18CTAP-C117271-03

보안 과제( ), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개( )발간등록번호()
국토교통기술촉진연구사업 제3차 연도 최종보고서

R&D / 18CTAP-C117271-03

BIM을 이용한 교량 구조물의 안전진단 및 유지관리 시스템 구축

최종보고서

2019. 07. 05.

주관연구기관 / 고려대학교
위탁연구기관 / 인하대학교
/ ㈜마이다스아이티

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

BIM을 이용한 교량 구조물의 안전진단 및 유지관리 시스템 구축 최종보고서

2019

국토교통부 국토교통과학기술진흥원

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.

2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.

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

제 출 문

국토교통부장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

'BIM을 이용한 교량 구조물의 안전진단 및 유지관리 시스템 구축'(연구개발 기간 : 2016. 06. 28 ~ 2019. 04. 27) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2019. 07. 05.

주관연구기관명 : 고려대학교 산학협력단 (대표자) 허 준 (인)



주관연구기관책임자: 한 상 윤

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

제 출 문

국토교통부장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

'BIM을 이용한 교량 구조물의 안전진단 및 유지관리 시스템 구축'(연구개발 기간 : 2016. 06. 28 ~ 2019. 04. 27) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2019. 07. 05.

위탁연구기관명 : (주)마이다스아이티 (대표자) 이 형 우 (인)



위탁연구기관책임자: 김 태 호

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

제 출 문

국토교통부장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

'BIM을 이용한 교량 구조물의 안전진단 및 유지관리 시스템 구축'(연구개발 기간 : 2016. 06. 28 ~ 2019. 04. 27) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2019. 07. 05.

위탁연구기관명 : 인하대학교 산학협력단 (대표자) 서 태 범 (인)



위탁연구기관책임자: 신 도 형

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제 고유 번호</td><td>18CTAP-C117271-03</td><td>해당 단계
연구 기간</td><td>2018.04.28
~ 2019.04.27</td><td>단계구분</td><td>3/3</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구사업명</td><td>중사업명</td><td colspan="4">국토교통기술촉진연구사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4">첨단융합</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구과제명</td><td>대과제명</td><td colspan="4">BIM을 이용한 교량 구조물의 안전진단 및 유지관리 시스템 구축</td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4">BIM을 이용한 교량 구조물의 안전진단 및 유지관리 시스템 구축</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구책임자</td><td rowspan="2">한상윤</td><td>해당단계
참여연구원 수</td><td>총: 23명
내부: 명
외부: 명</td><td>해당단계
연구비</td><td>정부: 377,000 천원
민간: 천원
정부외: 천원
상대국: 천원
계 : 천 원</td></tr>
<tr><td>총 연구기간
참여연구원 수</td><td>총: 33명
내부: 명
외부: 명</td><td>총 연구비</td><td>정부: 900,000 천원
민 간 : 천 원
정부외: 천원
상대국: 천원
계 : 천 원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소속 부서명</td><td colspan="3">고려대학교 산학협력단</td><td>참여기업명</td><td></td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명:</td><td colspan="2">상대국 연구기관명:</td></tr>
<tr><td>위탁연구</td><td colspan="3">연구기관명: 인하대학교
㈜마이다스아이티</td><td colspan="2">연구책임자: 신도형
김태호</td></tr>
<tr><td rowspan="2">보안등급 분류 및
결정사유</td><td colspan="5">일반</td></tr>
<tr><td colspan="5">- 본 과제는 교량 유지관리단계에 활용 가능한 BIM 기반 이력 데이터 관리 시스템을 구축하는 연구로써 다양한 교량 유지관리 및 BIM 분야의 전문가들과 공유해야 할 필요가 있음
- 국방 또는 안보관련 기술로 전용 가능한 연구가 아님</td></tr>
</table>

■ BIM을 활용한 교량 구조물의 안전진단 및 유지관리 시스템 구축

- BIM 기반 안전진단 및 유지관리 기술
- 교량 구조물의 가치평가 및 잔존수명 예측 시스템 개발
- 교량 구조물 BIM 라이브러리 구축 및 조립 프로그램 개발
- 교량 구조물 상태평가 기법 개발

보고서 면수 : 215p

〈 요약문 〉

연구의 목적 및 내용	■ **BIM 기반 안전 진단 및 유지관리 기술 구축** - 방대한 양의 이력 정보를 체계적으로 분류 및 정리하여 라이브러리를 구축 - BIM에 구축된 라이브러리를 적용하여 교량 구조물 이력 정보의 체계화 및 3차원 시각화를 가능하게 함 - BIM을 통한 안전 진단 및 유지관리 통합관리시스템 구축 ■ **교량 구조물의 가치평가 및 잔존 수명 예측 시스템 개발** - 육안 검사 기반의 이력 정보만으로는 교량 구조물의 내부성능 평가에 어려움이 있기 때문에 구조해석을 통한 상태평가 기반의 가치평가 및 잔존 수명 예측 시스템을 개발하고자 함 - 교량 구조물의 가치평가 및 잔존 수명 예측 시스템을 활용하여 라이브러리를 구축하고 BIM에 적용 ■ **교량 구조물 BIM 라이브러리 구축 및 조립 프로그램 개발** - 지형고를 고려한 BIM 라이브러리 구축 및 모듈 자동 조립 프로그램을 개발 - BIM에 구축된 라이브러리를 적용한 교량 구조물의 안전 진단 및 유지관리 프로그램 개발 ■ **교량 구조물 상태평가 기법 개발** - 확률론적 기법을 기반으로 다양한 하중에 따른 구조물의 응답에 대한 상태평가 기법 개발
연구개발성과	■ 교량 구조물 안전 진단 및 유지관리 통합관리시스템 개발 ■ 교량 구조물 상태평가 기반의 가치평가 및 잔존 수명 예측 시스템을 이용한 교량 구조물의 안전 진단 및 유지관리 기술 개발 ■ 지형고를 고려한 BIM 라이브러리 구축 및 모듈 자동 조립 프로그램 개발 및 특허 ■ 확률론적 기법을 기반으로 교량 구조물의 상태평가 모델 개발 및 특허
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	■ 본 제안과제는 유사환경 시험 단계로 **실제 BIM에 적용 가능한 안전 진단 및 유지관리 통합관리시스템 개발을 목표로 연구를 수행**할 것이며, **후속 연구로 실용화 단계**까지 수행될 수 있음 ■ 건설 산업에 BIM도입이 빠르게 퍼져나가고 있으며 교량 구조물의 안전 진단 및 유지관리에 BIM을 적용하여 **실무자들 간의 상호보완적인 관계형성과 효율성 및 국제 경쟁력 향상에 도움이 될 것으로 기대**됨 ■ 교량 구조물의 안전진단 및 유지관리에 BIM을 적용하는 것은 아직 도입 및 개발단계에 있기 때문에 구조물 유지관리에 **선도적인 기술**이 될 것임 ■ 지형고를 고려한 BIM 라이브러리 구축과 자동 조립 프로그램을 **개발**하여 일반적인 교량구조물에도 BIM을 접목할 수 있을 것이라 기대함 ■ 단순한 소프트웨어 측면이 아닌 **안전 진단 및 유지관리 전 범위에 걸쳐 효율성이 증대**될 것으로 기대됨
국문핵심어 (5개 이내)	건설정보통합 모델링 / 진단 / 관리 / 계측 / 안전

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	■ **Establishment of bridge safety diagnosis and maintenance based on BIM** - Development of database through systematical classification and organization of large quantities of data. - Enabling systemization and 3D visualization through application of established database to BIM. - Establishing integrated safety diagnosis and maintenance management system using BIM. ■ **Development of the value assessment and rest life prediction system of the bridge.** - It was desired to develop the value assessment and rest life prediction system of the bridge through structural analysis because of the difficulty to evaluate durability of the bridge only with history data based on visual inspection. - Establishment of database using the value assessment and rest life prediction system of the bridge and its application to BIM. ■ **Establishment of BIM database of bridge and development of automated assembling program** - Development of BIM database considering elevation and automated assembling program - Development of safety diagnosis and maintenance program through application of database organized in the BIM. ■ **Development of condition assessment technique of bridge** - Development of condition evaluation technique for the response of the structure according to the various loading based on stochastic technique
Results	■ Development of bridge safety diagnosis and maintenance integrated management system ■ Develop Bridges Condition Assessment Based Valuation and safety inspection and maintenance technology of bridge structures using the residual life prediction system ■ BIM database of considering elevation build and automated assembly module program development/patent ■ Develop bridges condition assessment development model based on stochastic technique/patent
Expected Contribution	■ The proposed project will be to conduct research aimed at safety diagnostics and maintenance management system integration application development environment similar to a real BIM pilot phase, with subsequent studies that can be done to the practical stage ■ BIM is expected to help effectiveness, improvement of international competitiveness, and complementary relationships among the practitioners since it is rapidly spreading out in the construction industry and applied to safety diagnosis and maintenance of the bridge structure ■ Applying BIM to the safety inspection and maintenance of the bridge structure, which is still in initial phase of introduction and development will be leading technology to structure maintenance ■ By developing BIM database and automated assembly system to consider elevation could be expected to combine the typical BIM bridges ■ Not only just simple software side, this is expected to increase that across the full range of safety inspection and maintenance to be increased efficiency

Keywords	BIM	diagnose	maintain	measurement	safety

〈 목 차 〉

제 1 장 연구개발과제의 개요 ····· 1

제 1 절 연구개발 개요 및 필요성 ····· 1

1. 연구개발 개요 ····· 1

2. 연구개발 필요성 ····· 1

제 2 절 연구개발의 중요성 ····· 6

제 3 절 연구개발 목표 및 범위 ····· 9

1. 연구개발 최종목표 ····· 9

2. 연구개발 세부목표 ····· 10

3. 연구개발 주요내용 ····· 10

가. BIM 기반 안전진단 및 유지관리 기술 ····· 10

나. 교량 구조물의 가치평가 및 잔존수명 예측 기술 ····· 11

다. 교량 구조물 BIM 라이브러리 구축 및 조립 프로그램 개발 기술 ····· 11

라. 교량 구조물 상태평가 기법 개발 기술 ····· 12

4. 연구개발 핵심 성과 ····· 12

가. 연구개발 핵심 연구성과 ····· 13

나. 핵심 연구성과별 설명 ····· 13

제 2 장 국내외 기술 개발 현황 ····· 16

제 1 절 국내외 유지관리 현황 ····· 16

1. 국내 유지관리 현황 ····· 16

2. 국외 유지관리 현황 ····· 21

가. 미국 ····· 21

나. 유럽 ····· 26

제 2 절 국내외 BIM 기술개발 현황 ····· 28

1. 국내 BIM 기술개발 현황 ····· 28

가. 한국시설안전공단 (2018) BIM기반 특수교량 유지관리를 위한 표준기술 개발 및 실증 연구 ····· 28

나. 한국도로공사 (2016) Ex-BIM 설계 표준모델 구축 연구 ····· 29

다. 한국철도기술연구원 (2019) BIM기반의 철도인프라 관리 표준기술 개발 ····· 32

라. 국토교통부 - BMS(Bridge Management System) ····· 34

2. 국외 BIM 기술개발 현황 ····· 35
가. 미국 ····· 35
나. 영국 ····· 37
다. 일본 ····· 39
3. 본 과제의 차별성 ····· 40

제 3 장 연구수행내용 및 성과 ····· 42

제 1 절 연구개발 추진 체계 ····· 42

1. 연구개발 추진전략 및 방법 ····· 42
2. 연구개발 추진체계 ····· 43
3. 연구개발 추진 일정 ····· 44

제 2 절 연구 수행 내용 ····· 45

1. 교량 통합 유지관리 이력 관리 정보체계 구축 ····· 45
가. 안전진단 및 유지관리 체계 구축 ····· 45
나. 교량 구조물의 가치평가 시스템 ····· 63
다. 교량 구조물의 잔존수명 예측 시스템 ····· 72
라. 교량 통합 유지관리 정보체계 구축 ····· 99
2. 교량구조물 BIM 라이브러리 구축 및 모델링 프로그램 개발 ····· 106
가. 교량 3D 모델 생성 기술 ····· 106
나. 교량 구조물의 형상 업데이트 기술 ····· 112
다. 3D 정보모델과 교량 해석 SW(midas Civil)과의 연동 기술 ····· 113
3. Web 기반 교량 유지관리 BIM 프로그램 개발 ····· 116
가. 대상 교량 선정 ····· 116
나. Web기반 교량 유지관리 이력 관리 프로그램 ····· 117
다. 이력 관리 프로그램-교량 모델 연동 기술 ····· 126
4. 교량 구조물의 손상 추정 시스템 개발 ····· 135
가. 교량 구조물의 손상 구조해석 ····· 135
나. 교량 구조물의 손상 예측 시스템 ····· 151

제 3 절 최종 연구 성과 ····· 175

1. 연구개발 결과 ····· 175
2. 연구개발 성과 ····· 185

제 4 장 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 189

제 1 절 목표 달성도 ····· 189

1. 질적 성과지표 달성도 ····· 189

2. 양적 성과지표 달성도 ····· 191

제 2 절 관련 분야 기여도 ····· 192

제 5 장 연구개발성과의 활용계획 ····· 193

1. 기존 연구와의 차별성 ····· 193

2. 연구성과의 한계점 ····· 193

3. 추가연구의 필요성 ····· 194

4. 사업화 계획 ····· 188

제 6 장 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보 ····· 197

제 1 절 BIM 정책 및 가이드라인 ····· 197

1. 미국 ····· 197

2. 영국 ····· 198

3. 싱가폴 ····· 199

4. 핀란드, 덴마크 ····· 199

제 7 장 연구개발성과의 보안등급 ····· 200

제 8 장 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황 ····· 200

제 9 장 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적 ····· 200

제 10 장 연구개발과제의 대표적 연구 실적 ····· 200

제 11 장 기타 사항 ····· 202

제 12 장 참고 문헌 ····· 203

<부록> 안전진단 결과, 잔존수명, 가치평가 산정 예시 ····· 207

1. 안전진단 결과(정기점검, 정밀점검, 정밀안전진단) ····· 207

가. 상태평가 ····· 207

나. 종합평가 ····· 208

2. 안전진단 결과(성능평가) ····· 209

가. 상태적 안전성 평가 ····· 209

나. 구조 안전성 평가 ····· 210

다. 내구성(강재) 평가 ····· 211

라. 내구성(콘크리트) 평가 ····· 213

마. 종합성능 평가 ····· 214

3. 잔존수명 ····· 216

가. 염해(추정) ····· 216

나. 염해(조사) ····· 217

다. 탄산화(추정) ····· 218

라. 탄산화(조사) ····· 218

마. 동해 ····· 218

바. 피로 ····· 219

4. 가치평가 ····· 219

가. 취득원가(정액법) ····· 219

나. 취득원가(결함도 지수) ····· 220

다. 대체원가(정액법) ····· 221

라. 대체원가(결함도 지수) ····· 222

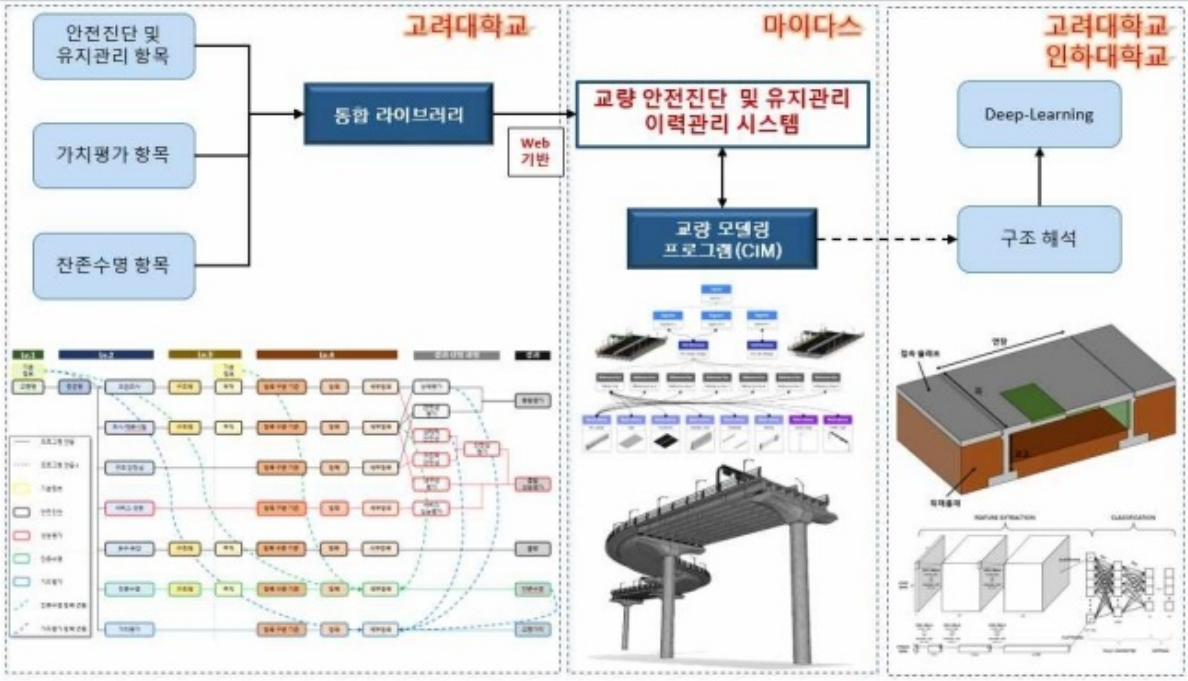
제 1 장 연구개발과제의 개요

제 1 절 연구개발 개요 및 필요성

1. 연구개발 개요

BIM을 이용한 교량 구조물의 안전진단 및 유지관리 시스템 구축

핵심 기술 연구			
BIM 기반 안전 진단 및 유지관리 기술 구축	교량 구조물 가치평가 및 잔존수명 예측 시스템 개발	교량 구조물 BIM 라이브러리 구축 및 조립 프로그램 개발	교량 구조물 상태평가 기법 개발



<그림 1.1.1> 연구개발 흐름도

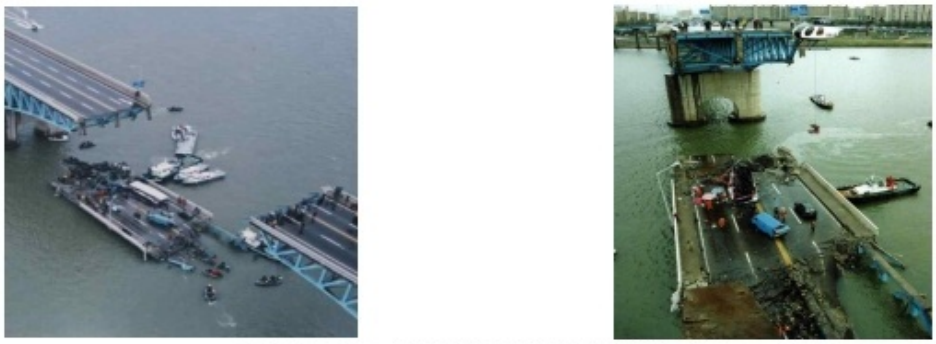
↓

BIM(Building Imformation Modeling)을 기반으로 안전진단 및 유지관리 이력 데이터를 교량 3D 정보모델을 통해 시각적으로 관리하고, 가치 있는 정보(잔존수명, 교량 가치)로 가공하여 제공할 수 있는 통합 관리 시스템 구축

2. 연구개발 필요성

○ 1960년대부터 1980년대까지 우선경제성장을 목표로 계획되었던 사회기반 시설물들이 21세기에 접어들어 급격하게 낙후되는 추세를 보이고 있음

- 1990년대 지하철 2호선 터널벽 붕괴, 청주 우암 상가아파트 붕괴, 남해 청선대교 붕괴, 성수대교 붕괴 등의 대형 참사가 연속적으로 발생하였음
- 사회기반 시설물들의 전반적인 유지관리의 필요성이 대두 되었으며 이에 따라 정부에서는 1995년 "시설물의 안전관리에 관한 특별법"을 제정하고 시행하여 지속적인 성능을 유지하기 위한 점검, 관리 및 보수를 법률화 하였음



<그림 1.1.2> 성수대교 붕괴사고 (1994년도)

○ 기존 시설물의 안전관리는 여전히 우선순위가 되지 못하였고 그 결과, 같은 해 6월에는 삼풍백화점 붕괴라는 최악의 참사로 이어지게 됨

- 국민 안전에 대한 관심이 집중되고, 급속하게 유지관리 산업이 정착되었음
- 꾸준한 정부 주도의 관리 및 유지 보수가 이어진 결과, 붕괴사고를 현저하게 감소시켰으며 사회기반 시설물에 대한 안전을 확보 할 수 있었음



<그림 1.1.3> 삼풍백화점 붕괴사고 (1995년도)

○ 기존에 시공된 사회기반 구조물들의 연한이 30년을 넘었으며 노후화로 인한 잠재적 붕괴가능성을 지니고 있음

- 국내의 교량 및 교통망, 철도, 항만 등의 전 분야에 걸쳐 건설된 사회기반 시설물은 총 2만여개에 달하며 그 중 10%에 해당하는 2천여개는 30년 이상 노후화된 구조물임
- 노후화된 교량 구조물은 30%의 가장 큰 비중을 차지하고 있으며 이 중 25%에 해당하는 교량은 완공 후 50년이 지난 상태
- 향후 2030년부터는 교량 구조물의 고령화가 본격화되므로 시설물의 진단 및 유지관리의 중요성이 부각되고 있음
- 특히 최근 내부순환로는 B등급 판정을 받은 교량이었으나 지속적인 관찰의 부재로 텐던의 파괴라는 극단적인 상황이 야기되었으며, 그 동안에 진행된 정밀 진단 및 안전진단, 유지관리에 대한 신뢰성이 저하되었음.



<그림 1.1.4> 내부순환로 텐던 파손

○ 시설물 체계적인 안전 진단 및 유지관리의 필요성이 대두됨

- 시설물 안전관리에 관한 특별법에서 법, 시행령 제 13조에 의거하여, 기존의 구조물에 대해 주기적으로 정기점검, 정밀점검, 정밀안전진단, 긴급점검을 수행하고 있으며 그 주기와 대상 교량을 살펴보면 다음 표와 같음

<표 1.1.1> 시설물 안전관리에 관한 특별법 (법, 시행령 제 13조)

점검	대상교량	점검주기
정기점검	도로상의 모든 교량	연 2회 이상
정밀점검	도로상의 교량 중 1, 2종 교량과 그 외의 교량 중 관리 주체가 선정한 교량	매 2년마다 1회 이상
정밀안전진단	1종 교량 중 준공 후 10년 이상 경과된 교량과 관리주체가 선정한 교량	매 5년마다 1회 이상 또는 관리주체가 필요하다고 판단하는 경우, 준공 후 10년이 경과된 교량의 첫 번째 정밀안전진단은 공용 연수가 15년이 되기 이전에 1회 실시한다.
긴급점검	각종 재해 및 긴급한 손상이 발견된 경우 또는 관리주체가 필요하다고 판단하여 선정한 교량	관리주체가 필요하다고 판단하는 경우에 실시

- 한국시설안전공단에서는 기존의 구조물이 위와 같이 안전점검을 실시한 후 손상등급을 나누어 상태를 분류하고 있으며 다음 표와 같음

<표 1.1.2> 손상등급 분류표 (한국시설안전공단)

등급	상태
A	문제점이 없는 최상의 상태
B	경미한 손상의 양호한 상태
C	보조부재에 손상이 있는 보통의 상태
D	주요부재에 진전된 노후화(강재의 피로균열, 콘크리트의 전단균열, 침하 등)로 긴급한 보수·보강이 필요한 상태로 사용제한 여부를 판단
E	주요부재에 심각한 노후화 도는 단면 손실이 발생하였거나 안전상에 위험이 있어 시설물을 즉각 사용금지하고 개축이 필요한 상태

- 6,428개소에서 매년 수행되는 안전 진단 및 유지관리 데이터는 축적만 되어 있는 상태임
- 기존의 재정된 특별법과 손상등급에 관한 분류가 되어 있지만, 현장 실무자가 가시화된 정보를 활용할 수 있는 시스템은 구축되어 있지 않음

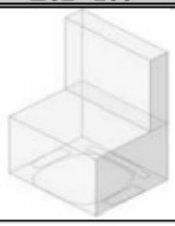
○ 교량 구조물의 안전 진단 및 유지관리에 BIM 기술을 접목

- BIM은 기존의 2차원 도면으로 시공되던 구조물을 3차원 상에서 전체 설계 및 시공 단계를 검토하여 건설 프로젝트 진행 과정 중 발생될 수 있는 위험도와 손실을 최소화시킴
- BIM은 2차원의 단순한 도면을 3차원 상으로 가시화해줄 뿐 아니라 구조물을 구성하는 부재들에 다양한 정보(재료, 가격, 상태, 시기 등)를 제공해주며 시공 시 발생할 수 있는 많은 시행착오를 줄여주고, 정확한 단가산출을 가능하게 해주는 장점이 있음
- 따라서, BIM을 기반으로 안전 진단 및 유지관리 정보를 가시화하여 체계적이고 효율적인 시스템 도입을 도모함

○ BIM 기술 도입에 적합한 라이브러리 구축 필요성 대두됨

- 기존에 분리되어 수행된 안전 진단 및 유지관리의 통합적인 데이터 이력 부재로 인해 BIM 기술 접목이 어려움
- 기 수행된 시설물 안전 진단은 육안검사 위주의 외관 조사로 인해 신뢰성이 저하됨
- 교량 구조물의 체계적인 파라미터 적립 및 LOD (Level of Detail)의 정의가 필요

<표 1.1.3> LOD(Level of Detail)에 대한 비교

LoD 100	LoD 200	LoD300	LoD 400	LoD 500
				
면적, 높이, 볼륨, 위치 등의 기본 정보만을 보임	모델 요소의 일반화된 형태와 실제와 근사한 수준의 물량, 크기, 형태를 보임	실제와 같은 물량 정보를 보임	조달, 시공에 필요한 모든 디테일한 정보를 보임	준공도면으로써 구분

○ 지형고를 고려한 교량 구조물의 BIM 자동 조립 프로그램 개발이 필요함

- 교량 구조물은 비정형구조물이여서 모듈화 작업에 어려움이 있음
- BIM 기반 교량 구조물의 지형고를 고려한다면 모듈화가 가능함
- 따라서 본 연구는 과거 국내에 가장 많이 설치된 교량 형식을 대상으로, 안전 진단 및 유지관리가 용이하도록 BIM 기반의 지형고를 고려한 자동 조립 프로그램을 개발하고 라이브러리를 구축하고자 함

○ 교량 구조물의 구조해석을 통한 상태평가 기법을 정립하여, 체계적인 안전 진단 및 유지관리 시스템을 구축해야 함

- 선정된 대표 교량 별 구조해석 모델링 및 상태평가 기법 선정
- 구조해석을 통하여 다양한 하중에 따른 교량 구조물의 응답을 추출하여 샘플링 모델 수집
- 교량 구조물의 상태평가 민감도 분석 및 모델 검증 수행

○ 교량 구조물의 가치평가 및 잔존 수명 예측으로 안전 진단 및 유지관리 상세 정보 구축이 필요함

- 정립된 교량 구조물 상태평가 기법을 기반으로 가치 평가와 잔존 수명 예측 정보를 구체화함
- 현재까지 사용된 교량의 가치 평가와 잔존 수명을 판정하는 기준을 마련하여, 안전 진단 및 유지관리 시기, 위치, 위험도 등의 구체화된 정보를 제공

○ BIM기반 안전 진단 및 유지관리 통합 시스템 구축

- BIM 라이브러리 구축을 통해 안전 진단 및 유지관리 이력 정보를 가시화 하여, 기존의 수행된 이력을 체계화함
- 국내에 기 시공된 대표 교량들의 안전 진단 및 유지관리 이력 정보를 BIM 상의 가시화된 데이터로 쉽게 확인하여, 문제 발생시에 적합한 대처 방안 마련
- 안전 진단 및 유지관리 통합 시스템으로 교량 구조물의 안전 진단 및 유지관리 비용 절감과 안정성 확보

○ 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하고자 방대한량의 정보를 체계적으로 관리가 가능한 BIM(Building Information Modeling) 기술에 적합한 라이브러리를 구축하여 기존에 수행된 이력을 관리하고 구조해석을 통한 상태평가 기반의 잔존수명 예측 및 가치평가에 대한 자세한 정보를 구조물 데이터에 접목 하고자함

○ BIM을 적용한 교량 구조물의 안전 진단 및 유지관리 기술로 실무자들 간의 상호보완적 관계를 도모하며 안전 진단 및 유지관리의 이력을 체계적으로 확립하고, 나아가 시설물의 붕괴와 사고를 감소시켜 국민 안전성 보장의 근간이 될 것으로 판단됨

제 2 절 연구개발의 중요성

○ 현재 국내에서 기존 건설된 사회 기반시설물 중 교량의 경우 노후화로 인하여 안전 진단 및 유지관리, 보수보강 등에 많은 국가적 비용이 소비되고 있으며 향후 더 많은 비용이 소비될 것임

- 정부 주도하에 1960년대부터 1980년대까지 우선 경제성장을 목표로 계획되었으며 경제력 향상이라는 사회적 요구를 충족할 수 있도록 단순히 시공됨
- 이에 따른 문제점들이 발생하고 있으며 교량 노후화로 인한 구조물 붕괴의 위험성이 증가함



(a) 1996년도에 세워진 제원교



(b) 1979년도에 완공한 왕산교

<그림 1.2.1> 노후화 교량 예시

○ 매년 또는 분기별 진행되는 교량의 시설물 점검은 지속적으로 수행되고 있으나, 주기별 수행되어지는 점검은 수행 기관별 일회성 결과물 도출로 인하여 대부분의 교량에서 이력을 확인하기 어려움

- 교량의 시설물 점검은 참여기업 입찰식으로 선정하기 때문에 매년 또는 분기별로 진행한다 하여도 매번 다른 기업이 교량의 시설물을 점검하게 되는 단점이 있음
- 매번 다른 기업의 시설물 점검으로 데이터의 축적이 불가능해지고 노후화된 교량의 기존 이력파악이 불가능함
- 또한 실무자들 간의 정보의 교환성이 떨어지며 교량 구조물의 안전 진단 및 유지관리의 어려움 증가

○ 안전 진단 및 유지관리의 체계화 시스템의 부재

- 안전 진단은 관리자의 육안검사로 진행되어 신뢰성이 저하되며 검사 결과로 작성된 과업지시서도 체계적으로 관리가 되지 못함
- 최근 안전 관리 소홀로 내부순환로는 B등급 판정을 받았으나 지속적인 안전 관리 부재 및 유지 보수의 부재로 텐던이 파괴되는 상황이 야기되었으며, 이로 인한 고가도로 전면통제로 교통 체증을 유발하였음



<그림 1.2.2> 내부순환로 통제구간

- 내부순환로를 주기적으로 안전 진단 및 관리하였다면 텐던의 파괴를 미연에 방지할 수 있었

을 것이고, 이에 따른 교통체증을 유발시키지 않아 국가적 차원에서 경제적 손해를 보지 않았을 것임

- 안전 진단의 경우 안전 진단에만 국한되어 등급을 나눠 놓은 실정이며 추가적인 안전 진단 및 조치 규정에 따른 보수 보강이 진행되지 않고 있음
- 안전 진단을 수행하는 실무자와 유지보수를 실행하는 실무자 간의 통일성 부재로 오차가 증가하게 되며 안전 진단과 유지관리를 통합관리 할 수 있는 시스템이 필요

○ 국가적 차원으로 건설 분야에 BIM을 접목 시키려는 노력이 증가하고 있는 추세임

- 조달청에서는 2010년 BIM 발주 정책 계획을 수립하고 BIM 발주가이드를 발표하였으며 2012년부터 500억 이상 건축 공사에서 BIM 설계를 의무화하며 2016년 까지 조달청에서 발주하는 모든 건축 공사에 BIM 활용을 의무화 하고자 계획하고 있으며 조달청에서 추진 중인 BIM 도입 추진 계획은 다음 표와 같음

<표 1.2.1> BIM 추진계획(조달청)

단계	단기계획 (10~12)	중기계획 (13~15)	장기계획 (16~)
목표	- BIM적용 확대를 통한 설계 품질 향상	- 4D(Cost) 설계관리 시스템 구축을 통한 예산절감	- 시설사업 전체로 BIM적용을 확대하여 업무혁신
대상	- Total Service 대상 건축공사 중 총공사비 500억 이상의 턴키 또는 설계공모로 발주하는 공사	- Total Service 대상 총 공사비 500억원 이상 건축공사	- 모든 건축공사
방법	- 적극적 마케팅을 통해 BIM 발주를 촉진 - 연차별로 BIM 발주지침을 개발 - BIM 적용시 인센티브 제공	- BIM발주 사업을 전문적으로 관리할 전담팀 구성 - 3D모델 데이터를 활용한 사업관리 시스템 구축	- 공사관리 업무에 BIM 모델데이터 활용 - 공사계약 업무에 BIM 모델데이터 활용 - 총 사업비검토 업무에 BIM 모델데이터 활용
기대효과	- 3D설계를 적용하여 수요기관 만족도 향상 - 민간 부문의 BIM 인프라 조성을 촉진 - 설계단계에서 다양한 검토로 설계품질 향상	- Total Service 원가관리 및 일정관리 향상 - 시공단계의 설계변경을 최소화하여 예산 낭비 요인을 제거	- 시설사업 혁신 및 재정집행 관리 강화

- 조달청에서는 시설사업 BIM 적용 기본 지침서를 발간하였으며 시설사업의 BIM이 갖춰야 할 최소 요건을 명시하고 설계자와 시공자 간의 업무 수행 기준을 제공하였음
- 건축분야 BIM 적용가이드를 개발 및 배포하며, BIM 활성화에 기여하고 있지만 토목분야 BIM 적용가이드의 연구가 필요함
- 토목 구조물은 비정형 구조물이여서 BIM을 적용하는 데 어려움이 있지만 지형고를 고려한 BIM 라이브러리를 구축한다면 기존 또는 신설 교량에 BIM을 적용할 수 있음



<그림 1.2.3> 시설사업 BIM적용 기본지침서

○ BIM 기술을 적용한 체계적인 라이브러리 구축의 필요성

- 기존 교량의 안전 진단 및 유지관리 이력을 확인하기는 힘든 실정이며, 이력을 축적할 수 있는 라이브러리가 필요함
- BIM에 적용 가능한 라이브러리를 구축하여, 관리의 편의성과 효율성을 극대화하고 체계적인 점검 및 유지관리를 진행해야함



<그림 1.2.4> 건축분야 BIM 적용가이드

- 실무자들 간의 다른 데이터로 인한 정보 공유의 부재 및 데이터 활용의 저하로 안전 진단 및 유지관리에 어려움을 발생시키며 라이브러리 구축이 필요함
- 활용 용도에 따라 라이브러리 구성방법에 많은 차이가 나타나며, BIM 라이브러리를 제공하는 사이트도 많음
- 모듈 라이브러리는 정확한 BIM 데이터 작성 기준과 BIM 활용 기준이 명확해야하며, BIM 데이터 작성 기준은 개방형 BIM을 구현하는 데 사용하는 공인된 국제표준(ISO/PAS 16739) 규격인 IFC로 선정할 수 있음



<그림 1.2.5> 국내외 BIM 라이브러리 관련 사이트

○ 상태평가 기반의 잔존 수명 예측 및 가치평가를 통한 교량 구조물 안전 진단 및 유지관리의 필요성

- 육안검사 기반의 외관조사만으로 교량 구조물의 잔존 수명 예측 및 가치평가에 어려움이 있음
- 안전 진단 및 유지관리 이력으로 볼 수 없는 정보를 구조해석을 통한 가치평가로 측정할 수 있음
- 교량 구조물의 잔존 수명 예측 및 가치평가를 통한 안전 진단 및 유지관리 시스템 구축이 필요함

○ 교량 구조물의 안전 진단 및 유지관리 정보 시각화를 통한 체계 구축

- 각 회사마다 다른 규격의 라이브러리를 활용한 BIM 소프트웨어를 보유하고 있으며, 다양한 데이터를 상호보완적으로 이용하는데 어려움이 있음
- BIM을 이용한 시각화로 실무자의 안전 진단 및 유지관리 업무의 효율성을 증가시킬 수 있음

○ 교량 구조물의 안전 진단 및 유지관리에 BIM을 접목 시킨 사례가 없고 노후화된 교량 구조물의 이력 관리가 재대로 수행되지 않고 있으며 체계적인 라이브러리 구축을 통한 이력 관리 및 실무자들 간의 자료 공유가 확보되어야함

제 3 절 연구개발 목표 및 범위

1. 연구개발 최종목표

○ 교량 구조물의 노후화로 안전 진단 및 유지관리에 소비되는 비용이 증가하고 있으며 매년 또는 분기별 점검이 지속적으로 수행되고 있지만 안전 진단 및 유지관리의 분리된 작업으로 이력 정보가 체계적으로 정리되어 있지 못하는 실정임

○ 또한 안전 관리 소홀로 미연에 방지할 수 있었던 사고들이 발생하고 있으며 안전 관리 및 유지보수에 중요성을 인식하지 못하고 안전 진단 및 유지보수의 효율성을 높여주는 정보 이력과 기술이 부족함

○ 교량 구조물은 비정형 구조물이기 때문에, 지형고를 고려한 BIM 라이브러리 구축이 필수적이며 자동 조립 프로그램 개발하여 일반적인 교량 구조물에도 BIM을 적용하고자 함

○ BIM을 적용한 교량 구조물의 안전 진단 및 유지관리 이력을 3차원 시각화해주고 라이브러리 구축을 통한 실무자 간의 업무 효율성이 증가하게 될 것이라 판단됨

○ 또한 구조해석을 수행하여 확인할 수 없는 이력에 대한 결과 값을 추가적으로 확보하여 상태평가를 수행하고 이에 따른 잔존수명 및 가치평가를 통한 체계적인 안전 진단 및 유지관리 시스템 구축에 핵심적인 기술이 될 것임

2. 연구개발 세부목표

<표 1.3.1> 연구개발 세부목표

기술명	BIM 기반 안전진단 및 유지관리 기술	교량 구조물의 가치평가 및 잔존 수명 예측 시스템 기술	교량 구조물 BIM 라이브러리 구축 및 조립 프로그램 개발 기술	교량 구조물 상태평가 기법 개발 기술
세부목표	안전 진단 및 유지관리 시스템 개발	구조해석을 통한 가치평가 기반의 잔존 수명 예측 및 가치평가	지형고를 고려한 BIM 라이브러리 개발	확률론적 기법을 이용한 교량 구조물의 상태평가
내용	• 사례 기반의 안전 진단 및 유지관리 이력 정보 확보 • 정보의 체계적인 라이브러리 구축 • 안전 진단 및 유지관리에 적용	• 교량 구조물 안전 진단 및 유지관리에 적용되는 하중해석 • 상태평가의 변수 민감도 분석 • 상태평가 기반의 가치평가 및 잔존 수명 예측	• 내부와 외부에서 데이터에 접근 할 수 있는 Hub 프로그램 개발 • 비정형 구조물의 지형고를 고려한 BIM 라이브러리 구축	• 교량 구조물의 응답 매개변수 후보군 선정 • 교량 구조물 상태평가 모델링 • 교량 구조물의 상태평가 민감도 분석
최종 성과물	• 안전 진단 및 유지보수 이력의 체계화 • BIM 적용 가능한 라이브러리 구축	• 이력이 없는 정보를 확보함 • 교량 구조물의 가치평가 및 잔존 수명 예측을 기반한 안전 진단 및 유지관리 기술 구축	• BIM과 Web 기반 라이브러리를 연결시켜주는 API 개발 • 지형고를 고려한 BIM 라이브러리 구축 및 자동 조립 프로그램 개발을 통한 안전 진단 및 유지관리 정보의 시각화	• 확률론적 기법 기반의 상태평가를 통한 교량 구조물의 안전 진단 및 유지관리 시스템 구축

3. 연구개발 주요내용

가. BIM 기반 안전진단 및 유지관리 기술

<표 1.3.2> BIM 기반 안전진단 및 유지관리 기술 분야 세부연구내용

기간	세부목표	세부연구내용
1차년도 (2015.06~ 2016.06)	기존 교량 구조물의 안전 진단 및 유지관리 현황 조사/분석	• 국내외 문헌 조사 및 분석 • 국내외 규정된 법률, 법령, 절차에 관한 조사 • 국내외 안전 진단 및 유지관리 체계 분석 • 안전 진단 이력 조사 및 분석 • 유지관리 이력 조사 및 분석
	BIM에 적용 가능한 안전 진단 및	• 대표 교량 구조물 선정

	유지관리 방법론 구축	• 안전 진단 주요 인자 결정 • 유지관리 주요 인자 결정 • BIM 라이브러리 구축을 위한 항목 도출
2차년도 (2016.06~ 2017.04)	안전 진단 및 유지관리 정보의 BIM 연동 모델 구축	• 안전 진단 및 유지관리 데이터의 LoD 조사 및 분석 • 안전 진단 및 유지관리 LoD 결정 • LoD에 따른 BIM 정보 적합성 평가
	안전 진단 이력 관리 시스템 개발	• 교량 구조물의 안전 진단 체계 정립 • 안전 진단 이력 관리 시스템 구축
3차년도 (2017.04~ 2017.04)	BIM기반 안전 진단 및 유지관리 통합 시스템 구축	• 기존 교량 구조물을 대상으로 안전 진단 이력 관리 시스템 검증 • 기존 교량 구조물을 대상으로 유지관리 시스템 검증
	유지관리 이력 시스템 개발	• 교량 구조물의 유지관리 체계 정립 • 유지관리 시스템 구축

나. 교량 구조물의 가치평가 및 잔존수명 예측 기술

<표 1.3.3> 교량 구조물의 가치평가 및 잔존수명 예측 기술 분야 세부연구내용

기간	세부목표	세부연구내용
1차년도 (2015.06~ 2016.06)	가치평가 및 잔존 수명 예측 기법 조사 /분석	• 국내외 문헌 조사 및 분석
	상태평가를 위한 구조해석 모델 구축	• 구조해석에 필요한 변수 결정 • 구조해석 모델의 상태평가 적용성 분석
2차년도 (2016.06~ 2017.04)	가치평가 및 잔존 수명 예측 기술 개발	• 교량 구조물의 가치평가 주요 인자 결정 • 교량 구조물의 잔존 수명 예측 주요 인자 결정 • 가치평가 및 잔존 수명 예측 방법론 도출 • BIM에 접목 가능한 라이브러리 항목 도출
	상태평가를 위한 구조해석 결과 도출	• 다양한 하중에 변수에 따른 시나리오별 교량 구조물의 응답 추출
3차년도 (2017.04~ 2017.04)	가치평가 및 잔존 수명 예측 시스템 구축	• 교량 구조물의 가치평가 기준 선정 • 안전 진단 및 유지관리에 따른 교량 구조물의 가치 평가 시스템 개발 • 상태평가에 따른 잔존 수명 기준 선정 • 잔존 수명 예측 시스템 개발
	상태평가 기법 검증	• 구조해석 모델을 통한 하중 시나리오별 상태평가 기법 검증

다. 교량 구조물 BIM 라이브러리 구축 및 조립 프로그램 개발 기술

<표 1.3.4> 교량 구조물 BIM 라이브러리 구축 및 조립 프로그램 개발 기술 분야 세부연구내용

기간	세부목표	세부연구내용
1차년도 (2015.06~ 2016.06)	구조해석 모듈 개발	• BIM 상 엘리먼트 및 노드 구현 • BIM 상 메쉬 구현 • 구조해석 모델 구현

	지형고를 고려한 라이브러리 조립 및 도면 생성 자동화 모듈 기반기술	• 지형고를 고려한 라이브러리 자동조립 기반 구축 • 도면자동 생성 기법 조사 및 분석 • 자동화 모듈 개발
2차년도 (2016.06~ 2017.04)	구조해석 기반 라이브러리 속성정보 체계 수립	• 라이브러리 속성정보 조사 및 분석 • 구조 해석 LoD 기반 라이브러리 속성정보 체계 개발 • Web기반 데이터베이스 연결을 위한 속성체계 수립
	안전 진단 이력 정보의 BIM 연동화 작업	• Web기반 데이터베이스 연결 • 안전 진단 이력 라이브러리 구축
	지형고를 고려한 라이브러리 조립 및 도면 생성 자동화 알고리즘 도출	• 지형고를 고려한 라이브러리 자동조립을 위한 알고리즘 체계 수립 • 도면 자동 생성 알고리즘 체계 수립
	지형고를 고려한 라이브러리 조립 및 도면 생성 자동화 프로그램 개발	• 알고리즘 기반 지형고를 고려한 라이브러리 자동조립 프로그램 개발 • 알고리즘기반 도면 자동생성 프로그램 개발
3차년도 (2017.04~ 2017.04)	유지관리 정보 시각화 작업	• 유지관리 정보 데이터베이스와 연동하여 색상 인덱싱 지표 기준 수립 • LoD 기반 색상 인덱싱 분류 • 색상 인덱싱 기법에 의한 BIM 객체 레이어 개발
	프로그램 통합 테스트 및 디버깅	• 프로그램 테스트에 따른 수정 및 보완 • 결함 보완 제작 수행
	실무 적용 시험	• 실무 적용 테스트 수행

라. 교량 구조물 상태평가 기법 개발 기술

<표 1.3.5> 교량 구조물 상태평가 기법 개발 기술 분야 세부연구내용

기간	세부목표	세부연구내용
1차년도 (2015.06~ 2016.06)	기술 동향 조사	• 확률론적 교량 구조물 평가 기법 분석 • 교량 구조물 응답 분석 기법 조사 • 상태평가 방법론 조사
	매개변수 분석	• 교량 구조물 응답 매개변수 후보군 선정 • 교량 구조물 응답 샘플링 데이터베이스 추출 • 매개변수에 의한 교량 응답 민감도 분석 • 응답 분석을 위한 지배적 매개변수 분석
2차년도 (2016.06~ 2017.04)	응답 데이터베이스 구축	• 구조해석 기반 응답 샘플링 기반 응답 데이터 생성 방향 선정 • 교량 구조물 응답 데이터베이스 구축
	모델링 기법 선정	• 상태평가를 위한 모델링 기법 선정
	시뮬레이션 검증	• 시뮬레이션 검증을 통해 패턴 분석 기법 검증
3차년도 (2017.04~ 2017.04)	평가 항목 설정	• 교량 구조물 상태평가 항목의 민감도 분석 • 교량 구조물 상태평가 항목 설정
	상태평가 모델링	• 교량 구조물 응답 기반 상태평가 모델링
	시뮬레이션 검증	• 시뮬레이션 검증을 통해 상태평가 모델 검증

4. 연구개발 핵심 성과

가. 연구개발 핵심 연구성과

<표 1.3.6> 연구개발 핵심 연구성과

연번	핵심성과	핵심성과 설명	성과 유형	연구기관	해당 연차	TRL
1	BIM 기반 안전 진단 및 유지관리 기술	교량 구조물의 안전 진단 및 유지관리 통합관리시스템 구축	시스템	고려대 학교	3	5
2	교량 구조물의 가치평가 및 잔존 수명 예측 시스템 기술	교량 구조물의 상태평가 기반의 가치평가 및 잔존수명 예측 기법 개발	기법		3	5
3	교량 구조물 BIM 라이브러리 구축 및 조립 프로그램 개발 기술	지형고를 고려한 BIM 라이브러리 구축 및 자동 모듈 조립 프로그램 개발	소프트 웨어	㈜마이다 스아이티	3	5
4	교량 구조물 상태평가 기법 개발 기술	확률론적 상태평가를 통한 교량 구조물의 안전 진단 및 유지관리 기법 개발	기법	인하대 학교	3	5

나. 핵심 연구성과별 설명

<표 1.3.7> 핵심성과1 설명

핵심성과 1	BIM 기반 안전 진단 및 유지관리 기술	
정의	BIM을 적용한 안전 진단 및 유지관리 이력 기반 통합관리시스템	
목적	- 안전 진단 및 유지관리 이력의 체계적인 라이브러리 구축을 기반으로 실무자 간의 정보공유 확보 및 3차원 시각화를 통한 재검진 시기 및 위험도를 알려줌	
성능목표	(기존기술 수준) - 방대한양의 정보가 체계적으로 정리되어 있지 않으며 실무자가 안전 진단 및 유지관리를 수행할 때 어려움이 있음 (개발기술 수준) - 이력 정보 기반의 라이브러리를 구축하여 실무자가 수행하는 안전 진단 및 유지관리 업무의 효율성을 증가시킴	
성과달성 책임자 (소속기관)	한상윤 (고려대학교)	
소요기간	'16.06 ~'19.04(2년10개월, 3년차)	
성과달성 확인방법	- 안전 진단 및 유지관리 이력 정보 라이브러리 내용 - BIM을 적용한 교량 구조물의 안전 진단 및 유지관리 통합시스템 구축 평가	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	[(예)출원 : 건, 등록 : 건]
	논문	[(예)SCI(E) : 건, 학술지 : 1건]
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건

<표 1.3.8> 핵심성과2 설명

핵심성과 2	교량 구조물의 가치평가 및 잔존 수명 예측 시스템 기술

정의	교량 구조물 상태평가 기반의 가치평가 및 잔존 수명을 예측 하는 기술	
목적	- 구조해석을 통한 상태평가 기반의 가치평가 및 잔존 수명 예측으로 육안검사로 확인할 수 없는 내부손상 이력 정보를 구축	
성능목표	(기존기술 수준) - 육안검사로 교량 구조물의 상태를 평가하여 이력 정보의 신뢰성이 떨어짐 - 교량 구조물의 내부손상을 평가하는 기준이 모호함 (개발기술 수준) - 구조해석을 통한 교량 구조물 상태평가 기반의 가치평가 및 잔존 수명 예측 정보를 안전 진단 및 유지관리에 적용	
성과달성 책임자 (소속기관)	한상윤 (고려대학교)	
소요기간	'18.04 ~'19.04(1년0개월, 3년차)	
성과달성 확인방법	- 교량 구조물의 가치평가 시스템 검증 내용 - 교량 구조물의 잔존 수명을 예측 시스템 검증 내용	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	[(예)출원 : 건, 등록 : 건]
	논문	[(예)SCI(E) : 건, 학술지 : 1건]
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건

<표 1.3.9> 핵심성과3 설명

핵심성과 3	교량 구조물 BIM 라이브러리 구축 및 조립 프로그램 개발 기술	
정의	BIM에 적용 가능한 라이브러리 및 모듈 자동 조립 프로그램 기술	
목적	- 교량 구조물은 비정형 구조물이기 때문에 BIM에 적용이 어려움 - 지형고를 고려한 BIM 라이브러리 구축 및 자동 조립 프로그램을 개발하여 일반적인 교량 구조물에 적용	
성능목표	- (기존기술 수준) - 특수교량에만 BIM이 적용되고 있으며 일반적인 교량에는 적용이 어려움 - 국토 교통부에서 제공하는 BIM 라이브러리는 지형고를 고려하지 못함 (개발기술 수준) - 지형고를 고려한 BIM 라이브러리를 구축하고 모듈 자동 조립 프로그램을 개발하여 일반적인 교량 구조물에도 BIM을 적용하려함	
성과달성 책임자 (소속기관)	김태호((주)마이다스아이티)	
소요기간	'16.06 ~'19.04(2년10개월, 3년차)	
성과달성 확인방법	- 실무적용 테스트를 통한 검증 내용	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	[출원 : 1건, 등록 : 건]
	논문	[SCI(E) : 0건, 학술지 : 건]
	저작	0건
	S/W	1건
	신기술	0건
	기타	0건

<표 1.3.10> 핵심성과4 설명

핵심성과 4	교량 구조물 상태평가 기법 개발 기술	
정의	확률론적 기법을 기반으로 수행한 교량 구조물 상태평가	
목적	- 실제 구조물 유지관리시 구조물의 정확한 상태평가가 어려움 - 확률론적 기법을 기반으로 상태평가 모델을 개발 - 이를 통하여 구조물의 상태평가가 용이해지며 따라서 교량 구조물 안전 진단 및 유지관리의 적시성과 효율성을 정진시킴	
성능목표	(기존기술 수준) - 교량 구조물에 다양한 하중이 작용하며 이에 따른 교량 구조물의 내부손상을 평가하기 어려움 - 교량 구조물 안전 진단 및 유지관리 시 구조물의 정확한 상태평가가 필요함 (개발기술 수준) - 확률론적 상태평가 모델을 통해서 구조물의 실제적인 상태평가가 용이해짐	
성과달성 책임자 (소속기관)	신도형(인하대학교)	
소요기간	'16.06 ~'19.04(2년10개월, 3년차)	
성과달성 확인방법	- 시뮬레이션검증을 통한 상태평가 모델 검증 내용	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	[출원 : 1건, 등록 : 건]
	논문	[SCI(E) : 0건, 학술지 : 1건]
	저작	0건
	S/W	1건
	신기술	0건
	기타	0건

제 2 장 국내외 기술 개발 현황

제 1 절 국내외 유지관리 현황

1. 국내 유지관리 현황

(1) 안전점검 및 정밀안전진단

○ 한국시설안전공단에서는 「시설물의 안전관리에 관한 특별법」 제 13조에 따라 제정한 「시설물의 안전점검 및 정밀안전진단 실시 등에 관한 지침」(국토교통부 고시, 제2016-807호, '16.12.6.)의 시행을 위하여 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(2017)을 제정하였음

○ 국내에서는 각 구조물의 관리주체가 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(2017)에 따라 해당 주기마다 안전진단을 수행함

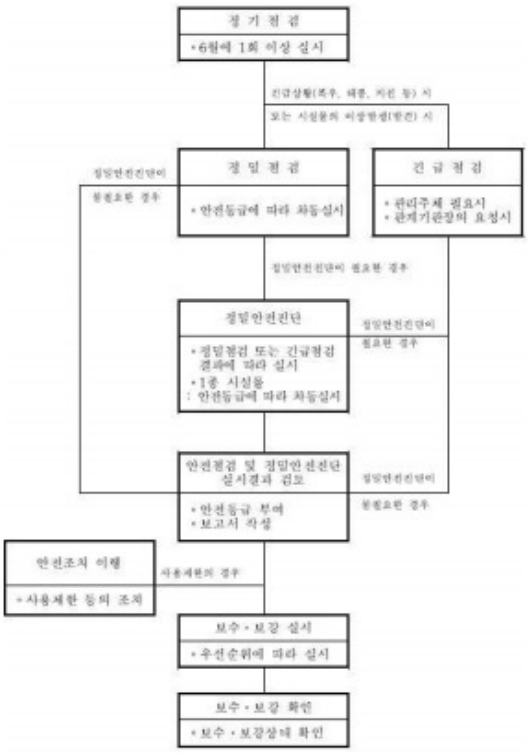
○ 한국시설안전공단(2017)에서 제안하고 있는 안전진단의 종류와 시기는 다음과 같음

<표 2.1.1.> 안전진단 종류 및 실시 시기

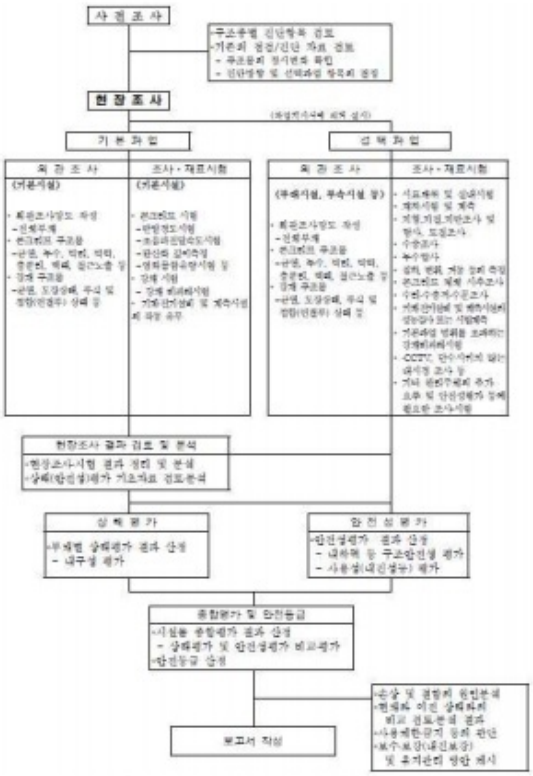
진단종류	설명	실시 시기
정기정검	- 경험과 기술을 갖춘 사람에 의한 세심한 외관조사 수준의 점검 - 시설물의 기능적 상태를 판단하고 시설물이 현재의 사용요건을 계속 만족시키고 있는지 확인하기 위한 관찰로 이루어짐	1회/0.5년
정밀점검	- 시설물의 현 상태를 정확히 판단하고 최초 또는 이전에 기록된 상태로부터의 변화를 확인 - 구조물이 현재의 사용요건을 계속 만족시키고 있는지 확인하기 위하여 면밀한 외관조사와 간단한 측정·시험장비로 필요한 측정 및 시험을 실시	A등급:1회/3년 B·C등급:1회/2년 D·E등급:1회/1년
긴급점검	- 관리주체가 필요하다고 판단한 때 또는 관계행정기관의 장이 필요하다고 판단하여 관리주체에게 요청한 때에 실시하는 정밀점검 수준의 안전점검 - 실시목적에 따라 손상점검과 특별점검으로 구분됨	긴급상황 또는 시설물의 이상발생 시
정밀안전진단	- 법 제7조 제1항에 따라 관리주체가 안전점검을 실시한 결과 시설물의 재해 및 재난 예방과 안전성 확보 등을 위하여 필요하다고 인정하는 경우에 실시함 - 안전점검으로 쉽게 발견할 수 없는 결함부위를 발견하기 위하여 정밀한 외관조사와 각종 측정·시험장비에 의한 측정·시험을 실시하여 시설물의 상태평가 및 안전성평가에 필요한 데이터를 확보함	A등급:1회/6년 B·C등급:1회/5년 D·E등급:1회/4년

○ 안전진단 흐름도 및 점검유형

- 안전관리 업무 및 정밀안전진단 흐름도는 다음과 같음



<그림 2.1.1> 안전관리 업무 흐름도



<그림 2.1.2> 정밀안전진단 흐름도

- 안전진단 종류에 따라 수행해야 하는 기본과업 및 선택과업에 해당하는 점검유형이 상이하며 각 점검유형에 대한 상세설명은 다음과 같음

<표 2.1.2> 점검유형 및 상세설명

점검유형	설명	점검항목
외관조사	교량의 외부적인 손상을 관찰하기 위한 육안 기반의 점검	균열, 누수, 박리, 박락, 도장상태, 부식 등
조사·재료시험	추가적인 측정 장비를 통해 육안으로 관찰할 수 없는 교량의 상태를 평가하기 위한 점검	반발경도시험, 탄산화 깊이측정, 비파괴시험 등
구조 안전성	구조물의 구조적 안전성을 평가하기 위한 재하시험 또는 해석 등의 점검	내하력, 사용성(내진성능), 구조안전성 평가 등

○ 시설물의 종합평가 방법

- 시설물의 종합평가를 통한 안전등급은 다음 식을 통해 산정됨

$$\text{안전등급} = \min(\text{상태평가}, \text{안전성평가}) \qquad \text{(식 2.1.1)}$$

- 시설물의 등급은 A부터 E까지 5단계로 구분되며 각 등급별 시설물의 상태는 다음과 같음

<표 2.1.3> 시설물의 종합등급 및 상태

안전등급	시설물의 상태

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

○ 교량 시설물의 안점점검 및 정밀안전진단 실시 범위에 대한 세부적인 대상시설

<표 2.1.4> 교량의 진단 대상시설

구분	시설물명		점검 및 진단 실시범위		
			정기점검	정밀점검	정밀안전진단
주요부재	상부구조	바닥판, 거더	O	O	O
	하부구조	교대 및 교각, 주탑, 기초	O	O	O
	받침	교량받침	O	O	O
	케이블	케이블, 정착구, 행어밴드, 새들	O	O	O
	기타부재	신축이음, 배수시설, 난간 및 연서, 교면포장	O	O	O
보조부재	2차부재	가로보 및 세로보			O

(2) 성능평가

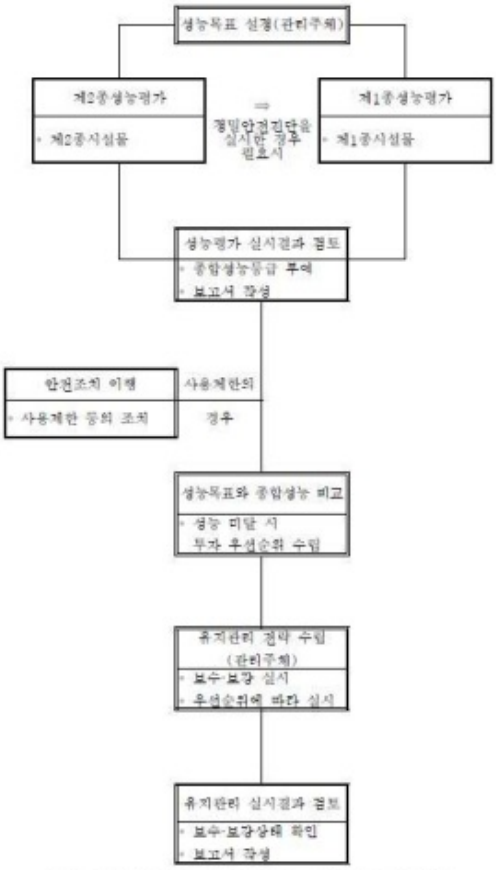
○ 교량의 안전뿐만 아니라 성능에 대한 진단 필요성이 대두되면서 한국시설안정공단에서 2018년에 시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침(성능평가 편)을 제정함

○ 정밀안전점검 및 정밀안전진단과의 관계

- 성능평가는 「법」 제40조에 따라 정밀안전점검 및 정밀안전진단을 포함하여 실시하거나 최근 1년 이내에 실시한 정밀안전점검 및 정밀안전진단 결과를 활용할 수 있음
- 대상시설물의 외관조사 및 외관조사망도 결과, 현장 재료시험, 보수·보강 방법, 기타 책임기술자가 판단에 따라 활용 가능한 항목 등을 활용할 수 있음

○ 성능평가 흐름도 및 점검유형

- 성능평가 업무 및 진단 흐름도는 다음과 같음



<그림 2.1.3> 성능평가 업무 흐름도



<그림 2.1.4> 성능평가 흐름도

- 성능평가의 점검유형은 기존의 정밀점검 및 정밀안전진단과 유사하나 사용성능에 대한 점검유형이 추가됨

<표 2.1.5> 점검유형 및 상세설명

점검유형	설명	점검항목
외관조사	교량의 외부적인 손상을 관찰하기 위한 육안 기반의 점검	균열, 누수, 박리, 박락, 도장상태, 부식 등
조사·재료시험	추가적인 측정 장비를 통해 육안으로 관찰할 수 없는 교량의 상태를 평가하기 위한 점검	반발경도시험, 탄산화 깊이측정, 비파괴시험 등
구조 안전성	구조물의 구조적 안전성을 평가하기 위한 재하시험 또는 해석 등의 점검	내하력, 사용성(내진성능), 구조안전성 평가 등
사용성능	구조물의 사용성을 평가하기 위한 점검	점검시설 유무, 교량조명, 포장상태 등

○ 성능평가에 대한 상세설명과 실시 시기는 다음과 같음

<표 2.1.6> 성능평가의 상세설명 및 실시 시기

진단종류	설명	실시 시기
성능평가	- 현장조사 및 각종시험에 의해 시설물의 성능을 종합적으로 평가하여 시설물의 객관적인 현재의 상태와 장래의 성능 변화를 파악·예측하고, 이를 통해 관리주체가 보수·개량·교체 등의 최적적시기 결정 등 합리적 유지관리 전략을 마련하기 위한 진단	1회/5년

○ 시설물의 종합평가 방법

- 시설물의 종합평가를 통한 안전등급은 다음 식을 통해 산정됨

$$\text{종합평가점수}(E) = \sum[\text{성능별결함도점수}(E_n) \times \text{성능간가중치}(W_n)] \qquad \text{(식 2.1.2)}$$

여기서 , E_n = 안전성능, 내구성능, 사용성능에 대한 결함도 점수
W_n = 안전성능, 내구성능, 사용성능에 대한 가중치

- 각 성능간 중요도를 고려하여 산정한 교량 종합성능등급은 다음과 같음

<표 2.1.7> 시설물의 종합등급 및 상태

안전등급	평가점수 범위	시설물의 상태
A(우수)	$0 \le E < 0.13$	문제점이 없는 최상의 상태
B(양호)	$0.13 \le E < 0.26$	보조부재에 경미한 결함이 발생하였으나 기능 발휘에는 지장이 없으며 내구성 증진을 위하여 일부의 보수가 필요한 상태
C(보통)	$0.26 \le E < 0.49$	주요부재에 경미한 결함 또는 보조부재에 광범위한 결함이 발생하였으나 전체적인 시설물의 안전에는 지장이 없으며, 주요부재에 내구성, 기능성 저하 방지를 위한 보수가 필요하거나 보조부재에 간단한 보강이 필요한 상태
D(미흡)	$0.49 \le E < 0.79$	주요부재에 결함이 발생하여 긴급한 보수·보강이 필요하며 사용제한 여부를 결정하여야 하는 상태
E(불량)	$0.79 \le E$	주요부재에 발생한 심각한 결함으로 인하여 시설물의 안전에 위험이 있어 즉각 사용을 금지하고 보강 또는 개축을 하여야 하는 상태

○ 교량 시설물의 성능평가 실시 범위에 대한 세부적인 대상시설

<표 2.1.8> 교량의 성능평가 진단 대상시설

구분	시설물명		점검 및 진단 실시범위	
			제1종 성능평가	제2종 성능평가
주요부재	상부구조	바닥판, 거더	O	O
	하부구조	교대 및 교각, 주탑, 기초	O	O
	받침	교량받침	O	O
	케이블	케이블, 정착구, 행어밴드, 새들	O	O
	기타부재	신축이음, 배수시설, 난간 및 연석, 교면포장	O	O
보조부재	2차부재	가로보 및 세로보	O	O

2. 국외 유지관리 현황

가. 미국

(1) Bridge Inspection's Reference Manual(BIRM)

○ 교량 검사 매뉴얼은 교량을 뉴욕 주 1.3 항에 의거하여 제시된 정책을 충족시키는 뉴욕 주 교통부의 교량, 대형 지하배수로, 잠수 검사에 대한 가이드를 제공하기 위하여 작성되었음

○ National Inspection Standards(NBIS), AASHTO Manual for Bridge Evaluation(MBE)를 기반으로 하여 작성됨

○ 검사 종류

<표 2.1.9> BIRM 검사 종류

검사 방법	관련 내용
Initial (Inventory)	- An initial inspection is the first inspection of a bridge as it becomes a part of a bridge file, but the elements of an initial inspection may also apply when there has been a change in configuration of the structure (e.g., widening, lengthening, supplemental bents, etc.) or a change in bridge ownership - The initial inspection is a fully documented investigation and is accompanied by load capacity ratings - The purpose of this inspection is two-fold. - First, an initial inspection provides all Structure Inventory and Appraisal (SI&A) data. Second, it provides baseline structural conditions and identification of existing problems.
Routine (Periodic)	- Routine inspections are regularly scheduled inspections consisting of observations and/or measurements needed to determine the physical and functional condition of the bridge, to identify any changes from "initial" or previously recorded conditions, and to ensure that the structure continues to satisfy present service conditions - Inspection of underwater portions of the substructure is limited to observations during low-flow periods and/or probing for signs of scour and undermining. - The areas of the structure to be closely monitored are those determined by previous inspections and/or load rating calculations to be critical to load-carrying capacity. Follow the plan of action for scour critical bridges. - According to the NBIS, inspect each bridge at regular intervals not to exceed 24 months - However, certain bridges require inspection at less than the 24-month interval. Establish criteria to determine inspection frequency and intensity based on such factors as age, traffic characteristics, and known deficiencies. Certain bridges may be inspected at greater than 24-month intervals, not to exceed 48 months, with prior FHWA-approval. This may be appropriate when past inspection findings and analysis justifies the increased inspection interval.

Damage	- A damage inspection is an unscheduled inspection to assess structural damage resulting from environmental factors or human actions - The scope of inspection is sufficient to determine the need for emergency load restrictions or closure of the bridge to traffic and to assess the level of effort necessary for an effective repair
In-Depth	- An in-depth inspection is a close-up, inspection of one or more members above or below the water level to identify any deficiencies not readily detectable using routine inspection procedures - Hands-on inspection may be necessary at some locations - When appropriate or necessary to fully ascertain the existence of or the extent of any deficiencies, nondestructive field tests may need to be performed - The inspection may include a load rating to assess the residual capacity of the member or members, depending on the extent of the deterioration or damage - This type of inspection can be scheduled independently of a routine inspection, though generally at a longer interval, or it may be a follow-up for other inspection types - For small bridges, the in-depth inspection includes all critical members of the structure - For large and complex structures, these inspections may be scheduled separately for defined segments of the bridge or for designated groups of elements, connections, or details - According to the NBIS, establish criteria to determine the level and frequency of this type of inspection
Fracture Critical	- A fracture critical member(FCM) inspection is performed within arm's length of steel members in tension, or with a tension element, who failure would probably cause a portion of or the entire bridge to collapse - The FCM inspection uses visual methods that may be supplemented by nondestructive testing - A very detailed visual hands-on inspection is the primary method of detecting cracks - This may require that critical areas be specially cleaned prior to the inspection and additional lighting and magnification be used - Other nondestructive methods may be used at the discretion of the Bridge Owner - Where the fracture toughness of the steel is not documented, some tests may be necessary to determine the threat of brittle fracture at low temperatures - According to the NBIS, fracture critical members (FCMs) are to be inspected at regular intervals not to exceed 24 months - However, certain FCMs require inspection at less than 24-month intervals - Establish criteria to determine the inspection level and frequency to which these members are inspected considering such factors as age, traffic characteristics, and known deficiencies.
Underwater	- An underwater inspection is the inspection of the underwater portion of a bridge substructure and the surrounding channel, which cannot be inspected visually at low water by wading or probing, generally requiring diving or other appropriate procedures - Underwater inspections are an integral part of a total bridge inspection plan

	- Scour evaluations are conducted for all bridges over water - Determine the severity and extent of scour, immediately communicating and documenting critical findings. Follow the plan of action for scour critical bridges. - Structural damage, scour and erosion due to water movement, drift, streambed load, ice loading, navigation traffic collision, and deleterious effects of water movement or of elements, are typical occurrences that could result in the decision to conduct underwater inspections at shorter intervals - According to the NBIS, underwater structural elements are inspected at regular intervals not to exceed 60 months - However, certain underwater structural elements require inspection at less than the 60-month intervals - Establish criteria to determine the level and frequency to which these members are inspected considering such factors as construction material, environment, age, scour characteristics, condition rating from past inspections and known deficiencies - Certain underwater structural elements may be inspected at greater than 60-month intervals, not to exceed 72 months, with written FHWA-approval. This may be appropriate when past inspection findings and analysis justifies the increased inspection interval.
Special (Interim)	- A special inspection is an inspection scheduled at the discretion of the Bridge Owner - It is used to monitor a particular known or suspected deficiency, such as foundation settlement or scour, fatigue damage, or the public's use of a load posted bridge - These inspections are not usually comprehensive enough to meet NBIS requirements for routine inspections - According to the NBIS, establish criteria to determine the level and frequency of this type of inspection. Guidelines and procedures on what to observe and/or measure are provided, and a timely process to interpret the field results is in place.

○ 부재 평가 기준

<표 2.1.10> BRIM 부재 평가 기준

평가 기준	설명
Good	element is limited to only minor problems
Fair	structural capacity of element is not affected by minor deterioration, section loss, spalling, cracking, or other deficiency
Poor	structural capacity of element is affected or jeopardized by advanced deterioration, section loss, spalling, cracking, or other deficiency

○ 요소 상태 등급 기준

- FHWA Coding Guide(1995)를 인용하여 다음과 같이 11단계로 제시함

<표 2.1.11> BRIM 요소 상태 등급 기준

평가 기준	설명
N	NOT APPLICABLE
9	EXCELLENT CONDITION
8	VERY GOOD CONDITION - no problems noted.
7	GOOD CONDITION - some minor problems
6	SATISFACTORY CONDITION - structural elements show some minor deterioration.
5	FAIR CONDITION - all primary structural elements are sound but may have minor section loss, cracking, spalling, or scour
4	POOR CONDITION - advanced section loss, deterioration, spalling, or scour.
3	SERIOUS CONDITION - loss of section, deterioration, spalling, or scour have seriously affected primary structural components. Local failures are possible. Fatigue cracks in steel or shear cracks in concrete may be present.
2	CRITICAL CONDITION - advanced deterioration of primary structural elements. Fatigue cracks in steel or shear cracks in concrete may be present or scour may have removed substructure support. Unless closely monitored it may be necessary to close the bridge until corrective action is taken.
1	"IMMINENT" FAILURE CONDITION - major deterioration or section loss present in critical structural components, or obvious vertical or horizontal movement affecting structure stability. Bridge is closed to traffic but corrective action may put bridge back in light service.
0	FAILED CONDITION - out of service; beyond corrective action.

