)에서 이미지 데이터를 수집하고 성능 평가를 수행함. 구체적으로, 객체 탐지 모델의 경우 TensorFlow 기반의 Mask R-CNN과 Faster R-CNN 네트워크를 개발함. 그 결과, 굴삭기, 덤프트럭, 작업자, 패널 등 다양한 유형의 건설자원을 평균 74.6%의 정확도로 인식함. 그림 43-45는 투입자원의 유형, 위치, ID를 자동으로 파악한 결과 예시이며, 다양한 이미지에서 건설자원들을 성공적으로 인식하는 것을 볼 수 있음.



그림 43. 투입 장비 현황 자동 인식 모델의 성능 시험 결과(정확도 96.5%) 예시.

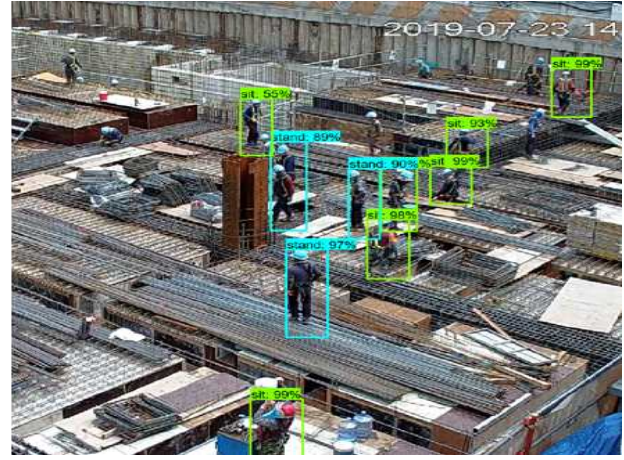


그림 44. 투입 작업자 현황 자동 인식 모델의 성능 시험 결과(정확도 94.7%) 예시.



그림 45. 투입 자재 현황 자동 인식 모델의 성능 시험 결과(정확도 32.5%) 예시.

- 건설자원의 유형별 인식 성능을 살펴보면, 장비(굴삭기/덤프트럭) 96.5%, 작업자 94.7%, 자재(패널) 32.5%로 자재에 대한 정확도가 낮은 것을 알 수 있음. 이를 개선하기 위해서 연구진은 패널이 사용되는 커튼월 공사의 특성을 고려한 후처리(Post-Processing) 알고리즘을 아래와 같이 개발함.
  - **후처리(Post-Processing):** 커튼월 설치공사를 수행하는 크레인 한 번에 하나의 패널만 양중하며, 이에 따라 현장에서 설치되는 패널의 개수는 투입된 크레인 장비의 대수보다 적거나 같음. 이러한 작업특성을 고려하면 잘못 인식된 결과(False Alarm, 이미 설치 완료된 패널 혹은 패널이 아닌 객체를 인식)를 제거할 수 있으며, 본 연구에서는 신뢰도 점수(Confidence Score)를 기준으로 후처리를 수행함(그림 46). 즉, 하나의 이미지 프레임에서 신뢰도 점수가 가장 높은 결과를 크레인이 양중하고 있는 패널로 결정함.



그림 46. 인식 신뢰도 기반 설치대상 패널 선정 예시.

- 더불어 크레인이 양중-설치하는 패널의 경우, 일정 시간 동안 건물의 비슷한 위치(높이 등)에 설치됨. 즉, 임의의 순서에 설치된 패널과 그 다음 순서에 설치된 패널의 위치가 거의 동일하므로, 각 패널의 시공간적 이동 경로가 유사하다는 특성이 있음. 이를 위해 연구진은 2차원 이미지상의 이동 경로를 자동으로 분석하는 Density-based Spatial Clustering of Applications with

Noise(DBSCAN) 알고리즘을 적용함. 그림 47과 같이 크레인이 양중-설치하는 패널과 False Alarm들을 구분하고 제거함으로써 객체 인식 모델의 성능을 개선함.

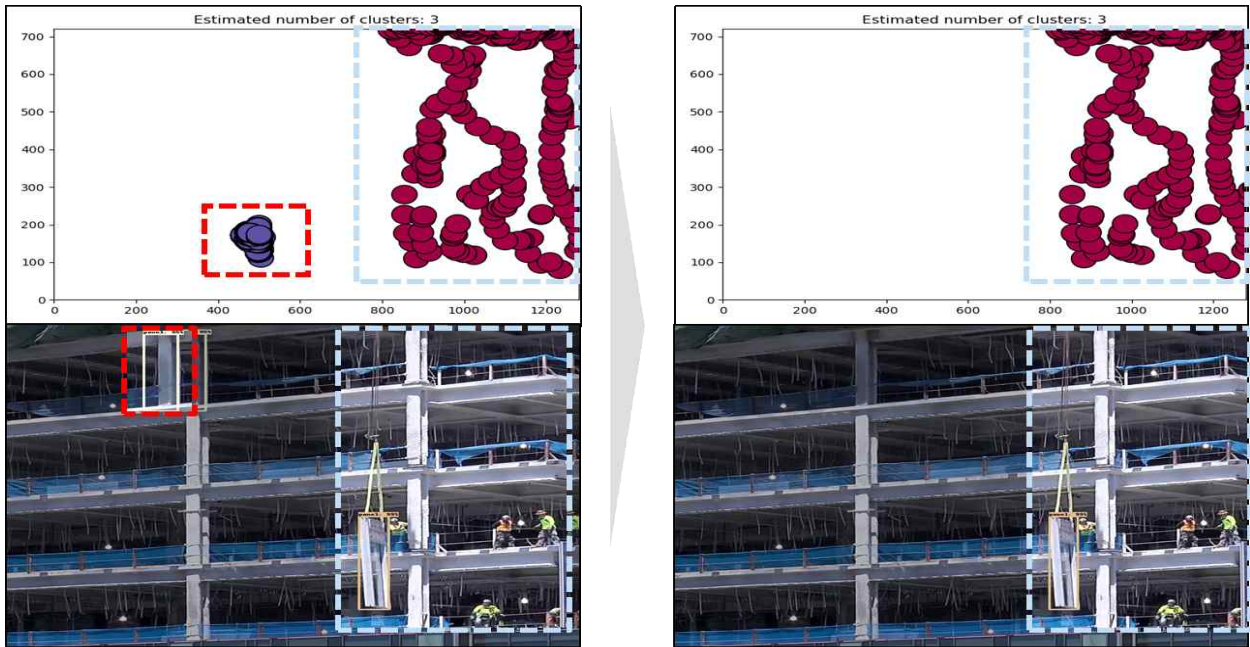


그림 47. DBSCAN 알고리즘 기반 False Alarm 제거 예시.

- 추가 개발한 후처리 알고리즘을 동일한 실험 데이터에 적용한 결과, 패널을 88.9%의 정확도로 인식하였으며 그림 48은 결과 예시임.



그림 48. 후처리 알고리즘을 적용한 객체 인식 모델의 성능 시험 결과(정확도 88.9%) 예시.

### 3. 작업상태 자동 인식 모델 개발

- 작업상태 자동 인식 모델을 개발하기 위해 우선 건설자원 유형별 표준분류체계를 구축하고, 이를 토대로 각 건설자원에 특화된 영상분석모델을 개발함. 표준분류체계의 경우 국토교통부와 한국건설기술연구원에서 매년 발간하는 건설공사 표준품셈과 기존의 건설프로세스 생산성에 관한 연구결과(Halpin and Riggs 1992, Jung et al. 2018, Smith et al. 1995)를 참고하여 개발함. 표준분류체계는 생산상태, 작업유형, 개별적인 행동, 건설자원 간 상호작용으로 구성되며, 이를 분석할 수 있는 작업상태 자동 인식 모델을 건설장비, 작업자, 자재와 같은 건설자원 유형별로 개발함. 자세한 내용은 다음과 같음.
- (1) **건설장비의 표준분류체계 및 작업상태 자동 인식 모델 개발:** 본 연구진은 대표적인 건설장비인 덤프트럭, 굴삭기에 대해 표준분류체계와 작업상태 자동 인식 모델을 아래와 같이 개발함. 이 모델은 토공사의 생산성을 파악하는데 활용될 수 있음.
  - 표 13은 덤프트럭의 표준분류체계를 보여줌. 덤프트럭의 작업유형은 유휴(Idle), 주행(Travel), 상차(Load), 하차(Unload)로 구분되며, 특히 상차작업 시 반정지 상태의 굴삭기(정지상태에서 몸통만 회전)와 상호작용을 수행한다는 특징이 있음. 또한, 덤프트럭은 각 작업을 수행할 때 정지(Stop), 이동(Move), 반정지(Semi-stop)와 같은 개별적인 행동을 보이며, 여기서 반정지

행동은 하차작업을 위해 덤프트럭이 동일한 위치에서 적재함을 움직이는 상태를 의미함. 이 같은 작업유형과 개별적인 행동에 따라 덤프트럭을 비생산적, 반생산적, 생산적 상태로 분류할 수 있음.

표 13. 덤프트럭의 표준분류체계.

| 덤프트럭                      |            |                |      |                |
|---------------------------|------------|----------------|------|----------------|
| 생산상태                      | 작업유형       | 개별적인 행동        | 상호작용 |                |
|                           |            |                | 건설자원 | 상태             |
| 비생산적<br>(Non-productive)  | 유휴(Idle)   | 정지(Stop)       | -    |                |
| 반생산적<br>(Semi-productive) | 주행(Travel) | 이동(Move)       | -    |                |
| 생산적<br>(Productive)       | 상차(Load)   | 정지(Stop)       | 굴삭기  | 반정지(Semi-stop) |
|                           | 하차(Unload) | 반정지(Semi-stop) | -    |                |

- 표 14는 굴삭기에 대한 표준분류체계를 나타냄. 굴삭기의 작업유형은 유휴, 주행, 흙고르기(Soil-manage), 상차로 구분되며, 정지상태의 트럭과 상호작용을 통해 상차작업을 수행한다는 특징이 있음. 또한, 굴삭기의 개별적인 행동은 정지, 이동, 반정지가 있으며, 반정지는 굴삭기가 이동하지 않고 흙고르기 작업을 수행하여 암(Arm)만 움직이는 상태를 말함. 이 같은 작업유형과 개별적인 행동에 따라 굴삭기를 비생산적, 반생산적, 생산적 상태로 분류할 수 있음.

표 14. 굴삭기의 표준분류체계.

| 굴삭기                       |                   |                |      |          |
|---------------------------|-------------------|----------------|------|----------|
| 생산상태                      | 작업유형              | 개별적인 행동        | 상호작용 |          |
|                           |                   |                | 건설자원 | 상태       |
| 비생산적(Non-productive)      | 유휴(Idle)          | 정지(Stop)       | -    |          |
| 반생산적<br>(Semi-productive) | 주행(Travel)        | 이동(Move)       | -    |          |
|                           | 흙고르기(Soil-manage) | 반정지(Semi-stop) |      |          |
| 생산적(Productive)           | 상차(Load)          | 반정지(Semi-stop) | 덤프트럭 | 정지(Stop) |

- 구축된 표준분류체계들을 토대로 덤프트럭과 굴삭기의 생산상태, 작업유형, 개별적인 행동을 분석하는 모델을 개발하였으며, 해당 모델의 입력값은 앞서 개발한 투입자원 현황 자동 인식 모델의 결과(시간에 따른 건설자원의 유형, 위치)임. 먼저, 시간에 따른 객체 중심점의 변화를 분석하면 건설장비의 정지/반정지와 이동 행동을 분류할 수 있음. 그 다음, 건설장비에 대한 경계 상자(Bounding Box)의 가로·세로 비율(Aspect Ratio) 변화를 추가 분석하여 정지와 반정지 행동을 구분함. 예를 들어, 덤프트럭과 굴삭기가 반정지 행동(동일한 위치에서 굴삭기의 암 또는 덤프트럭의 적재함이 움직이는 경우)을 보이면 경계 상자의 가로·세로 비율이 변화함. 마지막으로, 건설장비 간의 상호작용 유무를 분석하고자 경계 상자의 중심점 간의 거리와 각 경계 상자의 대각선의 합(Euclidean Distance)을 비교함. 이에 따라 건설장비의 개별적인 행동과 상호작용을 분석할 수 있으며, 이를 기반으로 생산상태와 작업유형을 파악함(그림 49, 50).

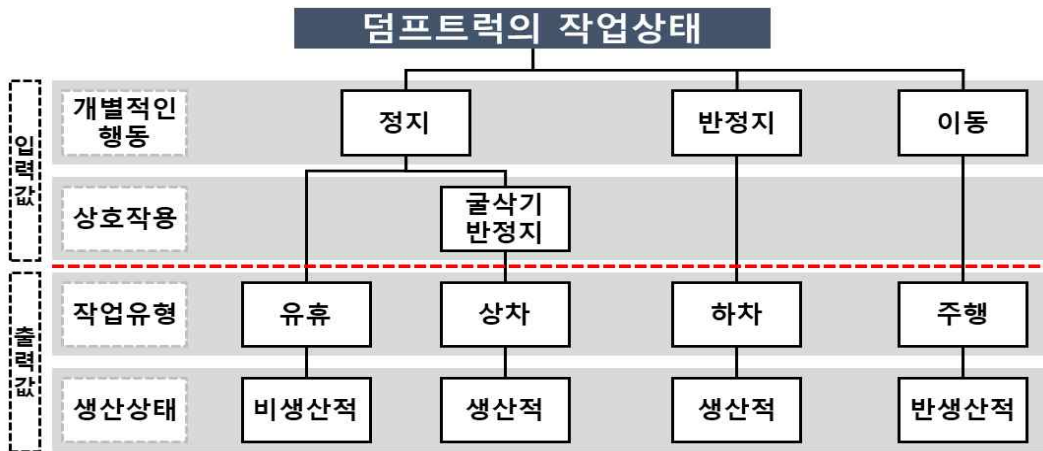


그림 49. 덤프트럭의 개별적인 행동 및 상호작용기반 생산상태, 작업유형 분석 방법.

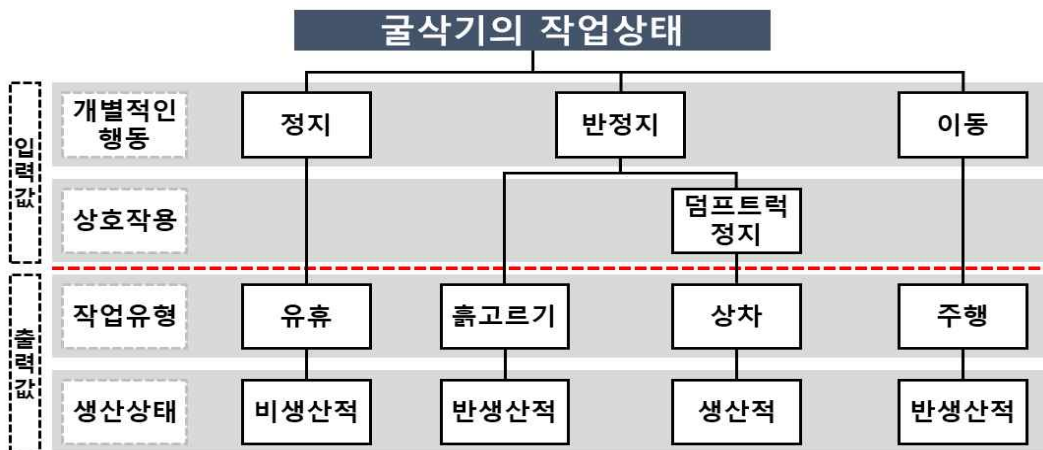


그림 50. 굴삭기의 개별적인 행동 및 상호작용기반 생산상태, 작업유형 분석 방법.

- 개발한 작업상태 자동 인식 모델을 검증하기 위해 유사환경(토공사를 진행하는 소규모 현장)에서 1시간 21분(14,605장)의 영상 데이터를 수집하고 성능 평가를 수행함. 그 결과, 덤프트럭과 굴삭기의 작업상태를 평균 84.1%(덤프트럭: 82.4%, 굴삭기: 85.8%)의 정확도로 인식하였으며, 그 예시는 그림 51과 같음.



그림 51. 장비 작업상태 자동 인식 모델 시험 결과(정확도 84.1%) 예시.

- (2) 작업자의 표준분류체계 및 작업상태 자동 인식 모델 개발: 작업자의 경우 건설공종에 따라 작업상태가 상이함. 연구진은 타 공종 대비 작업자가 많이 투입되는 골조공사의 거꾸집, 철근 설치공사를 기준으로 표 15와 같이 작업자의 표준분류체계를 구축하였고, 이를 기반으로 작업자의 작업상태 자동 인식 모델을 개발함. 이 모델은 골조공사의 생산성을 파악하는 기초자료로 활용됨.

표 15. 작업자의 표준분류체계.

| 작업자                   |                  |                |
|-----------------------|------------------|----------------|
| 생산상태                  | 작업유형             | 개별적인 행동        |
| 비생산적(Non-productive)  | 유휴(Idle)         | 정지(Stop)       |
| 반생산적(Semi-productive) | 이동(Travel)       | 이동(Move)       |
| 생산적(Productive)       | 설치(Installation) | 반정지(Semi-stop) |

- 골조공사 수행 시 작업자의 작업유형은 유휴, 이동(Travel), 설치(Installation)로 구분되며, 설치는 거푸집 및 철근 설치를 의미함. 이때 개별적인 행동은 정지, 이동(Move), 반정지이며 반정지는 작업자가 한 장소에서 이동하지 않고 설치작업을 수행하여 팔의 움직임만 있는 상태를 말함. 이러한 작업유형과 개별적인 행동에 따라 작업자는 비생산적, 반생산적, 생산적 상태를 가질 수 있음.
- 구축된 표준분류체계를 토대로 작업자의 생산상태, 작업유형, 개별적인 행동을 분석하는 모델을 개발함. 작업자의 경우, 카메라와의 거리에 따른 낮은 해상도 문제를 해결하기 위해서 Multi-Domain Convolutional Neural Networks 기반 객체 추적(MDNet, IoU기반 알고리즘의 일부) 알고리즘을 추가 적용하여 작업자의 주변환경까지 인식한 결과(Extended Bounding Box, 확장 경계 상자)를 샘플링함으로써 해당 모델의 입력값으로 활용함(그림 52).

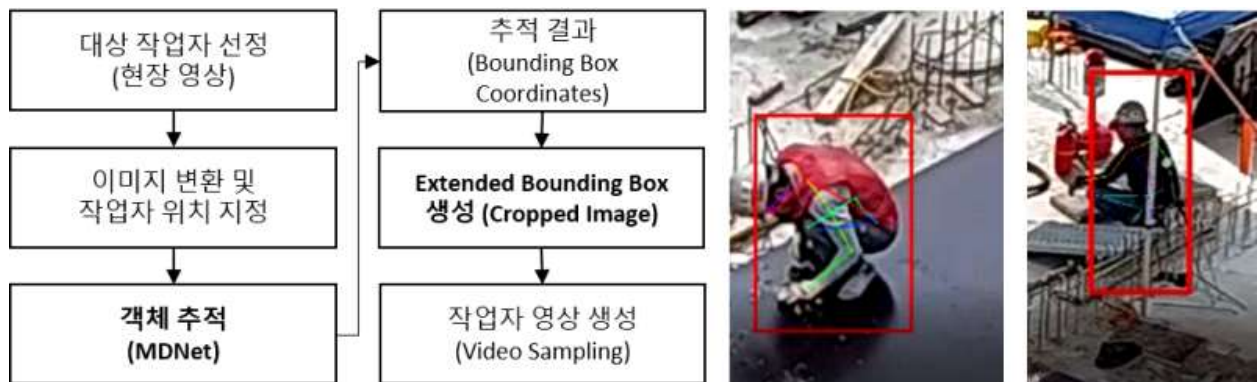


그림 52. MDNet 활용 작업자 샘플링 프로세스 및 결과 예시.

- 먼저, 시간에 따른 객체의 위치 변화를 분석하면 작업자의 정지/반정지와 이동(Move) 행동을 분류할 수 있음. 그 다음, 작업자의 생산상태를 구분하기 위해 연구진은 광학흐름(Optical Flow) 분석 알고리즘을 활용함. 광학흐름 알고리즘은 연속된 프레임 간 픽셀값과 위치의 변화를 분석하는 방법으로 영상 속 객체의 움직임을 감지하고 측정하는 데 쓰이며, 본 연구에서는 Lucas-Kanade 기법을 활용하여 작업자 영상의 광학흐름을 추출함. 단위 시간당 평균속력 값을 기준으로 작업자의 생산상태를 구분하였으며, 그 결과 예시는 그림 53과 같음.

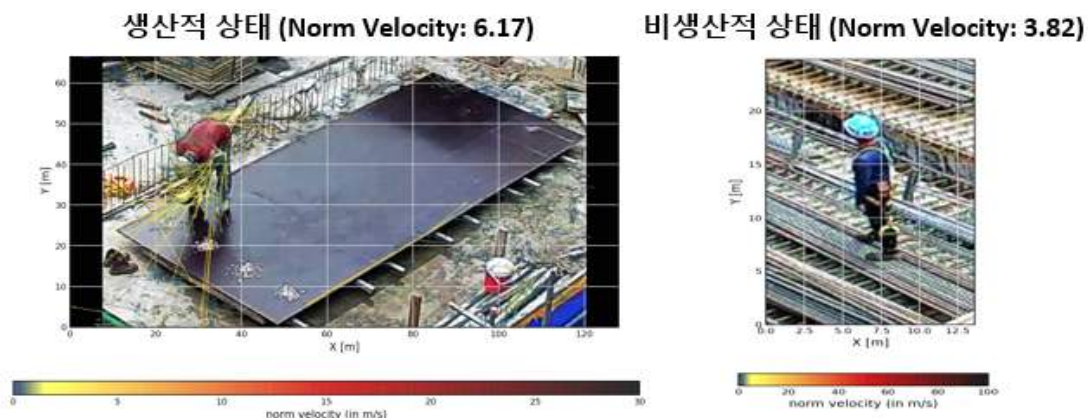


그림 53. 광학흐름 분석을 통한 작업자 생산상태 분석 예시.

- 이에 따라 작업자의 개별적인 행동(정지/반정지, 이동(Move))과 생산상태(생산적, 비생산적)를 분석할 수 있으며, 이를 기반으로 작업유형을 파악함(그림 54).

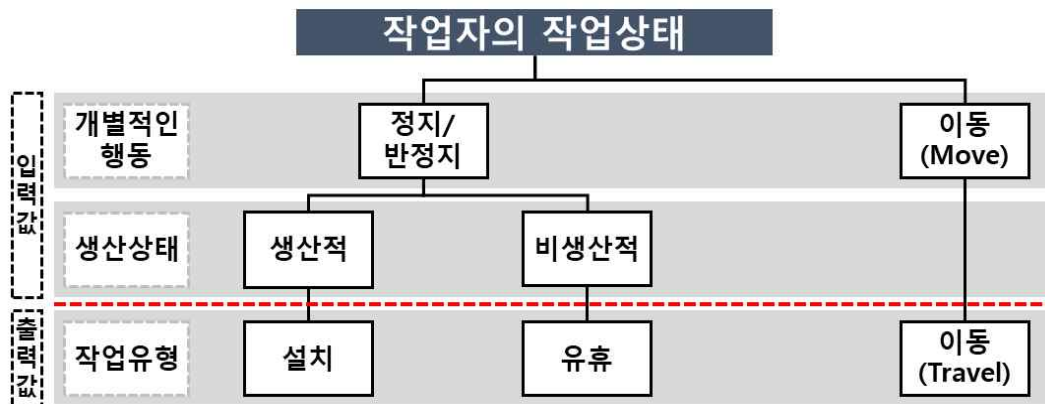


그림 54. 작업자의 개별적인 행동 및 생산상태기반 작업유형 분석 방법.

- 개발한 작업상태 자동 인식 모델을 검증하기 위해 유사환경(골조공사를 진행하는 소규모 현장)에서 1시간 40분(6,000장)의 영상 데이터를 수집하고 성능 평가를 수행함. 그 결과, 작업자의 작업상태를 평균 86.1%의 정확도로 인식함. 그림 55는 모델의 예측 결과 예시이며, 다양한 이미지에서 분석 대상 작업자의 작업상태를 성공적으로 인식함.

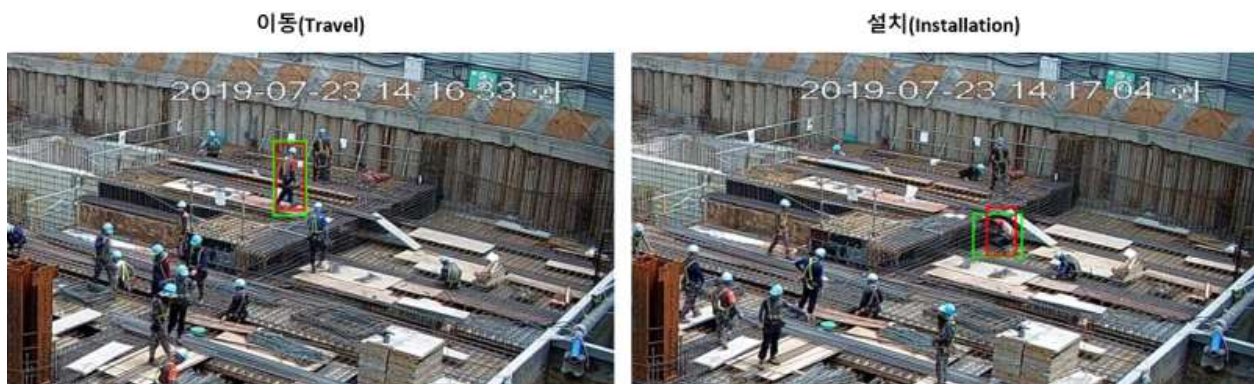


그림 55. 작업자 작업상태 자동 인식 모델 시험 결과(정확도 86.1%) 예시.

- (3) 자재의 표준분류체계 및 작업상태 자동 인식 모델 개발: 본 연구진은 대표적인 건설자재인 패널에 대해 표준분류체계와 작업상태 자동 인식 모델을 아래와 같이 개발함. 이 모델은 마감공사의 생산성을 파악하는 데 활용될 수 있음.
  - 표 16은 패널에 대한 표준분류체계를 보여줌. 패널의 작업유형은 결속(Bandage), 인양(Lift), 설치로 구분되며, 다른 유형의 건설자원과는 달리 반정지 행동이 없다는 특징이 있음. 이 같은 작업유형과 개별적인 행동에 따라 패널을 반생산적, 생산적 상태로 분류할 수 있음.

표 16. 패널의 표준분류체계.

| 패널                    |                  |                    |
|-----------------------|------------------|--------------------|
| 생산상태                  | 작업유형             | 개별적인 행동            |
| 반생산적(Semi-productive) | 결속(Bandage)      | 정지(Stop)           |
| 생산적(Productive)       | 인양(Lift)         | 이동(Move), 정지(Stop) |
|                       | 설치(Installation) | 정지(Stop)           |

- 구축된 표준분류체계를 토대로 패널의 생산상태, 작업유형, 개별적인 행동을 분석하는 모델을 개발하였으며, 해당 모델의 입력값은 앞서 개발한 투입자원 현황 자동 인식 모델의 결과(시간에 따른 건설자원의 위치)임. 먼저 시간에 따른 자재의 위치 변화를 분석하면 패널의 정지와 이동을 분류할 수 있음. 그 다음, 이동하는 패널의 경우 인양 작업유형으로 분류할 수 있으며, 정지한 패널의 작업유형(설치 또는 인양)을 추가 분석하기 위해서 이미지에 결속, 설치구역을 설정함.

구체적으로, 정지한 패널들의 위치를 통계분석하고 영상촬영각도에 따라 사분범위(Interquartile Range, IQR)를 설치(혹은 결속)구역으로 결정하였고, 해당 구역 내에 정지한 패널은 설치(혹은 결속), 구역 밖에 있는 패널은 인양으로 판단함. 이를 통해 패널의 개별적인 행동과 설치(혹은 결속) 구역 도달 여부를 분석하여 그림 56과 같이 작업유형과 생산상태를 파악함.



그림 56. 패널의 개별적인 행동 및 설치구역 도달 여부기반 생산상태, 작업유형 분석 방법.

- 개발한 자재의 작업상태 자동 인식 모델을 검증하기 위해 유사환경(마감공사를 진행하는 소규모 현장, 설치구역)에서 1시간 46분(9,540장)의 영상 데이터를 수집하고 성능 평가를 수행함. 그 결과, 자재의 작업상태를 평균 88.3%의 정확도로 인식함. 그림 57은 모델의 예측 결과 예시를 보여주며, 시간에 따른 패널의 작업상태를 성공적으로 인식하는 것을 볼 수 있음.



그림 57. 투입 자재 작업상태 자동 인식 모델 시험 결과(정확도 88.3%) 예시.

#### 4. 건설작업량 자동 분석 모델 개발

- 본 연구진은 장비, 작업자, 자재에 대한 건설자원 유형별 작업량 자동 분석 모델을 다음과 같이 개발함.
- (1) **건설장비의 작업량 자동 분석 모델:** 건설장비의 작업량은 작업 횟수로 산정할 수 있음. 예를 들어, 대표적인 건설장비인 덤프트럭과 굴삭기의 경우 덤프트럭의 용량과 상차작업 횟수의 곱으로 전체 토공량을 계산할 수 있음. 특히, 덤프트럭의 용량은 고정값(Fixed Variable)으로 가정할 수 있고, 상차작업의 횟수는 일정 시간 동안 굴삭기와 상호작용을 수행한 덤프트럭 대수(인식한 덤프트럭의 ID 수)와 동일함. 이러한 특성을 토대로 앞서 개발한 투입자원 현황 자동 인식 모델과 작업상태 자동 인식 모델의 결과를 활용하여 덤프트럭 대수에 기반하여 작업량을 분석하는 알고리즘을 개발함.
- 개발 모델의 성능을 검증하고자 유사환경(토공사를 진행하는 소규모 현장)에서 수집한 총 1시간 21분(14,605장)의 영상 데이터에 적용한 결과, 92.9%의 정확도로 상차작업을 수행한 덤프트럭 대수를 파악했으며(덤프트럭의 적재량은 25t으로 가정) 작업량 분석 결과는 표 17과 같음.

표 17. 덤프트럭, 굴삭기 건설작업량 자동 분석 결과.

| 분석방법    | 덤프트럭 수 | 덤프트럭이 투입된 시간 | 덤프트럭의 적재량 | 덤프트럭, 굴삭기 건설작업량 |
|---------|--------|--------------|-----------|-----------------|
| 전문가 분석값 | 13대    | -            | 25t       | 325t            |
| 모델 분석값  | 14대    | 3,682.7초     | 25t       | 350t            |

- (2) 건설 작업자의 작업량 자동 분석 모델: 본 연구에서 대상으로 하는 골조공사의 경우 그 작업량이 특정 구역의 작업완료 여부와 동일하다는 특성이 있음. 예를 들어, 아파트 공사에서 1층에 대한 콘크리트 작업이 완료되면, 작업량을 아파트 한 층에 대한 면적으로 산정할 수 있음. 이러한 특성을 고려하여 연구진은 앞서 개발한 작업자 수 자동 인식 모델과 작업완료 구역 자동 분류 모델의 결과를 활용하여 시간에 따른 작업자 및 작업완료 구역 수에 기반하여 작업량을 분석하는 알고리즘을 개발함(그림 58).

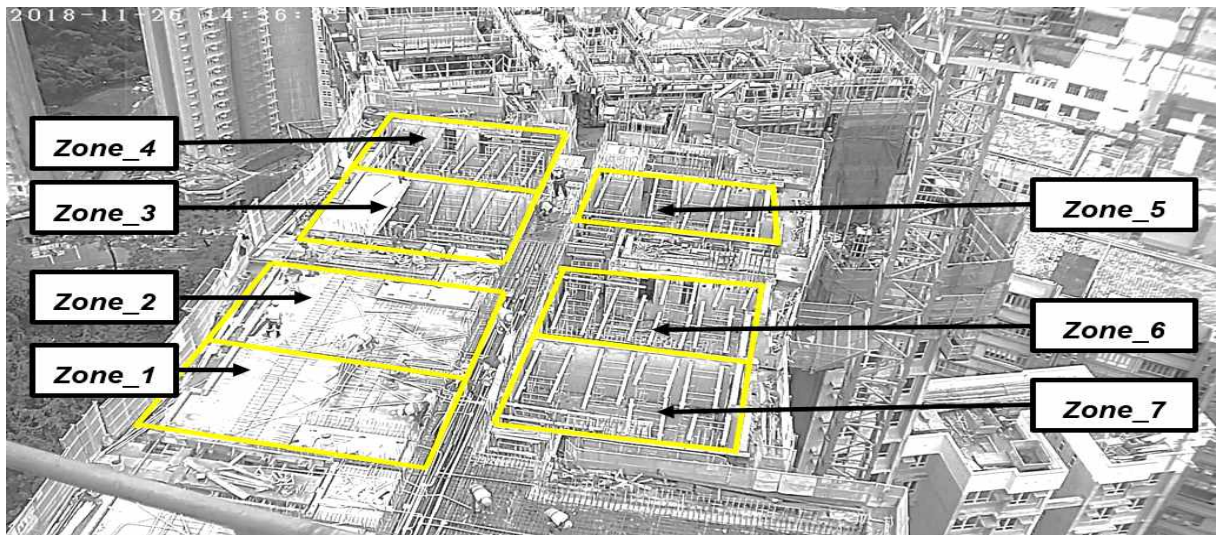


그림 58. 작업구역 구분 예시(홍콩 Fo Tan 현장).