○ 양호도 등급(Sufficiency Rating)

- Sufficiency Rating(S.R.)은 교량의 양호도를 조사하고 서비스를 유지하기 위해 수치적인 방법을 통해 다음 식으로 계산됨

$$S.R. = S_1 + S_2 + S_3 - S_4 \qquad \text{(식 2.1.3)}$$
$$0(entirely\,\text{deficient}) \le S.R. \le 100(entirely\,sufficient)$$

여기서 , S_1 = 최대 55%; 구조물의 적절성과 안전성에 기반
S_2 = 최대 30%; 사용성과 기능 노후화 정도에 기반
S_3 = 최대 15%; 공용에 대한 필요성
S_4 = 최대 13%; 우회로 길이, 교통 안전 특징 및 구조 유형에 대한 특별 감소에 기반

(2) AASHTO Manual

○ 각 부재의 손상평가에 대한 Manual for Bridge Element Inspection(MBEI)와 교량 평가에 대한 Manual for Bridge Evaluation(MBE)로 구분하여 지침을 제시하고 있음

○ National Bridge Inspection Standards(NBIS)를 만족하는 진단과 평가 방법을 정립하여 교량 관리자를 지원하기 위해 Manual for Bridge Evaluation(MBE)가 재정됨

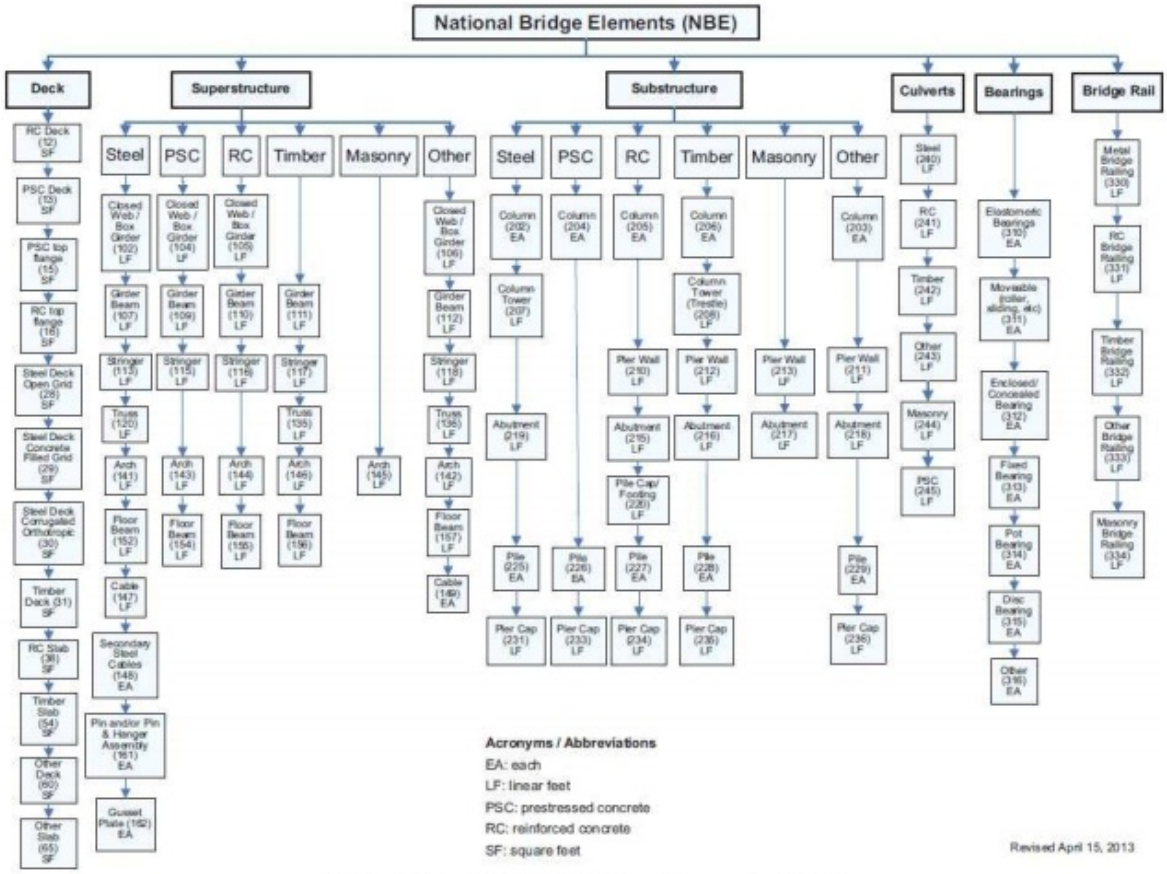
○ MBEI에서는 다음과 같은 교량 기본 정보와 진단 정보를 포함하도록 제시하고 있음

<표 2.1.12> MBEI 교량 기본 정보 및 진단 정보

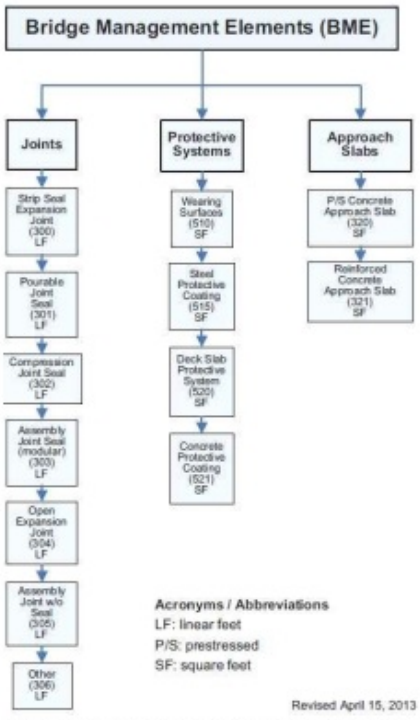
인벤토리 데이터	항목
General Data	- Structure Number - Name - Year Built - Year Reconstructed, Highway System - Location - Description of Structure - Skew - Spans - Structure Length - Bridge Roadway Width - Deck Width - Clearances - Wearing Surface and Deck Protective System - Curb or Sidewalk Widths - Railings and Parapets - Bridge Approach Alignment - Lanes on and under the Structure - Average Daily Traffic and Average Daily - Design Load - Features Intersected - Plans and Dimensions - Critical Features
Inspection Data	- Waterway - Channel Cross-Sections - Restrictions on Structure - Utility Attachments - Environmental Conditions - Miscellaneous

○ AASHTO Manual에서는 BIRM과 동일하게 Initial, Routine, Damage, In-Depth, Fracture, Underwater, Special로 검사 종류를 구분하고 있음

○ Manual for Bridge Element Inspection(MBEI)에서는 National Bridge Elements(NBE)와 Bridge Management Elements(BME)에서 제시하는 부재 타입을 포함하여 새로운 AASHTO 부재 세트를 구성하여 각 부재에 대한 세부 점검 가이드라인을 제시하고 있음



<그림 2.1.5> National Bridge Elements (NBE)



<그림 2.1.6> Bridge Management Elements (BME)

○ MBEI에서는 부재별 상태 등급을 Good, Fair, Poor, Severe 4단계로 구분하고 있음

나. 유럽

○ 검사 종류

<표 2.1.13> 유럽의 검사 종류

검사 유형	검사 종류	설명
The Fist Inspection	영수검사	- 영수검사는 새 교량을 완성한 후 수행해야 할 첫 번째 검사 유형이며, 목적은 건설 단계에서 발생한 구조물의 결함, 손상 또는 결함을 발견하기 위한 영수기준이 있는 교량 소유자의 인수 가능성에 대한 인수 기준을 수락하거나 수락하지 않는 것임. - 부적절한 설계 솔루션을 식별하고 향후 유지 관리와 관련하여 중대한 문제가 될 수 있는 모든 원인을 파악해야함. 합격 여부 검사는 교량에 대한 재활 또는 유지 보수 작업이 수행 된 후에 수행되어야함.
	보증검사	- 품질 보증 검사의 목적은 시공 단계에서 수행된 작업 또는 영수검사 이후의 수리가 허용되는지, 새 손상, 결함 또는 결함이 교량에 발생하지 않았는지 확인하는 것임. 추후 유지 보수를 위해 관련성이 저하되는 새로운 원인도 확인해야함.
Routine Inspections	일반검사	- 일반검사의 목적은 부하용량, 교통안전, 미래유지 또는 환경/미학에 영향을 미치는 심각한 손상이 구조에 나타나는지 확인하는 것임.
	주요검사	- 주요 검사의 목적은 전체 교량이 기능적이며, 이들에 대한 비용 추정을 포함하여 유지 보수 작업에 대한 필요성을 결정하는 것임. 검사에는 필요시 측정 및 재료 조사도 포함됨.
	케이블의 주요검사	- 케이블의 주요 검사 목적은 케이블, 행거 일체형 클램프 및 앵커 포인트에 대한 손상을 평가하여 기능을 검증하는 것임. 보충 행동은 추정을 포함해야한다. 적절한 조치비용이 결정되어야함.
	주요 수중검사	- 수중검사의 목적은 점검하는 것이며, 그 기능을 보장하기 위해 수중에서 어떤 교량 요소의 상태, 다리 부근의 강바닥도 확인해야함. 적절한 조치비용이 결정되어야함.
Additional Inspections	특별검사	- 특별 검사의 목적은 이전 검사에서 관찰된 모든 손상 및 손상 원인을 면밀히 조사할 뿐만 아니라 비용이 많이 드는 복잡한 조치에 대한 설명을 위한 근거를 형성하는 것임. 특별 검사는 정기적인 간격으로 수행되지는 않지만 다음과 같은 경우에 수행될 수 있음. ▪ 이전 주요 검사로부터 요구 ▪ 차량 충돌 피해와 같은 사고 ▪ 오버로딩 ▪ 홍수 또는 범람 ▪ 유사한 유형의 교량 및 환경에서의 경험이 나타날 때

○ 상태등급

- 상태등급은 각 개별 손상 또는 손상 그룹에 대한 검사 시간의 개발 속도 및 심각도에 따라 달라지는 심각도를 나타내는데 사용되며, 다음과 같이 구분됨

<표 2.1.14> 상태등급 기준

등급	설명
1	향후 10 년 내에 개선 조치가 필요하지 않은 사소한 손상 또는 결함
2	평균적이거나 약간의 손상 또는 4 - 10 년 이내에 개선 조치가 필요한 결함
3	I - 3 년 내에 개선 조치가 필요한 심각한 손상 또는 결함
4	0 - 1/2 년 내에 교정 조치가 필요한 치명적인 손상 또는 결함
9	검사되지 않음

제 2 절 국내외 BIM 기술개발 현황

1. 국내 BIM 기술개발 현황

가. 한국시설안전공단 (2018) BIM기반 특수교량 유지관리를 위한 표준기술 개발 및 실증 연구

○ 특수교량 정보요구사항 및 인벤토리 정의

- 특수교량 3D모델은 전체구조계 분류 모델과 구조부재 분류 모델 총 2단계로 구성됨
- 전체구조계 분류모델은 구조부재단위 검색, 점검일정 관리, 점검현황 및 상태표시 등과 같은 전보를 관리하고 구조부재 분류도델은 육안점검과 같은 유지관리 업무시 활용되며 점검정보 입/출력 기능을 함
- 제2진도대교의 부재 분류기준을 참고하여 3D 모델 인벤토리를 구성하고, 유지관리 매뉴얼에서 제시된 ID를 기반으로 번호체계를 부여함



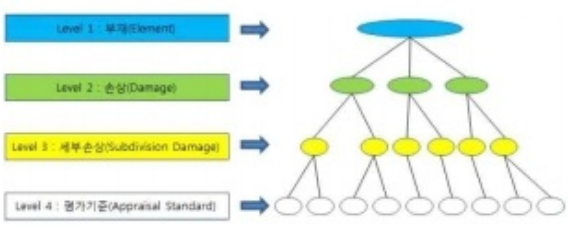
<그림 2.2.1> 부재인벤토리 구조 단순화



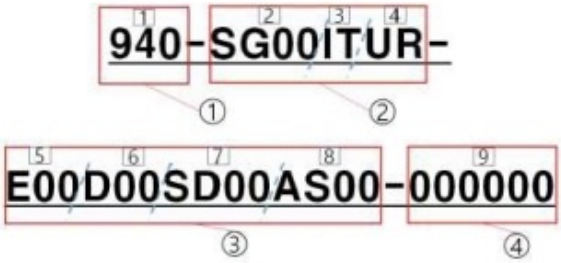
<그림 2.2.2> 모델 인벤토리별 연계정보 구성

○ 유지관리정보 코드 구축

- 손상유형 및 시험 및 조사 항목에 대한 정리 및 분류체계를 구축함
- 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침 해설서(교량)의 부재별 상태평가 기준 항목을 적용하여 부재유형에 따른 손상유형과 시험 및 조사 항목으로 분류
- 유지관리 단계의 정보를 구조물에 연동시키기 위해 점검단위 부재의 정보와 손상에 대한 정보를 포함하는 ID체계에 대한 연구 수행
- ID체계를 구조물 식별 코드, 점검 위치 코드, 부재 코드, 손상의 종류와 정도에 대한 코드로 총 4단 항으로 구성함



<그림 2.2.3> 유지관리 항목 분류체계



<그림 2.2.4> 손상반영 유지관리 ID체계

○ BIM기반 유지관리 정보 관리 시스템 Prototype 구축

- 구조물의 유지관리 업무에 필요한 정보를 관리하고 점검업무에 필요한 정보를 3D모델 기반으로 연계하여 조회 및 관리하며, 현장점검업무에 필요한 정보를 관리하고 점검결과 및 점검이력을 조회할 수 있는 BIM기반 유지관리정보 관리 프로그램 개발
- 서버로부터 점검계획과 점검을 하는데 필요한 정보를 받아 점검을 수행하고 점검의 결과를 다시 서보로 보내어 해당 점검의 결과를 취합하는 기능이 있는 현장 점검용 프로그램 개발



<그림 2.2.5> BIM기반 유지관리 정보 관리 시스템 Prototype

나. 한국도로공사 (2016) Ex-BIM 설계 표준모델 구축 연구

○ EX-BIM 도입 로드맵 구축

- Ex-BIM의 도입을 도입단계, 확산단계, 정착단계로 구분하여 로드맵 설정
- 도입단계에서는 업무단위의 적용을 시도하고 부처단위와 프로젝트 단위로 확장하여 최종적으로는 생애전주기 정보관리를 위한 정착단계로 설정
- 3차원 모델 기반의 업무는 의사소통을 증진시키는 장점을 가지지만 이를 위해서는 기존 업무와 절차의 변화를 이끌 수 있는 시간이 요구됨
- 프로젝트 단위의 BIM을 활용하기 위해서는 민간 기업과의 상시 협업 체계가 필요하고 이를 위해서 현재의 보안시스템에 대한 개선이 요구됨
- 궁극적으로 고속도로 생애주기 관리를 위한 수단으로 활용되어야 하고 기술적 효율성을 높이도록 발전단계별 전략을 수립해야 함
- 도로공사 내부연구진 5개 부처 담당자와 로드맵 도출을 위한 인터뷰 및 로드맵 초안에 대한 피드백을 수행하여 다음과 같이 EX-BIM 로드맵을 제시함

<표 2.2.1> EX-BIM 전체 로드맵

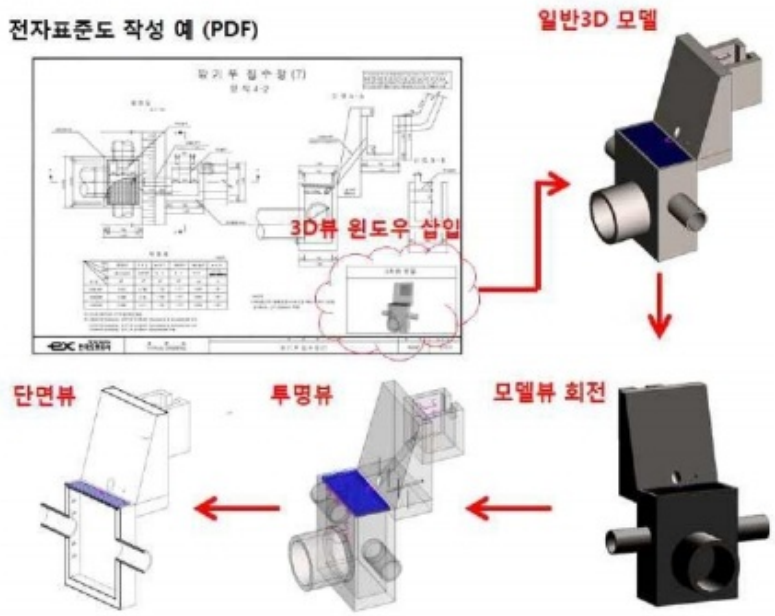
비전	**다차원 설계환경(BIM) 기반의 차세대 고속도로 설계 및 관리 역량 강화**		
목표	**• EX-BIM을 통한 가치 창조형 설계 및 고속도로사업 관리(PMC) 역량 증대** **• 전사적 공유 정보(Open Shared Information) 체계 확립으로 실시간 소통역량 제공** **• 다차원 설계 전환의 선도적 역할을 통한 국제적 수준의 첨단 설계관리 능력 확보**		
전략	도입단계(~2016년)	확장단계(2017~2019년)	정착단계(2020년 이후)
	로드맵/가이드라인/시범사업 추진	신규 사업적용 및 내재화	전사적 활용 및 서비스 가치 창출
세부 목표	• 설계품질 관리 체계 구축 • 차세대 전자도면 체계 개발 • EX-BIM 로드맵/가이드라인 개발 • 시공관리(공정, 자재, 인력, 문서) 체계 구축	• 신규 국내외 고속도로프로젝트 BIM 도입 • Paperless 전자납품 및 사업관리기술 • 도로 기술 통합정보시스템 구축 • 가상현장기반의 도로사업 사전검토 기술	• 차세대 교통체계에 맞는 EX-BIM 설계 관리 및 자산관리 시스템 (E-AMS) • 다차원 설계기술 기반의 신규 서비스 시장 창출 • EX-BIM 파트너십구축을 통한 세계시장확대
세부 추진 과제	• 3차원 모델기반 전자 표준도(H-CAD 고도화필요) • 정보모델 활용 및 설계 검토 기술(MVD) • 납품시 발주처 정보요구사항 정의 • BIM 기반 예산연계 공정관리 기술 • 도로, 기술 통합정보시스템 구축	• e-PLAN/e-Submission/e-Review 기술 • AR 및 모바일장치 기반의 검측/점검기술 • 디지털 고속도로 재해재난안전관리기술 • 최적노선 결정 통합검토체계 적용 (북한 및 해외 도로사업 시범 적용)	• EX-AIM System / EX-Global 기술 • 원격 무인 점검 및 안전관리 기술 • 무인운전/사물인터넷/빅데이터 정보제공 • 서비스 기술
EX-BIM 환경 조성	• Hi-설계 / 전자납품 체계 개선을 통한 기술 및 자산정보 순환체계 개선 • 도로공사 시설물 현황관리 체계 개선 • 디지털 정보 기반의 업무 절차 개선 및 교육	• 전사 EX-BIM 관리자 육성 • 전자 납품 및 승인 절차 (외부협력을 위한 보안체계) • 디지털 정보 기반 공사 및 사업관리 체계(BEP,PEP) • 도로공사 도로 및 시설물 인벤토리 작성 • BIM을 통한 부서별 업무 효율화	• EX-BIM 민간 파트너 체계 (PMC 세계화) • 시공간제약이 없는 업무 환경 및 절차구축 • 고속도로 기반 정보 자산화 및 서비스체계
가치 창출	• 설계단계에서의 관리 역량 강화 (설계 변경 최소화) • 업무 효율화 • 사업 관리 능력 개선	• 비정형 창의적 설계로 자산의 유산 가치화 • 미래 성장 동력으로의 자산정보 가치증대 • 민간기업과의 상시 협력을 통한 경쟁력확대	• 시설자산의 디지털화를 통한 가치 증대 • ICT 산업계와의 융합을 통한 시장 개척 • 민간기업의 고속도로 자산활용 증대로 서비스 시장 창출

○ 기존 표준도의 차세대 전자도면 표준화

- 2차원 도면의 파아깅 어려운 경우 3차원 모델을 탑재하고 이를 모바일 기기 등에서 쉽게 확인할 수 있도록 도면 전환
- 도면 및 문서에 고유 번호체계를 부여하여 이를 코드화하고 구조물에 부착하거나 목록을 통

해 one-click으로 필요 정보를 획득할 수 있도록 연계

- 시각화 도구가 연계되면 구조물 내부의 상세를 증강현실로 확인 가능

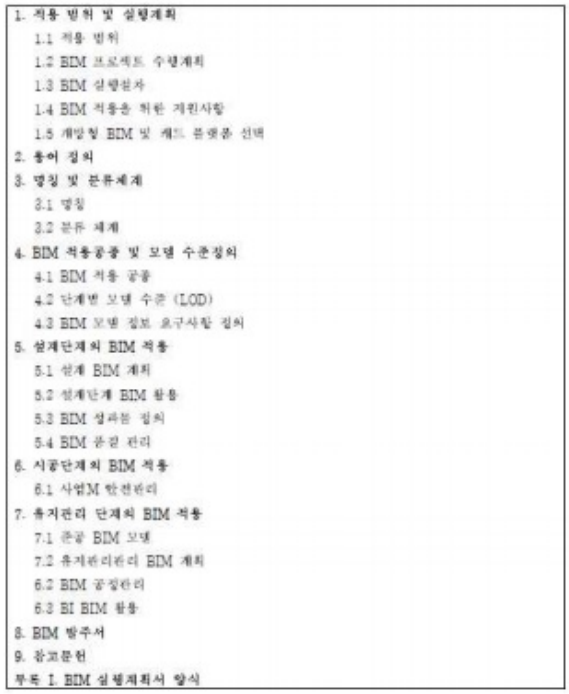


<그림 2.2.6> 전자도면 예시

○ EX-BIM 가이드라인 개발

- 국내외 BIM 관련 가이드라인 조사, 3D 모델링 적용 공종 사례 조사, 단계별 정보수준(LOD) 기준 비교검토, 시공단계 공정관리를 위한 객체분할 기준 연구 등을 수행하여 2016년 다음과 같이 EX-BIM 가이드라인을 제시




1. 적용 범위 및 실행계획
1.1 적용 범위
1.2 BIM 프로젝트 수행계획
1.3 BIM 실행문서
1.4 BIM 적용을 위한 계획사항
1.5 개발형 BIM 및 캐드 프로그램 선택
2. 용어 정의
3. 명칭 및 분류체계
3.1 명칭
3.2 분류 체계
4. BIM 적용공종 및 모델 수준정의
4.1 BIM 적용 공종
4.2 단계별 모델 수준 (LOD)
4.3 BIM 모델 정보 요구사항 정의
5. 설계단계의 BIM 적용
5.1 설계 BIM 계획
5.2 설계단계 BIM 활용
5.3 BIM 설계품질 검토
5.4 BIM 공정 관리
6. 시공단계의 BIM 적용
6.1 사업M 안전관리
7. 유지관리 단계의 BIM 적용
7.1 준공 BIM 모델
7.2 유지관리관리 BIM 계획
6.2 BIM 공정관리
6.3 BI BIM 활용
8. BIM 발주서
9. 참고문헌
부록 I. BIM 실행계획서 양식

<그림 2.2.7> EX-BIM 가이드라인

○ EX-BIM 시범도입

- 대구~순환 5, 함양~울산 12를 대상으로 Ex-BIM을 설계단계에서 시범도입하고 그 효과를 분석함
- 서울세종선에 대하여 시공 BIM 시범도입 추진



<그림 2.2.8> EX-BIM 설계 및 시공단계 시범도입

다. 한국철도기술연구원 (2019) BIM기반의 철도인프라 관리 표준기술 개발

○ BIM기반의 철도인프라 관리 체계 구축

- 철도인프라 관리체계 및 시스템 구축을 위해 프로젝트 참여자의 요구사항을 수집 분석하고 발주자 수준에서 사업관리(설계, 시공)에 필요한 정보 BIM 모델 추출 및 검토하여 BIM기반 철도인프라 정보 통합 운영·관리 체계 구축
- 국내 발주처(한국철도시설공단) 사업관리 업무절차서 및 해외 철도인프라분야 BIM 발주 요구사항 비교를 통한 사업관리 프로세스 표준 정립 및 정보 통합 관리·운영 시스템에 반영하여 BIM기반 프로젝트 실무 수행 가이드 구축
- 국내외 정책, 지침, 확산체계조사 및 분석을 통한 현 철도인프라 정책의 개선점을 분석하여 BIM기반 사업발주 및 확산을 위한 정책, 지침, 제·개정(안) 도출
- 철도에 대한 기본조사 및 계획안과 BIM을 활용한 실시설계에 따른 편익분석을 통해 BIM기반 경제·사회적 편익분석 및 의사결정 지원체계 구축



<그림 2.2.9> 철도인프라 통합 관리 체계

○ 철도인프라 정보모델링 기술 개발

- 기존 철도시설공단 PBS의 확장을 통한 노반, 궤도, 철도교량, 철도터널, 전기 및 신호 시설물에 대한 6단계 PBS 도출
- 노반, 궤도, 선형, 지형, 철도교량, 철도터널, 전기 및 신호 시설물을 위한 데이터 스키마 요소의 확장 및 검토
- 확장 데이터 스키마 기반으로 생성된 정보모델내 정보의 생성·재사용·표현을 서버 기반으로 하기 위한 프로세스와 처리 기술 구현
- 파라메트릭 기반의 원형 라이브러리 구축 및 라이브러리 명세서 작성(교량: 형태 33개, 유형 36개 / 터널: 형태 17개, 유형 17개 / 신호: 형태 39개. 유형 39개 / 전기 및 신호처리: 형태 133개, 유형 237개)
- 선형 기반의 철도인프라 3차원 정보모델 생성 표준절차 정립



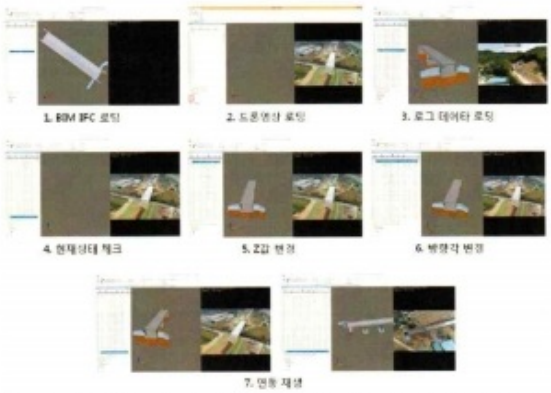
<그림 2.2.10> 철도인프라 통합 관리 체계

○ 다차원 객체기반 철도인프라 시공관리 기술 개발

- 철도인프라 사업관리 공정 관리 기술 개발
- 철도인프라 사업관리 표준 프레임워크 개발
- 철도인프라 사업관리를 위한 BIM 기반의 의사결정 지원 기술 개발
- 철도시설 공정별 공사기간 예측 알고리즘 및 전산 프로그램 개발
- 철도인프라 시공현장 영상정보 연동 기술 개발
- BIM 기반 설계변경에 따른 공사비 추정 알고리즘 및 설계변경 기능 개발



<그림 2.2.11> 철도인프라 사업관리 통합 프레임워크

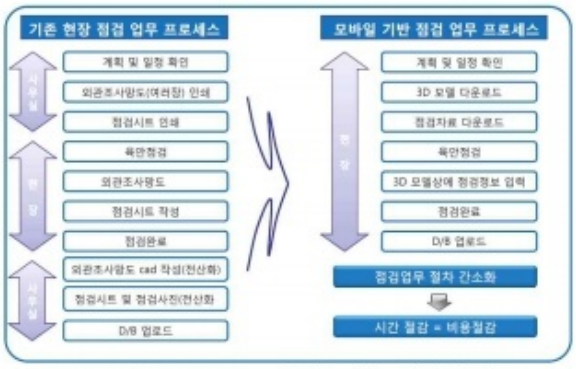


<그림 2.2.12> 드론영상과 BIM 객체정보 연동재생 방법

라. 국토교통부 - BMS(Bridge Management System)

○ 3D 모델을 이용한 교량 유지관리

- 기존의 사무실-현장-사무실인 기존 현장 점검 업무 프로세스를 현장에서 모두 완료할 수 있도록 모바일 기반 점검 업무 프로세스로 변경하여 점검업무 절차 간소화
- 기존 정보 입력 환경을 모바일로 대체하고 점검, 이미지, 영상, 음성을 결합하여 네트워크 기반 양방향 정보 교환
- 웹기반으로 유지관리 정보, 기초자료, 점검자료, 점검일정, 상태평가 및 보수보강 자료를 관리할 수 있는 정보 관리 및 분석 체계 구축
- 시설물 유지관리 주요 현황, 상세 점검 정보 및 상태평가 결과, 점검 진행현황을 3D모델에 표출할 수 있는 모듈 개발



<그림 2.2.13> 모바일 기반 점검체계



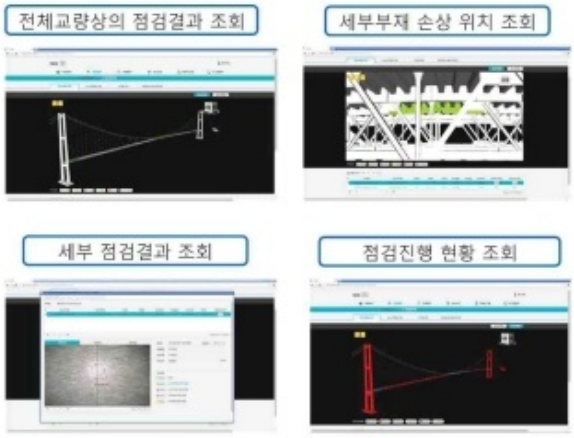
<그림 2.2.14> 3D기반 BMS 구성도

○ BMS 운영 프로그램(Web)

- 보수·보강 공법, 업체, 보수보강 결과 조회 기능
- 상태평가 가중치 및 등급 관리와 전체교량, 부재별, 평가단위별 상태평가 결과 조회 기능
- 전체교량상의 점검결과 점검 진행, 현황 조회 및 색상으로 구분하여 점검결과 시각화
- 3D 모델상에서 세부부재에 대한 점검 위치 및 점검정보 조회



<그림 2.2.15> 유지관리 정보 조회 기능



<그림 2.2.16> 점검결과 조회 기능

○ BMS 운영 프로그램(Client)

- 멀티 DID 또는 유지관리 통합 관제, 점검 진행 현황 및 점검이력 실시간 갱신 및 확인
- 3D 구조물의 시각화 및 색상으로 구분하여 점검이력 표출



<그림 2.2.17> BMS 운영 프로그램(Client) 기능

2. 국외 BIM 기술개발 현황

가. 미국

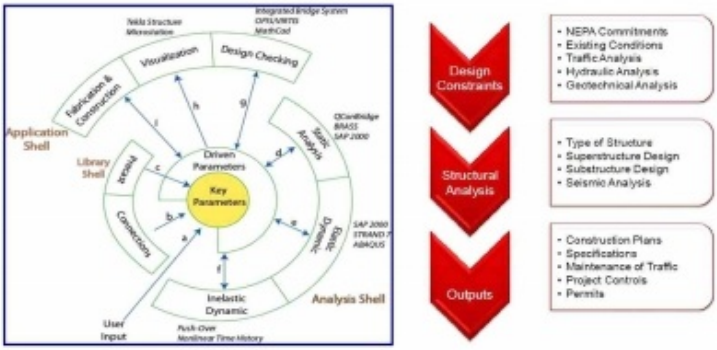
❍ 정책 및 현황

- BIM을 시각화, 엔지니어링 해석, 분규 분석, 법규 검토, 견적, 준공도서, 예산계획 등 많은 목적을 위해 시설물의 전자 모델을 만드는 행위로 정의하고 시설물 생애주기 동안의 정보 흐름에 중점을 두고 가이드라인을 개발하여 제시하고 있음, 우리나라 조달청에 해당하는 미국의 GSA(General Services Administration)는 2006년 10월부터 주요 공공건물에 BIM모델을 IFC 포맷으로 제출할 것을 요구하고 있음
- BIM은 2008년 이후 세계적으로 급속히 확산되어 BIM 기반으로 수행되는 프로젝트가 급증하였으며 국가적 정부 차원에서 BIM을 정책적으로 의무화하는 추세임. 미국의 경우 1990년대 후반부터 구축한 각종 연구와 시공경험을 토대로 2000년대 초반부터 본격적으로 BIM을 도입하기 시작하였음
- 미국에서의 BIM 프로젝트는 상당히 목적 지향적으로 제시되고 있는데 강구조 분야에서 CSI2 표준을 성공적으로 활용하였고 프리캐스트 분야에서도 중립 표준을 활발하게 개발하여 최근에 제시되었고 각 주별로 XML 등의 활용 가능한 중립표준을 기반으로 BIM 프로젝트를 발주하고 있음

❍ BIM 정보체계 및 BMS

- 교량에 대한 정보모델에 대한 연구가 활발하게 진행되었고 FHWA에서 교량정보모델을 BrIM으로 명칭을 부여하고 다음과 같은 주요 사항들과 정보체계를 제시하였음
- 교량 설계의 critical path에 기반하고 목적 위주의 현실적인 방안을 제시하고 있음
- 단계별로 발주처 입장에서 필요한 정보 요구사항을 정의하고 이를 기반으로 하는 교량 정보체계를 제시함

- 정보 호환을 위한 Link는 XML 기반 혹은 API를 이용한 상호 연동이 가능하도록 현실적인 대안을 제시함
- LOD를 모델 정보요구사항과 사용자에 대해서 정의하여 제시함
- 교량의 형상 정보 모델과 BMS 연계 구조를 제시하여 발주자인 동시에 시설물 관리자의 입장에서 BrIM의 체계를 제시함
- 형상과 정보를 분리하고 정보의 경우에는 XML 형태로 저장하도록 설정함



<그림 2.2.18> 교량정보모델 기반의 업무 절차 및 체계

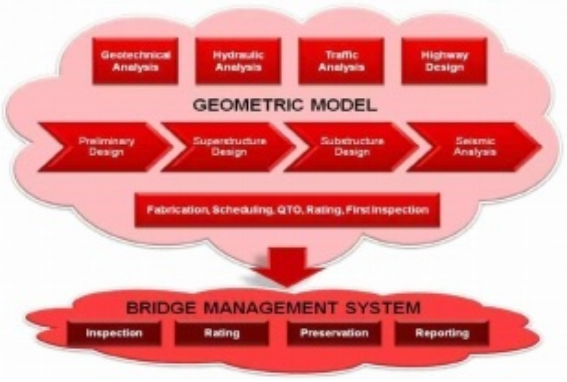


<그림 2.2.19> BrIM Data Pool

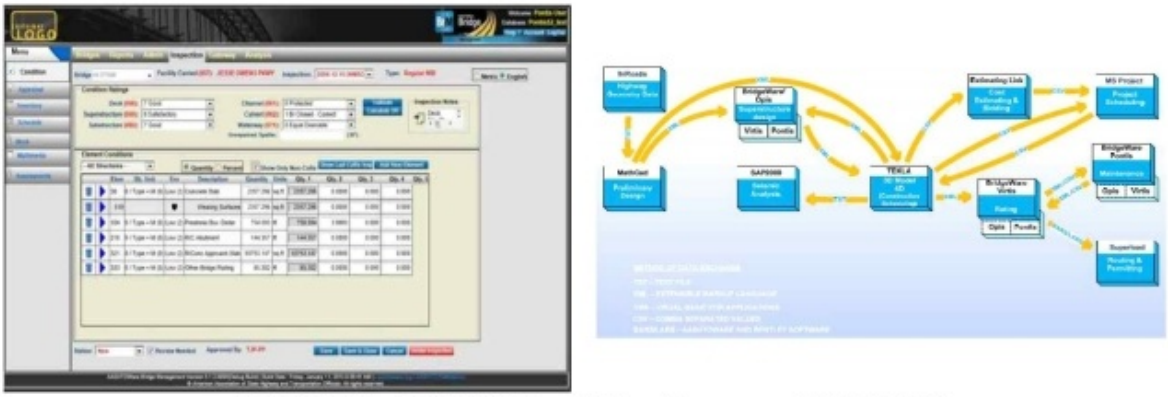
Table 3: AIA Definitions of LOD as applicable to Bridges

Level of Development (LOD)	Model Content Requirements	Authorized Uses
LOD 100	Overall massing indicative of height, volume, location and orientation. May be modeled in three dimensions or represented by other data.	Limited analysis Aggregate cost estimating High-level staging
LOD 200	Elements are modeled as generalized systems or assemblies with approximate quantities, size, shape, location and orientation. Attributes may be attached to model elements.	Preliminary Analysis High-level cost estimating High-level scheduling
LOD 300	Elements are modeled as specific assemblies and are accurate in quantity, size, shape, location and orientation. Attributes may be attached to model elements.	Construction documents Detailed analysis Project controls
LOD 400	As per LOD 300 plus complete fabrication, assembly and detailing information	Model-based fabrication Actual cost tracking Lock-aheads Virtual mock-ups
LOD 500	Elements are as-constructed assemblies accurate in quantity, size, shape, location and orientation. Attributes may be attached to model elements.	Maintenance and planning of future construction

<그림 2.2.20> LOD 수준에 따른 모델 정보



<그림 2.2.21> 교량 관리 시스템에서의 BIM 활용



<그림 2.2.22> AASHTOWare Bridge Management(BrIM) 예시

나. 영국

○ BIM 도입 전략

- BIM 기술의 활용도를 높이기 위해 “Push & Pull” 전략을 활용하고 있음
- 건설 산업계(Industry Push)와 정부(Client Pull)가 주축이 되어 진행중임
- Push는 프로젝트의 공급체인 구성원을 밀어주고 지원하는 것에 관한 것이며 표준, 지침, 교육지원 등을 포함하고 있음
- Pull은 BIM 관련 정책과 법을 제정하고 BIM 정보 명세화 등을 통한 요구사항을 정의하여 기술 활용을 요구하거나 유도하는 역할을 함



<그림 2.2.23> “Push & Pull” 전략 개념도

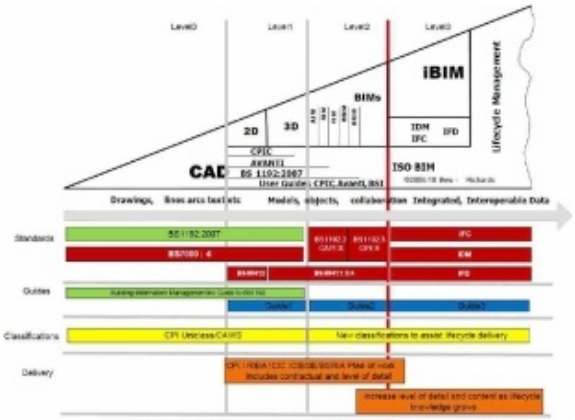
○ B/555 Roadmap

- 영국에서는 “Building Information Modelling Working Party Strategy Paper(2011)”에서 BSI의 B/555 위원회에서 개발한 영국 BIM 로드맵을 제안함
- B/555 위원회는 자국 건설 산업의 정보 교환 방법의 국제 표준에 중점을 두었으며 BIM 로드맵을 작성하기 위하여 BIM 성숙도 개념을 도입함
- BIM 로드맵에 적용된 성숙도 개념은 Level ‘0’부터 ‘3’까지 BIM 적용단계 또는 수준에 맞는 기술을 정의하고 각 수준에 부합되는 프로젝트와 계약에 적용될 수 있는 기준을 제시하기 위해 사용됨
- 각각의 성숙도 단계는 협업 수준에 따라 구분되어 있으며, 도구와 기술에 대한 이해도를 포함하고 있음
- Level 0은 2D CAD, Level 1은 3D 모델링 수준, Level 2는 BIM 프로세스 수준, Level 3은 통합 BIM 수준을 의미함
- 각각의 성숙도 단계는 기술적 수준, 협업의 정도, 프로젝트에서 BIM의 활용 과정에 대한 이해 정도에 따라 다음과 같이 레벨을 구분함

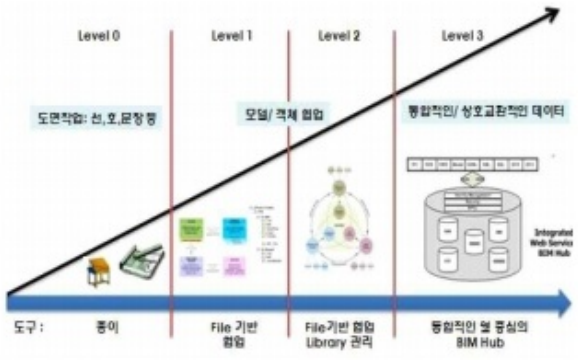
<표 2.2.2> BIM 성숙도 단계별 수준

Level	수준
0	종이에 기반을 둔 2D 형태의 CAD 작업으로 데이터 교환 매커니즘이 포함되지 않는 도면 수준
1	BS 1192:2007 정의에 따른 2D 또는 3D 캐드로 일발적인 데이터 환경에 대한 협업을 제공하는 수준으로 표준 데이터 구조와 포맷을 사용하고 상용 데이터 관리 및 통합되지 않는 상황에서 비용 관리가 가능한 수준
2	제출된 데이터를 활용할 수 있는 BIM 도구를 이용하여 3D 환경으로 4D 공정관리뿐만 아니라 5D 공사비관리를 수행할 수 있고 자원관리도 조직의 ERP(Enterpise Resource Planning) 시스템과 연계 가능한 수준
3	IFC/IFC 표준을 준수하며 통합이 웹서비스를 통해 건설 프로젝트의 협업을 수행할 수 있는 최종단계로 완전 개방 프로세스와 iBIM 혹은 통합 BIM을 이용해 동시 공학적 프로세

	스가 가능한 수준



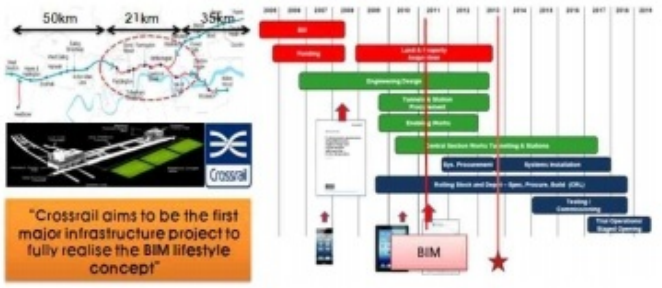
<그림 2.2.24> 영국의 B/555 로드맵



<그림 2.2.25> BIM 성숙도 단계 개념도

○ BIM 적용 사례(Crossrail 프로젝트)

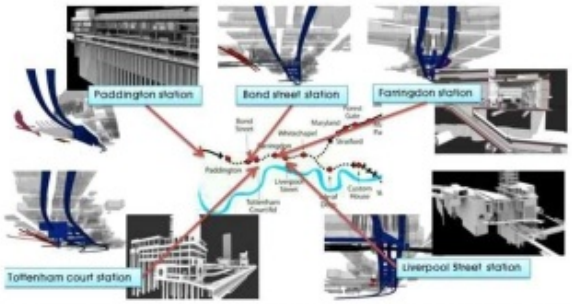
- 영국의 Crossrail 프로젝트는 런던권의 도시 외곽을 동서로 가로질러 영국 런던 주변 수도권 지역을 묶는 광역철도망 사업임
- 막대한 예산이 투입되는 Crossrail 프로젝트에 BIm 적용하고자 계획단계부터 단계별 도입전략을 수립하고 입찰서류에 BIM을 추가하여 정책적으로 사업을 수행하고 있음
- 협업은 모든 절차에서 BS 1192를 준용하였으며 협업 솔루션을 적절히 활용하여 이전보다 공사를 35% 빠르게 진행하여 비용을 280만 파운드를 절감하였다고 보고된 바 있음
- 대표적인 BIM tool인 Bentley사의 Microstation을 활용하여 진행하였으며, 3D 도면, 간섭체크와 4D 시뮬레이션 등의 기술들을 활용함



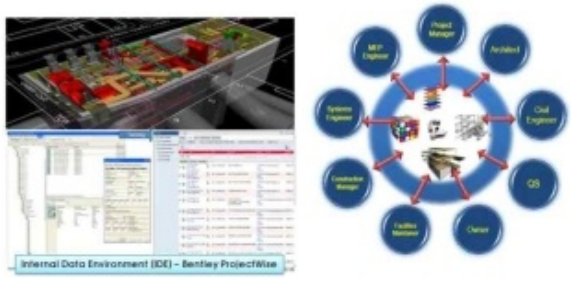
<그림 2.2.26> Life-cycle에 대해 BIM 적용



<그림 2.2.27> 성숙도 단계를 고려한 BIM 활용



<그림 2.2.28> Microstation을 활용한 3D 모델링



<그림 2.2.29> IDE를 통한 통합 데이터 관리

다. 일본

○ 정책 및 현황

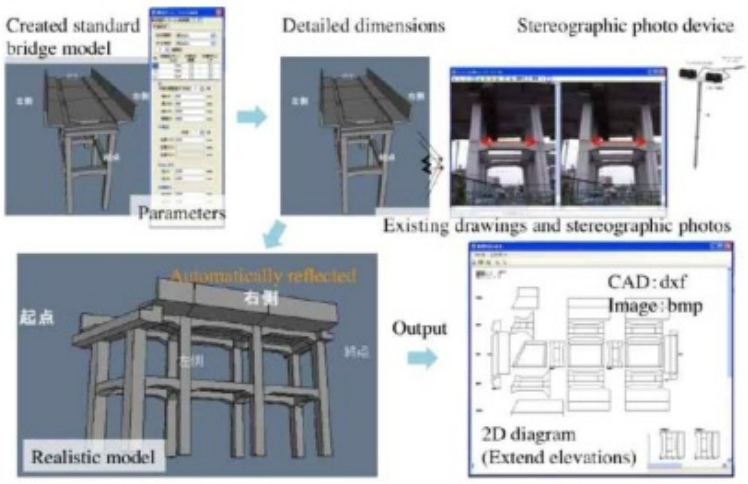
- 2009년에 BIM이 이슈화되고 2012년에 토목 구조물에 적용하기 위한 노력이 시작되었음
- 2016년에 공사금액 $3M 이상의 토공에 I-Construction을 시범적으로 실시하였음
- 2020년에 모든 공종을 I-Construction으로 진행하도록 발주기관에서 요구하는 것을 계획하고 있음
- 일본은 BIM의 확장단계로 국가차원의 I-Construction 도입을 준비하고 있음
- I-Construction : 무인체, 영상 이미지와 3차원 스캐너 등을 이용하여 측량, 설계, 시공, 유지관리단계를 아울러 총체적으로 건설을 관리하는 체계



<그림 2.2.30> I-Construction 개요도 및 예시

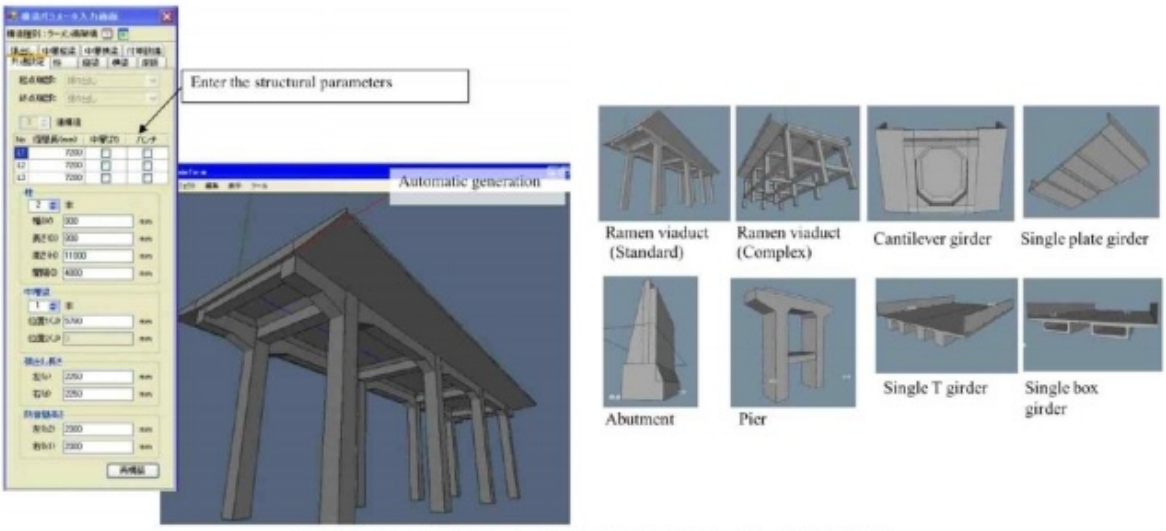
○ BMS 구축 예시

- 일본에서는 설계수명이 도달하고 있는 교량에 대한 체계적 관리 시스템 필요성을 인지하였고 시스템에 반영하기 위한 다음과 같은 세가지 문제점을 해결하기 위해 BMS 구축 연구를 수행하였음
- 첫째, 점검을 위한 전개도는 구체적 수치가 없는 개요도임. 둘째, 점검 도안은 시설물 점검과 보수 작업간 공유되지 않음. 셋째, 작성된 도안이 작성 연대순으로 관리되지 않음



<그림 2.2.31> 일본 BMS 개요

- 모델은 가장 일반적인 교량 형태인 single T 거더, single I 거더, 박스 거더와 단일 플레이트 거더, 라멘과 하부구조물을 변수 라이브러리를 변수모델로 제공하여 변수 입력시 즉각적으로 3D 모델이 생성됨

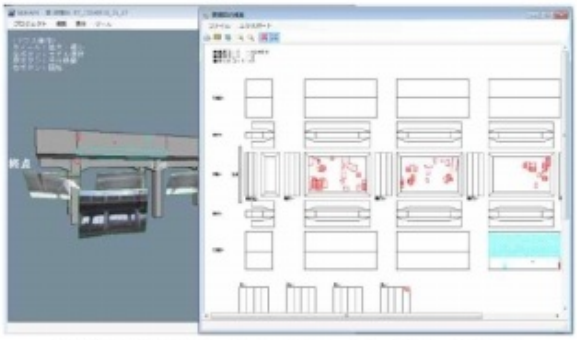


<그림 2.2.32> 변수기반 라이브러리 및 3D 모델 생성

- 실제 점검시 확보한 사진과 3D 모델을 정합하여 사진 위의 손상을 3D 모델 위에 반영할 수 있으며 3D 모델에 반영된 손상은 정량적으로 위치, 형태, 범위가 표현됨
- 각 손상에 ID를 부여할 수 있으며 ID를 이용하여 지속적으로 관리가 가능함
- 또한 3D모델의 전개도 출력 기능을 포함하고 있음. 전개도에 손상이 반영되어 출력하여 기록물로 반영할 수 있으며 추후 시설 점검에서 점검자와 보수작업자 사이에 자료를 공유할 수 있음



<그림 2.2.33> 3D모델-점검사진 정합



<그림 2.2.34> 손상 반영 3D 모델 전개도

3. 본 과제의 차별성

○ 국내외 안전진단 및 유지관리와 BIM 구축 현황을 조사/분석하고 본 과제와의 차별성을 <그림 2.2.35>에 나타냄

○ 본 과제에서는 신설되는 교량이 아닌 기존의 공용중인 교량을 대상으로 시스템을 구축하기 위하여 「도로 교량 및 터널 현황정보시스템」에서 교량 형식별 개소를 조사하였고 PSCI, STB, RCS, RA형식을 대상 교량형식으로 선정함

○ 2018년에 한국시설안전공단에서 「시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침(성능평가 편)」을 개정하였으며 본 과제에서는 성능평가에 대한 진단방법도 시스템에 포함시킴

○ 기존의 구축된 교량관리 시스템은 대부분 교량에 대한 정보이력을 누적하는 기능만을 포함하고 있으며 정보의 재활용에 대해서는 고려하고 있지 않기 때문에, 본 과제에서는 유지관리 의사결정의 도구로 활용될 수 있도록 안전진단 정보와 연계하여 교량의 잔존수명과 가치를 제공할 수 있도록 구축함

○ 본 과제의 모델링 기법은 도로/철도 선형에 따라서 라이브러리가 조합된 템플릿이 비정형으로 변형되는 모델링 환경과 잦은 설계 변경 및 연관 프로젝트에서 높은 사용성 및 재활용성을 지원함으로 다수의 교량의 효율적 모델링 가능

○ 4차산업 시대를 대비하여 구조해석 빅데이터를 사용해 머신러닝을 활용한 손상추정 알고리즘을 개발함. 단순히 계측데이터와 기준치를 비교한 이상치를 평가하는 것이 아닌 손상의 위치와 정도까지 판별하고자 함

항목	한국시설안전공단 (2017)	국토교통부 (BMS)	한국도로공사 (EX-BIM)	한국철도기술연구원 (2019)	본 연구
대상 구조물	케이블 교량	케이블 교량	도로교량	철도교량	일반 교량 (PSCI, STB, RCS, RA)
단계	유지관리	유지관리	설계, 시공	설계, 시공	유지관리
안전진단 및 유지관리 체계	안전 중심	안전 중심	x	x	안전 중심+성능 중심
점검유형	외관조사	외관조사, 조사·재료시험	x	x	외관조사, 조사·재료시험 구조안전성, 사용성능
가치평가	x	x	x	x	o
잔존수명	x	x	x	x	o
3D BIM 모델	o	o	o	o	o
3D 모델의 재활용성	일회성	일회성	일회성	중 (부재 라이브러리)	상 (선형기반 템플릿 활용)
구조해석 연동	x	x	x	x	o
손상 추정 시스템	x	x	x	x	o(라멘교)

<그림 2.2.35> 본 과제의 차별성

제 3 장 연구수행내용 및 성과

제 1 절 연구개발 추진 체계

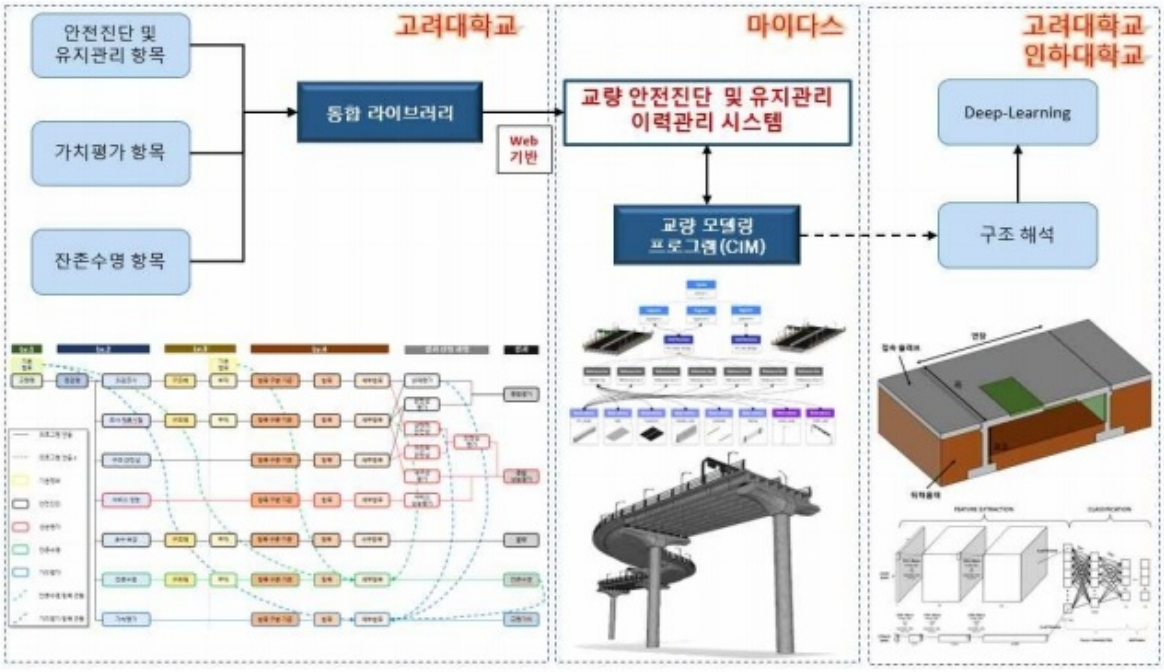
1. 연구개발 추진전략 및 방법

○ 교량 구조물 안전 진단 및 유지관리 이력 정보 라이브러리를 구축하고 BIM을 이용한 3차원 시각화 및 이력 정보의 자동 출력을 이용하여 실무자 간의 정보 공유를 돕고 교량 구조물의 안전 진단 및 유지관리의 효율성을 증가시킴

○ 건설이 된지 오래된 교량 구조물 이력 정보의 확보는 어려움이 있음. 본 연구에서는 이력 정보의 부족을 해결하고자 가치평가 및 잔존 수명 예측 시스템 개발을 통한 교량 구조물의 안전 진단 및 유지관리에 적용 가능한 이력 정보 라이브러리를 구축하여 교량 구조물의 안전 진단 및 유지관리 시스템에 적용하고자 함

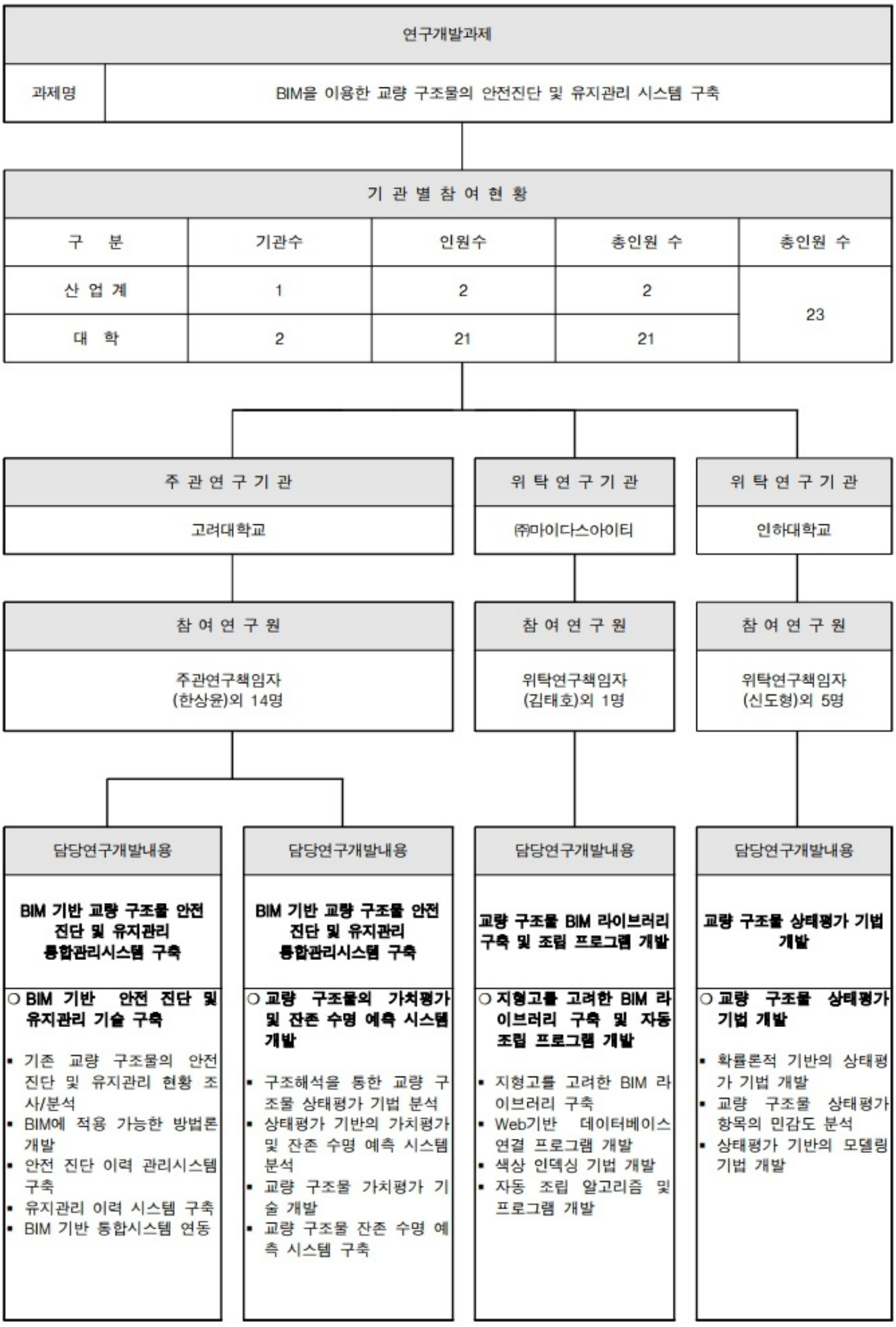
○ 지형고를 고려한 BIM 라이브러리 구축 및 조립 프로그램 개발로 교량 구조물에 BIM을 적용하고자 함

○ 구조해석을 통해 열화에 의해 손상된 구조물의 거동 빅데이터를 생성하고, 이를 활용하여 Deep-Learning을 수행해 구조물의 손상을 실시간으로 예측할 수 있는 시스템을 개발하고자 함



<그림 3.1.1> 연구개발 흐름도

2. 연구개발 추진체계


연구개발과제
과제명
BIM을 이용한 교량 구조물의 안전진단 및 유지관리 시스템 구축
기 관 별 참 여 현 황
구 분
기관수
인원수
총인원 수
총인원 수
산 업 계
1
2
2
23
대 학
2
21
21
주 관 연 구 기 관
고려대학교
위 탁 연 구 기 관
㈜마이다스아이티
위 탁 연 구 기 관
인하대학교
참 여 연 구 원
주관연구책임자
(한상윤)외 14명
참 여 연 구 원
위탁연구책임자
(김태호)외 1명
참 여 연 구 원
위탁연구책임자
(신도형)외 5명
담당연구개발내용
BIM 기반 교량 구조물 안전 진단 및 유지관리 통합관리시스템 구축
○ BIM 기반 안전 진단 및 유지관리 기술 구축
▪ 기존 교량 구조물의 안전 진단 및 유지관리 현황 조사/분석
▪ BIM에 적용 가능한 방법론 개발
▪ 안전 진단 이력 관리시스템 구축
▪ 유지관리 이력 시스템 구축
▪ BIM 기반 통합시스템 연동
담당연구개발내용
BIM 기반 교량 구조물 안전 진단 및 유지관리 통합관리시스템 구축
○ 교량 구조물의 가치평가 및 잔존 수명 예측 시스템 개발
▪ 구조해석을 통한 교량 구조물 상태평가 기법 분석
▪ 상태평가 기반의 가치평가 및 잔존 수명 예측 시스템 분석
▪ 교량 구조물 가치평가 기술 개발
▪ 교량 구조물 잔존 수명 예측 시스템 구축
담당연구개발내용
교량 구조물 BIM 라이브러리 구축 및 조립 프로그램 개발
○ 지형고를 고려한 BIM 라이브러리 구축 및 자동 조립 프로그램 개발
▪ 지형고를 고려한 BIM 라이브러리 구축
▪ Web기반 데이터베이스 연결 프로그램 개발
▪ 색상 인덱싱 기법 개발
▪ 자동 조립 알고리즘 및 프로그램 개발
담당연구개발내용
교량 구조물 상태평가 기법 개발
○ 교량 구조물 상태평가 기법 개발
▪ 확률론적 기반의 상태평가 기법 개발
▪ 교량 구조물 상태평가 항목의 민감도 분석
▪ 상태평가 기반의 모델링 기법 개발

3. 연구개발 추진 일정

구분	연구과제명 (연구수행기관)	관련 성과목표/지표			세부추진내용 (연구수행 Activity)	Activity별 산출물	소요 연구비 (백만원)	1차년도				2차년도				3차년도			
		핵심성과	단위성과	질적 성과지표				1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4
총괄							900	280				243				377			
주관	BIM 기반 안전 진단 및 유지관리 기술 구축 (고려대)	1	1-1	1-1-①	국내외 진단 및 유지관리 실태 조사/분석	10건이상	37	18	19										
				1-1-②	BMS 유지관리 시스템 적용성 분석	1건 이상	37	15	22										
			1-2	1-2-①	주요 인자 결정 및 라이브러리 항목 구축	10건 이상	37		10	10	17								
			1-3	1-3-①	LoD 별 BIM 정보 적합성 평가	분석 보고서	57					28	29						
			1-4	1-4-①	BIM 연동 및 라이브러리 구축	분석 보고서	57						20	20	17				
			1-5	1-5-①	BIM 연동 및 라이브러리 구축	분석 보고서	84									20	20	20	24
			1-6	1-6-①	시스템 가동률	논문	49										15	15	19
	교량구조물의 가치평가 및 잔존 수명 예측 시스템 개발 (고려대)	2	2-1	2-1-①	국내외 문헌 조사/분석	10건 이상	27	12	15										
				2-1-②	주요 인자 결정 및 방법론 도출	방법론 도출	27		7	10	10								
				2-1-③	BIM 라이브러리 항목 결정	분석 보고서	32					10	10	10	12				
			2-2	2-2-①	구조해석 모델 구축	5건 이상	55		15	20	20								
				2-2-②	다양한 하중 시나리오별 응답 추출	응답 이론 도출	49					10	10	15	14				
				2-2-③	교량 구조물 가치평가	1건 이상	84									40	44		
				2-2-④	잔존 수명 예측 시스템 구축	논문	84										25	25	34
위탁	교량 구조물 BIM 라이브러리 구축 및 조립 프로그램 개발 (마이다스)	3	3-1	3-1-①	라이브러리 자동조립 기반 구축	10건 이상	17	3	4	5	5								
				3-1-②	Web 기반 데이터베이스 연결	SW	11					5	6						
				3-1-③	색상 인덱싱 기법 구축	알고리즘 개발	14									3	3	4	4
			3-2	3-2-①	구조해석 모델구현	알고리즘 개발	13		3	3	7								
				3-2-②	자동조립을 위한 알고리즘 체계 수립	SW	13					3	3	3	4				
				3-2-③	시스템 가동률	특허 및 SW	24									4	6	6	8
위탁	교량 구조물 상태평가 기법 개발 (인하대)	4	4-1	4-1-①	상태평가 방법론 조사	10건 이상	30	5	10	10	5								
				4-1-②	모델링 기법 선정	논문	8					4	4						
			4-2	4-2-①	시뮬레이션 검증을 통한 패턴 분석 기법 검증	특허	16					4	4	4	4				
				4-2-②	상태평가 항목의 민감도 분석	특허 및 SW	38									8	8	10	12

제 2 절 연구 수행 내용

1. 교량 통합 유지관리 이력 관리 정보체계 구축

가. 안전진단 및 유지관리 체계 구축

(1) 연구배경

○ 현재 교량의 안전진단 및 유지관리 방법은 본 과제가 시작된 시점인 2016년에의 기준으로는 국토교통부 및 한국시설안전공단에서 2012년에 발간한 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침 해설서 및 2014년에 발행한 교량유지관리 매뉴얼에 따르며 본 보고서가 제출되는 현시점에서는 2018년 개정된 시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법 시행령에 따른 시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침[성능평가 편]에 따라 안전진단 및 유지관리가 시행됨.

○ 그러나 교량구조물의 진단 및 유지관리는 시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법(이하 시설물안전법)의 관리주체가 되는 각각의 지방정부에서는 유지관리 업체에 하청을 주어 교량구조물의 진단 및 유지관리가 현 상태의 보수에 그치는 단순 1회성에 그치는 수준이며 교량구조물의 전 생애주기에 걸쳐서 보여지는 성능감소를 대변하는 이력데이터의 활용은 전무한 실정임.

○ 교량의 이력데이터는 국토교통부가 제공하는 교량관리시스템인 BMS(Bridge Mangaement System) 및 한국 시설안전관리공단이 관리하는 시설물정보관리시스템 FMS(Facility Management System)에서 데이터를 받아서 한국건설기술연구원(KICT)에서 데이터를 관리하고 있음.

○ 현시점에서의 교량 유지관리는 2017년 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침서에 규정되어 있듯이 외관조사 및 조사·재료시험, 구조 안전성 항목에 따라 상태평가 및 안전성 평가로 구조물의 등급을 산정하고 이후 각각의 등급에 따라 전체 구조물의 종합평가를 수행하여 구조물 전체등급을 산정함.

○ 또한 본 과제가 제출되는 시점인 2019년 시행된 시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침 [성능평가]편에 따르면 외관조사 및 조사·재료시험, 구조 안전성 뿐 만 아니라 사용성능 항목을 추가하여 교량의 등급을 산정하며 교량의 전반적인 평가를 상태적 안전성 구조적 안전성을 포함한 안전성 평가 및 내구성 평가 서비스 성능평가로 3가지 부분의로 평가를 나누어 교량의 종합성능평가를 진행하며 이에 따른 내용을 표<3.2.1>에 나타냄.

<표 3.2.1> 진단종류별 비교 검토표

정기점검		정밀점검		정밀안전진단		성능평가	
1. 기간		1. 기간		1. 기간		1. 기간	
A 등급	1회/6개월	A 등급	1회/3년	A 등급	1회/6년	A 등급	1회/5년
B·C 등급		B·C 등급	1회/2년	B·C 등급	1회/5년	B·C 등급	
D·E 등급	3회/1년	D·E 등급	1회/1년	D·E 등급	1회/4년	D·E 등급	
2. 대상 시설물		2. 대상 시설물		2. 대상 시설물		2. 대상 시설물	

정기점검		정밀점검		정밀안전진단		성능평가	
상부구조	바닥판 거더	상부구조	바닥판 거더	상부구조	바닥판 거더	상부구조	바닥판 거더
하부구조	교대 및 교각 주탑 기초	하부구조	교대 및 교각 주탑 기초	하부구조	교대 및 교각 주탑 기초	하부구조	교대 및 교각 주탑 기초
받침	교량받침	받침	교량받침	받침	교량받침	받침	교량받침
케이블	케이블 정착구 행어밴드 새들	케이블	케이블 정착구 행어밴드 새들	케이블	케이블 정착구 행어밴드 새들	케이블	케이블 정착구 행어밴드 새들
텐던	강연선	텐던	강연선	텐던	강연선	텐던	강연선
기타부재	신축이음 배수시설 보호시설 교면포장	기타부재	신축이음 배수시설 보호시설 교면포장	기타부재	신축이음 배수시설 보호시설 교면포장	기타부재	신축이음 배수시설 보호시설 교면포장
2차부재	X	2차부재	X	2차부재	가로보 세로보	2차부재	가로보 세로보

3-1. 상태평가(기본과업)

① 상태변화 외관조사

콘크리트 구조물

강재 구조물

3-1. 상태평가(기본과업)

① 외관조사(주요부재)
외관조사망도 작성
결함이 신규로 발생 또는
진전된 부재
콘크리트 구조물
균열, 누수, 박리, 박락,
층분리, 백태, 철근노출 등
강재 구조물
균열, 도장상태, 부식상태
등

② 조사·재료시험(간단한
현장 재료시험)
콘크리트 시험
반발경도시험
탄산화 깊이 측정시험

3-1. 상태평가(기본과업)

① 외관조사(기본시설)
외관조사망도 작성
전체 부재

콘크리트 구조물
균열, 누수, 박리, 박락,
층분리, 백태, 철근노출 등
강재 구조물
균열, 도장상태, 부식 및
접합(연결부) 상태 등

② 조사·재료시험
(기본시설)
콘크리트 시험
반발경도시험
탄산화 깊이측정
염화물함유량 시험 등
초음파전달속도시험

강재 시험
강재 비파괴시험

기계·전기설비 및
계측시설의 작동 유무

3-1. 안전성평가

① 상태적 안전성
외관조사망도 작성
전체 부재

콘크리트 구조물
균열, 누수, 박리, 박락,
층분리, 백태, 철근노출 등
강재 구조물
균열, 도장상태, 부식 및
접합(연결부) 상태 등

② 구조적 안정성
상부구조
공용내하력
주행안젼성(철도교량 ->
고유 휨 진동수, 임계속도,
연직가속도, 연직처짐,
면틀림, 종방향 변위,
단차)
하부구조
세굴을 포함한 기초
안전성

3-2. 내구성평가

① 조사·재료시험

콘크리트
피복 콘크리트의 품질
탄산화 깊이
염화물 침투량
염해환경
동해환경
강재
도장열화
도장두께
대기환경
강설횟수

정기점검	정밀점검	정밀안전진단	성능평가
		3-2.안전성평가 (기본과업) 안전성평가 결과 산정 내하력 등 구조안전성 평가 사용성(내진성능) 평가	3-3. 서비스성능평가 사용성 포장상태 교량조명 진동사용성 기능성 점검시설의 유무 교통수요
	4-1. 상태평가(선택과업) ① 외관조사(전체부재) 외관조사망도 작성 전체부재 외관조사 ② 조사·재료시험 수중조사 기타 관리주체의 추가요구 및 안전성평가 등에 필요한 조사·시험 4-2. 안전성평가(선택과업) 안전성평가 결과 산정 내하력 등 구조안전성 평가	4-1. 상태평가(선택과업) ① 외관조사(부대시설, 부속시설 등) 외관조사망도 작성 전체부재 외관조사 콘크리트 구조물 균열, 누수, 박리, 박락, 층분리, 백태, 철근노출 등 강재 구조물 균열, 도장상태, 부식 및 접합(연결부) 상태 등 ② 조사·재료시험 시료채취 및 실내시험 재하시험 및 계측 지형,지질,지반조사 및 탐사, 토질조사 수중조사 누수탐사 침하, 변위, 거동 등의 측정 콘크리트 제체 시추조사 수리·수충격·수문조사 기계·전기설비 및 계측시설의 성능검사 또는 시험계측 기본과업 범위를 초과하는 강재비파괴시험 CCTV, 단수시키지 않는 내시경 조사 등 기타 관리주체의 추가요구 및 안전성평가 등에 필요한 조사·시험	

○ 표<3.2.1>을 통해 “2017 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침해설서” 및 “2018 시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침[성능평가 편]”의 차이점을 명확히 볼 수 있음. 차이점으로 기본과업에서 기본 및 선택 사항이었던 조사 및 재료시험 중 다수의 항목들이 필수사항을 들어왔으며 관련하여 새로 필수 사항으로 포함된 내구성 평가 항목이 교량의 등급 평가 판정 시 새로 추가됨을 확인 할 수 있다.

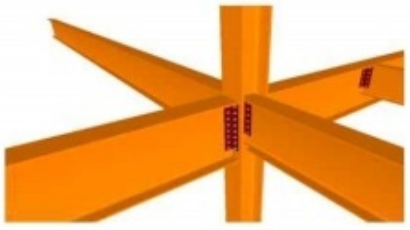
○ 또한 기존 지침에서는 부재했던 서비스성능평가 항목이 추가 됨으로 교량의 성능을 안전성과 내구성으로 국한하지 않고, 교량의 사용적인 측면에서의 성능을 고려 할 수 있게됨.

○ 그러나 앞서 언급하였듯이 성능평가에 따른 유지관리시 이력데이터를 사용해야 함에도 관련하여 이력데이터를 참조하는 항목평가는 부재함.

○ 이력데이터를 사용하는 유지관리를 하기 위해서는 첫 번째로 교량 구조물의 정보 축적 및 이력데이터의 관리를 위하여 교량의 정보가 저장되어지는 객체 정보 모델의 생성 및 관리, 연계되어지는 자료들의 관리 방식, 이후 상호 교환되어지는 자료들을 효율적으로 관리되게끔 하는 인벤토리의 항목들을 분류, 인벤토리 구성요소간의 조합 및 형식 에 관한 정보라이브러리 구축이 선행되어야 한다.

○ 이력데이터의 활용을 위한 객체 정보 모델의 생성, 관리, 분류, 조합은 BIM을 통하여 구체화 할 수 있는데 BIM 데이터의 상세 수준에 대한 기준은 LOD(Level of Development) 또는 BIL(BIM Information level)에 따라 나누어 구분할 수 있다. LOD의 경우 미국 AIA에서 규정한 기준으로써 100~500 사이의 단계로 구분하여 상세 수준을 정의하고 있으며 BIL의 경우는 2013 년 국토교통부 국토교통과학기술 진흥원 도시건축사업의 " 개방형 BIM 기반의 건축물 설계 표준 및 인프라 구축"(2011~2016) 에 따른 기준으로 구성요소의 상세수준을 정의하고 있다

B1010.10 – Floor Structural Frame (Steel Framing Beams)

100	See B10	
200	See B1010	
300	Element modeling to include: • Specific sizes of main horizontal structural members modeled per defined structural grid with correct orientation, slope and elevation Required non-graphic information associated with model elements includes: • Structural steel materials defined • Connection details • Finishes, i.e. painted, galvanized, etc.	
350	Element modeling to include: • Actual elevations and location of member connections • Large elements of typical connections applied to all structural steel connections such as base plates, gusset plates, anchor rods, etc. • Any miscellaneous steel members with correct orientation • Any steel structure reinforcement such as web stiffeners, sleeve penetrations, etc.	
400	Element modeling to include: • Welds • Coping of members • Bent plates, cap pates, etc. • Bolts, washers, nuts, etc. • All assembly elements	

<그림 3.2.1> AIA에서 제시한 LOD 상세설명 예

○ <표 3.2.2> 및 <그림 3.2.1>은 AIA에서 규정한 LOD 기준의 상세한 설명 및 LOD 예시로

철골조 조인트 프레임의 LOD 별 예시를 보여 주고 있다.

<표 3.2.2> LOD에 따른 세부사항

LoD 100	LoD 200	LoD 300	LoD 400	LoD 500
면적, 높이, 볼륨, 위치 등의 기본정보	모델요소의 일반화된 형태와 실제와 근사한 수준의 물량, 크기, 형태 정보	실제와 정확한 물량 정보	조달, 시공에 필요한 모든 디테일한 정보	크기, 모양, 위치, 수량 및 방향, 그래픽이 아닌 정보가 모델에 첨부되는 형식

○ BIL기준은 시설사업의 실시설계단계에서부터 BIM 기술을 적용하기 위한 최소의 요건을 정의하고, 관련 데이터를 시설물의 유지관리 단계까지 사용할수 있도록 BIM업무기준을 제공하기 위한 목적으로 작성되었으며 관련한 구성요소의 상세수준은 최소부재 작성대상의 목록을 제시하고 있다. 이를 <표 3.2.3>에 정리하여 나타내었다.

<표 3.2.3>

Building Information Level	표현 수준	용도 예
BIL10	주변 지형지물 표현 면적, 높이, 볼륨, 위치 및 방향	프로젝트의 전체기간 단계화를 위해 모델 사용가능
BIL20	계획설계 수준에서 필요한형상의 표현 계획에 필요한 부재의 존재 표현 공간 주요 구조부재의 표현	규모 검토 개략 공사비 검토 3차원 협의
BIL30	기본 설계 수준에서 필요한 모든 부재의 존재표현 부재의 수량, 크기, 위치 및 방향의 표현	정확한 기본 도면 산출 각종 설계 의사 결정 기본 품질 검토 개략 LCC 분석 개략시공계획
BIL40	실시설계 수준에서 필요한 모든 부재의 존재 표현 모든 구조부재의 구격 시공성 검토수준의 장비	간섭 체크 수량산출 시공성 검토 정확한 실시도면 산출 시공성 검토 LCC분석
BIL50	용도에 따라 정보추가 ex) 4D(공정), 5D(공사비), 6D(조달), 7D(유지관리) 시공좌표 및 자재정보 비용관리에 필요한 정보	공정 공사비 관리 자재 조달관리
BIL60	프로젝트별 Client의 요구에 따라 달라짐	유지보수

(2) 국내 BMS 유지관리 시스템 적용성 분석

○ 국내에서는 <그림 3.2.2>와 같이 5개의 특수교량에 대해서 BMS를 구축하여 운영하고 있으나, 각 교량의 완공시기 및 BMS 구축시기가 달라 각 BMS 시스템은 해당 교량에 대해 특화되어 있으며 시스템별로 차이점이 있음

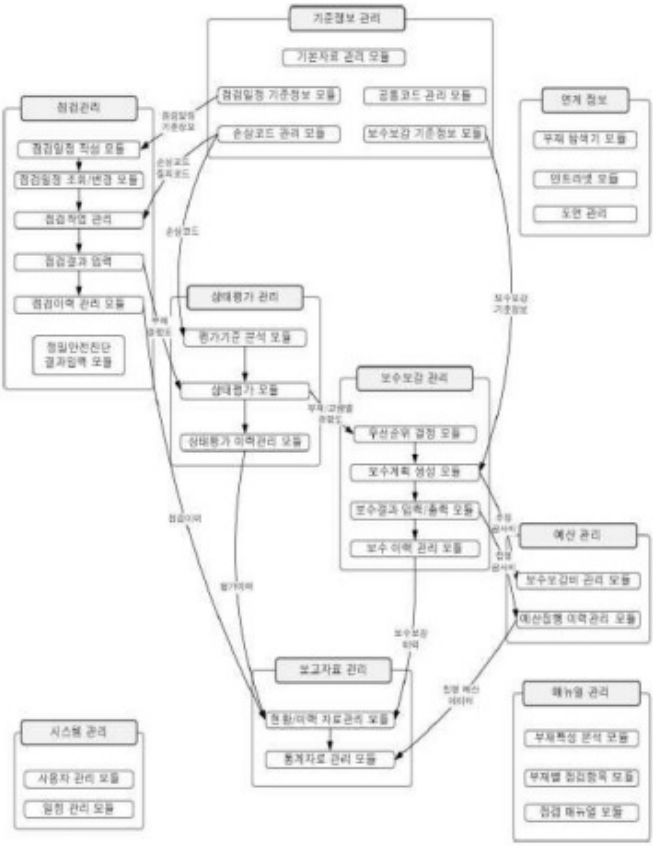
○ 본 과제의 목표는 기존 공용중인 교량에 대한 유지관리 이력 데이터를 일관성 있게 관리할

수 있는 시스템을 구축하는 것이기 때문에, 국내 BMS 시스템을 적용하기에는 무리가 있을 것으로 판단됨

○ 하지만, 교량의 유지관리 이력을 3D 모델을 활용하여 관리하려는 시스템 구축의 목표는 동일하기 때문에, <그림 3.2.3>과 같은 모듈 구성 및 속성정보 등을 활용하여 본 과제의 BIM 이력관리 시스템에 적용하였고, 자세한 사항은 [제3장.제2절.1.라. 교량 통합 유지관리 정보체계 구축]에서 다루었음



<그림 3.2.2> 국내 특수교량 BMS 구축현황



<그림 3.2.3.> 광안대교 현수교 BMS 모듈 구성도

(3) 인자 및 라이브러리 항목 구축

○ 따라서 본 연구 에서는 교량의 전 생애 주기에 걸쳐 교량의 객체정보들 즉 시공설계정보, 부재속성정보, 점검관리정보들을 하나의 플랫폼 안에서 관리하는 것을 목적으로 함.

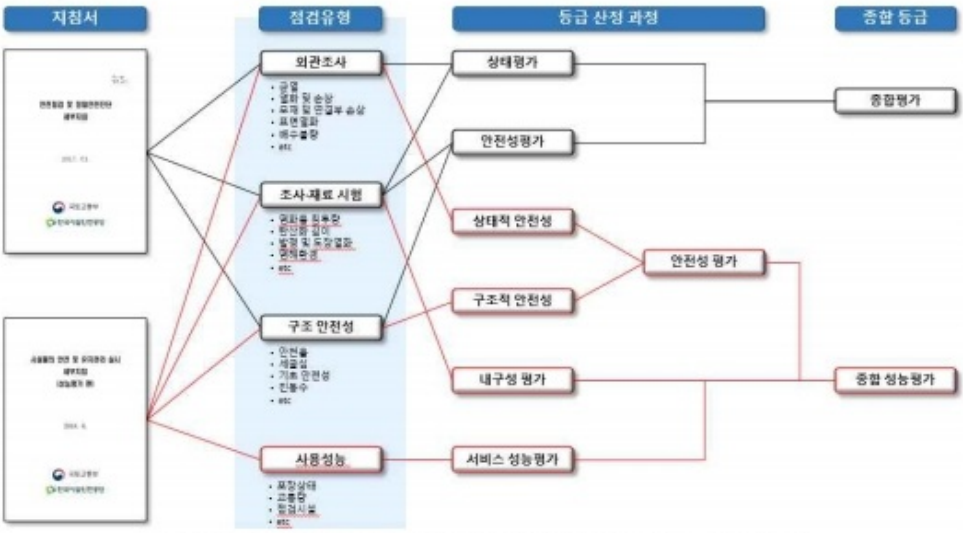
○ 앞으로 수행될 2018년 “시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침[성능평가 편]”에 따르는 유지관리 뿐만 아니라 선행된 유지관리 지침서에 따르는 이력데이터를 포괄한 데이터의 축적 및 관리를 목적으로 하기 위하여 두 지침서의 유지관리 프로세스를 <그림 3.2.5>로 분류하여 나타냄.

○ 2017 안전점검 및 정밀안전세부지침에서는 ①외관조사, ②조사·재료시험, ③구조 안전성 점검을 바탕으로 상태평가 및 안전성 평가 과정을 거쳐서 교량의 종합등급을 산정하며, 성능평가 세부지침에서는 ④사용성능 점검을 추가하여 교량의 안전성 평가, 내구성 평가, 서비스 성능 평가를 바탕으로 교량의 종합 성능을 평가함.



<그림 3.2.4> 교량 정보 모델의 표시

○ LoD 기준 및 BIL 기준은 시설물의 표현 정도에 따라 나누는 기준이며 본 과제 에서는 교량의 시설물을 Level 1 “교량의 기본정보” 부터 Level 4 교량 부재등급을 판별하는 “교량 개별 부재”까지 구성 하였으며, 이후 교량의 이력데이터를 활용할 수 있도록 교량의 등급 및 유지관리 방안 인벤토리까지 구성 하였음



<그림 3.2.5> 지침별 교량 유지관리 등급 산정 프로세스

○ 먼저 Level 1 단계에서는 현재 공용중인 교량의 번호를 BMS 도로교량 및 현황정보시스템에서 자료를 받아 각각의 고유번호로 구분하여 고유 ID로 넣게 되며 그 세부 사항으로는 교량의 위치적 요소에 따라 주교량(MB), 램프교(RP), 접속교량(RP)으로 구분함.

○ Level 2 단계에서는 Level 1에서 구분된 각각의 교량에 대해 상부구조, 하부구조 기타 등으로 구분하며 그림 <3.2.7>에 형식별 ID를 나타냄.



<그림 3.2.6> 부재 LOD 정보 모델의 표시

○ Level 3 단계에서는 상부 및 하부 구조의 세부 부재에 따라 구분하며 부재고유 ID 값은 <표 3.2.4>에 예시를 통해 나타내었다.

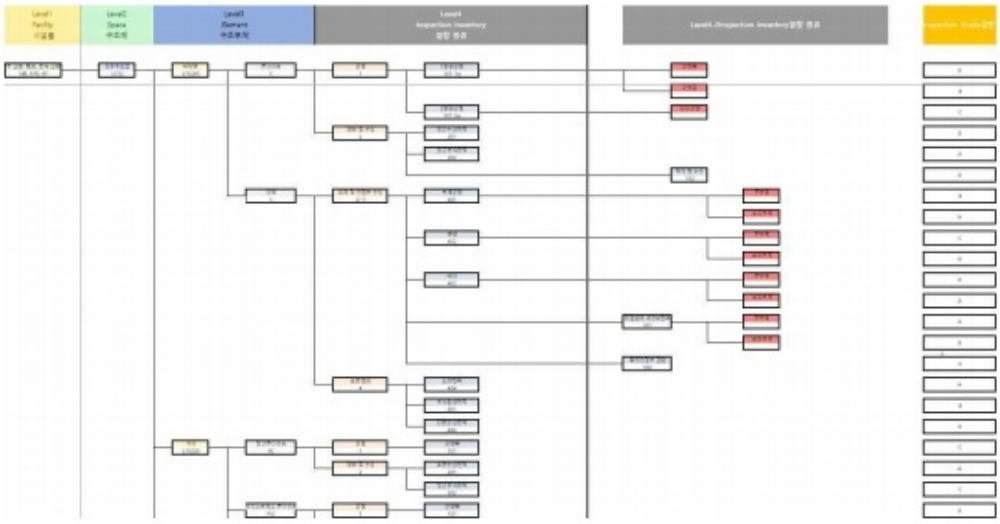
○ Level 4 단계에서는 각각의 부재에 따라 발생할 수 있는 결함을 나타내며, 점검 별 등급 산정 최소 단위에 속해진다.

상부구조형식		하부구조형식	
RC슬래브교	RCS	목조식교각	WP
RC중공슬래브교	RCH	중력식교각	GP
RCT형교	RCT	벽식교각	WLP
강 I형교	STI	구주식 교각	RP
PSC상자형교	PSCB	T형교각	TP
강판형교	SPG	라멘식 교각	RAP
RC라멘교	RA	아치식 교각	ARP
트러스교	TR	V형 교각	VP
아치교	AR	반중력식 교각	SGP
사장교	CS	중력식교대	GA
현수교	SU	반중력식교대	SGA
프리플렉스형교	PF	역T형식교대	RTA
PSCI형교	PSCI	부벽식교대	BTA
PSC슬래브교	PSCS	구주식교대	RAP
PSC중공슬래브교	PSCH	라멘식교대	RAA
RC상자형교	RCB	박스식교대	BA
강상자형교	STB		
기타형식	ETC	기타형식	ETC

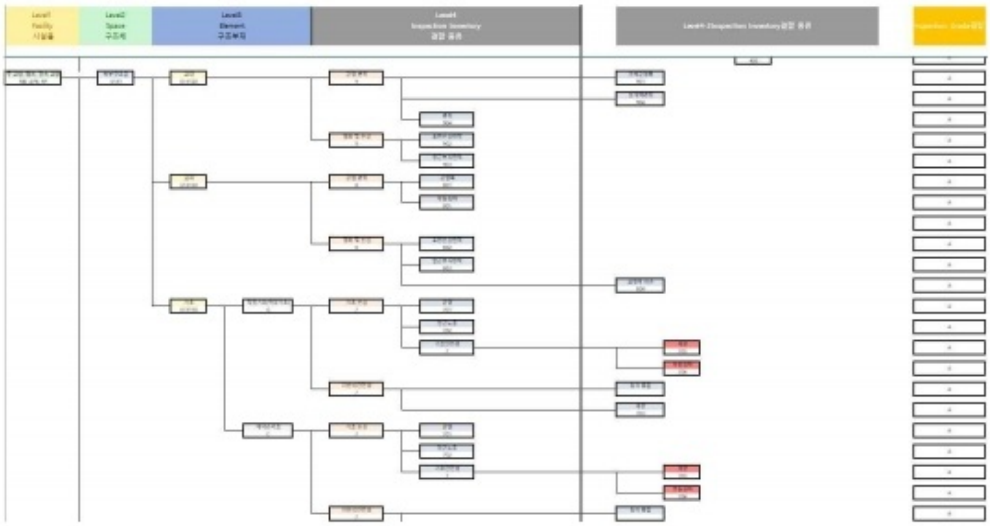
<그림 3.2.7> 상부구조&하부구조 ID

○ 교량의 Level 별 라이브러리 구축을 level 2 단계인 상부구조. 하부구조, 기타구조로 세분화

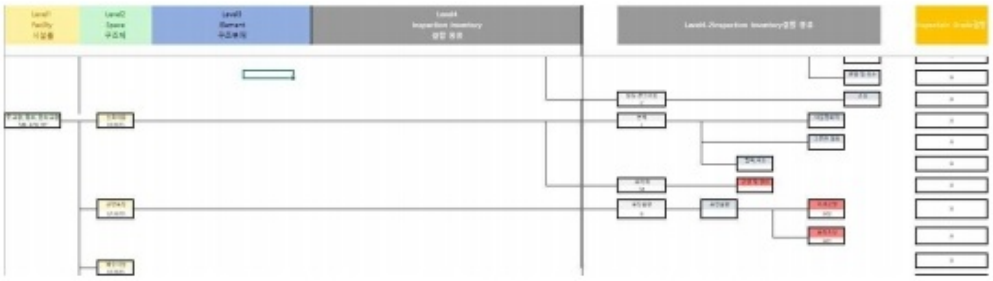
하여 <그림 3.2.8>에 표현하였다.



(a) Level 별 라이브러리 구축 예시 I (상부구조)



(b) Level 별 라이브러리 구축 예시 II (하부구조)



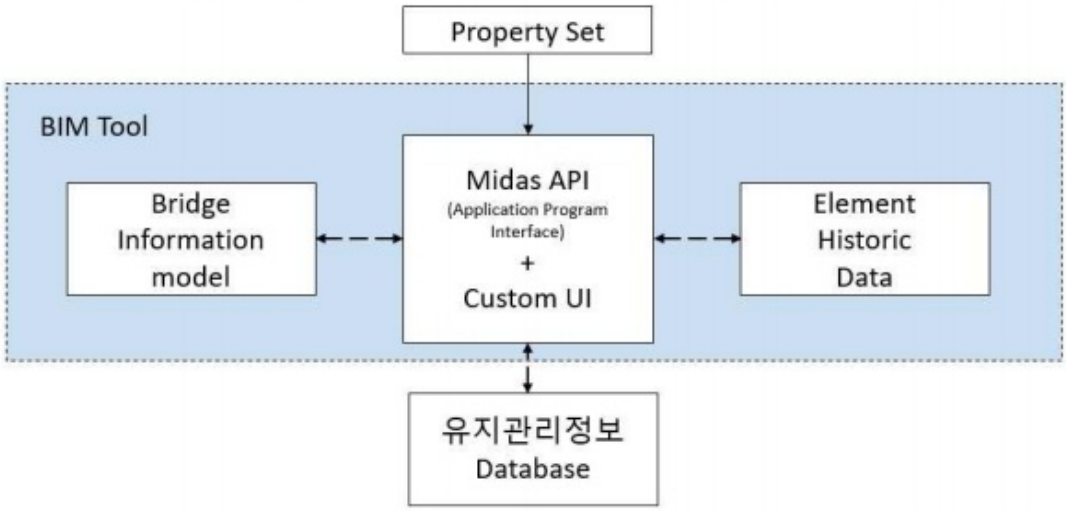
(c) Level 별 라이브러리 구축 예시 III(기타부재)

<그림 3.2.8> 부재 LOD별 정보 라이브러리의 표시

(4) LoD별 BIM 정보 적합성 평가

○ 구축된 라이브러리를 바탕으로 교량 모델 요소 식별을 통한 점검 및 진단 이력정보 표현 프로세스는 <그림 3.2.9>처럼 표현 할 수 있다. BIM Tool을 통해 생성된 교량 구성요소 식별

정보 속성(Property Set)을 교량 정보모델과 유지관리 정보 DB에 입력하면 동시에 정보 모델과 유지관리 정보들은 상호 Interface 하며 데이터 교환이 가능하다. 따라서 입력된 정보는 구성요소를 선택하고 점검 및 이력정보를 불러오면 입력한 식별정보에 의해 데이터가 연결되고 추가로 구축한 Web을 통해 이력정보를 확인 할 수 있다. 따라서 <그림 3.2.4>에 표현된 BIM 시설물의 전 생애주기 동안 모든 정보를 생산하고 관리하며 3차원 형상모델 기반을 동시에 만족한다고 볼 수 있음.



<그림 3.2.9> 교량 모델 구성요소 식별을 통한 점검 및 이력정보 프로세스 표현

<표 3.2.4> 교량 점검단위 및 부재 기호 예시

구분	부재	점검단위(기호)	부재 기호	예시
상부구조	바닥판	경간(S)	SL	S01-SL01
	거더	경간(S)	G	S01-G02
하부구조	교대	교대(A)	A	A01-A01, A02-A02
	교각	교각(P)	P	P01-P01, P02-P02
	기초	교대(A) or 교각(P)	F	A01-F01, P01-F01
받침	교량받침	교대(A) or 교각(P)	SH	A01-SH01, P01-SH02
기타부재	신축이음	교대(A) or 교각(P)	EJ	A01-EJ01, P02-EJ03
	배수시설	경간(S)	DF	S01-DF01, S03-DF02
	보호시설	경간(S)	PF	S01-PF01, S02-PF05
	교면포장	경간(S)	PV	S01-PV01, S02-PV01
2차부재	가로보	경간(S)	CB	S01-CB01, S03-CB04
	세로보	경간(S)	ST	S01-ST01, S03-ST03

- 시점 -> 종점 방향
- 좌측 -> 우측 방향

○ 그림 <3.2.10>을 통하여 세부 BIM 정보의 적합성을 기존의 AIA에서 규정한 LOD 기준 및 BIL기준 과 비교하여 나타 내었음.

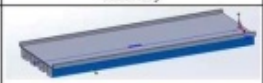
○ Level 1에서의 교량기본 정보는 BIL 10, LoD 100 단계에서의 일치하는 면적,높이,위치 등의 기본정보를 포함하며 관련하여 교량 구조물의 부속 교량(접속교, 램프교) 또한 포함 될 수 있음

○ Level 2에서의 상부 및 하부 구조체의 표현은 BIL 20 단계에서의 공간 및 구조 부재의 표현을 만족하며 LoD 200 단계에서의 일반화 형태 역시 만족함

○ Level 3 단계에서의 바닥판, 거더, 교각등의 표시는 BIL 30 단계에서의 부재의 표현 및 수량, 위치 등의 표현을 만족하며, LoD 300 단계에서의 물량정보 역시 포함하고 있음

○ Level 4 단계에서의 세부부재 표현 및 등급 판정을 위한 결함 항목의 표현은 BIL 40 단계에서의 실시설계 수준의 부재 표현 과 LoD 400 에서의 세부 부재 요소 표현을 만족시키며 나아가서 유지관리 Inventory 라이브러리를 단계화 함으로 더욱 세부적인 표현이 될 수 있음.

○ 라이브러리의 세분화는 결과적으로 객체 정보 모델의 생성 및 관리, 상호 교환을 가능하게 할수 있으며, 또한 유지관리를 목적으로 한 BIM 모델에서의 그래픽 및 객체 모델의 유지관리 정보를 담을 수 있으므로 BIL 60, LoD 500 단계를 포함한다고 볼 수 있음.

Building Information Level		라이브러리 Lod			Level of Development	
단계	표현 수준	단계	표현 수준		단계	표현 수준
BIL10	주변 지형지물 표현 면적,높이,위치 및 방향	Level 1 Facility 시설물	전체 시설물의 위치,경간,길이, 구간 표시	 Assembled Superstructure	LoD 100	면적, 높이, 위치등의 기본정보
BIL20	계획에 필요한 부재의 존재 표현 공간 및 구조부재의 표현	Level 2 Space 구조체	경간 별 구조물의 상부/하부/기타 구조체 표현 구조체별 형태,물량 정보	 Assembled Structure	LoD 200	Model요소의 일반화형태 근사수준 물량,크기,형태정보
BIL30	기본 설계수준에서 필요한 모든 부재의 표현 부재의 수량,크기,위치 표현	Level 3 Element 구조부재	점검기준 모든 부재의 표현 부재의 물량정보 표시	 Assembly	LoD 300	실제와 정확한 물량정보
BIL40	실시 설계수준 모든 부재 표현 수량 산출 및 구조부재 규격	Level 4 Inspection Inventory 결함 종류	모든 세부 부재 표현 상태등급 판정을 위한 결함항목표시	 Defect Inventory	LoD 400	접합부, 세부 부재 요소의 표현
BIL50~60	유지보수	Level 4-2 Insepction Inventory 세부 결함 종류	유지관리시 측정되는 세부결함 정보 포함 Interface model-Information	 Detail Defect	LoD 500	그래픽을 포함한 정보 등 모델 첨부 및 유지보수

<그림 3.2.10> 기존 기준 및 본 연구 Level 별 부재 표현단계 별 비교

(5) 안전진단 및 유지관리 이력 분석

○ 이력 분석 대상 교량

- 기존에 수행되었던 교량 안전진단 및 유지관리 정보를 효율적으로 관리할 수 있는 BIM을 구축하려면 정보의 유형과 목록 등을 파악하여 라이브러리를 구축할 필요가 있음
- 또한, 정보의 가공성 및 재활용성을 향상시키기 위해 각 정보간의 연계체계를 구축하여야 하기 때문에 기존에 포함되어 있지 않은 정보를 파악할 필요가 있음
- 효율적인 이력 관리 프로그램을 구축하기 위하여 STB형 교량 13개소, PSCI형 교량 9개소, RCB형 교량 2개소에 대해 2017년도에 수행된 정밀점검 보고서를 분석하였음
- 분석 대상 교량에 대한 현황은 다음과 같음

<표 3.2.5> 이력 분석 대상 교량 현황

상부형식	순번	이정(km)	연장(m)	준공년도	안전등급	비고
STB	1	246.94	200	2001	B	2종
STB	2	281.57	150	2001	B	2종
STB	3	251.02	100	2002	B	2종
STB	4	247.47	140	2002	A	2종
STB	5	247.47	140	2002	A	2종
STB	6	233.78	55	2002	B	2종
STB	7	224.61	285	2002	B	2종
STB	8	224.61	285	2002	B	2종
STB	9	57.79	50	2008	B	2종
STB	10	57.79	50	2008	B	2종
STB	11	42.16	199.8	2008	B	2종
STB	12	42.16	199.8	2008	B	2종
STB	13	55.8	50	2009	B	2종
PSCI	1	285.12	451.1	1995	B	2종
PSCI	2	284.5	420	2000	B	2종
PSCI	3	285.12	450	2000	B	2종
PSCI	4	290.71	420.3	2000	B	2종
PSCI	5	215.55	421.8	2004	A	2종
PSCI	6	215.58	390	2004	A	2종
PSCI	7	214.81	360	2004	A	2종
PSCI	8	36.4	280.4	2014	A	2종
PSCI	9	36.4	280.4	2014	A	2종

○ 안전진단 보고서 구성체계

- 안전진단 수행시 도출되는 정보들을 파악하기 위해서 보고서를 분석하였고, 보고서의 구성체계와 BIM 라이브러리를 구축할시 일반적으로 지침서에 포함되어 있는 내용과 예시 등을 제외한 활용할 수 있는 정보들을 선정하여 <표 3.2.5>에 나타냄
- 보고서에 포함되어 있는 구성 및 정보 자체는 교량 형식에 따라 상이하지 않음

<표 3.2.6> 안전진단 보고서 구성체계 및 BIM구축시 필요한 정보

목차	세부목차	BIM 라이브러리
제 1 장 정밀점검 개요	1.1 과업의 목적	▪ 진단 대상교량에 대한 현황표 ▪ 안전진단에 사용된 사용장비 및 시험기기 현황
	1.2 과업의 범위 및 내용	
	1.3 과업수행 일정	
	1.7 대상교량의 현황	
	1.5 사용장비 및 시험기기 현황	
	1.6 교량기호의 정의	
2. 자료 수집 및 분석	2.1 자료수집 개요	▪ 기존 점검 및 진단 실시결과 ▪ 보수·보강이력
	2.2 관련도면	
	2.3 기존 점검 및 진단 실시결과	
	2.4 보수·보강 이력	
	2.5 시설물의 내진설계 여부 확인	
	2.6 사고이력	
	2.7 자료분석 결과	
3. 현장조사 및 시험	3.1 개요	▪ 외관조사 결과 ▪ 조사·재료시험 결과
	3.2 외관조사 결과	
	3.3 시험 및 측정	
4. 시설물의 상태평가	4.1 상태평가 기준	▪ 상태평가 결과
	4.2 상태평가 방법	
	4.3 상태평가 결과	
5. 시설물의 종합평가 및 안전등급 지정	5.1 개요	▪ 종합평가 및 안전등급 지정 결과
	5.2 종합평가 및 안전등급 지정결과	
6. 보수·보강 및 유지관리 방안	6.1 개요	▪ 보수·보강 개략 공사비
	6.2 부재별 결함에 따른 보수·보강 방법	
	6.3 보수·보강 공법	
	6.4 보수·보강 개략공사비	
	6.5 유지관리 방안	
7. 종합결론	7.1 종합결론	▪ 안전진단 결과 요약
	7.2 정밀안전진단 및 사용제한 여부	
	7.3 특별 관리 사항	
8. 부록	8.1 외관조사망도	▪ 보고서에 포함되거나 포함되지 않은 상세 자료
	8.2 측정·시험 성과표	
	8.3 상태평가 결과 자료	
	8.4 시설물관리대장 사본	
	8.5 현황조사 및 외관조사 사진첩	
	8.6 사용장비 및 기기의 사진	
	8.7 사전조사 자료 일체	

○ 대상교량 현황표, 사용장비 및 시험기기 현황

- 시설안전공단에서는 안전진단 보고서에 <그림 3.2.11>과 같이 대상교량에 대한 현황표를 제출하도록 제안하고 있음
- 현황표에는 교량명, 위치, 설계하중, 종별, 상부구조-형식, 상부구조-교폭, 상부구조-연장, 하부구조-교대-본체, 하부구조-교대,기초, 하부구조-교각-본체, 하부구조-교각-기초, 방호울타리/중분대, 신축이음, 교량받침, 교차시설(도로,철도,하천), 시공자, 설계자, 관리주체, 준공년도에 대한 정보가 포함됨
- 위와 같은 정보는 교량의 잔존수명과 가치를 평가하거나 대상교량의 기본사항을 파악하는데 활용될 수 있으므로 BIM 구축시 라이브러리에 포함되야 한다고 판단됨
- 사용장비 및 시험기기는 조사·재료시험에 사용된 것을 제외하고는 모두 일반적으로 사용되는 보호구 같은 장비이기 때문에 조사·재료시험에 대한 상세정보에 포함되는 것이 적절하다고 판단됨

구분			내용
교량명			
위 치			
설계하중			DB-24/DL-24
종 별			2종
상부구조	형 식		강상형거더교 (I-TB)
	교 폭		B= 8.50m(1차로)
	연 장		L=100m (30+40+30=100m)
하부구조	교 대	본 체	역T형식
		기 초	강관말뚝기초
	교 각	본 체	T형식
		기 초	직접기초(확대)
방호울타리/중분대			콘크리트 방호울타리
신축이음			레일조인트 (A1, A2)
교량받침			포트받침
교차시설(도로,철도,하천)			하음천하로
시 공 자			
설 계 자			
관리주체			
준공년도			2002. 12. 20.

<그림 3.2.11> 대상교량 현황표 예시

장비명		규격	용도	활용방법	사진	비고
균열측정기	PGM-00	PIKA	균열폭 측정	균열폭의 크기와 길이를 확대렌즈를 통해 육안으로 확인		
고해상망원경	망원경	SONY DEV-50V	외관조사 보조기구	원거리에서 근접 육안조사용(사진, 동영상) 판독가능		
반발경도측정기	Schmidt hammer	NR식	콘크리트 강도측정	약 2cm 간격에 20회 경도 타격하여 그 값의 평균치를 구함		
탄산화 시험기		Coniot	콘크리트 내부 탄산화 체크	페놀프탈레인 용액 1%를 분사 후 대비되는 색깔로 탄산화 깊이 측정		
해머드릴		GBH26V-LI	드릴링	탄산화 시험 코어 채취를 시험 시료채취		
안전 경광등		파워 HB0112665.K	교통신호	시설물 점검 및 진단 시 사방통제		
통풍 안전모		파워 HB0116556.K	통풍	안전점검시 작업환경 개선(통풍수칭)		
기타		줄자, 스타프, 안전장구, 작업용사다리, 점검망치, 무전기, 개인 안전장비(안전모, 안전화, 안전부 등), 손전등, 서치라이트, 헤드랜턴, 크레인(스카이), 사다리, 카메라, 점검망치, 형광조사 교통 통제(라바콘, 공사안내표지판, 깃발, 신호봉 등)			

<그림 3.2.12> 사용장비 및 시험기기 현황 예시

○ 기존점검 및 보수·보강 이력

구분	점검기간	점검기종	점검자	안전등급	주요 점검결과	보수보강(안)	비고
정기점검	2016-12-31 ~ 2016-12-31	자체수행		양호	-바닥판:균열, 들뜸 -하부구조:박리, 박락, 백태 -난간/중분대:균열, 백태 -배수시설:배수구 막힘	-주입보수, 단면보수 -표면보수 -주입보수, 표면처리 -배수구청소	
	2016-05-10 ~ 2016-05-10	자체수행		양호	-바닥판:균열부백태,균열 -하부구조:백태	-단면보수,주입보수 -표면처리	
	2015-12-11 ~ 2015-12-11	자체수행		양호	-바닥판:멀화, 균열 -교량받침 : 녹교량지지심 부식, 박락 -하부구조:멀화 -신축이음:누수	-단면보수, 주입보수 -녹제거 및 재도장, 단면보수 -단면보수 -누수방지시설 설치	
	2014-08-14 ~ 2014-08-14	자체수행		양호	-바닥판:균열, 멀화	-균열보수, 단면보수	
	2014-04-22 ~ 2014-04-22	자체수행		양호	-바닥판:균열, 멀화 -하부구조:멀화	-균열보수, 단면보수 -단면보수	
	2013-04-04 ~ 2013-04-04	자체수행		양호	-바닥판 멀화 및 균열, 우레콘크리트 깨짐	바닥판 멀화 및 균열, 우레콘크리트 깨짐 보수	
	2012-09-06 ~ 2012-09-06	자체수행		보통	-바닥판하부 균열 및 백태, 신축이음부 하부 누수	-균열보수, 표면처리, 누수보수	
	2012-06-04 ~ 2012-06-04	자체수행		양호	-신축이음부 누수	-신축이음장치 보수	
	2011-09-04 ~ 2011-11-30	자체수행		양호	-양호	-없음	
	2011-03-02 ~ 2011-05-30	자체수행		양호	-양호	-없음	
	2010-09-01 ~ 2010-09-01	자체수행		양호	-양호	-없음	
	2009-05-11 ~ 2009-05-11	자체수행		양호	-양호	-없음	
	2008-05-14 ~ 2008-05-14	자체수행		양호	-A1 슈 및 슬플레이트 녹발생	-녹제거후 재도장	
	2007-11-19 ~ 2007-11-19	자체수행		양호	-양호	-없음	
	2007-06-11 ~ 2007-06-11	자체수행		양호	-양호	-없음	

<그림 3.2.13> 기존점검 이력 예시

번호	공사기간	보수위치	공사내역	공사비(원)	비고
1	2008.10.10.	교량받침	도장	40.000	
2	2010.06.17.	교량받침	도장	200.000	
3	2013.01.04.	신축이음장치	우레탄보수	160.747	
4	2014.01.02.	교대, 교각	세척	55.000	

<그림 3.2.14> 보수·보강 이력 예시

- 기존에는 안전진단을 매회 다른 기관에서 수행하기 때문에, 진단과업 수행 이전에 점검과 보수·보강에 대한 이력을 조사하여 검토해야함
- 본 과제에서 안전진단 정보 이력을 한 프로그램에서 관리할 수 있는 BIM이 구축될시 이와 같은 작업을 최소화할 수 있음

○ 외관조사 결과

- 외관조사에 의해 보고서에 포함되는 결과 정보들은 <그림 3.2.15>와 같음
- 손상유형, 손상사진, 물량 및 단위, 개소, 원인, 대책 등이 포함됨
- BIM 구축시 각 개별 부재에 대한 외관조사 결과가 입력되기 때문에 개소 정보는 제외하였고, 정보입력에 대한 작업량을 감소시키기 위해 원인 및 대책 정보는 점검자 의견으로 대체하였음
- 최종적으로 본 과제에서는 외관조사에 대한 상세정보를 손상사진, 손상유형, 손상물량, 손상등급, 점검자 의견으로 구성함

구 분		단위	개소	물량	비고
바닥판 하면	박락	㎡	3	1.27	
	균열 및 백태	㎡	1	0.10	
	파손	㎡	1	0.06	

S1 바닥판하면 박락		S2 바닥판하면 박락	
			
현황	• 박락	현황	• 박락
원인	• 신축이음부 누수	원인	• 신축이음부 누수
대책	• 단면보수(방청)	대책	• 단면보수(방청)

<그림 3.2.15> 외관조사 결과 예시

○ 조사·재료시험 결과

- 반발경도시험과 탄산화깊이측정에 대한 결과 예시를 <그림 3.2.16>과 <그림 3.2.17>에 나타내었음
- 조사·재료시험 결과에 포함되어 있는 정보는 조사 및 시험 종류에 따라 상이함
- 발발경도시험의 경우 측정위치, 반발경도, 압축강도, 제령계수, 평균값, 강도비(%), 설계기준강도로 구성되며 탄산화깊이측정의 경우 측정위치, 탄산화깊이, 실측 피복두께, 탄산화 잔여깊이, 평가결과, 탄산화속도계수, 잔존수명으로 구성됨
- 조사 및 시험에 대한 항목이 추가될 때마다 상세정보 목록을 수정해야하는 것은 비효율적이기 때문에 일관적인 상세정보 목록을 결정할 필요가 있음
- 시설안전공단에서 개정한 지침서의 등급기준에 적용할 정보를 제외하면 해당 정보를 도출하지 위한 기초자료들이기 때문에 본 과제의 이력관리 프로그램에서는 제외하고자 함
- 또한 각 조사 및 시험에 사용된 <그림 3.2.12>의 사용장비에 대한 정보를 포함시킴
- 최종적으로 본 과제에서는 조사·재료시험에 대한 상세정보를 시험사진, 시험항목, 측정 장비, 시험값, 시험등급, 점검자 의견으로 구성함

측정위치		반발경도 (Ro)	압축강도(MPa)		계정계수 (α)	평균값	강도비(%)	설계기준강도(MPa)
			일본재료학회	일본건축학회				
상부구조	S1경間피버(좌)	49.5	25.7	27.6	0.63	26.6	98.5	27.0
	S2경間피버(우)	50.8	26.4	28.0	0.63	27.2	100.7	
	S3경間피버(좌)	49.9	26.0	27.8	0.63	26.9	99.6	
하부구조	A1구체	47.2	26.4	28.0	0.63	27.2	113.3	24.0
	P1	47.6	26.7	28.2	0.63	27.5	114.6	
	A2구체	46.2	25.7	27.6	0.63	26.6	110.8	



콘크리트 강도조사(반발경도시험) 전경 | 콘크리트 강도조사(반발경도시험) 전경

<그림 3.2.16> 반발경도시험 결과 예시

측정위치		탄산화깊이 (mm)	실측피복두께 (mm)	탄산화잔여깊이 (mm)	평가결과	탄산화속도계수 (A)	잔존수명 (년)
상부구조	S1경間피버(좌)	2.0	52	50.0	a	0.516	100년 이상
	S2경間피버(우)	4.0	47	43.0	a	1.033	100년 이상
	S3경間피버(좌)	4.5	45	40.5	a	1.162	100년 이상
하부구조	A1구체	2.0	98	96.0	a	0.516	100년 이상
	P1	2.5	94	91.5	a	0.645	100년 이상
	A2구체	2.5	95	92.5	a	0.645	100년 이상



탄산화깊이측정 전경 | 탄산화깊이측정 전경

<그림 3.2.17> 탄산화깊이측정 결과 예시

○ 보수·보강 개략 공사비

- 안전진단 보고서에는 실제 수행된 보수·보강에 대한 정보는 포함되어 있지 않으며, <그림 3.2.18>과 같이 금회 발견된 손상에 대한 보수·보강방안 및 개략 공사비만 포함되어 있음
- 본 과제의 이력 관리 프로그램에서는 완료된 보수·보강 이력에 대한 정보를 포함할 수 있도록 구축하고자 하며 <그림 3.2.14>와 <그림 3.2.18>의 상세정보를 활용함
- 최종적으로 보수·보강방안, 손상물량, 보수물량, 보수단가, 보수비용, 점검자 의견으로 구성함

부재	점검결과	보수·보강 방안	단위	손상물량	보수물량	단가(천원)	공사비(천원)	추천순위	비고
교대	균열(0.3mm미만)	표면처리	㎡	0.50	0.15	54	41	3	
	균열(0.3mm이상)	주입보수	m	0.50	0.75	82	62	2	
	박리	단면보수	㎡	1.20	1.80	210	378	3	
	백태	표면처리	㎡	5.25	7.88	54	471	3	
	백태 및 누수흔적	표면처리	㎡	6.00	9.00	54	486	3	
	누수흔적	표면처리	㎡	0.65	0.98	54	53	3	
	누수	주의관찰	㎡	2.50	3.75	-	-	4	
	재수	주의관찰	㎡	7.50	11.25	-	-	4	
교각	균열(0.3mm미만)	표면처리	㎡	1.50	0.45	54	24	3	
	균열(0.3mm이상)	주입보수	m	0.80	1.20	82	98	2	
	박리	단면보수	㎡	0.01	0.02	210	3	3	
	백태	표면처리	㎡	2.00	3.00	54	162	3	
교량받침	탈청부식	재도장	㎡	5.00	7.50	16	120	3	
	도장박리	재도장	㎡	0.36	0.54	16	9	3	
	재료분리	단면보수	㎡	0.28	0.35	210	72	3	
	낙교방지장치부식	주의관찰	EA	2.00	3.00	-	-	4	
신축이음	균열(0.3mm미만)	표면처리	㎡	12.00	3.60	54	972	3	
	부식	재도장	㎡	3.40	5.10	28	143	3	
	밀개판 깊이부족	주의관찰	EA	4.00	6.00	-	-	4	
배수시설	막힘	청소	EA	5.00	7.50	10	75	4	
순공사비 합계(천원)							6,651		
제경비(50%)							3,326		
총공사비							9,977		

<그림 3.2.18> 보수·보강 개략 공사비 예시

○ 교량 형식별 차이점 분석

- 안전진단 보고서 분석 결과 교량 형식별로 구성체계나 정보 목록에 대한 차이점은 발견할 수 없었음
- 교량 형식별로 부재에 대한 재료가 상이하기 때문에 재료에 따른 결함종류와 보수·보강방안에 대한 차이점이 존재함. 따라서 본 과제의 이력 관리 프로그램에서는 모든 재료에 대한 결함종류 및 보수·보강방안에 대한 라이브러리를 구축하였음

부재	결함종류	단위	보수·보강 방안	손상물량		우선순위
				개소	물량	
방호벽	균열(0.3mm미만)	m	표면처리	10	51.80	3
	망상균열	㎡	표면처리	3	5.70	3
	철근노출	㎡	단면보수(망정)	2	3.00	2
	백태균열	㎡	표면처리	5	1.30	3
바닥판 하면	박락	㎡	단면보수(망정)	3	1.27	2
	균열 및 백태	㎡	표면처리	1	0.10	3
	파손	㎡	단면보수	1	0.06	3
거더부	볼트부식	EA	재도장	25	25.00	3
거더부	부식	㎡	재도장	3	1.75	3
교대	균열(0.3mm미만)	m	표면처리	2	0.50	3
	균열(0.3mm이상)	m	주입보수	1	0.50	2
	박리	㎡	단면보수	2	1.20	3
	백태	㎡	표면처리	4	5.25	3
	백태 및 누수흔적	㎡	표면처리	1	6.00	3
	누수흔적	㎡	표면처리	2	0.65	3
	누수	㎡	주의관찰	1	2.50	4
	재수	㎡	주의관찰	3	7.50	4
교각	균열(0.3mm미만)	m	표면처리	3	1.50	3
	균열(0.3mm이상)	m	주입보수	2	0.80	2
	파손	㎡	단면보수	1	0.01	3
	백태	㎡	표면처리	1	2.00	3
교량받침	받침부식	㎡	재도장	5	4.09	3
	녹장박리	㎡	재도장	4	0.36	3
	재료분리	㎡	단면보수	2	0.23	3
	낙교방지장치부식	EA	주의관찰	2	2.00	4
신축이음	균열(0.3mm미만)	m	표면처리	36	12.00	3
	부식	㎡	재도장	2	3.40	3
	덮개판 갈이부족	EA	주의관찰	4	4.00	4
배수시설	막힘	EA	청소	5	5.00	4

(a) STB-3 교량

부재	결함종류	단위	보수·보강 방안	손상물량		우선순위
				개소	물량	
교변포장	포장부 망상균열	㎡	주의관찰	1	30.00	4
	포장부 파손	㎡	주의관찰	1	0.09	4
방호벽 및 중분대	균열(0.3mm미만)		표면처리	2	2.00	3
	파손		단면보수	3	0.06	3
바닥판 하면	철근노출	㎡	단면보수(망정)	1	0.06	2
	철근노출 및 재료분리	㎡	단면보수(망정)	2	0.64	2
거더	박리 및 들뜸	㎡	단면보수	1	0.04	3
	백태	㎡	표면처리	56	29.43	3
	재료분리	㎡	단면보수	1	0.02	3
가로보	백태	㎡	표면처리	2	1.86	3
	재료분리	㎡	단면보수	1	0.17	3
교대	균열(폭 0.3mm미만)	m	표면처리	25	26.00	3
	망상균열	㎡	표면처리	1	0.50	3
	토사퇴적	EA	청소	1	1	3
교각	균열(폭 0.3mm미만)	m	표면처리	43	142.30	3
	균열(폭 0.3mm이상)	m	주입보수	3	5.00	2
	망상균열	㎡	표면처리	26	231.00	3
	파손	㎡	단면보수	3	0.11	3
교량받침	받침몰탈 균열	m	표면처리	33	3.30	3
	볼트체결 불량	EA	볼트체결	2	2	3
신축이음	본체부식	m	도장보수	5	15.00	3
	이물질 퇴적	㎡	청소	3	0.30	3
	우타재 균열	m	우타재보수	1	0.50	2

(b) PSCI-8 교량

<그림 3.2.19> 교량형식별 외관조사 및 보수·보강방안

○ BIM 라이브러리 점검유형별 속성정보

- 교량 기본정보에 대한 라이브러리 항목은 [3장.2절.1.라 교량 통합 유지관리 정보체계 구축]에서 구축함
- 각 점검유형별 BIM 라이브러리에서 포함해야할 정보들을 보고서를 분석하여 도출하였고 <표 3.2.7>에 나타냄

<표 3.2.7> BIM 라이브러리 점검유형별 상세정보

정보 유형	안전진단 보고서	BIM 이력 관리 프로그램
외관조사 속성정보	▪ 손상사진 ▪ 손상유형 ▪ 물량 ▪ 단위 ▪ 개소	▪ 손상사진 ▪ 손상유형 ▪ 손상물량 ▪ 손상등급 ▪ 점검자의견

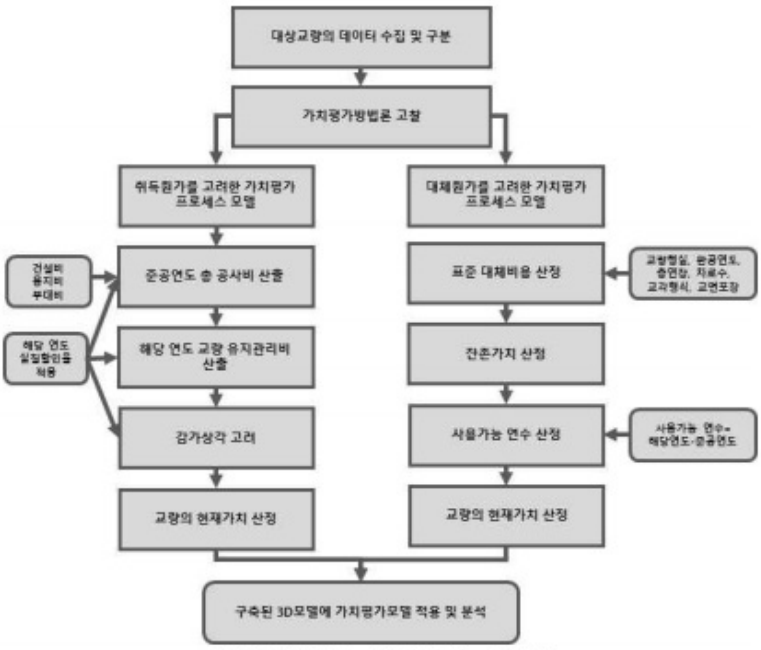
<table>
<tr><td></td><td>▪ 원인
▪ 대책</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">조사·재료시험 속성정보</td><td>반발경도시험
▪ 시험사진
▪ 반발경도
▪ 압축강도
▪ 제령계수
▪ 평균값
▪ 강도비(%)
▪ 설계기준강도
탄산화깊이측정
▪ 시험사진
▪ 탄산화깊이
▪ 실측 피복두께
▪ 탄산화 잔여깊이
▪ 평가결과
▪ 탄산화속도계수
▪ 잔존수명</td><td>▪ 시험사진
▪ 시험항목
▪ 측정장비
▪ 시험값
▪ 시험등급
▪ 점검자의견</td></tr>
<tr><td>보수·보강 속성정보</td><td>▪ 공사기간
▪ 보수위치
▪ 공사내역
▪ 공사비
▪ 단위
▪ 손상물량
▪ 보수물량
▪ 단가
▪ 공사비
▪ 우선순위</td><td>▪ 보수/보강
▪ 손상물량
▪ 보수물량
▪ 보수단가
▪ 보수비용
▪ 점검자의견
▪</td></tr>
</table>

나. 교량 구조물의 가치평가 시스템

(1) 가치평가 개요

○ 구조물에 대한 가치평가는 대상 자산의 유형, 준공시기, 감가상각 등에 따른 방법들의 차이가 있을 뿐만 아니라 평가방법에 따른 요구데이터 역시 다양함

○ 산출된 결과값에도 큰 차이가 있기 때문에 각 방법에 의한 결과 값은 공통적인 근거가 필요하며, 또한 자산가치 평가방법에 대한 명확한 기준이 필요함. 이에 기본적인 가치평가 흐름도를 <그림 3.2.20>에 나타냄



<그림 3.2.20> 가치평가 흐름도

○ 건설당시에 투입된 원가(매입대가에 부대비용, 요지비 등 소요되는 모든 비용 포함)의 현재가치를 나타낼 수 있는 화폐시간가치측정을 기반으로 초기 총공사비를 통해 산출되는 취득원가(역사적 원가)는 건설원가 혹은 총사업비로 준공 당시의 금액을 말하며 지정된 이율에 대해 과거의 건설원가를 현재의 가치로 나타내는 것임

○ 그러나 건설원가를 기초로 산출된 가치는 시간의 흐름에 따른 자산의 실질적인 가치평가가 어려우며, 이에 대체원가 기반의 가치평가 또한 고려되고 있음

○ 대체원가는 현재 완공되어 있는 대상 구조물의 기능을 유지한 동일한 조건의 구조물을 건설하는 비용으로 정의되며 구조물공사에 이르는 전 과정에 투입된 비용을 의미함. 현재시점에서의 산출된 소요비과 유지관리비 통한 해당 자산 수명의 증가와 사용 빈도에 의해 발생한 수명감소 등의 외적요인을 고려할 수 있음

○ 따라서 가치평가는 공학적·회계학적 방법을 활용하여 구조물에 자산가치를 부여하는 과정이라고 할 수 있으며, 교량의 가치는 교량 유지관리 의사결정의 도구로써 활용될 수 있음

(가) 취득원가

○ 취득원가 가치평가 방법은 화폐 시간가치 측정법을 사용하여 시간적 가치를 지정된 이율에 따라 과거의 총공사비를 현재의 가치로 나타내는 것임. 따라서 준공 당시 공사비와 유지보수·보강 관리비, 기타 비용을 평가하려는 해당 연도의 실질할인율을 적용하여 현재의 화폐가치로 산출이 가능함

○ 그러나 기술 변화에 따른 가치의 다양화, 시설물의 초기결함으로 인해 지속적인 유지보수·보강이 수행된 과도한 유지보수보강관리비 내역으로 성능 대비 고가치 시설물로 평가되는 단점도 있음.

○ 이러한 취득원가 개념을 사용하는 다양한 가치평가 방법에 대해서 <표 3.2.8>에 나타냄

<표 3.2.8> 취득원가 기준 자산가치평가 방법

기본단가	자산가치평가 방법	방법	감가상각 반영
취득원가	취득원가	역사적 원가,자산 초기건설비용	x
	취득원가로부터의 가치	과거 기록되어진 공공시설물 건설비용에서 추산한 가치(투입된 성능개선비용 모두 자본화)	x
	상응현재가치	인플레이션, 감가상각, 사용연한에 따른 조정된 취득원가	o
	GASB34	정액법을 사용하여 취득원가를 감가상각하여 자산가치를 평가	o
	수정된 GASB34	시설물의 상태가 유지된다는 가정하에, 감가상각을 하지않고 유지/보전/개선비용 자본화	x
	장부가격	회계장부 상에서 감가상각을 고려한 가치. 감가상각을 고려한 조정된 취득원가를 나타내는 방법	o
	갱신회계방법	수정된 GASB34와 동인한 전제조건, 별도의 감가상각비용 산출방법	o

(나) 대체원가

○ 대체원가는 현재시점에서 동일한 조건의 시설물을 재건설하는 비용으로 정의되며 계획 및 설계비용, 토공 및 구조물공사에 이르는 전과정에 투입된 비용을 말함

○ 유지관리를 통한 해당 시설물의 가용수명의 증가와 사용에 의한 가용수명 감소를 반영한 감가상각비를 통해 현재 자산가치를 산출할 수 있음

○ 이러한 대체원가 개념을 사용하는 다양한 가치평가 방법에 대해서 <표 3.2.9>에 나타냄

<표 3.2.9> 대체원가 기준 자산가치평가 방법

기본단가	자산가치평가 방법	방법	감가상각반영
대체원가	대체원가(RC)	과거의 자산을 현재의 시점에서 재건설하는 비용	x
	Deflated RC	현재시점에서의 대체원가(RC)를 준공시점으로 Deflated하여 현재가치를 산정	x
	감가대체원가방법	자산의 가치를 현행 대체원가를 이용하여 감가상각하는	o

	(DRC)	방법	
	상각후대체원가(WDRC)	시간에 따른 노후를 고려하여 자산을 현재의 상태로 대체하기 위한 비용	x
	순 공제 금액	자산의 대체원가 및 건설당시의 자산 상태로 되돌리기 위한 투입비를 고려하는 방법	x

(다) 가치평가 주요인자

○ 기본적인 가치평가 방법에 필요한 주요인자를 <표 3.2.10>에 요약하여 나타냄

<표 3.2.10> 가치평가 방법별 주요인자

가치평가 방법	준공 연도	세부 내역	건설평균 단가	유지보수 내역	초기건설 비용	가용 수명	실질할인 율	감가 상각
취득 원가	o			o	o	o	o	o
대체 원가	o	o	o				o	o

(2) 교량 가치 산정 방법

(가) 현재 총 공사비

○ 취득원가

$$C_p = C \times (1+i)^{(VY-CY)} \qquad \text{(식 3.2.1)}$$

여기서 , C = 총 공사비(won)
C_p = 현재 총 공바시(won)
i = 실질 할인율(%)
VY = 평가연도(Yr)
CY = 준공연도(Yr)

- 시설물정보종합관리시스템(FMS), 도로관리시스템(HMS), 교량관리시스템(BMS) 등을 통해 관리중인 구조물의 경우 데이터를 통해 교량의 초기공사비가 산출이 가능하나 대부분의 구조물의 경우 데이터가 부족하며 준공당시 수량산출서, 단가산출서, 준공내역서 등을 통한 초기 공사비 산출이 가능함
- 총공사비(C)는 건설당시의 건설비뿐만 아니라 용지비 및 부대비를 합산한 비용임
- 실질할인율(i)는 과거시점의 비용이 갖는 미래의 수익 또는 지출비용에 대하여 동등한 시간가치를 나타내는 계수이며, 시간경과에 따른 물가변동효과를 고려하며 인플레이션 효과를 고려하지 않고 모든 비용을 현재가치로 추정이 가능함
- 국내 교량시설물관련 실질할인율은 현재 정립되지 않은 상태이며 아래 '경제통계연보(2010)' <표 3.2.11>와 '실질할인율 생애주기비용 분석 및 평가요령(2008)' <표 3.2.12> 에서 참조 가능함

<표 3.2.11> 주요경제지표

년도	은행금리	인플레이션	실질	년도	은행금리	인플레이션	실질 할인율

	(대출금리) (%)	율 (%)	할인율 (%)		(대출금리) (%)	율 (%)	(%)
1996	11.21	4.92	6.00	2003	6.34	3.51	2.64
1997	11.83	4.44	7.08	2004	5.90	3.59	2.23
1998	15.18	7.51	7.13	2005	5.59	2.75	2.76
1999	9.4	0.81	8.52	2006	5.99	2.20	3.71
2000	8.55	2.26	6.15	2007	6.55	2.50	3.95
2001	7.70	4.07	3.47	2008	7.17	4.7	2.36
2002	6.70	2.76	3.83	2009	5.65	2.8	2.77
평균	8.12	3.48	4.47	변동계수	0.32	0.47	0.45

<표 3.2.12> 시설물별 실질할인율

구분	도공('01) 교량, 포장	도공('02) 교량	수공('04) 댐	수공('06) 수처리구조물	KDI (민자사업)
할인율 종류	한국은행 자료(은행이자율, 소비자물가지수)에 기초한 실질할인율				임의 산출한 실질할인율
할인율 수치	4.54%	4.5%	6%	4.5%	6%

○ 대체원가

$$C_p = SSC \times FL \qquad \text{(식 3.2.2)}$$

여기서 , C_p = 현재 총 공사비(won)
SSC = 건설 평균단가(won/m^2)
FL = 교량면적(m^2)

- 교량의 대체원가는 자산가치평가 대상 교량이 현재시점에서 재시공되는 것으로 가정하여 소요되는 건설원가를 의미함. 대상 교량과 동일한 기능을 가지는 교량을 시공하기 위한 공사비 적산이 필요함으로 많은 시간과 노력이 필요한 현실을 반영하여 아래 '도로업무편람(한국도로공사 2016)' <표 3.2.13>를 이용해 대체비용을 산정 방법을 대체할 수 있음

<표 3.2.13> 교량 건설 평균단가

구분		평균단가					
교량 (고속국도 4차로 기준)	교량 형식	Rahmen 계열	PSC거더 계열			Preflex 계열	강합성 계열
			일반형 ($s \leq 35m$)	개량·보강형 ($35m < s \leq 50m$)	분절형 ($s > 50m$)		
	m^2 당	3,269	1,795	1,631	1,993	2,074	2,570
터널 (2차로,NATM공법)		12,746/m당					

(나) 유지관리비

○ 자산가치를 평가하고자 하는 교량의 유지관리비용 산출에 있어 유지관리 내역이 존재할 시 이를 활용하였으나 내역이 존재하지 않을 시 가치평가에 적용하기 힘든 실정임. 유지관리 내역이 없을시는 '시설물 유형별 성능중심 평가 매뉴얼(한국건설기술연구원 2017)' <표 3.2.14> 또는 '사회기반시설 유지관리 제도화 연구용역 최종보고서(국토교통부 2015)'<표 3.2.15>을 통해 참조 가능함

○ 교량의 가치를 평가할시 유지관리비는 상시 유지관리 비용, 자산의 상태를 유지하기 위한 보전비용, 자산의 기능을 현저히 향상시키는 개선비용으로 구분됨. 일상 유지관리 비용은 비용화하고 개선비용은 자산화하나, 보전비용은 취득원가 기반은 다양한 가치평가 방법에 따라 비용화하거나 자산화 함

○ 최종적으로 유지관리비는 다음과 같이 산정할 수 있음

$$\text{유지관리비}(D_k) = \text{일상유지관리비용} \pm \text{보전비용} - \text{개선비용} \qquad \text{(식 3.2.3)}$$

<표 3.2.14> 시설물 유지보수공법별 평균단가

성능평가 항목	주요 조치 공법	평균단가(Won/m^2)			근거
안전성	균열보수	58,000			손상종류별 추정회귀식 (진단보고서)
	단면보수	196,000			
기능성	일상유지관리	$Y = 33.600 \times X$: 해당교량연장, 단위 : 천원/4차로×m			연간 발생 비용 추정 회귀식
서비스 성능 (사용성)	재포장 (절삭 및 덧씌우기)	151,000	48%	209,000	보수실적 (한국도로공사)
	교면개량 (초속경콘크리트)	262,000	52%		
	신축이음교체	909,000 (개소당)			보수실적 (한국도로공사)

<표 3.2.15> 교량 형식별 주기, 공법별 단가 및 조치율

구성요소	변상종류	주기	표준편차	분포모형	유지보수공법	조치율 (%)	단가(원)
강주형	도장손상	35	4.6	uniform	도장보수공법	30.98	50,000
	볼트손상	35	-	-	볼트교체	1.55	20,000
	강재균열	35	-	-	용접보수공법	1.94	17,000
					stop hole 설치공법	0.31	100,000
					가우징 후 재용접	0.2	200,000
					강판보강공법	0.01	300,000
	2차부재	64	4.55	lognormal	거셋판교체	3.37	300,000

	손상				브레이싱교체	1.67	216,000
					연결판교체	6.31	300,000
콘크리트 주형 교대 교각	균열	27	1.86	triangle	미세균열 표면처리	2.01	63,000
					표면처리 공법-보호제 도포	1.23	30,000
					수지주입공법	2.27	110,000
	백태	27	5.59	triangle	표면처리 공법-보호제 도포	3.94	30,000
					백태처리공법	4.19	63,000
	손상	35	10.17	uniform	단면보수공법 (충전-무근)	3.69	110,000
					철근방청단면보수 (충전-철근부식)	0.12	270,000
기초	세굴	46	13.65	lognormal	돌망태 보호공	47.7	6,500,000
					사각보호공	23.1	9,412,000
					사석보호공	42.96	9,362,500
					단면확대공	43.69	20,798,755
					인공블럭 보호공	35.87	29,000,000
					쉬트파일 항타	28.14	20,000,000
					확대기초 확대	14.29	14,000,000
반침장치	균열	46	3.69	uniform	용접보수공법	19.42	7,200
	부식				재도장공법	55.22	14,750
	볼트누락, 이완				재체결공법	9.46	35,000
	받침편기, 침하, 균열 및 파단	62	5.14	lognormal	선받침교체	18.02	4,000,000
					면받침교체	10.3	12,000,000
	받침몰탈 파손, 들뜸, 균열	23	19.06	triangle	몰탈보수공법	10.47	300,000
					받침몰탈교체	15.07	1,000,000
					실런트 주입	46.56	100,000
신축이음	누수	21	-	-	유도배수처리	71.43	460,000
배수관	배수관 막힘	15	-	-	배수관청소	3.03	10,000
	배수관 타락	15	-	-	부착공법	2.27	70,000
	배수관 교체	49	-	-	배수관교체	14.18	100,000

(다) 감가상각비

○ 정액법

$$D_k = \frac{(C_p - S_v)}{A} \times U_k \qquad \text{(식 3.2.4)}$$

여기서 , D_k = 감가상각비(won)
C_p = 현재 총 공사비(won)
S_v = 잔존가치(won)
A = 가용수명(Yr)
U_k = 사용수명(Yr)

- 수명이 긴 교량의 가치 감소분을 정확히 산정하는 것은 많은 어려움이 있기 때문에, 교량이 가용수명동안 가치가 일정하게 감소한다고 가정을 근거로 감가상각비를 산정하는 방법을 정액법이라 정의됨
- 잔존가치는 (식 3.2.5)와 같이 교량의 가용수명이 다한 것으로 예상되는 상태에서 관리주체가 교량을 현재 지점에서 폐기시, 재활용을 통해 얻는 비용과 폐기비용의 차액을 통해 확보할 수 있는 추정액을 의미함
- 또한, 잔존가치를 '건설폐기물의 적정처리단가 산정 및 관리기준 정립에 관한 연구 (환경부 2008)'을 통해 산출이 가능하나 이를 추정하기 불가능할 경우 '교량 LCC 분석기법(한국도로공사 2009)'에서 제시한 교량단위면적당 61,000원/m^2을 참조하여 아래 (식 3.2.6)를 통해 대략적인 잔존가치 산출이 가능하다

$$\text{잔존가치}(S_v) = \text{재활용비용} - (\text{철거비용} + \text{해체비용}) \qquad \text{(식 3.2.5)}$$

$$\text{잔존가치}(S_v) = \text{교량면적} \times \text{교량 단위면적당 단가} \qquad \text{(식 3.2.6)}$$

- 교량의 가용수명은 건설당시의 설계수명과 동일하지 않으며 공용기간중 유지보수 및 보강으로 수명연장이 가능하여 실제 가용수명을 예측하기는 현실적으로 불가능함. 실제로 열화로 인한 구조물의 손상을 조사하여 가용수명을 예측거나 <표 3.2.16>과 같이 '유형 고정자산 내용연수표(한국감정원 2013)'을 참조하여 가용수명을 선정할 수 있음

<표 3.2.16> 유형고정자산 내용연수표

분류기호	설비의 종류 및 세목	내용연수(Yr)
3-2-1	철골철근콘크리트조 또는 철근콘크리트조(전기한 것은 제외)	
	터널	40~50
	교량	40~50
	옹벽(철근콘크리트)	40
	안벽,잔교,방벽(폭발물용도 외),제방,방파제,탑,상수도,수조,용수용 댐	40~50
	드라이 독	50
	하수도(구거)	35~40
	하수도(흄관)	30~35
	굴뚝 및 연도	40~50
	시멘트 사일로(Cement Silo)	40~50
	고가도로, 제염용침전지, 사육장, 담	30
	폭발물용 방벽 및 방유제	20~25

	조선대	30~40
	여과조	25~30
	오수처리조	20~25
	방사성 동위원소의 방사선을 직접 받는 것	15~20
	저수지	40
	기타	40~50

○ BHI, BCI 활용

- 대체원가 기반 가치평가 방법 중 하나인 WDRC(Written Down Replacement Cost)에서는 교량의 현재 상태를 고려한 감가상각비를 산정하기 위해 BHI(Bridge Health Index)와 BCI(Bridge Condition Index)를 사용함
- 국내의 '안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(한국시설안전공단, 2017)'에서는 교량의 결함도지수를 활용하여 열화로 인한 손상 정도를 평가하는 방법을 제안하고 있으며, BCI는 다음 식으로 산정할 수 있음
- 결함도지수를 사용한 (식 3.2.8)을 통해 교량의 실제 상태를 고려한 감가상각비를 산정할 수 있음

$$BCI = BHI = 1 - \text{결함도지수} \quad \text{(식 3.2.7)}$$

$$D_k = C_p \times \text{결함도지수} = C_p(1 - BHI) = C_p(1 - BCI) \quad \text{(식 3.2.8)}$$

(라) 감가상각을 고려한 현재 총 공사비

- 최종적으로 교량의 가치는 현재 총 공사비에 유지관리비와 감가상각액을 제한 금액으로 산정할 수 있음
- 대체원가를 기반으로 하여 가치를 평가할시에는 유지관리비를 계산과정에 포함하지 않음

$$C_{p2} = C_p - D_k(-M) \quad \text{(식 3.2.9)}$$

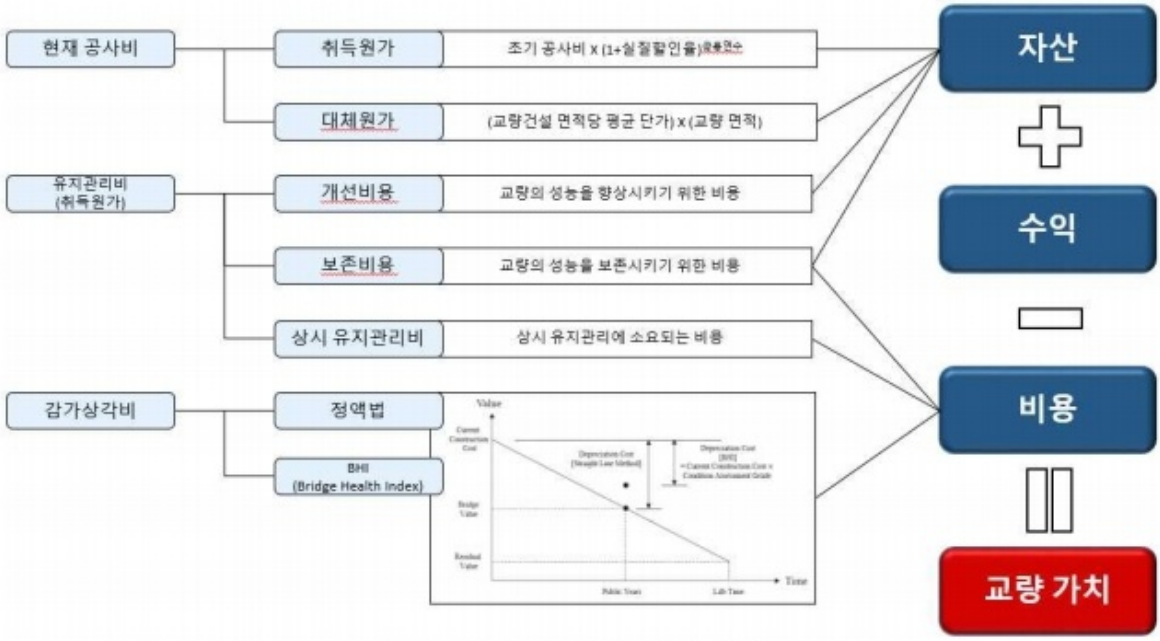
여기서 , C_{p2} = 감가상각을 고려한 현재 총 공사비
C_p = 현재 총 공사비(won)
M = 유지관리비(won)
D_k = 감가상각액(won)

(3) 교량의 가치평가 방법 정리 및 항목 도출

○ 본 연구에서는 안전진단에 의해 축적된 정보를들을 활용하여 유지관리 의사결정의 도구로 사용될 수 있는 교량의 가치를 제시하기 위해 국내외 가치평가 방법을 조사·분석하였음

○ 교량의 가치평가 방법은 건설 당시의 원가를 사용하는 취득원가 방법, 대상 교량의 상태를 고려하여 현재 시점에서의 건설 비용으로 대체하는 대체원가 방법으로 구분됨. 취득원가와 대체원가 방법은 교량의 가치를 평가할 시 원가에 대한 관점이 상이하지만, 기본적인 가치 산정 흐름은 동일함.

○ 교량의 가치를 평가하기 위한 항목은 회계학적 관점과 동일하게 자산, 수익, 비용으로 구분되며, 교량은 국가에서 공공이 이익을 위해 건설된 자산이므로 수익은 발생하지 않음. 최종적으로 (식 3.2.9)과 <그림 3.2.21>와 같이 자산에서 비용을 감하는 방식으로 교량의 가치를 평가함. 대체원가 방법을 사용할 때는 유지관리비를 고려하지 않음



<그림 3.2.21> 교량 가치평가 흐름도

<표 3.2.17> 교량의 가치평가 방법 및 필요 항목

	수식	항목
현재 총 공사비 (취득원가)	$C_p = C \times (1+i)^{(VY-CY)}$	▪ 초기 공사비 ▪ 실질할인율 ▪ 평가연도 ▪ 준공연도
	C= 건설비 + 부대비 + 용지비	▪ 건설비 ▪ 부대비 ▪ 용지비
현재 총 공사비 (대체원가)	$C_p = SSC \times FL$	▪ 교량 면적 ▪ 면적당 대체원가 단가
유지관리비 (취득원가)	일상유지관리비용 ± 보전비용 − 개선비용	▪ 일상 유지관리 비용 ▪ 보전비용 ▪ 개선비용
감가상각비 (정액법)	$D_k = \frac{(C_p - S_v)}{A} \times U_k$	▪ 현재 총 공사비 ▪ 잔존가치 ▪ 가용수명 ▪ 사용수명
	S_v = 재활용비용 − (철거비용 + 해체비용)	▪ 재활용비용 ▪ 철거비용 ▪ 해체비용
	S_v = 교량면적 × 교량 단위면적당 단가	▪ 교량면적 ▪ 교량 단위면적당 단가
감가상각비 (BHI, BCI)	$BCI = BHI = 1 -$ 결함도지수	▪ 결함도 지수

다. 교량 구조물의 잔존수명 예측 시스템

(1) 연구 배경

○ 교량 구조물 건설 후 시간이 경과함에 따라 건설했을 당시 보다 성능이 떨어지는 것은 기정사실임. 콘크리트 구조물과 강제 구조물 모두 동일하게 적용되는 사항이며 더 큰 피해를 막기 위해 안전진단 및 유지관리에 따른 보수 보강 대책을 수행해야함. 콘크리트 및 강제 열화 종류도 다양하며 열화에 따른 유지관리 보수 보강 대책은 여러 종류 존재하고 있음

○ 교량 구조물 안전진단의 결과로 나오는 정성적인 결과물을 활용하여 교량 구조물의 잔존수명을 예측하여 정량적인 결과물을 도출하는 것에 의의가 있음. 정성적인 결과물로는 교량 구조물이 어느 정도의 열화가 발생하였는지 혹은 어느정도 간격으로 재진단을 실시해야 하는지, 보수 보강을 하는 것이 이익이 있는지 아니면 허물고 다시 짓는 것이 이익인지를 판단하기 어려울 수 있기 때문에 잔존수명이라는 정량적인 결과를 도출하고자 함

○ 교량 구조물의 효율적 안전진단 및 유지관리를 위해서는 정확한 내구수명 및 잔존수명을 예측하여 관리할 필요가 있음. 시설물의 상태평가를 통한 내구성 및 안전성을 확인하기 위해 시설물에 따른 정밀점검 및 정밀안전진단을 실시하고 있지만, 열화에 따른 구조물 잔존수명에 대한 개념 및 인식이 부족하여 실무자들이 잔존수명을 평가하기엔 기술이 부족함

○ 본 연구에서는 잔존수명을 도출한 후 BIM 라이브러리에 반영하여 안전진단 및 유지관리 실무자가 적극적으로 활용할 수 있는 기반을 만들고자 하며 갑작스런 붕괴를 막고 고령화된 교량 구조물의 가치를 판단할 수 있는 척도로 사용될 수 있음

(2) 연구 개요

○ 교량 구조물 수명은 시공했을 때부터 해체 단계까지를 말하며 내용년수는 예정된 사용기간을 말함. 잔존 수명 예측을 위한 방법은 열화에 따라 다르며 열화의 종류 또한 교량 구조물을 이루는 재료에 따라 다름. 잔존 수명의 경우 여러 가지 요인에 따라 결과론적으로 달라질 수 있지만 예정된 내용년수는 설계했을 때 정해지는 수명임

○ 국내 안전진단 및 유지관리 지침에서는 안전점검 중심 상태평가를 수행하며 열화 단계별 평가를 하지만 평가기준이 미비한 것으로 판단되고 외부 환경요인에 대하여 고려를 하지 않으므로 정량적인 결과물을 도출하기 어려운 것으로 생각됨

○ 국외에서는 콘크리트 및 강제 열화에 따른 잔존수명 예측에 대한 연구가 체계적으로 진행되고 있으며 수명에 대한 정량화를 위해 연구가 수행되고 있음

○ 기존 정밀안전진단 지침을 참고해보면 강재의 내구성을 평가하기 위한 방법으로 육안검사를 통한 도장의 박리, 강재의 부식 면적, 부식 두께를 측정하여 상태를 평가 하고 있으며 콘크리트의 내구성을 평가하기 위한 방법으로는 염화물 침투량과 탄산화 깊이에 대하여 실시하고 있음.

○ 그러나 내구성 평가라는 개념은 존재하지 않으며 육안검사와 상태평가 항목으로 존재하고 있는 실정임. 따라서, 교량 구조물의 내구성을 조사 및 판단하는 것은 근본적으로 어려움이

있으며 정성적인 결과 만으로는 교량 구조물의 정확한 상태를 판단하기 어렵다.