- 개발 모델의 성능을 검증하고자 유사환경(골조공사를 진행하는 소규모 현장)에서 수집한 총 1시간 40분(6,000장)의 영상 데이터에 적용한 결과, 100%의 정확도로 작업 완료한 구역들을 파악했으며 작업량 분석 결과는 표 18과 같음.

표 18. 작업자 건설작업량 자동 분석 결과.

| 분석방법    | 작업완료 구역 수 | 작업자가 투입된 시간 | 투입된 작업자 수 | 작업자 건설작업량(작업구역) |
|---------|-----------|-------------|-----------|-----------------|
| 전문가 분석값 | 7         | -           | 14        | 7               |
| 모델 분석값  | 7         | 6,598초      | 14        | 7               |

- (3) 건설자재의 작업량 자동 분석 모델: 건설자재의 작업량은 설치 완료된 자재의 면적 또는 부피의 곱으로 산정할 수 있음. 패널의 경우 설치면적으로 작업량을 산정할 수 있으며, 이는 패널의 단위 면적과 설치된 개수를 곱하여 계산할 수 있음. 이에 따라 앞서 개발한 투입자원 현황 자동 인식 모델과 작업상태 자동 인식 모델의 결과 중 패널의 ID를 활용하여 설치한 패널의 수량을 자동 분석하는 알고리즘을 개발함.
- 개발 모델의 성능을 검증하고자 유사환경(골조공사를 진행하는 소규모 현장)에서 수집한 총 1시간 46분(9,540장)의 영상 데이터에 적용한 결과, 85.7%의 정확도로 설치가 완료된 패널의 수량을 파악했으며 작업량 분석 결과는 표 19와 같음.

표 19. 패널 건설작업량 자동 분석 결과.

| 분석방법    | 설치 패널의 수 | 패널 설치에 소요된 시간 | 패널 건설작업량 |
|---------|----------|---------------|----------|
| 전문가 분석값 | 6        | -             | 6        |
| 모델 분석값  | 7        | 2,157.3초      | 7        |

## ○ [2-2] 전주기 건설프로세스 통합관리 플랫폼 설계 및 구축

DB-free 영상분석 기반 전주기 건설프로세스 통합관리 플랫폼이 수집하는 데이터의 종류는 크게 비정형, 정형 데이터 두 가지로 구성됨. 이에 대한 세부 내용은 아래와 같음.

- **비정형 데이터:** 비정형 데이터란 텍스트, 오디오, 영상과 같이 관계형 데이터모델 형태로 정리할 수 없어 데이터 자체만으로는 내용에 대한 질의 처리를 할 수 없는 데이터를 말함. 비정형 데이터를 이용하기 위해서는 데이터의 특징을 추출하여 반정형 또는 정형 데이터로 변환하는 전처리 과정이 필요하며, 이는 이용 목적과 입력 데이터의 종류에 따라 다양함.
- **정형 데이터:** 정해진 형식과 구조에 따라 구성되어 저장된 데이터를 말함. 대표적인 예로 관계형 데이터베이스(Relational Database)의 테이블, 엑셀의 스프레드시트, Comma Separated Value(CSV) 데이터 등이 있으며, 데이터에 대한 검색 및 선택, 갱신 등의 연산과 접근이 자유로움.

### 1. 비정형 데이터 수집 및 저장 알고리즘 개발

- 본 연구에서 활용한 대부분의 비정형 데이터의 경우 실험용 이미지 DB를 인터넷을 통해 자동으로 수집함. 이를 위해 File-Transfer Protocol(FTP) 또는 HyperText-Transfer Protocol(HTTP)을 통해 인터넷상에서 비정형 데이터를 수집함. 또한, 검색 및 수집단계를 자동화하고자 Python의 Pytube, Request 패키지 또는 VideoProc 등의 소프트웨어를 활용해서 비정형 데이터를 분석 가능한 형태로 변환-저장함. 수집된 영상 데이터를 Python에서 제공하는 OpenCV 패키지를 통해서 프레임별 이미지 데이터 형태로 변환하여 사용하였으며 비정형 데이터 저장에 용이한 NoSQL 등의 사용언어를 정의하고 MongoDB, JSON, XML과 같이 시시각각 분석, 수집되는 현장 정보를 실시간으로 업데이트할 수 있는 동적 스키마(Schema)형 포맷의 알고리즘을 개발함.

### 2. 정형 데이터 수집 및 저장 알고리즘 개발

- 각 객체 경계 상자의 x축과 y축의 픽셀(Pixel)값, 이미지 정보(크기(Size), 프레임(Frame)), 추적 ID, 작업상태(비생산적, 반생산적, 생산적 상태), 작업유형별 소요시간 등 앞서 생성된 모든 문자 및 숫자 속성정보를 하나의 메타데이터로 구조화하여 수집함. 또한, 이를 분석하고 비정형 데이터와 연계를 할 수 있도록 그림 59와 같이 CSV 형태로 저장함. 해당 과정에서 Python에서 제공하는 Pandas, Numpy 등의 정형 데이터 구조화에 용이한 패키지를 활용하여 알고리즘 개발에 활용함.

| ImageID        | LabelNam | XMin     | XMax     | YMin     | YMax     |
|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| frame_0000.jpg | panel    | 0.641667 | 0.683854 | 0.034259 | 0.213889 |
| frame_0001.jpg | panel    | 0.646354 | 0.689583 | 0.037037 | 0.239815 |
| frame_0002.jpg | panel    | 0.645833 | 0.690625 | 0.034259 | 0.269444 |
| frame_0003.jpg | panel    | 0.641667 | 0.684896 | 0.055556 | 0.299074 |
| frame_0004.jpg | panel    | 0.636979 | 0.678125 | 0.076852 | 0.327778 |
| frame_0005.jpg | panel    | 0.633333 | 0.667188 | 0.100926 | 0.349074 |
| frame_0006.jpg | panel    | 0.629167 | 0.655729 | 0.124074 | 0.368519 |
| frame_0007.jpg | panel    | 0.626042 | 0.650521 | 0.14537  | 0.393519 |
| frame_0008.jpg | panel    | 0.624479 | 0.646875 | 0.173148 | 0.424074 |
| frame_0009.jpg | panel    | 0.618229 | 0.649479 | 0.192593 | 0.44537  |
| frame_0010.jpg | panel    | 0.615104 | 0.649479 | 0.222222 | 0.473148 |

**GroundTruth**

| ImageID        | LabelNam | Conf | XMin     | XMax     | YMin     | YMax     |
|----------------|----------|------|----------|----------|----------|----------|
| frame_0000.jpg | panel    | 0    | 0.642708 | 0.685938 | 0.031481 | 0.212963 |
| frame_0001.jpg | panel    | 0    | 0.646875 | 0.692188 | 0.027778 | 0.242593 |
| frame_0002.jpg | panel    | 0    | 0.646354 | 0.691667 | 0.030556 | 0.278704 |
| frame_0003.jpg | panel    | 0    | 0.644792 | 0.685417 | 0.060185 | 0.300926 |
| frame_0004.jpg | panel    | 0    | 0.638021 | 0.678125 | 0.076852 | 0.325    |
| frame_0005.jpg | panel    | 0    | 0.630729 | 0.667188 | 0.094444 | 0.352778 |
| frame_0006.jpg | panel    | 0    | 0.629688 | 0.654167 | 0.132407 | 0.378704 |
| frame_0007.jpg | panel    | 0    | 0.627604 | 0.644271 | 0.15     | 0.407407 |
| frame_0008.jpg | panel    | 0    | 0.622917 | 0.644792 | 0.172222 | 0.419444 |
| frame_0009.jpg | panel    | 0    | 0.61875  | 0.645833 | 0.192593 | 0.437037 |
| frame_0010.jpg | panel    | 0    | 0.613542 | 0.647917 | 0.219444 | 0.44537  |

**Tracking Result**

그림 59. 정형 데이터 저장의 예시.

### 3. 정형, 비정형 데이터 연계 및 관리 알고리즘 개발

- 현장 상황정보를 자동으로 추출하고 생산성을 자동으로 분석하기 위해서는 앞서 설명한 정형 및 비정형 데이터를 상호호환이 가능하도록 연계하고 통합관리하는 것이 중요함. 이를 위해서 비정형 영상 데이터(영상, 이미지)와 정형 데이터(CSV 데이터 형태로 저장된 모든 문자 및 숫자열)를 연계하고 관리하는 대표적인 영상분석 방법인 PASCAL VOC, ImageNet, ActivityNet, TensorRecord, TensorBoard 등을 검토하고 선별하여 데이터 간의 관계를 구조화함(그림 60).



그림 60. 정형, 비정형 데이터 연계 및 관리 예시.

#### 4. 사용자 인터페이스 개발

- 플랫폼이 생산하는 모든 생산성 관련 지식정보를 사용자(현장관리자, 발주자, 감리자 등)가 확인하고, 검색 및 질의응답을 할 수 있도록 사용자 인터페이스를 개발하였으며, 구체적으로 그림 61과 같이 사용자 인터페이스 구성도를 작성함.
- 사용자 인터페이스를 활용하여 업로드된 영상 데이터와 개발한 현장 상황정보 자동 분석 알고리즘이 연계되는 방법은 다음과 같음. 먼저, 동영상 업로드 여부를 사용자 인터페이스와 연동된 루프(Loop) 알고리즘이 자동으로 감지하여 사용자가 업로드한 영상 데이터를 서버로부터 수신함. 이후, 업로드된 영상 데이터를 분석하고 그 결과를 DB에 축적함. 보다 구체적으로, 기존 DB-free 영상분석기술(Web-Crawling 및 CPS 알고리즘)로 학습된 건설분야 표준모델을 HCI Learning을 활용해 분석 대상 영상 데이터에 적용하여 해당 현장에 특화된 모델로 맞춤화하고 투입자원, 작업상태, 작업량 등 생산성 분석에 필요한 정보를 추출함. 마지막으로, 이를 생산성 자동 분석 알고리즘에 적용하여 생산성 주요 지표 및 생산성 저해요인을 도출하며, 최초 요청된 서버 프로토콜에 따라 사용자 인터페이스에 다시 업로드하여 사용자에게 생산성 자동 분석 결과를 시각화하여 제공함.

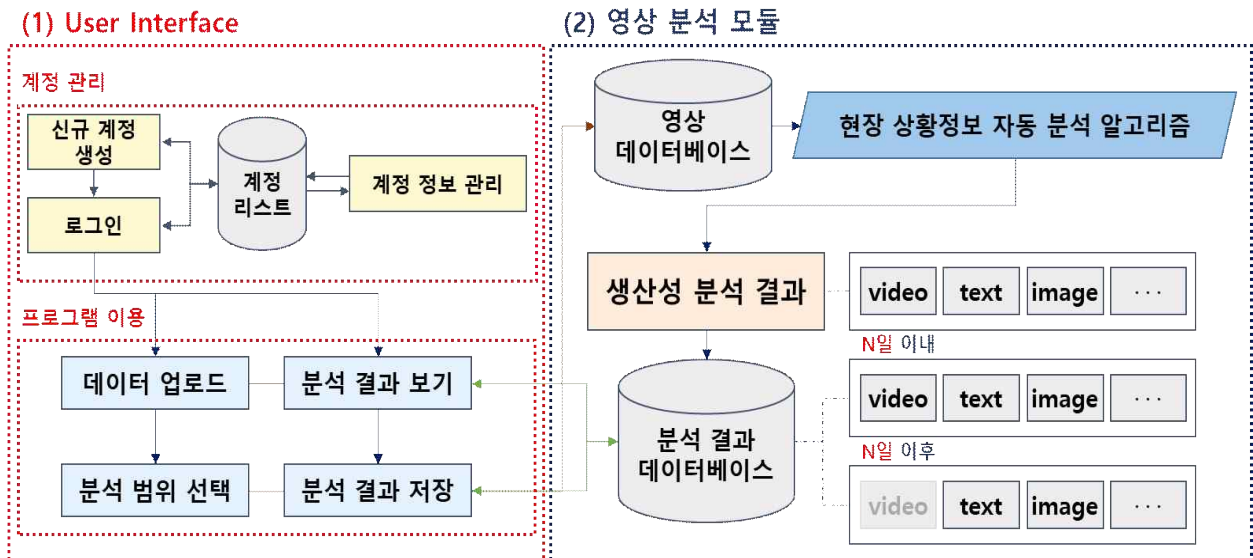


그림 61. 사용자 인터페이스 구성도.

- 특히, 긴밀한 공동연구개발을 위해 프로젝트관리 서비스인 깃허브(GitHub)와 트렐로(Trello)를 이용하여 서울대학교, HK PolyU 연구진 간 컴퓨터 프로그램 소스를 공유하며 협업함(그림 62).

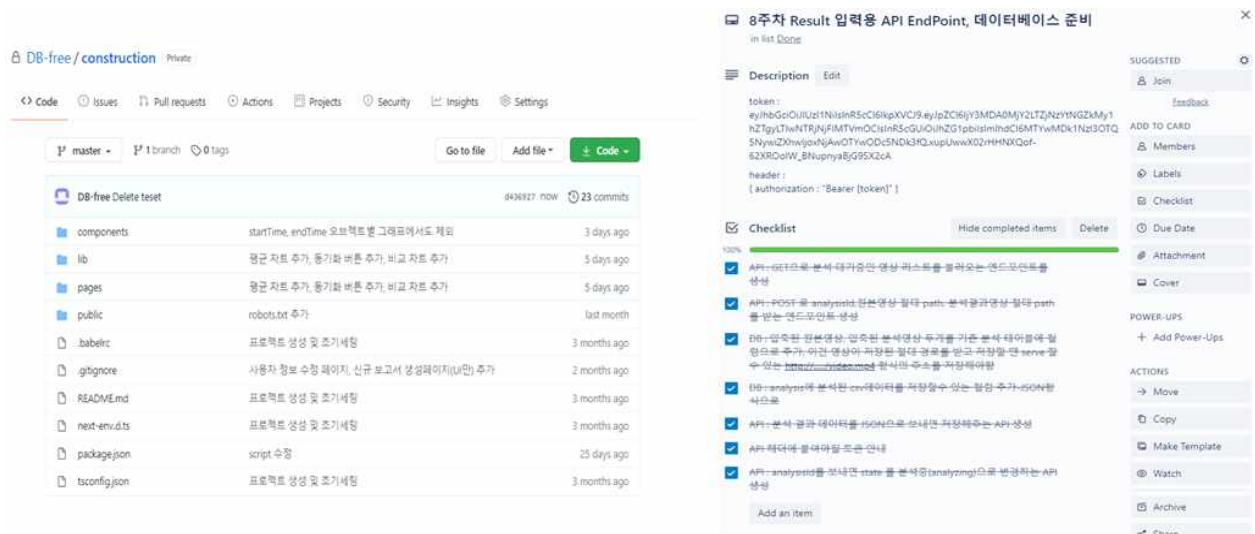


그림 62. 협업 개발을 위한 깃허브(GitHub)와 트렐로(Trello) 이용 예시.

- 개발한 사용자 인터페이스는 크게 프론트엔드(Frontend)와 백엔드(Backend)로 구성됨. 프론트엔드는 웹 페이지의 레이아웃, 텍스트, 그림 등 사용자에게 직접적으로 노출되는 부분이고, 백엔드는 데이터베이스를 저장하고 데이터를 수정하는 등 웹 페이지의 서버에서 일어나는 프로세스를 말함. 프론트엔드를 개발하기 위해 언어는 TypeScript, 프레임워크는 Next.js와 React.js, 스타일 라이브러리는 ant.design을 사용했으며, 그 예시는 그림 63과 같음. 백엔드를 개발 시 언어는 TypeScript, 프레임워크는 Express.js를 사용했으며, Object-relational Mapping(ORM)은 TypeORM, DB는 PostSQL, 인증방식은 JsonWebToken, API방식은 Representational State Transfer(Rest)을 활용함(그림 64).



그림 63. 프론트엔드(Frontend) 구성 예시.

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <pre> 1 import "reflect-metadata"; 2 import express from "express"; 3 import { createConnection } from "typeorm"; 4 import cors from "cors"; 5 import path from "path"; 6 import users from "./routers/users"; 7 import auth from "./routers/auth"; 8 import admin from "./routers/admin"; 9 import upload from "./routers/upload"; 10 import analysis from "./routers/analysis"; 11 import { logger } from "./middlewares/logger"; 12 13 createConnection() 14   .then(async () =&gt; { 15     const app = express(); 16     app.use(cors()); 17     app.use(logger); 18 19     app.use("/public", express.static(path.join(__dirname, "public"))); 20     app.use("/users", users); 21     app.use("/auth", auth); 22     app.use("/admin", admin); 23     app.use("/upload", upload); 24     app.use("/analysis", analysis); 25 </pre> | <pre> 1 import { Entity, Column, OneToOne } from "typeorm"; 2 import { Analysis } from "../Analysis"; 3 import { Common } from "../Common"; 4 5 @Entity() 6 export class Video extends Common { 7   publicFields() { 8     return { 9       id: this.id, 10      createdAt: this.createdAt, 11      updatedAt: this.updatedAt, 12      alive: this.alive, 13      uniqueFileName: this.uniqueFileName, 14      originalname: this.originalname, 15      mimetype: this.mimetype, 16      filename: this.filename, 17      size: this.size, 18      thumbnailUrl: this.thumbnailUrl, 19      videoUrl: this.videoUrl, 20      duration: this.duration, 21    }; 22  } 23 24  // 확장자 없는 비디오 하나를 가리키는 고유 이름 25  // ex. 59fae92e3c7ce514e517567ecce09bb1 </pre> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

그림 64. 백엔드(Backend) 구성 예시.

- 전처리 과정을 통해 정형 데이터로 변환된 비정형 데이터는 관계형 데이터베이스 관리 시스템(Relational DataBase Management System, RDBMS)을 통해 관리함. 수집된 정형 데이터는 회원(User), 영상 메타데이터(Video), 분석요청서(Analysis), 분석 결과(Analysis Result)로 구성됨. 각 구성 요소에 저장되는 데이터에 대한 세부 설명은 표 20과 같음.

표 20. 데이터 관리를 위한 구성 요소 분류 및 저장 데이터.

| 구성 요소                  | 저장 데이터                                                                              |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 회원(User)               | 성명, 메일 주소, 전화번호 등 회원가입 정보                                                           |
| 영상 메타데이터(Video)        | 용량, 영상 길이, 접근 path 등                                                                |
| 분석요청서(Analysis)        | 영상 메타정보(Video)와 사용자가 지정한 영상의 제목, 설명, 분석 대상 시점과 시간, 공종과 자원, 분석 결과(Analysis Result) 등 |
| 분석 결과(Analysis Result) | 영상 속 객체의 생산성 정보, 공종과 자원, 객체의 id 값 등                                                 |

- 사용자 인터페이스(<http://sitevision.snu.ac.kr>) 홈 화면:** 그림 65는 사용자가 전주기 건설프로세스 통합관리 플랫폼을 사용하고자 해당 웹사이트 로그인시 나타나는 화면임. 특히, 개발한 웹사이트의 범용성을 넓히고자 데스크톱뿐만 아니라 휴대폰, 태블릿 PC 등의 모바일 기기에서도 사용할 수 있는 사용자 친화형 건설프로세스 통합관리 플랫폼을 개발함.

## 프로그램 소개



## 분석 히스토리 - 총 10건

더보기

|  |                                                                                                                                                  |
|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p><b>커튼월 설치 예시(1)</b><br/>         설명 : 커튼월 설치 예시(1)<br/>         길이 : 54.1초<br/>         날짜 : 2020년 10월 17일</p> <p>완료</p> <p>보기 삭제 결과</p>      |
|  | <p><b>20201007 토공사</b><br/>         설명 : 20201007 토공사<br/>         길이 : 4868.3635초<br/>         날짜 : 2020년 10월 07일</p> <p>완료</p> <p>보기 삭제 결과</p> |

그림 65. 사용자 인터페이스(<http://sitevision.snu.ac.kr>) 홈 화면.

- **동영상 업로드 및 분석 요소 설정 화면(그림 66):** 그림 66과 같이 사용자가 분석하려는 동영상을 업로드하고 분석 영상에 대한 제목 및 내용을 설정할 수 있음. 동영상이 업로드되면, 파일명, 파일 크기 등 영상에 대한 메타데이터가 자동으로 출력되며 사용자는 원하는 분석 대상 시간(시작시간 및 종료시간)을 설정함. 이후, 분석 의뢰하고자 하는 생산성 정보에 대한 공종(토공사, 골조공사, 마감공사)과 분석 대상(건설장비, 작업자, 자재 등)을 선택함.

|                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Click Or Drag<br/>동영상파일을 업로드하십시오.</p> <p>제목</p> <p>내용</p> | <p>파일명<br/>200901_final1.mp4    다시 선택</p> <p>파일 크기<br/>25.965 MB</p> <p>파일 형식<br/>video/mp4</p> <p>영상 길이<br/>108 초</p> <p>시작 시간(초)<br/>0    <input type="text"/>    <input type="button" value="현위치"/></p> <p>종료 시간(초)<br/>108.00    <input type="text"/>    <input type="button" value="현위치"/></p> | <p>공종 선택</p> <p><input type="button" value="토공사"/> <input type="button" value="골조공사"/> <input type="button" value="마감공사"/></p> <p>분석대상 선택</p> <p><input type="button" value="공작기"/> <input type="button" value="임프트릭"/></p> <p>공종 선택</p> <p><input type="button" value="토공사"/> <input type="button" value="골조공사"/> <input type="button" value="마감공사"/></p> <p>분석대상 선택</p> <p><input type="button" value="근로자"/> <input type="button" value="자재"/></p> <p>공종 선택</p> <p><input type="button" value="토공사"/> <input type="button" value="골조공사"/> <input type="button" value="마감공사"/></p> <p>분석대상 선택</p> <p><input type="button" value="크레인"/> <input type="button" value="패널"/></p> |
|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

그림 66. 영상 업로드 및 분석 요소 설정 화면.

- 동영상 분석 진행상태 확인 화면(그림 67): 사용자는 분석 요청한 영상에 대하여 업로드한 동영상 원본, 분석 요청 정보(접수일시, 제목, 공종 등)와 진행상태(분석중, 완료)를 확인할 수 있음.

[Asan\_180628\_Zone1\_Loading] 분석 정보



### 영상 정보



원본 이름  
MAH00017.MP4

파일 타입  
video/mp4

파일 크기  
1.727 GB

재생 시간  
4868.3635 초

### 분석 요청 정보

접수일시  
2020년 10월 06일

제목  
Asan\_180628\_Zone1\_Loading

상태  
🔄 분석중

공종  
토공사

자원  
덤프트럭

분석시간  
0 ~ 4868.3635초

설명  
Asan\_180628\_Zone1\_Loading python coding test

닫기

그림 67. 영상분석 진행상태 확인 화면.

- 동영상 분석 결과 확인 화면: 관리자에 의해 분석이 완료되면 사용자는 분석 요청한 동영상 원본과 분석 결과 영상을 동시에 확인할 수 있음(그림 68). 또한, 초기에 설정한 공종별 분석 대상(굴삭기, 덤프트럭, 작업자 등)의 작업시간, 유희시간 등을 포함하는 생산성 분석 결과를 막대그래프(Barchart)를 통해 비교할 수 있으며(그림 69), 원그래프(Piechart)를 통해 건설자원별 생산성 분석 결과를 확인할 수 있음(그림 70).

## 결과 영상

원본 영상



분석 영상



그림 68. 원본 영상과 분석 결과 영상 동시 확인 예시.

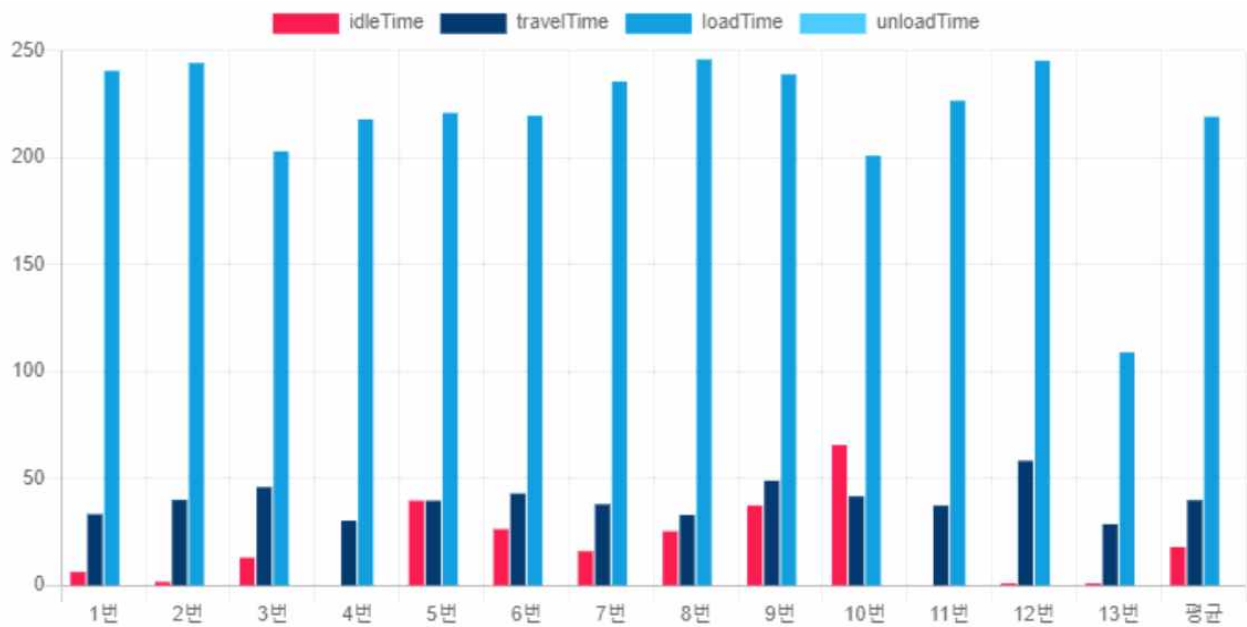


그림 69. 분석 대상 전체에 대한 생산성 분석 결과 제공 예시.



그림 70. 객체별 생산성 분석 결과 제공 예시.

## ○ [2-3] 건설프로세스 생산성 자동 분석 알고리즘 개발

[2-1] 현장 상황정보 자동 분석 알고리즘에서 설명한 건설작업량 자동 분석 모델은 전체 공사에 대한 작업량을 트럭 수(토공사), 완료구역 수(골조공사), 설치패널 수(마감공사)에 근거하여 측정함. 이 작업에 투입된 장비, 작업자, 자재 등 자원의 수와 그들의 움직임(투입자원 현황 자동 인식 모델 결과), 작업상태 정보(작업상태 자동 인식 모델의 결과)를 활용하면 투입시간, 작업별 소요시간 등 생산성 세부지표와 관련된 다양한 분석을 수행할 수 있고, 이로부터 생산성 저해요인을 확인할 수 있음.

### 1. 건설프로세스 생산성 주요 지표 도출

- 건설프로세스 생산성의 주요 지표를 도출하기 위해 건설공사 표준품셈 등 관련 문헌, 건설기계 시공능력 산정식과 같은 관련 경험식, 논문 등 다수의 자료를 수집 및 분석함(그림 71, 수식 1). 그 결과, 건설자원 유형에 따른 생산성, 생산성 측정방법, 세부작업단위 분석 대상 등을 정의할 수 있었으며 자세한 내용은 표 21과 같음.



$$Q(\text{덤프트럭}) = \frac{3600 \times q \times f \times E}{C_m}, q = \frac{T}{\gamma_t} \times L$$

$$Q(\text{굴삭기}) = \frac{3600 \times q \times K \times f \times E}{C_m}$$

$q$ : 적재량 or 버킷용량,  $f$ : 토량환산계수,

$K$ : 버킷계수,  $E$ : 작업효율,  $C_m$ : 사이클시간

수식 1. 건설기계 시공능력 산정식 예시.

그림 71. 수집 및 분석한 관련문헌, 논문 예시.

표 21. 건설자원유형별 생산성 정의, 측정방법, 세부작업단위 분석 대상.

| 건설자원유형 | 생산성 정의                                             | 생산성 측정방법                                   | 세부작업단위 분석 대상                          |
|--------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------|
| 장비     | 작업구역(zone)별<br>건설작업을 완료하는데<br>투입되는 장비가<br>소요하는 시간  | 작업구역별 작업 완료시점<br>측정 및 장비 작업상태별<br>소요시간 측정  | 작업구역별 투입되는<br>장비 수 및 시간               |
|        |                                                    |                                            | 개별 장비의 작업상태별<br>소요시간의 비율              |
| 작업자    | 작업구역(zone)별<br>건설작업을 완료하는데<br>투입되는 작업자가<br>소요하는 시간 | 작업구역별 작업 완료시점<br>측정 및 작업자 작업상태별<br>소요시간 측정 | 작업구역별 투입되는<br>인원 수 및 시간<br>(Man-hour) |
|        |                                                    |                                            | 개별 작업자의 작업상태별<br>소요시간의 비율             |
| 자재     | 작업구역(zone)별<br>건설작업을 완료하는데<br>투입되는 자재가<br>소요하는 시간  | 자재 설치 사이클 측정 및<br>자재의 작업상태별<br>소요시간 측정     | 작업구역별 투입되는<br>자재 수 및 시간               |
|        |                                                    |                                            | 개별 자재의 작업상태별<br>소요시간의 비율              |

### 2. 건설프로세스 생산성 자동 분석 알고리즘 개발

- 건설프로세스의 생산성 주요 지표를 활용하여 건설자원의 유형별 생산성 자동 분석 알고리즘을 맞춤 개발함. 해당 알고리즘은 (a) 건설프로세스의 생산성 지표 자동 계산, (b) 생산성 주요 지표의 통계적 분석 및 이상치(Outlier) 자동 탐지, (c) 생산성 저해요인 도출로 구성됨. 이에 대한 자세한 내용은 아래와 같음.

- 
- (a) **건설프로세스의 생산성 지표 자동 계산:** 건설프로세스 생산성 주요 지표인 건설자원의 총 투입시간을 계산하기 위해 건설자원 투입 현황 모델 결과를 활용함. 구체적으로 건설자원이 CCTV 동영상에 처음 나타난 시각(등장시각)과 사라진 시각(퇴장시각)을 탐지하고, [퇴장시각 - 등장시각]으로 투입시간을 산정함. 또한, 건설자원의 작업상태 자동 인식 결과를 토대로 건설프로세스의 주요 생산성 지표인 작업상태별 소요시간을 측정함. 예를 들어, 덤프트럭의 경우 상차작업을 시작한 시각과 상차작업이 끝난 시각을 탐지하여 상차작업에 소요된 시간을 산정함.
  - (b) **생산성 주요 지표의 통계적 분석 및 이상치 자동 탐지:** 앞서 계산된 생산성 주요 지표를 통계적으로 분석하여 생산성이 저하되는 이상치를 자동 탐지함. 보다 구체적으로, Z-점수 정규화(Z-Score Normalization) 방법론을 활용하여 특정 신뢰구간의 Z-Score보다 높은 값을 갖는 투입자원을 이상치로 판단함. 여기서 신뢰구간은 일반적으로 가장 많이 쓰이는 95%(Z-Score: 1.96)를 적용함.
  - (c) **생산성 저해요인 도출:** 본 단계는 탐지된 이상치 결과를 활용하여 생산성을 저하시키는 현장 여건 또는 특정 건설자원을 도출함. 예를 들어, 현장 출입구가 좁아서 건설장비 간 등장·퇴장시각이 지나치게 겹치는 경우(현장 여건에 의한 생산성 저하)와 특정 덤프트럭이 길을 잘못 들어 주행시간이 길어지는 경우(특정 건설자원에 의한 생산성 저하)가 존재할 수 있음. 이와 같은 생산성 저해요인을 도출하기 위해 이상치가 탐지된 시점의 CCTV 동영상을 자동으로 추출함으로써 전문가가 생산성 저해요인을 효율적으로 분석하도록 지원함.
- 개발한 건설프로세스 생산성 자동 분석 알고리즘을 검증하기 위해서 유사환경(토공사, 골조공사, 마감공사를 진행하는 소규모 현장)에서 이미지 데이터를 수집하고(토공사: 14,605장, 골조공사: 6,000장, 마감공사: 9,540장) 건설장비, 작업자, 자재와 같은 건설자원 유형별로 성능 평가를 수행함. 자세한 내용은 아래와 같음.
  - (1) **장비의 생산성 자동 분석:** 장비의 생산성 자동 분석 결과, 전문가 분석값(표 22) 대비 장비 아이디별 분석된 전체 작업시간은 88.35%의 정확도를 보였으며, 유휴시간(idleTime)은 77.34%, 주행시간(travelTime)은 89.54%, 상차시간(loadTime)은 80.16%의 정확도가 도출됨. Z-점수 정규화를 활용한 분석 결과(신뢰구간 95%, Z-Score: 1.96), 영상 내에서 3,682.33초(1시간 1분 22.33초) 경에 등장한 10번 덤프트럭이 다른 덤프트럭들에 비해 유휴시간이 길고(Z-Score: 2.459), 영상 내에서 4,406.33초(1시간 13분 26.33초) 경에 등장한 12번 덤프트럭이 다른 덤프트럭들에 비해 주행시간이 길기 때문에(Z-Score: 2.366) 이들을 이상치로 판단함(표 23, 그림 72). 이를 통해 10, 12번 덤프트럭이 생산성 저해요인으로 도출됨. 특히 10번 덤프트럭의 경우 굴삭기의 흙고르기 시간이 길어짐으로 인해 유휴시간이 길어졌으며, 이는 굴삭기-덤프트럭 간 자원투입 문제로 해석할 수 있음. 또한, 12번 덤프트럭은 타 덤프트럭들과는 다른 경로로 움직이면서 주행시간이 길게 측정되었으며, 이는 12번 운전자에게 올바른 주행경로를 교육하여 생산성을 향상할 수 있음.
-

표 22. 전문가의 덤프트럭 생산성 분석값.

(단위: 초)

| 아이디<br>(id) | 등장시각<br>(startTime) | 퇴장시각<br>(endTime) | 비생산적               | 반생산적                 | 생산적                |
|-------------|---------------------|-------------------|--------------------|----------------------|--------------------|
|             |                     |                   | 유휴시간<br>(idleTime) | 주행시간<br>(travelTime) | 상차시간<br>(loadTime) |
| 1           | 548                 | 828               | 6                  | 34                   | 240                |
| 2           | 831                 | 1,120             | 2                  | 41                   | 246                |
| 3           | 1,117               | 1,379             | 13                 | 46                   | 203                |
| 4           | 1,533               | 1,781             | 0                  | 30                   | 218                |
| 5           | 1,783               | 2,090             | 42                 | 42                   | 223                |
| 6           | 2,092               | 2,380             | 25                 | 43                   | 220                |
| 7           | 2,622               | 2,911             | 16                 | 38                   | 235                |
| 8           | 3,052               | 3,357             | 24                 | 34                   | 247                |
| 9           | 3,358               | 3,683             | 37                 | 49                   | 239                |
| 10          | 3,683               | 4,003             | 32                 | 45                   | 243                |
| 11          | 4,142               | 4,406             | 2                  | 35                   | 227                |
| 12          | 4,406               | 4,718             | 2                  | 60                   | 250                |
| 13          | 4,718               | 4,917             | 1                  | 27                   | 170                |

표 23. 덤프트럭의 생산성 자동 분석 알고리즘 실행 결과(1).

(단위: 초)

| 아이디<br>(id) | 등장시각<br>(start Time) | 퇴장시각<br>(end Time) | 비생산적                | 반생산적                  | 생산적                 | 유휴<br>시간<br>Z-<br>Score | 주행<br>시간<br>Z-<br>Score | 상차<br>시간<br>Z-<br>Score |
|-------------|----------------------|--------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|             |                      |                    | 유휴시간<br>(idle Time) | 주행시간<br>(travel Time) | 상차시간<br>(load Time) |                         |                         |                         |
| 1           | 550                  | 830                | 6.33                | 33.33                 | 240.67              | -0.599                  | -0.839                  | 0.613                   |
| 2           | 830.33               | 1,116              | 1.67                | 40                    | 244.33              | -0.839                  | 0.016                   | 0.718                   |
| 3           | 1,116.33             | 1,378              | 13                  | 46                    | 203                 | -0.255                  | 0.786                   | -0.462                  |
| 4           | 1,534.67             | 1,782.67           | 0                   | 30.33                 | 218                 | -0.925                  | -1.223                  | -0.034                  |
| 5           | 1,783                | 2,089.67           | 39.67               | 39.67                 | 221                 | 1.119                   | -0.026                  | 0.052                   |
| 6           | 2,090                | 2,378.67           | 26.33               | 43                    | 219.67              | 0.432                   | 0.401                   | 0.014                   |
| 7           | 2,622.33             | 2,911.67           | 16                  | 38                    | 235.67              | -0.100                  | -0.240                  | 0.471                   |
| 8           | 3,052.67             | 3,356.67           | 25.33               | 33                    | 246                 | 0.380                   | -0.881                  | 0.766                   |
| 9           | 3,357                | 3,682              | 37.33               | 49                    | 239                 | 0.999                   | 1.170                   | 0.566                   |
| 10          | 3,682.33             | 4,001.67           | 65.67               | 41.67                 | 201                 | 2.459                   | 0.231                   | -0.519                  |
| 11          | 4,142.33             | 4,406              | 0                   | 37.33                 | 226.67              | -0.925                  | -0.326                  | 0.214                   |
| 12          | 4,406.33             | 4,718              | 1                   | 58.33                 | 245.33              | -0.873                  | 2.366                   | 0.746                   |
| 13          | 4,718.33             | 4,917.33           | 1                   | 28.67                 | 109                 | -0.873                  | -1.436                  | -3.145                  |
| 평균          | -                    | -                  | 17.95               | 39.87                 | 219.18              | -                       | -                       | -                       |
| 표준편차        | -                    | -                  | 19.41               | 7.80                  | 35.03               | -                       | -                       | -                       |
| 정확도         | 88.35%               |                    | 77.34%              | 89.54%                | 80.16%              | Total: 83.85%           |                         |                         |

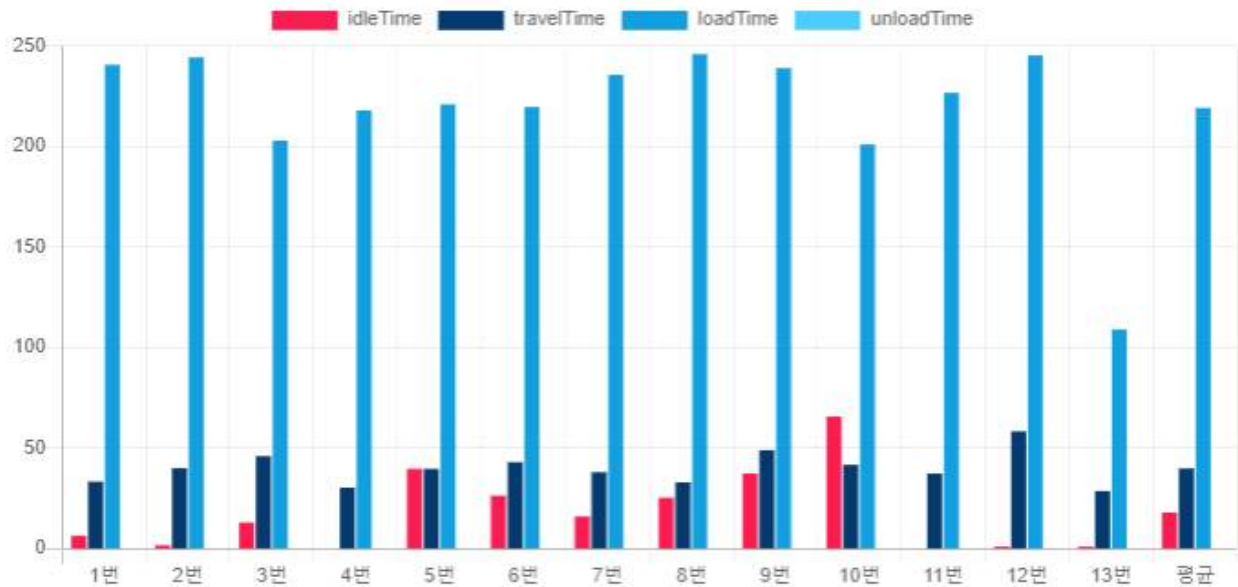


그림 72. 덤프트럭의 생산성 자동 분석 알고리즘 실행 결과(2).

- (2) **작업자의 생산성 자동 분석:** 작업자의 생산성 자동 분석 결과, 전문가 분석값(표 24) 대비 분석된 전체 작업시간(Duration)은 92.66%의 정확도를 보였으며, 유휴시간은 79.82%, 이동시간은 75.43%, 설치시간은 87.18%의 정확도가 도출됨. Z-점수 정규화를 활용한 분석 결과(신뢰구간 95%, Z-Score: 1.96), 2번째 작업(ID: 2, ID는 작업 한 사이클을 의미함)에서는 설치시간, 3번째 작업(ID: 3)에서는 유휴시간, 4번째 작업(ID: 4)에서는 이동시간이 이상치에 해당하는 Z-Score 값이 도출됨(표 25, 그림 73). 이를 통해 작업시간이 많이 소요된 작업과 해당 작업(ID: 2, 3, 4)에서 작업시간이 다른 작업에 비해 시간이 많이 소요된 이유를 영상분석을 통해 파악할 수 있으며, 실제 현장 영상에서도 5번째 작업부터는 작업 효율이 향상되어 필요한 작업시간이 줄어든 것을 확인함.

표 24. 전문가의 골조공사 작업자(거푸집 준비작업) 생산성 분석값.

(단위: 초)

| 아이디<br>(id) | 등장시간<br>(start Time) | 퇴장시간<br>(end Time) | 작업시간<br>(Duration) | 비생산적               | 반생산적                 | 생산적                        |
|-------------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|----------------------------|
|             |                      |                    |                    | 유휴시간<br>(idleTime) | 이동시간<br>(travelTime) | 설치시간<br>(installationTime) |
| 1           | 9:45:25              | 9:46:35            | 70                 | 10                 | 20                   | 40                         |
| 2           | 9:46:36              | 9:48:46            | 130                | 10                 | 20                   | 100                        |
| 3           | 9:48:47              | 9:53:07            | 260                | 200                | 10                   | 50                         |
| 4           | 9:53:10              | 9:55:20            | 130                | 10                 | 50                   | 70                         |
| 5           | 9:55:21              | 9:56:51            | 90                 | 35                 | 15                   | 30                         |
| 6           | 9:56:51              | 9:57:51            | 60                 | 15                 | 10                   | 35                         |

표 25. 골조공사 작업자(거푸집 준비작업) 생산성 자동 분석 알고리즘 실행 결과(1).

(단위: 초)

| 아이디<br>(id) | 작업시간<br>(Duration) | 비생산적               | 반생산적                 | 생산적                        | 유휴<br>시간<br>Z-<br>Score | 이동<br>시간<br>Z-<br>Score | 설치<br>시간<br>Z-<br>Score |
|-------------|--------------------|--------------------|----------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|             |                    | 유휴시간<br>(idleTime) | 이동시간<br>(travelTime) | 설치시간<br>(installationTime) |                         |                         |                         |
| 1           | 78.00              | 13.34              | 18.00                | 46.67                      | -0.516                  | -0.157                  | -0.551                  |
| 2           | 131.67             | 15.67              | 12.33                | 103.67                     | -0.488                  | -0.537                  | 2.054                   |
| 3           | 296.00             | 235.33             | 13.00                | 47.67                      | 2.225                   | -0.492                  | -0.506                  |
| 4           | 133.67             | 15.33              | 53.33                | 65.00                      | -0.492                  | 2.216                   | 0.287                   |
| 5           | 102.67             | 37.00              | 12.33                | 53.33                      | -0.224                  | -0.537                  | -0.246                  |
| 6           | 63.33              | 14.33              | 13.00                | 36.00                      | -0.504                  | -0.492                  | -1.038                  |
| 평균          | -                  | 17.95              | 39.87                | 219.18                     | -                       | -                       | -                       |
| 표준편차        | -                  | 19.41              | 7.80                 | 35.03                      | -                       | -                       | -                       |
| 정확도         | 92.66%             | 79.82%             | 75.43%               | 87.18%                     | Total: 80.81%           |                         |                         |

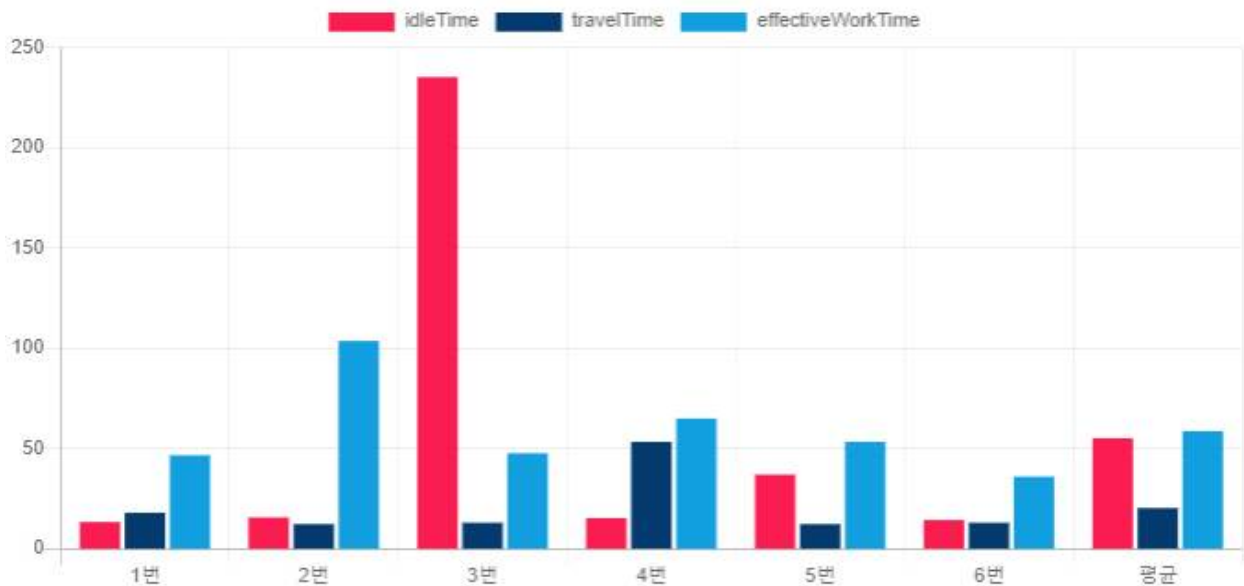


그림 73. 작업자의 생산성 자동 분석 알고리즘 실행 결과(2).

- (3) 자재의 생산성 자동 분석:** 자재의 생산성 자동 분석 결과, 전문가 분석값(표 26) 대비 분석된 전체 작업시간은 92.25%, 인양시간(liftTime)은 91.14%, 설치시간은 81.24%의 정확도가 도출됨(표 27, 그림 74). Z-점수 정규화를 활용한 분석 결과(신뢰구간 95%, Z-Score: 1.96), 영상 내 6번의 패널 설치 작업 사이클에서 Z-Score를 초과하는 이상치는 도출되지 않음. 하지만, 영상 내 1번 패널의 설치시간(Z-Score: -1.525)과 3번 패널의 인양시간(Z-Score: -1.562), 4번 패널의 설치시간(Z-Score: 1.594)이 이상치 기준에 근접한 것으로 판단됨. 실제 현장 영상을 확인해보니 1번과 3번 패널은 인양 및 설치속도가 빨랐으며, 4번 패널의 경우 설치 중 재인양이 발생하여 작업시간이 지연된 것으로 확인됨. 특히, 4번 패널의 경우 분석 결과와 다르게 이상치로 확인되었으며, 1번과 3번 패널은 이상치가 아닌 것으로 확인됨. 이에 따라 현장과 공종의 특성을 반영하여 신뢰구간을 다르게 설정(예시: 신뢰구간 90%, 단방향)할 필요가 있음을 확인함.

표 26. 전문가의 패널 생산성 분석값.

(단위: 초)

| 아이디<br>(id) | 등장시각<br>(startTime) | 퇴장시각<br>(endTime) | 생산적            |                        |
|-------------|---------------------|-------------------|----------------|------------------------|
|             |                     |                   | 인양시간(liftTime) | 설치시간(installationTime) |
| 1           | 0                   | 233               | 124            | 110                    |
| 2           | 272                 | 607               | 119            | 217                    |
| 3           | 649                 | 1,059             | 34             | 377                    |
| 4           | 1,065               | 1,406             | 51             | 291                    |
| 5           | 1,456               | 1,779             | 115            | 209                    |
| 6           | 1,798               | 2,159             | 118            | 243                    |

표 27. 패널의 생산성 자동 분석 알고리즘 실행 결과(1).

(단위: 초)

| 아이디<br>(id) | 등장시각<br>(startTime) | 퇴장시각<br>(endTime) | 생산적                |                            | 인양시간<br>Z-Score | 설치시간<br>Z-Score |
|-------------|---------------------|-------------------|--------------------|----------------------------|-----------------|-----------------|
|             |                     |                   | 인양시간<br>(liftTime) | 설치시간<br>(installationTime) |                 |                 |
| 1           | 0                   | 272               | 131.33             | 140.67                     | 0.813           | -1.525          |
| 2           | 272.67              | 650.67            | 122.67             | 256                        | 0.626           | 0.274           |
| 3           | 651.33              | 1,066             | 21.33              | 229.33                     | -1.562          | -0.142          |
| 4           | 1,066.67            | 1,456             | 49.33              | 340.67                     | -0.957          | 1.594           |
| 5           | 1,456.67            | 1,798             | 116                | 226                        | 0.482           | -0.194          |
| 6           | 1,798.67            | 2,157.33          | 121.33             | 238                        | 0.597           | -0.00694        |
| 평균          | -                   | -                 | 93.67              | 238.45                     | -               | -               |
| 표준편차        | -                   | -                 | 46.31              | 64.12                      | -               | -               |
| 정확도         | 92.25%              |                   | 91.14%             | 81.24%                     | Total: 86.19%   |                 |

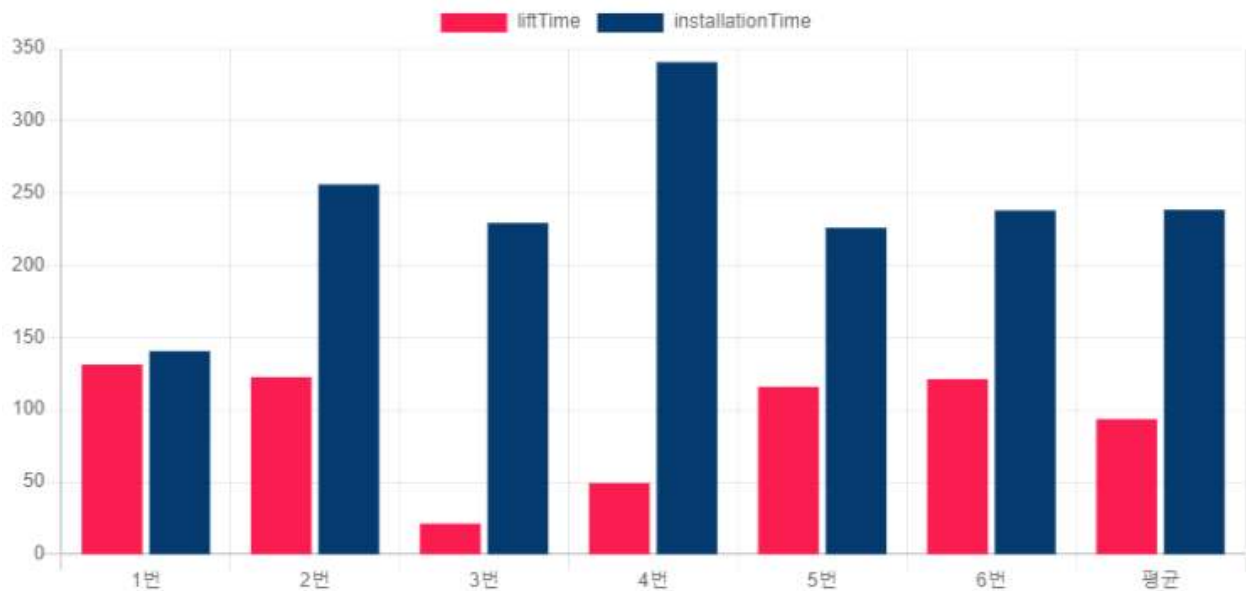


그림 74. 패널의 생산성 자동 분석 알고리즘 실행 결과(2).

### 3) 3차년도

- 3차년도 연구목표인 국내외 현장실험을 통한 플랫폼의 실무적 제약조건 도출 및 보완의 개념도는 그림 75와 같으며, 세부 연구목표별 구체적인 연구수행 결과는 다음과 같음.

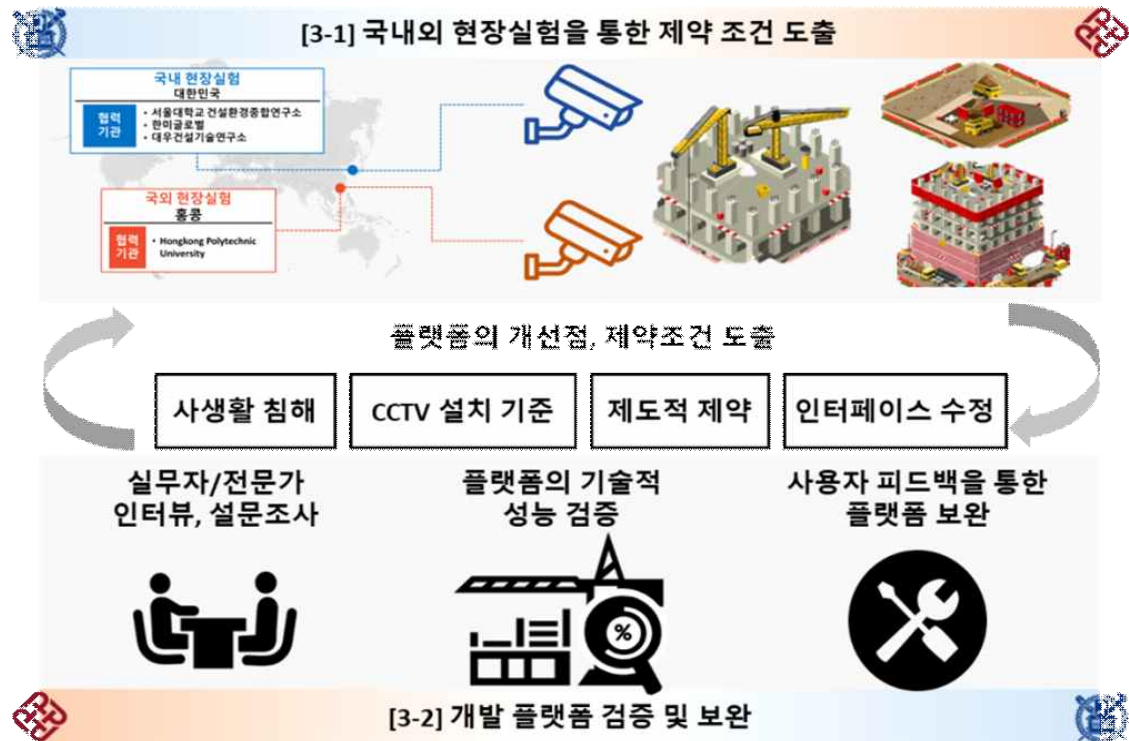


그림 75. 국내외 현장실험을 통한 플랫폼의 실무적 제약조건 도출 및 보완 개념도.

#### ○ [3-1] 국내외 현장실험을 통한 플랫폼 활용 제약조건 도출

본 단계는 개발 플랫폼을 국내외 현장에 적용함에 있어 발생 가능한 제약조건을 도출하는 과정으로, 1. 국내외 현장실험 계획수립, 2. 국내외 현장실험 수행, 3. 플랫폼 활용 제약조건 도출로 구성됨. 자세한 단계별 연구내용은 다음과 같음.

##### 1. 국내외 현장실험 계획수립

- **(1) 다양한 국내외 건설현장 선정:** 국내외 현장실험 계획수립에 앞서 영상을 확보하고자 다양한 건설현장을 선정함. 특히, 토공사, 골조공사, 마감공사 등 다양한 공종을 포함한 현장을 선정하고자 했으며, 이에 따라 다음과 같은 국내외 건설현장들을 섭외함.
  - **국내 건설현장:** 천안-아산 고속도로 건설현장과 분당 NAVER 1784 건설현장을 섭외함. 천안-아산 고속도로 현장은 충청남도 아산시에 위치하며 대우건설이 시공을 담당함. 본 현장은 고속도로 현장으로 다수의 굴삭기와 덤프트럭이 토공작업을 수행하는 현장이기에 다양한 공종 중 토공사에 대한 생산성 분석이 요구되는 현장임. NAVER 1784 건설현장은 경기도 분당시에 위치하며 삼성물산이 NAVER의 제2사옥을 시공하는 현장임. 섭외 당시에는 이미 토공작업이 완료된 상태였으며 이후 골조작업이 활발히 진행되고 있어 다수의 작업자가 공사에 참여함. 이에 따라 골조공사에 대한 생산성 분석이 가능한 현장임.
  - **국외 건설현장:** 홍콩의 The Hong Kong Polytechnic University Innovation Tower 건설현장과 미국의 CPMC Van Ness Campus 건설현장을 선정함. The Hong Kong Polytechnic University Innovation Tower 현장의 경우 거푸집 설치, 철근 설치, 콘크리트 타설 작업 등 다양한 골조작업이 다수의 작업자에 의해 이루어지고 있기에 골조공사에 대한 생산성 분석이 요구됨. 마감공사에 대한 생산성 분석의 경우, 코로나 팬데믹으로 인해 현장 섭외에 어려움이 있어 대안으로 웹사이트에 업로드된 미국의 CPMC Van Ness Campus 현장 영상을 이용하여 분석을 수행함. 해당 영상은 건물 외벽의 글래스 커튼월(Glass CurtainWall) 마감작업을 고정형 카메라로 촬영한 것으로, 개발 플랫폼을 적용할 수 있는 수준임이 확인됨.

- (2) 현장 맞춤형 실험 계획수립: 국내외 건설현장을 섭외한 후, 각 현장 상황에 맞춰 실험 계획을 수립함. 각 건설현장에서 진행 중인 공종에 따라 생산성 분석 계획을 구체적으로 수립함.
  - 천안-아산 고속도로 건설현장: 토공사 생산성 분석 알고리즘을 적용할 계획을 수립함. 본 현장의 토공작업은 자재나 작업자보다 굴삭기, 덤프트럭 등 크기가 큰 중장비 위주로 작업이 진행되므로 작업구역으로부터 가까운 곳에 카메라를 설치하면 영상에 온전한 작업 현황을 담을 수 없음. 이에 따라 작업구역으로부터 100m 이상의 거리를 두고 카메라를 설치하여 실험을 진행함. 또한, 본 현장은 공사를 시작한 지 얼마 되지 않은 관계로, 전봇대나 폴대와 같은 별도의 CCTV 설치장소가 존재하지 않아 캠코더를 활용하여 영상을 수집함.
  - 분당 NAVER 1784 건설현장: 골조공사 생산성 분석 알고리즘을 적용할 계획을 수립함. 본 현장의 골조공사는 현장 전 지역에 걸쳐 공사가 동시다발적으로 진행됨에 따라, 현장의 전 범위를 동시에 촬영하고자 현장 주변의 가설 가림막에 5대의 CCTV를 설치함.
  - The Hong Kong Polytechnic University Innovation Tower 건설현장: 골조공사 생산성 분석 알고리즘을 적용할 계획을 수립함. 본 현장에서는 골조공사가 현장 전 지역에 걸쳐 진행됨에 따라, 현장의 전 범위를 촬영하고자 주변 건물에 CCTV를 설치하여 영상을 수집함.
  - 미국 San Francisco CPMC Van Ness Campus 대형병원 건설현장: 마감공사 생산성 분석 알고리즘을 적용할 계획을 수립함. 해당 현장에 대한 데이터는 코로나 팬데믹으로 인한 현장 섭외의 어려움으로 웹사이트에 업로드된 영상을 이용하여 수집함. 해당 영상은 현장 주변에 설치된 2대의 CCTV를 통해 244주 동안 촬영된 영상이며, 그 중 154주가 마감공사에 대한 작업 영상임.

## 2. 국내외 현장실험 수행

- 앞서 수립한 실험 계획에 따라서 현장별 영상 데이터를 수집함. 이후 개발된 프레임워크에 따라 생산성 정보를 분석하였으며 자세한 내용은 그림 76과 같음. 이는 2차년도까지 수행한 연구를 단계별로 정리하여 생산성 자동분석과정을 체계화한 프레임워크임. 보다 구체적으로, CCTV로부터 수집된 영상데이터를 분석하여 작업공종을 인식하고, 그에 따라 기개발한 건설현장 맞춤형 DB-free 영상분석기술을 적용하여 객체 인식 모델을 구축함(학습 이미지데이터를 최대 10장 활용). 이후 각 공종의 특성에 적합한 작업상태 인식 및 생산성 분석을 수행하며, 결론적으로 통계적 이상치를 탐지하여 생산성 저해요인을 도출함.

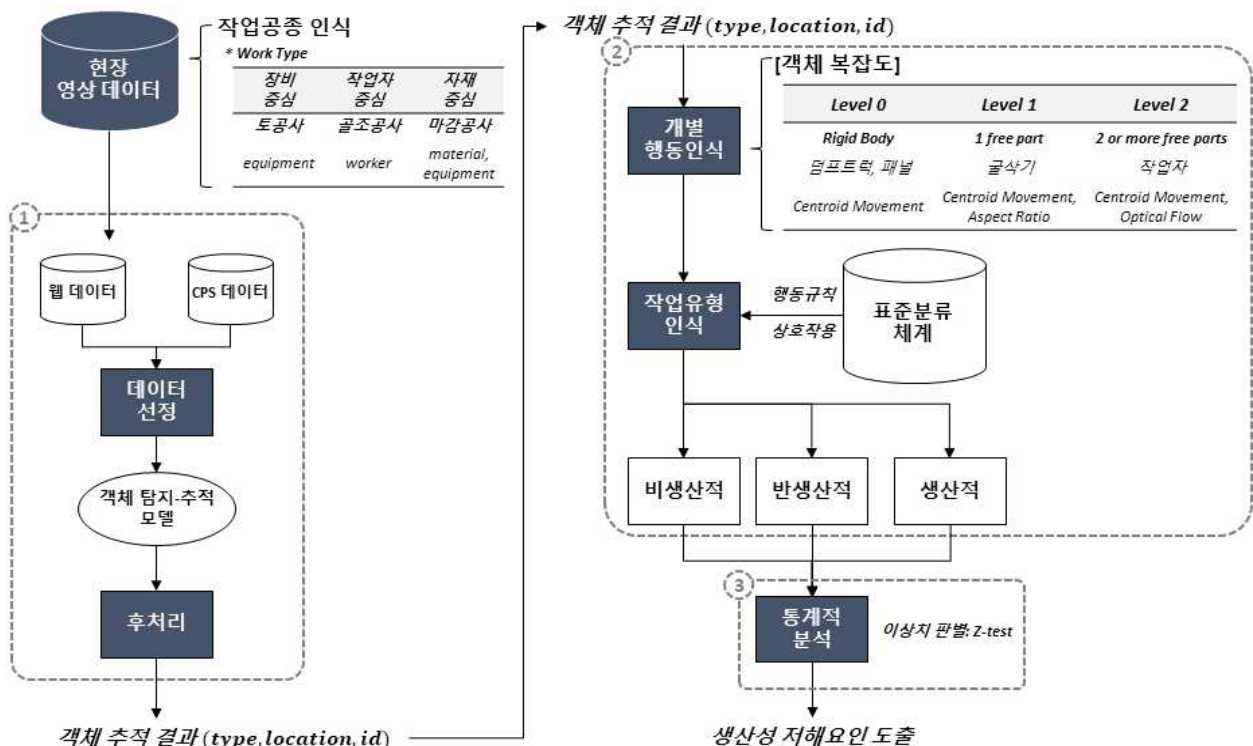


그림 76. 생산성 자동 분석 프레임워크.

- (1) 국내외 현장 영상 데이터 수집

- **천안-아산 고속도로 건설현장:** 현장에 캠코더를 설치하여 두 개의 토공사 작업구역을 촬영함. 작업구역마다 한 대의 굴삭기가 배치되었으며, 다수의 덤프트럭들이 수시로 작업구역에 출입하여 토량을 운반하는 작업이 진행됨. 하나의 작업구역에서는 해당 작업구역의 특성상 덤프트럭의 출구와 입구가 분리되어 있어 출입하는 덤프트럭 간의 교차가 발생하지 않음. 그러나 다른 작업구역에서는 출입구가 분리되지 않아서 작업구역에 출입하는 덤프트럭 간의 교차가 수시로 촬영됨. 두 작업구역에서 수집한 영상 데이터의 총 길이는 3시간이며, 예시는 그림 77과 같음.



그림 77. 천안-아산 고속도로 건설현장 촬영 영상 데이터 예시.

- **분당 NAVER 1784 건설현장:** 현장에 설치한 CCTV를 통해 다양한 골조공사 작업구역을 촬영함. 작업구역마다 다수의 작업자가 배치되어 골조작업이 이루어졌으며, 작업자들이 수시로 이동, 설치 등의 작업을 수행하며 공사가 진행됨. 작업자들의 위치와 작업상태, 작업구역의 공사 진행정도가 시시각각 변화함에 따라 작업자 간 교차가 수시로 발생함. 해당 현장에서 수집한 영상 데이터의 총 길이는 3,324시간이며, 그림 78은 수집한 영상 데이터의 예시임.



그림 78. 분당 NAVER 1784 건설현장 촬영 영상 데이터 예시.

- **The Hong Kong Polytechnic University Innovation Tower 건설현장:** 앞서 수립한 현장실험 계획에 맞춰 현장에 CCTV를 설치하여 건설현장을 촬영함. 작업구역에 따라 거푸집 설치, 철근 설치, 콘크리트 타설 등의 다양한 작업이 동시다발적으로 다수의 작업자에 의해 이루어짐. 이 건설현장에서 수집한 영상 데이터의 총 길이는 약 200시간이며, 그림 79는 수집한 영상 데이터의 예시임.