○ 일반적으로 콘크리트 잔존 수명 예측에 대한 기준은 존재하지 않고 있으며 내구성을 평가하는 기준으로 존재하고 있음. 콘크리트 구조물 목표 내구연한은 구조물 설계자, 사용자, 소유주 등이 구조물 용도 및 기능 등 요구 조전에 의해 결정되는 내구연한으로 구조물을 계획할 당시 정해지는 것임

○ 국내 콘크리트 구조물 목표 내구 수명은 구조물을 특별한 유지관리 없이 일상적으로 유지관리 할 때 내구성 한계 상태에 도달하기 까지의 기간으로 설정하고 있으며 콘크리트 표준시방서 내구성편에서는 아래 <표 3.2.18>와 같이 제시하고 있음

<표 3.2.18> 콘크리트 표준 시방서에 따른 목표 내구수명

구조물 내구등급	구조물 내용	목표 내구 수명(년)
1등급	특별히 높은 내구성이 요구되는 구조물	100
2등급	높은 내구성이 요구되는 구조물	65
3등급	비교적 낮은 내구성이 요구되는 구조물	30

○ 또한 국외 철근 콘크리트 목표 내구수명은 아래 <표. 3.2.19>와 같이 제시하고 있음

<표 3.2.19> 구조물 목표 내구수명

국가	기관	구조물 종류	목표 내구수명(년)
일본	건축학회	고도 내구성 필요	100
		일반 구조물	65
		짧은 내구연한 구조물	30
영국	BS 7543	일시적 구조물	10년 까지
		단기 기간 구조물	최소 10
		중기 기간 구조물	최소 30
		일반 구조물	최소 60
		장기 구조물	최소 120
미국	FHWA	일반 교량 구조물	75
한국	국토 교통부	특별히 높은 내구성이 요구되는 구조물	100
		높은 내구성이 요구되는 구조물	65
		비교적 낮은 내구성이 요구되는 구조물	30

○ 목표 내구수명과 관련된 각국의 현황을 분석한 결과 정부기관 및 학회연구 결과를 기반으로 지침 및 기준을 제 이용하시하고 있으며 국가에 따라 비슷한 유형을 갖고 있지만 지리적, 환경적 요인 등에 따라 약간의 차이가 반영된 것으로 판단됨

○ 국내 및 국외 교량 구조물에 대한 목표 내구수명을 맞추기 위해선 안전진단 및 유지관리로 발생할 수 있는 열화 및 파괴를 미연에 방지해야 함. 콘크리트 구조물 중 RC 구조물에서는

철근 부식에 의해 열화를 판단하며 잔존수명을 판단하기 위한 기준을 추가적으로 연구할 필요가 있음

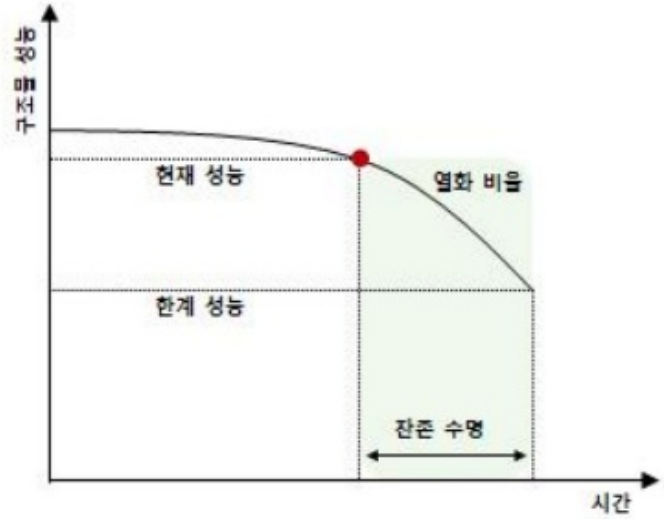
(3) 콘크리트 열화에 따른 잔존수명 분석

○ 본 연구에서는 교량 구조물을 구성하는데 필요한 재료 중 하나인 콘크리트의 잔존 수명을 판단하기 위한 열화에 대하여 조사·분석을 수행함.

○ 교량 구조물에서 콘크리트의 현재 상태 및 유지관리에 적용되었던 자료를 활용하여 콘크리트 열화에 영향을 미치는 인자들을 조사하였고 이를 통해 콘크리트 구조물의 잔존수명을 예측함

○ 시간에 따른 열화 발생으로 구조물 성능 저하 및 잔존 수명에 대한 흐름은 다음 <그림 3.2.22>과 같고, 콘크리트 부재 열화에 영향을 주는 대략적인 요소 및 요인들을 다음 <표 3.2.20>에 나타냄

○ 교량 구조물의 경우 시간 흐름에 따라 자연적으로 마모, 파손 및 부식이 발생할 수 있으며 다른 여러 요인에 의해 성능이 감소하여 잔존 수명은 감소할 수 있기 때문에, 급작스런 파괴를 막기 위해 안전진단 및 유지관리를 통해 보수, 보강을 실시 할 수 있음



<그림 3.2.22> 콘크리트 열화에 따른 성능 저하 및 잔존수명

<표 3.2.20> 열화 종류와 정의

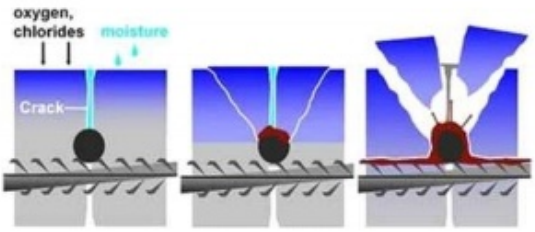
열화 종류	열화 요인	열화 현상	열화 영향 인자
염해	염화물	콘크리트 내부 철근 부식으로 콘크리트 균열, 박리 및 철근 단면 감소를 일으키는 열화 현상	• 염화물 이온 농도 • 철근 부식 정도
탄산화	이산화탄소	이산화 탄소가 시멘트 수화물과 탄산화 반응을 일으켜 pH를 저하함에 따라 철근 부식을 촉진시킴. 결과적으로 콘크리트 균열, 박리 철근 단면 감소를 일으키는 열화 현상	• 탄산화 깊이 • 철근 부식 정도

알칼리골재반응	알칼리 반응성 골재	골재 중에 포함된 반응성 실리카 광물과 탄산염이 포함된 골재가 콘크리트의 알칼 리 수용액과 반응하여 콘크리트에 이상 팽창이나 균열을 발생시키는 열화 현상	• 팽창량
동해	동결융해작용	콘크리트 내부 수분이 동결 및 융해 작용으로 반복적인 하중이 발생하여 미세 균열 및 팝아웃 등을 발생시키는 열화 현상	• 동해 깊이 • 철근 부식 정도
화학적 침식	산성비	산성비에 포함된 산성물질로 인해 콘크리트 표면과 접촉하여 콘크리트 경화체를 분해시키는 열화 현상	• 탄산화 깊이 • 침식 속도 • 철근 부식 정도
보 부재의 피로	교번하중 (반복 하중)	인장과 압축이 교대로 작용하거나 굽힘 또는 비틀림이 교대로 작용하여 균열이 발생하고 결국은 파단까지 발생시키는 열화 현상	• 누적 손상도

(가) 염해

○ 염해 손상 개념

- 염화물 이온 침투로 콘크리트 안에 있는 철근의 부동태 피막을 파괴 시킴으로 부식이 촉진되며, 이에 대한 매커니즘은 <그림 3.2.23>과 같음
- 철근 부식에 따른 체적 팽창압으로 콘크리트 내부에 균열이 발생하게 되며 점진적인 열화로 인해 <그림 3.2.24>과 같이 콘크리트 박락 및 철근 단면감소로 인해 구조물 잔존 수명이 저하되게 됨



<그림 3.2.23> 염화물 침투로 인한 열화 매커니즘



<그림 3.2.24> 염해에 의한 손상 예

○ 잔존수명 시기 정의

- 염해로 인한 철근 부식으로 콘크리트 구조물 상태 변화는 잠재기, 진전기, 촉진기, 한계기로 구분되며 단계별 성능저하 과정은 구조물 상태를 고려하여 진행됨
- 잠재기는 철근 피복위치에 염화물 이온 농도가 부식 발생 한계 농도에 도달할 시점, 진전기는 철근 부식 시작부터 부식 균열 발생까지 시점, 촉진기는 부식 균열 발생부터 속도가 증가하는 시점, 한계기는 부식량 증가로 내하력 저하가 현저하게 발생하는 시점으로 구분됨
- 염해 기간에 대한 정의 및 결정 요인은 다음 <표 3.2.21>와 같음. 기간을 결정하는 요인에 따라 상태를 정의하고 있으며 잔존수명 기준은 잠재기에서 진전기로 넘어가기 전까지로 판단되고 있음

<표. 3.2.21> 염해 열화 과정 정의

열화 과정	정의	기간 결정을 위한 요인
잠재기	철근 피복 위치에 염화물 이온 농도가 부식 발생 한계 농도에 도달하는 시점	• 염화물 이온 • 초기염분 함유량
진전기	철근 부식 시작부터 부식 균열 발생 시점	• 강재 부식 속도
촉진기	부식균열 발생부터 속도 증가하는 시점	• 철근부식으로 균열을 보이는 속도
한계기	부식량 증가로 내하력 저하되는 시점	

○ Fick의 제2 확산 법칙

- 콘크리트 염화물 침투는 일반적으로 일차원 확산 과정으로 설명될 수 있으며, Crank(1975)가 Fick의 제 2 확산 법칙이라고 불리는 편미분 방정식을 활용해 수학적으로 표현함. Fick의 제 2 확산 법칙은 (식 3.2.10)과 같이 나타낼 수 있음

$$\frac{\partial C(c,t)}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} \qquad \text{(식 3.2.10)}$$

여기서 , $C(x,t)$ = 깊이(x), 시간(t)에 따른 염화물 확산 농도
t = 시간
D = 확산 계수
x = 콘크리트 표면에서부터의 깊이

○ Collepardi(1972) 예측식

- Collepardi(1972)는 Fick의 제 2 확산 법칙을 콘크리트 염화물 침투에 처음으로 적용하였음.
- 확산 계수와 표면 염화물 농도가 일정하다는 가정하에 Fick의 제2 확산 법칙에 대한 분석해를 설명하였고, 준 무한대(semi-infinite) 매질로 일축 침투에 대한 수학적 공식을 (식 3.2.11)로 표현함

$$C_d(x,t) = C_{d;i} + (C_{d;s} - C_{d;i})erfc\left(\frac{x}{\sqrt{4D_d t}}\right) \qquad \text{(식 3.2.11)}$$

여기서 , $C_d(x,t)$ = 깊이(x), 시간(t)에 따른 염화물 이온 농도
$C_{d;i}$ = 콘크리트 내의 초기 함유 염화물 농도
$C_{d;s}$ = 표면 염화물 농도
D_d = 염화물 확산 계수

- 초기 염화물 농도는 수돗물, 결합제, 골재에서 비롯된 초기 콘크리트에 존재하는 염화물을 나타내며, 오차 함수(erf)와 상보적 오차함수(erfc)는 불안전한 감마 함수의 특별한 형태로 수식과 값은 다음 (식 3.2.12), (식 3.2.13), <표 3.2.22>와 같다.

$$erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^x e^{-t^2}dt \qquad \text{(식 3.2.12)}$$

$$erfc(x) = 1 - erf(x) \qquad \text{(식 3.2.13)}$$

<표 3.2.22> 가우스 오차함수 값

z	erf(z)	z	erf(z)	z	erf(z)
0	0	0.55	0.5633	1.3	0.9340
0.025	0.0282	0.60	0.6039	1.4	0.9523
0.05	0.0564	0.65	0.6420	1.5	0.9661
0.10	0.1125	0.70	0.6778	1.6	0.9763
0.15	0.1680	0.75	0.7112	1.7	0.9838
0.20	0.2227	0.80	0.7421	1.8	0.9891
0.25	0.2763	0.85	0.7707	1.9	0.9928
0.30	0.3286	0.90	0.7970	2.0	0.9953
0.35	0.3794	0.95	0.8209	2.2	0.9981
0.40	0.4284	1.0	0.8427	2.4	0.9993
0.45	0.4755	1.1	0.8802	2.6	0.9998
0.50	0.5205	1.2	0.9103	2.8	0.9999

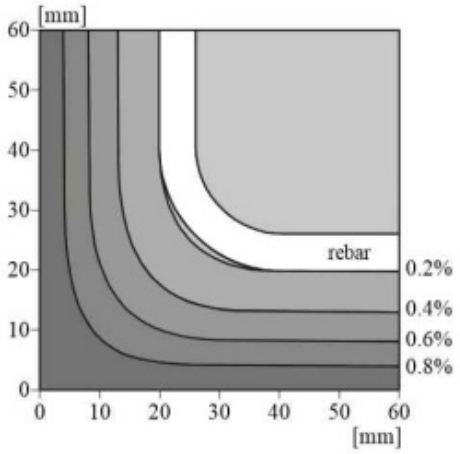
○ Suryavanshi(2002)의 예측식

- Collepardi(1972)의 가정은 보 가장자리에 대한 것을 무시하였으며 Suryavanshi(2002)에 의해 2차원 상황에서 콘크리트로 유입되는 염화물을 계산하는 식으로 (식 3.2.14)와 같이 보안되었음

$$C_d(x,y,t) = C_d;s\left[1 - erf\left(\frac{x}{\sqrt{4D_d t}}\right)erf\left(\frac{y}{\sqrt{4D_d t}}\right)\right] \qquad \text{(식 3.2.14)}$$

여기서 , $C_d(x,y,t)$ = 깊이(x), 측면깊이(y), 시간(t)에 따른 염화물 이온 농도
y = 측면깊이

- 2차원 염화물 침투는 증가된 염화물 침투를 이끌 수 있으며 아래 <그림 3.2.25>와 같이 등자 곡선을 따라 발생한다



<그림 3.2.25> 2차원 염화물 침투 단면

○ Crank(1975) 예측식

- 제설제 효과를 고려한 (식 3.2.15)를 제안하였으며, 총 염화물량(M)이 일정하게 유지된다는

조건을 만족시킴

$$C_d(x,t) = \frac{M}{\sqrt{(\pi D_d)t}} \exp\left(\frac{-x^2}{4D_d t}\right) \quad \text{(식 3.2.15)}$$

여기서 , M = 총 염화물량

○ Takewaka(1988) 예측식

- 콘크리트 노화 효과를 확산 계수에 포함하여 식 (3.2.16)를 제안함

$$D_d(t) = D_{d;i} t^{-n} \quad \text{(식 3.2.16)}$$

여기서 , n = 노화계수(0<n<1)

○ Bamforth(1999) 예측식

- Folkestone(영국)의 야외 기후에 노출 된 콘크리트를 8 년간 연구하였으며, 이에 근거하여 (식 3.2.14)의 매개변수를 도출함
- (식 3.2.14)은 등호 양측 식의 단위가 다르며 초기 확산 계수가 특정 시기에 대한 확산 계수를 나타내는 한계점이 있음
- 시간에 따른 확산 계수를 구하는 식은 다음 (식 3.2.17)과 같다

$$D_d(t) = D_{d;0}\left(\frac{t_o}{t}\right)^n \quad \text{(식 3.2.17)}$$

여기서 , $D_{d;o}$ = 기준 염화물 확산계수(t_o와 연관됨)
t_o = 노출 시간

- 시간에 따른 확산계수인 (식 3.2.17)을 Fick의 제 2 확산 법칙에 적용하면 다음 (식 3.2.18)을 도출할 수 있음

$$C_d(x,t) = C_{d;i} + (C_{d;s} - C_{d;i}) erfc\left(\frac{x}{\sqrt{4D_{d;o}(t_o/t)^n t}}\right) \quad \text{(식 3.2.18)}$$

○ Visser(2002) 예측식

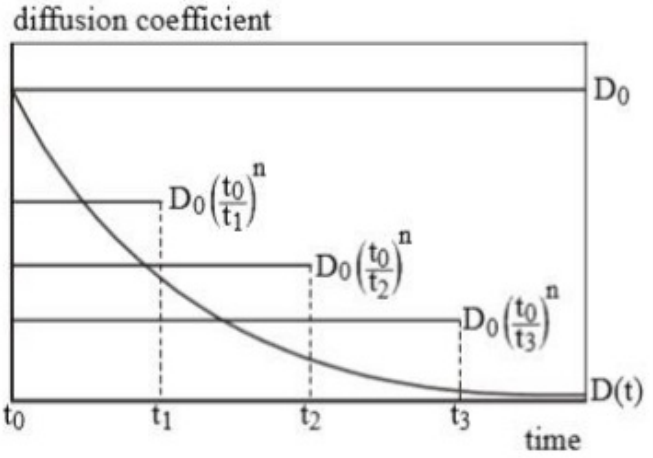
- Fick의 제2 법칙을 적용하기 위해서는 시간에 따라 확산계수가 일정해야 하기 때문에, Bamforth(1999)가 제안한 (식 3.2.18)은 수학적인 모순이 존재함
- Visser(2002)는 시간에 따라 상이한 확산 계수의 전체 시간을 포함하기 위해 Fick의 제 2 법칙을 수정하여 (식 3.2.19)과 같이 제안함
- 또한 (식 3.2.19)을 (식 3.2.11)에 적용하여 (식 3.2.20)와 같이 시간에 따른 확산계수를 고려

한 염해 예측식을 도출할 수 있음

$$\int_0^t D_d(t)dt = \frac{D_{d;0}}{1-n}\left(\frac{t_0}{t}\right)^n t \qquad \text{(식 3.2.19)}$$

$$C_d(x,t) = C_{d;i} + (C_{d;s} - C_{d;i})erfc\left(\frac{x}{\sqrt{4\frac{D_{d;o}}{1-n}(t_o/t)^n t}}\right) \qquad \text{(식 3.2.20)}$$

- Collepardi(1972) - 상수 확산계수, Bamforth(1999) - 준 시간 의존 확산계수, Visser(2002) - 시간 의존 확산계수
- 위와 같이 각 확산계수별 차이점을 살펴보면 <그림 3.2.26>와 같음



<그림 3.2.26> 시간에 따른 확산계수

○ Gaal(2003)

- 교량 구조물은 제설제 사용으로 염화물에 더 쉽게 노출되며 바닷물에도 영향을 받을 수 있음
- 제설제가 적용 되었을 때 구조물 연령은 시간에 따른 확산 계수 감소로 염화물 침투에 중요한 영향을 미칠 수 있음
- 염화물에 처음 노출된 시기와 변화하는 확산 계수에 대한 전체적인 기록이 Fick의 제 2 확산 법칙에 대한 계산 과정에 적용되며, 시간에 따른 확산 계수와 특정 염화물 노출에 대한 올바른 가정이 전제해야 하며 적용을 위한 식은 (식 3.12)와 같음
- Gaal(2003)는 (식 3.2.21)를 (식 3.2.11)에 적용하여 제설제를 고려한 염해 열화식을 (식 3.2.22)과 같이 제안함

$$\int_{t_s}^{t_s+t_{exp}} D_d(t)dt = \frac{D_{d;0}}{1-n}t_0^n\left[(t_s+t_{\exp})^{1-n} - t_s^{1-n}\right], \quad (t_s+t_{\exp}=t) \qquad \text{(식 3.2.21)}$$

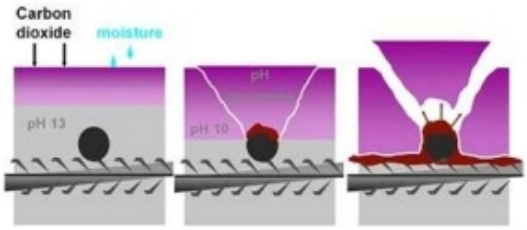
$$C_d(x,t) = C_{d;i} + (C_{d;s} - C_{d;i})erfc\left(\frac{x}{\sqrt{4\frac{D_{d;0}}{1-n}t_0^n\left[t^{1-n} - t_s^{1-n}\right]}}\right), \quad (t > t_s) \qquad \text{(식 3.2.22)}$$

(나) 탄산화

○ 탄산화 손상 개념

- 콘크리트는 다양한 외부적, 내구적 요인과 환경적 요인에 의해 철근 부식을 발생시키며 열화를 발생시키는 요소 중 하나인 탄산화는 구조물 대기중에 존재하는 CO_2가 내부로 침투하면서 콘크리트 알칼리성을 저하시키며, 결론적으로 부동태 피막을 파괴하여 철근을 부식시킴

○ 탄산화 열화 메커니즘



<그림 3.2.27> 탄산화 열화 메커니즘


<그림 3.2.28> 탄산화에 의한 열화 손상 예

- 탄산화에 따른 열화 메커니즘은 <그림 3.2.27>과 같으며 탄산화에 따른 열화 손상 형태는 <그림 3.2.28>과 같이 박리·박락이 발생함

○ 잔존수명 시기 정의

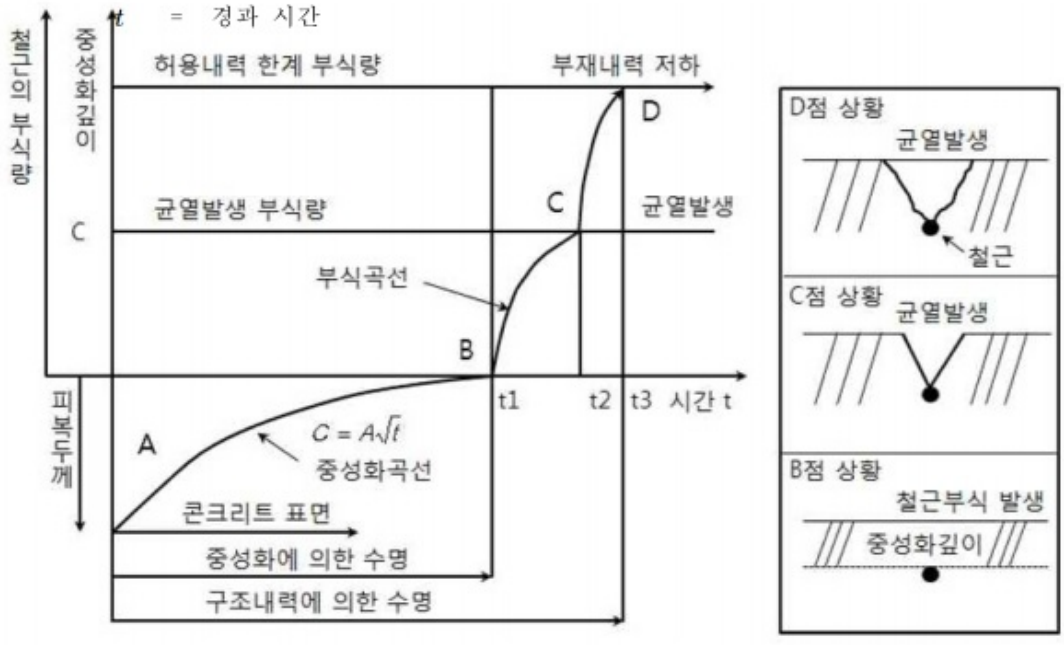
- <그림 3.2.29>에서 콘크리트 탄산화에 의한 철근 부식과 구조물 내구수명에 대한 개념을 나타내고 있음
- t_1은 탄산화가 내부철근 표면에 도달하는 시점, t_2는 철근이 부식하여 콘크리트에 균열을 발생시키는 시점, t_3은 부재내력이 한계에 도달하는 시점으로 정의됨
- 일반적으로 철근 콘크리트 구조물의 한계수명은 t_1으로 정하고 있으나 구조물 부재에 따라 탄산화 깊이, 피복 두께는 달라질 수 있으며 t_1에 이르는 시간이 모두 다르기 때문에 실제 구조물에 적용할 때 어려움이 존재할 수 있음

○ 탄산화 잔존수명에 대한 일반 예측식

- 탄산화는 정상적인 상태에서 콘크리트에 이산화탄소가 확산되며 발생한다고 가정하며 탄산화 깊이 C는 경과 시간 t의 제곱근에 비례하는 것으로 알려져 있음
- 탄산화의 진행속도는 속도계수인 A로 결정되며 탄산화의 진행정도를 예측하기 위하여 가장 널리 적용되는 모델은 $\sqrt{t}$ 방법으로 (식 3.2.23)와 같음

$$C = A\sqrt{t} \qquad \text{(식 3.2.23)}$$

여기서 , C = 탄산화 깊이
A = 탄산화 속도계수



<그림 3.2.29> 구조물의 탄산화와 철근 부식에 따른 내구수명

- $\sqrt{t}$ 방법은 마감재 표면 피복재 영향을 고려한 경우와 습도 및 강우 영향과 같은 환경조건을 고려한 식이 존재하고 있으며 아래 (식 3.2.24)과 (식 3.2.25)으로 나타낼 수 있음

$$C = A\sqrt{t} + B \quad \text{(마감재, 표면 피복재 고려)} \qquad \text{(식 3.2.24)}$$

$$C = A\sqrt{t} \quad \text{(환경, 폭로조건 고려)} \qquad \text{(식 3.2.25)}$$

- 또한 탄산화에 영향을 주는 탄산화 속도계수와 콘크리트 특성값 상관 관계를 실험적 연구를 통하여 관계식을 도출하였으며 다음 <표 3.2.23>과 같음

<표 3.2.23> 탄산화 속도계수의 영향 인자

영향인자	탄산화 속도계수에 영향을 주는 함수
물 시멘트비(W/C)	A=f(W/C)
혼화재 혼입여부	A=f(W/C+k*MA)
압축강도	A=f(1/f_{cu}) or A=f(1/$\sqrt{f_{cu}}$), A=f($\sqrt{f_{cu}}$)

○ 연구자별 예측식 분석

- (식 3.2.25) $\sqrt{t}$ 방법을 기반으로 여러 연구자들이 콘크리트 배합(시멘트, 골재 종류, 혼화제 유무), 이산화탄소 농도, 마감, 온도, 습도, 실내/실외 구분 등 다양하게 고려하여 다양한 탄산화 예측식을 제안함
- 연구자들이 제안한 탄산화 예측식과 고려되는 인자를 <표 3.2.24>에 정리해서 나타내었음

<표 3.2.24> 연구자별 탄산화 예측식과 고려되는 인자

연구자	탄산화 예측식	고려되는 인자

CEB-FIP	$x^2 = \frac{2D_{co_2}(c_1 - c_2)}{a}t$	x	=	시간에 따른 탄산화 깊이(mm)
		Dco2	=	탄산화된 콘크리트 내 이산화탄소 확산계수(m2/s)
		c1	=	주위 환경에서 이산화탄소 농도(g/me)
		c2	=	탄산화면 이산화탄소 농도(g/me)
		t	=	탄산화 기간(s)
Kishitani	$Y = \frac{0.3(1.15+3x)}{R^2(W/C-0.25)^2}C^2 \ (x > 0.6)$ $Y = \frac{7.2}{R^2(W/C-1.76)^2}C^2 \ (x \le 0.6)$	Y	=	경과년수 (C까지 탄산화 되는 기간)
		C	=	탄산화 깊이(cm)
		x	=	강도상의 물 시멘트비
		R	=	탄산화 속도 비율 <표 3.2.8>참조
Hamada	$t = \frac{k}{R}C^2$ $k = \frac{0.3(1.15+3\,W/C)}{(W/C-0.25)^2}$ $\gamma_c\gamma_s\gamma_a$	C	=	탄산화 깊이(cm)
		t	=	시간(년)
		k	=	물 시멘트비로 계산하는 상수
		R	=	탄산화 비율
		W/C	=	물 시멘트비
		γ_c	=	시멘트 종류에 따른 상수
		γ_s	=	골재 종류에 따른 상수
		γ_a	=	표면활성제 유무에 따른 상수
Shirayama	$t = \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \delta \cdot \epsilon \frac{5000}{(W/C-38)^2}C^2$	α	=	골재 및 혼화제에 따른 상수 <표 3.2.9>
		β	=	시멘트에 따른 상수 <표 3.2.10>
		γ	=	시공정도에 따른 상수 <표 3.2.11>
		δ	=	마무리에 따른 상수 <표 3.2.12>
		ϵ	=	실내외 노출환경에 따른 상수 <표. 3.2.13>
		C	=	탄산화 깊이(cm)
		W/C	=	물 시멘트비
Yoda	$t = \alpha\beta\gamma\frac{A}{(100x-B)^2}C^2$ (실내) $t = \alpha\beta\gamma\frac{D}{(100x-E)^2}C^2$ (실외)	t	=	시간(년)
		x	=	물시멘트비
		α	=	콘크리트 품질계수 <표 3.2.14>
		β	=	탄산화 지연 효과 상수 <표 3.2.15>
		γ	=	환경조건(일반적으로 1.0)
		C	=	평균 찬산화 깊이(mm)
		A,B, D,E	=	콘크리트 종류에 따른 상수 <표 3.2.16>
고경택	$X = (2.823 - 0.584\log C) \cdot$ $(0.0303\,W/C - 1.0187) \cdot \sqrt{Ct}$	t	=	시간(년)
		W/C	=	물시멘트비
		X	=	탄산화 깊이(cm)
		C	=	CO_2농도(실내 0.07%,

		실외 0.05%)
권성준	$t = \frac{0.3(1.153\,W/C)}{R^2(W/C-0.25)^2}C^2,\ W/B > 0.6$ $t = \frac{7.2}{R^2(4.6\,W/C-1.76)^2}C^2,\ W/B \le 0.6$	t = 탄산화 도달시간(년) W/C = 물시멘트비 C = 탄산화 깊이(cm) R = 탄산화 비율 (보통골재 및 OPC 1.0)

<표 3.2.25> 콘크리트 종류별 탄산화 비율 R

		시멘트 종류					
골재 종류	표면 활성제	보통 포틀랜드	조강 포틀랜드	고로 시멘트 (슬래그 30~40%)	고로 시멘트 (슬래그 60% 전후)	실리카 시멘트	플라이 애쉬 시멘트 (플라이 애쉬 20%)
강모래	플레인	1.0	0.6	1.4	2.2	1.7	1.9
	AE제	0.6	0.4	0.8	1.3	1.0	1.1
	AE 감수제	0.4	0.2	0.6	0.9	0.7	0.8
강모래, 화산골재	플레인	1.2	0.7	1.7	2.6	2.0	2.3
	AE제	0.8	0.4	1.0	1.6	1.2	1.4
	AE 감수제	0.5	0.3	0.7	1.1	0.8	0.9
화산골재	플레인	2.9	1.8	4.1	6.4	4.9	5.5
	AE제	1.8	1.0	2.4	3.8	3.0	3.3
	AE 감수제	1.1	0.7	1.6	2.6	2.0	2.2

<표 3.2.26> 골재 및 혼화제에 따른 상수

골재 \ 혼화제	사용 x	AE제	감수제
모래, 자갈	1.0	2.8	6.2
모래, 경량골재	0.7	1.6	4.0
경량골재	0.12	0.31	0.83

<표 3.2.27> 시멘트 종류에 따른 상수

보통 포틀랜드 시멘트	조강 포틀랜드 시멘트	고로 시멘트			플라이 애쉬 시멘트 B	실리카 시멘트 B
		A	B	C		
1	1.6	0.6	0.5	0.3	0.3	0.3

<표 3.2.28> 마감 방법에 따른 상수

마감 x	페인트	모르타르	타일
1	2	3	7

<표 3.2.29> 노출환경에 따른 상수

실외		실내
도서	지방	
1	1.3	0.5

<표 3.2.30> Yoda 콘크리트 품질 상수

등급	시공정도	품질계수α
A	우수한 경우	1
B	보통(상)인 경우	2/3
C	보통(중)인 경우	1/2
D	보통(하)인 경우	1/4

<표 3.2.31> Yoda 탄산화 지연 효과 상수

마감재 x	페인트	모르타르	타일
1.0	0.4	두께 15mm 이상 5	0.125
1.0	2.5	두께 12mm 이하 2.5	8

<표 3.2.32> Yoda 예측식에 적용되는 콘크리트에 따른 상수

	실내		실외	
노출환경	A	B	D	E
보통포틀랜드 시멘트	262	18	155	36
고로시멘트 A	117	25	182	27
고로시멘트 B	95	26	207	24
고로시멘트 C	68	28	251	19

○ 연구자별 탄산화 임계깊이

- 연구자별 탄산화 임계 깊이 설정 기준이 상이 하므로 연구에 적용할 수 있는 적정 임계 깊이 설정 또한 중요하게 작용할 수 있음
- 연구자별 제안된 탄산화 임계깊이는 다음과 같음

<표 3.2.33> 탄산화 임계 깊이 설정

탄산화 임계 깊이	
제안한 연구자	임계 깊이(비탄산화 기준)
Nagataki	12~13mm
한국, 일본 콘크리트 학회 콘크리트 표준 시방서	10mm
Kishitani	8mm
이창수	5mm
일본건축학회	0mm(실내 -20mm)

(다) 알칼리 반응

○ 알칼리 반응 개념

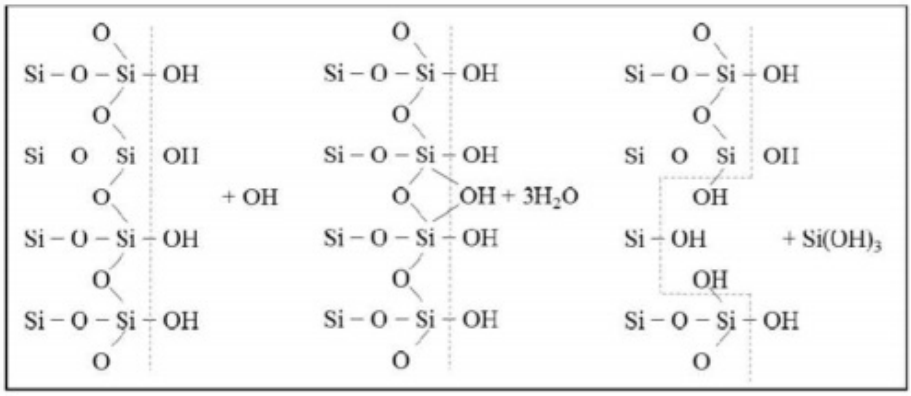
- 알칼리 반응을 받는 구조물은 화학적 열화 형태로 천천히 발전하지만 점진적으로 콘크리트 팽창과 균열을 일으키게 됨
- AAR(알칼리 골재 반응)은 포틀랜드 시멘트 또는 외부 공급원 및 특정 반응성 골재로부터 알칼리 수산화물 간의 화학 반응임

- AAR의 두가지 주요 유형은 반응에 관여하는 반응성 미네랄 유형, 즉 알칼리 실리카 반응(ASR) 알칼리 탄산염 반응(ACR)에 기초하여 인식되고 있음
- 알칼리 실리카 반응은 시멘트 페이스트와 특정 규산질 암석과 오팔 체트, 변형된 석영 및 산성 화산 유리와 같은 미네랄 간의 화학 반응으로 일부 응집체에 존재함
- 위의 반응에 대한 생성물은 알칼리 실리카 겔이며, 특정 환경에서 팽창하여 콘크리트 균열을 일으킴
- ASR로 인한 문제는 1920년대와 1930년대에 학교, 교량, 도로포장 등 여러 구조물이 적절한 지침을 따른 공사가 완료된 후 몇 년 동안 균열이 발생하게 됨

○ 알칼리 반응 메커니즘

- 실리카를 포함하고 있는 골재는 시멘트 페이스트 또는 환경의 주위로부터 물을 끌어당겨 반응하며 팽창하는 겔을 형성하기 위해 콘크리트에서 알칼리 수산화물과 반응할 수 있음
- 물의 흡수로, 이러한 겔은 팽창하고 콘크리트를 손상하는 팽창 압력이 충분하게 생길 수 있음
- 고 알칼리 시멘트 페이스트에서 실리케이트, 알루미 네이트 또는 설페이트 이온의 일부가 Ca^{2+} 대신 Na^{+} 또는 K^{+}에 의해 균형을 이루게되어 페이스트에서 비정상적으로 높은 pH 유체가 생성됨
- 약산의 음이온 가수분해 및 수산화 칼슘 대신 불용성 칼슘 염의 형성으로 효과가 확인함
- 두 반응 모두 pH가 7 이상인 환경에서 실리카 그룹 (Si-O-Si)의 파열을 초래하여 결정화되지 않은 실리카 응집체로의 확산에 의해 나트륨 또는 칼륨 이온과 함께 침투하는 하이드 록실 이온 (OH^-)을 생성함
- 하이드록실 공격에 의한 실리카 용해 메커니즘은 <그림 3.2.30>와 같다

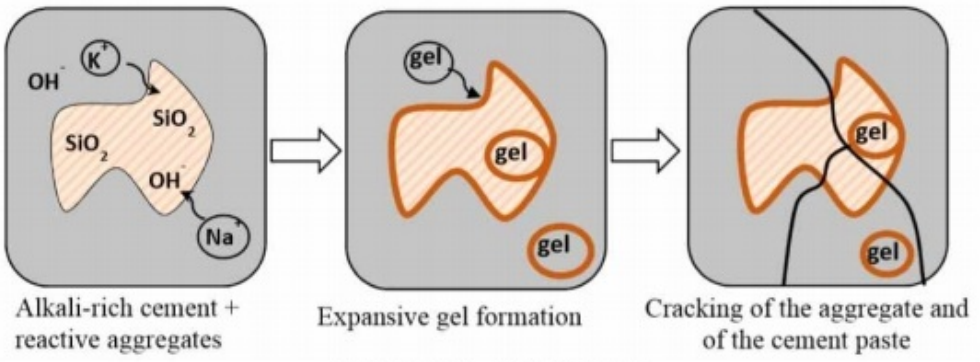
① 알칼리 + 반응 실리카 → 겔 반응 생성물
② 겔 반응 생성물 + 수분 → 팽창



<그림 3.2.30> 하이드록실 반응에 의한 실리카 용해 메커니즘

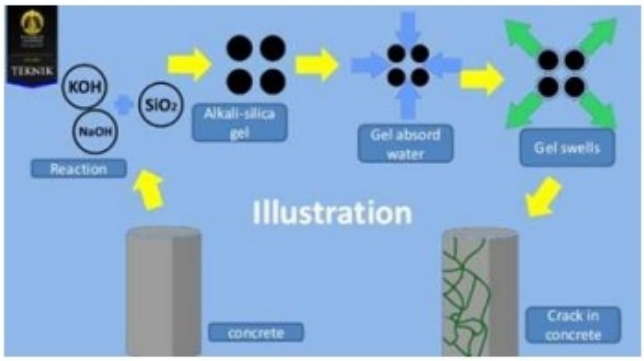
- 반응은 네트워크를 느슨하게 하고 반응성 골재 내 교차 결합된 고분자 전해질을 생성하고, 칼슘이 존재하면 실리카가 침전되고 주로 알칼리, 실리카, 칼슘을 포함하는 알칼리 성 실리카 겔이 형성됨
- 몇몇 연구자에 의해 몇 가지 확장 메커니즘이 물흡수(Dent-Glasser and Katakoa (1981)), 삼투압 (Diamond(1989)) 또는 두 가지의 조합으로 제안되었음

- 그럼에도 불구하고 거시적 팽창을 일으키는 인자는 알칼리 실리카 겔의 팽창으로 인한 압력 상승이며 그에 대한 설명은 <그림 3.2.31>과 같음



<그림 3.2.31> ARS 매커니즘

- ASR에 영향을 주는 주요 매개 변수는 온도, 물 알칼리 함량, 반응성 응집체의 종류, 응집체 크기, 공기 유입 및 다공성, 응력 수준으로 볼 수 있음. 알칼리 반응에 의한 열화 메커니즘은 <그림 3.2.32>과 같으며 구조물 열화 형상은 <그림 3.2.33>와 같이 나타남



<그림 3.2.32> 알칼리 반응에 의한 열화 메커니즘



<그림 3.2.33> 알칼리 반응에 의한 구조물 열화 현상

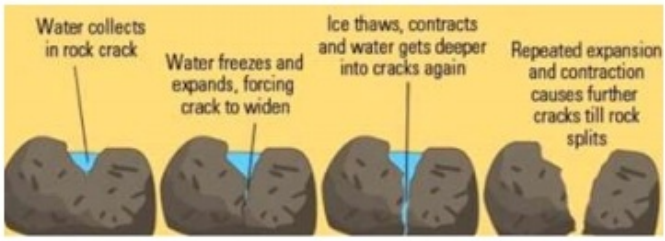
(라) 동해

○ 동해 손상 개념 및 매커니즘

- 동해 현상은 콘크리트 내의 수분이 동결, 융해의 반복작용에 의해 팽창하여 콘크리트에 손상을 발생시키는 현상을 말함
- 동해를 받은 구조물의 콘크리트 표면에 미세한 균열이 발생하고 표면에 일어나는 스케일링

과 표면이 떨어져 나가는 팝아웃 등과 같이 어느 형태로든 열화가 표면화 되는 것이 일반적임

- 미세균열과 스케일링은 콘크리트 경화 페이스트 부분이 열화하는 것으로 콘크리트 품질이 저하되는 경우나 적절한 연행공기가 없을 경우에 많이 발생함
- 동해에 의한 열화 현상은 콘크리트 단면 감소이며 이에 따라 철근 부식이 발생하는 경우가 있다. 동해 정도와 깊이에 따라 구조물 성능 저하가 발생되며 동해 열화과정 메커니즘은 <그림 3.2.34>와 같음
- 동해가 발생할 경우 콘크리트의 표면이 균열, 박리, 박락에 의해 떨어져 나갈 수 있으며, 이러한 현상은 <그림 3.2.35>와 같음



<그림 3.2.34> 동해에 따른 열화 매커니즘



<그림 3.2.35> 동해에 의한 구조물 열화 현상

- 동해에 대한 연구는 국내에서 보다는 일본 및 해외에서 많이 진행되고 있으며 다양한 제안식들이 제안되고 있고, 동해 열화 과정의 정의와 기간에 영향을 주는 요인은 다음 <표 3.2.34>에 설명하고 있다.

<표 3.2.34> 동해 열화 과정 정의 및 영향을 주는 요인

열화과정	정의	영향 요인
잠재기	열화가 발생하지 않는 기간	동해 발생 가능성 유무, 최저온도, 동결수량, 동결융해횟수
진전기	표면 열화가 진행되지만 철근 부식은 없는 기간	최저온도, 동결수량, 동결융해횟수
촉진기	철근 노출 및 철근 부식이 개시될 기간	동해깊이, 강재 부식속도
한계기	철근 부식이 진행되어 내하력이 현저하게 저하되는 기간	동해깊이, 강재 부식속도

○ Hama 예측식

- 건조 조건하에 기공 구조 변화와 동해에 대한 관계를 이용하여 (식 3.2.26), (식 3.2.27), (식 3.2.28)과 같이 수명 예측식을 제안하였음

$$PV_d/PV_i = 0.099\,Temp. - 0.151\,W/B + 1.564FB + 6.817 \quad \text{(식 3.2.26)}$$

$$\log(DF) = -0.317 - 1.209\log(PV) + 1.799A/P \quad \text{(식 3.2.27)}$$

$$DF_d/DF_i = (PV_d/PV_i)^{-1.209} \quad \text{(식 3.2.28)}$$

여기서 , PV_d = 건조 후 직경(40-2000mm)의 공극 부피

PV_i = 초기 조건에서 직경(40-2000mm)의 공극 부피

$Temp$ = 건조 기간 동안 최고 온도

W/B = 물결합제비

FB = 시멘트 타입

DF = 내구성 상수

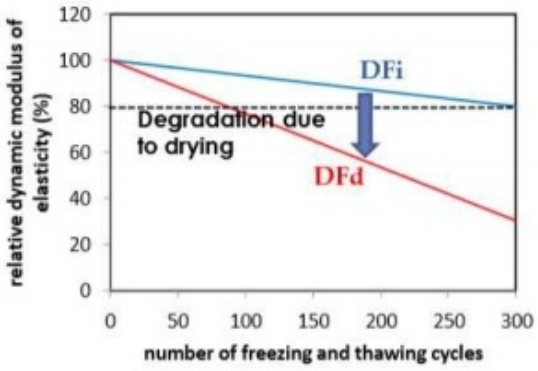
PV = 직경(40-2000mm)의 공극부피

A/P = 공기함유량/페이스트 비

DF_d = 건조 후 내구성 상수

DF_i = 초기 조건의 내구성 상수

- 건조에 따른 내구성 상수 저하에 대한 설명은 <그림 3.2.36>과 같음



<그림 3.2.36> 건조에 따른 내구성 상수 저하

○ Walton et al(1990) 예측식

- Walton et al은 콘크리트 상대 동탄성 계수에 대한 압축강도, 연행 공기 함유량, 물시멘트비, 동결융해 사이클 수에 대한 효과를 고려하여 상대 동탄성 계수 산정식을 (식 3.2.29)~(식 3.2.31)과 같이 제안함
- C_a와 C_b는 콘크리트 내의 공기 함유량과 물시멘트비에 의한 영향을 고려하기 위한 계수임

$$Calculated\,RDM = 100 - \left(\frac{N_{FT}}{C_a * C_b - 100}\right) * 100 \qquad \text{(식 3.2.29)}$$

$$C_a = \begin{cases} 275 * w_a + 118.25 * w_a^2 & \text{for } w_a \geq 4\% \\ 118.25 * w_a^2 & \text{for } w_a < 4\% \end{cases} \qquad \text{(식 3.2.30)}$$

$$C_b = 4.2 - 8.0 * (W/C) + 3.2 * (W/C)^2 \qquad \text{(식 3.2.31)}$$

여기서 , N_{FT} = 동결융해 사이클 수

C_a = 공기 함유량에 따른 상수

C_b = 물시멘트비에 따른 상수

w_a = 콘크리트 내의 공기 함유량

W/C = 물시멘트비

- 동결 손상 정도는 동결 융해 작용 결과로 콘크리트의 심각한 균열 및 열화의 시점으로 간주함
- 순환 동결 융해 작용하에 구조물이 만족스러운 성능을 보장하기 위한 최소 임계수준의 RDM은 <표 3.2.35>과 같음

<표 3.2.35> 최소 임계 수준의 RDM

구조물에 대한 노출	최소 임계 수준의 RDM(%)			
	혹독한 날씨 또는 순환 동결 융해 작용		온화한 날씨, 대기 온도가 0도 이하로 떨어지기 드문 경우	
	얇은 구조물	일반 구조물	얇은 구조물	일반 구조물
물에 담궈지거나 또는 물에의해 종종 포화된 경우	85	70	85	60
정상적인 노출 조건	70	60	70	60

- 70%의 RDM 수준은 콘크리트 건물 정면의 외부 패널에 대한 최소 임계 RDM으로 간주하고 동결 손상에 따른 잔존수명 예측식은 다음과 같이 제안함

$$t_d = \frac{N_t}{N_a} = \frac{D_l}{N_a}(C_a C_b - 100) \qquad \text{(식 3.2.32)}$$

여기서 , t_d = 동해에 의한 손상이 D_l에 도달하기 위한 시간
N_t = 총 동결·융해 사이클 횟수
N_a = 연간 동결·융해 사이클 횟수
D_l = 허용 동해 손상 수준(%)

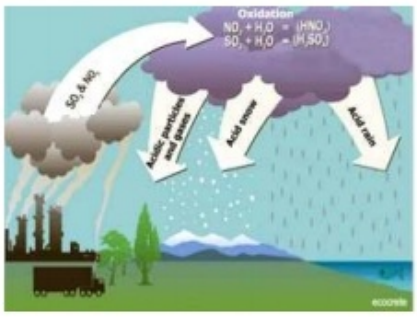
(마) 화학적 침식(산성비)

○ 화학적 침식(산성비) 열화 개념 및 매커니즘

- 콘크리트는 강알칼리성을 띄는 물질이며 콘크리트 표면과 약한산성 물질이 접촉한 경우 중화반응이 일어남
- 콘크리트에 강산인 산성비가 접촉하게 되면 시멘트 경화체를 중화하여 파괴시키게 되며 급진적인 파괴를 일으킬 수 있음
- 수경성 시멘트 콘크리트는 조성과 관계없이 pH 3 이하에 노출될 경우 중화반응을 방지하기 못함
- 산성비에 의한 열화 메커니즘은 <그림 3.2.37>과 같으며 구조물 열화에 대한 현상은 <그림 3.2.38>과 같음

○ Okamura et al. 예측식

- 산성비에 의한 열화 관련 식은 많이 연구된 분야는 아니지만 Okamura et al. 에 의해 제안



<그림 3.2.37> 산성비에 의한 열화 매커니즘



<그림 3.2.38> 산성비에 의한 구조물 열화 현상

된 (식 3.2.33), (식 3.2.34), (식 3.2.35)을 참고하여 수명을 예측 할 수 있음

$$Z_d = \gamma_{ca} C_d t \quad \text{(식 3.2.33)}$$

$$C_d = C_k \beta_{pH} \beta_t \gamma_c \quad \text{(식 3.2.34)}$$

$$\beta_{pH} = 10^{(pH_o - pH)} \quad \text{(식 3.2.35)}$$

여기서 , Z_d = 산성비 침식 깊이의 설계값
γ_{ca} = Z_d의 차이를 교려한 안전계수(1.15)
C_d = 콘크리트의 산성비에 대한 침식 속도 설계값(mm/y)
t = 산성비에 대한 설계 수명(년)
C_k = 콘크리트의 산성비에 대한 침식 기준속도 특성값(mm/y)
β_{pH} = 산성비 농도 계수
β_t = 강우량 계수
γ_c = 콘크리트 재료계수
pH = 산성 농도
pH_o = 침식 기준속도에 따른 산성 농도 기준

(4) 강재 열화에 따른 잔존수명 분석

(가) 피로

○ 피로 개요

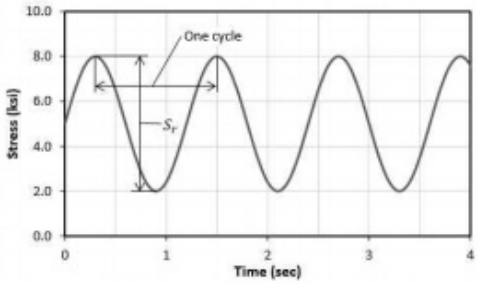
- 피로 저항을 특성화하기 위한 두가지 보편적인 방법이 존재하며, 저항은 실험적으로 응력 기반 접근법(S-N 곡선) 또는 수치적으로 파괴 역학 모델로부터 결정될 수 있음두 가지 방법 모두 피로 저항에 상당한 불확실성을 초래하는데, 그 이유는 부분적으로 피로가 국부적인 손상 축적을 포함하는 복잡한 과정이기 때문임. 또한 적용된 하중의 실제 특성과 불완전성이 연구되지 않았음

○ 응력 수명법(Stress Based Approach)

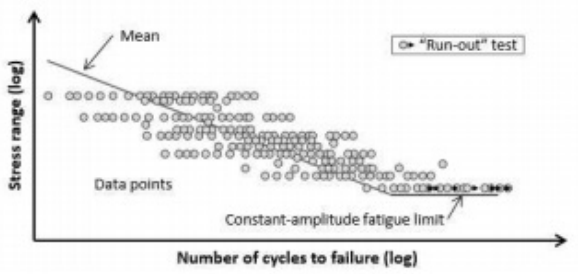
- 피로 저항을 특성화하기 위한 고전적인 실험 방법은 일정한 진폭 응력 범위에서 인장의 주어진 세부 사항을 테스트하고 파단까지의 사이클 수를 측정하는 것임
- 명목상 동일한 세부사항들은 파단까지 다른 일정한 진폭 응력 범위에서 테스트 되며 응력

범위는 응력 이력에서 가장 높은 값과 가장 낮은 값의 차이로 <그림 3.2.39>과 같이 정의됨

- 또한, 다양한 응력 범위에서 세부 사항을 테스트 한 후, 데이터는 다양한 주기적 응력 범위에 대한 파단까지 사이클 수가 <그림 3.2.40>와 같이 그래프로 나타낼 수 있음



<그림 3.2.39> 응력 범위 정의



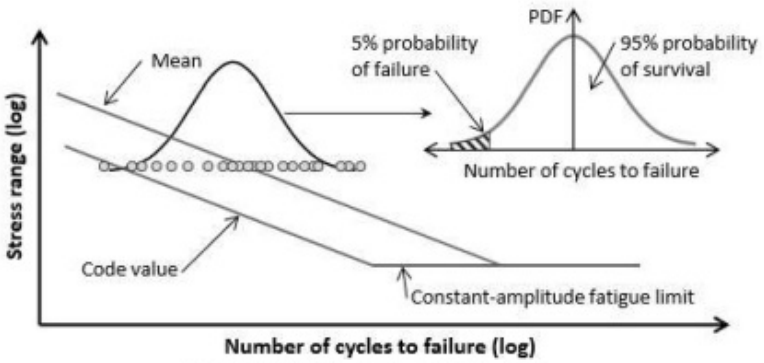
<그림 3.2.40> log-log 그래프

- 응력 범위와 세부 유형이 피로 저항에 영향을 주는 주요 변수라는 결론이 실험적으로 판명되었으며 응력 범위는 일반적으로 공칭 응력 범위라는 점에 유의해야 함
- 불연속 또는 용접부에서 응력의 흐름은 공업 역학(굽힘, 축방향 응력 등)에서 계산된 것 보다 큰 응력 집중이 발생함
- 응력 집중은 세부 사항에 따라 달라지므로 공칭 응력(불연속 또는 용접에서 따로 계산된 응력)은 일반적으로 S-N 곡선을 특성화 하는데 사용됨
- 단일 유형의 세부 사항을 고려하며 피로 저항은 (식 3.2.36)과 같이 나타낼 수 있으며 상수는 피로도 데이터로부터 경험적으로 결정됨

$$N_f = C \times S_r^B \qquad \text{(식 3.2.36)}$$

여기서 , N_f = S_r에서 파단까지의 사이클 수
C = 실험적 상수
S_r = 공칭 일정 진폭 응력범위
B = S-N 곡선 기울기

- 피로 저항을 결정하기 위해 회귀 분석을 이용하여 데이터의 평균을 통과하는 선을 정의하고 있음
- 대부분 금속의 경우 S-N 곡선의 기울기(B)는 -2 ~ -4(대부분 -3을 사용하지만) 사이에서 다양함
- 코드 값은 평균 파단 선을 왼쪽으로 약 2 표준 편차만큼 이동하여 결정됨
- AASHTO Load and Resistance Factor Design(LRFD) Bridge Design Specifications (2010)의 코드 값은 일반적으로 95 %의 생존 확률 (약 5 %의 실패 확률)의 95 % 신뢰 구간에 해당하며 회귀 분석 선은 <그림 3.2.41>과 같음



<그림 3.2.41> 회귀 분석선 정의

- 일정한 진폭 응력 범위에서 무한 피로 수명을 갖는 것으로 가정되는 응력 범위가 있음. 이러한 수평선은 CAFL(constant-amplitude fatigue limit)에 해당하며, CAFL의 결정은 역사적으로 200 만 사이클에 해당하며, 이 시점에서 표본은 "런아웃" 테스트로 결정됨
- 현재 AASHTO LRFD 설계기준(2010)에 사용 된 제안식은 (식 3.2.37)과 같음. 모든 세부항목은 -3의 값을 가지며 <표 3.2.36>을 따름. (식 3.2.37)은 설계에 주로 사용되고 <표 3.2.36>에 제시된 피로 범주에 대한 피로 상수(A)는 약 5%의 파단 확률을 갖는 낮은 한계값임

$$N_f = \frac{A}{S_r^3} \qquad \text{(식 3.2.37)}$$

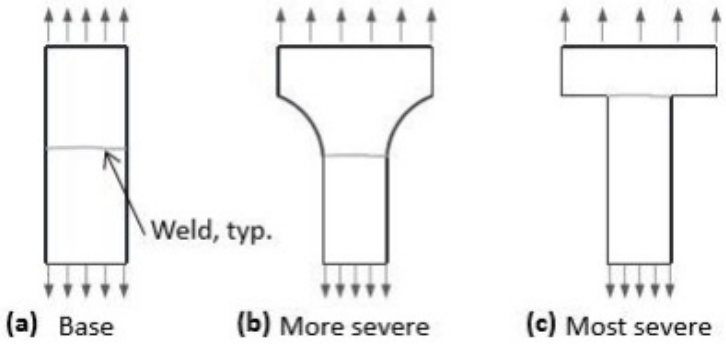
여기서 , A = AASHTO에 정의된 세부 항목에 대한 피로 상수

<표 3.2.36> AASHTO에 정의된 세부 항목에 대한 피로 상수

Category	Fatigue constant, A(ksi-3)	CAFL(ksi)
A	250*108	24.0
B	120*108	16.0
B'	61*108	12.0
C	44*108	10.0
C'	44*108	12.0
D	22*108	7.0
E	11*108	4.5
E'	3.9*108	2.6

- 설계를 위한 AASHTO 피로 분류는 <그림 3.2.42>에서와 같이 S-N 곡선의 형태로 표현식을 그래프로 표현하면 가장 잘 이해할 수 있음
- AASHTO LRFD 설계기준(2010)은 8 가지 피로 범주 각각에 맞는 전형적인 유형의 세부사항을 제공하고 있음카테고리 A는 모재 (즉, 용접 부착물이 없는 평판)의 피로 저항에 해당하고 카테고리 B는 연속 길이 방향 필렛 용접에 해당함
- <(그림 3.2.42(a)>의 표본은 범주 A 세부사항으로 간주되며 CAFL이 높고 피로 상수가 너무 크기 때문에 이러한 유형의 세부사항은 절대로 교량의 피로 저항을 제어하지 못함
- 대신 적용된 응력에 평행하고 수직 인 필렛 또는 홈 용접이 있는 불연속 또는 부착이 있는 세부 설계는 피로 고려 사항에 의해 제어 될 가능성이 더 큼

- 이러한 상황에서 피로 분류는 C와 E '사이에서 다양하며 그림 21-c의 표본은 범주 E 세부 사항으로 분류 될 수 있음
- 반면 그림. 21-b의 시험편에 대한 분류는 전이의 반경에 달려 있음



<그림 3.2.42> 인장 실험 형상에 따른 응력 집중

○ Palmgren-Miner's Rule

- 피로 시험은 역사적으로 일정한 진폭 응력 범위를 사용하여 수행되었지만, 실제 구조물은 다양한 진폭 응력 범위에 영향을 받으며, 교량에 대해서 강도는 교차하는 차량의 하중과 길이에 따라 다름
- 변동 진폭 사이클을 일정 진폭 피로 데이터와 관련시키기 위해서는 누적 손상 이론이 필요하며, Palmgren-Miner 규칙은 단순하며 기록된 피로 데이터와 잘 일치하기 때문에 가장 일반적으로 사용되는 누적 손상 이론임
- 이 규칙은 선형 손상 가설을 따르며 (식 3.2.38), (식 3.2.39)을 따름

$$D_j = \frac{n_j}{N_{f,j}} \qquad \text{(식 3.2.38)}$$

$$D = \sum_{j=1}^{k} D_j \qquad \text{(식 3.2.39)}$$

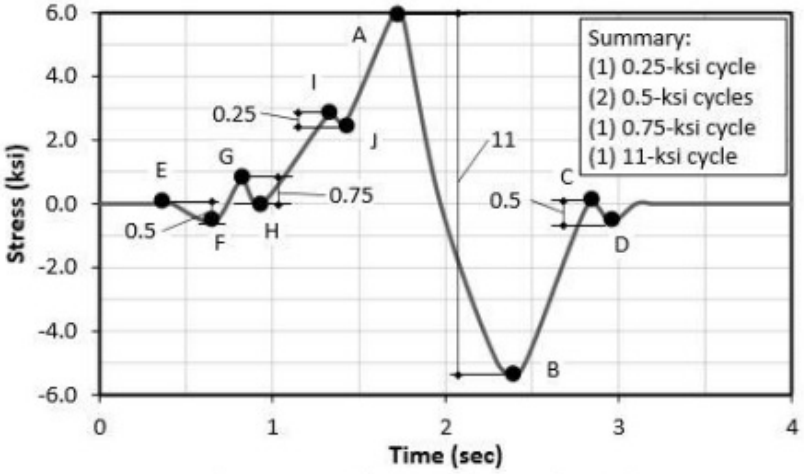
여기서 , D_j = Palmgren-Miner 누적 손상 지표에 대한 사이클 기여도
D = Palmgren-Miner 누적 손상 지표
n_j = $S_{r,j}$에서 측정된 사이클 수
$N_{f,j}$ = $S_{r,j}$에서 파단까지 사이클 수
k = 다른 응력 범위의 수

- Palmgren-Miner 규칙에 따르면, 각 사이클은 손상을 야기하며 야기된 손상은 실제 응력 범위에 대한 파단에 해당하는 사이클 수에 비례하며, 여러 응력 범위에 적용되는 요소의 총 손상은 각 응력 범위에서 누적된 손상을 간단히 합산하여 결정할 수 있음

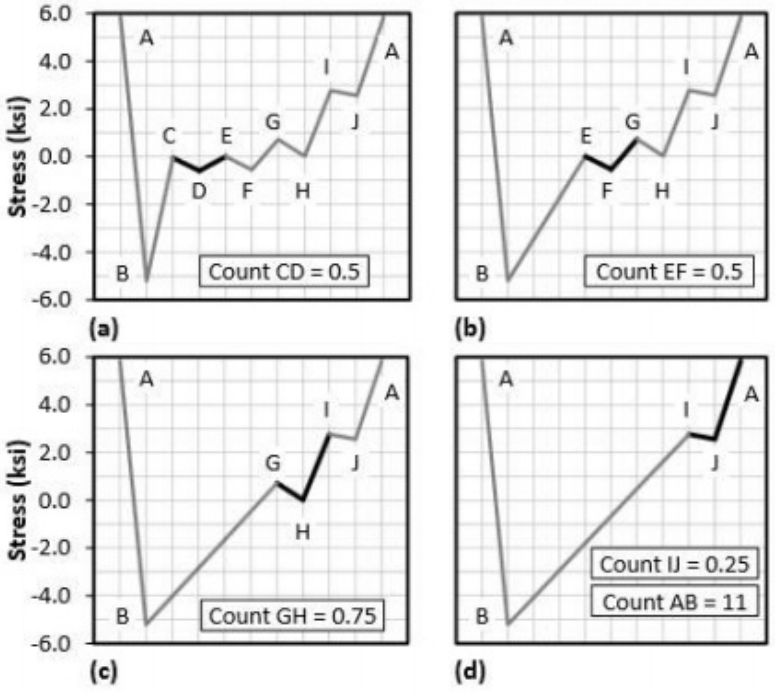
○ Cycle-Counting Method

- Palmgren-Miner의 법칙을 사용하려면 응력 스펙트럼을 결정해야 하기 때문에, 현장 측정을 활용하는 경우 응력 이력을 응력 진폭 히스토그램으로 변환하기 위해 주기 계산 방법이 필요함

- 피로 해석을 위한 네 가지 계산 방법은 ASTM E1049(2011)에 포함되어 있음((1) 레벨 교차 카운팅, (2) 피크 카운팅, (3) 단순 범위 카운팅, (4) 레인플로우 카운팅)
- 각 방법들은 주어진 응력 이력에 대해 서로 다른 응력 스펙트럼을 생성하기 때문에, Palmgren-Miner의 규칙 및 피로도 데이터(S-N 곡선)으로 검증되어야 함
- 간략화된 레인플로우 방법은 피로 분석에 적합하다고 간주되며(Dowling, 1972), ASTM E1049 (2011)의 레인플로우 방법과는 차이점이 있음
- ASTM 레인플로우 방법에서 반 사이클이 계산되는 반면, 단순화된 레인플로우 방법은 응력 이력의 모든 것을 전체 사이클로 계산함
- 이 방법은 Downing and Socie(1982)에 의해 개략적으로 설명되어 있으며 분석은 실시간 또는 오프라인으로 수행할 수 있음
- 단순화된 레인플로우 방법을 사용하여 사이클의 진폭을 결정하고 사이클을 Palmgren-Miner 규칙을 사용하여 유효 응력 범위로 변환하면 결과는 S-N 곡선과 일치함 (Swenson and Frank(1984))
- 간략화된 레인플로우 방법은 <그림 3.2.43>과 같은 변형률/응력 기록에 적용할 수 있음. 이 방법의 첫 번째 단계는 상대적인 위치의 피크와 벨리 (검은 색 점)를 모두 식별하는 것이며, 다음으로 최대 응력(지점 A)을 찾기 위해 내역을 다시 정렬함. 또한, 최대치 이전에 발생한 모든 데이터 포인트는 응력 이력의 끝으로 이동시킴



<그림 3.2.43> 간략화 된 레인플로우 방법



<그림 3.2.44> 간략화 된 레인플로우 카운팅 단계별 과정

- 피크와 벨리는 <그림 3.2.44(a)>에서 나타낸 것과 같으며, 3개의 데이터 포인트에 의해 이력 현상이 형성되었을 때 전체 사이클이 계산됨
- <그림 3.2.44(a)> 세 가지 데이터 점A, B, C를 고려한다면 데이터 포인트 A와 B 사이의 응력 차는 응력 범위 Y로 고정되고 데이터 포인트 B와 C 사이의 응력 차는 응력 범위 X로 지정됨
- Y가 X 와 같거나 작으면 범위가 카운트되고 카운트된 범위와 관련된 데이터 포인트가 삭제되며, Y가 X보다 크면 다음 데이터 요소가 고려된다. 새로운 데이터 포인트는 모든 범위가 계산될 때까지 고려됨

○ AASHTO(2011)

- 교량 평가 매뉴얼 (AASHTO 2011)은 세 가지 계산 레벨에서 남은 피로 수명을 산정하는 접근법을 제공함.: 최소(Minimum), 측정(Evaluation), 평균(Mean).
- AASHTO는 특정 파단 확률을 산출하기 위해 조정된 하중 계수를 사용함
- 응력 범위의 추정치가 실제 응력 범위에 가까워지면 파단 확률은 2% (최소), 16% (평가) 및 50% (평균)에 근접하게됨
- 최소 레벨은 피로 데이터의 평균보다 두 표준 편차가 낮지만 평가 레벨은 평균보다 한 표준 편차가 크며, AASHTO 접근법을 따르기 위한 응력 범위 식은 다음 (식 3.2.40)과 같음
- 두 가지 불확정 요인은 교량 평가 지침 매뉴얼(AASHTO 2011)에 의해 하중 요소로 고려됨: 분석에서 불확정성(Rsa), 가정된 유효 트럭 하중에서 불확정성(Rst). 부분 하중 요소(Rs)는 (식 3.2.41)로 나타낼 수 있다

$$(\Delta f)_{eff} = R_s * \Delta f \qquad \text{(식 3.2.40)}$$

$$R_s = R_{Sa} * R_{st} \qquad \text{(식 3.2.41)}$$

여기서 , Δf = 응력 범위
$(\Delta f)_{ef.}$ = 유효 응력 범위
R_s = 응력 범위 추정 부분 하중 요소 (<표 3.2.21> 참조)
R_{sa} = 부분 하중 계수
R_{st} = 트럭 중량 부분 하중 계수

<표 3.2.37> 응력 범위 추정 부분 계수(R_s)

Fatigue life evaluiton methods	Rs
단순화된 분석에 의한 응력 범위 및 LRFD 설계에 따른 트럭 중량 3.6.1.4 단순화된 분석에 의한 응력 범위 및 하중 이동 연구를 통해 평가된 트럭 하중	1.0 0.95
정교한 분석에 의한 응력 범위 및 LRFD 설계에 따른 트럭 중량 3.6.1.4	0.95
정교한 분석에 의한 응력 범위및 하중 이동 연구를 통해 평가된 트럭 하중	0.90
현장 측정된 변형율에 의한 응력 범위	0.85
평균 피로 수명(모든 방법)	1.00

- 최종적으로 수년간의 피로 수명(Y)는 다음 (식 3.2.42)으로 산정할 수 있고, 저항 계수(RR)은 피로 수명에 의해 결정됨
- 피로 수명 ($(ADTT)_{SL}$)에 대해 평균화된 단일 차선에서의 하루 평균 트럭 수는 (식 3.2.42)를 사용하여 계산해야 하며, AASHTO 접근법은 2%, 4%, 6%, 8%의 성장률을 기준으로 평균 평생 교통량을 추정하는 데 사용할 수 있는 해설 그래프를 제공하고 있음
- 응력 범위 싸이클 수 (n)는 LRFD 설계(6.6.1.2.5-2) <표 3.2.38> (AASHTO LRFD Specifications 2010), 영향선 또는 현장 측정을 통해 추정할 수 있음

$$Y = \frac{R_R * A}{365 * n * (ADTT)_{SL} * ((\Delta f)_{eff})^3} \qquad \text{(식 3.2.42)}$$

여기서 , R_R = 저항 계수
n = 트럭 통행에 따른 응력범위 사이클 수
$(ADTT)_{SL}$ = 단일 노선에 하루당 평균 트럭 통행 수
A = 피로상수

<표 3.2.38> 트럭 통행량 당 사이클,n

Longitudinal Members	Span Length	
	>40.0ft	≤40.0ft
Simple Span Girders	1.0	2.0
Continuous Girders		
1) near interior support	1.5	2.0
2) elsewhere	1.0	2.0
Cantilever Girders	5.0	
Orthotropic Deck Plate	5.0	

Connection Subjected to Wheel Load Cycling		
Trusses	1.0	
Transvers Members	Spacing	
	>20.0ft	≤20.0ft
	1.0	2.0

(5) 열화 종류별 잔존수명 예측 방법 정리 및 항목 도출

○ 본 연구에서는 안전진단 과업 범위 내에서 확보할 수 있는 정보를 활용하여 산정 가능한 물리적 수명 중 노후화에 의한 잔존수명 예측 기법에 대해 조사·분석 하였음

○ 구조물의 잔존수명을 예측하기 위해 RC의 경우 염해, 탄산화, 알칼리골재, 동해, 화학적 침식에 대한 열화가 고려됨. 하지만, 알칼리골재 잔존수명 예측에 대한 정량적인 산정식 연구가 없고 화학적 침식은 특수한 환경에만 발생하며 환경적 요인에 따라 열화 매커니즘이 다양해 획일화된 잔존수명 예측 과정 정립에 어려움이 많음

○ 또한, 잔존수명 예측식을 BIM에 적용하기 위해서는 해당 식 계산에 필요한 기초자료의 유무도 고려해야함. 따라서 본 연구에서 조사한 잔존수명 예측 기법 중 기초자료의 확보가 용이하며 실험 및 설계기준 수록 등의 추가적인 검증이 필요하지 않는 산정식을 선정하여 BIM에 적용하고자 함

○ <표 3.2.39>에 본 연구에서 정리한 잔존수명 예측 기법을 정리하였으며, 안전진단의 항목과 연계하여 정보의 재활용성을 높이기 위해 항목 또한 정리하였음

<표 3.2.39> 구조물 잔존수명 예측식 및 항목 정리

재료	열화	출처	잔존수명 예측식	항목
콘크리트	염해 (추정)	▪ 한국시설안전공단(2017) ▪ 한국콘크리트학회(2012)	$D = 10^{[4.5(W/C)^2 + 0.14(W/C) - 8.47]}$ $C_{d,limit} = (C_s - C_i)\left(1 - erf\frac{0.1x_c}{\sqrt{4Dt_{limit}}}\right) + C_i$ $T = t_{limit} - t$	▪ 물/시멘트비 ▪ 표면 염화물 농도 ▪ 초기 염화물 농도 ▪ 설계피복두께 ▪ 철근부 임계 염화물 농도 ▪ 공용연수
	염해 (조사)	▪ 한국시설안전공단(2017)	$C_d(x,t) = (C_s - C_i)\left(1 - erf\frac{0.1x}{\sqrt{4Dt}}\right) + C_i$ $C_{d,limit} = (C_s - C_i)\left(1 - erf\frac{0.1x_c}{\sqrt{4Dt_{limit}}}\right) + C_i$ $T = t_{limit} - t$	▪ 염화물 농도 ▪ 측정깊이 ▪ 공용연수 ▪ 초기 염화물 농도 ▪ 표면 염화물 농도 ▪ 설계피복두께 ▪ 철근부 임계 염화물 농도
	탄산화 (추정)	▪ 일반식 ▪ 국토교통부(2009)	$T = \left[\frac{x_c}{R(-3.57 + 9.0\,W/B)}\right]^2 - t$	▪ 환경영향계수 ▪ 공용연수 ▪ 설계피복두께 ▪ 물/결합제비
	탄산화 (조사)	▪ 일반식	$A = \frac{D}{\sqrt{t}}$ $T = \left(\frac{x_c}{A}\right)^2 - t$	▪ 탄산화깊이(측정) ▪ 공용연수 ▪ 설계피복두께
	알칼리 골재	**정량적인 예측식이 존재하지 않음**		

	동해	▪ Fahim(2013)	$C_a = \begin{cases} 275w_a + 118.25w_a^2, & w_a \geq 4\% \\ 118.25w_a^2, & w_a < 4\% \end{cases}$ $C_b = 4.2 - 8.0(W/C) + 3.2(W/C)^2$ $T = \frac{D_l}{100N_a}(C_aC_b - 100) - t$	▪ 연간 동결융해 횟수 ▪ 임계 동결 손상 정도 ▪ 콘크리트 공기함유량 ▪ 물/시멘트비 ▪ 공용연수
	화학적 침식	**특수한 환경에서만 발생하며 획일화된 잔존수명 예측 과정 정립이 어려움**		
강재	피로	▪ AASHTO(2011)	$ADTT_{SL} = p \times ADTT$ $T = \frac{0.75A \times 10^{11}}{365n(ADTT_{SL})(\triangle f)^3} - t$	▪ 단일 노선의 교통량 계수 ▪ 한방향의 평균 트럭 통행수/일 ▪ 트럭 한 대의 응력범위 반복횟수 ▪ 피로상수 ▪ 활하중 응력범위 ▪ 공용연수

라. 교량 통합 유지관리 정보체계 구축

(1) 정보 항목 정리 및 연계성 검토

○ BIM은 3D 정보모델을 활용하여 시설물을 전생애주기에 걸쳐 관리할 수 있는 기술로써 단순히 유지관리 이력을 축적하는데 그치지 않고 정보의 가공 및 재활용을 통해 효율적으로 시설물을 관리할 수 있도록 하는 것에 목표를 두어야 함

○ 앞서 언급한 바와 같이, 교량의 잔존수명과 가치는 유지관리의 효율적인 의사결정에 활용될 수 있기 때문에, 기존 연구 및 지침서 조사·분석을 통해 각 열화 종류에 대한 잔존수명 산정 방법과 가치평가 방법에 대해 검토함

○ 안전진단, 잔존수명, 가치평가에 대한 정보를 유동적으로 연계하여 BIM에 적용할 수 있는 정보체계를 구축하기 위해 잔존수명 및 가치 산정에 필요한 세부항목을 정리하여 <표 3.2.40>에 나타내었고 연계 방향성을 검토함

○ 안전진단의 점검유형은 외관조사, 조사·재료시험, 구조안전성, 사용성능으로 구분된다. 각 점검유형에 대한 세부항목은 「안전진단 및 정밀안전진단 세부지침」, 「시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침(성능평가 편)」의 부재별 세부 점검 항목을 참조하여 잔존수명과 가치평가에 필요한 세부항목과의 연계성을 검토함

○ 교량의 잔존수명 산정에 필요한 세부항목은 계수 및 상수, 측정값, 부재 속성 정보, 교량의 기본 정보로 구분됨

- 계수와 상수는 각 열화에 대한 산정식이 제안되어 있는 연구나 지침서의 값을 활용해야하며. 측정값인 측정깊이에 따른 염화물농도, 탄산화 깊이, 연간 동결융해 횟수, 일일 평균 트럭 통행량은 안전진단시 시행하는 조사·재료시험과 사용성능 평가에서 측정한 값과 연계가 가능함
- 물/시멘트비, 물/혼합제비, 콘크리트의 공기 함유량, 설계 피복두께는 부재의 기본 정보, 공용수명은 교량의 기본 정보에 해당됨. 이와 같은 교량과 부재의 정보는 설계 및 시공 단계에서 결정되기 때문에 유지관리 보고서나 구조계산서 등을 통해 확보가 가능하며, BIM 구축시 기본적으로 제공되어야 함

○ 교량의 가치 산정에 필요한 세부항목은 교량 속성 정보, 유지보수 정보, 감가 정보, 실질 할인율로 구분됨

- 교량의 현재 공사비를 산정하기 위해 필요한 건설비, 용지비, 부대비, 교량 면적은 교량 기본 정보로써 확보가 가능하지만, 교량 건설 평균 단가는 교량의 특성을 고려하여 결정하거나 지침서에서 제안하는 값을 사용해야 함
- 상시 유지관리 비용, 보전비용, 개선비용은 유지보수 정보에 해당되며, 보전비용과 개선비용은 교량의 상태를 보전하거나 개선하기 위해 시행하는 보수·보강 정보와 연계가 가능함
- 교량의 감가 방법은 정액법과 BHI(Bridge Health Index)를 활용한 방법이 주로 사용되는데, 정액법을 사용하기 위해서는 잔존가치, 현재 공사비, 잔존수명, 공용수명 정보가 필요함. 잔존가치는 직접 산정하거나 지침서에서 제시한 값을 사용할 수 있으며, 공용수명은 교량의 기본 정보와 연계, 잔존수명은 앞서 선정한 잔존수명 산정식을 통해 계산된 값과 연계가 가