그림 79. The Hong Kong Polytechnic University Innovation Tower 건설현장 촬영 영상 데이터 예시.

- 미국 San Francisco CPMC Van Ness Campus 대형병원 건설현장: 현장에서 CCTV로 촬영된 전체 영상 데이터 중 97주차부터 155주차까지의 커튼월 설치 영상을 선별하여 정리하였음. 각 작업영상에는 한 대의 타워크레인이 배치되어 있었으며, 옥상에 기적재된 패널을 결속하여 대상 구역에 인양 및 설치하는 형태로 작업이 진행됨. 해당 영상 데이터의 총 길이는 약 1,740시간이며, 그림 80은 해당 현장 영상 데이터의 예시임.



그림 80. 미국 San Francisco CPMC Van Ness Campus 대형병원 건설현장 촬영 영상 데이터 예시.

## • (2) 생산성 정보 분석 결과

- 토공사: 천안-아산 고속도로 건설현장에서 수집한 영상 데이터 중 덤프트럭의 출입구가 분리되지 않은 현장의 생산성이 출입구가 분리된 현장의 생산성에 비해 낮은 것으로 파악됨. 이에 따라, 출입구가 분리되지 않은 현장(10장의 학습용 데이터, 108,000장의 테스트 데이터)의 생산성을 2차년도에 개발한 통합관리 플랫폼으로 분석함. 덤프트럭의 ID에 따른 유희시간(비생산적), 주행시간(반생산적), 상차시간(생산적)을 자동으로 산정하였으며, 이를 모집단으로 정의하여 덤프트럭의 각 행동 유형에 따라 소요된 시간의 평균과 표준편차를 계산함. 소요시간의 평균과 편차에 따라 각 행동 유형의 통계적 이상치(outlier)를 보인 덤프트럭을 파악함. 이상치는 신뢰구간을 90%(z-score: 1.28) 기준으로 분류하였으며, 분석 결과 이상치를 갖는 덤프트럭의 ID는 5, 11, 12, 15임이 파악됨. 구체적인 생산성 분석 결과는 표 28과 같음.

표 28. 덤프트럭의 생산성 자동 분석 알고리즘 실행 결과.

(단위: 초)

| 아이디<br>(id) | 등장시간<br>(start Time) | 퇴장시간<br>(end Time) | 비생산적                | 반생산적                  | 생산적                 | 유휴<br>시간<br>Z-<br>Score | 주행<br>시간<br>Z-<br>Score | 상차<br>시간<br>Z-<br>Score |
|-------------|----------------------|--------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|             |                      |                    | 유휴시간<br>(idle Time) | 주행시간<br>(travel Time) | 상차시간<br>(load Time) |                         |                         |                         |
| 1           | 123.8                | 266.9              | 21.9                | 10.2                  | 109.3               | -0.762                  | -0.143                  | 0.173                   |
| 2           | 169.3                | 422.1              | 121.6               | 8.8                   | 122.6               | 1.186                   | -0.356                  | 0.371                   |
| 3           | 314.3                | 542.2              | 115.7               | 9.2                   | 98.4                | 1.070                   | -0.290                  | 0.010                   |
| 4           | 470.0                | 694.7              | 91.4                | 11.2                  | 122.2               | 0.595                   | -0.004                  | 0.366                   |
| 5           | 864.0                | 1,164.5            | 69.9                | 24.0                  | 201.8               | 0.176                   | 1.874                   | 1.554                   |
| 6           | 1,033.8              | 1,042.2            | 4.3                 | 4.2                   | 0.0                 | -1.107                  | -1.031                  | -1.458                  |
| 7           | 1,117.6              | 1,308.3            | 72.0                | 13.0                  | 105.8               | 0.216                   | 0.267                   | 0.121                   |
| 8           | 1,348.7              | 1,352.1            | 0.9                 | 2.6                   | 0.0                 | -1.173                  | -1.258                  | -1.458                  |
| 9           | 1,349.1              | 1,352.7            | 1.6                 | 2.1                   | 0.0                 | -1.159                  | -1.339                  | -1.458                  |
| 10          | 1,368.5              | 1,547.9            | 47.2                | 11.7                  | 117.6               | -0.268                  | 0.077                   | 0.296                   |
| 11          | 1,419.6              | 1,717.8            | 153.7               | 12.3                  | 132.6               | 1.813                   | 0.165                   | 0.521                   |
| 12          | 1,613.4              | 1,887.2            | 138.4               | 16.1                  | 119.4               | 1.513                   | 0.715                   | 0.324                   |
| 13          | 1,719.7              | 1,724.5            | 2.0                 | 2.9                   | 0.0                 | -1.152                  | -1.214                  | -1.458                  |
| 14          | 1,966.3              | 2,144.4            | 46.2                | 13.9                  | 118.1               | -0.288                  | 0.399                   | 0.305                   |
| 15          | 2,214.8              | 2,486.9            | 27.2                | 25.8                  | 217.7               | -0.659                  | 2.138                   | 1.791                   |
| 평균          | -                    | -                  | 60.9                | 11.2                  | 97.7                | -                       | -                       | -                       |
| 표준편차        | -                    | -                  | 51.2                | 6.8                   | 67                  | -                       | -                       | -                       |

- **골조공사:** NAVER 1784 건설현장의 거푸집 설치 작업 영상(10장의 학습용 데이터, 10,800장의 테스트 데이터)과 The Hong Kong Polytechnic University Innovation Tower 건설현장 영상(10장의 학습용 데이터, 8,820장의 테스트 데이터)을 활용하여 골조공사의 생산성 분석을 진행함. 기존에는 작업자 1명을 대상으로 샘플링하여 적용하였던 것과 달리 다수 작업자의 생산성을 동시에 분석하도록 알고리즘을 적용함. 개별 작업자 ID에 따라 유휴시간(비생산적), 이동시간(반생산적), 작업시간(생산적) 등을 자동으로 산정하였으며, 이를 모집단으로 정의하여 작업자의 행동 유형에 따른 평균과 표준편차를 계산함. 마찬가지로 결과에 따라 각 행동 유형의 통계적 이상치를 산출함. 이상치는 신뢰구간을 90%(z-score: 1.28) 기준으로 분류하였음. 분석 결과 NAVER 1784 건설현장의 경우 4번 ID의 작업자, The Hong Kong Polytechnic University Innovation Tower 건설현장의 경우 1, 4, 5번 ID의 작업자가 이상치를 가짐을 파악함. 구체적인 생산성 분석 결과는 표 29, 30과 같음.

표 29. 작업자의 생산성 자동 분석 알고리즘 실행 결과(NAVER 1784 건설현장).

(단위: 초)

| 아이디<br>(id) | 등장시간<br>(start Time) | 퇴장시간<br>(end Time) | 비생산적                | 반생산적                  | 생산적                           | 유휴<br>시간<br>Z-<br>Score | 이동<br>시간<br>Z-<br>Score | 작업<br>시간<br>Z-<br>Score |
|-------------|----------------------|--------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|             |                      |                    | 유휴시간<br>(idle Time) | 이동시간<br>(travel Time) | 작업시간<br>(Effective Work Time) |                         |                         |                         |
| 1           | 0                    | 300                | 107.0               | 23.0                  | 158.0                         | 1.24                    | -1.12                   | -1.37                   |
| 2           | 0                    | 1,080              | 63.0                | 237.0                 | 513.0                         | 0.12                    | 1.38                    | 0.54                    |
| 3           | 0                    | 600                | 14.0                | 119.0                 | 400.0                         | -1.13                   | 0.01                    | -0.07                   |
| 4           | 0                    | 1,080              | 51.0                | 205.0                 | 702.0                         | -0.19                   | 1.01                    | 1.56                    |
| 5           | 600                  | 1,080              | 17.0                | 55.0                  | 303.0                         | -1.03                   | -0.74                   | -0.59                   |
| 6           | 480                  | 1,080              | 98.0                | 73.0                  | 402.0                         | 1.01                    | -0.53                   | -0.06                   |
| 평균          | -                    | -                  | 58.3                | 118.7                 | 413.0                         | -                       | -                       | -                       |
| 표준편차        | -                    | -                  | 39.2                | 85.7                  | 184.9                         | -                       | -                       | -                       |

표 30. 작업자의 생산성 자동 분석 알고리즘 실행 결과(HK PolyU Innovation Tower 건설현장).

(단위: 초)

| 아이디<br>(id) | 등장시간<br>(start Time) | 퇴장시간<br>(end Time) | 비생산적                | 반생산적                  | 생산적                           | 유휴<br>시간<br>Z-<br>Score | 이동<br>시간<br>Z-<br>Score | 작업<br>시간<br>Z-<br>Score |
|-------------|----------------------|--------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|             |                      |                    | 유휴시간<br>(idle Time) | 이동시간<br>(travel Time) | 작업시간<br>(Effective Work Time) |                         |                         |                         |
| 1           | 0                    | 294                | 0                   | 0                     | 294                           | -0.89                   | -0.78                   | 1.82                    |
| 2           | 15                   | 235                | 0                   | 0                     | 220                           | -0.89                   | -0.78                   | 1.17                    |
| 3           | 22                   | 294                | 86                  | 66                    | 120                           | -0.19                   | 1.88                    | 0.30                    |
| 4           | 0                    | 294                | 294                 | 0                     | 0                             | 1.52                    | -0.78                   | -0.74                   |
| 5           | 0                    | 294                | 294                 | 0                     | 0                             | 1.52                    | -0.78                   | -0.74                   |
| 6           | 77                   | 242                | 123                 | 27                    | 15                            | 0.11                    | -0.30                   | -0.61                   |
| 7           | 0                    | 109                | 56                  | 19                    | 34                            | -0.44                   | -0.02                   | -0.45                   |
| 8           | 136                  | 198                | 19                  | 43                    | 0                             | -0.74                   | 0.95                    | -0.74                   |
| 평균          | -                    | -                  | 109.0               | 19.4                  | 85.4                          | -                       | -                       | -                       |
| 표준편차        | -                    | -                  | 121.8               | 24.8                  | 114.8                         | -                       | -                       | -                       |

- **마감공사:** 미국 CPMC Van Ness Campus 대형병원 건설현장 영상을 활용함. 우선적으로, 수집한 영상을 검토한 결과 패널 인양 및 설치 작업이 일부 지연되는 등 다른 작업에 비해 생산성이 낮은 것으로 파악됨. 이에 따라, 해당 시간대의 영상 데이터(10장의 학습용 데이터, 69,120장의 테스트 데이터)에 대한 생산성 분석을 진행함. 개발 플랫폼을 활용하여 패널 ID에 따른 인양시간, 설치시간을 자동으로 산정하였으며, 이를 모집단으로 정의하여 패널의 행동 유형에 따라 소요된 시간의 평균과 표준편차를 계산함. 결과를 활용하여 신뢰구간 90%(z-score: 1.28)를 기준으로 이상치를 분류하였으며, 분석 결과 이상치를 갖는 패널은 ID 3으로 파악됨. 구체적인 생산성 분석 결과는 표 31과 같음.

표 31. 패널의 생산성 자동 분석 알고리즘 실행 결과.

(단위: 초)

| 아이디<br>(id) | 등장시간<br>(start Time) | 퇴장시간<br>(end Time) | 생산적                 |                             | 인양<br>시간<br>Z-Score | 설치<br>시간<br>Z-Score |
|-------------|----------------------|--------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|---------------------|
|             |                      |                    | 인양시간<br>(lift Time) | 설치시간<br>(installation Time) |                     |                     |
| 1           | 200.0                | 1,446.7            | 52.0                | 1,194.7                     | 0.557               | 0.935               |
| 2           | 1,447.3              | 2,458.0            | 46.7                | 964.0                       | 0.309               | 0.163               |
| 3           | 2,458.7              | 3,189.3            | 80.0                | 650.7                       | 1.857               | -0.885              |
| 4           | 3,190.0              | 4,368.7            | 18.7                | 1,160.0                     | -0.990              | 0.819               |
| 5           | 4,369.3              | 5,449.3            | 24.0                | 1,056.0                     | -0.743              | 0.471               |
| 6           | 5,450.0              | 6,484.7            | 24.0                | 1,010.7                     | -0.743              | 0.319               |
| 7           | 6,485.4              | 6,890.7            | 34.7                | 370.7                       | -0.248              | -1.822              |
| 평균          | -                    | -                  | 40.0                | 915.2                       | -                   | -                   |
| 표준편차        | -                    | -                  | 21.5                | 298.8                       | -                   | -                   |

### 3. 플랫폼 활용 제약조건 도출

#### • (1) CCTV 설치 제약조건 도출

- 국내외 현장실험을 수행하면서, 건설현장에 CCTV를 설치할 때 발생 가능한 실무적, 기술적 제약조건을 확인함. 최근 CCTV 카메라 네트워크를 구축하여 상황정보를 수집 및 관리·감독하는 건설현장이 증가하는 추세지만, 대다수는 체계적인 업무지시서나 가이드라인 없이 개인 경험과 지식에 의존하여 CCTV를 설치하고 있음. 이와 같은 카메라 네트워크 구축 방식은 전원공급,

데이터 송수신, 중첩효과 등을 포함한 건설현장의 복잡성을 고려하는 데 한계가 있음. 이러한 한계를 해결하기 위해서 카메라 유형, 대수, 위치, 촬영 각도 등을 고려한 건설현장 카메라 네트워크 최적화 대안을 도출함.

- 구체적으로, 선행문헌 고찰, 이엔제이 솔루션, 우원개발 등 CCTV장비설치업 및 건설업에 종사하는 12명의 전문가 인터뷰, 남양주시 별내면 도로 확장공사 및 서울대학교 건설환경종합연구소 증축현장에서의 사례연구 2건을 통해 모니터링 목적, 비용, 공간적 제약조건에 따라 카메라 네트워크 설치 시 고려해야 하는 주요 요인을 도출함(표 32).

표 32. CCTV 설치시 고려해야 할 건설현장 제약조건.

| 영상<br>모니터링<br>결정요인 | 영향인자            | 설명                                         | 카메라 배치 고려요인      |                                                    |
|--------------------|-----------------|--------------------------------------------|------------------|----------------------------------------------------|
|                    |                 |                                            | 네트워크 조건          | 건설현장 조건                                            |
| 모니터링<br>목적         | 건설작업            | 건설현장 작업자와 장비의<br>업무성과 측정 및 이해              | -                | 작업구역                                               |
|                    | 건설현장<br>물류      | 작업 수행에 필요한 현장 내부의<br>자재흐름 파악               | -                | 이동구역<br>야적장                                        |
| Coverage           | 카메라<br>Coverage | 설치된 카메라 네트워크의 최대<br>Coverage               | 카메라 대수<br>카메라 유형 | -                                                  |
|                    | 중첩효과            | 카메라의 Coverage와 영상 모니터링을<br>방해하는 주요 요인      | 카메라 위치<br>카메라 방향 | 시설물<br>위치가 고정된 장비                                  |
| 총 비용               | 설치 비용           | 카메라를 임의의 위치에<br>설치하는 비용                    | 카메라 대수<br>카메라 위치 | 시설물                                                |
|                    | 구매 비용           | 카메라를 구매에<br>필요한 비용                         | 카메라 유형<br>카메라 대수 | -                                                  |
| 설치가능<br>구역         | 작업흐름<br>방해      | 카메라 네트워크와 건설작업, 현장물류<br>간의 물리적 간섭<br>또는 혼선 | 카메라 위치           | 반영구 시설물<br>영구 시설물<br>임시 시설물<br>작업구역<br>이동구역<br>야적장 |
|                    | 전원공급            | 카메라와 발전기 간의 전력 공급                          | 카메라 위치           | 발전기 위치                                             |
|                    | 데이터<br>송수신      | 카메라와 녹화장치 간 영상신호 송수신                       | 카메라 위치           | 송수신기 위치                                            |

• (2) 제약조건에 대한 현장 실무자 평가

- 앞서 도출한 제약조건의 타당성을 검증하기 위해 DL E&C, 대우건설, 한미글로벌 등에 종사하는 10명의 현장 실무자를 대상으로 2021년 11월 온라인 설문조사를 진행함. 본 설문은 앞서 도출한 CCTV 설치 시 고려해야 할 건설현장 제약조건(표 32)과 관련된 11개의 문항으로 구성되어 있으며 각 항목에 대한 자세한 설문내용은 표 33과 같음.

표 33. 세부 설문 문항

|                   |                                                                                              |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 제약조건<br>타당성<br>관련 | 1. CCTV 카메라 네트워크 구축을 위해, 건설현장 작업자 및 장비의 업무에 대한 측정과 이해가 필요하다.                                 |
|                   | 2. CCTV 카메라 네트워크 구축을 위해, 작업 수행 및 계획에 대한 현장 내부의 자재흐름 파악이 필요하다.                                |
|                   | 3. 설치된 CCTV 대수와 유형에 따른 카메라 네트워크의 최대 Coverage(촬영 가능 범위)에 대한 분석이 필요하다.                         |
|                   | 4. 카메라 위치, 방향에 따라 영상 모니터링을 방해하는 주요 요인에 대한 분석이 필요하다.                                          |
|                   | 5. 카메라를 설치하는 위치에 따라 변화하는 비용을 최적화할 필요가 있다. (예. 반영구 시설물, 영구 시설물, 임시 시설물, 작업구역, 이동구역, 야적장)      |
|                   | 6. 카메라 유형 및 대수에 따른 비용을 최적화할 필요가 있다.                                                          |
|                   | 7. 카메라 네트워크가 건설작업, 현장 물류에 미치는 물리적 간섭 또는 혼선을 고려해야 한다.                                         |
|                   | 8. 현장에서 카메라가 받을 수 있는 전력 공급에 따른 설치 가능 위치를 고려해야 한다.                                            |
|                   | 9. 카메라와 녹화장치 간 영상신호 송수신이 다른 현장 물류에 의해 영향을 받는지 여부를 확인해야 한다.                                   |
|                   | 10. 현재 카메라 네트워크 시스템 구축 방식은 실무자의 개인 경험과 지식에 의존한다.                                             |
|                   | 11. 경험 지식에 따라 카메라 네트워크를 설치할 경우 실제 카메라 네트워크 Coverage가 예상과 많이 달라지거나 주요 모니터링 지역이 보이지 않는 경우도 있다. |

- 설문은 각 항목에서 제시하는 내용이 타당한가에 대하여 예(1점), 아니오(0점)의 응답으로 수행되었으며 11개의 문항에 대한 설문조사 결과, 평균 0.9727점이 도출됨. 즉, 앞서 도출한 제약조건은 현장 실무자가 생각하는 현장의 제약조건을 반영하며 타당성 조사 결과는 목표치 90%를 만족함.
- 타당성 조사 결과를 활용하여 향후 카메라 네트워크 구축에 활용될 수 있는 수학적 모델을 도출함. 수학적 모델의 결정변수는 카메라 유형, 대수, 위치, 방향을 의미하며, 목적함수는 카메라 네트워크 성능을 최대화하기 위한 Coverage 최대화, 비용 최소화를 의미함. 제약조건은 건설현장의 설치가능구역(시설물 가장자리 여부, 전원공급 가능여부, 데이터 송수신 가능여부)으로 정의함. 정의에 따른 수학적 모델은 아래(수식 2-6)와 같음. 여기서  $x_{ij\theta}$ 는 이진변수로 카메라가 위치  $(i,j)$ 에  $\theta$ 의 각도로 설치됐는지를 설명하며,  $e_{i_1j_1\theta_1i_2j_2}$ 는 위치  $(i_2,j_2)$ 가  $\theta$ 의 각도로 위치  $(i_1,j_1)$ 에 설치된 카메라의 Coverage에 포함되는지를 나타냄.  $w_{ij}$  변수는 위치  $(i,j)$ 의 공간-맥락적(Spatial-contextual) 중요도를 나타내는 가중치이며, UP은 카메라의 단가를 의미함.  $c_{ij}$ 는 비용변수로, 카메라를 위치  $(i,j)$ 에 설치할 경우 필요한 비용을 의미하며, CR은 건설현장의 카메라 네트워크가 확보해야 하는 최소 Coverage 성능을 의미함. 또한, 설치가능구역에 관한 제약조건을 나타내는  $b_{ij}$ ,  $p_{ij}$ ,  $d_{ij}$  변수는 시설물의 가장자리 여부와 전원공급 가능여부, 데이터 송수신 가능여부를 설명함.

$$\max \sum_{\theta} \sum_i \sum_j x_{i_1 j_1 \theta_1}^* e_{i_1 j_1 \theta_1 i_2 j_2}^* w_{i_2 j_2}$$

수식 2. 카메라 네트워크의 Coverage 최대화(목적함수 1).

$$\min UP^* \sum_{\theta} \sum_i \sum_j x_{ij\theta} + \sum_{\theta} \sum_i \sum_j x_{ij\theta}^* c_{ij}$$

수식 3. 카메라 네트워크의 비용 최소화(목적함수 2).

$$\sum_{\theta} \sum_i \sum_j x_{i_1 j_1 \theta_1}^* e_{i_1 j_1 \theta_1 i_2 j_2}^* w_{i_2 j_2} \geq CR^* \sum_i \sum_j w_{ij}$$

수식 4. 최소 Coverage 산정(제약조건 1).

$$UP^* \sum_{\theta} \sum_i \sum_j x_{ij\theta} + \sum_{\theta} \sum_i \sum_j x_{ij\theta}^* c_{ij} \leq Budgets$$

수식 5. 최대 예산(제약조건 2).

$$\sum_{\theta} x_{ij\theta} \leq b_{ij}^* p_{ij}^* d_{ij} \text{ for } \forall i, j$$

수식 6. 카메라의 설치가능구역(제약조건 3).

- 추가적으로 10명의 설문대상자에게 개발된 플랫폼 ID를 공급하고 테스트하여 불편한 점에 대한 의견을 취합하고 플랫폼을 추가 보완함. 특히, 플랫폼의 프론트엔드 및 아키텍처를 보완하여 사용자 편의를 개선함. 또한, 플랫폼에 대한 소개글 및 예시 영상과 분석 결과를 삽입하여 플랫폼이 제공할 수 있는 서비스에 대한 이해를 높이고, 사용자가 하나의 현장에 대한 하나의 영상만이 업로드 가능한 기존과 달리 건설현장마다 여러 개의 카메라 영상을 업로드하고 이에 대한 생산성 분석을 수행할 수 있도록 플랫폼을 개선함.

## ○ [3-2] 개발 플랫폼 검증 및 보완

### 1. 분석 정확도 평가 및 보완

#### • (1) 개발 플랫폼을 활용한 초기 생산성 분석 정확도 평가

- **토공사:** 생산성 분석 정확도를 평가하고자 우선 전문가에 의한 덤프트럭 생산성 분석값을 도출함. 개발한 플랫폼을 활용하여 생산성 분석을 진행하였으며, 이를 앞서 도출한 전문가 분석값과 비교함. 정확도를 산출하는 방법은 전문가 분석값  $x_{groundtruth}$ 와 모델 분석값  $x_{prediction}$ 의 차이를 전문가 분석값으로 나누어 이를 전체 확률 1에서 차감하여 계산하였으며 자세한 내용은 수식 7과 같음. 그 결과, 덤프트럭과 굴삭기의 건설작업량 자동 분석 결과는 63.64%(표 34), 생산성 자동 분석 결과는 71.16%의 정확도(표 35)를 보여, 평균 67.40%의 플랫폼 정확도를 확보함. 표 36은 구체적인 생산성 자동 분석 결과를 설명함.

$$Accuracy = 1 - abs\left(\frac{x_{groundtruth} - x_{prediction}}{x_{groundtruth}}\right)$$

수식 7. 전문가 분석값 대비 모델 분석값의 정확도 산출 방법.

표 34. 덤프트럭, 굴삭기 건설작업량 자동 분석 결과.

| 분석방법    | 덤프트럭 수 | 덤프트럭이 투입된 시간 | 덤프트럭의 적재량 | 덤프트럭, 굴삭기 건설작업량 |
|---------|--------|--------------|-----------|-----------------|
| 전문가 분석값 | 11대    | 2,452초       | 25t       | 275t            |
| 모델 분석값  | 15대    | 2,363.1초     | 25t       | 375t            |
| 정확도     | -      | -            | -         | 63.64%          |

표 35. 덤프트럭 생산성 분석값 비교 결과.

(단위: 초)

| 아이디<br>(id) | 전문가 분석값                     |                           |                            |                              |                            | 모델 분석값                      |                           |                            |                              |                            |
|-------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|
|             | 등장<br>시각<br>(start<br>Time) | 퇴장<br>시각<br>(end<br>Time) | 비<br>생산적                   | 반<br>생산적                     | 생산적                        | 등장<br>시각<br>(start<br>Time) | 퇴장<br>시각<br>(end<br>Time) | 비<br>생산적                   | 반<br>생산적                     | 생산적                        |
|             |                             |                           | 유휴<br>시간<br>(idle<br>Time) | 주행<br>시간<br>(travel<br>Time) | 상차<br>시간<br>(load<br>Time) |                             |                           | 유휴<br>시간<br>(idle<br>Time) | 주행<br>시간<br>(travel<br>Time) | 상차<br>시간<br>(load<br>Time) |
| 1           | 123                         | 265                       | 22.5                       | 9.5                          | 110                        | 123.8                       | 266.9                     | 21.9                       | 10.2                         | 109.3                      |
| 2           | 168                         | 423                       | 122                        | 10                           | 123                        | 169.3                       | 422.1                     | 121.6                      | 8.8                          | 122.6                      |
| 3           | 314                         | 540                       | 116.5                      | 11                           | 98.5                       | 314.3                       | 542.2                     | 115.7                      | 9.2                          | 98.4                       |
| 4           | 470                         | 695                       | 91.5                       | 11                           | 122.5                      | 470.0                       | 694.7                     | 91.4                       | 11.2                         | 122.2                      |
| 5           | 863                         | 1,055                     | 72.5                       | 13                           | 106.5                      | 864.0                       | 1,164.5                   | 69.9                       | 24.0                         | 201.8                      |
| 6           | 1,118                       | 1,295                     | 47.5                       | 12.5                         | 117.5                      | 1,033.8                     | 1,042.2                   | 4.3                        | 4.2                          | 0.0                        |
| 7           | 1,368                       | 1,668                     | 154                        | 10.5                         | 135                        | 1,117.6                     | 1,308.3                   | 72.0                       | 13.0                         | 105.8                      |
| 8           | 1,419                       | 1,694                     | 140                        | 15                           | 120                        | 1,348.7                     | 1,352.1                   | 0.9                        | 2.6                          | 0.0                        |
| 9           | 1,613                       | 1,793                     | 46.5                       | 146                          | 117.5                      | 1,349.1                     | 1,352.7                   | 1.6                        | 2.1                          | 0.0                        |
| 10          | 1,966                       | 2,200                     | 80                         | 22.5                         | 131.5                      | 1,368.5                     | 1,547.9                   | 47.2                       | 11.7                         | 117.6                      |
| 11          | 2,215                       | 2,575                     | 225                        | 17.5                         | 118                        | 1,419.6                     | 1,717.8                   | 153.7                      | 12.3                         | 132.6                      |
| 12          | -                           |                           |                            |                              |                            | 1,613.4                     | 1,887.2                   | 138.4                      | 16.1                         | 119.4                      |
| 13          |                             |                           |                            |                              |                            | 1,719.7                     | 1,724.5                   | 2.0                        | 2.9                          | 0.0                        |
| 14          |                             |                           |                            |                              |                            | 1,966.3                     | 2,144.4                   | 46.2                       | 13.9                         | 118.1                      |
| 15          |                             |                           |                            |                              |                            | 2,214.8                     | 2,486.9                   | 27.2                       | 25.8                         | 217.7                      |
| 정 확도        | -                           |                           |                            |                              |                            | 80.41%                      |                           | 66.24%                     | 63.64%                       | 74.35%                     |
|             |                             |                           |                            |                              |                            | Total: 71.16%               |                           |                            |                              |                            |

표 36. 덤프트럭의 생산성 자동 분석 알고리즘 실행 결과.

(단위: 초)

| 아이디<br>(id) | 등장시각<br>(start<br>Time) | 퇴장시각<br>(end<br>Time) | 비생산적                   | 반생산적                     | 생산적                    | 유휴<br>시간<br>Z-<br>Score | 주행<br>시간<br>Z-<br>Score | 상차<br>시간<br>Z-<br>Score |
|-------------|-------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|             |                         |                       | 유휴시간<br>(idle<br>Time) | 주행시간<br>(travel<br>Time) | 상차시간<br>(load<br>Time) |                         |                         |                         |
| 1           | 123.8                   | 266.9                 | 21.9                   | 10.2                     | 109.3                  | -0.762                  | -0.143                  | 0.173                   |
| 2           | 169.3                   | 422.1                 | 121.6                  | 8.8                      | 122.6                  | 1.186                   | -0.356                  | 0.371                   |
| 3           | 314.3                   | 542.2                 | 115.7                  | 9.2                      | 98.4                   | 1.070                   | -0.290                  | 0.010                   |
| 4           | 470.0                   | 694.7                 | 91.4                   | 11.2                     | 122.2                  | 0.595                   | -0.004                  | 0.366                   |
| 5           | 864.0                   | 1,164.5               | 69.9                   | 24.0                     | 201.8                  | 0.176                   | 1.874                   | 1.554                   |
| 6           | 1,033.8                 | 1,042.2               | 4.3                    | 4.2                      | 0.0                    | -1.107                  | -1.031                  | -1.458                  |
| 7           | 1,117.6                 | 1,308.3               | 72.0                   | 13.0                     | 105.8                  | 0.216                   | 0.267                   | 0.121                   |
| 8           | 1,348.7                 | 1,352.1               | 0.9                    | 2.6                      | 0.0                    | -1.173                  | -1.258                  | -1.458                  |
| 9           | 1,349.1                 | 1,352.7               | 1.6                    | 2.1                      | 0.0                    | -1.159                  | -1.339                  | -1.458                  |
| 10          | 1,368.5                 | 1,547.9               | 47.2                   | 11.7                     | 117.6                  | -0.268                  | 0.077                   | 0.296                   |
| 11          | 1,419.6                 | 1,717.8               | 153.7                  | 12.3                     | 132.6                  | 1.813                   | 0.165                   | 0.521                   |
| 12          | 1,613.4                 | 1,887.2               | 138.4                  | 16.1                     | 119.4                  | 1.513                   | 0.715                   | 0.324                   |
| 13          | 1,719.7                 | 1,724.5               | 2.0                    | 2.9                      | 0.0                    | -1.152                  | -1.214                  | -1.458                  |
| 14          | 1,966.3                 | 2,144.4               | 46.2                   | 13.9                     | 118.1                  | -0.288                  | 0.399                   | 0.305                   |
| 15          | 2,214.8                 | 2,486.9               | 27.2                   | 25.8                     | 217.7                  | -0.659                  | 2.138                   | 1.791                   |
| 평균          | -                       | -                     | 60.9                   | 11.2                     | 97.7                   | -                       | -                       | -                       |
| 표준편차        | -                       | -                     | 51.2                   | 6.8                      | 67                     | -                       | -                       | -                       |

- **골조공사:** 토공사와 마찬가지로 수식 7을 활용하여 플랫폼이 자동으로 분석한 생산성을 전문가가 분석한 생산성과 비교하여 정확도를 평가함. 거푸집 영상에 대한 작업자의 건설작업량 자동 분석 결과는 100%(표 37), 생산성 자동 분석 결과는 73.84%의 정확도(표 38)를 보여 평균 86.92%의 플랫폼 정확도가 도출됨. 표 39는 작업자의 생산성 자동 분석 결과를 보여줌.

표 37. 작업자 건설작업량 자동 분석 결과(거푸집 설치).

| 분석방법    | 작업완료 구역 수 | 작업자가 투입된 시간 | 투입된 작업자 수 | 작업자 건설작업량(작업구역) |
|---------|-----------|-------------|-----------|-----------------|
| 전문가 분석값 | 7         | 1,080초      | 6         | 7               |
| 모델 분석값  | 7         | 1,080초      | 6         | 7               |
| 정확도     | -         | -           | -         | 100%            |

표 38. 작업자 생산성 분석값 비교 결과.

(단위: 초)

| 아이디<br>(id) | 전문가 분석값                     |                           |                            |                              |                                              | 모델 분석값                      |                           |                            |                              |                                              |
|-------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------------------------|
|             | 등장<br>시각<br>(start<br>Time) | 퇴장<br>시각<br>(end<br>Time) | 비<br>생산적                   | 반<br>생산적                     | 생산적                                          | 등장<br>시각<br>(start<br>Time) | 퇴장<br>시각<br>(end<br>Time) | 비<br>생산적                   | 반<br>생산적                     | 생산적                                          |
|             |                             |                           | 유휴<br>시간<br>(idle<br>Time) | 이동<br>시간<br>(travel<br>Time) | 작업<br>시간<br>(Effec<br>-tive<br>Work<br>Time) |                             |                           | 유휴<br>시간<br>(idle<br>Time) | 이동<br>시간<br>(travel<br>Time) | 작업<br>시간<br>(Effec<br>-tive<br>Work<br>Time) |
| 1           | 0                           | 300                       | 89.0                       | 30.0                         | 150.0                                        | 0                           | 300                       | 107.0                      | 23.0                         | 158.0                                        |
| 2           | 0                           | 1,080                     | 62.0                       | 157.0                        | 498.0                                        | 0                           | 1,080                     | 63.0                       | 237.0                        | 513.0                                        |
| 3           | 0                           | 600                       | 11.0                       | 59.0                         | 354.0                                        | 0                           | 600                       | 14.0                       | 119.0                        | 400.0                                        |
| 4           | 0                           | 1,080                     | 50.0                       | 155.0                        | 574.0                                        | 0                           | 1,080                     | 51.0                       | 205.0                        | 702.0                                        |
| 5           | 600                         | 1,080                     | 16.0                       | 25.0                         | 289.0                                        | 600                         | 1,080                     | 17.0                       | 55.0                         | 303.0                                        |
| 6           | 480                         | 1,080                     | 80.0                       | 64.0                         | 401.0                                        | 480                         | 1,080                     | 98.0                       | 73.0                         | 402.0                                        |
| 정확도         | -                           |                           |                            |                              |                                              | -                           |                           | 86.69%                     | 42.95%                       | 91.88%                                       |
|             |                             |                           |                            |                              |                                              | Total: 73.84%               |                           |                            |                              |                                              |

표 39. 작업자의 생산성 자동 분석 알고리즘 실행 결과.