능함. BHI를 활용한 감가는 교량의 상태를 고려한 방법이며 안전진단 결과인 상태평가, 상태적 안전성 등급과 연계할 수 있음

- 실질할인율은 취득원가를 통해 교량의 가치를 산정할시 역사적 가치를 현재의 가치로 나타내기 위해 필요한 항목이며, 화폐 가치 인플레이션율을 고려하여 산정되어야 함

<표 3.2.40> 각 점검유형별 항목 및 세부항목

점검유형	구조체	부재	재료 및 항목 구분 기준	항목	세부항목
안전진단					
외관조사	상부구조	바닥판	콘크리트	균열	손상 유형 손상물량 손상물량 단위 손상등급 점검자 의견
				열화 및 손상	
			강재	모재 및 연결부 손상	
				포면열화	
		거더	콘크리트	균열	
				열화 및 손상	
			강재	모재 및 연결부 손상	
				포면열화	
	하부구조	교대		균열, 변위	
				열화 및 손상	
		교각		균열, 변위	
				열화 및 손상	
		기초		기초 손상	
				지반 안전성	
	받침	교량 받침	고무	본체 손상	
				받침 콘크리트 손상	
			강재	본체 손상	
				받침 콘크리트 손상	
	텐던	강연선		강연선 손상	
				시멘트 그라우트 손상	
				보호관 손상	
	기타부재	신축이음		본체 손상	
				후타재 손상	
		교면포장		포장 불량	
				배수 불량	
		배수시설		배수 불량	
		보호시설	콘크리트	본체 손상	
			강재	본체 손상	
	2차부재	가로보, 세로보	콘크리트	균열	
				열화 및 손상	
			강재	모재 및 연결부 손상	
				포면열화	
조사·재료 시험	구조체	부재	강재	발청 및 도장열화	시험 항목 측정 장비 시험값 시험값 단위 시험 등급 점검자 의견
				도장 두께	
				대기 환경	
				강설 횟수	
			콘크리트	염화물 침투량	
				탄산화 깊이	
				피복 콘크리트 품질	
				염해환경	
				동해환경	
구조 안전성			도로교량	공용 내하력	구조안전성 등급 점검자 의견
				기초 안전성	
			철도교량	주행안전성	
사용성능			도로교량	포장상태	사용성능 등급 점검자 의견
				교량 조명	
				진동사용성	
				점검시설	
				교통량	
			철도교량	승차감	
				점검시설	
				통행량	
잔존수명					
잔존수명	구조체	부재	콘크리트	염해(추정)	임계 염화물 농도
					표면 염화물 농도
					물/시멘트비
					설계 피복 두께

점검유형	구조체	부재	재료 및 항목 구분 기준	항목	세부항목
				염해(조사)	측정 깊이
					염화물 농도(깊이)
					임계 염화물 농도
					초기 염화물 농도
					표면 염화물 농도
					설계 피복 두께
					공용 연수
				탄산화(추정)	물/결합재비
					설계 피복 두께
					공용 연수
					환경 영향 계수
				탄산화(조사)	설계 피복 두께
					공용 연수
					탄산화 깊이
				동해	연간 동결·융해 횟수
					임계 동절 손상 정도
					콘크리트 공기 함유량
					물/시멘트비
			강재	피로	유효 응력 범위
					부분 하중 계수
					저항 계수
					피로 상수
					단일 노선의 교통량 계수
					일간 평균 트럭 통행량
					응력 범위 사이클 횟수
가치평가					
가치평가			취득원가	현재 공사비	건설비
					용사비
					부대비
				유지관리비	일상 유지관리비
					보전비
					개선비
				감가상각비 (정액법)	잔존가치
					현재 공사비
					잔존수명
					공용수명
				감가상각비 (BHI)	결함도 지수
				실질 할인율	실질 할인율
			대체원가	현재 공사비	건설 평균 단가
					교량 면적
				감가상각비 (정액법)	잔존가치
					현재 공사비
					잔존수명
					공용수명
				감가상각비 (BHI)	결함도 지수

(2) 교량 및 부재 속성정보

○ 교량 유지관리 BIM 구축시, 각 점검에 대한 이력 정보뿐만 아니라 교량 및 각 부재에 대한 정보 또한 포함되야 하며 재활용 될 수 있도록 정보체계를 구축해야 함

○ 교량 기획, 설계, 시공 단계에서부터 교량과 부재에 대한 정보들이 결정되고 정보 항목들이 다양하나, 본 연구에서는 유지관리에 필요한 정보에 초점을 맞춰 조사·분석하였음

(가) 교량 속성정보

○ 「안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(한국시설안정공단, 2017)」에서는 안전진단 수행 후 보고서 작성시에 <그림 3.2.45>과 같이 해당 교량에 대한 현황표 작성을 요구하고 있음

○ 현황표에 작성된 각 교량에 대한 기본정보는 안전진단 수행시에 필수적으로 작성되어야 하기 때문에, 이력이 손실되지 않으며 정보의 확보가 용이함. 또한, 각 정보들이 잔존수명 예측과 교량의 가치를 평가할 때 활용될 수 있으므로 BIM 유지관리 정보체계에 포함하고자 함

○ 본 BIM 프로그램에 포함하고자 하는 교량 기본정보는 다음과 같음. 시설물명, 교량 ID, 관리번호, 준공년월일, 위치, 설계하중, 노선명, 제원(연장), 제원(폭), 구조형식(상부), 구조형식(하부), 기초형식(교대), 기초형식(교각), 받침형식, 신축이음, 교차시설물, 통과높이, 부착시설내용

□ 교량

○○교 현황표

작성일 : 년 월 일

구 분		내 용	구 분		내 용
시설물명			시설물번호		
준공년월일			관리번호		
시설물위치					
설계하중			노선명(이정)		
제원	연장	L=○○m, (○@○○=○○m)			
	폭	B=○○m, (보도+차도) ○차로			
구조형식	상부		기초형식	교대	
	하부			교각	
교량받침			신축이음		
교차시설물 (도로, 철도, 하천)			통과 높이		
부착시설내용					
기 타		※ 종·평면도 ※ 준경 검결사항(붕피유발부재, 보수·보강 부위 등을 기재) ※ 별지 이용			

<그림 3.2.45> 교량 기본 현황표

(나) 각 부재 속성정보

○ 각 부재에 대한 정보는 기획, 설계 단계에서 결정되며 시공 단계에서 확정됨. 안전진단 보고서에는 각 부재에 대한 정보를 작성하는 항목이 따로 존재하지 않기 때문에, 교량 설계시에 작성된 구조설계서를 통해 정보를 확보해야 함

○ 구조설계서에는 각 부재에 대한 설계시 필요한 부재 정보를 포함하고 있으나 그 양이 방대하고 실제로 모든 정보가 유지관리에 활용될 수 없다는 점을 감안하여, 본 연구에서는 국토교통부에서 관리하는 특수교량 관리 시스템인 BMS(Bridge Management System)를 참조하여 부재 정보 항목을 구성하였음

○ <표 3.2.41>에 BMS에 포함되어 있는 각 부재별 기본정보를 나타내었으나, 각 부재별로 정보 항목들이 상이해 정보 관리가 비효율적이고 사용자 관점에서도 불편한 단점이 있음

○ 따라서 본 연구에서는 각 부재별로 필요한 기본정보를 <표 3.2.41>와 같이 통합하였으며 잔존수명 예측과 가치평가에 필요한 정보 항목들도 추가하였음

<표 3.2.41> 각 부재에 대한 필요 속성정보

부재	부재별 속성정보(BMS)	속성정보(통합)
거더	▪ 부재 ID ▪ 부재 Type ▪ 재료 물성치 ▪ 제원 ▪ 비용	▪ 부재 ID ▪ 부재 형식 ▪ 구성 재료 ▪ 제원 ▪ Capacity ▪ 물량 ▪ 제작 비용 ▪ 콘크리트 재료 물성치 - 물/시멘트비 - 물/결합재비 - 설계 피복두께 - 압축강도 ▪ 강재 재료 물성치 - 항복강도 - 극한강도
주탑	▪ 부재 ID ▪ 부재 Type ▪ 단면 제원 ▪ 강재 물성치 ▪ 콘크리트 물성치 ▪ 기초 형식 ▪ 비용	
케이블	▪ 부재 ID ▪ 부재 위치 ▪ 제원 ▪ 단면적 ▪ 배치 Type ▪ 허용 응력 ▪ 케이블 댐퍼 ▪ 비용	
타이다운케이블	▪ 부재 ID ▪ 부재 Type ▪ 허용 응력 ▪ Capacity ▪ 배치 Type ▪ 설계 강도 ▪ 비용	
신축이음	▪ 부재 ID ▪ 부재 Type ▪ Capacity ▪ 제품 정보 ▪ 비용	
교량받침	▪ 부재 ID ▪ 부재 Type ▪ 제품 정보 ▪ 비용	
교대	▪ 부재 ID ▪ 부재 Type ▪ 재료 물성치 ▪ 비용	
교각	▪ 부재 ID ▪ 부재 Type ▪ 재료 물성치 ▪ 비용	

(3) 유지관리 통합 정보체계 구축

○ 유지관리에 BIM을 적용하기 위해서는 유지관리에 필요한 정보가 3D 모델과 연계되어야 하며, 각 정보들의 수준이 적절하게 분배되어야 함. 본 연구에서는 유지관리에 BIM을 적용하기 위해서 정보수준을 4단계로 구분함. Lv.1은 교량 구분, Lv.2는 점검계획 및 점검유형, Lv.3은 구조체 및 부재, Lv.4는 각 점검유형의 이력을 축적하고 가공하기 위한 세부항목으로 구성됨

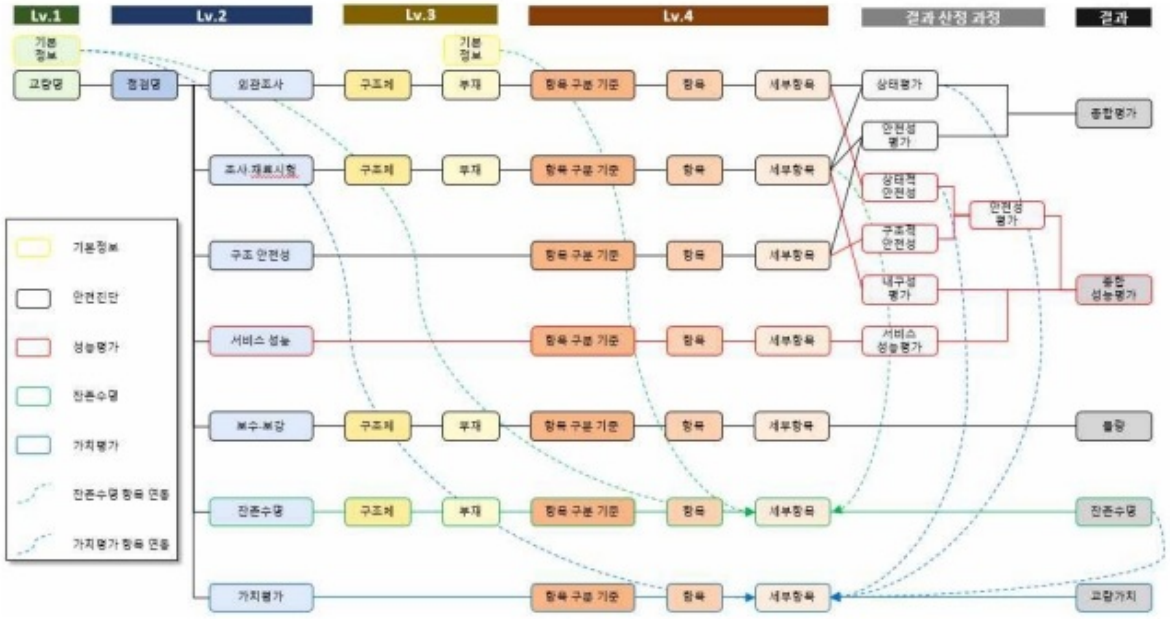
○ Lv.1은 다수의 교량에 대한 관리를 하기 위해서 교량명과 해당 교량에 대한 공용수명, 건설비용, 교량 면적 등의 기본 정보를 포함

○ Lv.2는 다수의 점검 정보를 관리하기 위해서 점검계획과 점검유형으로 구성됨. 점검계획은 점검연도와 정기정검, 정밀점검 등의 점검종류를 포함하고 점검유형은 외관조사, 조사·재료시험, 구조 안전성, 사용성능, 보수·보강, 잔존수명, 가치평가를 포함

○ Lv.3은 3D 모델에 대한 정보수준을 나타냄. 외관조사, 조사·재료시험, 보수·보강, 잔존수명 점검유형에 대한 항목 및 세부항목은 부재의 종류에 따라 상이하기 때문에 부재의 하위 수준으로 구축되어야 함. 또한, Lv.3에서는 물/시멘트비, 설계피복두께, 콘크리트 공기 함유량 등의 부재 기본 정보를 포함

○ Lv.4는 각 점검유형과 부재에 따른 구분기준, 항목, 세부항목을 나타낸다. 각 항목들을 재료 및 교량 형식, 가치평가 방법에 따라 구분하기 위하여 구분기준을 추가하였으며, 항목 및 세부항목은 <표 3.2.40>를 통해 구성됨

○ 외관조사, 조사·재료시험, 구조 안전성, 사용성능, 보수·보강에 대한 항목는 안전진단과 교량에 대한 보수·보강시에 누적되는 정보이며, 교량과 부재에 대한 기본 정보는 설계 및 시공 단계에서 결정됨. 위와 같은 정보를 가공하여 교량의 잔존수명을 예측하고 가치를 평가하여 유지관리에 대한 의사결정시 활용할 수 있음. 유지관리에 BIM을 적용하고 정보의 재활용성을 향상시키기 위해 통합 정보체계를 구축하고 앞서 분석한 연계 방향성을 고려하여 <그림 3.2.46>에 나타냄

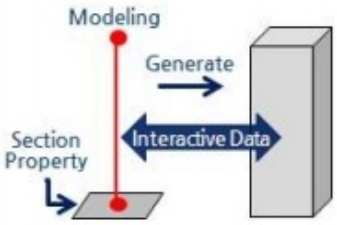


<그림 3.2.46> 교량 유지관리 통합 정보체계

2. 교량구조물 BIM 라이브러리 구축 및 모델링 프로그램 개발

가. 교량 3D 모델 생성 기술

○ 템플릿 모델링 작업환경을 포함한 프레임워크와 DB 구축
- 템플릿 라이브러리 기반 모델이 Master Line에 참조되어 메인 모델의 DB로 구성되는 엔진을 설계 및 구현
- Master Line의 형상 변화에 따라 모델 갱신 가능
- Direct Modeling 기반 구현으로 1D/2D Property 기반의 부재정보와 3D Solid Shape의 CAD를 연계하는 DB 구현



<그림 3.2.47> Solid형상 기반의 부재모델링



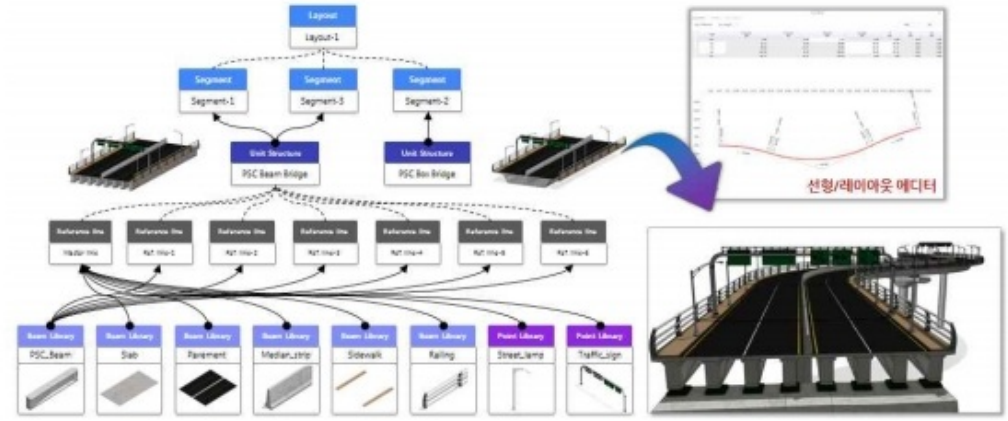
<그림 3.2.48> Parasolid Model Import

- 기존 상용 3D CAD 형상 데이터를 import 하여 제품에서 재활용 할 구 있는 기반이 구현됨. Template Library 및 3D 모델링 환경에서 모두 사용이 가능한 구조로 개발



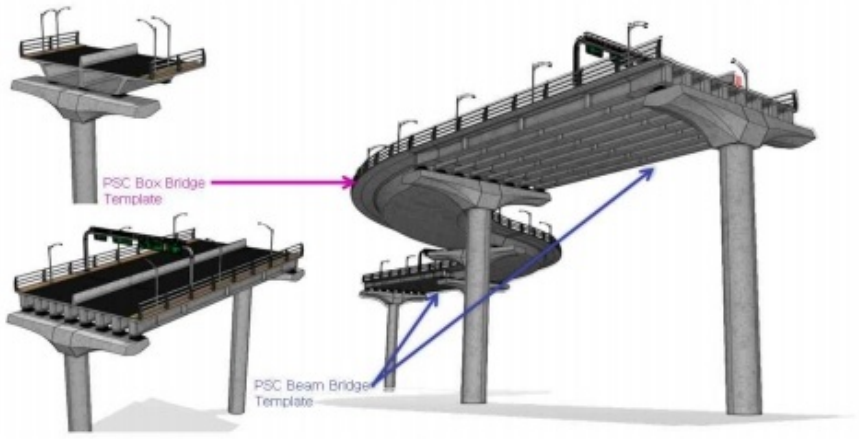
<그림 3.2.49> 3D CAD 기반 모델링

○ 교량 구조물 구조부재의 3D 정보모델 생성을 위한 개방형 템플릿
- 삽입, 편집, 저장 등 라이브러리 모델링 객체의 관리 기능 개발
- 정보 객체의 그룹 연산 기능 및 기하/관례/논리 연산 기능 개발



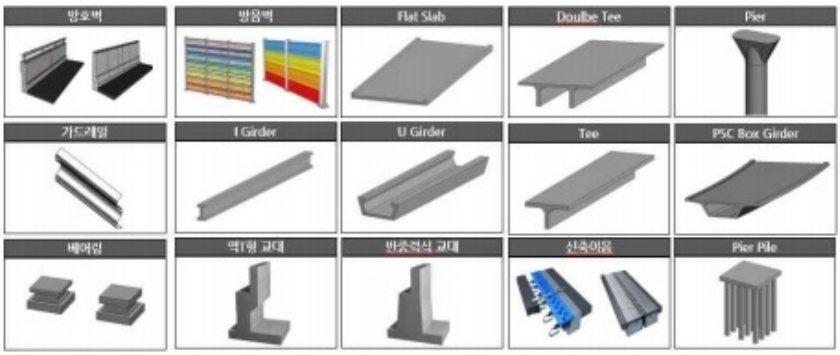
<그림 3.2.50> 라이브러리 정보 객체의 관리 및 연산 알고리즘

- 표준화된 거더 교량 형식에 대하여 빠르게 정보 모델을 정의할 수 있는 템플릿 구성
- 국내 도로공사에 표준화된 WBS 체계에 따른 클래스로 부재 세트를 정의함은 물론 교량 구조물의 표준화된 구성요소가 포함되어 있음
- 실제 구조물의 길이 변화에 따라 파라메트릭하게 변경되도록 구성



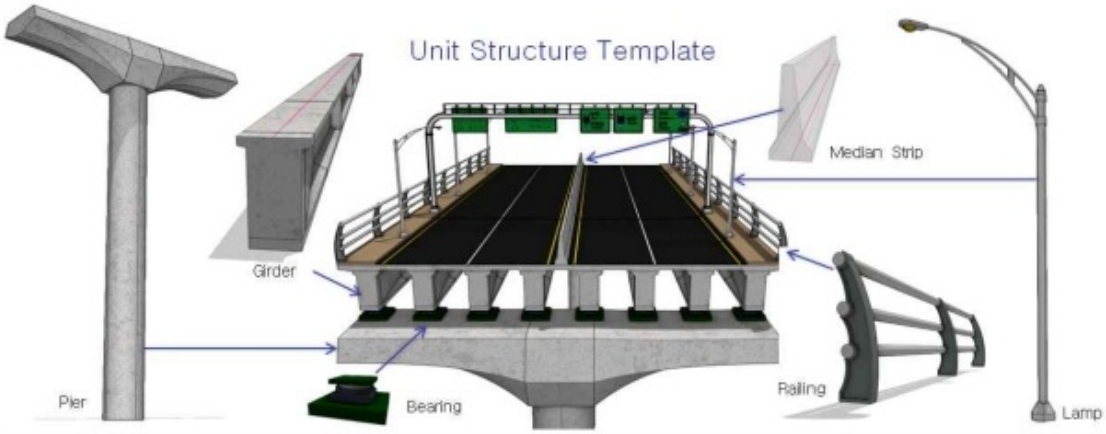
<그림 3.2.51> 길이 변화에 따른 파라메트릭 모델링

- 정보객체 간의 Boolean 등 기하/관계/논리 연산기능
- WBS 기반의 3D 정보모델(선형정보, 보강재, 다양한 인프라 구조물 전용 템플릿/라이브러리) 기준 상세 정보 모델 템플릿 45종 개발



<그림 3.2.52> 교량 구조물의 대표 정보모델 템플릿 구성

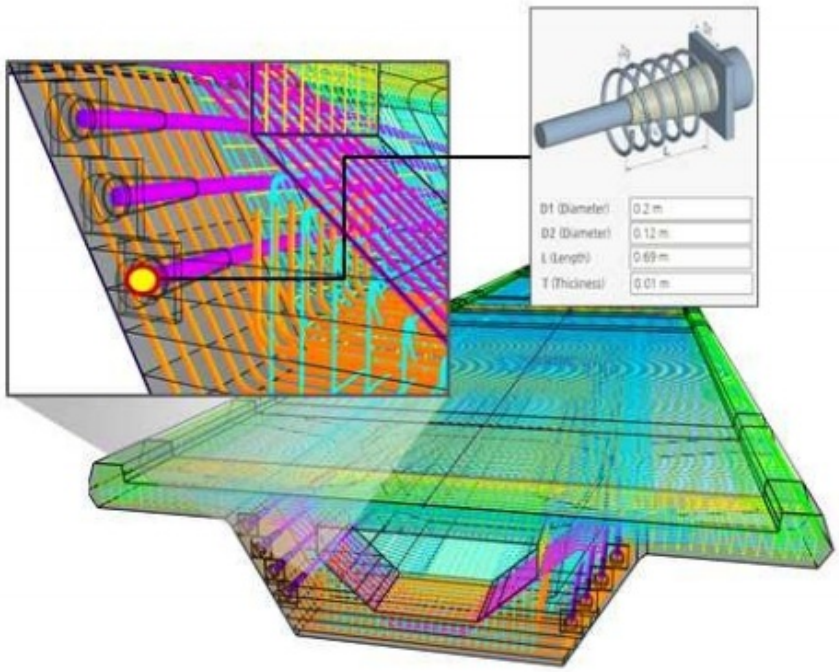
- 라이브러리 모델링 객체의 관리 기능(삽입/편집/저장)과 정보 객체의 그룹 연산 기능 개발
- 도로/철도 선형에 따라서 라이브러리가 조합된 템플릿이 비정형으로 변형되는 모델링 환경과 잦은 설계 변경 및 연관 프로젝트에서 높은 사용성 및 재활용성을 지원함으로 다수의 교량의 효율적 모델링 가능



<그림 3.2.53> 교량의 단위 구조 템플릿 구성

- 기존 층 개념 중심의 건축기반 BIM SW의 사용성 문제 해결
- 교량 구조물을 설계 실무자 수준에서 3D 정보모델 생성이 가능해짐

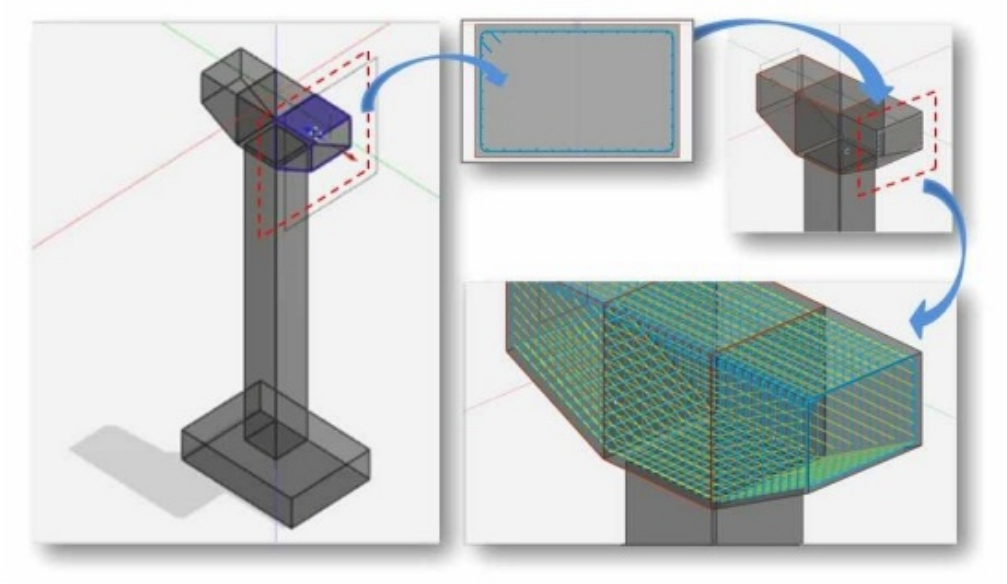
○ 구조물 보강재(철근/강연선)에 대해 파라메트릭 모델링
- 단면 형상과 보강재의 배치 및 현상 연동
- 보강재 객체와 일반 3D 객체간의 제약조건(간섭, 충돌, 결함)
- 대규모 인스턴스 객체 렌더링을 위한 LOD(Level of Detail) 지정



<그림 3.2.54> 보강재 파라메트릭 모델링 및 대규모 객체 렌더링

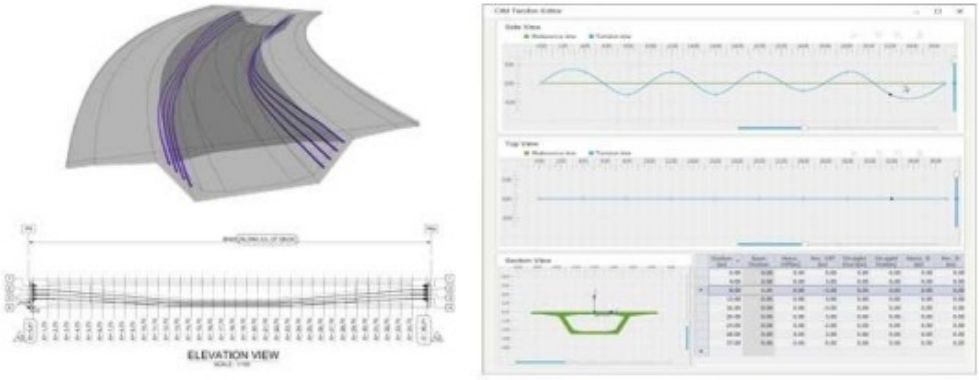
- 보강재 정보로부터 시공도면 및 철근상세 수량 산출 가능

- 일반 PC 사용환경에서 대규모 보강재에 대한 우수한 조작 성능을 보임(세계최고수준)



<그림 3.2.55> 보강재 모델링 및 보강재 연동

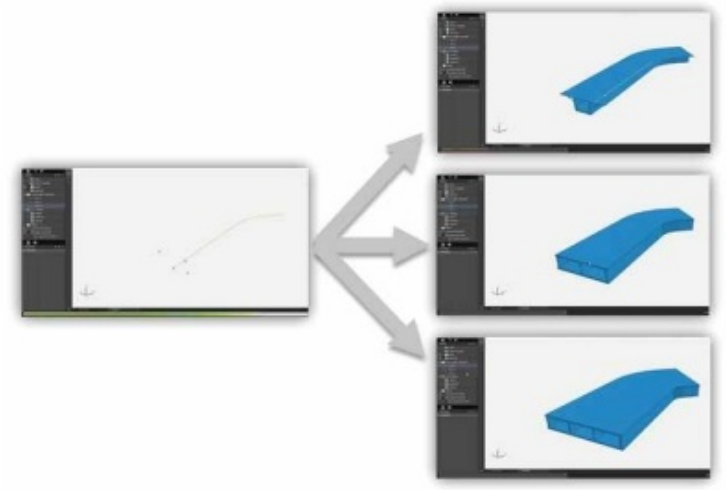
- 2D 그래프 형태로 평면, 측면, 단면 뷰를 구성하여 3차원 좌표를 동시에 확인하며 텐던 입력 및 편집 가능



<그림 3.2.56> 보강재 파라메트릭 모델링 및 대규모 객체 렌더링

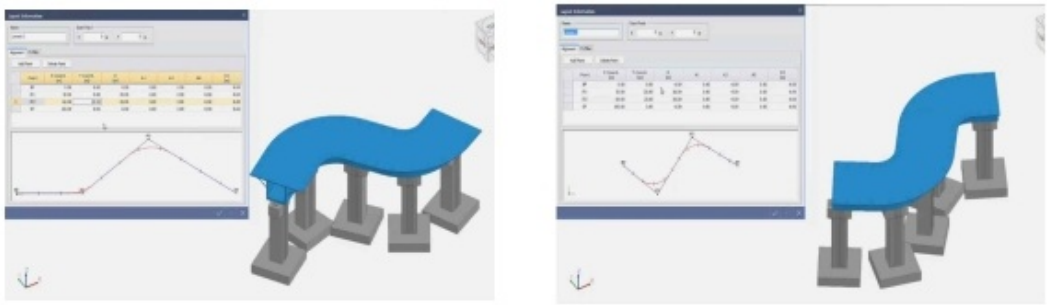
○ 선형에 따라 Linear Library 할당

- 직선, 곡선 및 선형 그리드라인에 대해 Linear Library를 할당/해제 하는 기능 개발.



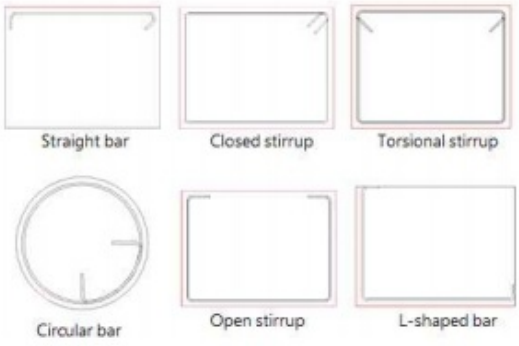
<그림 3.2.57> Linear Library 모델 업데이트

- 도로 선형의 진행 경로를 따라 함께 연장, 반복되는 속성을 부여할 수 있는 기능 개발. 모델 업데이트 시 Linear Library 모델에 설정되어 있는 부재의 속성정보 유지 가능



<그림 3.2.58> 선형 파라메트릭 업데이트

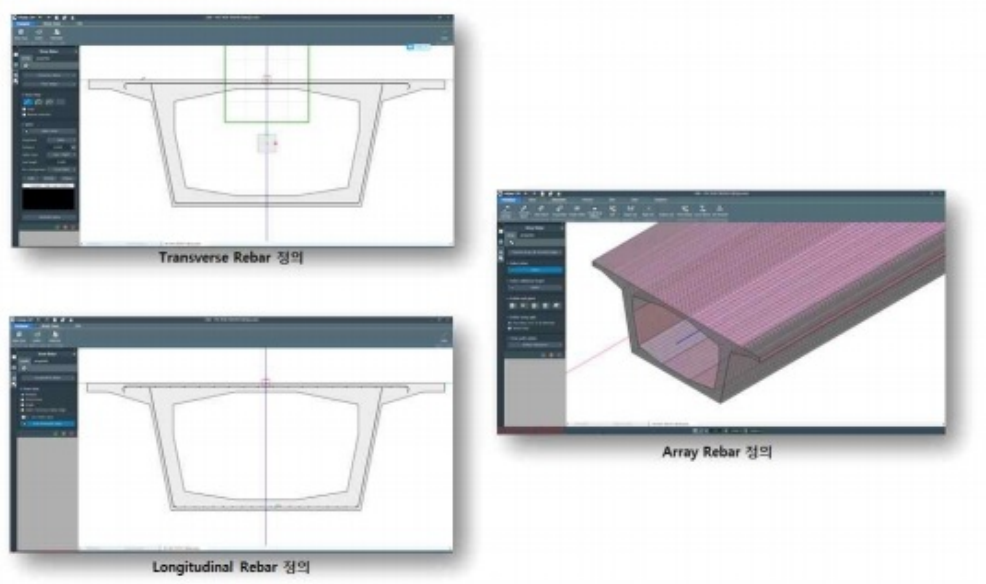
- 부재 형상과 연동되는 철근 객체 생성
- 철근 입력 파라미터로부터 형상정보를 가지는 정보객체를 생성하기 위한 기반기술 개발
- 철근 특성, Hook 형상, 단면 형상과의 관계 정보를 조합하여 철근 3D CAD 객체를 생성
- 부재와 철근 그룹, 철근 그룹과 철근 객체가 연동되어 입력/갱신될 수 있는 DB 설계



<그림 3.2.59> Rebar Library

- 부재 단면 View에서 철근 파라미터를 가시적으로 입력하고 결과를 확인할 수 있는 환경 구축

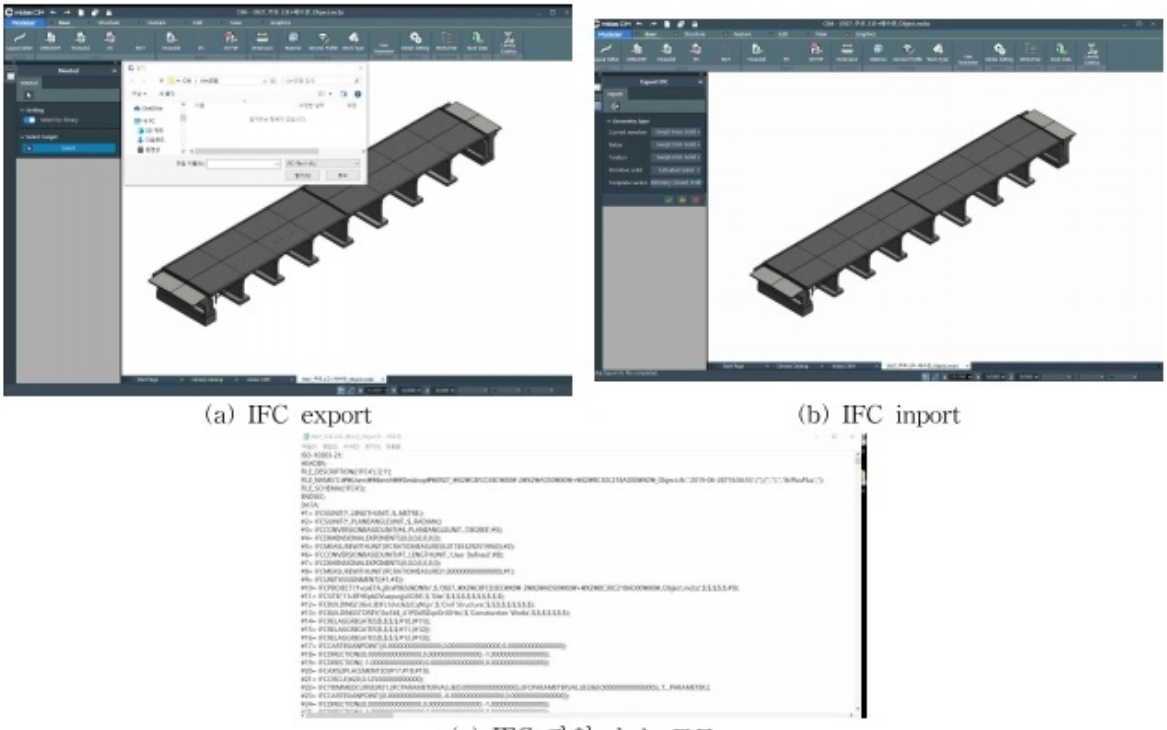
- 부재 위치와 길이의 변경, 단면 치수 변경에 따라 철근 그룹의 철근 객체 갱신 기능



<그림 3.2.60> Rebar 정의

○ IFC export/import 기능

- IFC형식의 파일로 export 및 import 가능



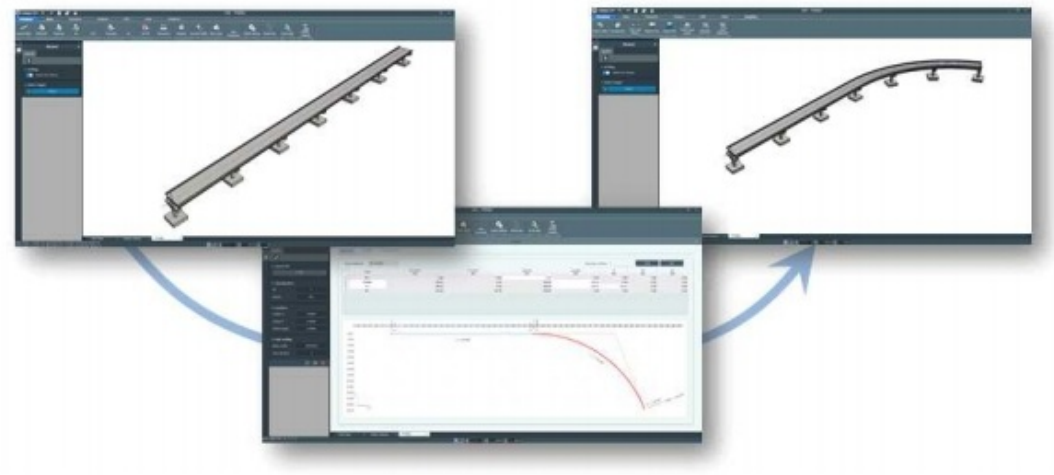
(a) IFC export (b) IFC inport

(c) IFC 파일 소스 코드

<그림 3.2.61> IFC 호환성 검토

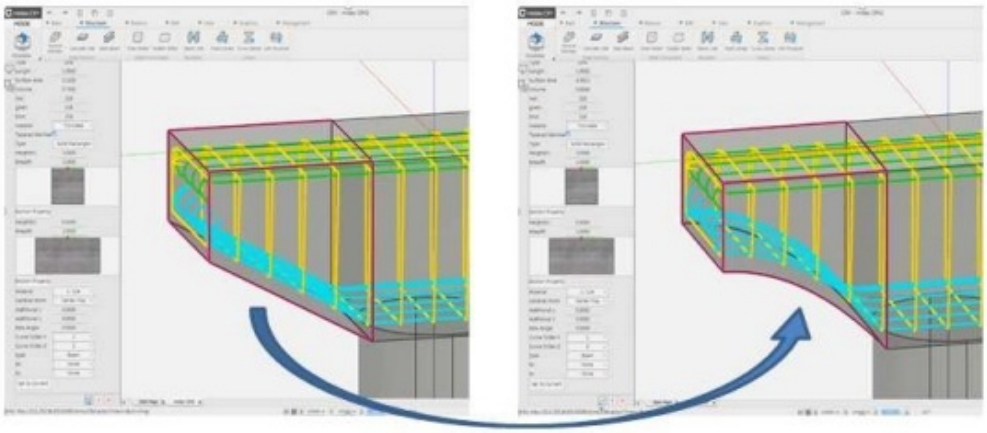
나. 교량 구조물의 형상 업데이트 기술

○ 템플릿 라이브러리 기반 구현으로 형상 모델 갱신
- Master Line의 형상 변화에 따라 형상 모델이 연동하여 갱신되도록 구현 됨



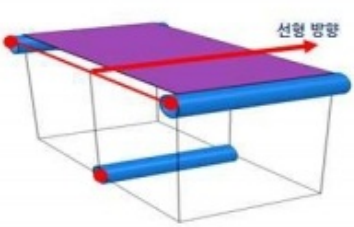
<그림 3.2.62> Master Line에 따른 형상 갱신

○ 교량 구조물의 보강재(철근/강연선)에 대한 정보관리 기술
- 단면 형상과 보강재 배치/현상 연동에 따라 비정형/변단면 부재형상에 대한 보강재 일괄 생성 가능
- 기준 부재의 위치/길이변경/형상변경에 따른 보강재 형상 연동 기술 개발로 획기적인 작업 효율 향상

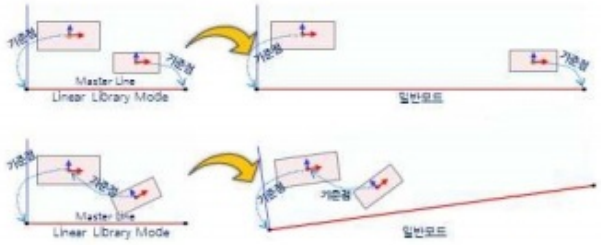


<그림 3.2.63> 부재 형상 변경에 따른 보강재 형상 자동 연동

○ 선형에 따라 Linear Library 업데이트
- 연장/반복되는 객체에 대하여 도로 선형의 진행 경로에 따라 함께 연장/반복되는 속성 부여 기능 개발
- 모든 부재 타입에 대한 속성 부여 기능 제공 : 1D-Point, 2D-Line, 3D-Face
- 반복 규칙에 대해 마지막 반복 객체 처리, 반복 기준선 설정 등의 옵션 제공

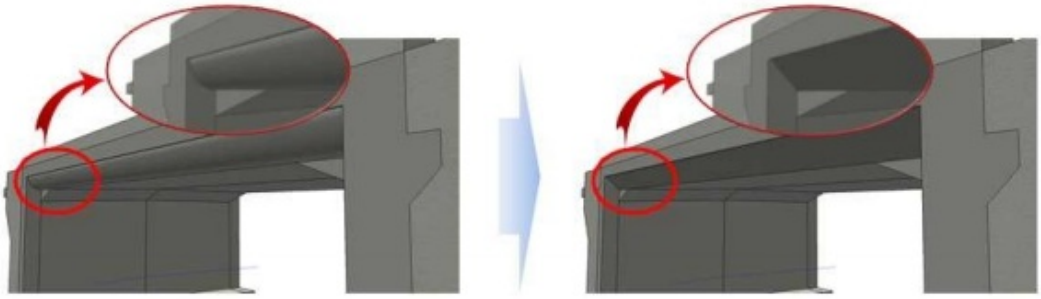


<그림 3.2.64> Point/Line에 대한 연장 속성 부여를 통한 부재 생성

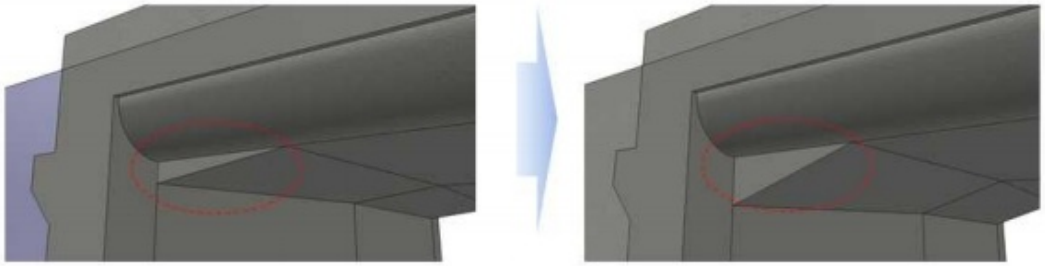


<그림 3.2.65> 기준점 중심 좌표 유지

○ midas CIM 모델 업데이트 기술을 이용한 라멘교 적용 예시
- 본 과제를 통해 3D 모델링 된 라멘교에 대해 챔버와 헌치의 수정 활용



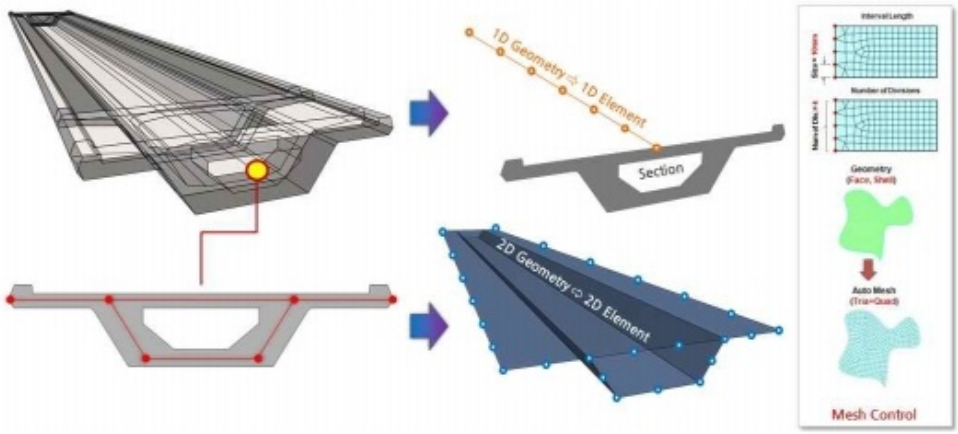
<그림 3.2.70> 챔버 수정 예시



<그림 3.2.66> 헌치 수정 예시

다. 3D 정보모델과 교량 해석 SW(midas Civil)과의 연동 기술

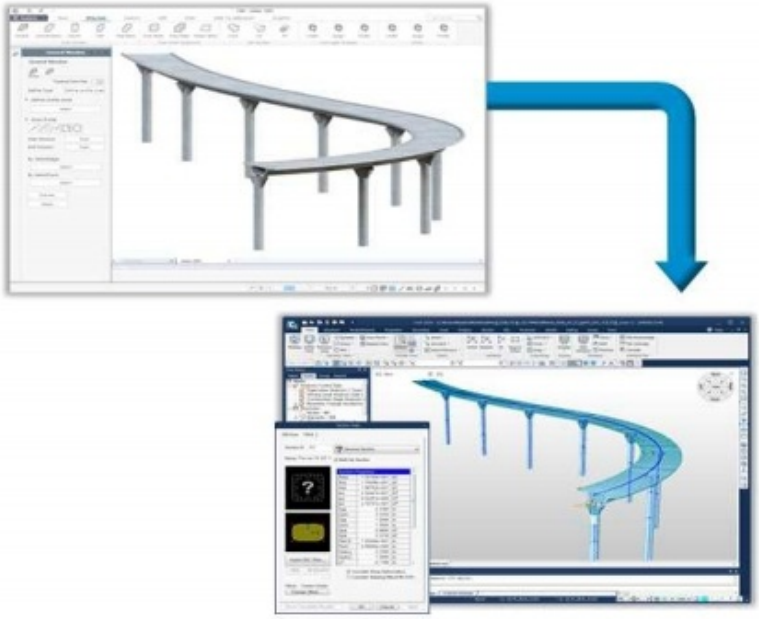
○ 3D 정보모델 기반의 구조설계모델 자동생성을 위한 가상보 정의 기술
- 중심선 형상에 따른 3D 객체 추출연산 연동
- 생성 규칙에 따른 가상보 설계구간별 해석 요소망 자동생성 기능 개발
- 기존 유한 요소 모델링 작업의 자동화를 통한 작업 효율 증대



<그림 3.2.67> 1D/2D 해석 요소 생성

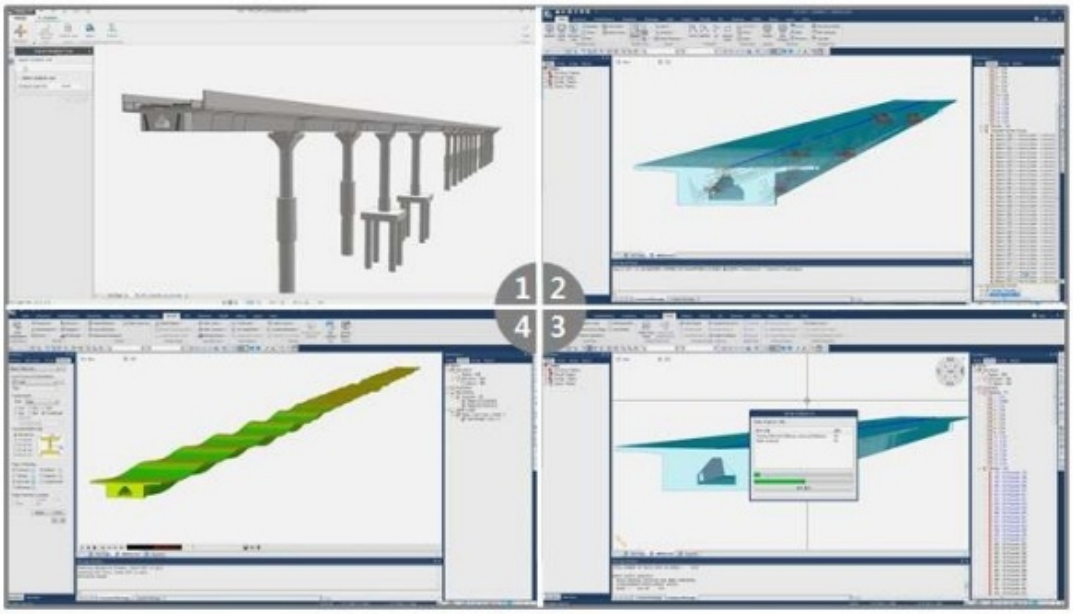
- 보강재 배치에 따른 부재강도 산정 데이터 생성
- 합성단면의 파트에 따른 추출되는 요소 종류 및 재료 개발

❍ 유한요소해석 및 설계검토 프로그램(midas Civil)과의 데이터 인터페이스
- 3D 정보모델의 중심선 자동 추출 및 설정 기능
- 중심선 정보를 이용한 3차원 해석 모델링 생성기능 확보



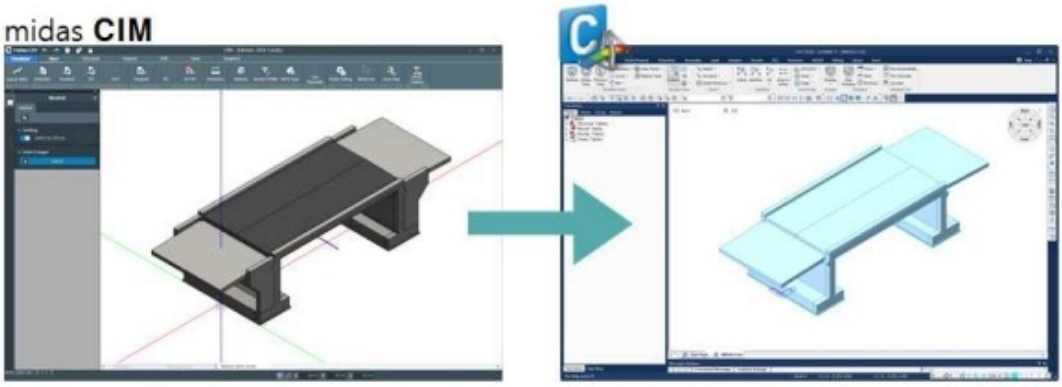
<그림 3.2.68> 3D 정보 모델로부터 midas Civil 연동

- 기하형상에 대한 자동 요소망 생성 기능 구현
- 해석/설계 검토 프로그램에 정보를 전달하는 중립파일 정의 및 생성
- midas CIM으로부터 midas Civil의 구조해석모델 연계지원을 통해 해석/설계의 효율성 극대화
- 기존 사용자의 작업 프로세스와 SW 사용경험을 유지하면서 3D 정보설계 통합 솔루션과 연계한 해석/설계가 가능하도록 지원



<그림 3.2.69> 3D 정보 모델의 midas Civil 연동 및 해석

○ midas CIM과 교량해석 SW인 midas Civil의 연동 기술을 이용한 라멘교 적용 예시



<그림 3.2.70> 라멘교 대상 midas CIM에서 midas Civil 연동

3. Web 기반 교량 유지관리 BIM 프로그램 개발

가. 대상 교량 선정

○ 대상 교량형식 선정

- 본 과제에서 개발한 BIM 프로그램을 적용하기 위해서 국토교통부에서 운영하는 『도로 교량 및 터널 현황정보시스템』에서 2018년 기준 공용중인 교량 상부구조 형식별 개소를 참고하여 대상 교량 형식을 선정하였음
- 현재 국내에서는 강상자형교(STB), PSCI형교(PSCI), RC슬래브교(RCS), 라멘교(RA)가 공용중인 교량중에서 가장 일반적으로 사용되고 있어 본과제의 대상 구조물 형식으로 선정하였음



<그림 3.2.71> 공용중인 교량 형식별 개소(도로 교량 및 터널 현황정보시스템)



(a) 강상자형교(STB) (b) PSCI형교(PSCI) (c) RC슬래브교(RCS) (d) 라멘교(RA)

<그림 3.2.72> 교량 형식별 예시

○ 대상교량 선정

- 본 과제에서 구축된 프로그램의 적용성을 검증하기 위해 <그림 3.2.78>에서 선정하였던 교량형식별 대상 구조물을 선정하였음
- 라멘교는 대부분의 교량이 1,2종 시설물이 아닌 기타시설물로 분류되어 안전진단 이력 자료가 많지 않아 CALS(국토교통부)에서 제공하는 라멘교 표준도를 활용하고 이력 데이터를 임의로 구축하여 BIM 프로그램에 적용함
- 각 교량형식별 대상구조물의 기본제원은 다음과 같음

<표 3.2.42> BIM 적용 대상 교량 제원

항목	STB	PSCI	RCS	RA
시설물종별	1종	2종	2종	CALS 라멘교 표준도 사용
준공연도	2003	1997	2001	
공사비(천원)	4,021,000	602,000	64,918	
설계하중	DB-24	DB-24	DB-24	
연장(m)	230	120.1	112.2	
경간수	5	4	8	
최대경간장(m)	50	30.1	14.1	
총폭(m)	15.5	11.0	19.5	
교고(m)	8.5	5.1	0	
상부형식	STB	PSCI	RCS	
교량받침	포트받침	포트받침	포트받침	
신축이음	Rail-Type 조인트	Mageba 조인트	Rail-Type 조인트	
교각형식	T형교각	T형교각	벽식	
교각기초	미상	확대(전면)기초	확대(전면)기초	
교대형식	라멘식	역T형	역T형	
교대기초	확대기초	확대기초	확대기초	
바닥판	RC	RC	RC	
주형	Steel	PC	-	

나. Web기반 교량 유지관리 이력 관리 프로그램

○ 프로그램 개요

- 본 과제에서 구축된 통합관리 정보체계인 <그림 3.2.46>을 통해 교량의 안전진단 및 유지관리 이력을 관리할 수 있는 프로그램
- Web기반의 시설물 관리, 정보의 입력 및 조회, 정보 분석 기능을 포함



<그림 3.2.73> Web 프로그램 로그인 화면

○ 메뉴 구성

- 메뉴는 외관조사, 조사/재료시험, 구조 안전성/사용성능, 보수/보강, 잔존 수명, 가치평가, 점검결과, 시스템 관리로 총 8개로 구성됨
- 각 메뉴에 해당하는 세부메뉴와 기능은 다음과 같음

<표 3.2.43> Web 프로그램 메뉴구성 및 기능

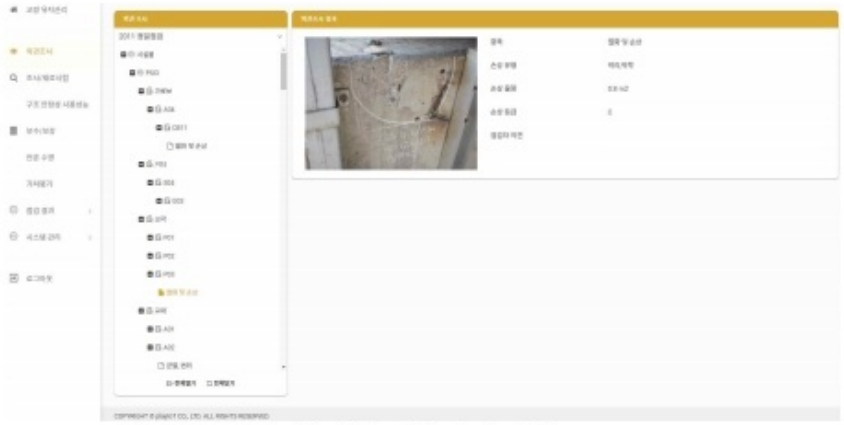
메뉴명		입력	표출
외관조사		▪ 각 점검계획 및 부재별 외관조사 손상종류 및 상세정보 입력	▪ 입력된 외관조사 정보 조회 ▪ BIM 3D 모델과 연동
조사/재료시험		▪ 각 점검계획 및 부재별 조사·재료시험 종류 및 상세정보 입력	▪ 입력된 조사·재료시험 정보 조회 ▪ BIM 3D 모델과 연동
구조 안전성/사용성능		▪ 각 점검계획별 시설물의 구조 안전성 및 사용성능 정보 입력	X
보수/보강		▪ 각 점검계획 및 부재별 보수·보강종류 및 상세정보 입력	▪ 입력된 보수·보강 정보 조회 ▪ BIM 3D 모델과 연동
잔존수명		▪ 각 점검계획 및 부재별 염해, 탄산화, 동해, 피로 열화에 대한 잔존수명 예측에 필요한 정보 입력 ▪ 연계 가능한 정보 자동입력	X
가치평가		▪ 각 점검계획별 시설물의 취득원가 및 대체원가를 활용한 가치평가에 필요한 정보 입력 ▪ 연계 가능한 정보 자동입력	X
점검 결과	진단평가	X	▪ 외관조사, 조사·재료시험, 구조안전성 이력을 활용하여 상태평가 및 종합평가 결과 표출
	진단평가-성능평가	X	▪ 외관조사, 조사·재료시험, 구조안전성, 사용성능 이력을 활용하여 안전성능, 내구성능, 사용성능 및 종합성능 평가 결과 표출
	잔존수명	X	▪ 염해, 탄산화, 동해, 피로에 대한 부재별 잔존수명 예측 결과 표출
	가치평가	X	▪ 각 시설물에 대한 점검계획별 취득원가 대체원가를 활용한 가치 표출
시스템 관리	시설 관리	▪ 시설물별 부재 트리 관리 ▪ 시설물 및 부재 속성정보 관리	X
	가중치 관리	▪ 진단평가 및 성능평가에 필요한 가중치 입력	X
	사용자 관리	▪ 프로그램 사용자 추가 및 삭제	X

○ 외관조사 메뉴

- 각 점검계획 및 부재별 외관조사 손상종류 및 상세정보 입력
- 입력된 외관조사 정보 조회



(a) 외관조사 정보 입력



(b) 외관조사 정보 조회

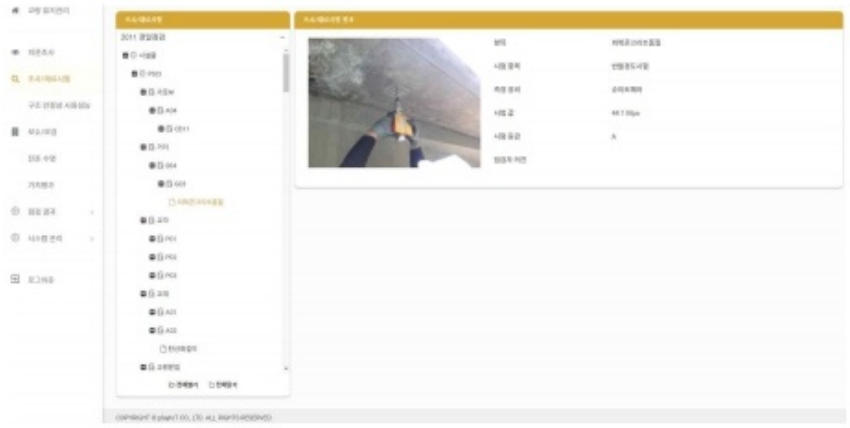
<그림 3.2.74> 외관조사 메뉴 화면

○ 조사/재료시험 메뉴

- 각 점검계획 및 부재별 조사·재료시험 종류 및 상세정보 입력
- 입력된 조사·재료시험 정보 조회



(a) 조사·재료시험 정보 입력



(b) 조사·재료시험 정보 조회

<그림 3.2.75> 조사·재료시험 메뉴 화면

○ 구조 안전성/사용성능 메뉴

- 각 점검계획별 시설물의 구조 안전성 및 사용성능 정보 입력
- 입력된 구조 안전성/사용성능 정보 조회



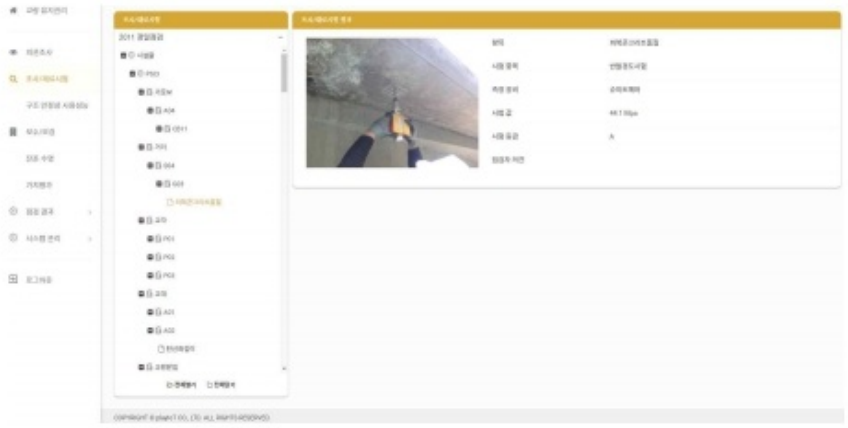
<그림 3.2.76> 구조 안전성/사용성능 메뉴 화면

○ 보수/보강 메뉴

- 각 점검계획 및 부재별 보수·보강종류 및 상세정보 입력
- 입력된 보수·보강 정보 조회



(a) 보수/보강 정보 입력



(b) 보수/보강 정보 조회

<그림 3.2.77> 보수/보강 메뉴 화면

○ 잔존수명 메뉴

- 각 점검계획 및 부재별 염해, 탄산화, 동해, 피로 열화에 대한 잔존수명 예측에 필요한 정보 입력
- 연계 가능한 정보 자동입력



(a) 연계 가능한 정보 자동입력



(b) 그 외 기타 필요 정보 입력

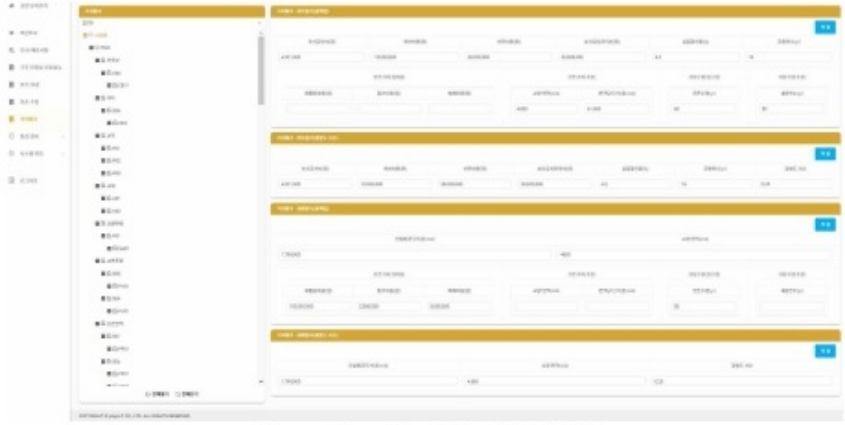
<그림 3.2.78> 잔존수명 메뉴 화면

○ 가치평가 메뉴

- 각 점검계획별 시설물의 취득원가 및 대체원가를 활용한 가치평가에 필요한 정보 입력
- 연계 가능한 정보 자동입력



(a) 연계 가능한 정보 자동입력

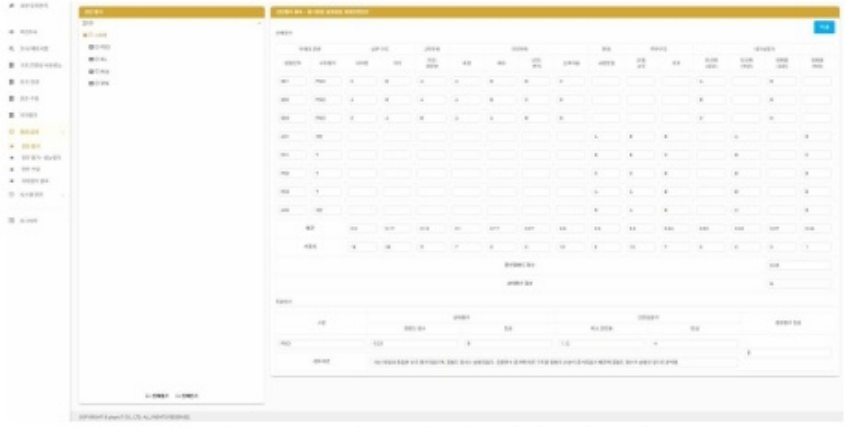


(b) 그 외 기타 필요 정보 입력

<그림 3.2.79> 가치평가 메뉴 화면

○ 점검결과(진단평가) 메뉴

- 외관조사, 조사·재료시험, 구조 안전성 이력을 활용하여 상태평가 및 종합평가 결과 표출



<그림 3.2.80> 점검결과(진단평가) 메뉴 화면

○ 점검결과(진단평가-성능평가) 메뉴

- 외관조사, 조사·재료시험, 구조 안전성, 사용성능 이력을 활용하여 안전성능, 내구성능, 사용성능 및 종합성능 평가 결과 표출



(a) 상태적 안전성 결과 표출



(b) 내구성능(강재) 결과 표출



(c) 내구성능(콘크리트 결과 표출)



(d) 종합성능 평가 결과 표출

<그림 3.2.81> 점검결과(진단평가-성능평가) 메뉴 화면

○ 점검결과(잔존수명) 메뉴

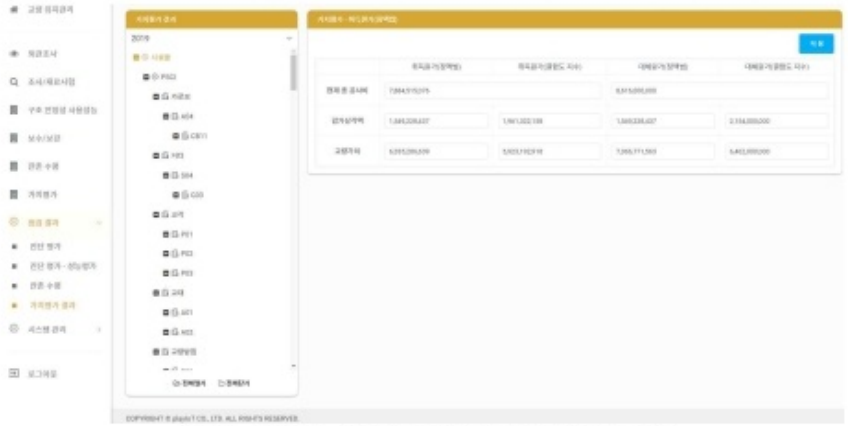
- 염해, 탄산화, 동해, 피로에 대한 부재별 잔존수명 예측 결과 표출



<그림 3.2.82> 점검결과(잔존수명) 메뉴 화면

○ 점검결과(가치평가) 메뉴

- 각 시설물에 대한 점검계획별 취득원가 대체원가를 활용한 가치 표출



<그림 3.2.83> 점검결과(가치평가) 메뉴 화면

○ 시스템 관리(시설 관리) 메뉴

- 시설물별 부재 트리 관리
- 시설물 및 부재 속성정보 관리



(a) 시설물 관리(추가, 삭제) 및 속성정보 입력

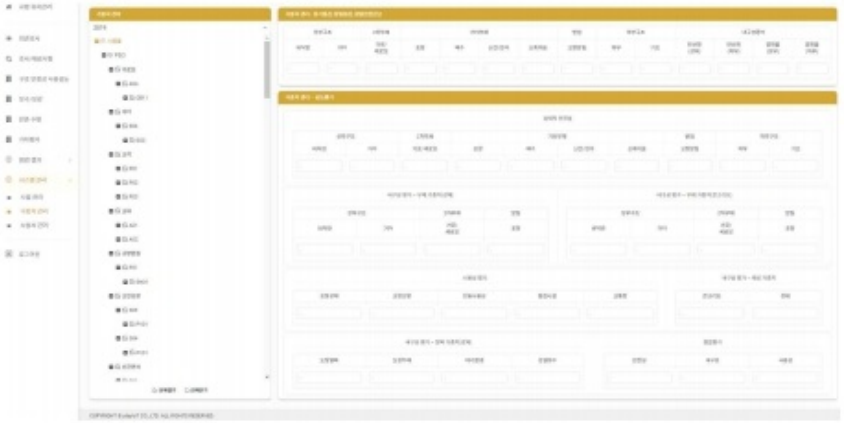


(b) 부재 관리(추가, 삭제) 및 속성정보 입력

<그림 3.2.84> 시스템 관리(시설 관리) 메뉴 화면

○ 시스템 관리(가중치 관리) 메뉴

- 진단평가 및 성능평가에 필요한 가중치 입력



<그림 3.2.85> 시스템 관리(가중치 관리) 메뉴 화면

○ 시스템 관리(사용자 관리) 메뉴

- 프로그램 사용자 추가 및 삭제

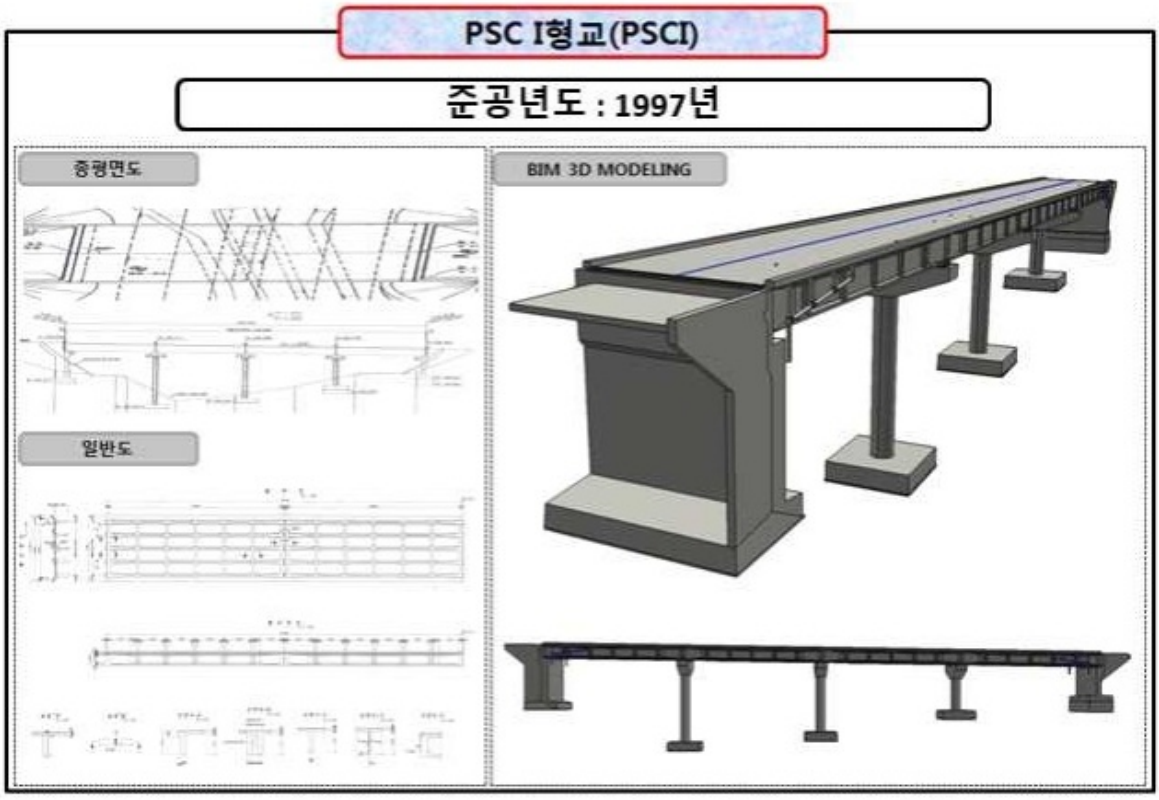


<그림 3.2.86> 시스템 관리(사용자 관리) 메뉴 화면

다. 이력 관리 프로그램-교량 모델 연동 기술

○ Midas CIM 모델링 기술을 활용한 대상교량 3D 모델 구축

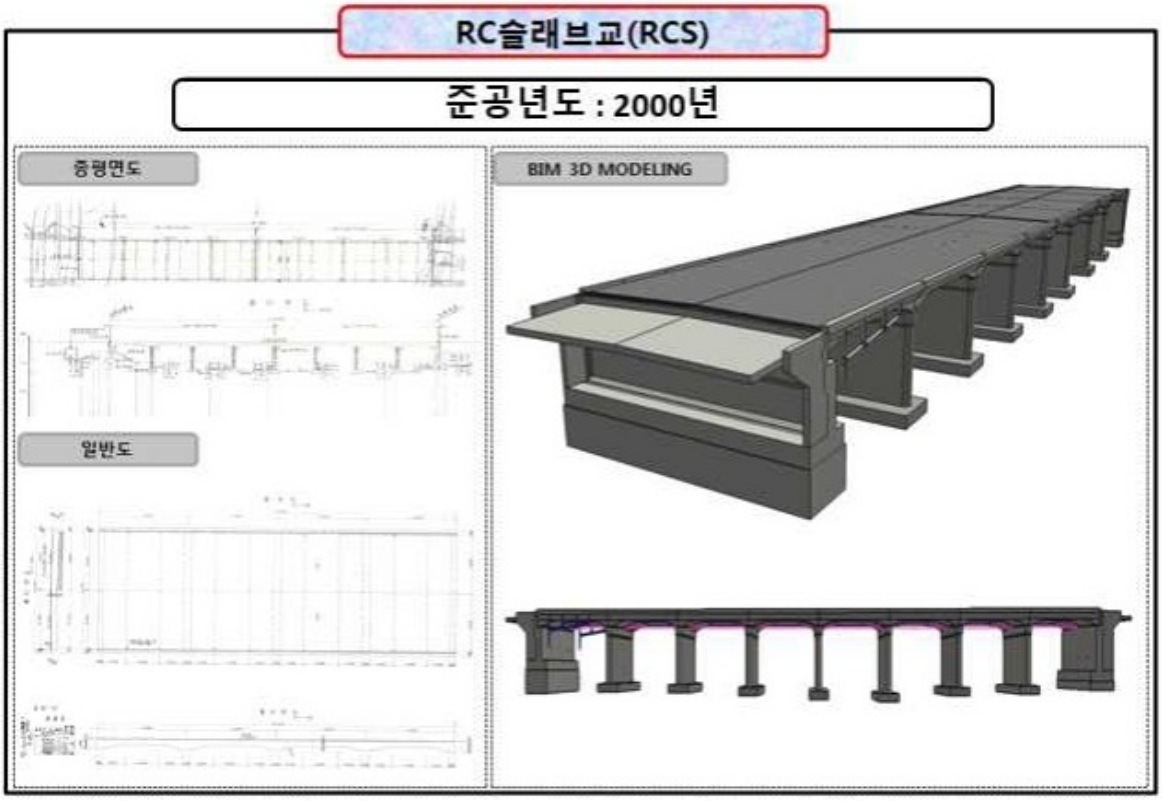
- 본 과제를 통해 대표적인 4가지 형태(PSC I 형교, 강박스거더교, 슬래브교, 라멘교)의 교량에 대한 3D 모델링 구축