(단위: 초)

| 아이디<br>(id) | 등장시각<br>(start<br>Time) | 퇴장시각<br>(end<br>Time) | 비생산적                   | 반생산적                     | 생산적                             | 유휴<br>시간<br>Z-<br>Score | 이동<br>시간<br>Z-<br>Score | 작업<br>시간<br>Z-<br>Score |
|-------------|-------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------|---------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|             |                         |                       | 유휴시간<br>(idle<br>Time) | 이동시간<br>(travel<br>Time) | 작업시간<br>(Effective<br>WorkTime) |                         |                         |                         |
| 1           | 0                       | 300                   | 107.0                  | 23.0                     | 158.0                           | 1.24                    | -1.12                   | -1.37                   |
| 2           | 0                       | 1,080                 | 63.0                   | 237.0                    | 513.0                           | 0.12                    | 1.38                    | 0.54                    |
| 3           | 0                       | 600                   | 14.0                   | 119.0                    | 400.0                           | -1.13                   | 0.01                    | -0.07                   |
| 4           | 0                       | 1,080                 | 51.0                   | 205.0                    | 702.0                           | -0.19                   | 1.01                    | 1.56                    |
| 5           | 600                     | 1,080                 | 17.0                   | 55.0                     | 303.0                           | -1.03                   | -0.74                   | -0.59                   |
| 6           | 480                     | 1,080                 | 98.0                   | 73.0                     | 402.0                           | 1.01                    | -0.53                   | -0.06                   |
| 평균          | -                       | -                     | 58.3                   | 118.7                    | 413.0                           | -                       | -                       | -                       |
| 표준편차        | -                       | -                     | 39.2                   | 85.7                     | 184.9                           | -                       | -                       | -                       |

- 마감공사: 위의 두 공종과 마찬가지로 플랫폼이 자동으로 분석한 생산성과 전문가가 분석한 생산성을 수식 7을 통해 비교하여 정확도를 평가함. 커튼월 공사의 작업량 자동 분석 결과는 100%(표 40), 생산성 자동 분석 결과는 54.52%의 정확도(표 41)를 보여 평균 77.26%의 플랫폼 정확도를 확보함. 표 42는 패널 인양 및 설치에 대한 생산성 자동 분석 결과를 설명함.

표 40. 패널 건설작업량 자동 분석 결과.

| 분석방법    | 설치 패널의 수 | 패널 설치에 소요된 시간 | 패널 건설작업량 |
|---------|----------|---------------|----------|
| 전문가 분석값 | 7        | 6,128.0초      | 7        |
| 모델 분석값  | 7        | 6,690.7초      | 7        |
| 정확도     | -        | -             | 100%     |

표 41. 패널 생산성 분석값 비교 결과.

(단위: 초)

| 아이디<br>(id) | 전문가 분석값                     |                           |                            |                                        | 모델 분석값                                      |                           |                            |                                        |
|-------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------------------|
|             | 등장<br>시각<br>(start<br>Time) | 퇴장<br>시각<br>(end<br>Time) | 생산적                        |                                        | 등장<br>시각<br>(start<br>Time)                 | 퇴장<br>시각<br>(end<br>Time) | 생산적                        |                                        |
|             |                             |                           | 인양<br>시간<br>(lift<br>Time) | 설치<br>시간<br>(install<br>ation<br>Time) |                                             |                           | 인양<br>시간<br>(lift<br>Time) | 설치<br>시간<br>(install<br>ation<br>Time) |
| 1           | 194.7                       | 1,438.7                   | 70.7                       | 1,173.3                                | 200.0                                       | 1,446.7                   | 52.0                       | 1,194.7                                |
| 2           | 1,439.5                     | 2,454.2                   | 56.0                       | 958.7                                  | 1,447.5                                     | 2,458.2                   | 46.7                       | 964.0                                  |
| 3           | 2,454.9                     | 3,193.5                   | 85.3                       | 653.3                                  | 2,458.9                                     | 3,193.6                   | 80.0                       | 654.7                                  |
| 4           | 3,193.9                     | 4,372.6                   | 32.0                       | 1,146.7                                | 3,194.0                                     | 4,343.4                   | 18.7                       | 1,130.7                                |
| 5           | 4,373.0                     | 5,453.0                   | 24.0                       | 1,056.0                                | 4,343.8                                     | 5,447.8                   | 53.3                       | 1,050.7                                |
| 6           | 5,453.3                     | 6,488.0                   | 50.7                       | 984.0                                  | 5,448.1                                     | 6,485.4                   | 29.3                       | 1,008.0                                |
| 7           | 6,488.4                     | 6,941.8                   | 82.7                       | 370.7                                  | 6,485.8                                     | 6,893.8                   | 37.3                       | 370.7                                  |
| 정확도         |                             |                           |                            |                                        | 54.63%    63.83%    51.47%<br>Total: 54.52% |                           |                            |                                        |

표 42. 패널의 생산성 자동 분석 알고리즘 실행 결과.

(단위: 초)

| 아이디<br>(id) | 등장시각<br>(start<br>Time) | 퇴장시각<br>(end<br>Time) | 생산적                    |                                | 인양<br>시간<br>Z-<br>Score | 설치<br>시간<br>Z-<br>Score |
|-------------|-------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------|-------------------------|-------------------------|
|             |                         |                       | 인양시간<br>(lift<br>Time) | 설치시간<br>(installation<br>Time) |                         |                         |
| 1           | 200.0                   | 1,446.7               | 52.0                   | 1,194.7                        | 0.338                   | 0.967                   |
| 2           | 1,447.5                 | 2,458.2               | 46.7                   | 964.0                          | 0.069                   | 0.182                   |
| 3           | 2,458.9                 | 3,193.6               | 80.0                   | 654.7                          | 1.755                   | -0.871                  |
| 4           | 3,194.0                 | 4,343.4               | 18.7                   | 1,130.7                        | -1.348                  | 0.749                   |
| 5           | 4,343.8                 | 5,447.8               | 53.3                   | 1,050.7                        | 0.403                   | 0.477                   |
| 6           | 5,448.1                 | 6,485.4               | 29.3                   | 1,008.0                        | -0.811                  | 0.332                   |
| 7           | 6,485.8                 | 6,893.8               | 37.3                   | 370.7                          | -0.406                  | -1.837                  |
| 평균          | -                       | -                     | 45.3                   | 910.5                          | -                       | -                       |
| 표준편차        | -                       | -                     | 19.8                   | 293.9                          | -                       | -                       |

- 앞서 설명한 정확도 평가결과를 요약하면 아래 표 43과 같으며 성능 개선을 위해 추가적인 보완이 필요함이 확인됨.

표 43. 초기 생산성 분석 정확도 결과.

| 정확도       | 토공사    | 골조공사    | 마감공사    | 평균            |
|-----------|--------|---------|---------|---------------|
| 건설작업량 분석값 | 63.64% | 100.00% | 100.00% | 87.88%        |
| 생산성 분석값   | 71.16% | 73.84%  | 54.52%  | 66.51%        |
| 평균        | 67.40% | 86.92%  | 77.26%  | <b>77.19%</b> |

• (2) 생산성 자동 분석 알고리즘 문제점 분석 및 개선

- 토공사: 기존 알고리즘은 덤프트럭 간의 중첩으로 인한 교차가 발생했을 때 새로운 ID를 부여하여 인식되는 덤프트럭의 수가 실제 덤프트럭의 수보다 증가하는 경우가 있었음. 예를 들어, 그림 81과 같이 두 대의 덤프트럭이 중첩으로 인해 서로 교차했을 때 추적이 끊어진 덤프트럭의 ID가 변경되는 것을 확인할 수 있음(ID Switch 문제). 이로 인해 실제보다 많은 수의 덤프트럭이 인식됨. 따라서, 생산성 분석 결과에서 상차작업 시간이 존재하지 않는 덤프트럭은 상기한 ID Switch 문제가 발생한 것으로 판단하여 등장 및 퇴장시각을 기준으로 ID를 예측 및 병합하여 추적 오류를 보완하는 알고리즘을 추가 개발함(그림 82).



그림 81. 덤프트럭 추적 오류(덤프트럭의 ID가 지속적으로 인식되지 않은 경우)의 예시.



그림 82. 덤프트럭 추적 오류 보완 후 결과(덤프트럭의 ID가 지속적으로 인식된 경우) 예시.

- 또한, 덤프트럭에 대하여 HCI Learning을 추가 실시하고 CPS DB를 확장하여 덤프트럭을 보다 정확하게 인식할 수 있도록 분석 알고리즘을 개선함. 그 결과, 덤프트럭과 굴삭기의 건설작업량 자동 분석 결과를 100%(표 44), 생산성 자동 분석 결과를 97.50%(표 45)까지 향상하여 전체 플랫폼의 토공사 분석 정확도를 98.75%까지 높임(표 46). 표 47은 구체적인 생산성 분석 결과를 나타냄.

표 44. 덤프트럭, 굴삭기 건설작업량 자동 분석 보완 결과.

| 분석방법    | 덤프트럭 수 | 덤프트럭이 투입된 시간 | 덤프트럭의 적재량 | 덤프트럭, 굴삭기 건설작업량 |
|---------|--------|--------------|-----------|-----------------|
| 전문가 분석값 | 11대    | 2,452초       | 25t       | 275t            |
| 모델 분석값  | 11대    | 2450.9초      | 25t       | 275t            |
| 정확도     | -      | -            | -         | 100%            |

표 45. 보완된 덤프트럭 생산성 분석값 비교 결과.

(단위: 초)

| 아이디<br>(id) | 전문가 분석값                     |                           |                            |                              |                            | 모델 분석값                      |                           |                            |                              |                            |
|-------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|
|             | 등장<br>시각<br>(start<br>Time) | 퇴장<br>시각<br>(end<br>Time) | 비<br>생산적                   | 반<br>생산적                     | 생산적                        | 등장<br>시각<br>(start<br>Time) | 퇴장<br>시각<br>(end<br>Time) | 비<br>생산적                   | 반<br>생산적                     | 생산적                        |
|             |                             |                           | 유휴<br>시간<br>(idle<br>Time) | 주행<br>시간<br>(travel<br>Time) | 상차<br>시간<br>(load<br>Time) |                             |                           | 유휴<br>시간<br>(idle<br>Time) | 주행<br>시간<br>(travel<br>Time) | 상차<br>시간<br>(load<br>Time) |
| 1           | 123                         | 265                       | 22.5                       | 9.5                          | 110.0                      | 123.8                       | 265.2                     | 21.9                       | 10.2                         | 109.3                      |
| 2           | 168                         | 423                       | 122.0                      | 10.0                         | 123.0                      | 169.3                       | 422.2                     | 121.6                      | 8.8                          | 122.6                      |
| 3           | 314                         | 540                       | 116.5                      | 11.0                         | 98.5                       | 314.3                       | 537.5                     | 115.7                      | 9.2                          | 98.4                       |
| 4           | 470                         | 695                       | 91.5                       | 11.0                         | 122.5                      | 470.0                       | 694.7                     | 91.4                       | 11.2                         | 122.2                      |
| 5           | 863                         | 1,055                     | 72.5                       | 13.0                         | 106.5                      | 864.0                       | 1054.8                    | 72.0                       | 13.0                         | 105.8                      |
| 6           | 1,118                       | 1,295                     | 47.5                       | 12.5                         | 117.5                      | 1117.6                      | 1294.1                    | 47.2                       | 11.7                         | 117.6                      |
| 7           | 1,368                       | 1,668                     | 154.0                      | 10.5                         | 135.0                      | 1368.5                      | 1667.1                    | 153.7                      | 12.3                         | 132.6                      |
| 8           | 1,419                       | 1,694                     | 140.0                      | 15.0                         | 120.0                      | 1419.6                      | 1693.4                    | 138.4                      | 16.1                         | 119.4                      |
| 9           | 1,613                       | 1,793                     | 46.5                       | 146.0                        | 117.5                      | 1613.4                      | 1791.6                    | 46.2                       | 13.9                         | 118.1                      |
| 10          | 1,966                       | 2,200                     | 80.0                       | 22.5                         | 131.5                      | 1966.3                      | 2199.7                    | 79.7                       | 23.1                         | 130.6                      |
| 11          | 2,215                       | 2,575                     | 225.0                      | 17.5                         | 118.0                      | 2214.8                      | 2574.6                    | 224.2                      | 18.4                         | 117.4                      |
| 정확도         | -                           |                           |                            |                              |                            | 99.45%                      |                           | 99.27%                     | 91.83%                       | 99.44%                     |
|             |                             |                           |                            |                              |                            | Total: 97.50%               |                           |                            |                              |                            |

표 46. 덤프트럭 생산성 알고리즘 개선 후 정확도 향상률.

|         | 건설 작업량 분석값 | 생산성 분석값 | 평균 정확도 |
|---------|------------|---------|--------|
| 보완 전    | 63.64%     | 71.16%  | 67.40% |
| 보완 후    | 100%       | 97.50%  | 98.75% |
| 정확도 향상률 | 36.36%     | 26.34%  | 31.35% |

표 47. 덤프트럭의 생산성 자동 분석 알고리즘 보완 결과.

(단위: 초)

| 아이디<br>(id) | 등장시간<br>(start Time) | 퇴장시간<br>(end Time) | 비생산적                | 반생산적                  | 생산적                 | 유휴<br>시간<br>Z-<br>Score | 주행<br>시간<br>Z-<br>Score | 상차<br>시간<br>Z-<br>Score |
|-------------|----------------------|--------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|             |                      |                    | 유휴시간<br>(idle Time) | 주행시간<br>(travel Time) | 상차시간<br>(load Time) |                         |                         |                         |
| 1           | 123.8                | 265.2              | 21.9                | 10.2                  | 109.3               | -1.434                  | -0.788                  | -0.863                  |
| 2           | 169.3                | 422.2              | 121.6               | 8.8                   | 122.6               | 0.372                   | -1.142                  | 0.512                   |
| 3           | 314.3                | 537.5              | 115.7               | 9.2                   | 98.4                | 0.265                   | -1.032                  | -1.999                  |
| 4           | 470.0                | 694.7              | 91.4                | 11.2                  | 122.2               | -0.176                  | -0.556                  | 0.475                   |
| 5           | 864.0                | 1,054.8            | 72.0                | 13.0                  | 105.8               | -0.528                  | -0.104                  | -1.226                  |
| 6           | 1,117.6              | 1,294.1            | 47.2                | 11.7                  | 117.6               | -0.976                  | -0.422                  | -0.007                  |
| 7           | 1,368.5              | 1,667.1            | 153.7               | 12.3                  | 132.6               | 0.953                   | -0.275                  | 1.554                   |
| 8           | 1,419.6              | 1,693.4            | 138.4               | 16.1                  | 119.4               | 0.675                   | 0.640                   | 0.185                   |
| 9           | 1,613.4              | 1,791.6            | 46.2                | 13.9                  | 118.1               | -0.994                  | 0.115                   | 0.050                   |
| 10          | 1,966.3              | 2,199.7            | 79.7                | 23.1                  | 130.6               | -0.387                  | 2.361                   | 1.347                   |
| 11          | 2,214.8              | 2,574.6            | 224.2               | 18.4                  | 117.4               | 2.229                   | 1.201                   | -0.028                  |
| 평균          | -                    | -                  | 101.07              | 13.43                 | 117.62              | -                       | -                       | -                       |
| 표준편차        | -                    | -                  | 55.21               | 4.10                  | 9.64                | -                       | -                       | -                       |

- 분석 결과, 생산성 저해요인으로 도출된 덤프트럭의 ID는 7, 10, 11이며 7번 덤프트럭은 상차시간, 10번 덤프트럭은 주행시간과 상차시간, 11번 덤프트럭은 유휴시간이 이상치를 가진 것으로 분석됨. 실제 영상을 확인한 결과, 7번 덤프트럭의 경우 다른 덤프트럭들에 비해 상차에 비교적 오랜 시간이 소요됨. 10번 덤프트럭은 상차작업을 위해 굴삭기 근처에 주차하기까지의 시간이 다른 덤프트럭에 비해 오랜 시간이 걸렸으며, 이로 인해 다음 순서인 11번 덤프트럭의 대기(유휴) 시간이 길어짐을 확인함. 이를 통해 토공사 생산성 자동 분석 알고리즘이 성공적으로 보완되었음을 확인함.
- **골조공사:** 기존에는 작업자의 생산적/비생산적 행동을 판단하기 위해 광학흐름(Optical Flow)을 분석하였음(49쪽 참고). 하지만 이것만으로는 같은 위치에서 작업하는 작업자의 행동 변화를 정확하게 분석함에 한계가 있어 추적된 작업자의 가로세로 비율(Aspect Ratio)의 변화 또한 추가로 고려하도록 알고리즘을 개선함. 개선된 알고리즘은 다수의 작업자를 동시에 추적할 때도 만족할만한 성능을 보였음(그림 83).

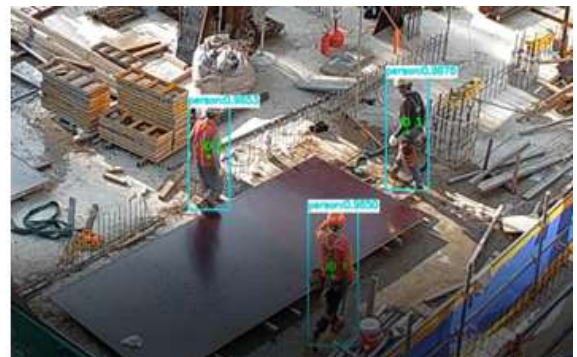


그림 83. Aspect Ratio와 Optical Flow를 활용해 개선된 다수 작업자 추적 예시.

- 또한, 기존에는 골조공사 작업 중 거푸집 설치에 대해서만 생산성 분석을 수행했으나, 실제 골조공사 현장에서는 거푸집 설치뿐 아닌 철근 설치나 콘크리트 타설 등의 다양한 작업이

동시다발적으로 진행됨. 이와 같은 골조공사의 생산성을 구체적으로 파악하기 위해 작업별 현장 DB를 추가하였으며, 영상에서 작업구역을 설정하는 알고리즘(Zone Classification)을 추가하여 골조공사 생산성 분석 알고리즘을 보완함. 앞서 수행한 거푸집 설치 생산성 분석에 더해 추가로 분석한 영상은 철근 설치와 콘크리트 타설을 동시에 수행하는 현장의 영상이었으며, 분석 결과 개발 플랫폼의 정확도는 92.15%가 도출됨. 구체적으로, 작업자 건설작업량 분석 정확도는 각각 100%(거푸집 설치), 100%(철근 설치), 100%(콘크리트 타설)였으며, 생산성 자동 분석 결과는 73.84%(거푸집 설치), 89.47%(철근 설치), 89.60%(콘크리트 타설)가 도출됨. 자세한 결과는 표 48~51과 같음.

표 48. 작업자 건설작업량 자동 분석 보완 결과.

| 작업 구분      | 분석방법        | 작업자가 투입된 시간 | 투입된 작업자 수 | 작업자 건설작업량(총 작업시간) |
|------------|-------------|-------------|-----------|-------------------|
| 거푸집<br>설치  | 전문가 분석값     | 1,080초      | 6명        | 6,480초            |
|            | 모델 분석값      | 1,080초      | 6명        | 6,480초            |
|            | 정확도         | -           | -         | 100%              |
| 철근 설치      | 전문가 분석값     | 1,320초      | 14명       | 18,480초           |
|            | 모델 분석값      | 1,320초      | 14명       | 18,480초           |
|            | 정확도         | -           | -         | 100%              |
| 콘크리트<br>타설 | 전문가 분석값     | 1,080초      | 5명        | 5,400초            |
|            | 모델 분석값      | 1,080초      | 5명        | 5,400초            |
|            | 정확도         | -           | -         | 100%              |
| 종합         | Total: 100% |             |           |                   |

표 49. 보완된 작업자 생산성 분석값 비교 결과.

(단위: 초)

| 아이디<br>(id)   |     | 전문가 분석값                     |                           |                            |                              |                                              | 모델 분석값                      |                           |                            |                              |                                              |
|---------------|-----|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------------------------|
|               |     | 등장<br>시각<br>(start<br>Time) | 퇴장<br>시각<br>(end<br>Time) | 비<br>생산적                   | 반<br>생산적                     | 생산적                                          | 등장<br>시각<br>(start<br>Time) | 퇴장<br>시각<br>(end<br>Time) | 비<br>생산적                   | 반<br>생산적                     | 생산적                                          |
|               |     |                             |                           | 유휴<br>시간<br>(idle<br>Time) | 이동<br>시간<br>(travel<br>Time) | 작업<br>시간<br>(Effec-<br>tive<br>Work<br>Time) |                             |                           | 유휴시<br>간<br>(idle<br>Time) | 이동시<br>간<br>(travel<br>Time) | 작업<br>시간<br>(Effec-<br>tive<br>Work<br>Time) |
| 거푸집설치         | 1   | 0                           | 300                       | 89.0                       | 30.0                         | 150.0                                        | 0                           | 300                       | 107.0                      | 23.0                         | 158.0                                        |
|               | 2   | 0                           | 1,080                     | 62.0                       | 157.0                        | 498.0                                        | 0                           | 1,080                     | 63.0                       | 237.0                        | 513.0                                        |
|               | 3   | 0                           | 600                       | 11.0                       | 59.0                         | 354.0                                        | 0                           | 600                       | 14.0                       | 119.0                        | 400.0                                        |
|               | 4   | 0                           | 1,080                     | 50.0                       | 155.0                        | 574.0                                        | 0                           | 1,080                     | 51.0                       | 205.0                        | 702.0                                        |
|               | 5   | 600                         | 1,080                     | 16.0                       | 25.0                         | 289.0                                        | 600                         | 1,080                     | 17.0                       | 55.0                         | 303.0                                        |
|               | 6   | 480                         | 1,080                     | 80.0                       | 64.0                         | 401.0                                        | 480                         | 1,080                     | 98.0                       | 73.0                         | 402.0                                        |
|               | 정확도 | -                           |                           |                            |                              |                                              | -                           |                           | 86.69%                     | 42.95%                       | 91.88%                                       |
| Total: 73.84% |     |                             |                           |                            |                              |                                              |                             |                           |                            |                              |                                              |
| 철근설치          | 1   | 0                           | 1,140                     | 10.0                       | 316.0                        | 813.0                                        | 0                           | 1,140                     | 9.0                        | 303.0                        | 828.0                                        |
|               | 2   | 0                           | 780                       | 27.0                       | 273.0                        | 479.0                                        | 0                           | 780                       | 20.0                       | 357.0                        | 403.0                                        |
|               | 3   | 0                           | 1,320                     | 28.0                       | 201.0                        | 1,091.0                                      | 0                           | 1,320                     | 23.0                       | 199.0                        | 1,098.0                                      |
|               | 4   | 0                           | 1,320                     | 6.0                        | 178.0                        | 1,135.0                                      | 0                           | 1,320                     | 7.0                        | 181.0                        | 1,132.0                                      |
|               | 5   | 0                           | 1,140                     | 0.0                        | 344.0                        | 795.0                                        | 0                           | 1,140                     | 0.0                        | 445.0                        | 695.0                                        |
|               | 6   | 120                         | 1,080                     | 53.0                       | 193.0                        | 714.0                                        | 120                         | 1,080                     | 24.0                       | 281.0                        | 655.0                                        |
|               | 7   | 240                         | 960                       | 173.0                      | 138.0                        | 409.0                                        | 240                         | 960                       | 157.0                      | 202.0                        | 361.0                                        |
|               | 8   | 360                         | 1,140                     | 114.0                      | 215.0                        | 451.0                                        | 360                         | 1,140                     | 122.0                      | 262.0                        | 396.0                                        |
|               | 9   | 120                         | 240                       | 0.0                        | 120.0                        | 0.0                                          | 120                         | 240                       | 0.0                        | 120.0                        | 0.0                                          |
|               | 10  | 240                         | 600                       | 0.0                        | 334.0                        | 26.0                                         | 240                         | 600                       | 0.0                        | 347.0                        | 13.0                                         |
|               | 11  | 240                         | 300                       | 0.0                        | 60.0                         | 0.0                                          | 240                         | 300                       | 0.0                        | 60.0                         | 0.0                                          |
|               | 12  | 1,200                       | 1,260                     | 0.0                        | 18.0                         | 42.0                                         | 1,200                       | 1,260                     | 0.0                        | 18.0                         | 42.0                                         |
|               | 13  | 600                         | 1,200                     | 0.0                        | 472.0                        | 128                                          | 600                         | 1,200                     | 0.0                        | 475.0                        | 125.0                                        |
|               | 14  | 1,200                       | 1,320                     | 0.0                        | 120.0                        | 0.0                                          | 1,200                       | 1,320                     | 0.0                        | 120.0                        | 0.0                                          |
|               | 정확도 | -                           |                           |                            |                              |                                              | -                           |                           | 89.90%                     | 86.77%                       | 91.73%                                       |
| Total: 89.47% |     |                             |                           |                            |                              |                                              |                             |                           |                            |                              |                                              |
| 콘크리트타설        | 1   | 0                           | 1,140                     | 665.0                      | 103.0                        | 312.0                                        | 0                           | 1,140                     | 640.0                      | 179.0                        | 260.0                                        |
|               | 2   | 0                           | 1,140                     | 482.0                      | 200.0                        | 458.0                                        | 0                           | 1,140                     | 407.0                      | 217.0                        | 516.0                                        |
|               | 3   | 0                           | 1,140                     | 658.0                      | 90.0                         | 392.0                                        | 0                           | 1,140                     | 562.0                      | 90.0                         | 488.0                                        |
|               | 4   | 0                           | 780                       | 241.0                      | 153.0                        | 385.0                                        | 0                           | 780                       | 178.0                      | 239.0                        | 363.0                                        |
|               | 5   | 900                         | 1,080                     | 0.0                        | 180.0                        | 0.0                                          | 900                         | 1,080                     | 0.0                        | 180.0                        | 0.0                                          |
|               | 정확도 | -                           |                           |                            |                              |                                              | -                           |                           | 93.62%                     | 86.10%                       | 89.08%                                       |
| Total: 89.60% |     |                             |                           |                            |                              |                                              |                             |                           |                            |                              |                                              |
| 종합            |     | Total: 84.30%               |                           |                            |                              |                                              |                             |                           |                            |                              |                                              |

표 50. 작업자 생산성 알고리즘 개선 후 정확도 향상률.

|         | 건설 작업량 분석값 | 생산성 분석값 | 평균 정확도 |
|---------|------------|---------|--------|
| 보완 전    | 100%       | 73.84%  | 86.92% |
| 보완 후    | 100%       | 84.30%  | 92.15% |
| 정확도 향상률 | -          | 10.46%  | 5.23%  |

표 51. 작업자의 생산성 자동 분석 알고리즘 보완 결과.

(단위: 초)

| 아이디<br>(id) |      | 등장시간<br>(start<br>Time) | 퇴장시간<br>(end<br>Time) | 비생산적                   | 반생산적                     | 생산적                                 | 유휴<br>시간<br>Z-<br>Score | 이동<br>시간<br>Z-<br>Score | 작업<br>시간<br>Z-<br>Score |
|-------------|------|-------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|             |      |                         |                       | 유휴시간<br>(idle<br>Time) | 이동시간<br>(travel<br>Time) | 작업시간<br>(Effective<br>Work<br>Time) |                         |                         |                         |
| 거푸집설치       | 1    | 0                       | 300                   | 107.0                  | 23.0                     | 158.0                               | 1.24                    | -1.12                   | -1.37                   |
|             | 2    | 0                       | 1,080                 | 63.0                   | 237.0                    | 513.0                               | 0.12                    | 1.38                    | 0.54                    |
|             | 3    | 0                       | 600                   | 14.0                   | 119.0                    | 400.0                               | -1.13                   | 0.01                    | -0.07                   |
|             | 4    | 0                       | 1,080                 | 51.0                   | 205.0                    | 702.0                               | -0.19                   | 1.01                    | 1.56                    |
|             | 5    | 600                     | 1,080                 | 17.0                   | 55.0                     | 303.0                               | -1.03                   | -0.74                   | -0.59                   |
|             | 6    | 480                     | 1,080                 | 98.0                   | 73.0                     | 402.0                               | 1.01                    | -0.53                   | -0.06                   |
|             | 평균   |                         |                       | 58.3                   | 118.7                    | 413.0                               | -                       | -                       | -                       |
|             | 표준편차 |                         |                       | 39.2                   | 85.7                     | 184.9                               | -                       | -                       | -                       |
| 철근설치        | 1    | 0                       | 1,140                 | 9.0                    | 303.0                    | 828.0                               | -0.34                   | 0.45                    | 1.02                    |
|             | 2    | 0                       | 780                   | 20.0                   | 357.0                    | 403.0                               | -0.12                   | 0.85                    | -0.02                   |
|             | 3    | 0                       | 1,320                 | 23.0                   | 199.0                    | 1098.0                              | -0.06                   | -0.30                   | 1.67                    |
|             | 4    | 0                       | 1,320                 | 7.0                    | 181.0                    | 1132.0                              | -0.38                   | -0.43                   | 1.76                    |
|             | 5    | 0                       | 1,140                 | 0.0                    | 445.0                    | 695.0                               | -0.52                   | 1.49                    | 0.69                    |
|             | 6    | 120                     | 1,080                 | 24.0                   | 281.0                    | 655.0                               | -0.04                   | 0.29                    | 0.60                    |
|             | 7    | 240                     | 960                   | 157.0                  | 202.0                    | 361.0                               | 2.65                    | -0.28                   | -0.12                   |
|             | 8    | 360                     | 1,140                 | 122.0                  | 262.0                    | 396.0                               | 1.94                    | 0.15                    | -0.04                   |
|             | 9    | 120                     | 240                   | 0.0                    | 120.0                    | 0.0                                 | -0.52                   | -0.88                   | -1.00                   |
|             | 10   | 240                     | 600                   | 0.0                    | 347.0                    | 13.0                                | -0.52                   | 0.77                    | -0.97                   |
|             | 11   | 240                     | 300                   | 0.0                    | 60.0                     | 0.0                                 | -0.52                   | -1.31                   | -1.00                   |
|             | 12   | 1,200                   | 1,260                 | 0.0                    | 18.0                     | 42.0                                | -0.52                   | -1.62                   | -0.90                   |
|             | 13   | 600                     | 1,200                 | 0.0                    | 475.0                    | 125.0                               | -0.52                   | 1.70                    | -0.70                   |
|             | 14   | 1,200                   | 1,320                 | 0.0                    | 120.0                    | 0.0                                 | -0.52                   | -0.88                   | -1.00                   |
|             | 평균   |                         |                       | 25.9                   | 240.7                    | 410.6                               | -                       | -                       | -                       |
|             | 표준편차 |                         |                       | 49.5                   | 137.5                    | 410.6                               | -                       | -                       | -                       |
| 콘크리트타설      | 1    | 0                       | 1,140                 | 640.0                  | 179.0                    | 260.0                               | 1.06                    | -0.04                   | -0.31                   |
|             | 2    | 0                       | 1,140                 | 407.0                  | 217.0                    | 516.0                               | 0.19                    | 0.63                    | 0.91                    |
|             | 3    | 0                       | 1,140                 | 562.0                  | 90.0                     | 488.0                               | 0.77                    | -1.60                   | 0.78                    |
|             | 4    | 0                       | 780                   | 178.0                  | 239.0                    | 363.0                               | -0.67                   | 1.02                    | 0.18                    |
|             | 5    | 900                     | 1,080                 | 0.0                    | 180.0                    | 0.0                                 | -1.34                   | -0.01                   | -1.56                   |
|             | 평균   |                         |                       | 357.4                  | 181.0                    | 325.4                               | -                       | -                       | -                       |
|             | 표준편차 |                         |                       | 266.5                  | 56.9                     | 208.8                               | -                       | -                       | -                       |

- 작업자의 경우, 장비나 자재와는 달리 특정 작업에 대한 작업량이 고정된 값이 아님. 그러므로 한 작업량에 대해 생산적인 작업을 오랫동안 하는 것으로 이상치를 판별할 수 없어, 작업구역 내에서 생산적으로 일하는 시간이 다른 작업자에 비해 짧은 경우를 이상치로 설정함. 동일한 이유로 유휴시간과 이동시간은 반대로 비교적 큰 값을 이상치로 설정함. 결과의 예를 보면, 생산성 저해요인으로 도출된 작업자의 경우 철근 설치 시 5, 7, 8, 13의 ID를 가진 작업자인 것으로 분석됨. 실제로, 철근 설치의 경우 7, 8번 작업자가 다른 작업자들에 비해 생산적인 작업을 덜

수행했으며, 5, 13번 작업자는 지속적으로 이동을 하며 특정 위치에 머물러 작업하지 않은 것을 볼 수 있었음. 이를 통해 골조공사 생산성 자동 분석 알고리즘 또한 성공적으로 보완되었음을 파악할 수 있음.

- **마감공사:** 앞선 생산성 분석 결과에서는 모델이 분석한 커튼월 패널의 결속·설치시간이 전문가가 분석한 값보다 길게 도출됨. 이는 패널 단일 객체를 추적하여 생산성 분석을 수행했을 때 나타나는 문제로, 예를 들면 이미 설치된 패널을 다음 ID의 패널이 등장하기 전까지 계속해서 ‘설치’ 상태로 오분류하기 때문임(그림 84). 이를 해결하기 위해 패널 설치에 사용되는 대표적인 중장비인 크레인을 추가로 분석하기로 했으며, 특히 크레인의 움직임에 대표할 수 있는 크레인 훅(Hook)에 대해 객체 인식을 수행함. 그림 85는 학습에 활용하기 위해 추가로 구축한 크레인 훅의 CPS 데이터 예시이며, 이를 활용하여 기존의 패널 생산성 분석 알고리즘을 보완함. 새로운 분석 객체를 추가함으로써, 기존의 생산성 분석에서 고려했던 작업상태인 ‘인양’, ‘설치’뿐만이 아닌 2차년도 표준분류체계에서 정의한 ‘결속’과 ‘복귀’까지 총 4개의 행동으로 생산성을 분류하여 인식되지 않은 오류를 보완함(그림 86).



그림 84. 패널 인식 오류 예시(좌: 복귀를 결속으로 오분류, 우: 인양을 설치로 오분류).



그림 85. 크레인 훅 CPS 데이터 구축 예시.



그림 86. 패널 인식 알고리즘 보완 예시.

- 또한, 새로운 DB 구축 과정에서 패널과 크레인 훅 두 객체의 CPS 데이터를 현장 배경사진과 Cross-Oversampling하여 분석하고자 하는 현장에 모델을 최적화함으로써 분석 알고리즘을 보완함.

그 결과 개발 플랫폼의 정확도는 96.80%가 도출되었으며, 구체적으로 커튼월 공사 작업량 분석은 100.0%, 생산성 자동 분석 결과는 93.60%의 정확도를 확보함. 자세한 결과는 표 52-55와 같음.

표 52. 패널 건설작업량 자동 분석 결과.

| 분석방법    | 설치 패널의 수 | 패널 설치에 소요된 시간 | 패널 건설작업량 |
|---------|----------|---------------|----------|
| 전문가 분석값 | 7        | 6,128.0초      | 7        |
| 모델 분석값  | 7        | 6,118.7초      | 7        |
| 정확도     | -        | -             | 100%     |

표 53. 보완된 패널 생산성 분석값 비교 결과.

(단위: 초)

| 아이디<br>(id) | 전문가 분석값                     |                           |                            |                            |                                         |                             | 모델 분석값                      |                           |                            |                            |                                         |                             |
|-------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------|
|             | 등장<br>시간<br>(start<br>Time) | 퇴장<br>시간<br>(end<br>Time) | 비<br>생산적                   | 생산적                        |                                         |                             | 등장<br>시간<br>(start<br>Time) | 퇴장<br>시간<br>(end<br>Time) | 비<br>생산적                   | 생산적                        |                                         |                             |
|             |                             |                           | 결속<br>시간<br>(idle<br>Time) | 인양<br>시간<br>(lift<br>Time) | 설치<br>시간<br>(installa-<br>tion<br>Time) | 복귀<br>시간<br>(swing<br>Time) |                             |                           | 결속<br>시간<br>(idle<br>Time) | 인양<br>시간<br>(lift<br>Time) | 설치<br>시간<br>(installa-<br>tion<br>Time) | 복귀<br>시간<br>(swing<br>Time) |
| 1           | 194.7                       | 800.0                     | 194.7                      | 70.7                       | 524.0                                   | 6.0                         | 200.0                       | 793.3                     | 200.0                      | 60.0                       | 530.0                                   | 6.0                         |
| 2           | 1,438.7                     | 2,186.7                   | 638.7                      | 56.0                       | 681.3                                   | 10.7                        | 1,446.7                     | 2,180.0                   | 653.3                      | 50.0                       | 681.3                                   | 8.7                         |
| 3           | 2,453.3                     | 2,746.7                   | 266.7                      | 85.3                       | 198.7                                   | 9.3                         | 2,457.3                     | 2,742.7                   | 277.3                      | 80.0                       | 198.7                                   | 8.3                         |
| 4           | 3,192.0                     | 3,917.3                   | 445.3                      | 32.0                       | 674.7                                   | 18.7                        | 3,192.0                     | 3,912.0                   | 449.3                      | 27.7                       | 688.0                                   | 16.0                        |
| 5           | 4,370.7                     | 4,909.3                   | 453.3                      | 24.0                       | 488.0                                   | 26.7                        | 4,341.3                     | 4,898.7                   | 429.3                      | 23.0                       | 485.3                                   | 21.7                        |
| 6           | 5,450.7                     | 5,944.0                   | 541.3                      | 50.7                       | 432.0                                   | 10.7                        | 5,445.3                     | 5,938.7                   | 546.7                      | 49.7                       | 453.3                                   | 10.7                        |
| 7           | 6,485.3                     | 6,768.0                   | 541.3                      | 82.7                       | 186.7                                   | 13.3                        | 6,482.7                     | 6,768.0                   | 544.0                      | 80.0                       | 231.7                                   | 15.0                        |
| 정확도         | -                           |                           |                            |                            |                                         |                             | -                           |                           | 97.61%                     | 92.16%                     | 95.33%                                  | 89.29%                      |
|             |                             |                           |                            |                            |                                         |                             | Total: 93.60%               |                           |                            |                            |                                         |                             |

표 54. 패널 생산성 알고리즘 개선 후 정확도 향상률.

|         | 건설 작업량 분석값 | 생산성 분석값 | 평균 정확도 |
|---------|------------|---------|--------|
| 보완 전    | 100%       | 54.52%  | 77.26% |
| 보완 후    | 100%       | 93.60%  | 96.80% |
| 정확도 향상률 | -          | 39.08%  | 19.54% |

표 55. 패널의 생산성 자동 분석 알고리즘 보완 결과.

(단위: 초)

| 아이디<br>(id) | 등장<br>시간<br>(start<br>Time) | 퇴장<br>시간<br>(end<br>Time) | 반생산적                       | 생산적                        |                                        |                             | 결속<br>시간<br>Z-<br>Score | 인양<br>시간<br>Z-<br>Score | 설치<br>시간<br>Z-<br>Score | 복귀<br>시간<br>Z-<br>Score |
|-------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|             |                             |                           | 결속<br>시간<br>(idle<br>Time) | 인양<br>시간<br>(lift<br>Time) | 설치<br>시간<br>(install<br>ation<br>Time) | 복귀<br>시간<br>(swing<br>Time) |                         |                         |                         |                         |
| 1           | 200.0                       | 793.3                     | 200.0                      | 52.0                       | 537.3                                  | 4.0                         | -1.526                  | 0.337                   | 0.356                   | -1.190                  |
| 2           | 1,446.7                     | 2,180.0                   | 653.3                      | 46.7                       | 681.3                                  | 5.3                         | 1.323                   | 0.067                   | 1.096                   | -0.952                  |
| 3           | 2,457.3                     | 2,742.7                   | 277.3                      | 80.0                       | 198.7                                  | 6.7                         | -1.040                  | 1.754                   | -1.383                  | -0.714                  |
| 4           | 3,192.0                     | 3,912.0                   | 449.3                      | 18.7                       | 688.0                                  | 13.3                        | 0.041                   | -1.349                  | 1.130                   | 0.476                   |
| 5           | 4,341.3                     | 4,898.7                   | 429.3                      | 53.3                       | 485.3                                  | 18.7                        | -0.085                  | 0.405                   | 0.089                   | 1.427                   |
| 6           | 5,445.3                     | 5,938.7                   | 546.7                      | 29.3                       | 453.3                                  | 10.7                        | 0.652                   | -0.810                  | -0.075                  | 0.000                   |
| 7           | 6,482.7                     | 6,768.0                   | 544.0                      | 37.3                       | 232.0                                  | 16.0                        | 0.636                   | -0.405                  | -1.212                  | 0.952                   |
| 평균          | -                           | -                         | 442.86                     | 45.33                      | 468.00                                 | 10.67                       | -                       | -                       | -                       | -                       |
| 표준편차        | -                           | -                         | 159.12                     | 19.76                      | 194.71                                 | 5.60                        | -                       | -                       | -                       | -                       |

- 생산성 저해요인으로 도출된 패널 ID는 2, 3, 5이며 5번 패널은 결속시간, 3번 패널은 인양시간, 5번 패널은 복귀시간이 이상치를 가진 것으로 분석됨. 실제로 2번 패널의 경우 다른 패널들에 비해 결속시간이 비교적 오래 걸렸으며, 3번 패널의 경우 설치 대상 위치로 이동하는 경로가 다른 패널들에 비해 우회되고 길었음. 5번 패널의 경우 설치 이후 패널과의 결속 해체에 시간이 오래 걸려 크레인 혹은 복귀시간이 지연되는 것을 확인함. 이를 통해 마찬가지로 마감공사의 생산성 자동 분석 알고리즘도 성공적으로 보완되었음을 확인할 수 있었음.
- 결론적으로, 기존의 공종별 생산성 자동 분석 알고리즘이 초래한 문제점을 확인하고 이를 개선하여 기존 분석 모델의 성능을 향상시킴. 그 결과 플랫폼의 정확도는 보완 후 토공사에서 31.35%, 골조공사에서 5.23%, 마감공사에서 19.54% 증가했으며, 정확도가 평균 18.71% 향상됨. 구체적인 결과는 아래 표 56과 같음.

표 56. 생산성 분석 보완 후 정확도 결과.

| 정확도       | 토공사    | 골조공사   | 마감공사   | 평균     |
|-----------|--------|--------|--------|--------|
| 건설작업량 분석값 | 100%   | 100%   | 100%   | 100%   |
| 생산성 분석값   | 97.50% | 84.30% | 93.60% | 91.80% |
| 평균        | 98.75% | 92.15% | 96.80% | 95.90% |
| 보완 전 평균   | 67.40% | 86.92% | 77.26% | 77.19% |
| 정확도 향상률   | 31.35% | 5.23%  | 19.54% | 18.71% |

## 2. 생산성 향상 정도 분석 및 플랫폼 사용도 만족도 조사

### • (1) 공종별 시뮬레이션 모델 구축

- 본 연구가 목표로 하는 생산성 20% 향상은 소요시간 20% 단축을 의미하며, 생산성 향상 정도를 파악하기 위해 앞선 실험에서 파악된 이상치에 따른 생산성 저해요인을 제거하기 전과 후의 생산성을 비교하는 시뮬레이션을 수행함. 시뮬레이션을 위해 Symphony.NET 프로그램을 활용하여 실험영상이 보여준 공종별 작업프로세스를 모델링하였음. Symphony.NET은 University of Alberta의 Simaan AbouRizk 박사와 Danny Hajjar 박사가 개발한 Visual Basic과 C# 프로그래밍 언어 기반 시뮬레이션 프로그램으로, 템플릿 배치를 자유롭게 하여 시뮬레이션 모델을 구축할 수 있는 유저인터페이스(그림 87)임. 이를 통해 대부분의 건설 작업에 대한 모델링이 가능하며, Symphony.NET은 다양한 통계분석 기능도 제공함. 각 공종에 대한 시뮬레이션 모델은 다음과 같이 구축되었음.

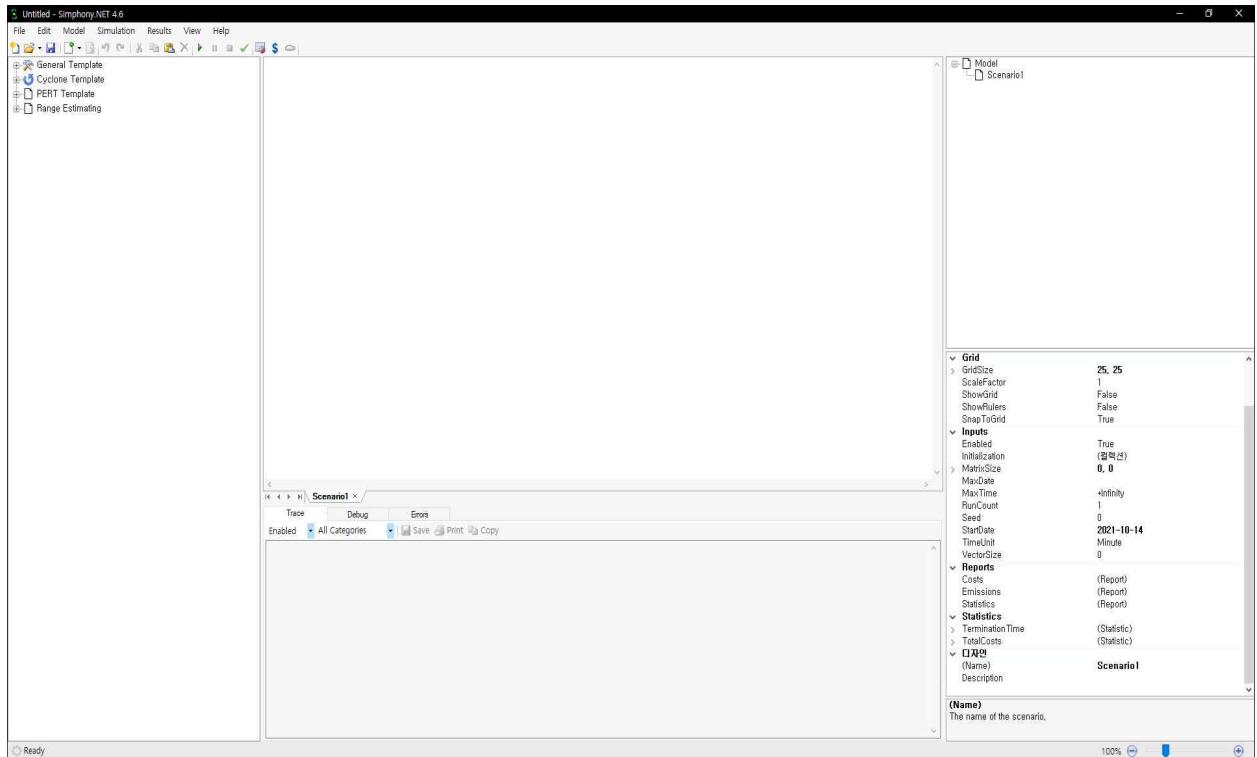


그림 87. Simphony.NET의 구동 예시.

- **토공사:** 덤프트럭에 의해 운반된 토공량을 건설작업량으로 설정하였으며, 건설작업량과 모든 작업량을 소화하는데 필요한 소요시간은 상차작업에 참여한 덤프트럭 수에 비례하므로 생산성 분석의 기준을 토랑 운반에 참여한 덤프트럭의 수로 지정함. 이에 따라 토공사 생산성 시뮬레이션을 위해 덤프트럭을 모델의 객체로 입력하였으며, 모델링 예시(덤프트럭 입장 → 상차구역으로의 이동 → 상차 대기 → 상차 → 퇴장)는 그림 88과 같음. 시뮬레이션은 전체 작업을 마무리하는데 소요되는 덤프트럭의 수를 결과값으로 도출함.

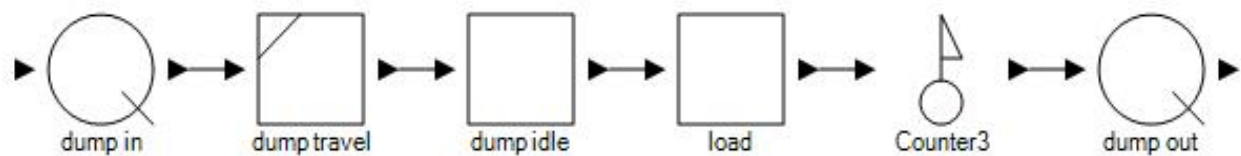


그림 88. 토공사 생산성 시뮬레이션을 위한 모델링 예시.

- **골조공사:** 거푸집 설치, 철근 설치, 콘크리트 타설의 골조공사 순서를 기준으로 모델링 하였으며, 이때 생산성은 분석한 영상과 같은 골조공사를 완료하는데 걸리는 총 시간(시뮬레이션의 결과값)으로 정의할 수 있음. 이에 따라 골조공사 세부작업 단위를 객체로 모델을 구성함(그림 89, 작업개시 → 거푸집 설치 → 철근 설치 → 콘크리트 타설 → 작업종료).

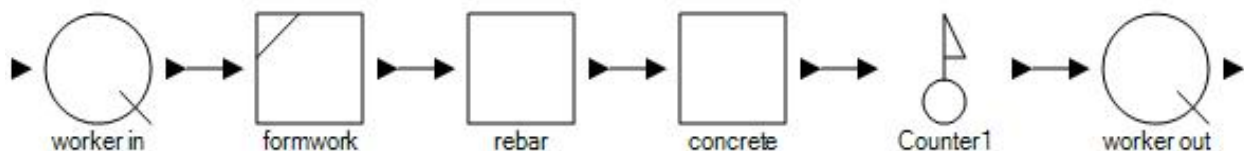


그림 89. 골조공사 생산성 시뮬레이션을 위한 모델링 예시.

- **마감공사:** 커튼월 패널 설치 순서를 기준으로 모델링을 하였으며, 이때 패널의 설치 개수를 건설작업량으로 정의할 수 있음. 생산성의 기준은 패널 1개를 설치하는 데 소요되는 시간(시뮬레이션의 결과값)으로 정의되며 이를 위해 패널을 모델의 객체로 입력함(그림 90, 작업개시 → 결속 → 인양 → 설치 → 흙 복귀 → 패널 고정).

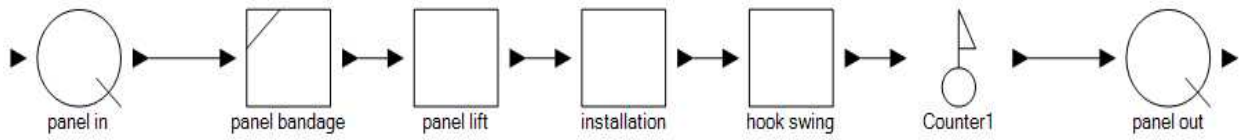


그림 90. 마감공사 생산성 시뮬레이션을 위한 모델링 예시.

• (2) 생산성 저해요인 제거 전과 후에 대한 시뮬레이션 결과 비교

- 시뮬레이션 모델은 투입되는 건설자원이 개별작업을 마무리하는데 소요되는 시간을 확률분포로 입력하여 생산성을 계산함. 입력값을 위해 다양한 확률분포 중 모집단 수가 작고 편차가 큰 생산성 데이터의 특성을 반영할 수 있는 삼각분포를 활용함. 삼각분포는 (최솟값, 최댓값, 발생 가능성이 가장 높은 값)으로 표현되며, 이에 따라 각 공종에 대한 시뮬레이션 입력값을 (최솟값, 최댓값, 평균값)으로 변환하여 입력함. 공종별 구체적인 입력 변수값은 다음과 같음.
- **토공사:** 생산성 저해요소 제거 전에 대한 입력변수는 실험결과를 바탕으로 덤프트럭 운행(travel)(21.9, 224.2, 101.07), 유휴(idle)(8.8, 23.1, 13.43), 상차(load)(98.4, 132.6, 117.62)를 입력함. 단위는 ‘초’임. 생산성 저해요소 제거 후 시뮬레이션 모델의 입력변수는 이상치를 제거한 데이터의 최솟값, 최댓값, 평균값을 활용함. 구체적으로, 덤프트럭 운행(21.9, 138.4, 81.78), 유휴(8.8, 16.1, 11.74), 상차(98.4, 122.6, 114.16)의 변수를 입력함. 시뮬레이션을 수행한 결과는 평균 투입 덤프트럭으로 표현됨. 그림 91과 같이 생산성 저해요소 제거 후 해당 작업을 수행하는데 필요한 덤프트럭의 대수가 9.325대에서 7.206대로 2.119대만큼 감소하였으며, 결론적으로 생산성이 29.41% 향상됨.

| Statistics Report                                                                                                                                                                                                                                                          |                |                    |                |                |                   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|--------------------|----------------|----------------|-------------------|
| Date: 2021-09-30<br>Project: Model<br>Scenario: Scenario3<br>Run: All Runs (of 100)                                                                                                                                                                                        |                |                    |                |                |                   |
| Note: When summarized across all runs, the mean value reported for a statistic is the mean of the means of each run; the minimum value reported is the minimum of the means of each run; the maximum value reported is the maximum of the means of each run; and so forth. |                |                    |                |                |                   |
| Waiting Files                                                                                                                                                                                                                                                              |                |                    |                |                |                   |
| Element Name                                                                                                                                                                                                                                                               | Average Length | Standard Deviation | Maximum Length | Current Length | Average Wait Time |
| dump in                                                                                                                                                                                                                                                                    | 0.000          | 0.000              | 0.000          | 0.000          | 0.000             |
| dump out                                                                                                                                                                                                                                                                   | 9.325          | 0.689              | 10.929         | 10.121         | NaN               |

| Statistics Report                                                                                                                                                                                                                                                          |                |                    |                |                |                   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|--------------------|----------------|----------------|-------------------|
| Date: 2021-09-30<br>Project: Model<br>Scenario: Scenario3<br>Run: All Runs (of 100)                                                                                                                                                                                        |                |                    |                |                |                   |
| Note: When summarized across all runs, the mean value reported for a statistic is the mean of the means of each run; the minimum value reported is the minimum of the means of each run; the maximum value reported is the maximum of the means of each run; and so forth. |                |                    |                |                |                   |
| Waiting Files                                                                                                                                                                                                                                                              |                |                    |                |                |                   |
| Element Name                                                                                                                                                                                                                                                               | Average Length | Standard Deviation | Maximum Length | Current Length | Average Wait Time |
| dump in                                                                                                                                                                                                                                                                    | 0.000          | 0.000              | 0.000          | 0.000          | 0.000             |
| dump out                                                                                                                                                                                                                                                                   | 7.206          | 0.533              | 8.706          | 6.917          | NaN               |

그림 91. 토공사 생산성 분석 전/후 생산성 향상도 시뮬레이션 결과.

- **골조공사:** 앞선 실험결과를 활용한 입력변수는 거푸집 설치(formwork)(1133.8, 2375.3, 1508.3), 철근 설치(rebar)(1149.4, 2557.5, 1618.1), 콘크리트 타설(concrete)(602.4, 1068.4, 776.4)임. 단위는 ‘분’임. 저해요소 제거 후의 입력변수는 각 작업을 수행하는 작업자 행동의 이상치를 제거한 데이터의 최솟값, 최댓값, 평균값을 활용하였으며, 거푸집 설치(1133.8, 1960.8, 1394.7), 철근 설치(1149.4, 2252.3, 1150.4), 콘크리트 타설(602.4, 1068.4, 744.0)을 변수로 입력함. 결론적으로 그림 92와 같이 평균 작업소요시간이 4650.968분에서 3938.313분으로 712.655분 감소하여 생산성이 18.10% 향상됨.

| Statistics Report                                                                                                                                                                                                                                                          |            |                    |                   |               |               |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|--------------------|-------------------|---------------|---------------|
| Date: 2021-12-31<br>Project: Model<br>Scenario: Scenario3<br>Run: All Runs (of 100)                                                                                                                                                                                        |            |                    |                   |               |               |
| Note: When summarized across all runs, the mean value reported for a statistic is the mean of the means of each run; the minimum value reported is the minimum of the means of each run; the maximum value reported is the maximum of the means of each run; and so forth. |            |                    |                   |               |               |
| Non-Intrinsic Statistics                                                                                                                                                                                                                                                   |            |                    |                   |               |               |
| Element Name                                                                                                                                                                                                                                                               | Mean Value | Standard Deviation | Observation Count | Minimum Value | Maximum Value |
| Scenario3 (Termination Time)                                                                                                                                                                                                                                               | 4650.968   | 53.167             | 100.000           | 4,528.035     | 4,821.092     |
| concrete (InterArrivalTime)                                                                                                                                                                                                                                                | 15.406     | 1.292              | 100.000           | 10.716        | 18.279        |
| formwork (InterArrivalTime)                                                                                                                                                                                                                                                | 0.000      | 0.000              | 100.000           | 0.000         | 0.000         |
| rebar (InterArrivalTime)                                                                                                                                                                                                                                                   | 9.279      | 0.430              | 100.000           | 8.066         | 10.146        |

| Statistics Report                                                                                                                                                                                                                                                          |            |                    |                   |               |               |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|--------------------|-------------------|---------------|---------------|
| Date: 2021-12-31<br>Project: Model<br>Scenario: Scenario3<br>Run: All Runs (of 100)                                                                                                                                                                                        |            |                    |                   |               |               |
| Note: When summarized across all runs, the mean value reported for a statistic is the mean of the means of each run; the minimum value reported is the minimum of the means of each run; the maximum value reported is the maximum of the means of each run; and so forth. |            |                    |                   |               |               |
| Non-Intrinsic Statistics                                                                                                                                                                                                                                                   |            |                    |                   |               |               |
| Element Name                                                                                                                                                                                                                                                               | Mean Value | Standard Deviation | Observation Count | Minimum Value | Maximum Value |
| Scenario3 (Termination Time)                                                                                                                                                                                                                                               | 3938.313   | 26.418             | 100.000           | 3,874.823     | 4,003.041     |
| concrete (InterArrivalTime)                                                                                                                                                                                                                                                | 6.926      | 0.445              | 100.000           | 5.800         | 7.778         |
| formwork (InterArrivalTime)                                                                                                                                                                                                                                                | 0.000      | 0.000              | 100.000           | 0.000         | 0.000         |
| rebar (InterArrivalTime)                                                                                                                                                                                                                                                   | 3.808      | 0.124              | 100.000           | 3.514         | 4.058         |

그림 92. 골조공사 생산성 분석 전/후 생산성 향상도 시뮬레이션 결과.

- **마감공사:** 실험결과로부터 도출한 입력변수는 패널 결속(bandage)(200, 653, 443), 인양(lift)(19, 80, 45), 설치(installation)(199, 688, 468), 크레인 복귀(hook swing)(4, 19, 11)이며 단위는 ‘초’임. 토공사, 골조공사와 마찬가지로 이상치를 제거한 데이터를 활용하여 저해요소 제거 후의 입력변수를 설정했으며 결속(200, 547, 408), 인양(19, 53, 40), 설치(199, 688, 468), 크레인 복귀(4, 16, 9)를 입력함. 시뮬레이션 결과, 그림 93과 같이 패널 1개 설치에 소요되는 시간이

7.988분에서 6.489분으로 1.499분 감소하여 생산성이 18.80% 향상됨.

Statistics Report

Date: 2021-10-13  
Project: Model  
Scenario: Scenario3  
Run: All Runs (of 100)

Note: When summarized across all runs, the mean value reported for a statistic is the mean of the means of each run; the minimum value reported is the minimum of the means of each run; the maximum value reported is the maximum of the means of each run; and so forth.

Waiting Files

| Element Name | Average Length | Standard Deviation | Maximum Length | Current Length | Average Wait Time |
|--------------|----------------|--------------------|----------------|----------------|-------------------|
| panel in     | 0.000          | 0.000              | 0.000          | 0.000          | 0.000             |
| panel out    | 7.988          | 0.567              | 9.372          | 9.372          | NaN               |

Statistics Report

Date: 2021-10-13  
Project: Model  
Scenario: Scenario3  
Run: All Runs (of 100)

Note: When summarized across all runs, the mean value reported for a statistic is the mean of the means of each run; the minimum value reported is the minimum of the means of each run; the maximum value reported is the maximum of the means of each run; and so forth.

Waiting Files

| Element Name | Average Length | Standard Deviation | Maximum Length | Current Length | Average Wait Time |
|--------------|----------------|--------------------|----------------|----------------|-------------------|
| panel in     | 0.000          | 0.000              | 0.000          | 0.000          | 0.000             |
| panel out    | 6.489          | 0.541              | 7.797          | 6.449          | NaN               |

그림 93. 마감공사 생산성 분석 전/후 생산성 향상도 시뮬레이션 결과.

- 요약하여 설명하면, 생산성 저해요인 제거를 통해 건설 생산성은 토공사에서 29.41%, 골조공사에서 18.10%, 마감공사에서 18.80% 향상하였으며, 평균 22.10%의 건설 생산성 향상을 보임(표 57). 이는 본 연구의 생산성 20% 향상 목표를 만족함.

표 57. 생산성 향상도 시뮬레이션 결과.

|         | 토공사    | 골조공사   | 마감공사   | 평균     |
|---------|--------|--------|--------|--------|
| 생산성 향상도 | 29.41% | 18.10% | 18.80% | 22.10% |

- 추가적으로 관리자가 앞서 도출된 생산성 저해요인(분석 결과의 이상치)을 제거할 때 도움을 줄 수 있는 생산성 저해요소-원인 분류체계를 개발함. 문헌조사 및 삼호개발, 동양건설 등에 종사하는 실무자 자문을 통해, 각 공종에서 특정 건설자원으로 인해 발생할 수 있는 이상치와 관련된 생산성 저해요소들을 분석하고, 이에 대한 예측 가능한 원인들을 파악하여 정리하였음(표 58-60). 해당 정보를 개발한 플랫폼을 통해 제공함으로써 관리자가 이상치를 줄이는 방안을 고민하고 궁극적으로 생산성을 향상할 수 있도록 유도함.