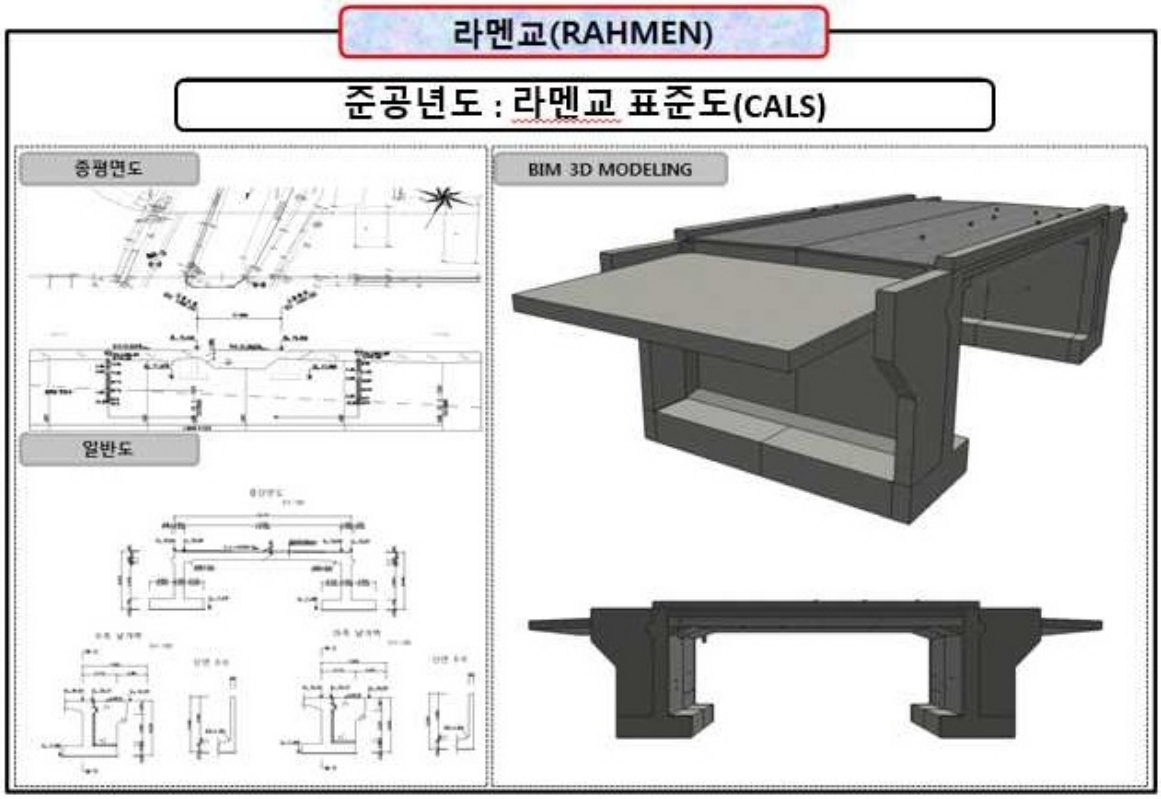
<그림 3.2.87> PSC I형교(PSCI)



<그림 3.2.88> 강박스거더교



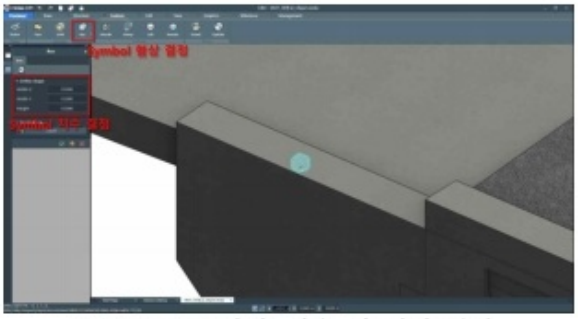
<그림 3.2.89> RC슬래브교



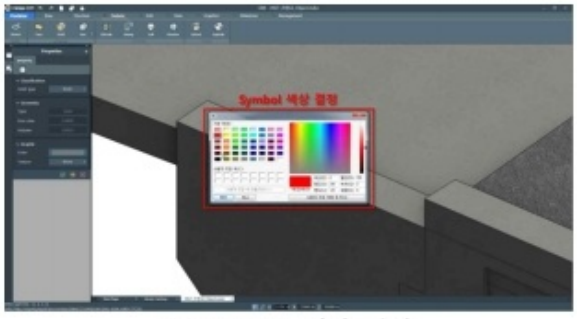
<그림 3.2.90> 라멘교 - 라멘교 표준도

○ Symbol 생성 및 색상 인덱싱 기술 개발

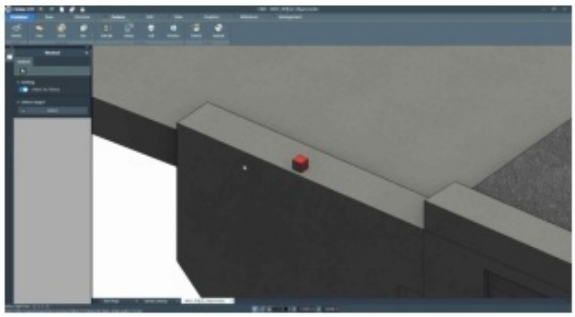
- midas CIM에서 3D 모델에 안전진단 이력에 대한 위치를 표현하기 위해 Symbol 생성 기술 개발
- Symbol은 Box, Tapered Box, Cylinder, Sphere, Core의 형태로 구성되고 치수를 결정함으로써 생성이 가능함
- 안전진단시 수행하는 육안검사나 조사·재료시험의 이력의 경우 대부분 구조물의 표면에서 확인하거나 측정하는 것이기 때문에, Symbol은 구조물의 표면에 생성 가능하도록 개발
- 본 과제에서는 점검유형별로 구분하기 위해 외관조사는 빨간색, 조사·재료시험은 파란색, 보수·보강은 파란색으로 표현하였음



(a) Symbol 형태, 치수 및 위치 결정



(b) Symbol 색상 결정

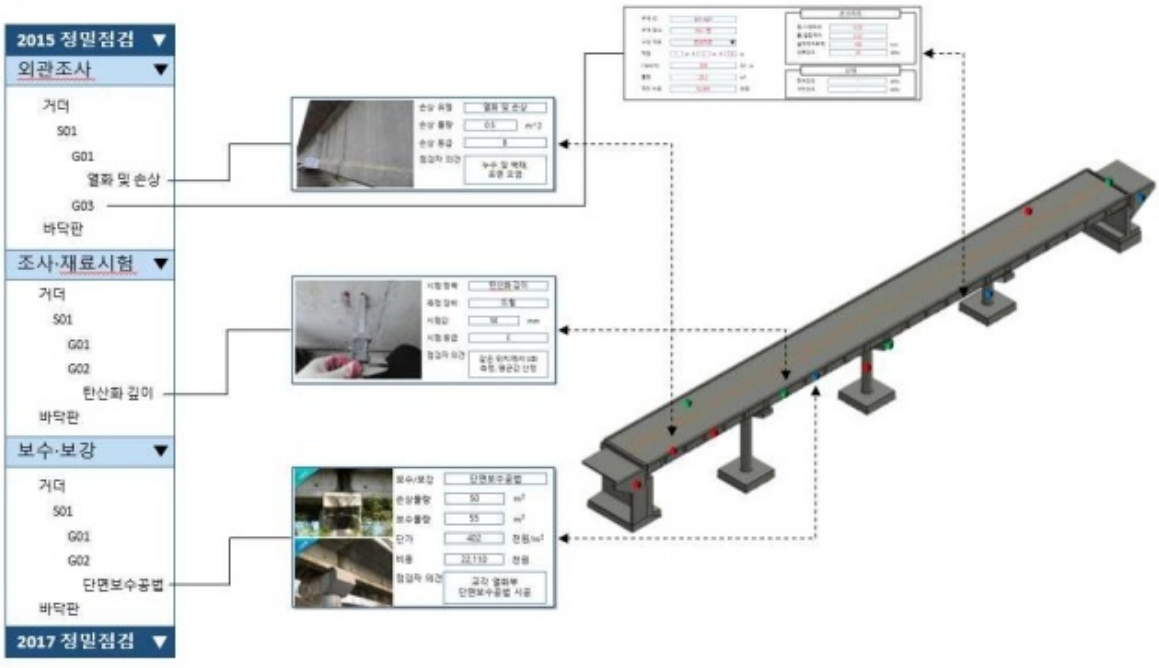


(c) Symbol 생성 예시

<그림 3.2.91> Symbol 형상,치수,위치 및 색상 결정

○ 3D 모델-Web기반 이력관리 프로그램 연동 흐름도

- 3D 모델링 프로그램 내에서 Inspection interface를 개발하여 Symbol과 Web 프로그램의 이력데이터, 부재 속성정보, 시설물 속성정보를 연결
- 3D 모델링 프로그램 내에서 Web 프로그램의 교량 부재 및 이력 트리가 팝업되며 Symbol과 맵핑 방식으로 연결
- Symbol과 이력 맵핑시 View가 저장되며 해당 이력 클릭시 연결된 Symbol로 Zoom-in됨
- Symbol을 선택하여 해당 이력의 상세정보, 부재 속성정보, 시설물의 속성정보를 확인 가능
- 3D 모델-Web 프로그램 연동 개념도



<그림 3.2.92> 3D 모델-Web 프로그램 연동 개념도

○ 3D 모델-Web기반 이력관리 프로그램 정보 연동 방법(URL)

- 로그인 후 페이지 이동 (CIM → 웹)

형식: http://inspect.playiot.biz/cim/login/{r_id}

호출 방식: HTTP **GET**

호출 예: http://inspect.playiot.biz/cim/login/12345
*{r_id} -> CIM의 rid

- 로그인만 수행 (CIM → 웹)
형식: http://inspect.playiot.biz/cim/login/{r_id}
호출 방식: HTTP **POST**
호출 예: http://inspect.playiot.biz/cim/login/12345
응답: {"success": true}, {"success": false, "reason": "invalid_rid"}

- 로그아웃 (CIM → 웹)
형식: http://inspect.playiot.biz/logout
호출 방식: HTTP **GET**

- 부재 트리 (CIM → 웹)
형식: http://inspect.playiot.biz/cim/tree/{r_id}/{facil_id}
호출 예: http://inspect.playiot.biz/cim/tree/12345/DA493C00-91A5-4898-9D54-EFB65B0449F7
* 호출 시 자동 로그인됨
* {facil_id} -> 웹에 등록된 시설물의 아이디

- 점검내용 조회 페이지 (CIM → 웹)
형식: http://inspect.playiot.biz/cim/view/{r_id}/{facil_id}/{modelKey}
호출 예:
http://inspect.playiot.biz/cim/view/12345/DA493C00-91A5-4898-9D54-EFB65B0449F7/1526
* {modelKey} -> CIM의 등록된 부재의 모델키
* 존재하지 않는 {modelKey}로 요청 시 부재트리 화면으로 이동함
* 호출 시 자동 로그인됨

- 객체 연결(트리 상단의 연결 아이콘 클릭 시 웹에서 호출함, 웹 → CIM)
형식: cmd::map::{작업연도}-{부재아이디}-{점검종류}-{손상종류}
호출 예: cmd::map::2019-5ABD234DA3F-0-0
* 부재아이디는 문자열 형식임(최소 길이: 10, 최대 길이: 20)

○ 3D 모델-Web기반 이력관리 프로그램 정보 연동 방법(자바스크립트)

- CIM에서 객체를 연결할 때 호출해야될 자바스크립트 함수 (CIM → 웹)
형식: onMapModel(아이디, modelKey, eyeDirX, eyeDirY, eyeDirZ, upDirX, upDirY, upDirZ, focalDist);
사용 예: onMapModel("2019-5ABD234DA3F-0-0",
"MKEY1526",
2.1, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6);
* 아이디: {작업연도}-{부재아이디}-{점검종류}-{손상종류}

- 트리에서 연결된 점검내용 선택 시 호출 (웹 → CIM)
형식:
cmd::select::{modelKey}::data::{eyeDirX},{eyeDirY},{eyeDirZ},{upDirX},{upDirY},{upDirZ},{focalDist}
호출 예: cmd::select::MKEY1526::data::2.1,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6
* 2-가 항에서 넘겨받은 정보를 그대로 전달함

- 객체 연결 해제 (CIM → 웹)

  형식: onUnmapModel("{modelKey}")

  사용 예: onUnmapModel("MKEY1526")

- 연결된 부재트리의 점검항목 선택 (CIM → 웹)

  형식: onSelectModel("{modelKey}", silent)

  사용 예: onSelectModel("MKEY1526", true) → 2-나 항 호출안함

  사용 예: onSelectModel("MKEY1526", false) → 2-나 항 호출함

- 대상 교량에 대한 3D 모델-Web 프로그램 연동 화면

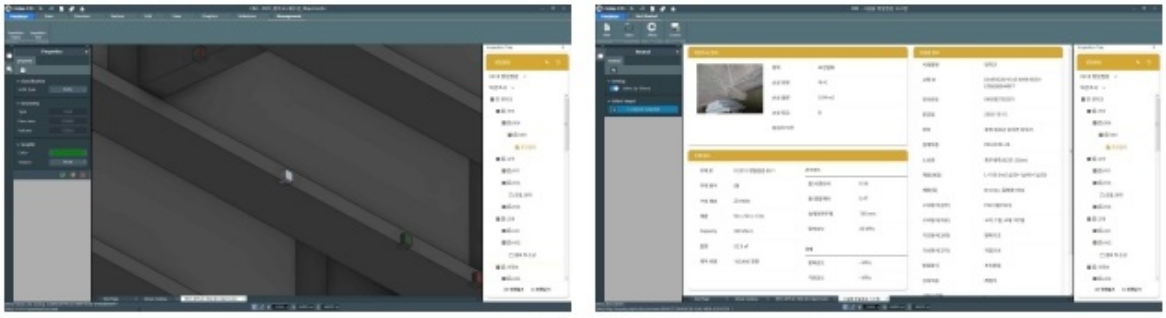


(a) PSCI (b) STB

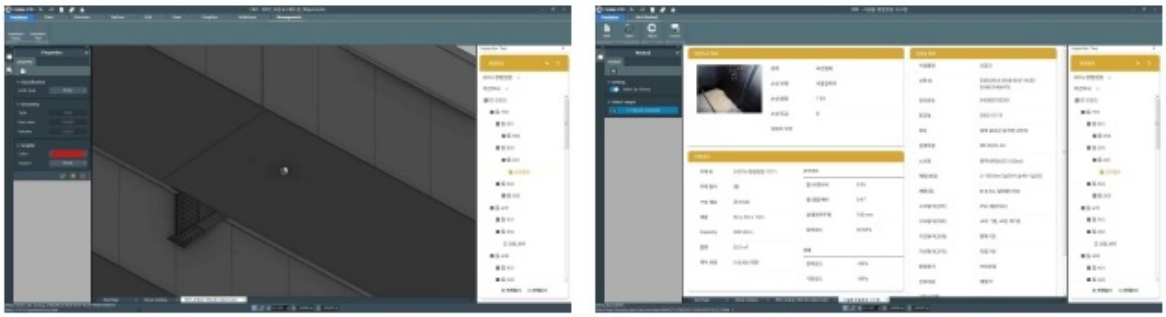
(c) RCS (d) RA

<그림 3.2.93> 3D 모델-Web 프로그램 연동 화면

- 대상 교량에 대한 외관조사 이력정보 팝업 화면



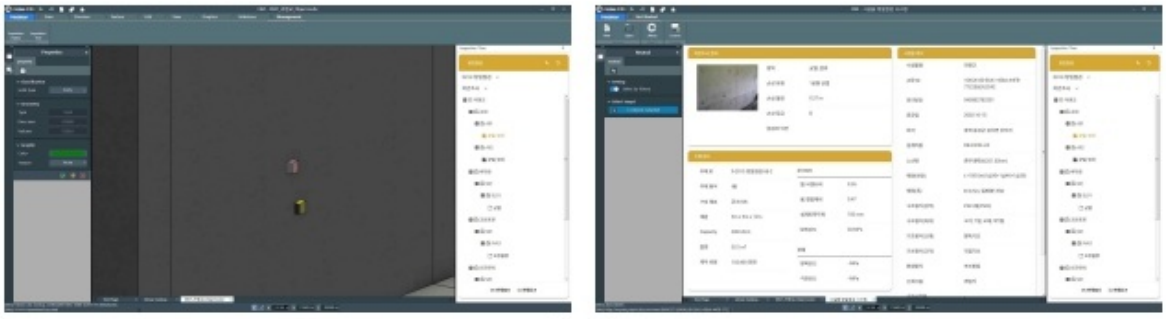
(a) PSCI



(b) STB



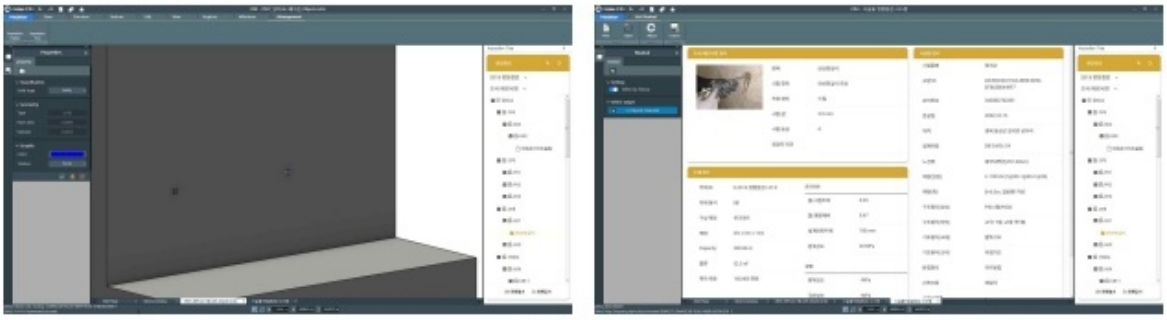
(c) RCS



(d) RA

<그림 3.2.94> 외관조사 이력정보 팝업 화면

- 대상 교량에 대한 조사·재료시험 이력정보 팝업 화면



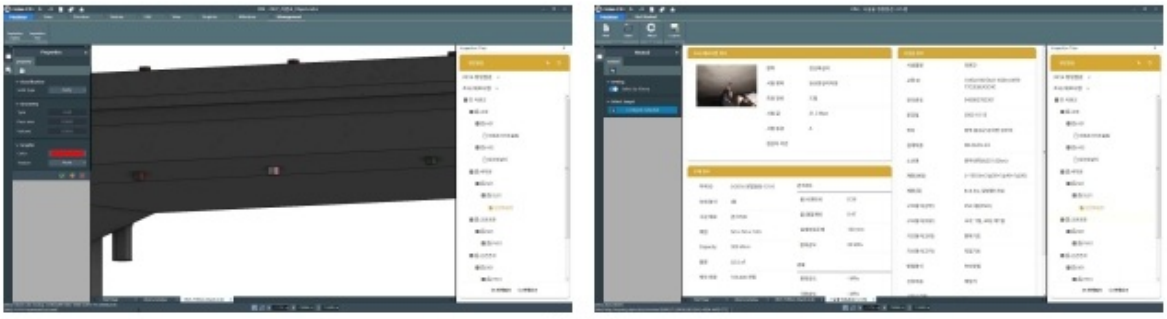
(a) PSCI



(b) STB



(c) RCS



(d) RA

<그림 3.2.95> 조사·재료시험 이력정보 팝업 화면

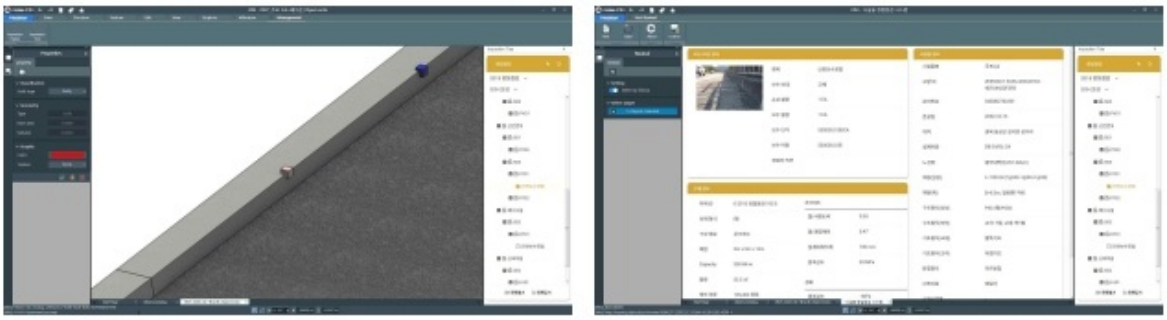
- 대상 교량에 대한 보수·보강 이력정보 팝업 화면



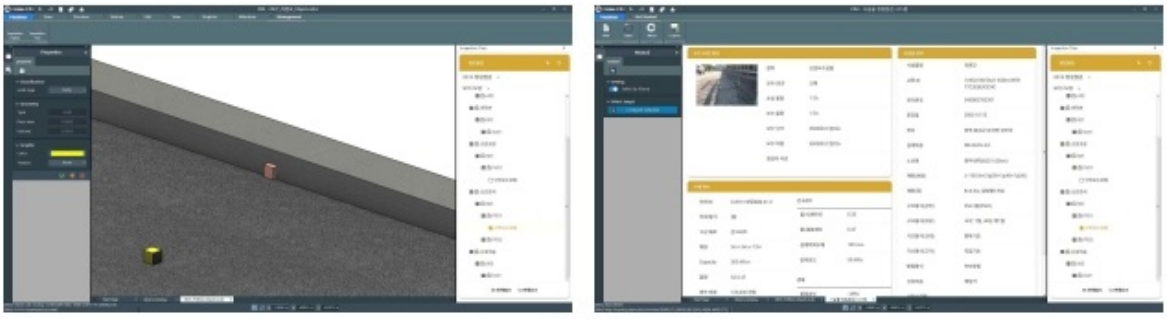
(a) PSCI



(b) STB



(c) RCS



(d) RA

<그림 3.2.96> 보수·보강 이력정보 팝업 화면

4. 교량 구조물의 손상 추정 시스템 개발

가. 교량 구조물의 손상 구조해석

(1) 연구 개요

○ 현재 교량에 대한 안전진단은 시설물 안전관리에 관한 특별법(법, 시행령 제 13조)에 의거하여 한국시설안전공단의 주도하에 수행되고 있음

○ 안전진단의 결과에 따라 교량의 상태등급을 A-E로 분류하고 있으며, 상태등급에 따라 보수·보강 등의 유지보수 조치를 시행함

○ 하지만, 안전점검은 대부분 육안에 기반하여 수행되고 있기 때문에 점검자(기술자)의 경험과 기술수준에 따라 상태평가 결과가 상이할 가능성이 존재하고, 점검주기에 따라 공용중인 모든 교량에 대해 안전진단을 수행할 인력이 부족한 실정임

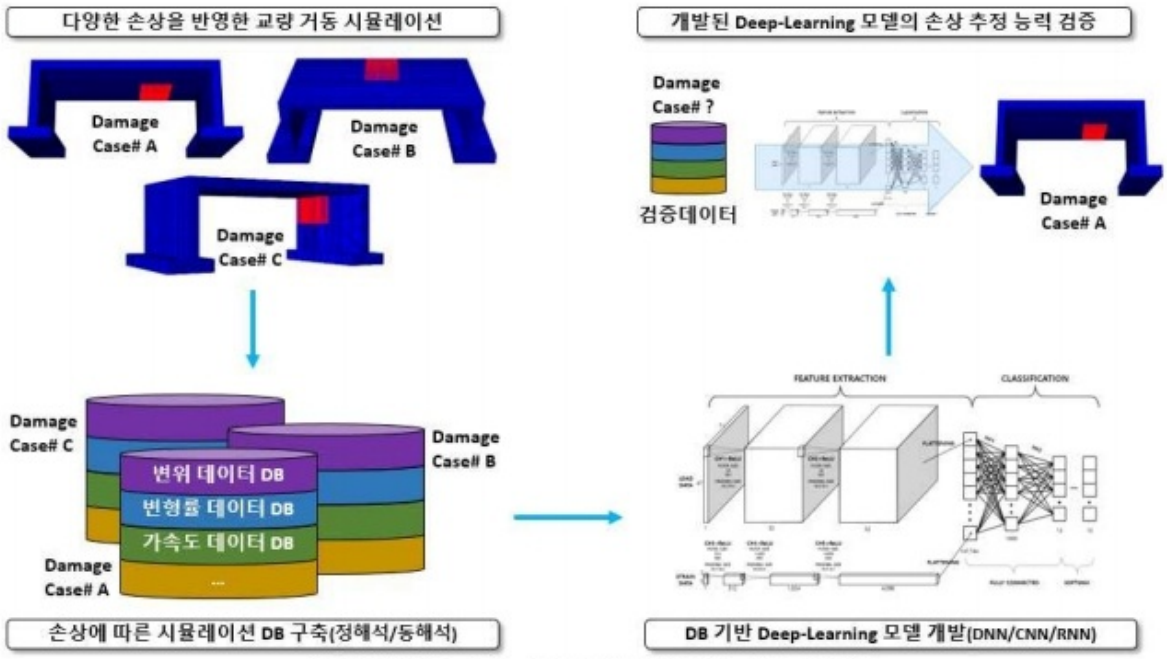
<표 3.2.44> 시설물 안전관리에 관한 특별법 (법, 시행령 제 13조)

점검	대상교량	점검주기
정기점검	도로상의 모든 교량	연 2회 이상
정밀점검	도로상의 교량 중 1,2종 교량과 그 외의 교량 중 관리 주체가 선정한 교량	매 2년마다 1회 이상
정밀안전진단	1종 교량 중 준공 후 10년 이상 경과된 교량과 관리주체가 선정한 교량	매 5년마다 1회 이상 또는 관리주체가 필요하다고 판단하는 경우, 준공 후 10년이 경과된 교량의 첫 번째 정밀안전진단은 공용 연수가 15년이 되기 이전에 1회 실시한다.
긴급점검	각종 재해 및 긴급한 손상이 발견된 경우 또는 관리주체가 필요하다고 판단하여 선정한 교량	관리주체가 필요하다고 판단하는 경우에 실시

○ 따라서, 본 연구에서는 Deep-Learning을 활용하여 계측 결과를 통해 교량의 손상을 상시 예측할 수 있는 시스템 기반을 구축하고자 함

○ Deep-Learning을 활용하기 위해서는 다음과 같이 여러가지 제한사항이 존재하며, 본 절에서는 다음 사항들을 고려하여 <그림 3.2.97>과 같이 연구를 수행함

- 적절한 Deep-Learning 결과를 얻기 위해서는 각 손상 위치, 종류, 정도에 따라 최소 1000개의 데이터가 필요함
- 각 손상 위치, 종류, 정도에 따라 분류되어 있는 상시 계측 데이터가 존재하지 않으므로, 해석을 통해 인위적으로 데이터를 생성하여 Deep-Learning을 수행함
- 손상 위치, 종류, 정도가 복합적으로 적용된 해석 데이터를 사용할 경우 Deep-Learning에서 각각의 영향을 독립적으로 추론할 수 없음
- 각 손상 위치, 종류, 정도에 대한 Input(하중), Output(계측값)의 데이터 행렬의 크기가 같아야 함
- 실제 교량과 최대한 유사한 조건을 적용해야 신뢰성 있는 Deep-Learning 결과를 도출할 수 있음



<그림 3.2.97> 교량 손상 추정 시스템 개발 흐름도

○ Deep-Learning을 수행하기 위해서는 Input, System, Output 데이터가 필요하며, 해석 연구로 도출한 각 데이터 정보를 <표 3.2.45>에 나타냄

<표 3.2.45> Deep-Learning 수행에 필요한 해석 정보

데이터 종류	Input	System	Output
데이터 정보	차량 하중	손상 정보	변위, 변형률

(2) 대상 교량 형식 선정

○ Deep-Learning을 통해 상시 손상 예측 시스템의 기반을 구축하기 위해서는 손상 Case 하나당 최소 1000개의 해석 데이터가 필요하며, 손상에 대한 정보를 해석 모델에 적절하게 표현하기 위해서는 Solid 요소를 사용하는 것이 불가피함

○ Solid 요소는 유한요소에서 사용하는 모든 요소 중 해석에 가장 많은 시간이 소요되기 때문에, 현실적으로 연구 기간 내에 모든 교량 형식에 대한 손상 예측 시스템 기반을 구축하는 것은 불가능하다고 판단됨

○ 따라서, 본 절에서는 대상 교량 형식을 선정하기 위하여 현재 공용중인 교량에 대해 상부구조 형식별 개수를 <표 3.2.46>에 나타냄

<표 3.2.46> 상부구조별 교량현황(참조-2017 도로 교량 및 터널 현황조서(국토교통부))

상부구조 형식	합계		고속국도		일반국도		특별,광역시도	
	개소	연장	개소	연장	개소	연장	개소	연장

	32,325	3,243,800	9.369	1,251,925	7,951	828,151	1,267	324,166
RC 슬래브교	8,355	351,114	246	11,980	1,254	58,452	226	19,725
RC 중공 슬래브교	229	21,231	112	7,116	44	4,620	22	4,849
RC T형교	773	37,417	30	2,256	65	3,495	26	2,049
강I형교	196	23,954	36	3,133	30	3,685	9	2,195
PSC 상자형교	746	343,251	457	223,494	94	33,557	43	50,406
강판형교	289	58,319	127	20,638	63	13,878	48	16,240
라멘교	7,559	158,802	2,604	42,417	1,837	34,506	162	8,729
트러스교	13	8,457	2	1,263	1	60	2	2,200
아치교	189	35,796	26	4,715	24	8,453	26	8,963
사장교	52	68,210	4	26,706	16	15,229	14	11,790
현수교	8	20,316	1	5,926	4	3,560	2	8,570
프리플렉스형교	1,296	83,663	372	18,032	365	19,567	104	11,524
PSC I형교	6,778	896,398	3,287	481,967	2,109	229,587	193	35,597
PSC 슬래브고	441	36,959	114	7,578	120	10,719	28	1,686
PSC중공 슬래브교	35	5,526	1	50	6	1,439	8	1,340
RC 상자형교	186	8,630	30	425	20	1,228	17	1,246
강상자형교	4,404	998,596	1,696	362,280	1,759	367,431	298	131,346
엑스트라도즈드교	21	13,155	1	801	9	8,708	2	357
기타	755	73,998	223	31,142	131	9,972	37	5,345

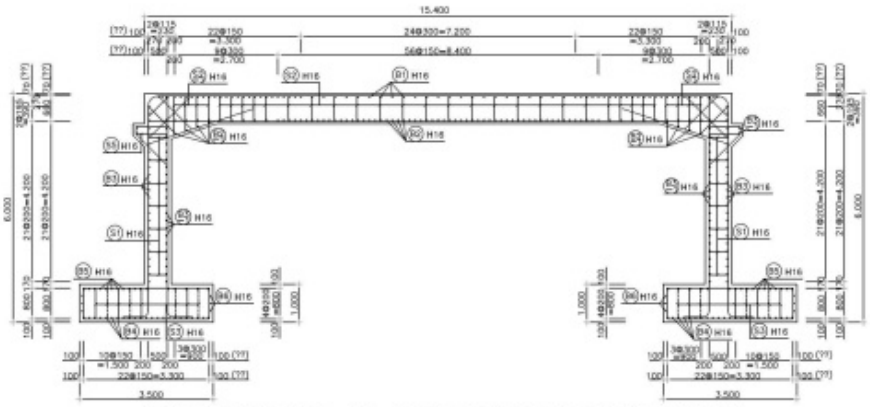
○ 공용중인 교량에서 RC 슬래브교 8,355개, 라멘교 7,559개, PSC I형교 6,778개로 가장 많은 상부구조 형식으로 나타났으며, 본 연구에서는 비교적 형상이 간단한 라멘교를 대상 교량 형식으로 선정함

(3) 해석 모델 및 개요

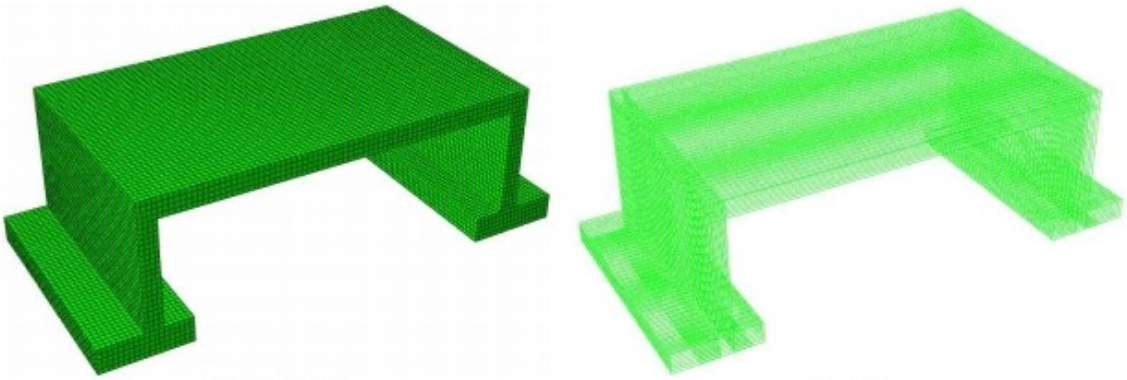
(가) 해석 모델

○ 앞서 언급한 바와 같이 라멘교를 대상 교량으로 선정하였으며, 그 중 교대 하부형식을 채택하여 해석 연구를 수행함

○ 기본적으로 라멘교 해석모델의 형상은 국토교통부 CALS(Continuous Acquisition&Life-Cycle Support)에서 제공하는 라멘교량 표준도를 활용함



<그림 3.2.98> 14m 라멘교 표준도(국토교통부 CALS)

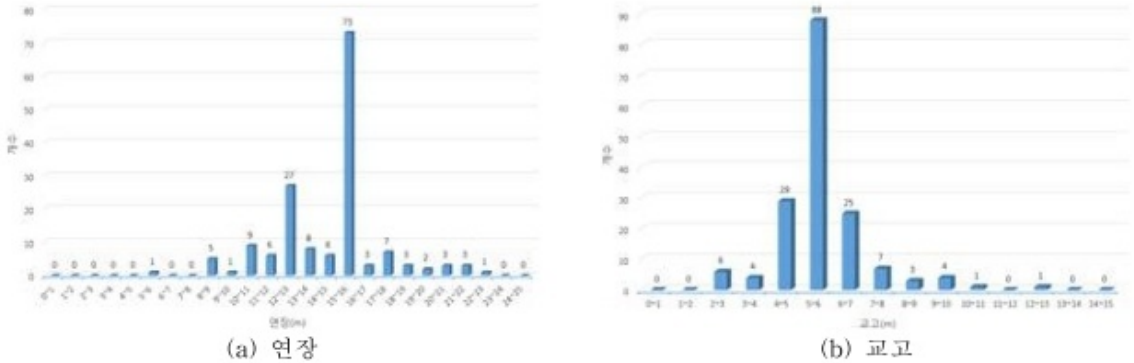


(a) 콘크리트 (b) 철근

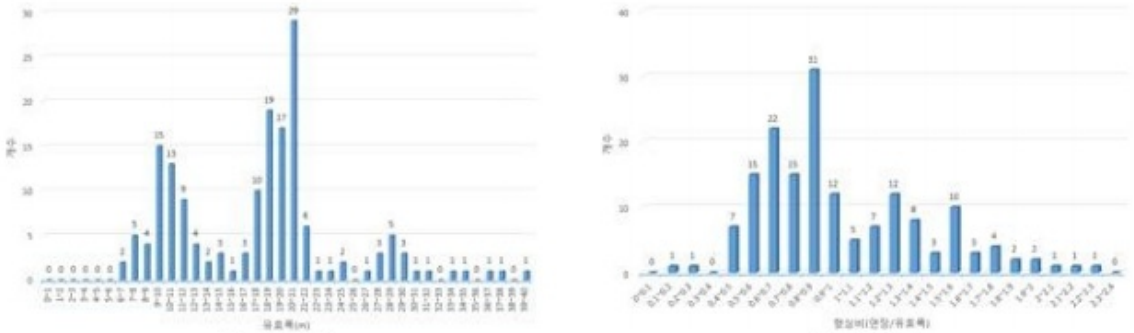
<그림 3.2.99> 해석 모델

(나) 라멘교 모델 제원

○ 본 해석 모델에 실제 공용중인 교대 형식 라멘교의 제원(연장, 교고, 유효폭, 형상비)을 적용하기 위해서 BMS(국토교통부)의 제원 정보를 조사하여 <그림 3.2.100>에 나타냄



(a) 연장 (b) 교고



(c) 유효폭 (d) 형상비

<그림 3.2.100> 공용중인 교대 형식 라멘교 제원(참조-국토교통부 BMS)

○ 연장 8m~23m, 교고 2m~10m, 형상비(연장/폭) 0.5~2, 폭 6m~22m로 분석되었으며, 폭은 차로수에 따라 2차로 6m~14m, 4차로 16m~22m인 라멘교가 주로 공용중인 것으로 나타남

○ Deep-Learing에 적용하기 위해서는 많은 해석 데이터가 필요하기 때문에, 대표적인 제원값을 선정함

○ 라멘교의 폭이 4차로인 경우 차량 하중에 대한 경우의 수가 너무 많아 신뢰성이 저하될 수 있기 때문에 2차로에 대한 유효폭 제원을 선정함

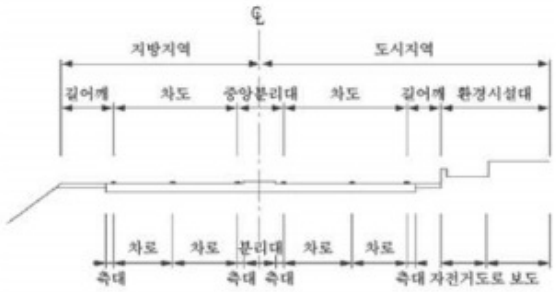
○ 대표 제원값으로는 연장 15m, 교고 6m, 폭 10m을 사용하였으며, 그 의외에 기초 두께, 슬래브 두께, 철근 간격 등은 <그림 3.2.98>의 라멘교 표준도와 동일한 값을 사용함

(다) 차로 제원

○ Input, System, Output의 데이터 형식중 Input에 해당하는 하중 데이터는 Output 결과에 가장 영향을 많이 미치는 인자중 하나이기 때문에, 실제와 최대한 유사한 형태를 구현하기 위하여 실제 차량이 슬래브 상부에 위치해 있는 형태를 묘사하여 재하하여야 함

○ 슬래브 상부에서 차량하중의 재하 범위를 결정하기 위하여 국가건설기준에서 제공하는 차도 횡단면 구성 및 제원표를 참조함

○ BMS(국토교통부)에서 공용중인 교대 형식 라멘교에 대해 분석한 결과 대부분이 일반국도에 해당하여 해석 모델의 차도는 중앙분리대가 없는 일반 횡단면으로 가정하였고, 차로폭은 평균값인 3.2m로 선정함



<그림 3.2.101> 차도 횡단면 구성
(참조-국가건설기준)



<그림 3.2.102> 라멘교(해석 모델) 횡단면 구성

<표 3.2.47> 도로구분에 따른 차도 횡단면 제원(참조-국가건설기준)

도로구분		해당도로	설계속도 (km/h)	차로폭 (m)	중앙 분리대	길어깨		측대 (m)
						우측	좌측	
지방 지역	고속도로	고속도로	100~120	3.5~3.6	3.0	3.0	1.0	0.5
	주 간선도로	국도	60~80	3.25~3.5	1.5~2.0	2.0	0.75	0.5
	보조 간선도로	국도,지방도	50~70	3.0~3.25		1.5	0.5	0.5
	집산도로	지방도, 군도	50~60	3.0		1.25	0.5	0.25
	국지 도로	군도	40~50	3.0		1.0	0.5	0.25
도시 지역	도시고속도로		80~100	3.5	2.0	2.0	1.0	0.5
	주 간선도로		80	3.25~3.5	1.0~2.0	1.5	0.75	0.5
	보조 간선도로		60	3.0~3.25		1.0	0.5	0.25
	집산도로		50	3.0		0.5	0.5	0.25
	국지도로		40	3.0		0.5	0.5	0.25

(라) 차량 제원

○ 일반적으로 교량은 표준특럭하중인 DB-18, DB-24를 사용하여 설계되며, 최근에는 대부분 DB-24를 사용하는 추세임

○ 하지만, 본 연구의 목적은 상시 계측 데이터를 활용하여 구조물에 급작스럽게 발생하는 손상을 예측할 수 있는 시스템을 개발하는 것이며, 실제 표준트럭하중과 동일 제원을 가진 트럭이 교량을 주행하는 경우가 많지 않기 때문에, 승용차에 의한 하중을 고려하여 연구를 수행함

○ <표 3.2.5>은 각 제조사별 승용차 제원을 나타내며, 현재 국내에는 소형, 중형 승용차의 사용량이 많기 때문에, 본 연구에서는 소형, 중형 승용차 제원의 평균값인 차륜 길이 2600mm, 차륜 폭 1600mm, 총중량 16000N을 사용함

○ 총중량은 [공차중량+탑승자(65kg)4명]의 방법으로 산정하였으며, 최종 하중 크기는 도로교 설계기준(2015)에서 제시하고 있는 충격계수(IM) 값인 1.25를 곱하여 결정함

<표 3.2.48> 각 승용차 차량별 제원

제조사	구분	종류	배기량 (cc)	길이 (mm)	폭 (mm)	높이 (mm)	바퀴		공차중량 (kg)	총중량 (kg)
							길이 (mm)	폭 (mm)		
기아	경차	올뉴모닝	998	3595	1595	1485	2400	1465	910	1235
		더 뉴 레이	998	3595	1595	1700	2520	1424	1040	1365

	중형	K3	1591	4560	1780	1435	2700	1560	1250	1575
		K5	1999	4855	1860	1465	2805	1610	1450	1775
		스팅어	1998	4830	1870	1400	2905	1620	1785	2110
	대형	K7	3342	4970	1870	1470	2855	1610	1665	1990
		K9	3342	5095	1900	1490	3045	1650	1920	2245
현대	소형	엑센트	1368	4370	1705	1455	2570	1490	1070	1395
	중형	아반떼	1591	4570	1800	1440	2700	1570	1260	1585
		i30	1353	4340	1795	1455	2650	1550	1325	1650
		벨로스터	1353	4240	1800	1400	2650	1550	1285	1610
		쏘나타	1999	4855	1865	1475	2805	1600	1450	1775
		i40	1999	4745	1815	1470	2770	1580	1510	1835
	대형	그랜저	2359	4930	1865	1470	2845	1605	1550	1875
		아슬란	2999	4970	1860	1470	2845	1605	1665	1990
쉐보레	경차	스파크	999	3595	1595	1475	2385	1415	900	1225
	소형	아베오	1362	4420	1735	1515	2525	1510	1195	1520
		아베오 HB	1362	4060	1510	1515	2525	1510	1175	1500
	중형	크루즈	1399	4665	1805	1470	2700	1550	1250	1575
		말리부	1490	4925	1855	1470	2830	1595	1400	1725
	대형	임팔라	2457	5110	1855	1495	2835	1580	1675	2000

(마) 재료 물성치

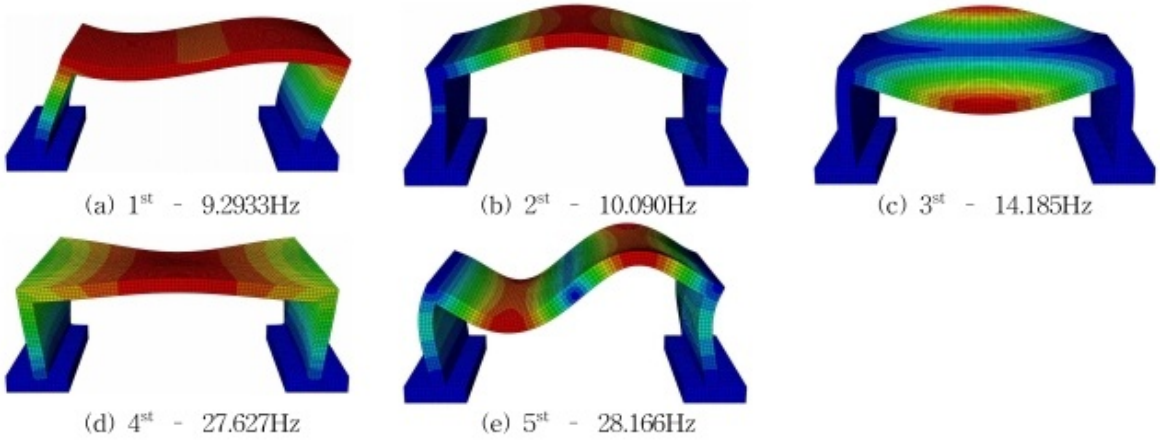
○ 콘크리트와 강재의 경우 <표 3.2.49>과 같이 일반적으로 사용되는 재료의 물성치를 사용함

○ 본 연구에서는 동적 유한요소해석을 수행하기 위해 필요한 구조물의 Damping 계수를 산정하기 위해 해석 모델의 각 Mode Shape와 해당하는 진동수를 산출하여 <그림 3.2.7>에 나타내었다.

○ 라멘교에 차량하중이 재하될 경우 발생할 수 있는 변형 형상은 <그림 3.2.103>의 (c)와 (e)이기 때문에 $w_1 = 14.185Hz$, $w_2 = 28.166Hz$를 사용하였고, (식 3.2.43)을 통해 Rayleigh Damping 계수($\alpha = 0.9433891$, $\beta = 0.0023612$)을 도출함

<표 3.2.49> 콘크리트와 강재 재료 물성치

콘크리트			강재		
밀도	탄성계수	푸아송비	밀도	탄성계수	푸아송비
2350kg/m^3	27.5MPa	0.2	7850kg/m^3	200MPa	0.3



(a) 1st - 9.2933Hz (b) 2st - 10.090Hz (c) 3st - 14.185Hz

(d) 4st - 27.627Hz (e) 5st - 28.166Hz

<그림 3.2.103> 라멘교 Mode Shape별 진동수

$$\xi_i = \frac{\alpha}{2w_i} + \frac{\beta w_i}{2} \qquad \text{(식 3.2.43)}$$

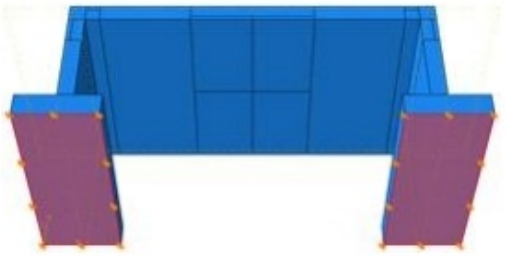
여기서 , α, β = Rayleigh Damping 계수
w_i = i번째 진동수
ξ_i = i번째 Damping Ratio

(바) 경계조건

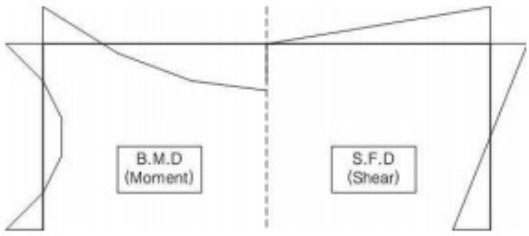
○ 실제 교량의 경계조건을 해석적으로 완벽히 동일하게 표현하는 것은 불가능하기 때문에, 해석 수행시 교량의 거동에 영향을 많이 미치는 부분을 최대한 유사하게 표현하는 것이 중요함

○ 교량의 기초 바닥판은 Fix로 고정함

○ 라멘교에 차량하중이 작용하는 경우 발생하는 휨 모멘트와 전단력은 <그림 3.2.104>와 같이 분포되는데, 교대와 슬래브가 강접합 되있기 때문에 교대 외측이 토양쪽으로 변형되는 현상이 나타남

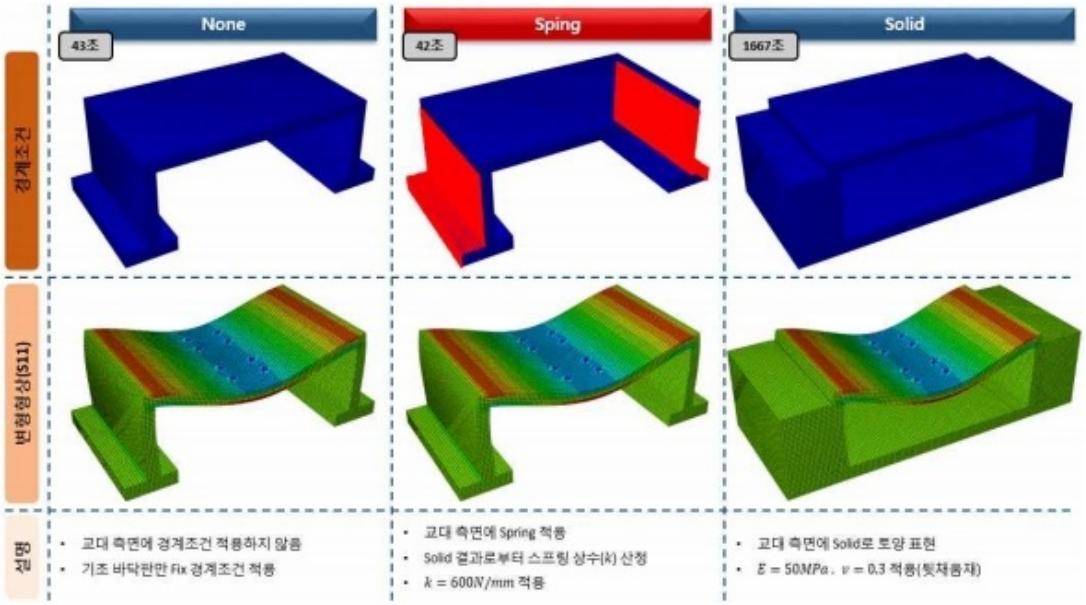


<그림 3.2.104> 기초 바닥판 경계조건



<그림 3.2.105> 라멘교 모멘트, 전단력 선도

○ 이와 같은 경우 교대 외측의 경계조건 유무에 따라 Input에 의한 Output의 결과가 달라지기 때문에 본 연구에서는 <그림 3.2.10>과 같이 경계조건이 없는 경우와 Spring 및 Solid로 적용한 결과를 분석하여 경계조건 적용 방법을 결정함



<그림 3.2.106> 경계조건 표현 방법

○ Solid 방법에서 뒷채움재에는 우리나라에서 일반적으로 구조해석시 사용되는 물성치를 적용하였고, Spring 방법에서의 스프링 강성은 동일한 조건에서의 해석 결과를 비교/검토하기 위하여 Solid의 해석 결과로부터 산정함

○ 해석시간은 None 43초, Spring 42초, Solid 1667초로 Solid 방법은 너무 많은 시간이 소요되어 Deep-Learning에 적용하기에는 어려울 것이라 판단되기 때문에, 경계조건을 Spring으로 적용하는 것은 불가피하며 Spring을 최대한 Solid의 결과와 유사하도록 묘사하여 연구를 수행함

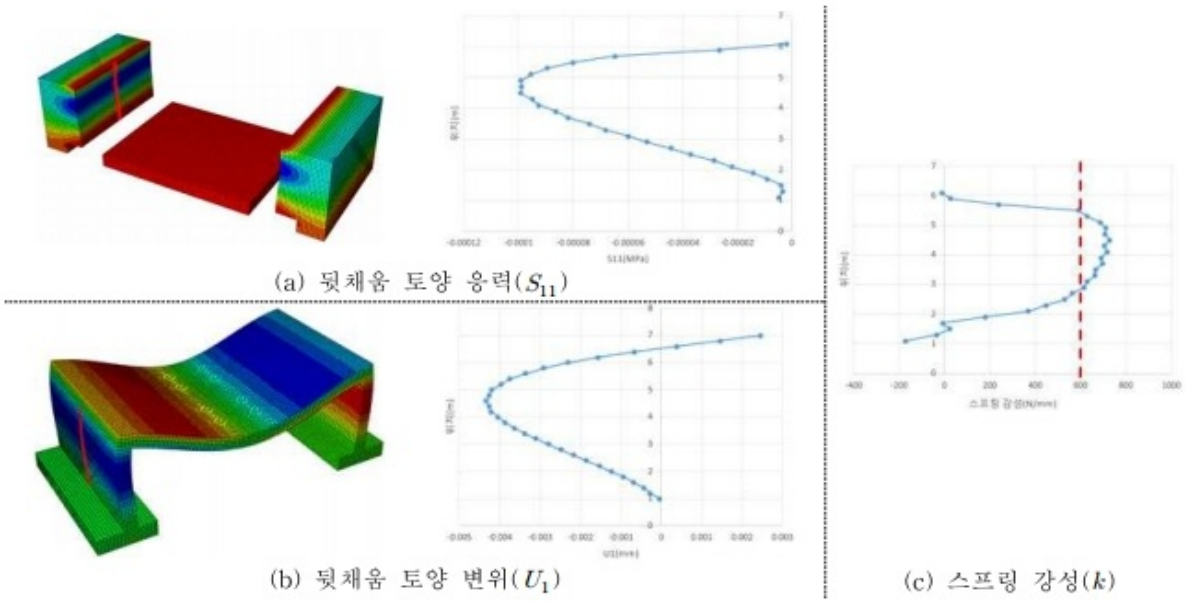
○ 스프링 강성 산정 과정은 <그림 3.2.107>와 같다. Solid 모델의 뒷채움 토양에서 응력(σ)과 수평 변위(δ)를 측정하고 (식 3.2.44)을 통해 스프링 강성(k)을 산정하여 <그림 3.2.107(c)>에 나타냄

○ 하지만, 깊이에 따라 강성값에 차이가 있고, 재하되는 차량하중의 위치 및 손상 위치에 따라 도출되는 강성값이 다르게 도출될 것이라 판단됨

○ 따라서, 모든 조건에 따라 유사하게 적용될 수 있는 스프링 강성값이 필요하기 때문에, <그림 3.2.107(c)>의 평균값인 600N/mm를 적용하여 비교/분석함

$$k = \frac{F}{\delta} = \frac{\sigma \times A}{\delta} \qquad \text{(식 3.2.44)}$$

○ 스프링 강성값의 적절성을 판단하기 위해 스프링 강성은 $k = 100N/mm$, $600N/mm$, $2000N/mm$를 적용하였고 None, Spring, Solid에 대한 해석 결과인 교대 변위와 응력을 <그림 3.2.108>에 나타냄



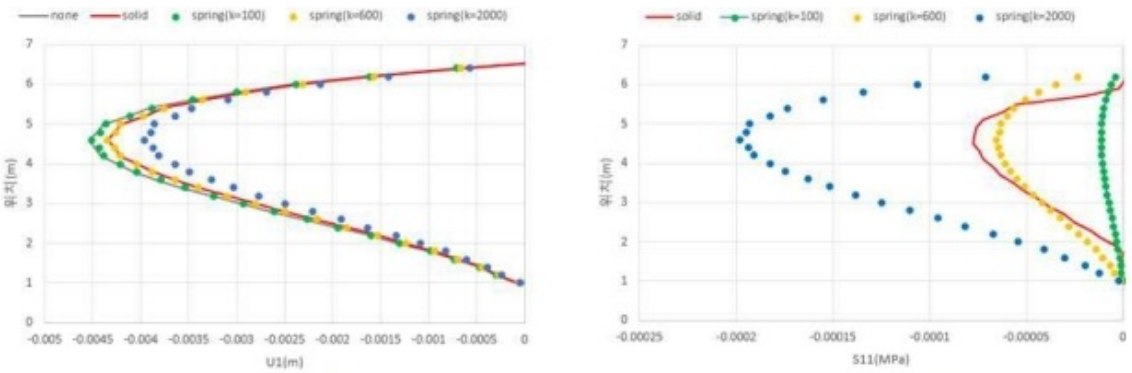
(a) 뒷채움 토양 응력(S_{11})

(b) 뒷채움 토양 변위(U_1)

(c) 스프링 강성(k)

<그림 3.2.107> 스프링 강성(k) 산정 방법

○ 강성이 작아질수록 교대 외측에 발생하는 변위는 None의 결과와 근접하고, 작용하는 응력의 크기가 작아지는 경향을 보였으며 스프링 강성이 $k=600N/mm$일 경우에 Solid와 가장 근접한 결과를 나타냄



(a) 교대 변위(U_1)

(b) 교대 응력(S_{11})

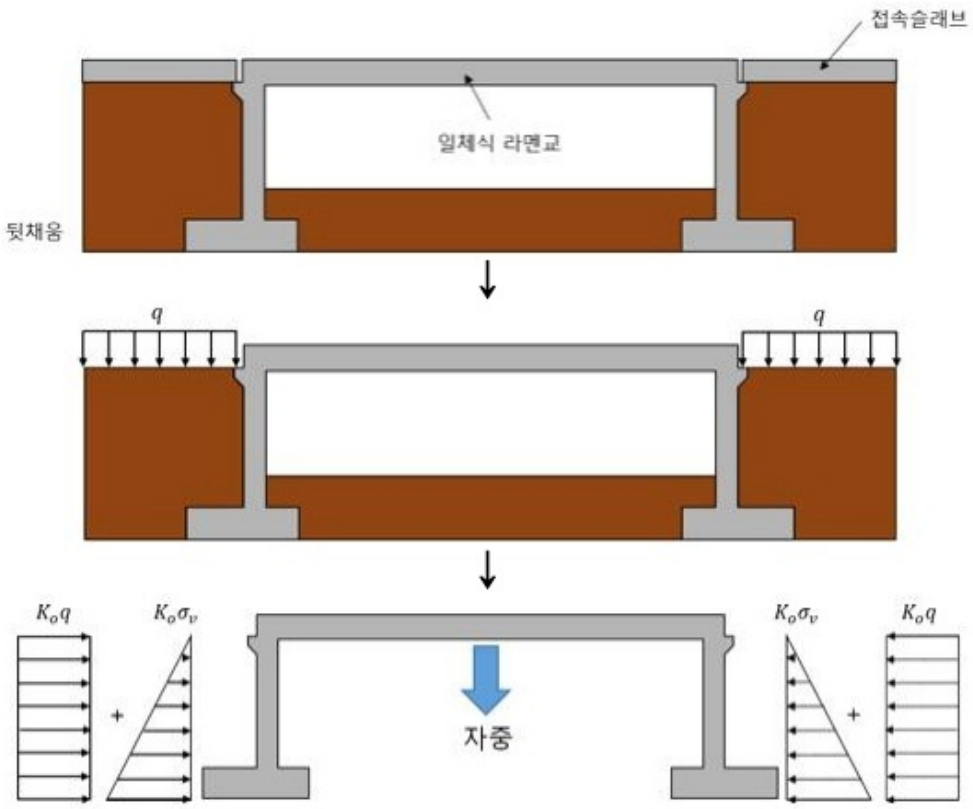
<그림 3.2.108> 스프링 강성에 따른 Ouput 결과 비교/분석

(사) 상시 작용하중 검토

○ 일반적으로 교대 형식 라멘교의 교대 외측에는 누수에 의한 접속 슬래브의 처짐을 방지하기 위하여 투수성이 좋은 뒷채움재에 의해 채워지며, 뒷채움재 상부에는 접속 슬래브가 시공됨

○ 따라서, 라멘교에는 자중뿐만 아니라 뒷채움재에 의한 토압과 접속슬래브의 상재하중에 의해 발생하는 토압이 교대 외측에 추가적으로 작용함

○ <그림 3.2.109>에 나타낸바와 같이 뒷채움재 토압과 접속 슬래브에 의한 토압은 교대 외측의 수평방향으로 작용하며, 뒷채움재 토압은 깊이에 따라 크기가 커지는 경향을 보임



<그림 3.2.109> 교대 형식 라멘교의 작용 사하중

○ 식 (3.2.45)~(3.2.48)에 교대 형식 라멘교의 교대 외측에 작용하는 사하중의 계산과정을 나타내었고, 물성치는 각 재료의 일반적인 값을 사용함

○ 각 수식은 정지토압계수(K_o), 토양 마찰각($\varnothing$), 상재하중(q), 콘크리트 단위중량($\gamma_{concrete}$), 슬래브 두께(t_{slab}), 중력 가속도(a), 뒷채움재 수직 토압(σ_v), 토양 단위중량(γ_{soil}), 깊이(z), 총 수평토압(σ_h)으로 구성되며, 최종적으로 상시 작용 하중은 중력과 수평토압을 해석모델에서 검토함

- 정지토압계수

$$K_o = 1 - \sin(\varnothing) = 0.426 \quad \text{(식 3.2.45)}$$

- 상재하중

$$q = \gamma_{concrete} \times t_{slab} \times a = 2350kg/m^3 \times 0.8m \times 9.8m/s^2 = 18424N/m^2 = 0.0184N/mm^2 \quad \text{(식 3.2.46)}$$

- 뒷채움재 수직 토압

$$\sigma_v = \gamma_{soil} \times z \times a = 1900kg/m^3 \times z \times 9.8m/s^2 = 18620N/m^2 \times z = 0.0186zN/mm^2 \quad \text{(식 3.2.47)}$$

- 총 수평토압

$$\sigma_h = K_o(q+\sigma_v) = 0.426(0.0184+0.0186z)N/mm^2 = 0.0078+0.0079zN/mm^2 \quad \text{(식 3.2.48)}$$

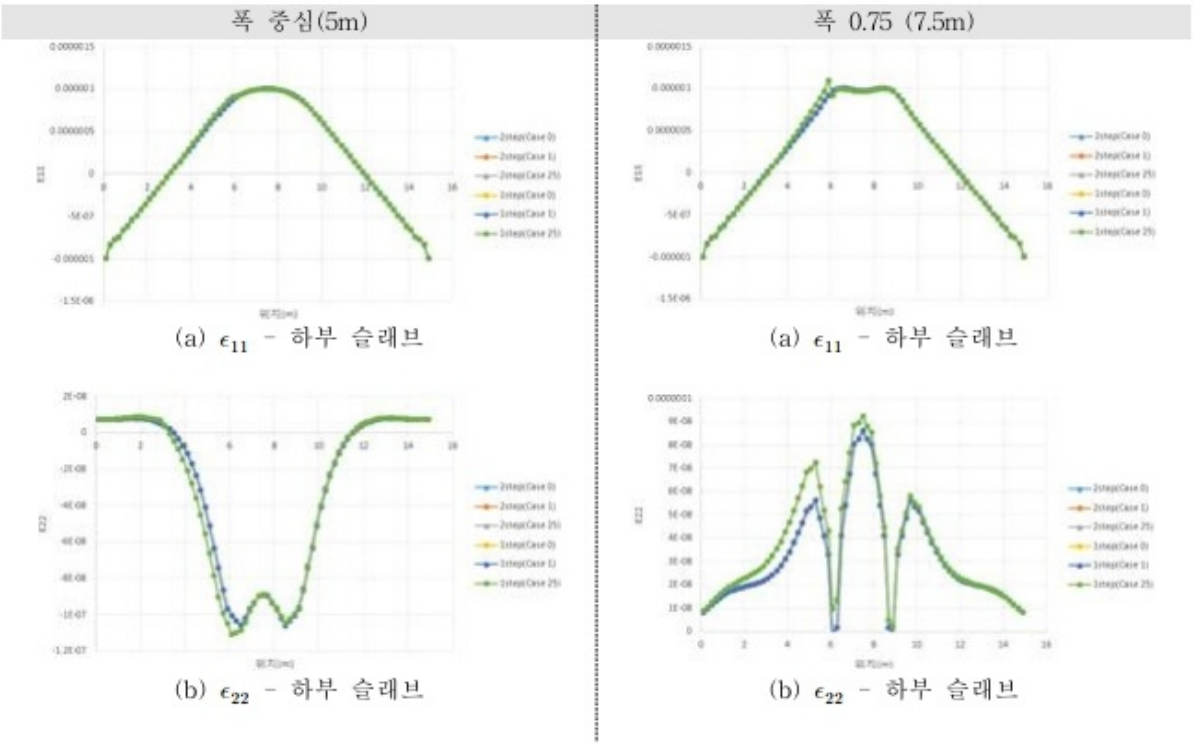
○ 본 연구의 손상 예측 시스템은 공용중인 교량에 계측기를 통하여 변위, 변형률 등의 계측 데이터를 측정할 시 이미 재하되고 있는 사하중에 의한 영향은 측정되지 않기 때문에, 설계 단계에 대한 연구와는 차이점이 있음

○ 하중에 따라 Ouput 데이터가 상이하게 나타나며, 최종적으로 Deep-Learning에 의한 손상 예측 시스템의 결과가 신뢰성이 저하될 수 있으므로, 실제 조건과 유사한 조건으로 해석을 수행하는 것은 상당히 중요함

○ 따라서, 본 연구에서는 다음과 같이 2가지의 하중 재하 방법에 따른 해석 결과를 분석하고, 하중 재하 방법을 결정함

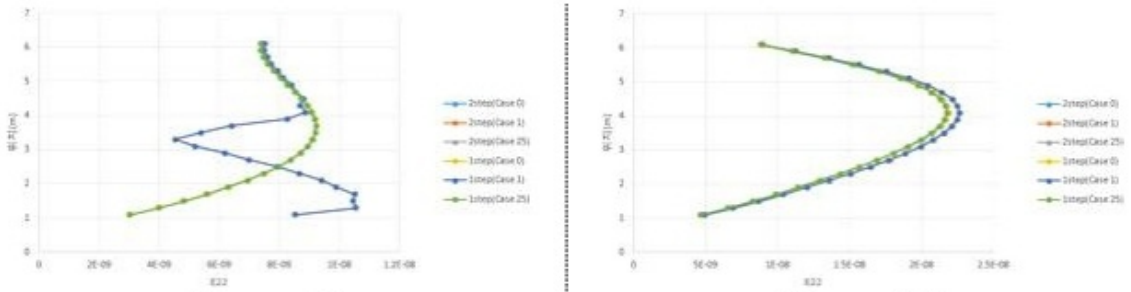
- 2 Step : 사하중(Step-1) -> 활하중(Step-2)
- 1 Step : 활하중(Step-1)

○ 손상 위치, 하중 재하 방법에 따른 라멘교 폭 중심과 0.75 위치의 변형률 분포를 <그림 3.2.110>에 나타내었고, 해석 데이터를 분석한 결과 손상 위치에 따른 차이는 발생하나 하중 재하 방법에 따른 차이는 미비하였음



(a) ϵ_{11} - 하부 슬래브 (a) ϵ_{11} - 하부 슬래브

(b) ϵ_{22} - 하부 슬래브 (b) ϵ_{22} - 하부 슬래브



(c) ϵ_{22} - 교대　　(c) ϵ_{22} - 교대

<그림 3.2.110> 하중 재하 방법에 따른 데이터 분포

○ 이상적으로는 2 Step 재하 방법이 적절하나, 결과의 차이가 미비하고 해석시간의 단축을 위해서 1 Step의 재하 방법으로 해석을 수행하였음

(아) 손상 표현

○ RC 구조물의 경우 염해, 탄산화, 동해, 화학적 침식, 알칼리골재 반응, 피로 등의 열화 현상에 의해 노후화가 진행되는데, 이와 같은 열화 현상은 RC 구조물에 공통적으로 철근 부식, 철근-콘크리트 부착력 감소, 균열, 박리·박락과 같은 손상을 발생시킴

○ 이러한 손상은 해석적으로 철근 단면적 감소, 철근-콘크리트 마찰력 감소, 콘크리트 강성 감소, 콘크리트 단면적 감소 등으로 표현할 수 있을 것으로 판단되나, 본 연구에서 사용되는 Deep-Learning 방법인 DNN, CNN, RNN은 복합적으로 표현된 손상을 구분할 수 없는 한계를 지니고 있음

○ 따라서, 본 연구에서는 RC 구조물에 발생하는 모든 손상을 포괄적으로 표현할 수 있어야하기 때문에, 탄성계수의 감소로 RC 구조물의 손상을 나타냄(<표 3.2.50>)

<표 3.2.50> RC구조물 손상에 대한 해석적 표현

손상	철근 부식	부착력 감소	균열	박리·박락
손상(해석)	철근 단면적 감소	철근-콘크리트 마찰력 감소	콘크리트 강성 감소	콘크리트 단면적 감소
손상 표현(해석)	**탄성계수 감소**			

○ <그림 3.2.111>에 손상을 탄성계수의 감소로 표현하는 것에 대한 재료역학 기반의 근거를 나타냄

○ 보의 단면이 강성이 상이한 두가지의 재료로 구성되어 있는 경우, 단면치환 계수($n = E_2/E_1$)을 통해 동일한 강성의 재료로 치환하는 복합보 이론을 사용하여 설계됨

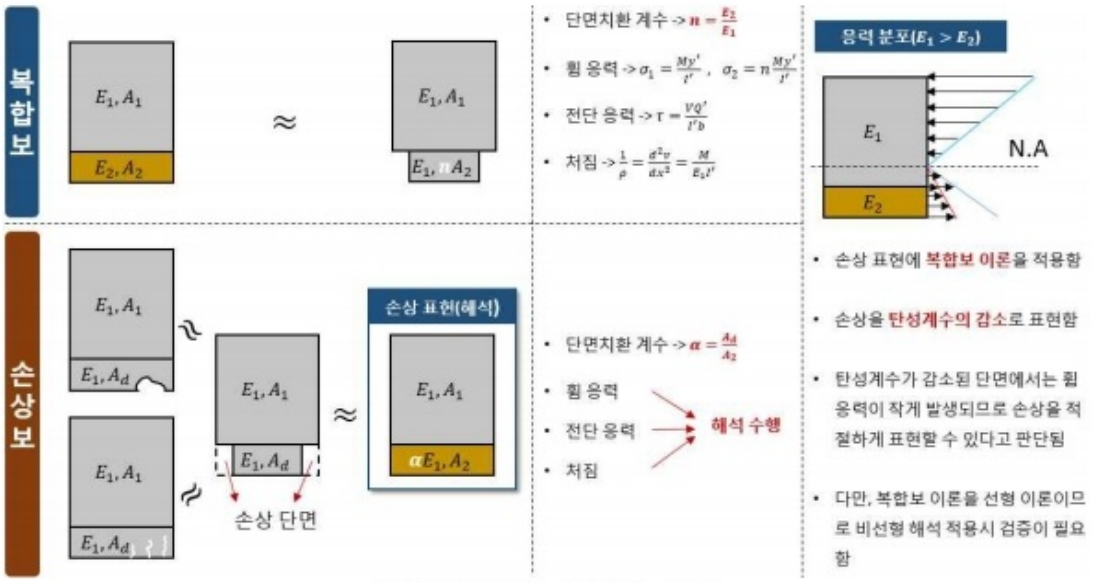
○ $E_1 > E_2$인 경우 치환된 단면은 기존의 단면보다 세장하며, 치환단면에 발생하는 휨 응력은 더 작아지게 됨

○ 본 연구에서는 복합보 이론을 역으로 적용하였다. RC 구조물에 균열이나 박리·박락 등의 손상이 작용하는 경우 강도를 발현할 수 있는 유효 단면적이 줄어들게 됨

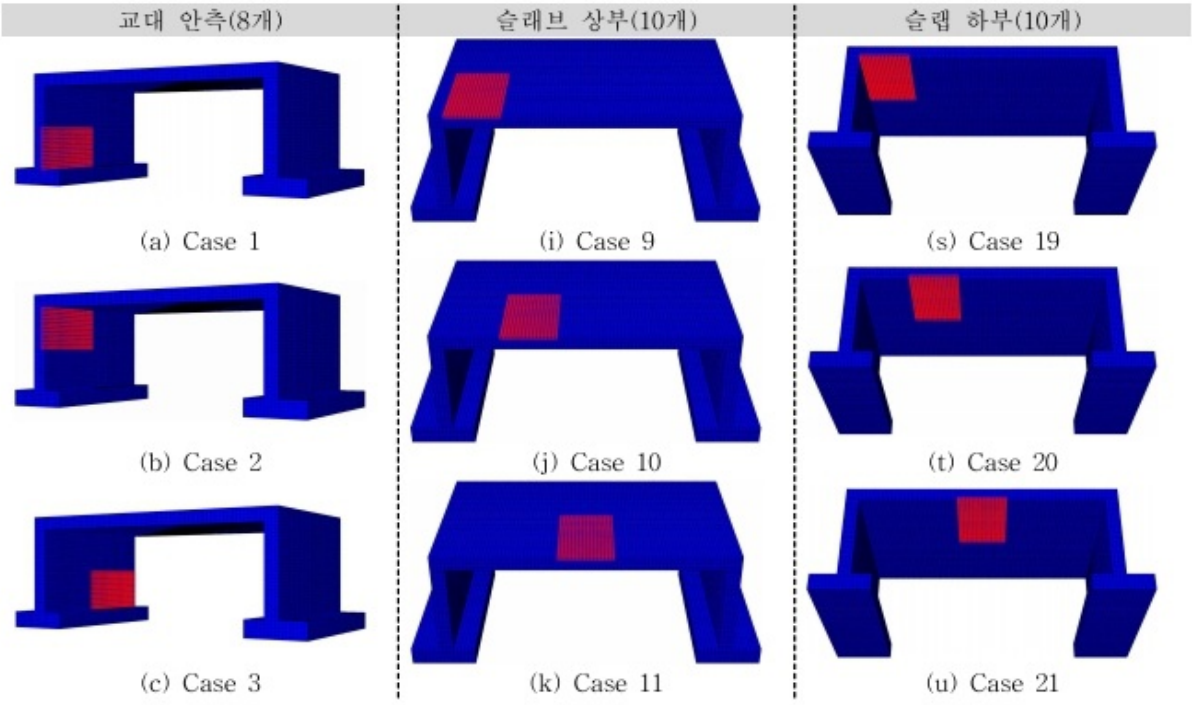
○ 하지만, 해석 모델의 요소를 제거하여 손상을 표현할 경우 손상의 무작위성을 나타낼 수 없기 때문에, 단면의 감소로 표현하는 대신에 탄성계수치환 계수($\alpha = A_d/A_2$)를 통해 탄성계수를 감소시키는 방법을 적용함