표 58. 토공사 생산성 저해요소 및 원인 분류체계.

| 토공사 |           |                      |                                               |       |                |      |      |      |
|-----|-----------|----------------------|-----------------------------------------------|-------|----------------|------|------|------|
| 번호  | 발생<br>가능성 | 생산성<br>저해요소          | 생산성 저해 원인                                     | 저해 종류 | Main<br>Object | 생산활동 | 작업유형 | 개별행동 |
| 1   | ○         | 굴삭기<br>유류 시간<br>증가   | 작업할 덤프트럭이 도착하지 않음<br>(배차관리가 잘못됨)              | 관리    | 굴삭기            | 비생산적 | 유류   | 정지   |
| 2   |           |                      | 작업할 덤프트럭이 도착하지 않음<br>(해당 덤프트럭의 경로가 잘못됨)       | 증장비   | 굴삭기            | 비생산적 | 유류   | 정지   |
| 3   |           |                      | 작업할 덤프트럭이 도착하지 않음<br>(배차관리가 잘못됨)              | 관리    | 굴삭기            | 반생산적 | 흙고르기 | 반정지  |
| 4   |           | 굴삭기<br>흙고르기<br>시간 증가 | 흙의 상태가 좋지 않아 흙고르기 시간이<br>오래걸림(젖은흙, 마사토, 암석 등) | 자재    | 굴삭기            | 반생산적 | 흙고르기 | 반정지  |
| 5   |           |                      | 상차작업을 위한 평탄작업을 수행 중임                          | 관리    | 굴삭기            | 반생산적 | 흙고르기 | 반정지  |
| 6   |           |                      | 앞 덤프트럭이 아직 상차작업 중에 있음<br>(배차관리가 잘못됨)          | 관리    | 덤프트럭           | 비생산적 | 유류   | 정지   |
| 7   |           | 덤프트럭<br>유류 시간<br>증가  | 앞 덤프트럭이 아직 상차작업 중에 있음<br>(굴삭기의 상차작업시간이 길어짐)   | 증장비   | 덤프트럭           | 비생산적 | 유류   | 정지   |
| 8   |           |                      | 굴삭기가 흙고르기를 수행 중임                              | 증장비   | 굴삭기            | 반생산적 | 흙고르기 | 반정지  |
| 9   |           |                      | 앞 덤프트럭이 아직 상차작업 중에 있음<br>(덤프트럭 위치 재조정)        | 관리    | 덤프트럭           | 반생산적 | 주행   | 이동   |
| 10  |           | 덤프트럭<br>주행 시간<br>증가  | 덤프트럭이 위치를 잡는 시간이 오래걸림                         | 증장비   | 덤프트럭           | 반생산적 | 주행   | 이동   |
| 11  |           |                      | 해당 덤프 트럭이 잘못된 경로로 운행함                         | 증장비   | 덤프트럭           | 반생산적 | 주행   | 이동   |
| 12  |           | 상차 시간<br>증가          | 상차작업 중간에 흙고르기를 수행함<br>(흙고르기를 미리 수행하지 않음)      | 증장비   | 덤프트럭           | 생산적  | 상차   | 반정지  |
| 13  |           |                      | 덤프트럭의 위치가 상차작업 수행에<br>부적절함(덤프트럭 경험 부족)        | 증장비   | 굴삭기            | 생산적  | 상차   | 정지   |
| 14  |           |                      | 덤프트럭의 위치가 상차작업 수행에<br>부적절함(흙상태, 지형 등의 문제)     | 현장 환경 | 덤프트럭           | 생산적  | 상차   | 반정지  |
| 15  |           |                      | 굴삭기 작업 지연<br>(부적절한 회전각, 버킷 토사량 등 문제)          | 증장비   | 굴삭기            | 생산적  | 상차   | 정지   |
| 16  |           |                      | 흙의 상태가 좋지 않아<br>작업 시간이 오래걸림                   | 자재    | 덤프트럭           | 생산적  | 상차   | 반정지  |
|     |           |                      |                                               |       | 굴삭기            | 생산적  | 상차   | 정지   |

표 59. 골조공사 생산성 저해요소 및 원인 분류 체계.

| 골조공사 |           |                    |                                                                     |       |                |      |      |      |
|------|-----------|--------------------|---------------------------------------------------------------------|-------|----------------|------|------|------|
| 번호   | 발생<br>가능성 | 생산성<br>저해요소        | 생산성 저해 원인                                                           | 저해 종류 | Main<br>Object | 생산활동 | 작업유형 | 개별행동 |
| 1    | ○         | 작업자<br>유류 시간<br>증가 | 관리/감독의 부적절함(잘못된 업무 지시,<br>노무자의 활용능력 부족 등)                           | 관리    | -              | 비생산적 | 유류   | 정지   |
| 2    |           |                    | 현장 관리자 사이에 의사소통의 부족<br>(협력업체 및 부서 간의 의사소통 미흡,<br>의사소통 정보 누락 및 오류 등) | 관리    | -              | 비생산적 | 유류   | 정지   |
| 3    |           |                    | 작업자의 불성실한 작업                                                        | 작업자   | -              | 비생산적 | 유류   | 정지   |
| 4    |           | 작업자<br>이동 시간<br>증가 | 자재 운반 시 운반경로 파악 어려움<br>(자재, 도구가 먼 곳에 비치되었거나,<br>계획과 다르게 비치됨)        | 자재    | 자재             | 비생산적 | 운반   | 이동   |
| 5    |           |                    | 동력 도구의 이용 동선을 위한<br>연장코드선 부족                                        | 자재    | 도구             | 비생산적 | 운반   | 이동   |
| 6    |           | 작업자<br>작업 시간<br>증가 | 작업자의 시공 작업 미숙(작업자의 경험,<br>기술, 팀워크 부족 등)                             | 작업자   | -              | 생산적  | 설치   | 정지   |
| 7    |           |                    | 건설현장 작업자 수급량의 부족<br>(노무자의 결근, 전문시공 기술이 없는<br>작업자 배치)                | 관리    | -              | 생산적  | 설치   | 정지   |
| 8    |           |                    | 관리자의 경험 부족(도면 정보 이해, 시공<br>지식, 시공 경험 부족 등)                          | 관리    | -              | 생산적  | 설치   | 정지   |
| 9    |           |                    | 자재 또는 도구의 가용성 부족(동력 도구,<br>소요 자재 등)                                 | 자재    | 자재             | 생산적  | 설치   | 정지   |

표 60. 마감공사 생산성 저해요소 및 원인 분류 체계.

| 마감공사 |           |                |                                          |       |                |      |      |           |
|------|-----------|----------------|------------------------------------------|-------|----------------|------|------|-----------|
| 번호   | 발생<br>가능성 | 생산성<br>저해요소    | 생산성 저해 원인                                | 저해 종류 | Main<br>Object | 생산활동 | 작업유형 | 개별행동      |
| 1    | △         | 작업 유휴<br>시간 증가 | 크레인을 이용한 다른 작업이 진행 중임<br>(크레인 작업순서 관리문제) | 관리    | 크레인            | 비생산적 | 유휴   | 정지        |
| 2    |           |                | 크레인을 이용한 다른 작업이 진행 중임<br>(크레인 결속작업 지연)   | 중장비   | 크레인            | 비생산적 | 유휴   | 정지        |
| 3    |           |                | 적재된 패널의 위치가 멀<br>(패널 결속 준비를 미리 수행하지 않음)  | 자재    | 패널             | 비생산적 | 유휴   | 정지        |
| 4    |           |                | 패널에 결함이 발견되어 교체해야 함<br>(패널의 상태 문제)       | 자재    | 패널             | 비생산적 | 유휴   | 정지        |
| 5    |           | 패널 결속<br>시간 증가 | 결속 완료되었으나 선행작업이 진행 중임<br>(패널 결속시간 지연)    | 관리    | 패널             | 생산적  | 결속   | 정지        |
| 6    |           |                | 작업자 결속 숙련도 차이<br>(패널 결속시간 지연)            | 작업자   | 패널<br>작업자      | 생산적  | 결속   | 정지<br>-   |
| 7    | ○         | 패널 인양<br>시간 증가 | 다른 작업에 의해 경로가 방해받음<br>(크레인 인양 경로 문제)     | 관리    | 패널<br>크레인      | 생산적  | 인양   | 이동<br>이동  |
| 8    |           |                | 인양 상차-하차의 거리가 멀<br>(크레인 인양 경로 문제)        | 중장비   | 패널<br>크레인      | 생산적  | 인양   | 이동<br>이동  |
| 9    |           |                | 패널이 설치에 적합하지 않아 재인양<br>(방향 등 패널상태 문제)    | 자재    | 패널<br>크레인      | 생산적  | 인양   | 이동<br>이동  |
| 10   |           |                | 패널 인양 중 흔들림<br>(바람, 우천 등 환경적 요소)         | 현장 환경 | 패널<br>크레인      | 생산적  | 인양   | 이동<br>이동  |
| 11   |           | 패널 설치<br>시간 증가 | 크레인 조작 숙련도 차이<br>(설치 이후 후크 해체 지연)        | 중장비   | 패널<br>크레인      | 생산적  | 설치   | 반정지<br>정지 |
| 12   |           |                | 패널 유격 불량으로 설치 지연<br>(패널의 상태 문제)          | 자재    | 패널<br>크레인      | 생산적  | 설치   | 반정지<br>정지 |
| 13   |           |                | 작업자 설치 숙련도 차이<br>(설치 이후 후크 해체 지연)        | 작업자   | 패널<br>작업자      | 생산적  | 설치   | 반정지<br>-  |
| 14   |           | 패널 복귀<br>시간 증가 | 다른 작업에 의해 경로가 방해받음<br>(크레인 복귀 경로 문제)     | 관리    | 크레인            | 반생산적 | 복귀   | 이동        |
| 15   |           |                | 복귀 하차-상차의 거리가 멀<br>(크레인 복귀 경로 문제)        | 중장비   | 크레인            | 반생산적 | 복귀   | 이동        |
| 16   |           |                | 패널 인양 중 흔들림<br>(바람, 우천 등 환경적 요소)         | 현장 환경 | 크레인            | 반생산적 | 복귀   | 이동        |

• (3) 플랫폼 사용자 만족도 조사

- 건설분야 실무자 25명을 대상으로 플랫폼의 사용성과 플랫폼이 제공하는 생산성 분석 결과에 대한 만족도 조사를 2021년 11월 실시함. 만족도 조사는 Google 설문지 양식을 이용하여 진행하였음.
- **설문 항목:** 설문은 (1) 플랫폼의 사용성과 (2) 플랫폼에서 제공하는 생산성 분석 정보와 관련된 내용으로 구성되어 있으며, 각 12개와 16개의 세부 문항으로 구성됨. 구체적으로, (1) 플랫폼의 사용성은 사용자가 해당 플랫폼에서 원하는 기능을 쉽게 찾을 수 있는지, 원하는 결과를 얻기 위한 처리 과정이 간결한지 등 사용자의 편의성과 관련된 설문문항임. (2) 플랫폼에서 제공하는 생산성 분석 정보는 각 공종(토공, 골조공, 마감공)에서 분석하고자 하는 대상이 적절한지, 제공되는 저해요인이 타당한지 등 분석 내용이 타당한지를 설문하는 항목임. 각 항목에 대한 세부 문항은 표 61과 같음.

표 61. 세부 설문 문항.

|                 |                                                         |
|-----------------|---------------------------------------------------------|
| 플랫폼<br>사용성 관련   | 1. 이용하고자 하는 기능을 쉽게 찾을 수 있습니까?                           |
|                 | 2. 메뉴의 계층 구조가 가시적입니까?                                   |
|                 | 3. 원하는 검색 결과를 제공합니까?                                    |
|                 | 4. 분석 결과가 이해하기 쉽도록 제공됩니까?                               |
|                 | 5. 사용자의 현재 위치와 전후관계가 명확하게 보입니까?                         |
|                 | 6. 키워드, 중요한 문장 등이 눈에 쉽게 들어옵니까?                          |
|                 | 7. 페이지 내에서 정보 간의 동질성, 이질성을 시각적으로 적절히 구분해서 제공합니까?        |
|                 | 8. 조작 절차가 복잡하지 않고 간결합니까?                                |
|                 | 9. 잘못 선택하였을 경우 쉽게 수정할 수 있도록 되어 있습니까?                    |
|                 | 10. 메뉴 항목들이 기억하기 쉽게 구성되어 있습니까?                          |
|                 | 11. 메인 페이지의 디자인은 사이트를 잘 설명하고 있습니까?                      |
|                 | 12. 과거 이용 내역을 쉽게 확인할 수 있습니까?                            |
| 생산성 분석<br>결과 관련 | 1. 분석 결과로 제공되는 영상이 만족스럽습니까?                             |
|                 | 2. (토공사) 분석하고자 하는 대상이 적절합니까?                            |
|                 | 3. (골조공사) 분석하고자 하는 대상이 적절합니까?                           |
|                 | 4. (마감공사) 분석하고자 하는 대상이 적절합니까?                           |
|                 | 5. (토공사) 분석하고자 하는 작업 행동 분류가 적절합니까?                      |
|                 | 6. (골조공사) 분석하고자 하는 작업 행동 분류가 적절합니까?                     |
|                 | 7. (마감공사) 분석하고자 하는 작업 행동 분류가 적절합니까?                     |
|                 | 8. (토공사) Outlier 판별 기준이 타당합니까?                          |
|                 | 9. (골조공사) Outlier 판별 기준이 타당합니까?                         |
|                 | 10. (마감공사) Outlier 판별 기준이 타당합니까?                        |
|                 | 11. (토공사) 제공되는 저해요인이 타당합니까?                             |
|                 | 12. (골조공사) 제공되는 저해요인이 타당합니까?                            |
|                 | 13. (마감공사) 제공되는 저해요인이 타당합니까?                            |
|                 | 14. (토공사) 분석 결과가 실제 생산성 향상에 사용될 수 있는 유의미한 정보라고 생각하십니까?  |
|                 | 15. (골조공사) 분석 결과가 실제 생산성 향상에 사용될 수 있는 유의미한 정보라고 생각하십니까? |
|                 | 16. (마감공사) 분석 결과가 실제 생산성 향상에 사용될 수 있는 유의미한 정보라고 생각하십니까? |

- 설문 대상자: DL E&C, 롯데건설, 한국수자원공사 등 건설 분야에 종사하는 25명의 실무자를 대상으로 설문을 수행하였으며 설문 대상자들의 연령, 근무년수, 재직 부서 등과 관련된 통계는 그림 94와 같음. 특히, 설문 대상자 중 약 64%가 11년 이상 건설 분야에서 종사하였으며, 공사, 기획, 영업, BIM 등 다양한 업무에 재직 중임.

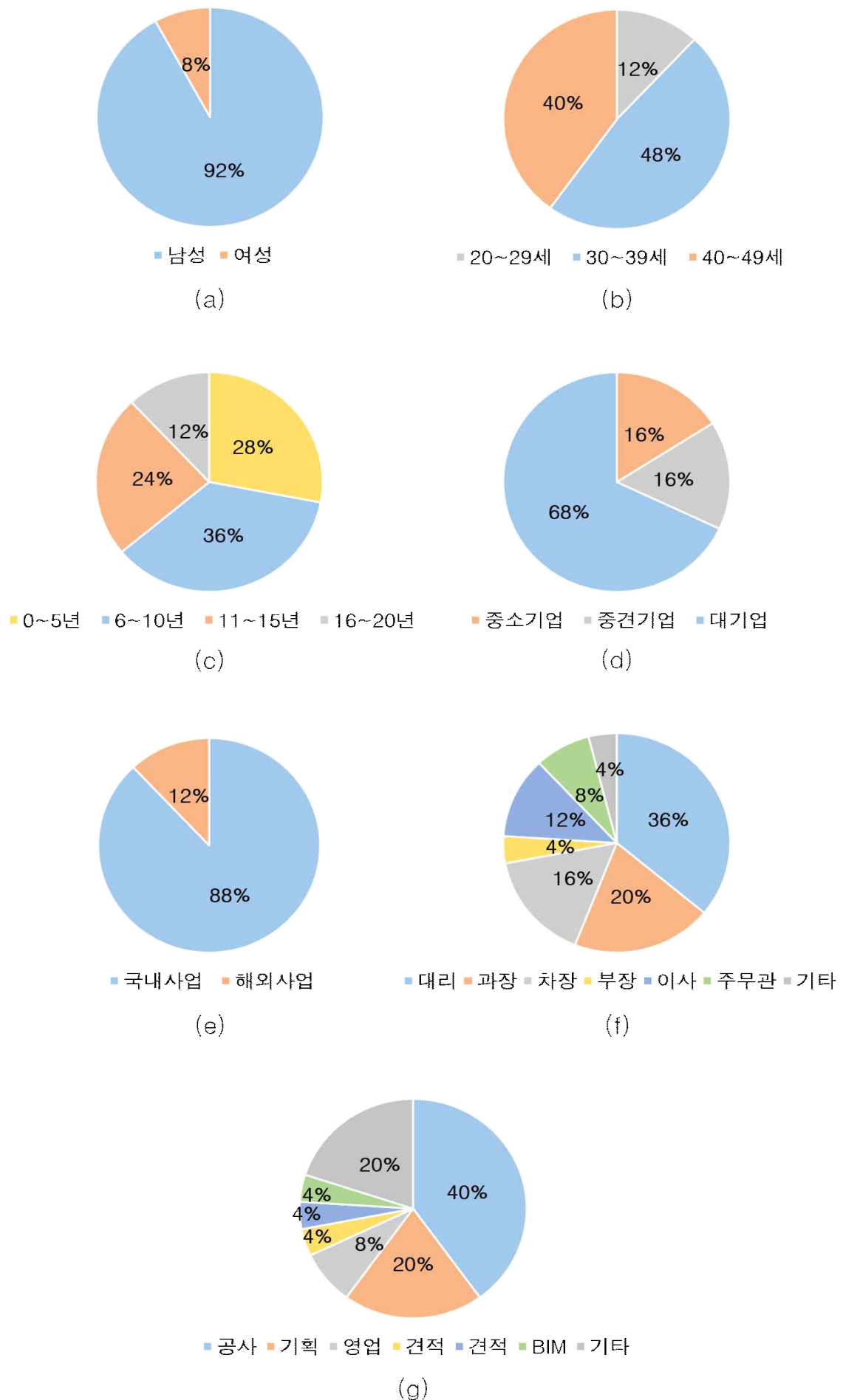


그림 94. 설문 대상자 기본 정보.

(a) 성별. (b) 연령. (c) 근무년수. (d) 기업규모. (e) 관여사업. (f) 직급. (g) 재직 부서

- **설문 결과:** 설문은 5점 만점으로, 항목별 1점(매우 그렇지 않음)부터 5점(매우 그러함)까지 총 5개의 선택 사항으로 진행됨. 각 설문 문항에 대한 25명 응답자의 평점 평균은 표 62와 같음.

표 62. 플랫폼 만족도 조사 설문 결과.

| 플랫폼 사용성      |         | 생산성 분석 결과 |      |
|--------------|---------|-----------|------|
| 설문 문항        | 평점      | 설문 문항     | 평점   |
| 1            | 4.44    | 1         | 4.72 |
| 2            | 4.56    | 2         | 4.60 |
| 3            | 4.16    | 3         | 4.64 |
| 4            | 4.48    | 4         | 4.64 |
| 5            | 4.48    | 5         | 4.72 |
| 6            | 4.56    | 6         | 4.56 |
| 7            | 4.56    | 7         | 4.60 |
| 8            | 4.84    | 8         | 4.60 |
| 9            | 4.72    | 9         | 4.48 |
| 10           | 4.68    | 10        | 4.40 |
| 11           | 4.72    | 11        | 4.48 |
| 12           | 4.44    | 12        | 4.48 |
| 평균           | 4.55    | 13        | 4.52 |
|              |         | 14        | 4.64 |
|              |         | 15        | 4.52 |
|              |         | 16        | 4.40 |
|              |         | 평균        | 4.56 |
| 생산성 분석 결과    |         |           |      |
| 평균           | 4.56    |           |      |
| (100점 만점 기준) | (91.17) |           |      |

- 위와 같이 (1) 플랫폼의 사용성에 관한 12개의 문항은 평균 4.55점, (2) 플랫폼에서 제공하는 생산성 분석 결과에 관한 16개의 문항은 평균 4.56점, 전체 28개의 문항에 대한 만족도 조사의 평균은 4.56점으로 나타남. 또한, 플랫폼 보안을 위한 정성적 의견을 추가로 수집하였고, 이를 반영하여 플랫폼 사용성을 개선함. 예를 들어, ‘공중 등으로 필터링 시 결과가 제대로 출력되지 않음’ 등 플랫폼 제공 기능의 오류를 수정하고, ‘분류체계와 기준 정보, 결과 Dash 보드의 가독성이 떨어짐’과 ‘다수의 하위항목으로 인해 원하는 기능을 찾기 어려움’ 등의 의견을 반영하여 플랫폼 가시성 문제를 보완함. ‘상태별 발생 시각을 확인할 수 있으면 실제 영상에서 해당 시간을 추적하여 판단 기준 등을 이해하는 데 도움이 될 것 같다’ 등 제공 기능과 관련된 의견을 반영하여 그림 95와 같이 영상 내 outlier의 발생 시간, ID, 상태정보를 로그로 기록하고 이를 결과 영상과 연동함으로써 outlier 선택 시 해당 시간을 추적하는 기능을 추가함. 또한, 이러한 이상치에 대한 예상되는 생산성 저해 원인을 표 58-60으로부터 제공함.

| Outlier                          |                           |
|----------------------------------|---------------------------|
| 로그                               | 예상되는 생산성 저해 원인            |
| 00:24:10 / ID : 7 / 상태 : load    | - 굴삭기가 흙고르기를 미리 마무리하지 못함. |
| 00:32:47 / ID : 10 / 상태 : travel | - 트럭 운전수의 경험 부족.          |
| 00:37:00 / ID : 11 / 상태 : idle   | - 흙 상태 및 지형의 문제 발생.       |
|                                  | - 흙 상태가 좋지 못함.            |

그림 95. Outlier 발생 로그(발생 시간, ID, 상태) 및 예상되는 생산성 저해요인.

## (2) 정량적 연구개발성과

### ○ 정량적 연구개발목표 및 연구개발성과

- 적용 방법론의 타당성 및 독창성, 기술의 산업적 기여 등 개발기술의 우수성을 입증하기 위해 다수의 국제저명학술지 논문게재, 지적재산권 등록, 인력양성 등의 연구성과 달성을 목표로 함. 보다 구체적으로 SCI(E)/SSCI급 저명학술지 논문게재 8편, 국내외 학술대회 발표 11건, 국내 특허 등록 1건 및 해외 특허 등록 2건, 소프트웨어 등록 3건, 통합관리 플랫폼 시제품 1건, 인력양성 8명, 연구종료 후 6개월 이내 기술이전계약 1건을 정량적 연구개발목표로 설정함.
- 본 연구개발과제는 설정한 정량적 연구개발목표를 대부분 초과달성하였음. 보다 구체적으로 SCI(E)/SSCI급 저명학술지논문 게재 11편(3편 초과달성), 비SCI급 논문게재 3편(달성), 국내외 학술대회 발표 16건(5건 초과달성), 국내 특허 출원 및 등록 1건(달성), 해외 특허 출원 및 등록 2건(달성), 소프트웨어 등록 3건(달성), 인력양성 7명(1명 미달성: 2022년 2월 졸업 예정), 통합관리 플랫폼 시제품 1건(달성)을 달성하고 10,000천원의 기술료를 포함한 기술이전 계약을 2021년 8월 29일 체결(달성)함. 뿐만 아니라 기존에 목표로 설정하지 않은 포상 3건을 달성함. 특히, 2020년에 Automation in Construction에 게재된 논문 2편은 다른 논문으로부터 이미 각 17회, 23회 인용되어 질적 우수성을 인정받음. 구체적인 정량적 연구개발성과는 표 63과 같음.

표 63. 정량적 연구개발성과표.

(단위 : 건, 천원)

| 성과지표명           |                       |         | 연도     | 1차년도<br>(2019.04~2019.12) | 2차년도<br>(2020.01~2020.12) | 3차년도<br>(2021.01~2021.12) | 계    | 가중치<br>(%) |
|-----------------|-----------------------|---------|--------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------|------------|
| 전담기관 등록·기탁 지표   | 논문<br>(SCIE/<br>SSCI) | 실적(누적)  | 1(1)   | 6(7)                      | 4(11)                     | 11                        | 30   |            |
|                 | 논문<br>(비SCI)          | 실적(누적)  | 3(3)   | -                         | -                         | 3                         | 10   |            |
|                 | 특허 출원                 | 실적(누적)  | 1(1)   | 2(3)                      | -                         | 3                         | 5    |            |
|                 | 특허 등록                 | 실적(누적)  | -      | 1(1)                      | 2(3)                      | 3                         | 15   |            |
|                 | 소프트<br>웨어             | 목표(단계별) | 1(1)   | 1(2)                      | 1(3)                      | 3                         | 10   |            |
|                 |                       | 실적(누적)  | 1(1)   | 1(2)                      | 1(3)                      | 3                         |      |            |
|                 | 학술발표                  | 실적(누적)  | 4(4)   | 6(10)                     | 6(16)                     | 16                        | 15   |            |
| 연구개발과제 특성 반영 지표 | 기술실시                  | 목표(단계별) | -      | -                         | 1(1)                      | 1                         | 5    |            |
|                 |                       | 실적(누적)  | -      | -                         | 1(1)                      | 1                         |      |            |
|                 | 기술료                   | 목표(단계별) | -      | -                         | 10,000                    | 10,000                    | 5    |            |
|                 |                       | 실적(누적)  | -      | -                         | 10,000                    | 10,000                    |      |            |
|                 | 시제품<br>제작             | 목표(단계별) | -      | -                         | 1(1)                      | 1                         | 5    |            |
|                 |                       | 실적(누적)  | -      | -                         | 1(1)                      | 1                         |      |            |
|                 | 포상                    | 목표(단계별) | -      | -                         | -                         | -                         | -    |            |
|                 |                       | 실적(누적)  | 1(1)   | 1(2)                      | 1(3)                      | 3                         |      |            |
| 계               | 목표(단계별)               |         | 6(6)   | 11(17)                    | 14(31)                    | 31                        | 100% |            |
|                 | 실적(누적)                |         | 11(11) | 17(28)                    | 17(45)                    | 45                        |      |            |

- 개발기술의 활용성, 상용화 및 사업화 가능성 등 개발기술의 실효성을 입증하기 위해 학습용 DB 구축 소요시간, 영상분석 정확도, 플랫폼 만족도 등을 연구개발성과 성능 평가 항목으로 설정함. 보다 구체적으로 영상분석기술 학습용 DB 구축 소요시간 1/10로 단축, 자동 구축한 학습용 DB로 개발한 영상분석기술 정확도 80%, DB-free 영상분석기반 전주기 건설프로세스 통합관리 플랫폼의 생산성 분석 정확도 80%, 플랫폼 제약조건 타당성 90%, 개발 플랫폼 만족도 90%, 개발 플랫폼을 통한 건설 생산성 향상도 20%를 평가 항목으로 설정함.
- 본 연구개발과제는 설정한 연구개발성과 성능 평가 항목들을 모두 초과 달성하였음. 보다 구체적으로 영상분석기술 학습용 DB 구축 소요시간 1/16로 단축, 자동 구축한 학습용 DB로 개발한 영상분석기술 정확도 93.0%, DB-free 영상분석기반 전주기 건설프로세스 통합관리 플랫폼의 생산성 분석 정확도 95.90%, 플랫폼 제약조건 타당성 97.27%, 개발 플랫폼 만족도 91.17%, 개발 플랫폼을 통한 건설 생산성 향상도 22.10%를 달성함. 구체적인 연구개발성과 성능 평가 항목은 표 64와 같음.

표 64. 연구개발성과 성능지표 만족결과.

| 평가 항목<br>(주요성능)                                                       | 단<br>위 | 전체<br>항목에서<br>차지하는<br>비중(%) | 세계 최고          |           | 연구개발 전<br>국내 성능수준 | 연구개발 목표치                      |                               |                               | 목표설정 근거                                                                                                            |
|-----------------------------------------------------------------------|--------|-----------------------------|----------------|-----------|-------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                       |        |                             | 보유국/<br>보유기관   | 성능<br>수준  |                   | 1차년도<br>(2019.04~<br>2019.12) | 2차년도<br>(2020.01~<br>2020.12) | 3차년도<br>(2021.01~<br>2021.12) |                                                                                                                    |
| 1 영상분석기술<br>학습용 DB<br>구축 소요시간                                         | 분      | 15                          | 미국<br>/MIT     | 600<br>분  | 905분              | 목표: 90분<br>결과: 60분            | -                             | -                             | 기존의 영상분석기술은 사람이<br>현장에 직접 방문하여 카메라를<br>설치하고 목적에 맞는 영상<br>데이터를 수집해야 하기 때문에<br>많은 시간과 비용이 필요함.                       |
| 2 자동 구축한<br>학습용 DB로<br>개발한<br>영상분석기술<br>정확도                           | %      | 15                          | 캐나다<br>/UOT    | 78.1<br>% | 70%               | 목표: 80%<br>결과: 93.0%          | -                             | -                             | 기존의 영상분석기술은 사람이<br>직접 학습용 DB를 구축하기<br>때문에 건설자원과 현장의 다양한<br>특성(형태, 색상 등)을 모두<br>포함하는 DB를 구축하기 어려움.                  |
| 3 DB-free<br>영상분석기반<br>전주기<br>건설프로세스<br>통합관리<br>플랫폼의<br>생산성 분석<br>정확도 | %      | 30                          | 미국<br>/Procore | 75%       | 60%               | -                             | 목표: 80%<br>결과: 95.90%         | -                             | 기존 영상분석 기반 건설프로세스<br>통합관리 플랫폼은 단일 공종에만<br>적용 가능한 형태로 개발됨.<br>즉, 기존의 기술로는 건설프로젝트<br>전주기에 걸친 통합적인 관리가<br>불가능함.       |
| 4 플랫폼<br>제약조건<br>타당성                                                  | %      | 10                          | 프랑스<br>/VINCI  | 85%       | 70%               | -                             | -                             | 목표: 90%<br>결과: 97.27%         | 기존 기술이 단일 공종에 대해<br>만족할만한 성능을 보였다<br>할지라도 상용화로까지 이어지지<br>못했던 주요 원인 중 하나는<br>기술적응에 따른 실무적<br>애로사항을 해결하지 못했기<br>때문임. |
| 5 개발 플랫폼<br>만족도                                                       | %      | 10                          | 미국<br>/Procore | 75%       | 70%               | -                             | -                             | 목표: 90%<br>결과: 91.17%         | 플랫폼의 활용 측면에서 별도의<br>기술자 도움 없이도 데이터를<br>수집, 분석하여 사용자에게<br>제공하는 전 과정이 손쉽게<br>자동으로 진행되어야 그 활용도와<br>가치를 높일 수 있음.       |
| 6 개발 플랫폼을<br>통한 건설<br>생산성 향상도                                         | %      | 20                          | 미국<br>/Bechtel | 3%        | 1%                | -                             | -                             | 목표: 20%<br>결과: 22.10%         | 지난 20년간 타 산업의 생산성은<br>평균 2.8% 향상된 반면 건설산업<br>생산성은 1% 증가에 그침.<br>특히, 국내 건설산업의 생산성은<br>제조업 대비 53.2% 수준임.             |

### (3) 세부 정량적 연구개발성과

#### [과학적 성과]

☐ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

| 번호 | 논문명                                                                               | 학술지명                             | 주저자명          | 호   | 국명       | 발행기<br>관 | SCIE<br>여부<br>(SCIE/비<br>SCIE) | 게재일     | 등록번호<br>(ISSN) | 기여율  |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|---------------|-----|----------|----------|--------------------------------|---------|----------------|------|
| 1  | Multi-camera Vision-based<br>Productivity Monitoring of<br>Earthmoving Operations | Automation<br>in<br>Construction | Jinwoo<br>Kim | 112 | 네덜<br>란드 | Elsevier | SCI(E)                         | 2020.02 | 0926-5805      | 100% |

|    |                                                                                                                                    |                                           |                  |     |       |          |        |         |           |      |
|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------|-----|-------|----------|--------|---------|-----------|------|
| 2  | VR-Based Investigation of Forklift Operator Situation Awareness for Preventing Collision Accidents                                 | Accident Analysis and Prevention          | Minji Choi       | 136 | 네덜란드  | Elsevier | SSCI   | 2020.01 | 0001-4575 | 100% |
| 3  | UAV-RFID Integration for Construction Resource Localization                                                                        | KSCE Journal of Civil Engineering         | Daeyoun Won      | 24  | 대한민국  | KSCE     | SCI(E) | 2020.05 | 1226-7988 | 100% |
| 4  | Occupant Behavior Monitoring and Emergency Event Detection in Single-person Households Using Deep Learning-based Sound Recognition | Building and Environment                  | Jinwoo Kim       | 181 | 영국    | Elsevier | SCI(E) | 2020.06 | 0360-1323 | 100% |
| 5  | Towards Database-free Vision-based Monitoring on Construction Sites: A Deep Active Learning Approach                               | Automation in Construction                | Jinwoo Kim       | 120 | 네덜란드  | Elsevier | SCI(E) | 2020.08 | 0926-5805 | 100% |
| 6  | Impact of Mobile Augmented Reality System on Cognitive Behavior and Performance during Rebar Inspection Tasks                      | Journal of Computing in Civil Engineering | Ali Abbas        | 34  | 미국    | ASCE     | SCI(E) | 2020.11 | 0402-0050 | 100% |
| 7  | A few-shot learning approach for database-free vision-based monitoring on construction sites                                       | Automation in Construction                | Jinwoo Kim       | 124 | 네덜란드  | Elsevier | SCI(E) | 2021.04 | 0926-5805 | 100% |
| 8  | Hybrid kinematic-visual sensing approach for activity recognition of construction equipment                                        | Journal of Building Engineering           | Jinwoo Kim       | 44  | 네덜란드  | Elsevier | SCI(E) | 2021.12 | 2352-7102 | 50%  |
| 9  | Semantic Text-pairing for Relevant Provision Identification in Construction Specification Reviews                                  | Automation in Construction                | Seonghye on Moon | 128 | 네덜란드  | Elsevier | SCI(E) | 2021.08 | 0926-5805 | 100% |
| 10 | Automated Postural Ergonomic Risk Assessment Using Vision-based Posture Classification                                             | Automation in Construction                | JoonOh Seo       | 128 | 네덜란드  | Elsevier | SCI(E) | 2021.08 | 0926-5805 | 100% |
| 11 | Effectiveness of Immersive Virtual Reality-based Communication for Construction Projects                                           | KSCE Journal of Civil Engineering         | Ali Abbas        | 23  | Korea | KSCE     | SCI(E) | 2019.11 | 1226-7988 | 100% |
| 12 | 액티브 러닝을 활용한 영상기반 건설현장 물체 자동 인식 프레임워크                                                                                               | 대한토목학회 논문집                                | 김진우              | 39  | 대한민국  | 대한토목학회   | 비SCI   | 2019.10 | 1015-6348 | 100% |
| 13 | 설계검토를 위한 가상현실·증강현실 기술의 활용 효과 비교 분석                                                                                                 | 한국BIM학회 논문집                               | 이진강              | 9   | 대한민국  | 한국BIM학회  | 비SCI   | 2019.12 | 2288-1697 | 100% |
| 14 | 건설현장 영상 분석을 위한 웹 크롤링 기반 학습 데이터베이스 구축 자동화                                                                                           | 대한토목학회 논문집                                | 황정빈              | 39  | 대한민국  | 대한토목학회   | 비SCI   | 2019.12 | 1015-6348 | 100% |