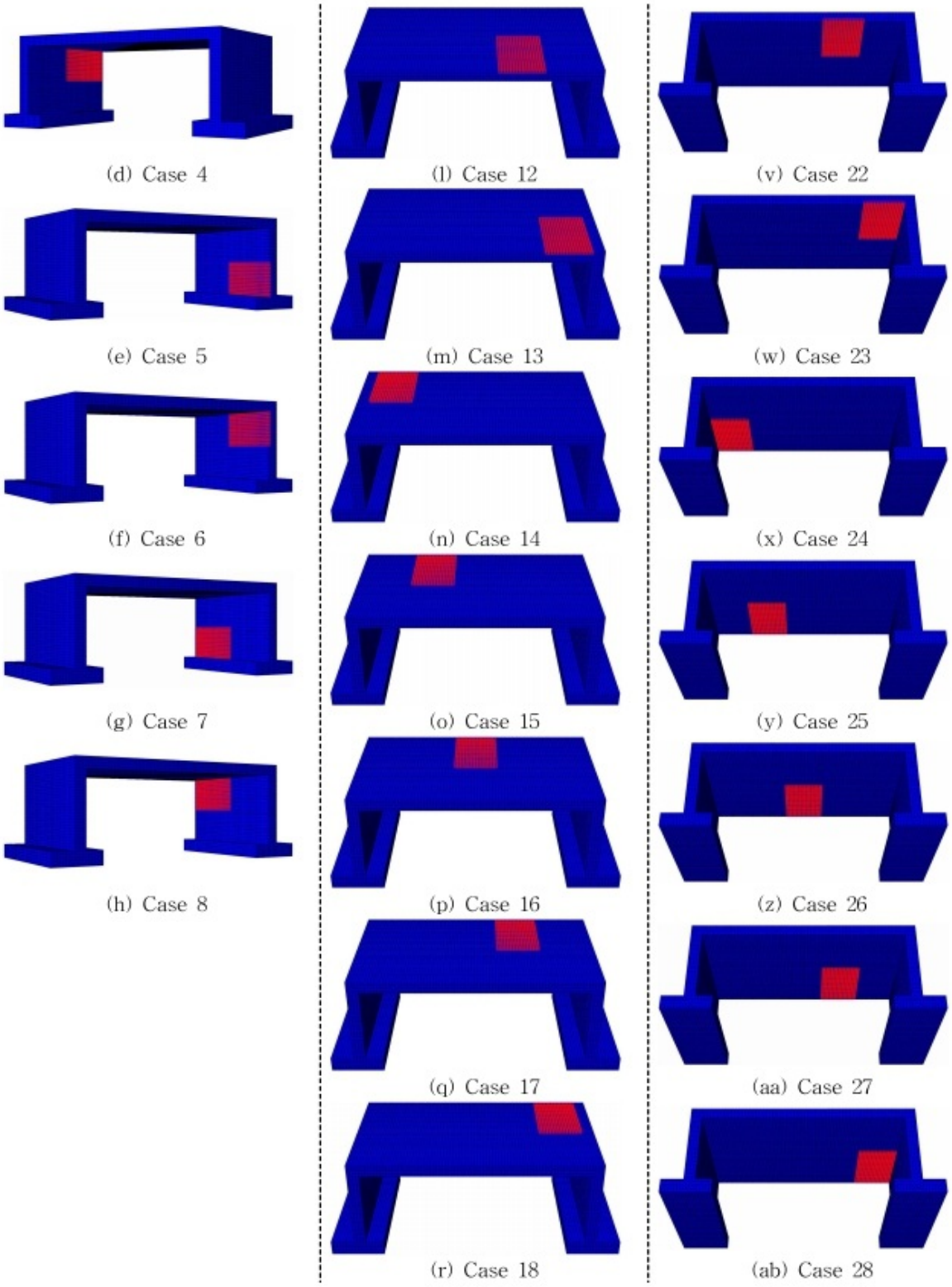
○ 손상은 열화에 의해 라멘교 표면 전체에 발생할 수 있도록 교대 안측(8개), 슬래브 하부(10개), 슬래브 상부(10개)로 <그림 3.2.112>와 같이 총 28개 손상을 고려하였고 손상이 없는 것까지 포함하여 총 29개의 Case로 해석을 진행하였음

○ 탄성계수는 적정 단면 손실률을 고려하여 20%~30%의 비율로 감소시킴



<그림 3.2.111> 손상표현 근거





<그림 3.2.112> 해석 모델 손상 Case

(4) 해석 방법

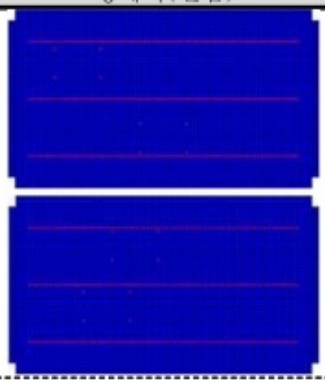
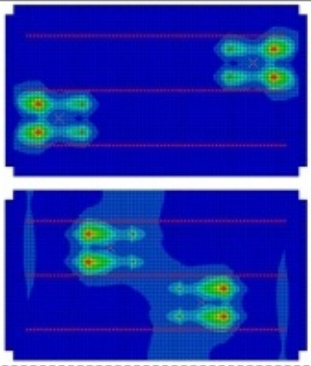
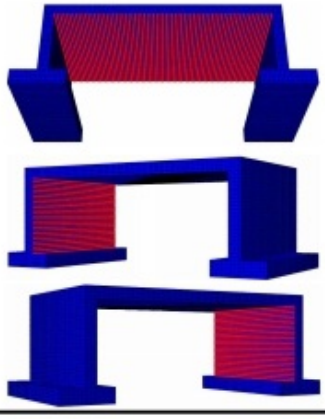
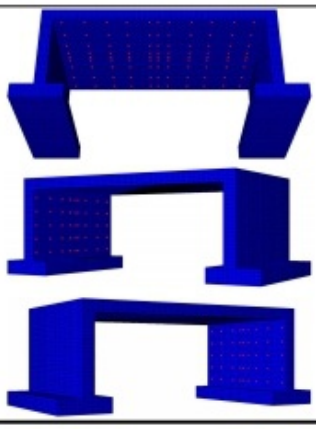
○ 구조물의 손상을 Deep-Learning을 통하여 예측하는 기법은 4차산업 시대에 들어서면서 새롭게 시도되는 기법으로 현재 정형화된 연구 방법이 없음

○ 본 연구에서는 Deep-Learning을 수행할 빅데이터를 생성하기 위해 앞서 언급한 라멘교 모

델에 대해 정해석(랜덤), 동해석(랜덤), 동해석(중첩)을 수행함

○ 손상 구조해석에 대한 상세 해석 방법을 <표 3.2.51>에 나타냄

<표 3.2.51> 손상 구조해석 상세 해석 방법

구분	정해석(랜덤)	동해석(랜덤)
하중 재하 방법		
	- 4개의 집중하중 형태로 차륜을 묘사함 - 차로 내에서 각 차로당 무작위로 차륜 위치 선정	- 4개의 강체 요소로 차륜을 묘사함 - 2개의 차로에 모두 재하 - 각 차로 내에서 차륜의 폭 위치 무작위 선정 - 2번째 차량 출발 시간 무작위 선정
상세 해석 방법	재료/기하 선형 정해석	재료/기하 선형 동해석
변수	- 손상 위치 : 0 - 28 (총 29 Case)	- 손상 위치 : 0 - 28 (총 29 Case) - 차량 속도(km/s) : 65km/s 고정
랜덤 변수	- 각 차로내 차륜 위치 - 손상 정도: 20%-30%	- 각 차로내 차륜 폭 위치 - 손상 정도: 20%-30% - 2번째 차량 출발 시간
데이터 생성 Hz	X	10Hz
총 데이터 생성 개수	29000개 (Case당 1000개)	29000개 (Case당 1000개)
데이터 종류	변위(U1 U2, U3), 변형률(E11, E22, E33, E12, E13, E23)	
데이터 생성 위치		

(5) 소결

○ 본 연구에서는 교량의 손상 예측 시스템 개발의 사전 작업으로써, Deep-Learning에 적용할 데이터를 생성하기 위해 해석 연구를 수행하였는데,. 본 연구에서의 연구과정과 연구결과를 정리하면 다음과 같음

- Deep-Learning을 수행하기 위해서는 많은 수의 데이터가 필요하기 때문에, 연구 기간내에

결과를 도출하기 위해 현재 국내에 공용중인 교량 현황을 조사하여 대상 교량을 라멘교로 제한하고 해석 모델 제원을 설정함
- 차로와 차량 제원도 국내 현황을 조사하여 선정됨
- 실제와 유사한 경계조건과 상시 작용하는 하중을 묘사하기 위해 검증 해석을 수행하였으며, 뒷채움재의 경우 spring으로 묘사하였고 상시 작용하중의 영향은 미비하다 판단되어 배제함
- 박리, 박락, 부식과 같은 열화에 의한 부재의 손상은 복합보 이론을 역으로 적용하여 탄성계수의 감소로 표현하였으며, 열화 현상은 구조물의 표면에서부터 발생하기 때문에 슬래브(하부)와 교대(좌,우)에 일정 면적별로 구분하여 총 28개의 손상에 대한 데이터를 생성함
- 데이터는 정해석(랜덤), 동해석(랜덤), 동해석(중첩)의 해석 방법을 통해 생성되었으며 정해석(랜덤) 29000개, 동해석(랜덤) 29000개, 동해석(중첩) 377개의 데이터를 생성함
- 동적 데이터의 중첩에 대한 타당성을 검토하기 위해 추가 검증 해석을 수행하였으며, 해석결과 데이터가 다소 상이하나 수치해석 오차(roundoff error, truncation error)로 판단됨

나. 교량 구조물의 손상 예측 시스템

(1) 상태평가 모델링 기반기술

(가) 기존 확률론적 상태 평가 방법론 조사

○ 손상 추정 시스템의 개발에 앞서 본 연구에서는 기존 교량 유지관리에 관한 연구에 사용되는 변수들의 변동성을 파악하기 위해 확률론적 방법에 기반을 둔 교량 유지관리 연구에 대해 조사하였음

○ 확률론적 교량구조물 평가기법은 변수들을 확률적 분포로 표현하여 그에 따른 파괴확률을 구하는 방법을 말하며 문헌분석의 결과 확률론적 교량구조물 평가 기법에 대한 문헌들로 주로 '신뢰성 기반 평가기법'에 대한 연구들이 대다수의 문헌을 차지하고 있음을 확인하였음신뢰성 기반 평가방법이 주를 이루었고 그 종류로는 응답면기법(RSM, Response Surface Method), 신뢰성 해석 기법(FORM, First Order Reliability Method), 몬테카를로 시뮬레이션(MCS, Monte Carlo Simulation) 등이 있음을 확인함<표3.2.52>

<표 3.2.52> 국내외 확률론적 교량구조물 평가기법 문헌조사

구분	제목	저자	연구 내용	수행연도
국내	교량구조의 체계 신뢰성 해석을 위한 중요도 표본추출 기법	조효남, 김인섭	- 많은 반복횟수를 필요로 하는 기존의 몬테카를로 시뮬레이션(MCS) 방법을 개선한 중요도 표본 추출기법(Importance Sampling Technique; IST)기법을 사용한 IST-MCS방법을 사용하여 최확파괴점을 구하여 신뢰성 해석을 수행	1991
	응답면 기법을 이용한 구조 신뢰성 해석	양영순, 이재옥, 김판영	- 관심있는 영역에서 몇 개의 표본점을 선정하여 선정된 표본점에서 구조해석을 실시하고, 그 결과를 통해 한계상태방정식을 근사함	1995
	실제 구조물의 유한요소 신뢰성해석을 위한 복합 알고리즘	허정원	- 유한요소법을 활용한 응답면기법과 일차신뢰도법(First-Order Reliability Method: FORM)을 혼합하여 신뢰성해석을 수행	2003
	신뢰성 지수를 이용한 교량 구조물의 건설진동 예측에 관한 연구	박연수, 우정하, 전양배, 김용록, 김동현	- 하중과 재료의 강도가 일정한 값이 아닌 어떠한 형태의 확률분포로 판단하고 그 분포에 따라 구조물의 안전성을 판단함	2003

	선형 적응적 가중 응답면기법에 의한 현수교의 위험도 분석	조태준, 김이현, 조효남	- 몇 개의 결정된 분석값과 이러한 결과의 회귀분석 값을 통하여 특성 묘사함수를 근사 접근하는 응답면 기법을 활용함 - 응답면 기법을 활용하여 시공단계에서의 부재별, 위치별 안전성을 판단	2008
	생애주기분석을 통한 강교량 시스템수준의 유지관리 전략	박경훈, 이상윤, 김정호, 조효남, 공정식	- 교량을 부재들의 상호 종속적인 관계를 고려한 시스템 수준의 모형으로 유지관리함 - 또한 생애주기비용 뿐만 아니라 생애주기성능을 통해 각 부재의 성능의 기간을 산출	2008
	LRFD 설계를 위한 교대의 신뢰성 해석 모델	엄준식	- 여러 하중(사하중, 활하중, 상재하중 등)을 고려하여 한계상태함수를 구한 후 이를 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 신뢰성 해석을 함 - 신뢰성 해석 후 설계변수와 신뢰성계수의 관계를 정립함	2014
	확률적인 응력-수명 방법에 의한 강교 부재의 피로신뢰성 평가	박연수, 한석열, 강대홍, 서병철	- 강교 부재의 피로신뢰성을 평가하기 위해 응력범위를 빈도분포로 표현하고 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 부재에 발생하는 응력이력에 의한 파괴확률을 구함	2004
국외	Effect of reinforcement corrosion on reliability of highway bridges	Dimitri V.Val, Mark G. Stewart, Robert E. Melchers	- 부식에 의한 교량의 신뢰성을 일차신뢰도법(FORM)을 활용하여 국부적, 전체적 관점에서 연구	1998
	Updating bridge reliability based on bridge management systems visual inspection results	Allen C, Dan M Frangopol	- 관측결과로 얻어지는 결과값들을 활용하여 신뢰성지수를 파악하여 교량관리	2003
	Multiobjective maintenance planning optimization for deteriorating bridges considering condition, safety, and life-cycle cost	Min Liu, Dan M. Frangopol	- 유전자 알고리즘을 통해 생애 주기 비용과 교량의 상태 각각의 관점에서 교량을 관리하여 최적의 관리를 함 - 유전자 알고리즘을 통한 값들의 변동성을 고려하여 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 비교함	2005
	Bridge health monitoring system based on vibration measurements	Evaggelos Ntotsios, Costas Papadimitriou, Panagiotis Panetsos, Grigorios Karaiskos, Kyriakos Perros, Philip C. Perdikaris	- 구조물을 유한 요소 모델로 구분한 후 베이지안 기법을 활용하여 모델에 관측되는 값을 통해 구조물의 피해를 감지	2008
	Bridge reliability assessment based on monitoring	Dan M. Frangopol, Alfred strauss, Sunyong Kim	- 관측된 데이터를 통해 일차신뢰도법(FORM)과 이차신뢰도법(SORM)방법을 사용하여 항복강도와 피로 거동을 분석함 - 추가로 관측 비용에 관한 부분도 연구	2008
	Bridge model updating using Response Surface Method and Genetic Algorithm	Lu Deng, C.S.Cai	- 응답면기법을 활용하여 교량모델에 영향을 주는 변수들의 값을 구하고 많은 시뮬레이션을 통해 응답면 함수를 구한다. - 그렇게 구한 함수를 유전자 알고리즘을 통해 보정한다.	2010

○ 이러한 교량구조물의 평가기법들은 주로 System 변수(콘크리트 단위중량, 탄성계수 등)와 Condition 변수(사하중, 활하중, 풍력 등)의 값들을 확률적 분포로 정의해서, 파괴확률을 추

정하는데 초점을 두었음. 본 연구에서 목표로 하는 계측가능한 Response 변수와 Condition 변수들을 이용하여 계측이 어려운 System 변수를 추정하는 머신러닝 기반 모델의 개발은 기존의 방법들과는 차별화된 방법론이라 판단됨

(나) 머신러닝 기반 상태평가 모델링 기법 분석 및 선정

○ 본 연구에서는 이러한 머신러닝 기반의 상태평가 방법론을 이용한 교량 구조물의 손상 추정 기법의 개발에 앞서 머신러닝 기반 모델링 기법들 중 적절한 상태평가가 가능한 모델링 기법을 선정하고자 하였음

○ 머신러닝은 컴퓨터가 스스로 학습하도록 알고리즘 및 기술을 개발하는 분야를 말함. 다시 말해 학습된 알고리즘을 이용하여 데이터를 처리하는 방법론임

○ 머신러닝의 여러 방법론들은 크게 표<3.2.53>과 같이 5가지 유형으로 정리가 가능함 (Domingos, 2016)

<표 3.2.53> 5가지 머신러닝의 유형

유형	표현	대표적 알고리즘	평가	최적화
유추주의	서포트벡터	서포트벡터머신 (SVM, Support Vector Machine)	마진	조건부최적화
베이즈주의	그래픽모형	베이즈이론 (Bayes' Theorem)	사후확률	확률추론
기호주의	논리	의사결정트리 (Decision Tree)	정확도	역연역법
진화주의	유전자프로그래밍	유전자 알고리즘 (Genetic Algorithm)	적합성	유전자탐색
연결주의	신경망	신경망 알고리즘 (Neural Network)	제곱오차	기울기하강

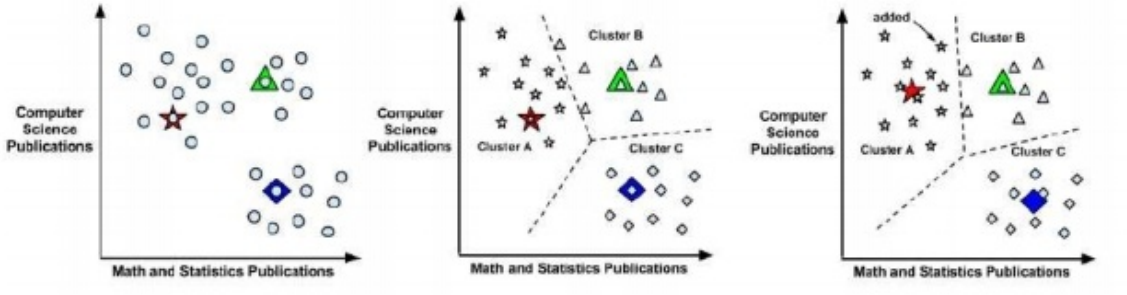
○ 모든 머신러닝 알고리즘은 각각의 특성을 가지고 있으며 작동상에도 조금씩 차이가 있으므로, 특정 프로젝트에서 머신러닝을 이용하여 목표한 성능을 달성하기 위해선 각각 알고리즘의 특성을 파악해야하고 해당 프로젝트에 각각 머신러닝 알고리즘들의 적합성을 따져봐야 함

○ 따라서 손상 추정 시스템의 개발에 앞서 각 머신러닝 유형에 따른 머신러닝 기법 적합성 분석을 진행하였음

▨ 유추주의

○ 유추주의의 알고리즘들은 연속형 변수를 예측하는 알고리즘이 아닌 입력변수에 대한 결과로

변수들을 분류하는 Classification 알고리즘들이며 대표적인 알고리즘으로는 K-means Clustering이 있음<그림 3.2.113>



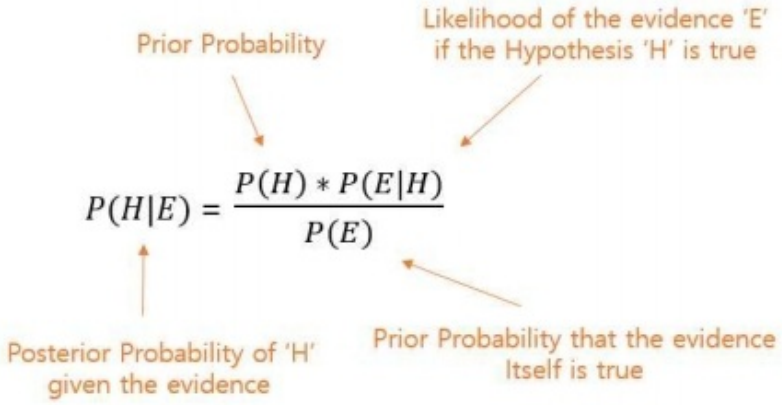
<그림 3.2.113> K-means Clustering 개요(Lantz, B., 2013)

○ 다시 말해, 뉴럴네트워크 알고리즘과 비교하면, 뉴럴 네트워크 알고리즘을 이용하기 위해선 미리 모델을 형성시키는 과정인 Training 과정을 미리 거친 뒤 모델을 이용하여 Test를 진행하는 반면에 유추주의 알고리즘은 해당 데이터 자체를 이용하여 결과 값을 산정할 수 있다는 장점이 있음

○ 따라서 트레이닝 시간은 전혀 필요하지 않지만, 테스트를 위해선 모든 데이터를 메모리에 로드해야하기 때문에 테스트 시간이 매우 길다는 단점을 가지고 있어 활용성이 떨어지므로 본 연구에 적합하지 않다고 판단됨

▨ 베이즈주의

○ 베이즈 주의의 주요 알고리즘들은 베이즈의 정리<그림3.2.18>를 이용하여 분류를 하는 방법론임



<그림 3.2.114> 베이즈 정리

○ 베이즈 이론에서는 사전확률(Prior Probability), 새로 습득한 정보(Likelihood)를 이용하여 사후확률(Posterior Probability)를 구해내어, 다음 의사결정의 확률을 변화시켜 의사결정에 활용함

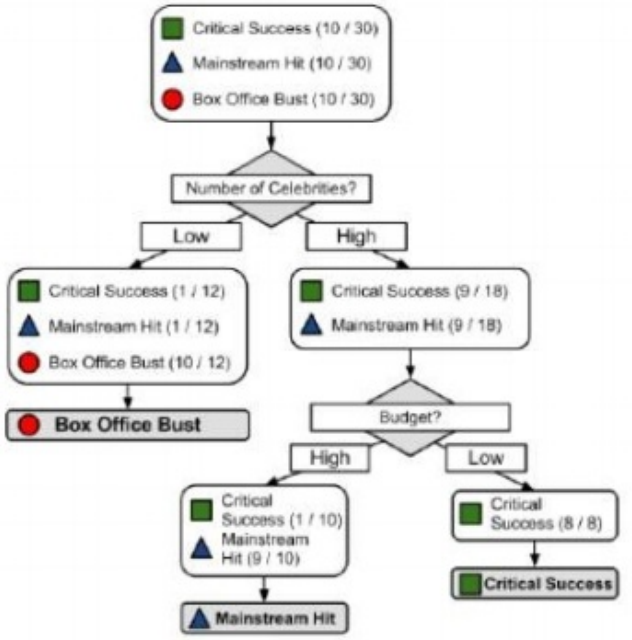
○ 즉, 우리가 이전에 알고 있던 정보에 새로 습득한 정보를 조합해 이를 바탕으로 사후확률을 예측해 결정을 내림

○ 베이즈 알고리즘은 의사결정에서 주어진 Data 외에 우리가 이전에 알고 있던 사전지식을 적절히 활용하여 의사결정하는 방법론(Bayesian Approach)으로 발전하여 스팸분류기, 문자, 음성인식 등 학습형 알고리즘을 만드는데 활용되고 있음

○ 타 알고리즘의 경우 독립변수들을 이용하여 종속변수를 구하게 되지만, 베이즈 알고리즘을 이용하면 기존 사전지식을 활용하기 때문에 주어진 데이터와 사전지식을 활용하여 종속변수에 따른 각 독립변수들의 확률들을 정의할 수 있다는 장점을 가지나 다양한 변수간의 상호연관성을 나타내는 것이 매우 어려운 문제이므로, 본 연구에 적절하지 않다고 판단됨

▨ 기호주의

○ 미리 알고있는 경험적 지식을 바탕으로 Rule을 설정하고, 설정된 Rule에 부합하는지의 여부에 따라 결과값을 만들어 내는 알고리즘으로 대표적 알고리즘은 Decision Tree임<그림 3.2.115>



<그림 3.2.115> Decision Tree 예 (Lantz, B., 2013)

○ Decision Tree의 알고리즘의 종류로는 C4.5, C5.0, CART, CHAID, Regression Tree 등이 있으며 머신러닝에서 Decision Tree는 C5.0, Random Forest방법 등과 같이 Random Sampling 된 수많은 트리를 이용하여 예측의 정확성을 높이는 방법들이 존재함

○ 타 방법론과는 달리 각각의 데이터가 어떻게 분류되었는지를 가장 쉽게 확인할 수 있고 규칙만 알면 적절한 시간내에 학습을 진행할 수 있다는 장점을 가짐

○ 또한 Input 및 Output 변수로 범주형, 연속형 변수를 모두 사용할 수 있으며 특히 랜덤포레스트의 경우 기존 회귀분석의 예측 정확도보다 더욱 높은 예측 정확도를 보임

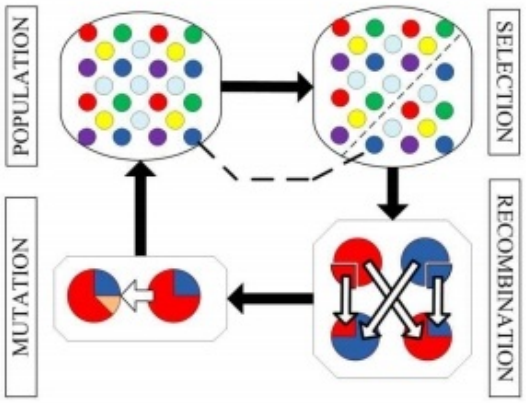
○ 이러한 점과 더불어 연구에서 사용될 Input, Output 변수의 경우 연속형 변수로 정의될 가능성이 높으므로, Decision Tree 알고리즘의 이용이 가능할것으로 보이나, 학습된 규칙만으

로 실제현상을 설명하기 어려움

○ 또한, 트리의 깊이가 깊어질수록, 잘못된 규칙이 생길 위험이 커지고, 그 규칙으로 설령 맞는 예측을 내놓았다고 해도 도저히 설명할 수 없는 상황이 벌어질 수 있다는 단점이 있어 신뢰성이 떨어질 수 있으므로 손상 추정에는 적절하지 않다고 판단됨

▨ 진화주의

○ 유전 알고리즘(Genetic Algorithm)은 자연세계의 진화과정에 기초한 계산 모델로서 존 홀랜드(John Holland)에 의해서 1975년에 개발된 전역 최적화 기법임<그림 3.2.116>



<그림 3.2.116> Genetic Algorithm의 예
(Olsson and Magnusson, 2016)

○ Genetic Algorithm은 구현하기 쉽고, 이해하기 쉽다는 장점과 대체적으로 만족할 만한 결과를 가져다 준다는 여러 연구 결과가 존재하여 다양한 최적화 문제에 활용되고 있음

○ 하지만 본 연구에서 활용될 데이터를 고려할 때, 다양한 교량 손상에 모두 적합될 만한 목적함수 목적함수를 제시하는 것이 어려우므로 본 연구에 적합하지 않다고 판단됨

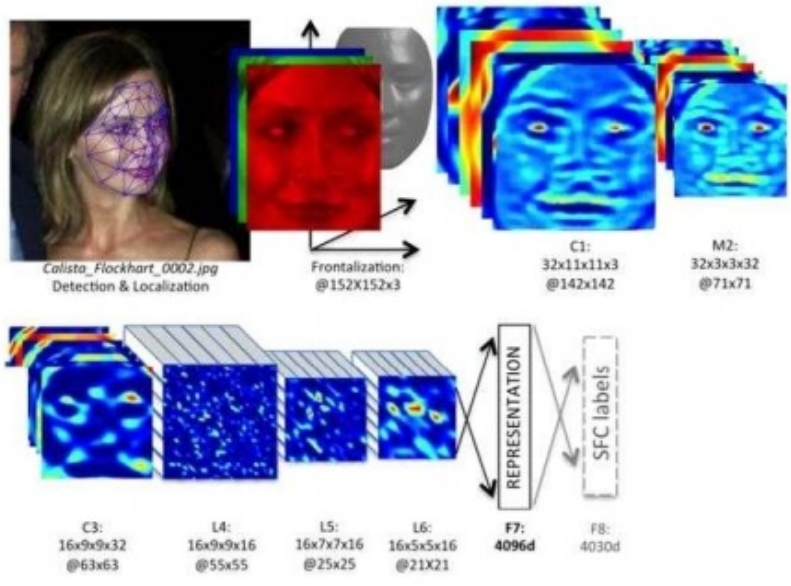
▨ 연결주의

○ 현재 가장 각광받고 있는 머신러닝 기법인 딥러닝(Deep Learning)의 기초가 되는 알고리즘이며 주로 인간의 뇌를 모방한 알고리즘인 인공신경망을 기반함

○ 신경망 알고리즘은 규칙기반 프로그래밍으로 풀기 어려운 컴퓨터 비전 또는 음성 인식과 같은 다양한 범위의 문제를 푸는데 주로 사용되고 있음

○ 뉴럴 네트워크의 대표적 알고리즘인 딥러닝 기법은 기존 뉴럴 네트워크와 비교하여 많은 수의 Hidden Layer를 가지고 있다는 특징이 있으며 딥러닝 기법은 일반적인 인공신경망과 마찬가지로 복잡한 비선형 관계(Non-Linear Relationship)들을 모델링할 수 있다는 장점을 가짐

○ <그림 3.2.117>은 실제 활용되는 딥러닝 기법중 하나인 Convolution Neural Network(CNN)의 아키텍처를 보여줌



<그림 3.2.117> CNN architecture 예 (Taigman et al., 2014)

○ 이러한 Deep Learning은 예측 정확성을 요구하는 분야에 많이 사용하고 있으며 망의 구성이 복잡해질수록 모형의 정확도가 높아짐

○ 광범위한 문제영역을 다룰 수 있고, 범주 및 연속형 변수 모두 다룰 수 있고 많은 Deep Learning 라이브러리(Tensor Flow, Keras, Pytorch 등)가 제공되어 있어 개발접근성이 좋음

○ Input 및 Output 변수로 범주형, 연속형 변수를 모두 사용할 수 있으며 기존 회귀분석의 예측 정확도보다 더욱 높은 예측 정확도를 보이고 있음

○ 또한 Input 및 Output 변수의 형식으로 범주형, 연속형 변수가 섞여있는 형태를 분석할 수 있으며, 많은 변수까지 고려할 수 있다는 장점으로 미루어 볼 때 본 연구에 가장 적합한 알고리즘이라고 평가됨

(다) 상태평가 모델링 기반기술을 위한 매개변수 선정

○ 앞선 교량 구조물 응답 분석 기법 조사를 통하여 실시한 문헌조사에 따르면 주로 변형률계, 온도계, 가속도계, 풍향 풍속계 등을 이용하여 구조물의 거동 및 상태를 측정하는것을 확인할 수 있었음

○ 사장교의 시공 중 계측 시스템을 구성하기 위하여 경사계, 변형률계, 온도계, 응력계, 가속도계, 처짐계, 풍향풍속계 등을 설치함 이를 통해 흔들림, 응력, 온도에 의한 거동변화, 처짐, 풍향·풍속, 케이블의 장력, 교각과 주탑의 경사 등을 측정함(공병승 & 황대형, 2006)

○ 계측자료를 활용하여 구조물의 거동을 평가하기 위하여 변형률계, 신축이음계, 경사계, 온도계, 지진계, 레이저변위계, 가속도계, 풍향풍속계 등을 설치하였고, 이를 통해 구조물의 변형 및 응력, 온도변화에 따른 구조물의 신축거동, 주탑의 경사 변화, 케이블의 온도 등을 측정함(박종칠 외, 2004)

○ 또한 추가적인 문헌조사 결과 실제로 계측기가 설치된 교량에서 사용한 계측기 및 계측된

변수들의 목록은 다음과 같이 조사되었음<표 3.2.54>

<표 3.2.54> 국내 공용중 교량에서 사용중인 계측기 및 계측 변수

교량 이름	사용 계측기 및 계측 변수
서해대교	경사계, 가속도계, 온도계, 하중계, 변형률계, 지진계, 풍향풍속계 등을 통하여 주탑의 경사, 고유진동수, 교량의 강성변화 등을 측정
낙동대교	하중계, 경사계, 변형률계, 가속도계, 온도계, 균열계 등을 사용하여 강선의 정착력, 교량의 경사변화 및 철근 및 콘크리트의 응력 등을 측정
중앙선 북한강교	경사계, 침하계, 온도계, 가속도계, 변형율계 등을 통하여 교각의 기울기, 구조물의 처짐량 및 구조물의 온도 영향 등을 측정
돌산대교	가속도계, 레이저 변위계, 변형률계, 풍향풍속계, 경사계, 온도계, 지진계 등을 통해서 교량상판의 진동가속도, 상판의 처짐, 주탑 상부의 풍향 및 풍속 및 주탑의 경사변화 등을 측정
신행주대교	변형률계, 전단변형률계, 지점변위계, 콘크리트 응력계, 가속도계, 처짐계 등을 통해서 교량의 동적 거동 측정
광안대교	경사계, 온도계, 가속도계, 풍향풍속계, 변형률계, 레이저변위계, 지진계, 신축이음계 등을 사용하여 주탑의 경사, 현수교 케이블 장력 및 지진의 영향을 측정
상진대교	경사계, 변위계, 가속도계, 레이저 변위계 등을 사용하여 교각의 각변위 주형처짐 및 신축이음부 변위 등을 측정
삼천포대교	가속도계와 변위계를 사용하여 주탑의 진동가속도, 주형 처짐 및 케이블 장력 증감 측정

○ 이를 통해 활용 가능한 교량의 Response 데이터들로는 <표 3.2.55>로 정리될 수 있음

<표 3.2.55> 교량의 Response 데이터

변수
휨 균열 모멘트
X, Y, Z 방향 변위
X, Y, Z 방향 가속도
X, Y, Z 방향 변형률
온도

(2) 정해석 데이터를 활용한 손상 추정 시스템 개발

○ 선정된 상태평가 방법론인 Deep Learning과 매개변수들을 기반으로 손상 추정 시스템을 개발하기 위해 4-1장에서 서술한 구조해석 데이터를 현장에 적용시킬 수 있는 손상 추정 시스템을 개발하였으며, 시스템의 개발은 정해석 데이터, 동해석 데이터 두가지의 데이터 형식을 활용하여 개발되었음

(가) 정해석 데이터를 이용한 CNN 모델 개발

○ 앞서 선정된 연결주의 머신러닝 기법과, 교량에서 얻을 수 있는 교량의 Response 데이터들의 특성을 고려할 때, 딥러닝 기법이 가장 타당한 모델링 기법으로 선정되었음

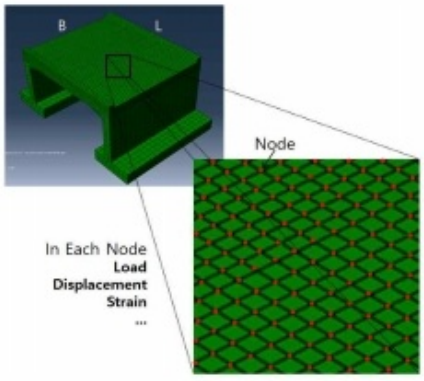
○ 한편 교량의 계측 데이터<그림 3.2.118>는 좌표체계를 가지며 각 좌표별 다중 데이터가 존재한다는 점에서 이미지 데이터<그림 3.2.119>과 여러 유사점이 있음

○ 이러한 유사점을 기반으로 할 때, 여러 딥러닝 모델 중 이미지프로세싱에서 자주 사용되고 있는 CNN을 활용하게 되면 손상 추정에 높은 정확도를 보일 수 있다고 판단됨

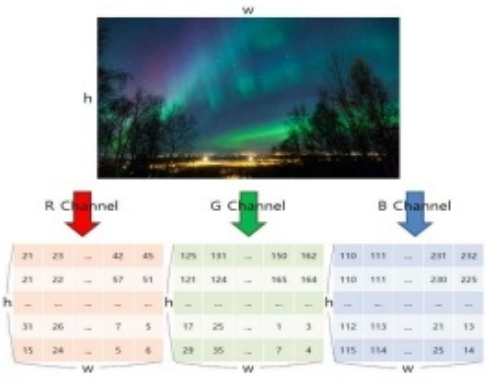
○ 따라서, 본 연구에서는 먼저 Convolutional Neural Network를 기반으로 한 상태평가 모델링 기법을 개발하고자 하였음

○ CNN은 신경망의 다양한 종류의 Layer 중 Convolution Layer를 주로 이용한 Neural Network를 말하며 CNN를 이용한 Deep Learning 과정에서는 Input 데이터를 여러층의 Convolution Layer를 이용하여 모델을 학습시키며, 이를 통해 예측, 분류 등과 같은 CNN 알고리즘의 목적을 이루도록 함

○ 본 연구에서는 CNN에 교량 해석 데이터를 적절하게 활용하기 위해 교량을 여러 개의 노드들로 나누고 각 노드에 대응되는 여러 데이터를 계측한 뒤, 영상에서 픽셀을 물체 식별에 이용하듯, 계측값들을 CNN으로 학습시켜 교량의 균열 위치 파악에 사용하고자 하였음



<그림 3.2.118> 교량 해석 데이터



<그림 3.2.119> Image recognition 데이터

(나) 정해석 데이터 취득 위치 결정

○ 정해석 데이터를 이용한 구조해석 데이터는 한가지 손상단계는 20%~30%의 강성 감소이며, 각 손상 case별 1,000개의 데이터를 구성하여, 손상이 없는 case를 포함하여 총 29,000개의 데이터를 구성하였으며 각 데이터들은 공통적으로 구성하는 노드의 위치에 따라 하중, 변위, 변형률 세 개의 채널로 구성되어 있음

○ 이러한 구조해석 데이터의 경우 실제 계측 시스템에서 생길 수 있는 오차 역시 반영하고 있지 않아 실용성이 떨어진다는 특징이 있어 CNN을 이용한 교량 구조물 손상 추정 기술 개발을 위해선 CNN 손상 추정 모델에 활용할 수 있도록 정해석 데이터를 전처리해야함

○ 따라서 먼저 CNN 모델에 알맞은 데이터로의 전환을 진행하였음

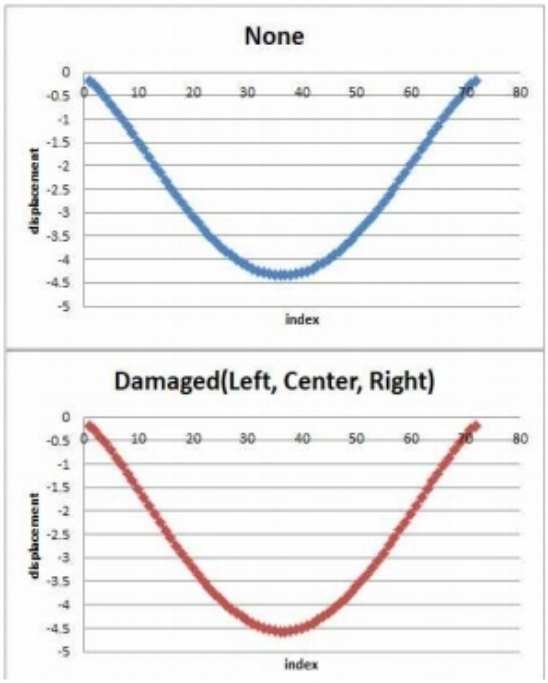
○ 본 연구에서 사용하고자 하는 CNN의 경우 패턴을 찾아내는데 유용한 기법이므로 실제 각 변수들이 패턴을 가지고 있는지에 대한 선제적 파악이 필요하며, 파악 없이 다량의 데이터만 사용한다면 정확도에 향상에 크게 기여하지 못하고 시스템의 학습 시간을 늘릴 우려가 있음

○ 확실한 패턴의 유무 파악을 위해 RC 라멘교에 극단적인 손상(슬래브 중앙 윗부분의 20cm 깊이의 가로 20cm 세로 10m의 표면 제거)을 준 데이터를 활용하였음

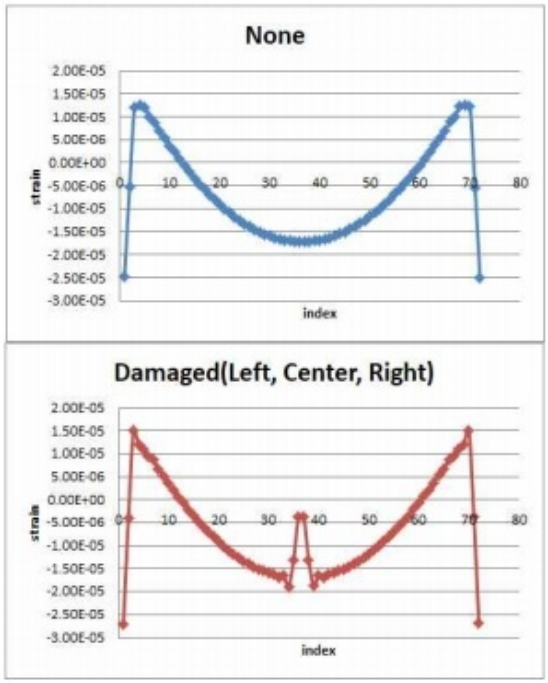
○ <그림 3.2.120>과 <그림 3.2.121>은 각각 손상이 있을 때, 손상이 없을 때 라멘교 수평부재의 하부 변위와 변형률의 변화를 보여주는 그래프임

○ 변위의 경우 손상에 따른 전체적 경향이 크게 눈에 띄지 않는데 반해 변형률의 경우 손상이 존재할 경우 손상이 있는 양 끝단, 중앙부 노드의 변형률이 크게 변하는 모습을 볼 수 있음

○ 따라서 본 연구에서는 변위는 이용하지 않고 손상영향을 비교적 명확히 판단할 수 있는 변형률(교량의 종방향)만 이용하도록 하였음

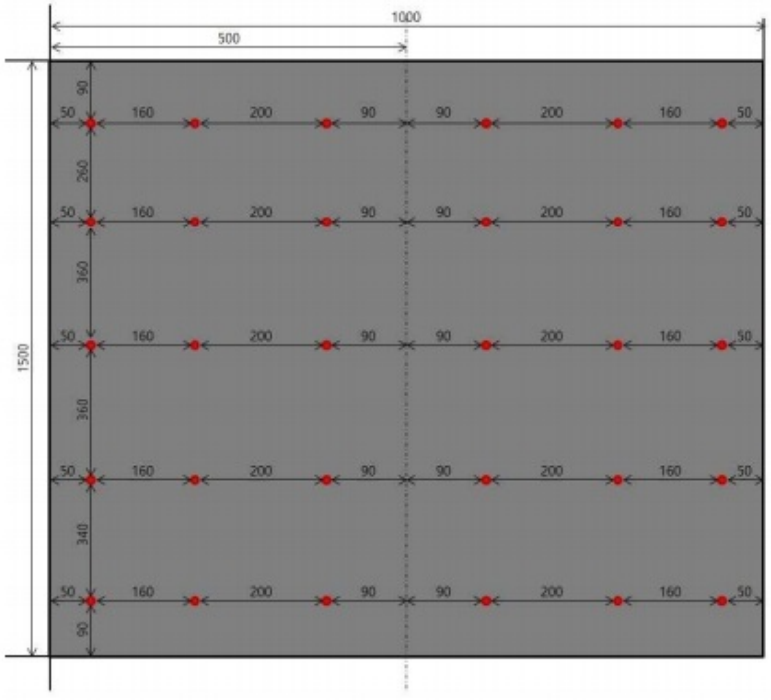


<그림 3.2.120> 중앙부 손상 유무에 따른 RC 라멘교 하단부 변위의 변화

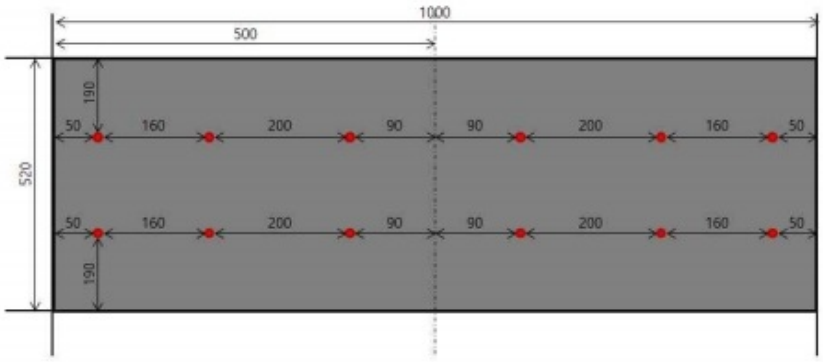


<그림 3.2.121> 중앙부 손상 유무에 따른 RC 라멘교 하단부 변형률의 변화

○ 또한, 사용된 변형률 데이터의 경우 실제 데이터를 취득하는 것처럼 표현하기 위해 전체 노드의 변형률을 이용하지 않고 일부 노드(슬래브 하부의 30곳, 양쪽 교대 각각 12곳 총 54곳의 변형률 데이터)의 변형률만을 이용하였음<그림 3.2.122, 3.2.123>



<그림 3.2.122> 정해석 데이터의 변형률 취득 위치(슬래브 하부)



<그림 3.2.123> 정해석 데이터의 변형률 취득 위치(양쪽 교대)

○ 특히 본 연구에서는 차량 하중의 위치도 함께 활용하고자 하였으며, 상시계측이 불가한 차량 하중의 경우, CCTV를 통해 파악할 수 있다고 가정하였음
- 실제로 미국 Eyedea recognition(2017)은 현재 카메라를 통한 차량의 위치를 20픽셀 이내, 차량의 종류 98%의 정확도로 실시간으로 파악하는 알고리즘인 "Make and Model Recognition Software for Static Cameras"를 상용화하여 판매하고 있음
- 다시 말해, 카메라를 통해 확인할 수 있는 교량의 위치와 차량의 위치, 차량의 종류 등의 파악이 가능함

○ 이를 통해 교량에 상재되는 차량 하중에 대한 데이터의 생성이 가능하다고 가정을 수립하였고, 모든 노드에 대한 데이터를 이용하였음

(다) 정해석 데이터 정규화

○ 본 연구에서 이용하고자 하는 변형률데이터의 평균은 약 10^{-5}이며 하중은 예비손상 해석, 본 손상 해석 각각 -2,750N, -4,000N이므로 변형률 데이터와 하중 데이터 간에는 스케일에 큰 차이가 있음

○ 따라서 해당데이터를 데이터 정규화 과정 없이 이용한다면 상대적으로 크기가 더욱 큰 하중 데이터에 의존하는 CNN 모델의 생성을 야기할 수 있으며 이에 따라 변형률 데이터가 무의미해질 우려가 있으므로, 각 데이터의 scale을 맞춰주는 정규화 과정이 필수적으로 필요함

○ CNN 학습에 데이터를 이용하기 전 변형률 데이터의 경우 (식 3.2.49)과 같이 변형률 데이터(X_{strain})에서 전체 평균($\overline{X}_{strain}$)을 차감시킨 뒤 각 데이터를 표준편차(σ_{strain})로 나누어 정규화를 진행하였음
○ 적용되는 하중의 경우, -4,000N으로 하중이 고정되어 있으므로 변형률과 같이 정규화를 진행하게 되면 하중이 적용되지 않은 곳이 하중이 적용된 곳 보다 더욱 많게 변하게 되므로 동일한 정규화를 진행하는데 무리가 있음

○ 따라서 (식 3.2.50)와 같이 적용되는 하중(X_{load})을 -4,000으로 나누어 1로 변환시켜 CNN 모델 학습에 줄 수 있는 영향을 되도록 작도록 설계하였음

○ <표 3.2.56>은 데이터 전처리를 통해 변화되는 변형률 및 하중을 보여줌

$$\hat{X}_{strain} = \frac{X_{strain} - \overline{X}_{strain}}{\sigma_{strain}} \quad \text{(식 3.2.49)}$$

$$\hat{X}_{load} = -\frac{X_{load}}{4000} \text{ (본 손상 데이터)} \quad \text{(식 3.2.50)}$$

<표 3.2.56> 정규화된 데이터 샘플(변형률 평균 = 1.38×10^{-5}, 변형률 표준편차 = 2.85×10^{-5})

노드번호	변형률 (10^{-5}mm/mm)	정규화 된 변형률	하중 (N)	정규화 된 하중
1	-3.03	-0.57	-2,750	1
2	1.20	0.90	-2,750	1
3	3.72	1.78	-2,750	1
4	3.00	1.53	0	0
5	3.01	1.54	0	0
6	2.35	1.31	0	0

(라) 데이터 계측 오차 반영

○ 실제 변형률계를 통해 얻게 되는 변형률데이터는 오차를 지니고 있을 가능성이 있으므로 본 연구에서 개발한 CNN 모델의 실제 활용성을 높이기 위해서는 검증을 위한 데이터에 실제와 비슷한 오차를 적용시켜 모델의 정확도를 검증하는 것이 필요함

○ 변형률계에서 발생되는 오차는 성능오차와 사용오차로 나눌 수 있으며, 성능오차는 변형률계 자체의 오차를 뜻하며 사용오차는 성능오차를 포함하여 변형률계의 시공 하자에 의해 나타나는 오차 등의 모든 오차를 포함한 오차를 말함

○ 본 연구에서는 변형률계 제조사인 Micro-Measurements(2007)가 정한 허용 오차 기준을 따른다. Micro-Measurements의 변형률계 실험 결과에 따르면 성능오차로 허용되는 오차율은 -45℃~65℃의 일반 교량에서 접착제 및 계측기의 재질, 테스트 기간 등에 따라 약 ±1%의 오차(very high), ±3% 오차(high), ±5% 오차(moderate)로 총 3가지 단계까지 허용됨을 확인할 수 있음

○ 본 연구에서 이용하는 데이터는 일반 교량의 정적 및 동적해석에 의한 데이터로 오차율이 중요하나, 오차의 상황은 이용되는 센서의 종류/성능에 따라 적용 가능한 ±1%, ±3%, ±5%의 오차율을 모두 고려할 수 있도록 모델링을 설계하였음

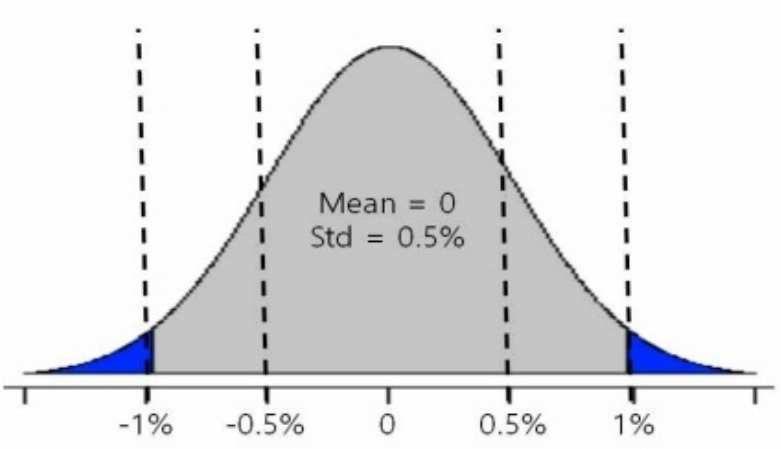
○ 본 연구에서 사용되는 데이터는 시뮬레이션을 통해 생성되므로, 오차는 시뮬레이션 데이터의 생성 패턴인 가우시안 분포를 따를 것이라 가정으로 오차 생성에 적용하였음

○ 특히 가우시안 모형 중 절단형 가우시안 모형을 이용한 오차를 생성시킬 경우 설정된 범위 밖의 값이 출연하지 않는다는 장점을 가지고 있으며, <그림 3.2.27>과 같이 일반 가우시안 모형의 양 끝단을 잘라낸 모형을 말함

○ <그림 3.2.124>의 회색 부분이 오차가 출현할 수 있는 ±1% 내외의 임의 오차의 생성을 위

해 평균이 0, 표준편차가 0.005인 절단형 가우시안 모형에서 -1% 이상 1% 이하인 값들로만 생성되도록 하였음

○ 또한 ±3% 내외의 임의 오차 생성을 위해선 평균이 0, 표준편차가 0.015, ±5% 내외의 임의 오차 생성을 위해선 평균이 0, 표준편차가 0.025인 절단형 가우시안모형을 이용하여, 이와 같은 절단형 가우시안 모형을 통해 Micro-Measurements의 허용 오차 기준의 ±1%, ±3%, ±5%의 오차율을 모사하여 해석 데이터에 적용하였음



<그림 3.2.124> 절단형 가우시안 확률분포함수(평균 = 0, 표준편차 = 0.005)

○ 29,000개의 데이터는 학습 데이터와 검증 데이터 숫자의 비율은 각각 약 7:3의 비율로 나누어졌으며, 학습 데이터는 training set과 validation set으로 나누어지며 8:2의 비율로 나누어 구성하였음

- 학습데이터와 검증데이터는 각각 20,000개의 데이터, 9,000개의 데이터를 이용하였고 training set과 validation set은 각각 16,000개, 4,000개로 나누었음<표 3.2.57>.

<표 3.2.57> 학습데이터 분류

학습 데이터 손상단계	학습 데이터 개수		검증 데이터 개수
	training	validation	
손상없음, 20%~30% 손상	16,000	4,000	9,000

(마) CNN 모델 구성

○ 본 연구에서 CNN 모델의 학습을 위해 사용되는 하중 및 변형률 데이터의 경우 데이터의 크기가 동일하지 않다는 특징이 있음

○ 따라서 각 변수들 간 개별 convolution 과정의 적용이 가능하도록 CNN architecture를 설계하였음

○ 사용한 CNN architecture는 입력 layer, 출력 layer를 포함, 하중데이터의 학습을 위한 2개

의 convolution layer, 변형률데이터의 학습을 위한 3개의 convolution layer, flattening layer, 2개의 hidden layer를 포함하는 fully connected layer로 이루어져 있다. 손실함수는 softmax를 이용하였다.

○ CNN architecture는 각 데이터의 세부적인 크기를 데이터의 특성에 맞게 조정되었음<표 3.2.58, 그림 3.2.125>

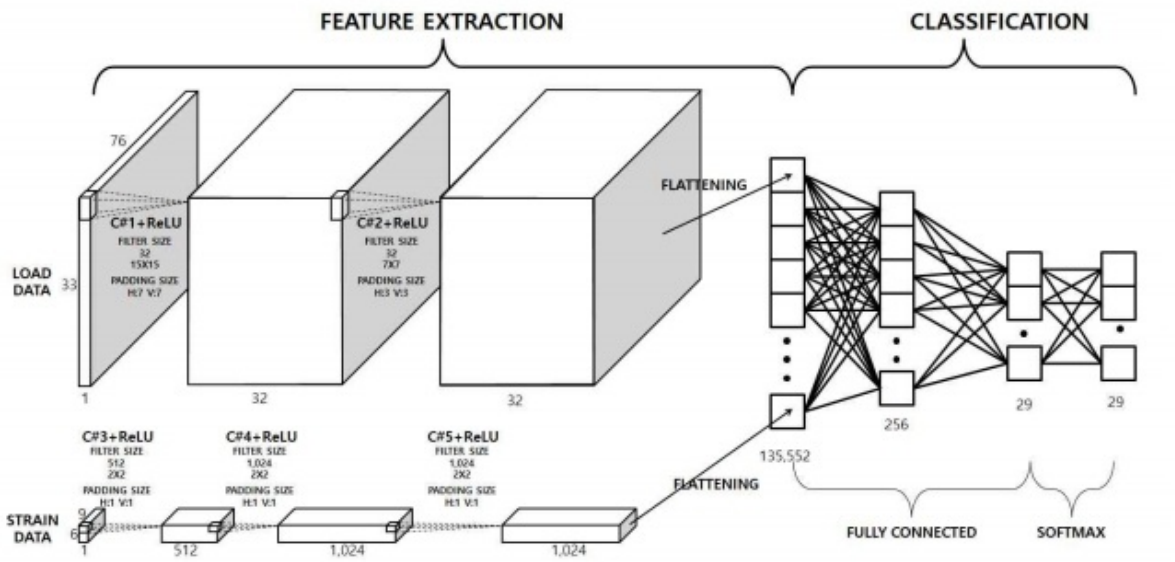
○ CNN architecture의 학습에 사용된 Hyperparameter는 다음과 같음
- batch size는 32, gradient method는 adam optimizer를 사용하였음
- Learning rate의 경우 0.002를 시점으로 하여 250회당 1%씩 감소시키는 exponential decay 기법을 이용하였음<표 3.2.16>
- Activation function은 ReLU를 이용하였고, 각 convolution layer 및 fully connected layer에 이용할 수 있도록 하였음
- 또한 가중치를 초기화하기 위한 initialization 기법으로는 Xavier initialization을 이용하였음
- 또한 기존 모델에 Regularization을 추가하여 정확도를 높이고자 하였으며 Regularization으로는 L2 loss를 이용하도록 하였음
- 모든 과정은 python 코드로 작성되었으며 CNN architecture는 tensorflow를 이용해 구성하였음

<표 3.2.58> CNN architecture의 학습을 위한 Hyperparameter

layer	Input Size			Filter Size			Output Size			Stride		Padding	
	Height	Width	Depth	Height	Width	Depth	Height	Width	Depth	H	V	H	V
C#1	76	33	1	15	15	32	76	33	32	1	1	7	7
C#2	76	33	32	7	7	32	76	33	32	1	1	3	3
C#3	9	6	1	2	2	512	2	5	512	1	1	1	1
C#4	9	6	512	2	2	1,024	9	6	1,024	1	1	1	1
C#5	9	6	1,024	2	2	1,024	9	6	1,024	1	1	1	1
Flatten	76 9	33 6	32 1,024	-	-	-	1	1	135,552	-	-	-	-
H#1	1	1	135,552	-	-	-	1	1	256	-	-	-	-
H#2	1	1	256	-	-	-	1	1	29	-	-	-	-
Softmax	1	1	29	-	-	-	1	1	29	-	-	-	-

<표 3.2.59> Exponential decay를 적용한 learning rate

Model	Learning rate 시작점	트레이닝 횟수 별 Learning rate 감소율
R1	0.002	1% / 250회



<그림 3.2.125> CNN 학습에 사용된 architecture

(바) 개발된 CNN 모델 학습 및 검증 결과

○ CNN 모델은 100,000회 training iteration 기준으로 약 18시간의 학습시간이 소요되었음

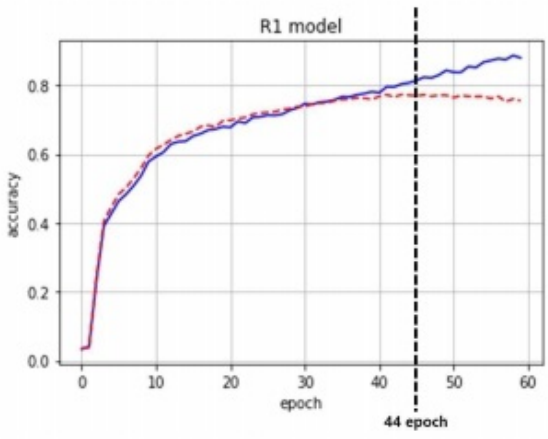
○ 모델의 학습의 종료시점은 validation accuracy값이 가장 큰 곳으로 설정하였음

○ <그림 3.2.126>은 각 epoch의 CNN 모델의 평균 training accuracy, validation accuracy를 보여주고 있으며 <그림 3.2.30>은 학습이 진행될 때마다 얻은 training accuracy, validation accuracy를 보여줌

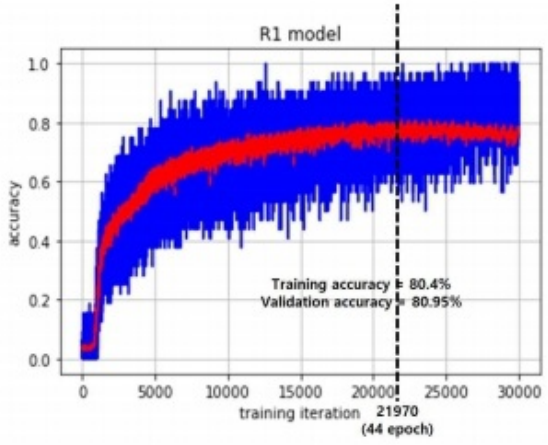
○ <그림 3.2.126>을 보면 epoch가 약 4회에 이를 때까지는 가파르게 상승하였다가 더디게 상승하는 모습을 확인하였으며 약 50회 이후부터는 training accuracy는 지속적으로 상승하지만 validation accuracy는 오히려 줄어드는 과적합 현상을 보이기 시작하는 것을 확인할 수 있음

○ 따라서, 50 epoch 이전의 경우를 살펴보면, training iteration이 21,970회(44 epoch)일 때 validation accuracy가 가장 높았으므로 이 때를 기준으로 모델의 학습을 중단하여 테스트를 진행하였음

○ Training iteration이 21,970회일 때 validation accuracy는 80.95%임을 확인하였음<그림 3.2.127>



<그림 3.2.126> Epoch 증가에 따른 CNN 모델의 epoch별 평균 training accuracy(파란색 실선)와 평균 validation accuracy(붉은색 점선)



<그림 3.2.127> 학습 횟수 증가에 따른 CNN 모델의 training accuracy(파란색 실선)와 validation accuracy(붉은색 점선)

○ <표 3.2.60>는 CNN 모델의 학습 완료시점과, 해당 모델에 대해 변형률계의 오차를 분류하여 검증한 모델의 정확도를 보여줌 CNN 모델의 경우 오차가 없을 경우 최대 80.5%의 정확도로 29개의 class 분류를 생각해 볼 때, 높은 정확도를 얻을 수 있음을 확인할 수 있었음

<표 3.2.60> 각 모델별 학습 종료 시점 및 변형률계의 오차에 따른 검증 결과

Training epoch (training iteration)	Error of strain gage	Accuracy
44 (21,970)	0%	80.5%
	±1%	72.0%
	±3%	45.8%
	±5%	28.0%

○ 앞서 정해석 데이터를 활용한 손상 추정 시스템에서 딥러닝을 실제 교량의 손상 추정에 사용하게 되면, 교량 유지관리자의 의사결정에 큰 도움을 줄 수 있을 것이라 판단됨

○ 하지만, 실제 현장에서 나타날 수 있는 교량의 거동 데이터의 경우 동적 차량 하중이 재하되어 나타나게 되므로 정해석 데이터가 아닌 동해석 데이터를 활용한 방법의 개발이 필요함

○ 따라서 본 연구에서는 동해석 데이터를 활용한 딥러닝 모델을 개발하고자 하였으며, 앞서 CNN만 활용하였던 정해석 데이터와 달리, Deep Neural Network (DNN), Recurrent Neural Netwo가 (RNN)도 함께 비교 분석하여 딥러닝의 활용가능성을 제시하고자 하였음

○ 또한 변형률 데이터 뿐 아니라 변위, 가속도 데이터를 활용하여 손상 추정할 수 있는 강건한 손상 추정 시스템을 개발하고자 하였으며, 딥러닝을 활용할 때, 데이터들이 나타내는 정확도를 비교분석하여 딥러닝 기반 손상 추정 시스템의 민감도 분석을 진행하였음

(3) 동해석 데이터를 활용한 손상 추정 시스템 개발

(가) 동해석 데이터 구성 및 딥러닝 모델 개요

○ 동해석 데이터의 구성은 앞서 서술한 정해석 데이터의 구성 방식과 전반적으로 유사함

○ 본 연구에서 적용할 딥러닝 알고리즘은 대표적으로 사용되는 DNN, CNN, RNN 이며 딥러닝 알고리즘의 학습과 검증과정에서 필요한 데이터 38,400개 중 80%를 학습데이터 집합, 20%를 테스트집합과 노이즈가 적용된 테스트집합으로 설정함<표 3.2.61>

○ 특히 딥러닝 알고리즘의 학습 방법에는 약간의 차이가 있을 수 있는데, 이를 통일 시키기 위하여 각 딥러닝 모델의 학습 시 Hyperparameter들(Batch 크기와 최적화기법, 학습률(Learning rate), 가중치 초기화기법 등)을 통일하여 사용함

○ 딥러닝 알고리즘들의 학습 횟수는 각 알고리즘 마다 손실함수가 수렴하는 학습 횟수가 다르기 때문에, 손실함수가 수렴하는 학습 횟수까지 진행하였으며 학습된 각 딥러닝 모델은 테스트 집합을 통해 그 정확도를 검증하였음

<표 3.2.61> 딥러닝 학습의 데이터 분류

구분	변형률	변위	가속도
학습데이터 집합	27,840	27,840	27,840
테스트집합	6,960	6,960	6,960
테스트 집합 (노이즈 2.8%)	6,960	6,960	6,960
테스트 집합 (노이즈 5.6%)	6,960	6,960	6,960
테스트 집합 (노이즈 8.4%)	6,960	6,960	6,960

(나) DNN 기반 딥러닝 모델

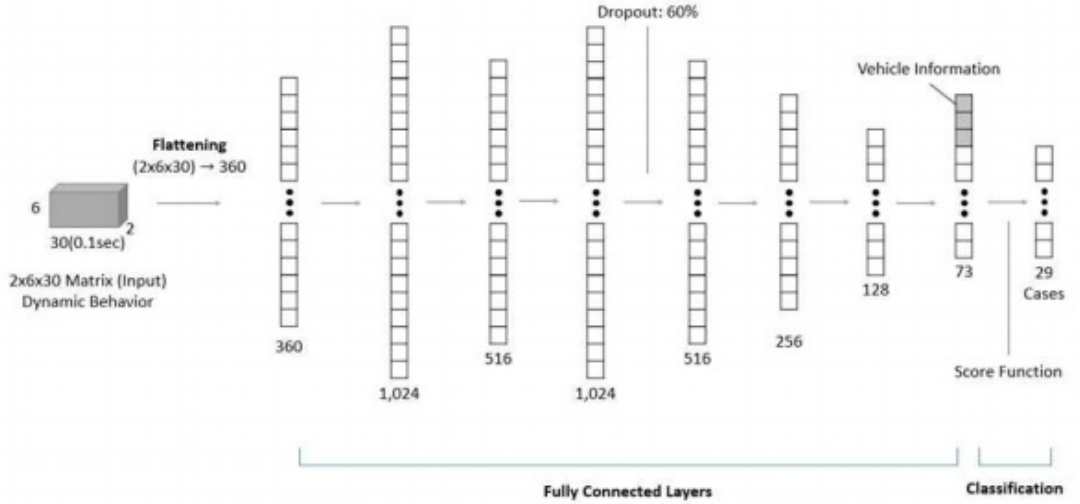
○ 정의한 입력데이터를 학습하기 위한 본 연구의 DNN 구조는 <그림 3.2.128>과 같다. DNN에 사용하기 위해 설정된 입력데이터는 배열(Array) 형태로 변경하였으며 총 7단계에 걸친 완전연결층을 통해 학습하였음

○ 완전연결층을 통해 계산된 값들은 스코어 함수(Score Function, SoftMax)를 통한 값과 설정된 손상케이스의 값의 오차가 계산되고, DNN의 가중치와 바이어스가 조정되어짐

○ DNN을 통한 학습에서 사용된 파라미터는 <표 3.2.62>과 같음
- 'H'는 은닉층과 그 번호를 나타냄, 각 은닉층의 활성함수는 LeakyReLU를 사용하였으며, Dropout을 H4에 추가하여 과적합을 방지함
- 학습시간을 증대를 위해, Batch를 설정하였음
- Batch는 1회 계산 사이클을 맞추기 위해 64 크기를 갖도록 설정하였으며 이에 따라 64개의 입력데이터로 계산된 평균오차로 DNN의 가중치와 바이어스가 1회 조정될 수 있도록 설정

함

- 학습률(Learning rate)는 초기 0.001을 설정하였으며, 학습이 진행됨에 따라 지수적 감소방법(Exponential decay)으로 학습률을 감소시켜 학습이 진행될수록 DNN의 가중치와 바이어스의 조정영향을 낮출 수 있도록 설정함
- 가중치와 바이어스의 최적화는 Adam optimizer를 사용하였으며, 가중치 초기화는 절단형 가우시안 분포를 이용함
- 이와 같은 사항으로, 학습의 결과가 수렴하기까지 약 700회의 학습 횟수와 40분의 학습시간이 소요됨



<그림 3.2.128> Deep Neural Network 기반의 손상추정모델

<표 3.2.62> DNN Parameters

Layer	Flattening	H#1	H#2	H#3	H#4	H#5	H#6	H#7	Score Function
Input	2x6x30	360	1,024	516	1,024	516	256	128	73
Activate Function	-	Leaky ReLU	Leaky ReLU	Leaky ReLU	Leaky ReLU	Leaky ReLU	Leaky ReLU	Leaky ReLU	SoftMax
Dropout	-	-	-	-	60%	-	-	-	-
Outout	360	1,024	516	1,024	516	256	128	64	29

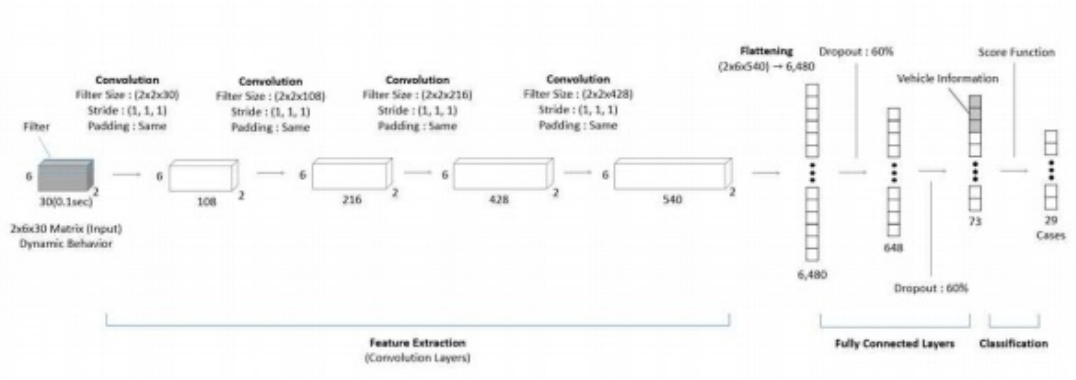
(다) Convolution Neural Network

○ CNN 구조는 <그림 3.2.129>과 같다. 입력데이터를 4단계의 합성곱망을 통해 동적거동 데이터의 특징을 추출하였으며, 추출된 특징을 2단계의 완전연결층과 1단계의 스코어 함수를 분류문제에 적용시켜 학습을 진행함

○ 입력데이터의 크기는 2 × 6 × 30의 매트릭스 형태를 가지므로, 합성곱망의 데이터 처리량을 줄이는 풀링은 불필요하다 판단하여 사용하지 않음

○ CNN을 통한 학습의 딥러닝 파라미터는 <표 3.2.63>와 같음

- 여기서 'C'는 합성곱망을 나타내며, 숫자는 합성곱망의 순서를 나타냄
- 모든 합성곱망에서는 Stride는 (1,1,1)로 설정하였으며, Padding은 매트릭스의 크기가 작기 때문에 설정하지 않음
- 합성곱망과 완전연결층의 활성함수는 Leaky ReLu로 설정하였으며, H#1과 H#2에 Dropout을 추가하여 과적합을 방지함
- 이외의 Batch size, Learning rate, 최적화 방법과 가중치 초기화 방법은 DNN과 같은 파라미터를 사용함
- 학습의 결과가 수렴하기까지 약 600회의 학습 횟수와 1시간 10분의 학습시간이 소요됨



<그림 3.2.129> Convolutional Neural Network 기반의 손상추정모델

<표 3.2.63> CNN Parameters

Layer	C#1	C#2	C#3	C#4	Flattening	H#1	H#2	Score Function
Input Size	2x6x30	2x6x108	2x6x216	2x6x428	2x6x540	6,480	648	73
Filtter Size	2x6x30	2x6x108	2x6x216	2x6x428	-	-	-	-
Stride	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	-	-	-	-
Padding	None	None	None	None	-	-	-	-
Activate Function	Leaky ReLu	Leaky ReLu	Leaky ReLu	Leaky ReLu	-	Leaky ReLu	Leaky ReLu	SoftMax
Dropout	-	-	-	-	-	60%	60%	-
Output	2x6x108	2x6x216	2x6x428	2x6x540	6,480	648	64	29

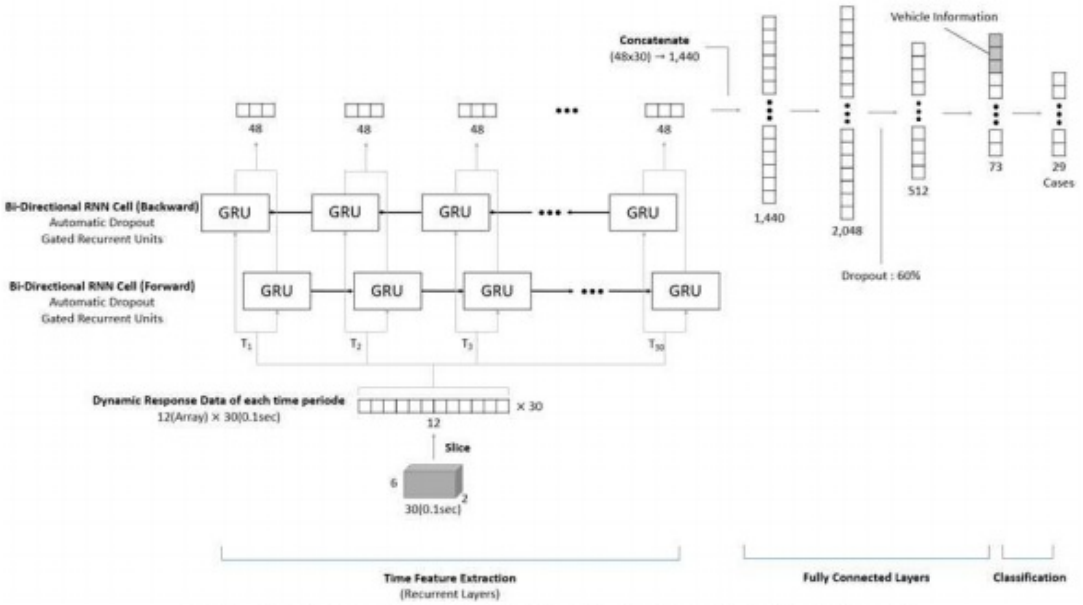
(라) Recurrent Neural Network

○ RNN의 구조는 <그림 3.2.130>와 같으며 입력데이터는 RNN의 입력값에 맞도록 배열로서 설정함. 순환망은 30단계의 시간영역과 2개의 층을 쌓았으며, 1번째 층에는 시간의 정방향, 2번째 층은 시간의 역방향으로 학습방법을 설계함

○ RNN에 적용된 딥러닝 파라미터는 <표 3.2.64>과 같음.
- 여기서 'R'은순환망을 나타내며, 'F'은 Forward로 시간의 정방향 'B'는Backward로 시간의

역방향 순환망을 뜻함

- 순환망의 내부함수는 GRU를 사용하였으며, 완전연결층의 활성함수는 Leaky ReLu가 사용됨
- 각 순환망에 Dropout을 추가시켰으며, 완전연결층의 H#2에도 Dropout 기능을 추가시켜 학습의 과적합을 방지하였음
- Batch size, Learning rate, 최적화 방법과 가중치 초기화 방법은 DNN과 같은 파라미터를 사용하였음
- 학습의 결과가 수렴하기까지 약 600회의 학습 횟수와 2시간 30분의 학습시간이 소요됨



<그림 3.2.130> Recurrent Neural Network 기반의 손상추정모델

<표 3.2.64> RNN Parameters

Layer	R#F	R#B	Concate nate	H#1	H#2	H#3	Score Function
Input Size	12x30 (Time)	12x30 (Time)	48x30	1,440	2,048	512	73
Activate Function			-	Leaky ReLu	Leaky ReLu	Leaky ReLu	SoftMax
Internal Function(RNN)	GRU	GRU	-	-	-	-	-
Dropout	Automat ic	Automat ic	-	-	60%	-	-
Output	48x30	48x3	1,440	2,048	512	64	29

(마) 딥러닝 모델 학습 결과

○ 앞서 구성된 DNN, CNN, RNN 모델들을 통해 각 동적거동 데이터 별 학습을 진행한 결과 총 9개의 딥러닝 모델을 테스트 집합을 이용하여 검증을 수행하여 손상 추정 정확도를 얻어내었음

○ <표3.2.65>는 설계된 DNN, CNN, RNN 학습모델들에 테스트집합과 노이즈를 적용한 테스트집합을 이용하여 얼만큼의 정확도를 가지고 손상케이스를 분류하는지에 대한 결과임