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

| 번호 | 회의 명칭                  | 발표자 | 발표 일시      | 장소      | 국명   |
|----|------------------------|-----|------------|---------|------|
| 1  | 대한토목학회 2019 컨벤션        | 황정빈 | 2019.10.18 | 평창 알펜시아 | 대한민국 |
| 2  | 한국건설관리학회 2019 정기학술발표대회 | 김진우 | 2019.11.15 | 일산 킨텍스  | 대한민국 |
| 3  | 한국건설관리학회 2019 정기학술발표대회 | 김진우 | 2019.11.15 | 일산 킨텍스  | 대한민국 |

|    |                                                                                     |             |            |                                      |           |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------|------------|--------------------------------------|-----------|
| 4  | The 8th International Conference on Construction Engineering and Project Management | Ali Abbas   | 2019.12.09 | The Hong Kong Polytechnic University | Hong Kong |
| 5  | 대한토목학회 2020 컨벤션                                                                     | 이기택         | 2020.10.21 | 제주 신화월드                              | 대한민국      |
| 6  | 한국건설관리학회 2020 정기학술발표대회                                                              | 김정훈         | 2020.11.05 | 온라인                                  | 대한민국      |
| 7  | 한국건설관리학회 2020 정기학술발표대회                                                              | 정인수         | 2020.11.05 | 온라인                                  | 대한민국      |
| 8  | 한국건설관리학회 2020 정기학술발표대회                                                              | 천취경         | 2020.11.05 | 온라인                                  | 대한민국      |
| 9  | 한국건설관리학회 2020 정기학술발표대회                                                              | 황정빈         | 2020.11.05 | 온라인                                  | 대한민국      |
| 10 | The 8th International Conference on Construction Engineering and Project Management | Yanfang Luo | 2020.12.07 | 온라인                                  | Hong Kong |
| 11 | 대한토목학회 2021 컨벤션                                                                     | 김정훈         | 2021.10.21 | 광주 김대중컨벤션센터                          | 대한민국      |
| 12 | 대한토목학회 2021 컨벤션                                                                     | 정인수         | 2021.10.21 | 광주 김대중컨벤션센터                          | 대한민국      |
| 13 | 대한토목학회 2021 컨벤션                                                                     | 황정빈         | 2021.10.21 | 광주 김대중컨벤션센터                          | 대한민국      |
| 14 | 한국건설관리학회 2021 정기학술발표대회                                                              | 문성현         | 2021.11.11 | The-K Hotel 경주                       | 대한민국      |
| 15 | 13 <sup>th</sup> Asian Forum on Graphic Science                                     | Yixuan Jin  | 2021.12.07 | Virtual(Hong Kong)                   | Hong Kong |
| 16 | 13 <sup>th</sup> Asian Forum on Graphic Science                                     | Yanfang Luo | 2021.12.07 | Virtual(Hong Kong)                   | Hong Kong |

- ☐ 기술 요약 정보: 해당사항 없음
- ☐ 보고서 원문: 해당사항 없음
- ☐ 생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물: 해당사항 없음

#### [기술적 성과]

- ☐ 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신제품, 프로그램)

| 번호 | 지식재산권 등 명칭<br>(건별 각각 기재)                                                                                              | 국명   | 출원                                                 |             |                 |               | 등록                                                 |             |                 | 기여율  | 활용 여부 |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|----------------------------------------------------|-------------|-----------------|---------------|----------------------------------------------------|-------------|-----------------|------|-------|
|    |                                                                                                                       |      | 출원인                                                | 출원일         | 출원 번호           | 등록 번호         | 등록인                                                | 등록일         | 등록 번호           |      |       |
| 1  | 건설현장 자동 모니터링을 위한 Active Learning 기반 학습용 이미지 DB 최적 구축 방법                                                               | 대한민국 | 서울대학교 산학협력단                                        | 2019. 10.24 | 10-2019-0132630 | SDP2019-1066  | 서울대학교 산학협력단                                        | 2020. 10.15 | 10-2168558-0000 | 100% | 부     |
| 2  | Human-Computer Interactive Learning System for Training Database Development and Vision-Based Construction Monitoring | 홍콩   | 서울대학교 산학협력단 & The Hong Kong PolyTechnic University | 2020. 06.30 | 32020010231.9   | 32020010231.9 | 서울대학교 산학협력단 & The Hong Kong PolyTechnic University | 2021. 03.05 | HK30031213      | 100% | 부     |
| 3  | Method for Developing Synthetic Image Datasets for Vision Based Construction Site Monitoring                          | 홍콩   | The Hong Kong PolyTechnic University & 서울대학교 산학협력단 | 2020. 06.30 | 32020010234.3   | 32020010234.3 | The Hong Kong PolyTechnic University & 서울대학교 산학협력단 | 2021. 03.05 | HK30031214      | 100% | 부     |

- 지식재산권 활용 유형: 해당사항 없음

☐ 저작권(소프트웨어, 서적 등)

| 번호 | 저작권명                                                               | 창작일        | 저작자명           | 등록일        | 등록 번호             | 저작권자명 | 기여율 |
|----|--------------------------------------------------------------------|------------|----------------|------------|-------------------|-------|-----|
| 1  | 웹 크롤링 기법을<br>활용한 영상분석기술<br>학습 DB 자동 구축 및<br>개발 소프트웨어<br>능동학습을 통한   | 2019.09.27 | 서울대학교<br>산학협력단 | 2019.10.10 | C-2019<br>-027967 | 지석호   | 70% |
|    |                                                                    |            |                |            |                   | 황정빈   | 15% |
|    |                                                                    |            |                |            |                   | 김진우   | 15% |
| 1  | 건설현장 학습 이미지<br>DB 최적 구축 및 물체<br>인식 소프트웨어                           | 2020.08.03 | 서울대학교<br>산학협력단 | 2020.09.25 | C-2020<br>-033073 | 지석호   | 70% |
|    |                                                                    |            |                |            |                   | 김진우   | 10% |
|    |                                                                    |            |                |            |                   | 황정빈   | 10% |
|    |                                                                    |            |                |            |                   | 정인수   | 10% |
| 3  | 이미지 분할 기법 기반<br>건설현장 영상 자동<br>모니터링 기술 학습을<br>위한 데이터 자동<br>라벨링 프로그램 | 2021.03.05 | 서울대학교<br>산학협력단 | 2021.04.30 | C-2021<br>-018828 | 지석호   | 80% |
|    |                                                                    |            |                |            |                   | 황정빈   | 20% |

☐ 신기술 지정: 해당사항 없음

☐ 기술 및 제품 인증: 해당사항 없음

☐ 표준화: 해당사항 없음

[경제적 성과]

☐ 시제품 제작

| 번호 | 시제품명                          | 출시/제작일     | 제작 업체명         | 설치 장소 | 이용 분야 | 사업화<br>소요 기간 | 인증기관<br>(해당 시) | 인증일<br>(해당 시) |
|----|-------------------------------|------------|----------------|-------|-------|--------------|----------------|---------------|
| 1  | 영상분석기반<br>건설 생산성<br>자동 분석 시스템 | 2021.09.01 | 서울대학교<br>산학협력단 | 서울대학교 | 건설업   | 12개월         | -              | -             |

☐ 현장적용

☐ 기술 실시(이전)

| 번호 | 기술 이전<br>유형 | 기술 실시 계약명     | 기술 실시<br>대상 기관 | 기술 실시<br>발생일 | 기술료<br>(해당 연도 발생액) | 누적<br>징수 현황 |
|----|-------------|---------------|----------------|--------------|--------------------|-------------|
| 1  | 기술이전        | 기술이전(라이선싱) 계약 | 주식회사<br>사이트비전  | 2021.08.29   | 10,000천원           | 10,000천원    |

☐ 사업화 투자실적: 해당사항 없음

☐ 사업화 현황: 해당사항 없음

☐ 매출 실적: 해당사항 없음

☐ 사업화 계획 및 무역 수지 개선 효과: 해당사항 없음

☐ 고용 창출: 해당사항 없음

☐ 고용 효과: 해당사항 없음

☐ 비용 절감(누적): 해당사항 없음

☐ 경제적 파급 효과: 해당사항 없음

☐ 산업 지원(기술지도): 해당사항 없음

☐ 기술 무역: 해당사항 없음

[사회적 성과]

☐ 법령 반영: 해당사항 없음

- ☐ 정책활용 내용: 해당사항 없음
- ☐ 설계 기준/설명서(시방서)/지침/안내서에 반영: 해당사항 없음
- ☐ 신진연구자 채용: 해당사항 없음
- ☐ 전문 연구 인력 양성

| 번호 | 분류 | 기준 연도 | 현황  |    |    |    |    |   |     |     |     |     |    |
|----|----|-------|-----|----|----|----|----|---|-----|-----|-----|-----|----|
|    |    |       | 학위별 |    |    |    | 성별 |   | 지역별 |     |     |     |    |
|    |    |       | 박사  | 석사 | 학사 | 기타 | 남  | 여 | 수도권 | 충청권 | 영남권 | 호남권 | 기타 |
| 1  | 박사 | 2019  | 1   |    |    |    | 1  |   | 1   |     |     |     |    |
| 2  | 석사 | 2019  |     | 1  |    |    |    | 1 | 1   |     |     |     |    |
| 3  | 박사 | 2020  | 1   |    |    |    | 1  |   | 1   |     |     |     |    |
| 4  | 석사 | 2020  |     | 1  |    |    |    | 1 | 1   |     |     |     |    |
| 5  | 박사 | 2021  | 1   |    |    |    | 1  |   |     |     |     |     | 1  |
| 6  | 석사 | 2021  |     | 2  |    |    | 2  |   | 2   |     |     |     |    |

- ☐ 산업 기술 인력 양성: 해당사항 없음
- ☐ 다른 국가연구개발사업에의 활용: 해당사항 없음
- ☐ 국제화 협력성과: 해당사항 없음
- ☐ 홍보 실적: 해당사항 없음
- ☐ 포상 및 수상 실적: 해당사항 없음

[인프라 성과]

- ☐ 연구시설·장비: 목표성과가 없어 해당사항은 없으나 연구수행과정 중 아래 연구장비를 소요함

| 구축기관  | 연구시설/<br>연구장비명     | 규격<br>(모델명)                           | 개발여부<br>(○/×) | 연구시설·장비<br>종합정보시스템<br>* 등록여부 | 연구시설·장비<br>종합정보시스템<br>* 등록번호 | 구축일자<br>(YY.MM.<br>DD) | 구축비용<br>(천원) | 비고<br>(설치 장소)      |
|-------|--------------------|---------------------------------------|---------------|------------------------------|------------------------------|------------------------|--------------|--------------------|
| 서울대학교 | 카메라<br>네트워크<br>시스템 | HD IP<br>스피드돔카메<br>라 25X 3개<br>및 부속장치 | ×             | ×                            | -                            | 19.07.05               | 5,000        | 네이버<br>그린팩토리<br>현장 |
| 서울대학교 | 카메라<br>네트워크<br>시스템 | Dahwa PTZ<br>카메라 30X<br>6개 및<br>부속장치  | ×             | ×                            | -                            | 20.10.26               | 14,462       | -                  |
| 서울대학교 | AWS 서비스            | Amazon<br>EC2, RDS                    | ×             | ×                            | -                            | 21.06.29               | 5,500        | 플랫폼 구축             |
| 서울대학교 | 카메라<br>네트워크<br>시스템 | Dahwa PTZ<br>카메라 30X<br>2개 및<br>부속장치  | ×             | ×                            | -                            | 21.07.29               | 5,000        | -                  |

(4) 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항

[사회적 성과]

- ☐ 포상 및 수상 실적

| 번호 | 종류 | 포상명               | 포상 내용   | 포상 대상 | 포상일        | 포상 기관    |
|----|----|-------------------|---------|-------|------------|----------|
| 1  | 상장 | 대한토목학회<br>우수논문상   | 우수논문 선정 | 황정빈   | 2019.10.18 | 대한토목학회   |
|    |    |                   |         | 김진우   |            |          |
|    |    |                   |         | 지석호   |            |          |
|    |    |                   |         | 서준오   |            |          |
| 2  | 상장 | 한국건설관리학회<br>우수논문상 | 우수논문 선정 | 정인수   | 2020.11.05 | 한국건설관리학회 |
|    |    |                   |         | 황정빈   |            |          |
|    |    |                   |         | 김진우   |            |          |
|    |    |                   |         | 지석호   |            |          |
| 3  | 상장 | 대한토목학회<br>우수논문상   | 우수논문 선정 | 서준오   | 2021.10.21 | 대한토목학회   |
|    |    |                   |         | 정인수   |            |          |
|    |    |                   |         | 황정빈   |            |          |
|    |    |                   |         | 김정훈   |            |          |
|    |    |                   |         | 지석호   |            |          |

#### □ 신진연구자 채용

| 번호 | 채용 연구개발기관명 | 채용일      | 근로기간              | 채용인원(명)       | 채용인원 중 청년인력(명) |
|----|------------|----------|-------------------|---------------|----------------|
| 1  | 서울대학교      | 19.09.01 | 19.09.01~20.08.31 | 김진우(1명)       | 김진우(1명)        |
| 2  | 서울대학교      | 20.09.01 | 20.09.01~21.12.31 | 문성현(1명)       | 문성현(1명)        |
| 3  | HK PolyU   | 19.08.06 | 19.08.06~21.02.28 | 이진강(1명)       | 이진강(1명)        |
| 4  | HK PolyU   | 21.12.15 | 21.12.15~21.12.31 | Ali Abbas(1명) | Ali Abbas(1명)  |

#### □ 국제화 협력성과

| 번호 | 구분<br>(유치/파견) | 기간       | 국가 | 학위 | 전공                                   | 내용                                    |
|----|---------------|----------|----|----|--------------------------------------|---------------------------------------|
| 1  | 유치            | 19.11.25 | 홍콩 | 박사 | Department of Building & Real Estate | [국제공동워크숍] 본 과업 수행을 위한 연구진 간 정기 워크숍 1차 |
| 2  | 유치            | 20.07.24 | 홍콩 | 박사 | Department of Building & Real Estate | [국제공동워크숍] 본 과업 수행을 위한 연구진 간 정기 워크숍 2차 |
| 3  | 유치            | 21.07.16 | 홍콩 | 박사 | Department of Building & Real Estate | [국제공동워크숍] 본 과업 수행을 위한 연구진 간 정기 워크숍 3차 |

### 3-2. 목표 달성 수준

| 연구 개발 목표                                                        | 달 성 내 용                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 달성도(%) |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| [연구목표 1-1] 건설현장 맞춤형 Human-Computer Interactive Learning 알고리즘 개발 | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 본 연구는 Active Learning, Reinforcement Learning, Online Learning 방법을 활용하여 건설현장 맞춤형 HCI Learning 알고리즘을 성공적으로 개발했으며 계획된 질적/양적 성과를 모두 달성함.</li> <li>○ 구체적으로, 기존 방식 대비 학습 DB 구축 소요시간 1/10, SCI(E)/SSCI급 학술지 논문 게재 1편, 특허 출원 1건, 학술대회 발표논문 게재 2편(초과 달성), 실험실 환경 성능 테스트(정확도 89.4%)를 통해 개발 알고리즘의 이론적/기술적 타당성을 검증함.</li> </ul> | 100%   |
| [연구목표 1-2] 건설현장 영상 데이터 Web-Crawling 알고리즘 개발                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 본 연구는 건설분야 키워드를 활용하여 웹사이트 상에 흩어져 있는 이미지 데이터를 자동으로 수집, 가공하여 현장 영상분석에 성공적으로 활용함으로써 계획된 질적/양적 성과를 모두 달성함.</li> <li>○ 구체적으로, 기존 방식 대비 학습 DB 구축 소요시간</li> </ul>                                                                                                                                                           | 100%   |

|                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |      |
|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
|                                                         | 1/30, 비SCI 학술지 논문 게재 1편, S/W 등록 1건, 학술대회 발표논문 게재 1편(초과 달성), 실험실 환경 성능 테스트(정확도 86.5%)를 통해 개발 알고리즘의 이론적/기술적 타당성을 검증함.                                                                                                                                                                                                                                   |      |
| [연구목표 1-3] 건설현장<br>Cyber-Physical Simulation 알고리즘<br>개발 | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 본 연구는 데이터 수집이 어려운 작업자, 건설장비, 작업환경 등에 대한 CPS 기술을 개발하여 현장 영상분석에 활용할 수 있는 DB를 성공적으로 구축함으로써 질적/양적 성과를 모두 달성함.</li> <li>○ 구체적으로, 기존 방식 대비 학습 DB 구축 소요시간 1/20, SCI(E)/SSCI급 학술지 논문 게재 1편, 비SCI급 학술지 논문 게재 1편, 학술대회 발표논문 게재 1편(초과 달성), 실험실 환경 성능 테스트(정확도 70.0%)를 통해 개발 알고리즘의 이론적/기술적 타당성을 검증함.</li> </ul>           | 100% |
| [연구목표 2-1] DB-free 영상분석<br>기반 현장 상황정보 자동 분석<br>알고리즘 개발  | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 본 연구는 작업공중 자동 분류 모델, 투입자원 현황 자동 인식 모델, 작업상태 자동 분석 모델, 건설작업량 자동 분석 모델을 개발하여 실시간 수집되는 건설현장 CCTV 영상 데이터로부터 현장 상황정보를 자동으로 분석하였으며 계획된 질적/양적 성과를 모두 달성함.</li> <li>○ 구체적으로, SCI(E)/SSCI급 학술지 논문 게재 4편(초과 달성), 학술대회 발표논문 게재 4편(초과 달성), 국내 특허 등록 1건, 해외 특허 출원 2건, S/W 등록 1건을 통해 개발 알고리즘의 이론적/기술적 타당성을 검증함.</li> </ul> | 100% |
| [연구목표 2-2] 전주기<br>건설프로세스 통합관리 플랫폼 설계<br>및 구축            | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 본 연구는 비정형 데이터 수집 및 저장 알고리즘, 정형·비정형 데이터 연계 및 관리 알고리즘, 사용자 인터페이스를 개발하여 건설현장 CCTV 영상, 현장 상황정보, 건설프로세스 생산성 분석 정보를 통합관리하고 사용자의 요구에 응답하는 플랫폼을 설계 및 구축하였으며 계획된 질적/양적 성과를 모두 달성함.</li> <li>○ 구체적으로, SCI(E)/SSCI급 학술지 논문 게재 2편(초과 달성), 학술대회 발표논문 게재 1편을 통해 개발 플랫폼의 이론적/기술적 타당성을 검증함.</li> </ul>                       | 100% |
| [연구목표 2-3] 건설프로세스<br>생산성 자동 분석 알고리즘 개발                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 본 연구는 건설프로세스 생산성 주요 지표를 도출하고 건설프로세스 생산성 자동 분석 알고리즘을 개발함으로써 플랫폼에 저장된 현장 상황정보를 활용하여 건설 생산성을 자동으로 분석하였으며 계획된 질적/양적 성과를 모두 달성함.</li> <li>○ 구체적으로, SCI(E)/SSCI급 학술지 논문 게재 3편(초과 달성), 학술대회 발표논문 게재 2편, 유사환경 성능 테스트(정확도 84.30%)를 통해 개발 알고리즘의 이론적/기술적 타당성을 검증함.</li> </ul>                                           | 100% |
| [연구목표 3-1] 국내외 현장실험을<br>통한 플랫폼 활용 제약조건 도출               | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 본 연구는 국내외 현장실험을 통해 개발된 플랫폼을 실제 현장에 적용할 경우 따르는 플랫폼 설치 및 활용 관련 실무적 제약조건을 도출함으로써 계획된 질적/양적 성과를 모두 달성함.</li> <li>○ 구체적으로, SCI(E)/SSCI급 학술지 논문 게재 2편, 학술대회 발표논문 게재 3편과 전문가 설문(만족도</li> </ul>                                                                                                                      | 100% |

|                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
|                           | 97.27%)을 통해 플랫폼 제약조건의 타당성을 검증함.                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |
| [연구목표 3-2] 개발 플랫폼 검증 및 보완 | <p>○ 본 연구는 개발 플랫폼의 생산성 분석 성능을 평가하고 부족한 부분을 보완함으로써 최종 정확도를 향상하였음. 또한, 플랫폼에 대한 사용자 만족도 조사(91.17% 만족)를 수행하여 계획된 질적/양적 성과를 모두 달성함.</p> <p>○ 구체적으로, SCI(E)/SSCI급 학술지 논문 게재 2편, 학술대회 발표논문 게재 3편, 해외 특허 등록 2건, 시제품 제작 1건, 소프트웨어 등록 1건, 개발 플랫폼을 통한 건설 생산성 분석 및 향상 테스트(정확도 95.90%, 향상도 22.10%)를 통해 개발 플랫폼의 이론적/기술적 타당성을 검증함.</p> | 100% |

#### 4. 목표 미달 시 원인분석: 해당사항 없음

#### 5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도

##### 5-1. 연구개발성과의 기여점

###### ○ 기술적 기여점

- 본 연구는 DB 구축에 많은 시간과 비용이 요구되던 기존 기술의 한계를 극복하고 건설현장의 다양성을 반영한 학습용 DB를 구축함으로써 높은 성능의 영상분석기술을 개발함. 학습용 DB 구축의 자동화는 건설분야에서는 첫 번째 시도이고 IT분야에서 또한 도로, 실내건물 등 일부 환경을 대상으로만 개발된 바 있는 매우 도전적인 시도임. 개발한 DB 자동구축 기술은 건설분야를 넘어 스마트시티, 스마트팩토리 등 타 산업으로의 확장 적용 또한 가능할 것임.
- 2019년 1월 한국정보화진흥원은 AI 허브 구축사업의 일환으로 사물이미지, 보행영상, 일반 CCTV 영상 등 인공지능 학습용 DB 구축 계획을 발표했음. 본 연구는 이러한 정책 기조에 대응하며 AI 최고수준 보유국 미국대비 2019년 기준 78.86% 수준인 국내기술 향상에 이바지할 것임.
- 건설프로세스를 전주기적으로 통합관리하는 플랫폼 기술은 건설산업에 빅데이터, 딥러닝 기술을 선도적으로 접목한 기술로 건설현장에서 쏟아져 나오는 각종 영상 데이터를 수집, 저장하고 자동으로 분석하여 다양한 경험지식을 도출하는 기반을 마련함. 이는 데이터-정보-지식으로 이어지는 건설 지식생태계를 구축하여 현재 10%인 건설생산 가치 누수 수준을 7-8%로 향상하는데 기여할 것임.

###### ○ 경제·산업적 기여점

- 지난 수십 년간 전 세계적으로 정체되어 있는 건설 생산성을 향상함으로써 건설산업이 고부가가치 산업으로 도약할 수 있는 계기를 마련함. 생산성 20% 향상은 2018년 기준 국내 건설산업의 노동 시간당 부가가치 창출액 \$18.2를 \$21.8로 개선하여 현재 글로벌 선도 수준 대비 65%인 수준을 80% 수준으로 향상할 수 있을 것임. 개발된 원천기술은 건설산업뿐만 아니라 조선산업, 제조업 등의 생산성 문제해결에도 활용될 것으로 기대됨.
- 최근 코로나 사태에 따른 언택트(Untact) 시대에 발맞추어 건설프로젝트 통합관리를 비대면, 자동화함으로써 경제·산업적 타격을 최소화하면서 생산성 향상을 도모할 수 있음.
- 생산성 향상이라는 손에 잡히는 이익을 발주자 및 시공사에게 제공함으로써 딥러닝, 영상분석, 인공지능 등 최신 IT 기술을 활용한 건설프로세스 관리의 가능성을 입증하고 융복합 영역에 대한 산업계의 관심을 제고함. 이는 건설산업의 이미지 향상으로도 이어질 수 있음.
- 국제기준에 부합하는 기술을 개발하여 세계 시장으로의 기술이전을 타진하고 대한민국을 대표하는 건설 스타트업에 창업할 수 있는 기술적 기반을 마련함. 또한, 국제협력 역량과 융합적 사고를 지닌 고급인력을 양성함.

## 5-2. 관련 분야에 대한 기여점

### ○ 영상분석 분야에 대한 기여점

- 본 연구는 기존 영상분석 분야의 고질적인 문제점이었던 학습 DB 구축에 많은 시간과 비용이 필요하다는 문제를 근본적으로 해결함. 그 결과, 비교적 적은 인력과 노력으로도 높은 인식 성능과 보편성을 갖는 영상분석모델을 짧은 시간 내에 개발할 수 있으며, 이를 토대로 국내외 연구자들에게 새로운 연구방향을 제시하고 영상분석 연구분야의 발전에 기여할 수 있음.
- 현장 진행 상황에 따른 카메라 설치 위치의 변화로 인해 발생할 수 있는 배경 변화 또는 흐림 현상 또한 학습 DB의 지속적인 업데이트를 통해 해결할 수 있으며, 개발된 HCI기술은 다양한 환경 조건에서도 정확하게 영상분석기술을 활용할 수 있도록 도움을 줄 것임.

### ○ 건설 플랫폼 분야에 대한 기여점

- 본 연구에서 개발한 플랫폼을 활용함으로써 건설작업의 생산성을 자동으로 분석하여 생산성 저해요인 도출, 공사계획 대비 실적 평가, 공사비/공기 예측, 인력 및 장비 투입계획 수립 등 현장 관리자의 의사결정 및 업무를 지원할 수 있으며 궁극적으로 현장 생산성 관리에 필요한 인력과 비용을 절감하고 업무 생산성 향상에 기여할 수 있음.
- 생산성 자동분석 플랫폼의 설계 및 구축 방식은 건설현장 안전사고 예방을 위해서도 동일하게 적용될 수 있음. 현장 맞춤형 DB를 활용하여 전 공정에 걸쳐 작업자와 장비, 자재의 위치와 행동을 실시간으로 모니터링함으로써 작업구역별 투입 인원 및 장비 수 현황, 작업자와 장비 간 충돌 가능성, 작업자의 위험지역으로의 접근 여부, 자재 적재 위험성, 작업자의 안전 보호장구 착용 여부, 쓰러져 있는 작업자 등을 확인할 수 있어 위험사고를 예방하여 안전한 현장 구현에 이바지할 수 있음(그림 96).

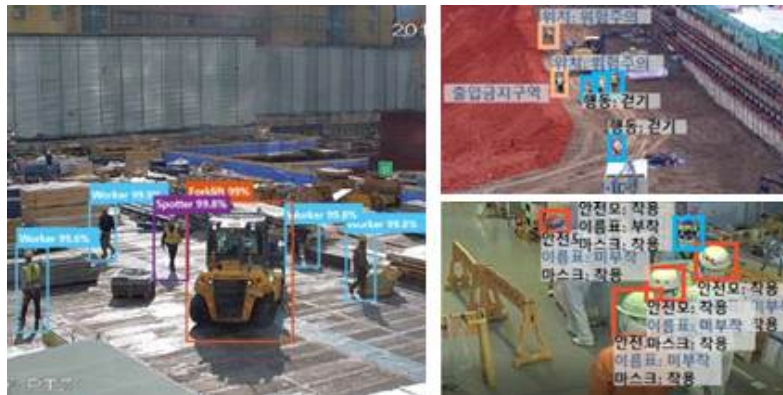


그림 96. 개발기술의 건설현장 안전관리 적용 예시.

## 6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

### ○ 관리 및 활용 계획

- 본 연구를 통해 건설 생산성을 향상할 수 있는 고부가가치 핵심기술인 건설프로세스 통합관리 플랫폼을 개발함. 특히 DB-free 영상분석기술을 활용하여 전주기적으로 생산성을 관리하는 핵심원천기술은 국제적으로 유일무이한 기술이며 국내외 건설프로젝트 발주기관뿐만 아니라 시공사에서도 범용적으로 활용할 수 있는 기술임. 또한, 학습용 DB 자동구축 기술과 영상분석 생산성 관리 기술은 건설 최전선에 적용될 수 있는 실용적인 기술로 산업 생산성 향상에 이바지할 것임.
- 연구개발성과를 연구책임자 서울대학교 지식호 교수 연구실에서 꾸준히 관리할 것이며 앞으로 추가될 성과는 국토교통과학기술진흥원에 업데이트할 것임. 개발된 기술 중 주식회사 사이트비전으로 이전된 액티브 러닝 기술(특허 제10-2168558호)은 건설현장의 특성을 보다 쉽게 반영할 수 있도록 해당 스타트업에 의해 지속해서 관리 개발될 것임.
- 연구개발성과의 현장 적용성을 높이기 위해 실제 건설현장을 추가로 섭외하여 플랫폼을 테스트하고,

실용화를 위해 필요한 기능을 추가 및 보완할 것임. 현재 한국수자원공사의 충주 건설현장을 섭외하여 구체적인 현장 적용 계획을 논의 중에 있으며, 이외에도 연구진이 보유한 대우건설, GS건설, 현대건설 등 산학 네트워크를 적극 활용하여 연구 성과의 현장 적용 및 실용화를 수행할 것임. 연구 성과의 향후 주요 활용처의 경우, 한국도로공사, 한국수자원공사, 한국토지주택공사 등의 공기업과 체계적인 현장 모니터링을 원하는 많은 민간기업이 대상이 될 것이며, 현장사업관리 솔루션을 제공하는 PMIS 기업으로의 기술이전도 고려해볼 수 있음. 또한, 생산성 관제는 현장 안전관제로도 이어질 수 있어 국토안전관리원의 스마트 안전장비 지원사업, 국토안전 K-테스트베드 사업과 연계하여 실용화를 추진할 수도 있을 것임.

- 홍콩과의 국제공동연구 성과를 바탕으로 등록한 해외특허 2건을 활용하여 홍콩, 중국 시장으로의 진출과 전문적인 관리인력이 절대적으로 부족한 동남아시아 개발도상국 시장으로의 진출도 계획해볼 수 있음.

#### ○ 추후 예상되는 연구개발성과

- 현재 제출하여 심사를 받고 있거나 작성 중인 논문이 다수 있어 연구과제 종료 이후에도 지속적으로 연구개발성과가 달성될 것으로 기대하며, 본 연구과제를 통해 인건비를 지원받은 대학원생이 향후 전문인력으로 배출될 것임. 예를 들어, 사후 3년 동안 총 5편의 국제저명학술지 논문이 추가로 게재될 것이 예상되며, 학사 1명, 박사 6명의 전문인력이 향후 4년에 걸쳐 배출될 것임.

표 65. 연구개발성과 활용계획표.

| 구분(정량 및 정성적 성과 항목) |           | 사후1년차 | 사후2년차 | 사후3년차 | 사후4년차 |
|--------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|
| 국외논문               | SCIE/SSCI | 3     | 1     | 1     |       |
|                    | 비SCIE     |       |       |       |       |
|                    | 계         | 3     | 1     | 1     |       |
| 인력양성               | 학사        |       | 1     |       |       |
|                    | 석사        |       |       |       |       |
|                    | 박사        |       | 2     | 2     | 2     |
|                    | 계         |       | 3     | 2     | 2     |

## 7. 참고 문헌

- Akhavan, R., and Behzadan, A. H. (2016). "Smartphone-based construction workers' activity recognition and classification." *Automation in Construction*, 71, 198-209.
- Azar, E. R., Dickinson, S., and McCabe, B. (2013). "Server-Customer Interaction Tracker: Computer Vision-Based System to Estimate Dirt-Loading Cycles." *Journal of Construction Engineering and Management*, 139(7), 785-794.
- Gong, J., and Caldas, C. H. (2010). "Computer Vision-Based Video Interpretation Model for Automated Productivity Analysis of Construction Operations." *Journal of Computing in Civil Engineering*, 24(3), 252-263.
- Ham, Y., Han, K. K., Lin, J. J., and Golparvar-Fard, M. (2016). "Visual monitoring of civil infrastructure systems via camera-equipped Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): a review of related works." *Visualization in Engineering*, 4(1), 1.
- Kim, H., Bang, S., Jeong, H., Ham, Y., and Kim, H. (2018). "Analyzing context and productivity of tunnel earthmoving processes using imaging and simulation." *Automation in Construction*, 92, 188-198.

- 
- Kim, H., Ham, Y., Kim, W., Park, S., and Kim, H. (2019). "Vision-based nonintrusive context documentation for earthmoving productivity simulation." *Automation in Construction*, 102, 135-147.
- Kim, J., Chi, S., and Seo, J. (2018). "Interaction analysis for vision-based activity identification of earthmoving excavators and dump trucks." *Automation in Construction*, 87, 297-308.
- Lee, S. S., Park, S., and Seo, J. (2018). "Utilization analysis methodology for fleet telematics of heavy earthwork equipment." *Automation in Construction*, 92, 59-67.
- McKinsey Global Institute. (2017). *Reinventing Construction: A Route To Higher Productivity*. McKinsey & Company.
- Seo, J., Han, S., Lee, S., and Kim, H. (2015). "Computer vision techniques for construction safety and health monitoring." *Advanced Engineering Informatics*, 29(2), 239-251.
- Seo, J. O., Alwasel, A., Lee, S., Abdel-Rahman, E. M., and Haas, C. (2017). "A comparative study of in-field motion capture approaches for body kinematics measurement in construction." *Robotica*, 1-19.
- Teizer, J. (2015). "Status quo and open challenges in vision-based sensing and tracking of temporary resources on infrastructure construction sites." *Advanced Engineering Informatics*, Elsevier, 29(2), 225-238.
- Yang, J., Park, M. W., Vela, P. A., and Golparvar-Fard, M. (2015). "Construction performance monitoring via still images, time-lapse photos, and video streams: Now, tomorrow, and the future." *Advanced Engineering Informatics*, 29(2), 211-224.
- Zhang, C., Hammad, A., and Rodriguez, S. (2012). "Crane Pose Estimation Using UWB Real-Time Location System." *Journal of Computing in Civil Engineering*, 26(5), 625-637. "건설기술진흥법 제98조 및 제99조." (2019). Korea, <<http://www.law.go.kr/법령/건설기술진흥법>> (Jan. 24, 2019).
- 국토교통부. (2018). 제6차 건설기술진흥기본계획 (2018~2022).
- 이학준, 권영민, 윤차웅, 서종원. (2016). "덤프의 이동경로 모니터링을 통한 생산성 분석." *대한토목학회논문집*, 36(3), 565-571.
- 한국건설산업연구원. (2017). *건설동향브리핑*.
- 

## < 별첨 >

### 별첨 자료

1. 총 연구개발기간 성과점검기준표 및 증빙자료
  2. 세부 정량적 연구개발성과 증빙자료(총 연구개발기간 성과점검기준표 실적 증빙자료에 기 포함되어 있는 증빙자료 제외)
-

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.