<표 3.2.65> 동적거동 데이터와 딥러닝 알고리즘 별 손상추정의 정확도(단위 : %)

오차	손상위치추정의 정확도								
	Deep Neural Network			Convolutional Neural Network			Recurrent Neural Network		
	변형률	변위	가속도	변형률	변위	가속도	변형률	변위	가속도
오차없음	89.96	72.94	91.08	89.80	91.41	82.87	93.16	83.51	89.68
오차 ±2.8%	83.01	56.56	87.94	78.83	56.55	84.71	89.03	30.50	86.26
오차 ±5.6%	68.16	41.91	80.96	61.04	34.52	69.51	77.05	19.86	81.86
오차 ±8.4%	56.19	33.02	72.91	48.91	24.18	56.69	63.96	14.96	77.71
평균	74.58	51.11	53.22	69.65	51.67	75.95	80.80	37.21	83.88

오차	알고리즘 별 평균 정확도		
	Deep Neural Network	Convolutional Neural Network	Recurrent Neural Network
오차 없음	84.66	91.36	88.78
오차 ±8.4%	54.04	43.26	52.21
오차 ±8.4% (변위 제외)	64.55	52.80	70.86

○ DNN은 가장 양호한 패턴인식 결과를 나타내는 것으로 판단되었으나 노이즈가 적용된 테스트집합의 패턴인식 정확도 검증 결과, 변형률과 변위를 입력값으로 적용한 DNN은 급격한 정확도 감소가 나타남

○ CNN은 노이즈가 없는 테스트 집합을 통한 검증결과, 평균 91.36%로 가장 양호한 결과를 도출하지만 테스트 집합에 노이즈를 적용할수록 가장 급격한 정확도 감소폭을 나타냄

○ 이는 합성곱망의 특징추출 기능이 노이즈가 없는 학습데이터의 특징에 과적합되어, 노이즈가 섞여 데이터 패턴의 명확성이 떨어지게 되면 패턴을 제대로 인식하지 못하는 경우로 판단됨

○ 마지막으로 RNN은 변형률과 가속도를 입력값으로 적용한 결과 노이즈를 ±8.4%까지 적용한 테스트집합에서도 가장 양호한 결과를 나타냈으나 변위 데이터를 활용하였을 때에는 가장 낮은 정확도를 기록하였음

○ 시계열 데이터의 특징을 가장 잘 반영하는 RNN의 특성상, 가장 높은 결과를 나타낸 것으로 판단되나, 가속도나 변형률데이터에 비해 변위 데이터의 경우 절대적인 데이터의 값이 상대적으로 작은 값으로 거동하는 특징을 가지고 있어 시계열 적으로 분석할 때 그 특징이 나타나지 않은 것으로 판단되어짐

○ 따라서, 이러한 결과를 정확도 측면에서 종합하여 볼 때, 오차가 없을 경우에는 모든 방법론이 타당하게 활용될 수 있을것으로 판단되어지나, 다양한 하중과 다양한 환경조건이 존재하는 실제 교량에 적용할 때에는 'RNN과 가속도 데이터', 'DNN과 가속도 데이터'를 활용한 방법론이 가장 좋은 결과를 나타낼 수 있을 것으로 판단됨

(바) 오차에 따른 정확도의 민감도 분석

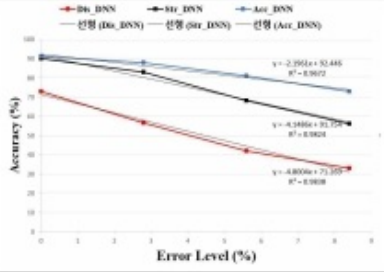
○ 본 연구에서는 얻어진 손상 추정의 결과를 기반하여 사용된 방법론과 변수별 민감도를 분석하여 큰 오차에도 강건한 결과를 줄 수 있는 딥러닝 기법의 결정 및 딥러닝에 가장 적합한 변수를 찾아내고자 하였음

○ 본 연구에서 말하는 민감도는 선형회귀 적합선의 기울기의 절대값을 나타내며 이러한 민감도는 각각의 방법에 따른 오차별 손상 정확도의 변화를 선형적합을 통하여 얻어내었음

○ <그림 234>의 (a)-(c)는 각각 DNN, CNN, RNN을 사용할 때, 에러에 따른 정확도의 추이 및 이에 적합된 선형을 보여주고 있으며 이를 분석한 결과는 <표 3.2.66>와 같음

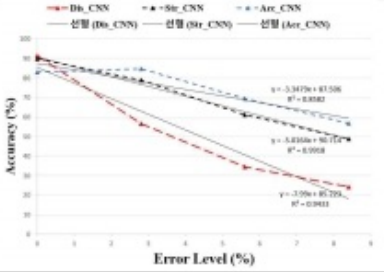
<표 3.2.66> 딥러닝 기법 별, 데이터 종류 별 민감도 분석 결과

DNN



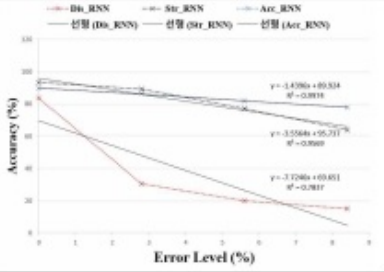
민감도		
변위	변형률	가속도
4.8	4.1	2.2
평균 민감도		
3.7		

CNN



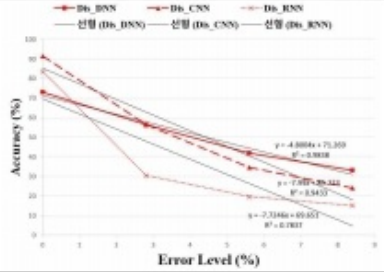
민감도		
변위	변형률	가속도
8.0	5.0	3.3
평균 민감도		
5.5		

RNN



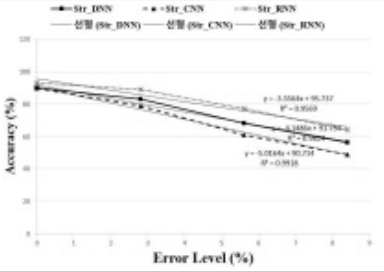
민감도		
변위	변형률	가속도
7.7	3.6	1.4
평균 민감도		
4.2		

변위



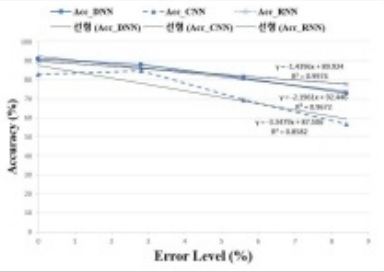
민감도		
DNN	RNN	CNN
4.8	8.0	7.7
평균 민감도		
6.8		

변형률



민감도		
DNN	RNN	CNN
4.1	5.0	3.6
평균 민감도		
4.2		

가속도



민감도		
DNN	RNN	CNN
2.2	3.3	1.4
평균 민감도		
2.3		

○ 방법론적 측면에서, 평균 민감도는 각각 DNN을 사용할 때 가장 낮은 것으로 보아 데이터 측정 오차가 높아지더라도 가장 강건한 결과를 줄 수 있는 방법론은 DNN으로 판단됨

○ 변수의 측면에서는 가속도를 사용할 때 가장 민감도가 낮은 것을 확인할 수 있으며 모든 방법론의 변수별 민감도의 최소값이 가속도를 사용할 때 얻어지는 것을 볼 수 있으므로 가속도를 사용할 때 모든 방법론에서 가장 신뢰할 만한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단됨

○ 이러한 결과를 종합하여 볼 때, DNN과 가속도 데이터를 함께 사용하는 것이 가장 바람직할 것으로 보이며, 특히 가속도를 사용할 경우 어떤 방법론을 알맞게 사용하더라도 높은 신뢰도를 가진 결과를 얻을 수 있을것으로 판단되어 세가지 방법론의 적절한 사용을 통해 손상추정의 신뢰성을 더욱 확보할 수 있을것으로 보임

(4) 소결

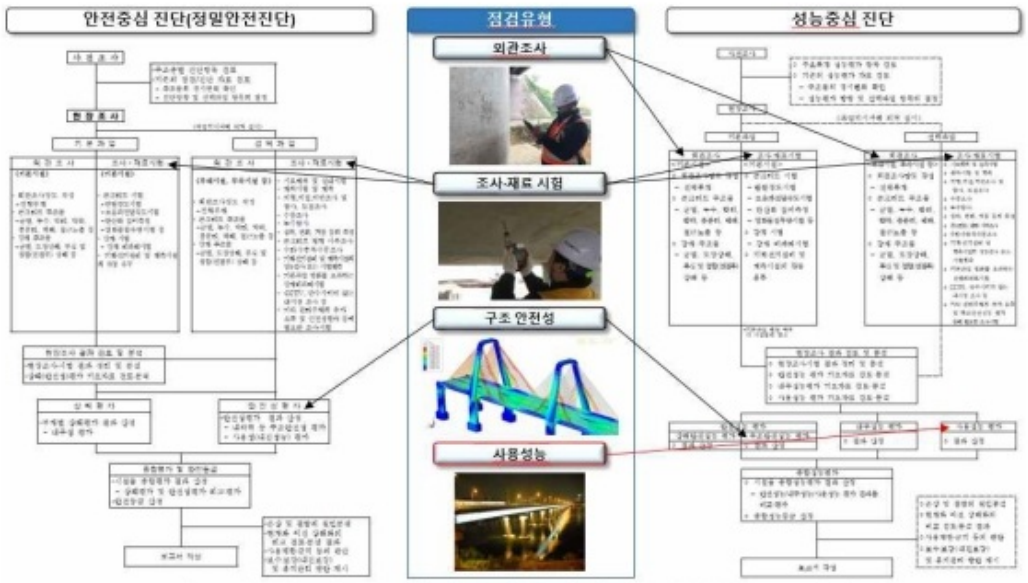
○ 본 연구에서는 앞서 생성된 데이터를 기반으로 교량의 손상 위치를 추정 위한 교량의 손상 위치 추정 기술 개발 연구를 수행하였다. 본 연구에서의 연구과정과 연구결과를 정리하면 다음과 같음

- 교량의 손상 위치 추정 기술을 개발하기 위해 다양한 머신러닝 방법론을 분석하여 가장 적합한 기법으로 딥러닝을 결정하였으며, 딥러닝은 교량 거동 데이터를 적절하게 활용할 수 있고 정확도가 높으며, 다양한 딥러닝 라이브러리가 존재하여 적용이 쉽다는 여러 장점을 가지고 있음
- 교량 손상위치 추정 기술은 정해석 데이터, 동해석 데이터를 각각 이용하여 개발되었으며, 여러 딥러닝 기법들 중 정해석 데이터는 CNN, 동해석 데이터는 DNN, CNN, RNN을 교량의 손상 위치 추정 기술을 개발하였음
- 본 연구에서는 정해석 데이터의 분석을 통해 최대 80.5%의 손상위치 추정 정확도를 얻을 수 있었으며 이러한 결과는 교량의 거동 데이터를 통하여 교량의 손상 위치 추정이 가능함을 보여주는 결과임
- 반면 정해석 데이터는 동적하중이 적용되는 실제 교량의 데이터와 같다고 볼 수 없어 본 연구에서는 동해석 데이터를 통한 손상 위치 추정 기술을 개발하였음
- 동해석 데이터를 통하여 개발한 손상 위치 추정 기술은 다양한 방법론과 다양한 변수를 이용하여 개발되었으며 데이터가 가진 오차의 크기와 정확도간의 민감도 분석을 통해 손상 추정에 가장 적합한 변수, 적합한 방법론을 결정하고자 하였음
- 동해석 데이터의 분석 결과, 오차가 없을 경우에는 모든 방법론이 타당하게 활용될 수 있을 것으로 판단되어지나, 다양한 하중과 다양한 환경조건이 존재하는 실제 교량에 적용할 때에는 'RNN과 가속도 데이터', 'DNN과 가속도 데이터'를 활용한 방법론이 가장 좋은 결과를 나타낼 수 있을 것으로 판단됨
- 민감도 분석을 통해 보아도, 'DNN과 가속도 데이터'를 함께 사용하는 것이 가장 바람직할 것으로 보이며, 특히 가속도를 사용할 경우 어떤 방법론을 알맞게 사용하더라도 높은 신뢰도를 가진 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단되어 세가지 방법론의 적절한 사용을 통해 손상추정의 신뢰성을 더욱 확보할 수 있을 것으로 보임

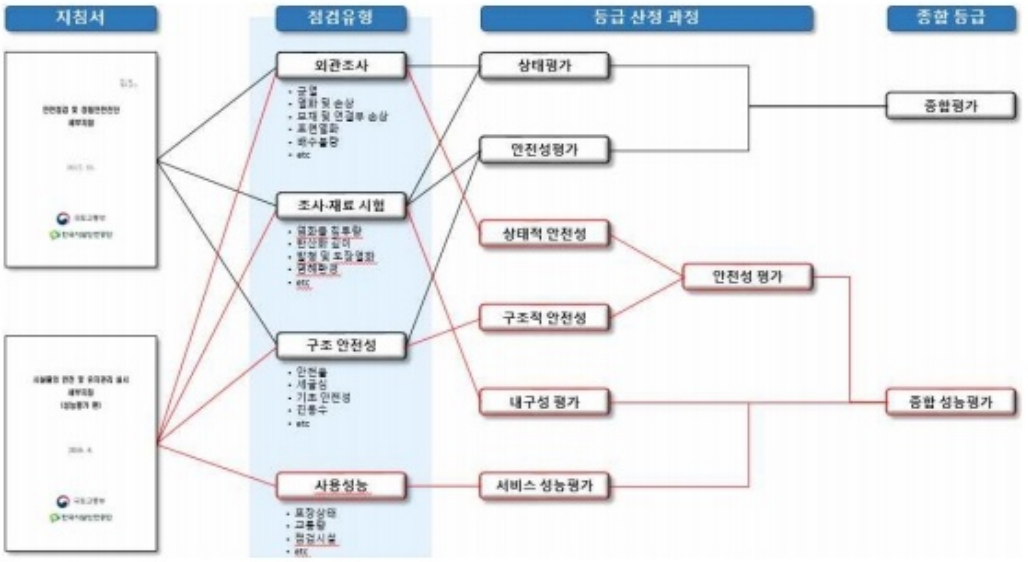
제 3 절 최종 연구 성과

1. 연구개발 결과

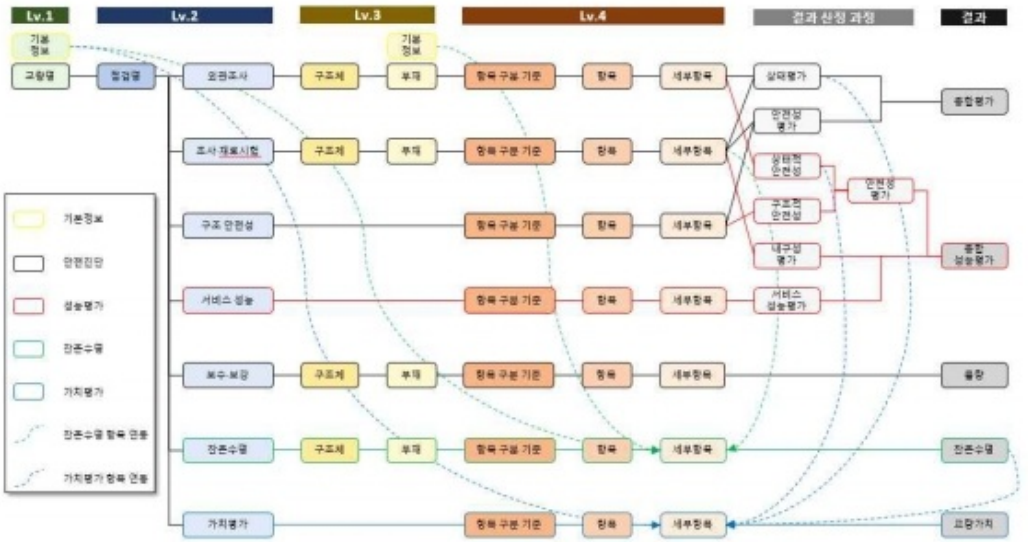
성 과 명	BIM 기반 안전 진단 및 유지관리 기술
수행기관	고려대학교
정 의	BIM을 적용한 안전 진단 및 유지관리 이력 기반 통합관리시스템
연구개발 성과	▪ 국내외 안전진단 및 유지관리 체계 조사 및 분석 - 국내외 안전진단 흐름도 조사 및 분석 - 국내외 안전진단 점검유형 조사 및 분석 - 국내외 안전진단 교량 분류체계 조사 및 분석 - 국내외 안전진단 요소 상태 등급 기준 조사 및 분석 ▪ 국내외 BIM 유지관리 기술개발 현황 조사 및 분석 - BIM 유지관리 정보체계 조사 및 분석 - BIM 유지관리 교량 부재 분류체계 조사 및 분석 ▪ BIM 유지관리 정보체계 정립 - 시설안전공단에서 2018년에 개정한 성능평가 적용성 분석 - 기존 안전진단 체계와 성능평가 체계를 통합하기 위한 점검유형별 분류체계 정립 - BIM 유지관리 정보체계에 대한 LOD 결정 - 각 정보의 재활용성 향상을 위한 각 정보의 연동체계 정립 ▪ 국내 안전진단 및 유지관리 이력 조사 및 분석 - STB형 교량 13개소, PSCI형 교량 9개소에 대한 정밀점검 보고서 조사 및 분석 - 안전진단 보고서 구성체계 분석 및 BIM 라이브러리에 필요한 정보 선정 - 외관조사, 조사·재료시험, 보수·보강에 대한 필요 상세정보 정립 - BIM 라이브러리 구축시 교량형식별 차이점 분석 ▪ Web기반 안전진단 및 유지관리 통합관리 시스템 개발 - 기존 안전진단과 성능평가를 통합한 Web기반 이력 관리 시스템 개발 - 각 정보간의 연동기능 및 자동 결과 도출 기능 개발 - 실제 이력데이터를 적용한 시스템 검증 - BIM 모델과의 연동 기능 개발



<기존 안전진단과 성능평가 통합을 위한 점검유형별 분류체계>



<점검유형별 정보체계 및 결과 산정 과정 정립>



<정보 연동 및 LOD를 고려한 BIM 유지관리 통합관리 정보체계>



(a) 이력 관리 시스템 기본 화면



(b) 시설물 관리 및 속성정보 입력 기능



(c) 부재 관리 및 속성정보 입력 기능



(d) 안전진단 정보 입력 기능



(e) 안전진단 정보 조회 기능



(f) 안전진단 결과 표출 기능

<Web 안전진단 및 유지관리 통합관리 시스템 및 적용 검증>

성 과 명	교량 구조물의 가치평가 및 잔존 수명 예측 시스템 기술
수행기관	고려대학교
정 의	교량 구조물 상태평가 기반의 가치평가 및 잔존 수명을 예측하는 기술

연구개발 성과

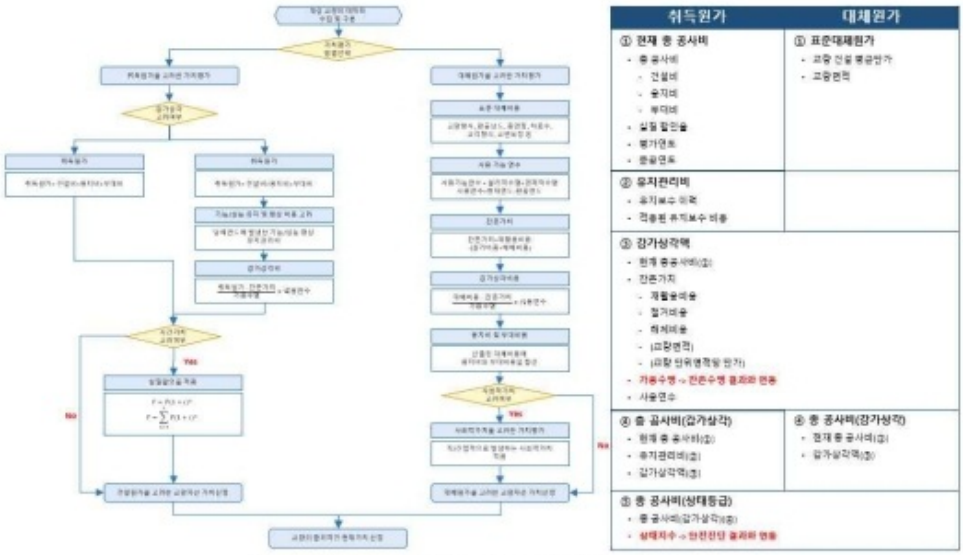
- 국내외 교량 잔존수명 예측 및 가치평가 방법 조사 및 분석
  - 콘크리트와 강재에 대한 열화종류 조사 및 분석
  - 열화종류별 잔존수명 예측 방법 조사 및 분석
  - 잔존수명 예측에 필요한 주요인자 조사 및 분석
  - 대체원가, 취득원가를 활용한 교량 가치평가 방법 조사 및 분석
  - 교량 가치평가 흐름체계 조사 및 분석

- 잔존수명 예측 및 가치평가 라이브러리 구축
  - 열화종류별 잔존수명 예측에 필요한 주요인자 도출
  - 교량 잔존수명 예측 흐름체계 정립
  - 대체원가와 취득원가를 활용한 가치평가에 필요한 주요인자 도출
  - 교량 가치평가 흐름체계 정립
  - 안전진단 정보체계와 연동체계 정립

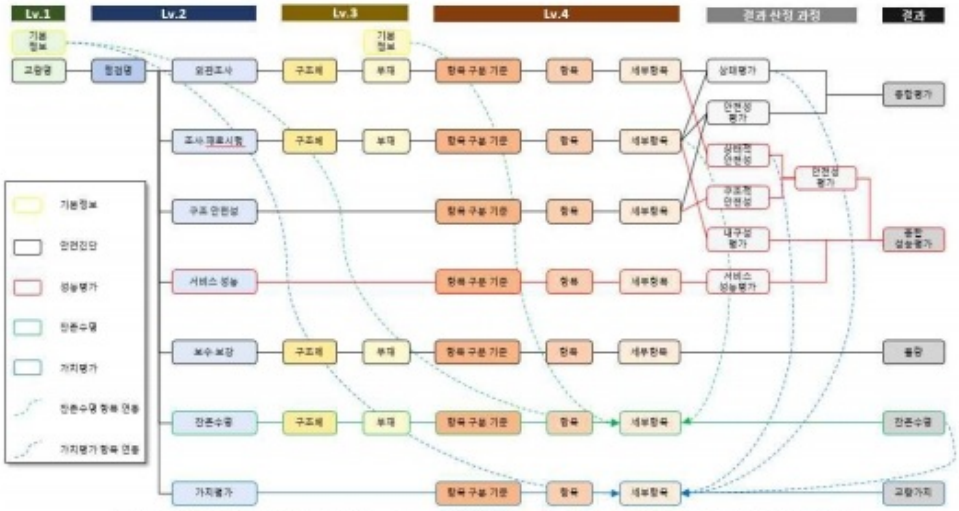
- Web기반 안전진단 및 유지관리 통합관리 시스템에 적용
  - 잔존수명과 가치평가 체계 통합관리 시스템에 적용
  - 안전진단 정보와의 연동체계 적용
  - 교량의 가치 및 잔존수명 산정 기능 검증

열화 종류	출처	잔존수명 예측 식	항목
염해 (조사 無)	• 한국시설안전공단(2015) - RC 구조물의 내구수명 정립 및 수명예측 기법 마련 연구 • 한국콘크리트학회(2012) – 콘크리트 구조기준	$C_{cr} = C_s\left\{1 - erf\left(\frac{x}{2\sqrt{10^{[4.5(W/C)^2+0.14(W/C)-8.47]} \times t}}\right)\right\}$	임계 염화물 농도 표면 염화물 농도 물/시멘트비 설계 피복두께
염해 (조사 有)	• 한국시설안전공단(2015) - RC 구조물의 내구수명 정립 및 수명예측 기법 마련 연구 • 한국콘크리트학회(2012) – 콘크리트 구조기준	$C(x,t) = (C_o - C_i)\left\{1 - erf\left(\frac{x}{2\sqrt{D_{cl} \times t}}\right)\right\} + C_i$	염화물 농도, 측정깊이, 공용연수, 초기 염화물 농도, 표면 염화물 농도, 설계 피복두께, 임계 염화물 농도
탄산화 (조사 無)	• 한국시설안전공단(2015) - RC 구조물의 내구수명 정립 및 수명예측 기법 마련 연구 • 국토교통부(2009) - 콘크리트표준시방서	$T = \left[\frac{x_c}{R(-3.57 + \frac{9.0W}{B})}\right]^2 - t$	물/결합재비, 설계 피복두께, 공용연수, 환경 영향계수
탄산화 (조사 有)	• 한국시설안전공단(2015) - RC 구조물의 내구수명 정립 및 수명예측 기법 마련 연구	$T = (\frac{x_c\sqrt{t}}{D})^2 - t$	설계 피복두께, 공용연수, 탄산화 깊이
동해	• Faim, A.N(2013) – Computerised Prediction of the Deterioration of Concrete Building Facades Caused by Moisture and Changes in Temperature	$T = \frac{D_l}{100N_a}(C_aC_b - 100) - t$	연간 동결융해 횟수, 임계 동결 손상 정도, 콘크리트 공기 함유량, 물/시멘트비
부재의 파로	• AASHTO(2011) – The Manual for Bridge Evluation	$T = \frac{0.75A \times 10^{11}}{365n(ADTT_{SL})(\Delta f)^3} - t$	유효 응력범위, 부분 안전계수, 지함 계수, 피로 상수, 응력 반복 횟수, 일간 트럭 통행량, 교통량 계수

<열화종류별 잔존수명 예측방법 및 라이브러리 항목>



<가치평가 프로세스 및 라이브러리 항목>



<잔존수명과 가치평가를 고려한 BIM 유지관리 통합관리 정보체계>



(a) 잔존수명 정보 입력 기능



(b) 가치평가 정보 입력 기능



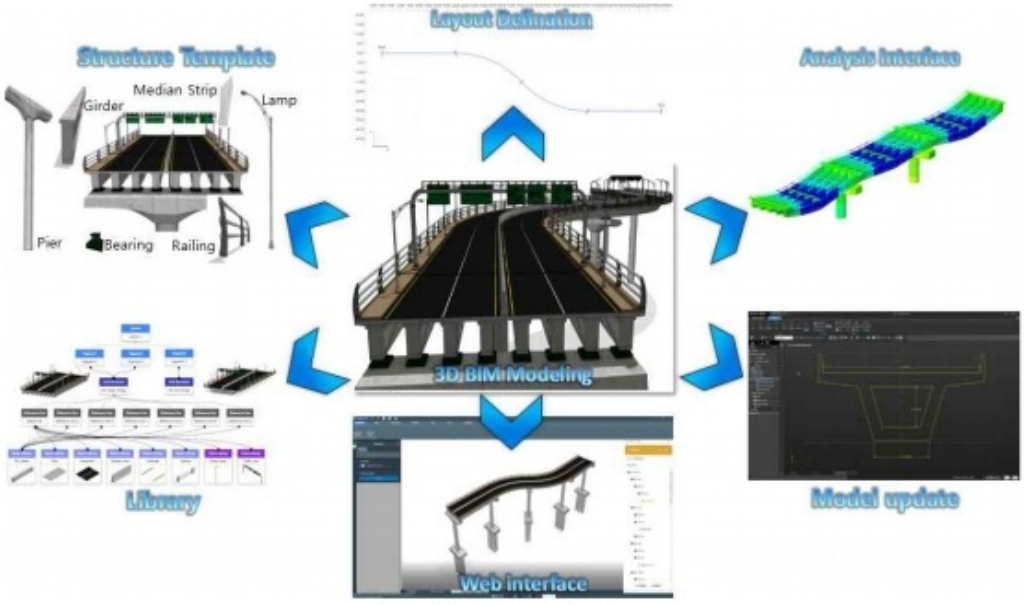
(c) 잔존수명 결과 도출 기능



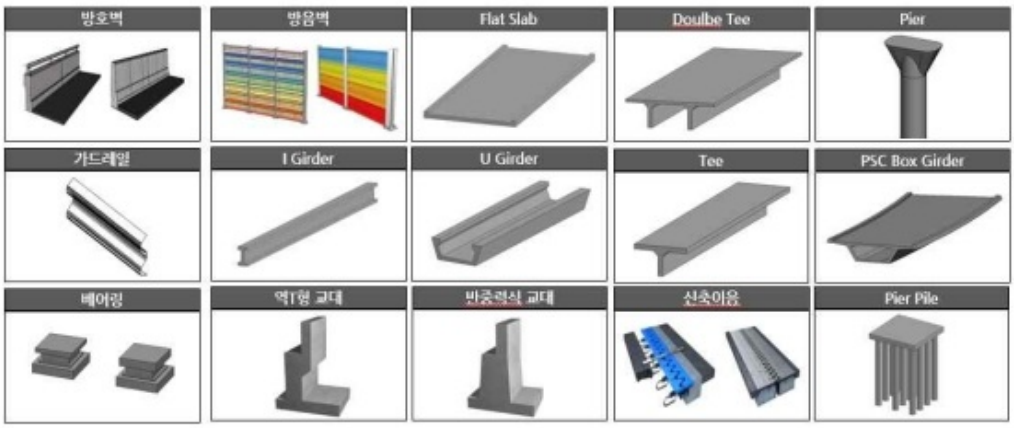
(d) 가치평가 결과 도출 기능

<Web 안전진단 및 유지관리 통합관리 시스템 및 적용 검증>

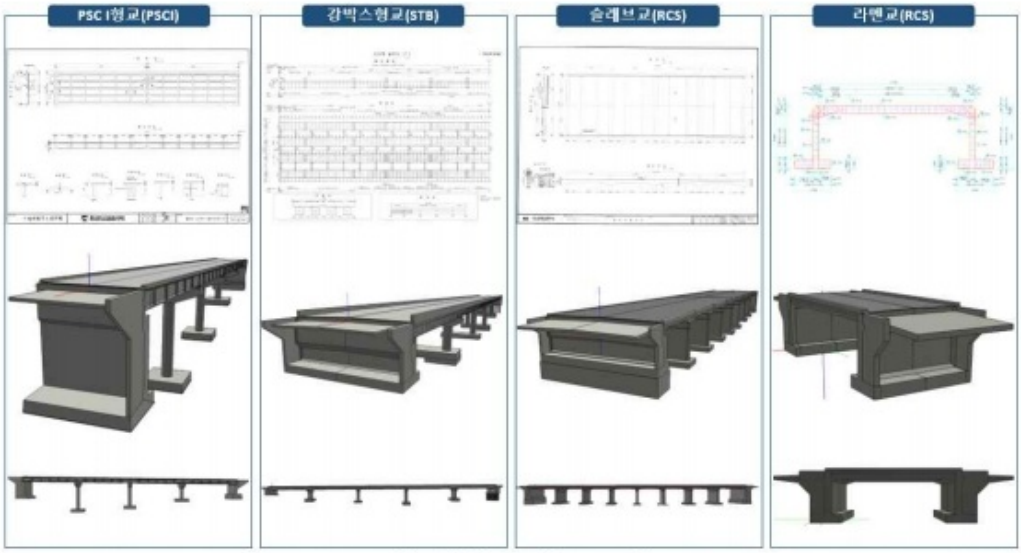
성 과 명	교량 구조물 BIM 라이브러리 구축 및 조립 프로그램 개발 기술
수행기관	㈜마이다스아이티
정 의	BIM에 적용 가능한 라이브러리 및 모듈 자동 조립 프로그램 기술
연구개발 성과	▪ 교량 3D 모델 생성 기술 - 템플릿 모델링 작업환경을 포함한 프레임워크와 DB 구축 - 교량 구조물 구조부재의 3D 정보모델 생성을 위한 개방형 템플릿 개발 - WEB 기반의 3D 정보모델(선형정보, 보강재, 다양한 인프라 구조물 전용 템플릿/라이브러리) 기준 상세 정보 모델 템플릿 45종 개발 - 구조물 보강재(철근/강연선)에 대한 파라메트릭 모델링 기술 개발 - 선형기반 Linear Library 할당 기술 개발 ▪ 교량 구조물의 형상 업데이트 기술 - Master Line의 형상 변화에 따른 구조물 모델 연동 기술 개발 - 교량 구조물의 보강재(철근/강연선)에 대한 정보관리 기술 개발 - 선형에 따른 Linear Library 업데이트 기술 개발 ▪ 3D 정보모델과 교량 해석 SW(Midas Civil)과의 연동 기술 - 3D 정보모델 기반의 구조설계모델 자동생성을 위한 가상보 정의 기술 개발 - 유한요소해석 및 설계검토 프로그램과의 3차원 해석 모델링 연동기능 확보 - 1D-Frame 요소와 2D-Plate Export 기능 개발 ▪ Web기반 안전진단 및 유지관리 통합관리 시스템과의 연동 기술 - 검증 대상 교량에 대한 3D 모델 구축 - 안전진단 및 유지관리 이력을 시각화하기 위한 Symbol 생성 및 색상 인덱싱 기법 개발 - Web 통합관리 시스템 연동 인터페이스 구축



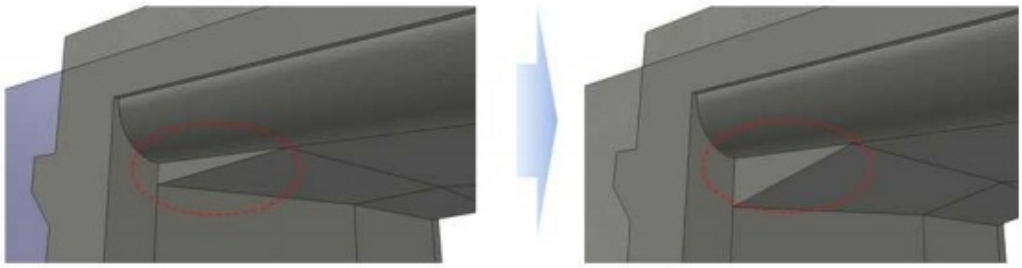
<BIM 3D 모델링 프로그램>



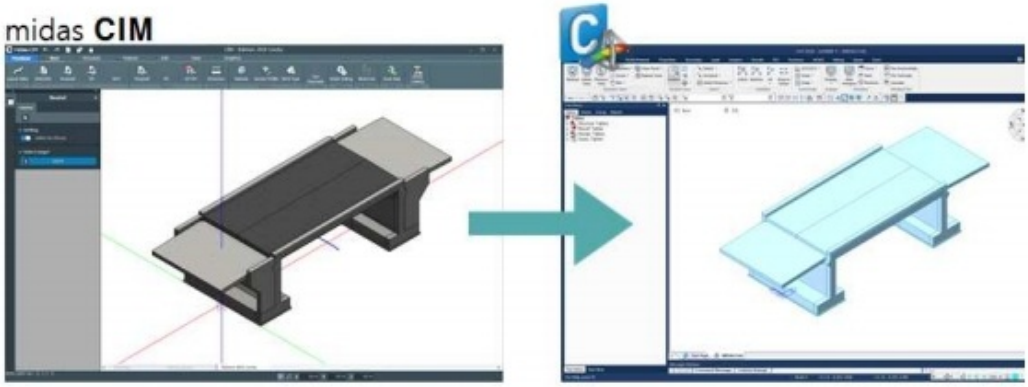
<교량 구조물의 대표 정보모델 템플릿 구성>



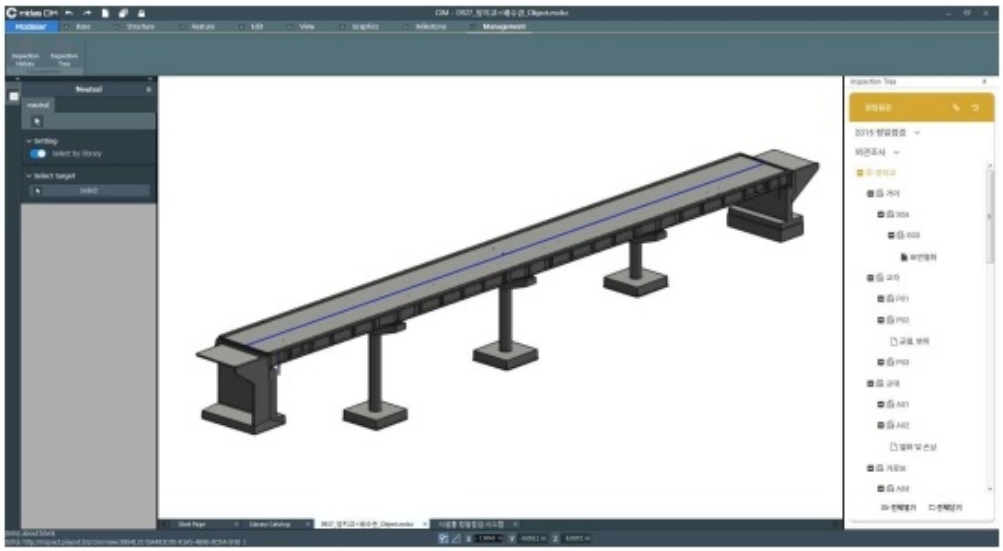
<검증 대상 교량 3D 모델>



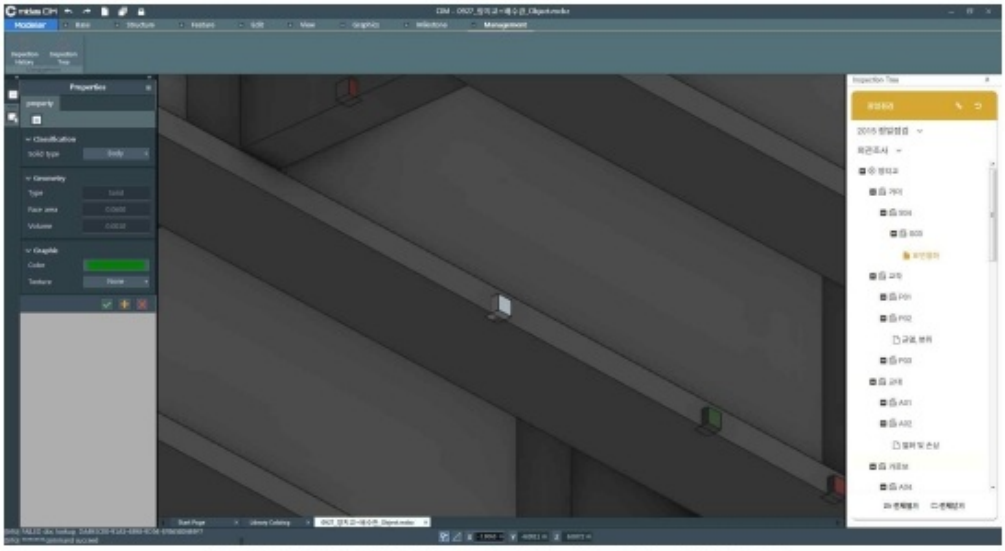
<모델 형상 업데이트 기술 적용>



<구조해석 연동 기술 적용>



(a) Web 통합관리 프로그램 연동 인터페이스



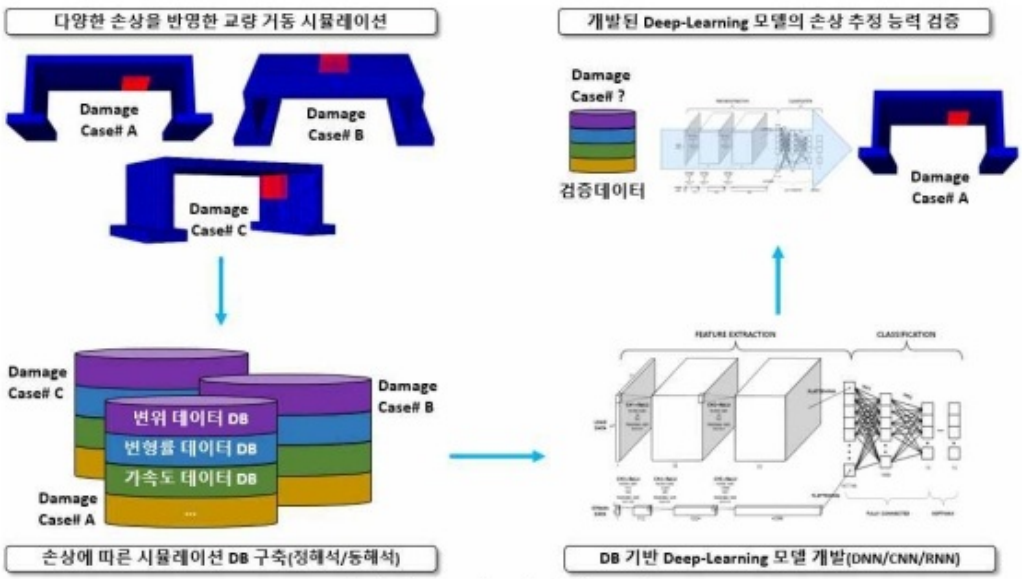
(b) 안전진단 이력 Symbol 생성 및 색상 인덱싱 기능



(c) 안전진단 이력 조회 기능

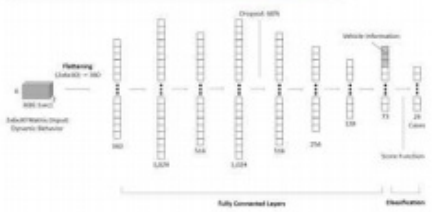
<Web 통합관리 프로그램 연동 인터페이스>

성 과 명	교량 구조물 상태평가 기법 개발 기술
수행기관	인하대학교
정 의	확률론적 기법을 기반으로 수행한 교량 구조물 상태평가
연구개발 성과	▪ 교량 구조물 손상 데이터 생성 기술 - 유한요소해석 프로그램을 사용한 손상 데이터 인위적 생성 - 실제 교량과의 Twin Model을 구축하기 위해 모델과 차로 및 차량 제원, 뒷채움재, 상시 적용하중 등을 고려한 해석모델 구축 - 복합보 이론을 적용하여 탄성계수 감소로 콘크리트 구조물 손상 표현 - 손상 데이터를 생성하기 위해 정해석 2900건, 동해석 2900건 수행 ▪ 머신러닝 기반 상태평가 모델링 기법 분석 및 선정 - 교량 구조물의 손상 추정 기법 개발을 위한 머신러닝 기반 모델링 기법 분석 - 유추주의, 베이즈주의, 기호주의, 진화주의, 연결주의 기법에 대해 분석하고 손상 추정 기법 개발에 적합한 기법 선정 - DNN(Deep Neural Networks), CNN(Convolutional Neural Network), RNN(Recurrent Neural Network) 기법 조사 및 분석 ▪ 손상 추정 시스템 개발 - 정해석 및 동해석 데이터를 활용한 손상 추정 알고리즘 개발 - 정해석은 CNN 알고리즘 체계 활용 - 동해석은 DNN, CNN, RNN을 활용하여 알고리즘을 구축하고 비교·분석 수행 - 계측오차 0%에 대해 정확도 85% 이상 확보 ▪ 오차에 따른 정확도의 민감도 분석 - 계측오차에 따른 머신러닝 기법별 민감도 분석 - 계측오차에 따른 데이터 종류별 민감도 분석

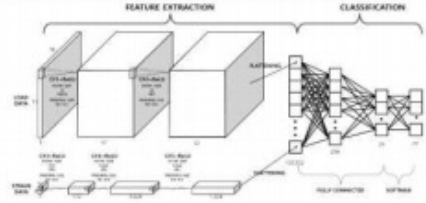


<손상 추정 시스템 개발 흐름도>

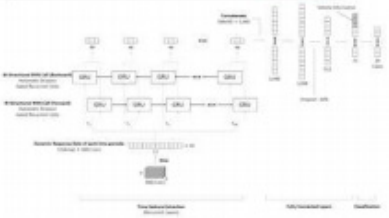
DNN(Deep Neural Networks) - 동해석



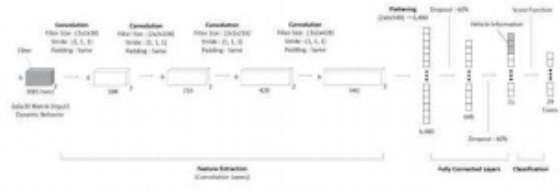
CNN(Convolutional Neural Network) - 정해석



RNN(Recurrent Neural Network) - 동해석



CNN(Convolutional Neural Network) - 동해석



<손상 추정 머신러닝 알고리즘 개발>

정해석 결과

계측오차	정확도 (CNN)
0%	87.3%
±1%	76.7%
±3%	55.0%
±5%	46.0%
평균	66.25%

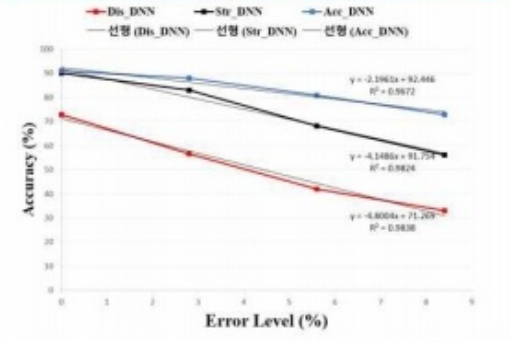
동해석 결과

계측오차	정확도(DNN)			정확도(CNN)			정확도(RNN)		
	빈형률	변위	가속도	빈형률	변위	가속도	빈형률	변위	가속도
0%	89.96%	72.94%	**91.08%**	89.80%	91.41%	92.87%	93.16%	83.51%	**89.68%**
±2.8%	83.01%	56.56%	**87.94%**	78.83%	56.55%	84.71%	89.03%	30.50%	**86.26%**
±5.6%	69.16%	41.91%	**80.96%**	61.04%	34.52%	69.51%	77.05%	19.86%	**81.86%**
±8.6%	56.19%	33.02%	**72.91%**	48.91%	24.18%	56.69%	63.96%	14.96%	**77.71%**
평균	74.58%	51.11%	**83.22%**	69.65%	51.67%	75.95%	80.80%	37.21%	**83.88%**

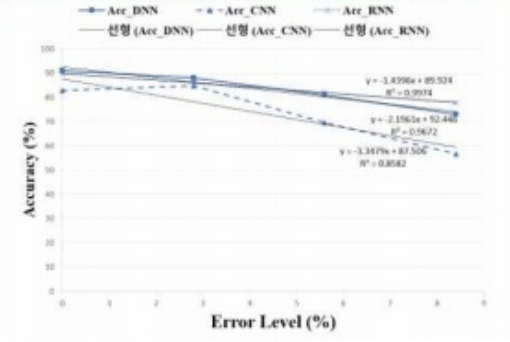
<머신러닝을 활용한 손상 추정 결과>

동해석 결과 기반 민감도 분석

변수별 민감도 분석 결과(DNN)



방법론별 민감도 분석 결과(가속도)



<데이터 종류 및 머신러닝 기법별 민감도 분석 결과>

2. 연구개발 성과

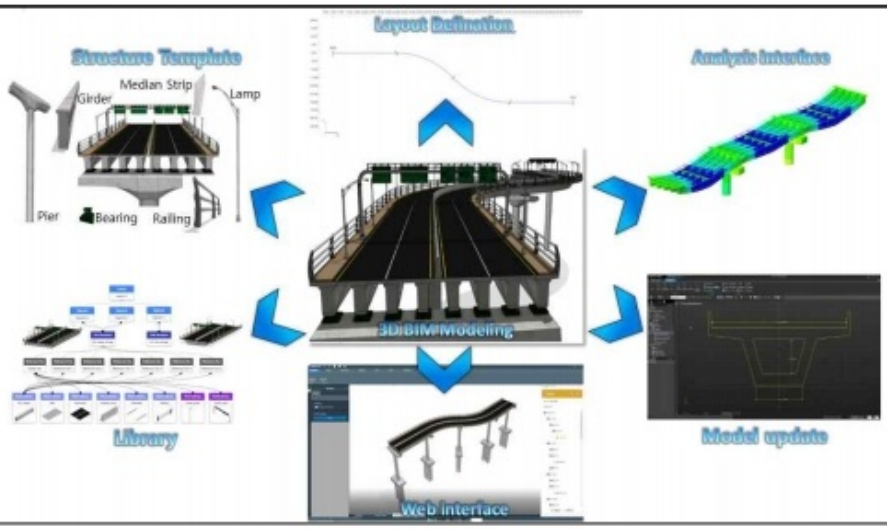
(1) 핵심성과명 : BIM 기반 안전 진단 및 유지관리 기술

<table>
<tr><td colspan="2">관련 그림 / 사진</td><td colspan="7"> 
</td></tr>
<tr><td colspan="2">정의</td><td colspan="7">- BIM을 적용한 안전 진단 및 유지관리 이력 기반 통합관리 시스템</td></tr>
<tr><td colspan="2">목적</td><td colspan="7">- 안전 진단 및 유지관리 이력의 체계적인 라이브러리 구축을 기반으로 실무자 간의 정보공유 확보 및 3차원 시각화를 통한 직관적인 이력 확인 가능</td></tr>
<tr><td colspan="2">성능목표</td><td colspan="7">(기존기술 수준)
- 방대한 양의 정보가 체계적으로 정리되어 있지 않으며 실무자가 안전 진단 및 유지관리를 수행할 때 어려움이 있음
(개발기술 수준)
- 이력 정보 기반의 라이브러리를 구축하여 실무자가 수행하는 안전 진단 및 유지관리 업무의 효율성을 증가시킴</td></tr>
<tr><td colspan="2">성과달성 책임자 (소속기관)</td><td colspan="7">한상윤 (고려대학교)</td></tr>
<tr><td colspan="2">소요기간</td><td colspan="7">'16.06 ~'19.04(2년10개월, 3년차)</td></tr>
<tr><td rowspan="12">핵심성과</td><td rowspan="3">달성 확인방법</td><td>1차년도</td><td colspan="6">안전진단 및 유지관리에 대한 지침서와 문헌 조사/분석 내용</td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td colspan="6">안전진단 및 유지관리에 대한 정보수준별 라이브러리 구축 내용</td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td colspan="6">Web기반 교량 유지관리 이력관리 프로그램 개발</td></tr>
<tr><td rowspan="6">양적성과</td><td rowspan="2">1차년도</td><td>특허 출원</td><td>특허 등록</td><td>SCI 논문</td><td>비SCI논문</td><td>S/W</td><td>기타</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td>국내 1/1</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">2차년도</td><td>특허 출원</td><td>특허 등록</td><td>SCI 논문</td><td>비SCI논문</td><td>S/W</td><td>기타</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">3차년도</td><td>특허 출원</td><td>특허 등록</td><td>SCI 논문</td><td>비SCI논문</td><td>S/W</td><td>기타</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td>국내 1/1</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">질적성과</td><td>1차년도</td><td colspan="6">- 국내외 진단 및 유지관리 실태 조사/분석 22건
- BMS 유지관리 시스템 적용성 분석 1건
- 주요 인자 결정 및 라이브러리 항목 구축 10건 이상</td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td colspan="6">- LOD별 BIM 정보 적합성 평가 95%
- BIM 연동 및 라이브러리 구축 100%</td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td colspan="6">- BIM 연동 및 라이브러리 구축 100%
- 시스템 가동률 95%</td></tr>
<tr><td colspan="2">성과 활용계획</td><td colspan="7">범용적인 국내 교량 유지관리 통합관리 프로그램 구축 / 교량관리 국가기관 / 종료 후 5년</td></tr>
</table>

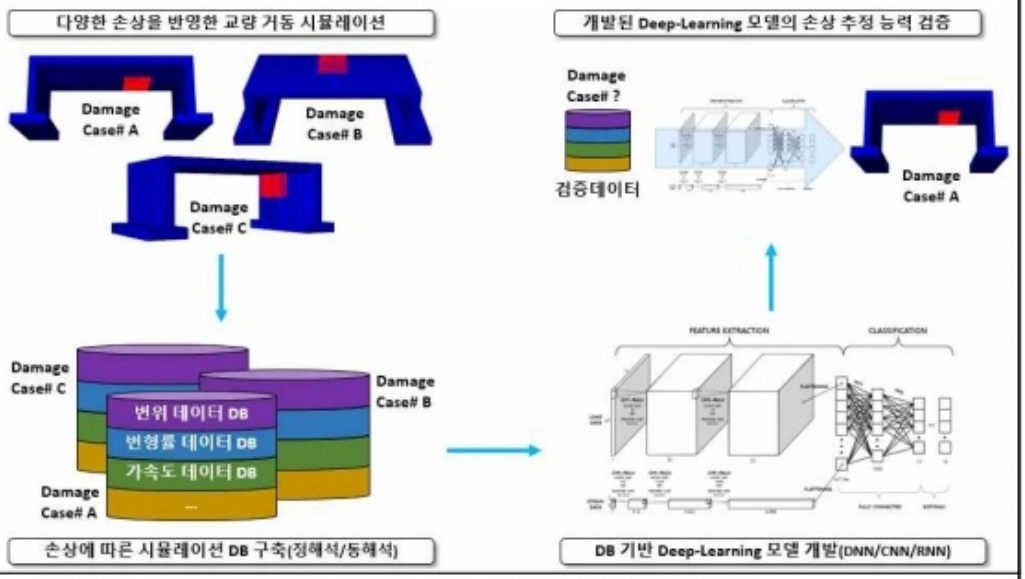
(2) 핵심성과명 : 교량 구조물의 가치평가 및 잔존 수명 예측 시스템 기술

<table>
<tr><td colspan="2">관련 그림 / 사진</td><td colspan="7"> 
</td></tr>
<tr><td colspan="2">정의</td><td colspan="7">- 교량 구조물 상태평가 기반의 가치평가 및 잔존수명을 예측하는 기술</td></tr>
<tr><td colspan="2">목적</td><td colspan="7">- 교량 구조물의 안전진단 항목 및 결과와의 연계체계를 고려한 잔존수명 및 가치평가를 산정하여 유지관리 의사결정에 활용될 수 있는 정량적 근거 제시</td></tr>
<tr><td colspan="2">성능목표</td><td colspan="7">(기존기술 수준)
- 이력관리와 정보 분석 프로그램이 개별적으로 운영되고 있음
- 가치평가에 활용되는 인자의 값들이 실제 교량 상태를 반영하지 못함
(개발기술 수준)
- 안전진단 이력관리와 정보 분석을 하나의 통합 프로그램에서 처리
- 안전진단과의 연계체계를 고려하고 교량의 상태를 반영한 잔존수명, 자산가치 제시</td></tr>
<tr><td colspan="2">성과달성 책임자 (소속기관)</td><td colspan="7">한상윤 (고려대학교)</td></tr>
<tr><td colspan="2">소요기간</td><td colspan="7">'18.06 ~ '19.04(2년10개월, 3년차)</td></tr>
<tr><td rowspan="12">핵심성과</td><td rowspan="3">달성 확인방법</td><td>1차년도</td><td colspan="6">잔존수명과 가치평가에 대한 국내외 문헌 조사/분석 내용</td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td colspan="6">잔존수명과 가치평가에 대한 예측식, 프로세스 정립 및 인자 도출 내용</td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td colspan="6">안전진단과의 연계체계 정립 및 Web기반 프로그램 적용 여부</td></tr>
<tr><td rowspan="6">양적성과</td><td rowspan="2">1차년도</td><td>특허 출원</td><td>특허 등록</td><td>SCI 논문</td><td>비SCI논문</td><td>S/W</td><td>기타</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">2차년도</td><td>특허 출원</td><td>특허 등록</td><td>SCI 논문</td><td>비SCI논문</td><td>S/W</td><td>기타</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">3차년도</td><td>특허 출원</td><td>특허 등록</td><td>SCI 논문</td><td>비SCI논문</td><td>S/W</td><td>기타</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td>국내 1/1</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">질적성과</td><td>1차년도</td><td colspan="6">- 국내외 문헌 조사/분석 19건
- 주요 인자 결정 및 방법론 도출 99%
- 구조해석 모델 구축 28건</td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td colspan="6">- BIM 라이브러리 항목 결정 95%
- 다양한 하중 시나리오별 응답 추출 90%</td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td colspan="6">- 교량 구조물 가치평가 1건
- 잔존수명 예측 시스템 구축 1건</td></tr>
<tr><td colspan="2">성과 활용계획</td><td colspan="7">범용적인 국내 유지관리 이력정보 분석 기법 구축 / 교량관리 국가기관 / 종료 후 5년</td></tr>
</table>

(3) 핵심성과명 : 교량 구조물 BIM 라이브러리 구축 및 조립 프로그램 개발 기술

<table>
<tr><td colspan="2">관련 그림 / 사진</td><td colspan="7"> 
</td></tr>
<tr><td colspan="2">정의</td><td colspan="7">- BIM에 적용 가능한 라이브러리 및 모듈 자동조립 프로그램 기술</td></tr>
<tr><td colspan="2">목적</td><td colspan="7">- 교량 모델 객체를 라이브러리화 하여 모델의 재활용성을 향상
- 선형정보를 포함한 템플릿기반 모델기술로 3D 모델링 구축 시간 단축</td></tr>
<tr><td colspan="2">성능목표</td><td colspan="7">(기존기술 수준)
- 특수교량에만 BIM이 적용되고 있으며 일반적인 교량에는 적용이 어려움
- 모델 객체가 라이브러리화 되어 있지 않아 모델의 재활용이 어려움
(개발기술 수준)
- 일반교량에 활용 가능한 BIM 3D 모델링 기술 개발
- BIM 비전문가도 쉽게 접근할 수 있는 3D 모델링 기술 개발</td></tr>
<tr><td colspan="2">성과달성 책임자 (소속기관)</td><td colspan="7">김태호 (마이다스아이티)</td></tr>
<tr><td colspan="2">소요기간</td><td colspan="7">'16.06 ~'19.04(2년10개월, 3년차)</td></tr>
<tr><td rowspan="11">핵심성과</td><td rowspan="3">달성 확인방법</td><td>1차년도</td><td colspan="6">교량 모델 객체 라이브러리 구축 및 템플릿 생성 기술 개발 내용</td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td colspan="6">교량 모델 생성 기술 및 Web프로그램 연동 모듈 개발 내용</td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td colspan="6">안전진단 이력 시각화 기술 개발 및 가동률 검토 내용</td></tr>
<tr><td rowspan="6">양적성과</td><td rowspan="2">1차년도</td><td>특허 출원</td><td>특허 등록</td><td>SCI 논문</td><td>비SCI논문</td><td>S/W</td><td>기타</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">2차년도</td><td>특허 출원</td><td>특허 등록</td><td>SCI 논문</td><td>비SCI논문</td><td>S/W</td><td>기타</td></tr>
<tr><td>1/1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">3차년도</td><td>특허 출원</td><td>특허 등록</td><td>SCI 논문</td><td>비SCI논문</td><td>S/W</td><td>기타</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td>1/1</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">질적성과</td><td>1차년도</td><td colspan="6">- 라이브러리 자동조립 기반 구축 15건
- 구조해석 모델 구현 100%</td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td colspan="6">- Web기반 데이터베이스 연결 100%
- 자동조립을 위한 알고리즘 체계 수립 95%</td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td colspan="6">- 색상 인덱싱 기법 구축 100%
- 시스템 가동률 100%</td></tr>
<tr><td colspan="2">성과 활용계획</td><td colspan="7">기술 경쟁력을 갖춘 범용적인 국내 3D BIM 모델링 프로그램 구축 / 교량 안전진단 업체, 엔지니어링社 / 종료 후 3년</td></tr>
</table>

(4) 핵심성과명 : 교량 구조물 상태평가 기법 개발 기술

<table>
<tr><td colspan="2">관련 그림 / 사진</td><td colspan="7"> 
</td></tr>
<tr><td colspan="2">정의</td><td colspan="7">- 확률론적 기법을 기반으로 수행한 교량 구조물 실시간 상태평가</td></tr>
<tr><td colspan="2">목적</td><td colspan="7">- 확률론적 기법을 기반으로 실시간 상태평가 모델 개발
- 교량 구조물의 안전진단 및 유지관리의 적시성과 효율성 향상</td></tr>
<tr><td colspan="2">성능목표</td><td colspan="7">(기존기술 수준)
- 교량의 안전진단 주기는 최소 1년으로 실시간 상태평가가 어려움
- 계측데이터의 양이 적어 머신러닝을 활용하기 어려움
(개발기술 수준)
- 구조해석을 통한 빅데이터 생성으로 머신러닝 활용
- 교량 구조물의 실시간 손상 위치 및 정도 평가 가능</td></tr>
<tr><td colspan="2">성과달성 책임자 (소속기관)</td><td colspan="7">신도형 (인하대학교)</td></tr>
<tr><td colspan="2">소요기간</td><td colspan="7">'16.06 ~'19.04(2년10개월, 3년차)</td></tr>
<tr><td rowspan="11">핵심성과</td><td rowspan="3">달성 확인방법</td><td>1차년도</td><td colspan="6">확률론 및 머신러닝 기법에 대한 국내외 문헌 조사/분석 내용</td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td colspan="6">정해석 데이터를 활용한 손상추정 알고리즘 개발 내용</td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td colspan="6">동해석 데이터를 활용한 손상추정 알고리즘 개발 내용</td></tr>
<tr><td rowspan="6">양적성과</td><td rowspan="2">1차년도</td><td>특허 출원</td><td>특허 등록</td><td>SCI 논문</td><td>비SCI논문</td><td>S/W</td><td>기타</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">2차년도</td><td>특허 출원</td><td>특허 등록</td><td>SCI 논문</td><td>비SCI논문</td><td>S/W</td><td>기타</td></tr>
<tr><td>1/1</td><td></td><td></td><td></td><td>1/0</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">3차년도</td><td>특허 출원</td><td>특허 등록</td><td>SCI 논문</td><td>비SCI논문</td><td>S/W</td><td>기타</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td>국내 1/1</td><td>2/1</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">질적성과</td><td>1차년도</td><td colspan="6">- 상태평가 방법론 조사 14건</td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td colspan="6">- 모델링 기법 선정 95%
- 시뮬레이션 검증을 통한 패턴 분석 기법 검증 100%</td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td colspan="6">- 상태평가 항목의 민감도 분석 100%</td></tr>
<tr><td colspan="2">성과 활용계획</td><td colspan="7">교량 구조물의 실시간 상태평가 시스템 구축 / 교량 안전진단 업체 / 종료 후 5년</td></tr>
</table>

제 4 장 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

제 1 절 목표 달성도

1. 질적 성과지표 달성도

○ 총괄

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준						
					질적 성과지표		목표치	달성치	측정방법	검증방법	가중치
주관	1	BIM 기반 안전 진단 및 유지관리 기술 구축	1-1	기존 교량 구조물의 안전 진단 및 유지관리 현황 조사/분석	①	국내외 진단 및 유지관리 실태 조사/분석	조사/분석 10건 이상	22건	조사/분석 건수	보고서	4
					②	BMS 유지관리 시스템 적용성 분석	1건 이상	1건	분석 건수	보고서	4
			1-2	BIM에 적용 가능한 방법론 개발	①	주요 인자 결정 및 라이브러리 항목 구축	인자/항목 도출 10건 이상	10건 이상	인자/항목도출 건수	보고서	4
			1-3	LoD(Level of Detail) 결정	①	LoD 별 BIM 정보 적합성 평가	95% 이상	95%	BIM 적합성 평가	전문가 검증	7
			1-4	안전 진단 이력 관리 시스템	①	BIM 연동 및 라이브러리 구축	100%	100%	시스템 개발	보고서	7
			1-5	유지관리 이력 시스템	①	BIM 연동 및 라이브러리 구축	100%	100%	시스템 개발	보고서	7
			1-6	BIM 기반 통합시스템 연동	①	시스템 가동률	95% 이상	95%	시스템 연동	전문가 검증	4
주관	2	교량구조물의 가치평가 및 잔존 수명 예측 시스템 개발	2-1	가치평가 및 잔존 수명 예측 기반 기술	①	국내외 문헌 조사/분석	조사/분석 10건 이상	19건	조사/분석 건수	보고서	3
					②	주요 인자 결 정 및 방법론 도출	99%	99%	적절성	보고서	3
					③	BIM 라이브러리 항목 결정	95% 이상	95%	BIM 적합성 평가	보고서	4
	2	교량구조물의 가치평가 및 잔존 수명 예측 시스템 개발	2-2	상태 평가를 통한 가치평가 및 잔존 수명 예측 시스템	①	구조해석 모델 구축	5건 이상	28건	대표 교량 형식별 건수	보고서	6
					②	다양한 하중 시나리오별 응답 추출	90% 이상	90%	실제 교량 대비	보고서	6
					③	교량 구조물 가치평가	1건 이상	1건	적절성	보고서	7
					④	잔존 수명 예측 시스템 구축	1건 이상	1건	시스템 개발	보고서	7
위탁	3	교량 구조물 BIM 라이브러리 구축 및 조립 프로그램 개발	3-1	지형고를 고려한 BIM 라이브러리 구축	①	라이브러리 자동조립 기반 구축	인자/항목 도출 10건 이상	15건	인자/항목 도출 건수	보고서	2.5
					②	Web 기반 데이터베이스 연결	100%	100%	시스템 연동	전문가 검증	2
					③	색상 인덱싱 기법 구축	100%	100%	시스템 연동	전문가 검증	1.7
			3-2	교량 구조물 모델 생성 프로그램 개발	①	구조해석 모델구현	100%	100%	시스템 연동	전문가 검증	2
					②	자동조립을 위한 알고리즘 체계 수립	95%	95%	적절성	보고서	2.5
					③	시스템 가동률	100%	100%	시스템 연동	전문가 검증	2.8

위탁	4	교량 구조물 상태평가 기법 개발	4-1	상태평가 모델링 기반기술	①	상태평가 방법론 조사	조사/분석 10건 이상	14건	조사/분석 건수	보고서	4.5
					②	모델링 기법 선정	95% 이상	95%	적절성	보고서	1.5
			4-2	상태평가 기술 개발	①	시뮬레이션 검증을 통한 패턴 분석 기법 검증	100%	100%	적절성	보고서	3
					②	상태평가 항목의 민감도 분석	100%	100%	적절성	보고서	4.5
계											100

○ 1차년도

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준						
					질적 성과지표		목표치	달성치	측정방법	검증방법	가중치
주관	1	BIM 기반 안전 진단 및 유지관리 기술 구축	1-1	기존 교량 구조물의 안전 진단 및 유지관리 현황 조사/분석	①	국내외 진단 및 유지관리 실태 조사/분석	조사/분석 10건 이상	22건	조사/분석 건수	보고서	4
					②	BMS 유지관리 시스템 적용성 분석	1건 이상	1건	분석 건수	보고서	4
			1-2	BIM에 적용 가능한 방법론 개발	①	주요 인자 결정 및 라이브러리 항목 구축	인자/항목 도출 10건 이상	10건 이상	인자/항목도출 건수	보고서	4
	2	교량구조물의 가치평가 및 잔존 수명 예측 시스템 개발	2-1	가치평가 및 잔존 수명 예측 기반 기술	①	국내외 문헌 조사/분석	조사/분석 10건 이상	19건	조사/분석 건수	보고서	3
					②	주요 인자 결 정 및 방법론 도출	99%	99%	적절성	보고서	3
			2-2	상태 평가를 통한 가치 평가 및 잔존 수명 예측 시스템	①	구조해석 모델 구축	5건 이상	28건	대표 교량 형식별 건수	보고서	6
위탁	3	교량 구조물 BIM 라이브러리 구축 및 조립 프로그램 개발	3-1	지형고를 고려한 BIM 라이브러리 구축	①	라이브러리 자동조립 기반 구축	인자/항목 도출 10건 이상	15건	인자/항목 도출 건수	보고서	2.5
			3-2	교량 구조물 모델 생성 프로그램 개발	①	구조해석 모델구현	100%	100%	시스템 연동	전문가 검증	2
위탁	4	교량 구조물 상태평가 기법 개발	4-1	상태평가 모델링 기반기술	①	상태평가 방법론 조사	조사/분석 10건 이상	14건	조사/분석 건수	보고서	4.5
계											33

○ 2차년도

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준						
					질적 성과지표		목표치	달성치	측정방법	검증방법	가중치
주관	1	BIM 기반 안전 진단 및 유지관리 기술 구축	1-3	LoD(Level of Detail) 결정	①	LoD 별 BIM 정보 적합성 평가	95% 이상	95%	BIM 적합성 평가	전문가 검증	7
			1-4	안전 진단 이력 관리 시스템	①	BIM 연동 및 라이브러리 구축	100%	100%	시스템 개발	보고서	7
	2	교량구조물의 가치평가 및 잔존 수명 예측 시스템 개발	2-1	가치평가 및 잔존 수명 예측 기반 기술	③	BIM 라이브러리 항목 결정	95% 이상	95%	BIM 적합성 평가	보고서	4
			2-2	상태 평가를 통한 가치 평가 및 잔존 수명 예측 시스템	②	다양한 하중 시나리오별 응답 추출	90% 이상	90%	실제 교량 대비	보고서	6
위탁	3	교량 구조물 BIM 라이브러리 구축 및 조립	3-1	지형고를 고려한 BIM 라이브러리 구축	②	Web 기반 데이터베이스 연결	100%	100%	시스템 연동	전문가 검증	2

		프로그램 개발	3-2	교량 구조물 모델 생성 프로그램 개발	②	자동조립을 위한 알고리즘 체계 수립	95%	95%	적절성	보고서	2.5
위탁	4	교량 구조물 상태평가 기법 개발	4-1	상태평가 모델링 기반기술	②	모델링 기법 선정	95% 이상	95%	적절성	보고서	1.5
			4-2	상태평가 기술 개발	①	시뮬레이션 검증을 통한 패턴 분석 기법 검증	100%	100%	적절성	보고서	3
계											33

○ 3차년도

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준						
					질적 성과지표		목표치	달성치	측정방법	검증방법	가중치
주관	1	BIM 기반 안전 진단 및 유지관리 기술 구축	1-5	유지관리 이력 시스템	①	BIM 연동 및 라이브러리 구축	100%	100%	시스템 개발	보고서	7
			1-6	BIM 기반 통합시스템 연동	①	시스템 가동률	95% 이상	95%	시스템 연동	전문가 검증	4
	2	교량구조물의 가치평가 및 잔존 수명 예측 시스템 개발	2-2	상태 평가를 통한 가치 평가 및 잔존 수명 예측 시스템	③	교량 구조물 가치평가	1건 이상	1건	적절성	보고서	7
					④	잔존 수명 예측 시스템 구축	1건 이상	1건	시스템 개발	보고서	7
위탁	3	교량 구조물 BIM 라이브러리 구축 및 조립 프로그램 개발	3-1	지형고를 고려한 BIM 라이브러리 구축	③	색상 인덱싱 기법 구축	100%	100%	시스템 연동	전문가 검증	1.7
			3-2	교량 구조물 모델 생성 프로그램 개발	③	시스템 가동률	100%	100%	시스템 연동	전문가 검증	2.8
위탁	4	교량 구조물 상태평가 기법 개발	4-2	상태평가 기술 개발	②	상태평가 항목의 민감도 분석	100%	100%	적절성	보고서	4.5
계											34

2. 양적 성과지표 달성도

성과지표명		1차년도		2차년도		3차년도		합계	
		목표	달성	목표	달성	목표	달성	목표	달성
특허	출원	-	-	2	2	-	-	2	2
	등록	-	-	-	-	-	-	-	-
소프트웨어(S/W)		-	-	-	1	2	3	2	4
국내외 학술지 게재	일반학술지	1	1	-	-	2	3	3	4
	SCI(E)학술지	-	-	-	-	-	-	-	-
국내외 학술회의 발표		-	3	-	7	-	1	-	11

제 2 절 관련 분야 기여도

○ 공공적 기여도

- 현재 토목 구조물의 BIM 적용에 대한 관심이 급증하고 있으나 설계 및 시공단계에 머물러 있기 때문에, 본 과제의 성과물인 교량 유지관리에 대한 통합 이력 관리 시스템은 국내 BIM의 유지관리에 대한 방향성을 제시함
- 안전진단과 보수·보강은 매회 다른 기관에서 수행하므로 작업자간의 혼선이 발생할 수 있음. 본 과제의 성과물에서는 안전진단 이력을 3D 모델에 시각적으로 나타냄으로써 작업자간의 혼선을 감소시킬 수 있음

○ 기술적 기여도

- 구조해석을 활용하여 빅데이터를 생성하고 실시간 손상추정에 대한 머신러닝 알고리즘을 개발하여 교량 유지관리에 대한 4차산업 적용 기술의 초석을 마련함
- 3D 모델링 프로그램과 1D-Frame, 2D-Plate 형태의 구조해석 모델 연동 기술은 교량의 구조안전성 평가시 활용될 수 있음

○ 학술적 기여도

- 안전진단 이력데이터와 연계하여 교량의 가치와 잔존수명을 제시함으로써 교량 유지관리 의사결정의 정량적인 근거로 활용할 수 있음
- 교량 유지관리에 BIM을 적용하기 위한 안전진단, 보수·보강, 잔존수명, 가치평가에 대한 항목을 LOD와 BIL과 비교하여 Level 4단계로 나타냄으로써 BIM 유지관리 정보체계에 대한 방향성을 제시함

○ 경제적 기여도

- 선형기반 라이브러리 및 템플릿을 활용한 3D 모델링 프로그램은 비전문가도 쉽게 사용할 수 있게 개발되었기 때문에, BIM 적용시 과다한 인력 추가비용에 대한 문제를 해소할 수 있음
- 라이브러리 및 템플릿 기반 기술은 같은 형식의 다른 교량을 모델링할 시 기존 교량 모델을 활용할 수 있으며 교량 모델링에 발생하는 추가비용을 감소시킬 수 있음
- 의사결정의 정량적 근거인 가치평가와 잔존수명을 활용하여 적절한 시기의 보수·보강을 수행할 수 있어 교량 유지관리에 소요되는 비용을 최소화할 수 있음

○ 기타 기여도

- 국내외 유지관리와 BIM에 대한 현황을 조사/분석하여 정리함으로써 연구자들의 문헌조사에 소요되는 시간을 절약시킬 수 있음

제 5 장 연구개발성과의 활용계획

1. 기존 연구와의 차별성

○ 대상 교량 구조물과 점검유형 방법 차이

- 본 과제 대상은 타 연구에서 수행되는 신설되는 교량이 아닌 기존의 노후화된 공용중인 교량을 대상으로 시스템을 구축하였으며, 세부적으로는 상부교량 형식 중 많이 쓰이는 PSCI (프리스트레스 I형교량), STB(강박스 교량), RCS(콘크리트 슬래브 교량), RA(라멘형 교량) 등 4개의 형식을 대상으로 시스템을 구축 함.
- 본 과제가 제출 되는 시점은 2018년 한국시설안전공단에서 발간된 「시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침(성능평가)」로 교량 시설물의 유지관리를 수행하도록 개정 되었으며 이에 관련 하여 타 연구 및 현재 유지관리 시스템에서 누락되어 있는 성능평가에 대한 진단방법이 시스템에 포함시킴.

○ 관리 데이터의 차이

- 기존의 구축된 대부분의 교량 관리 시스템의 경우 교량의 일회성적인 교량의 정보이력 데이터의 단순한 누적 기능이며 정보의 활용은 미비하다. 본 과제의 경우 교량의 이력데이터를 유지관리의 의사결정의 도구로 활용될 수 잇도록 교량의 잔존수명과 가치평가에 제공 하도록 구축하였음.

○ 비정형성 3D 모델링

-
- 토목 BIM 의 경우 도로/철도 교량의 비정형성으로 인한 라이브러리 제작의 어려움이 뒤따르며 앞선 연구들의 BIM 플랫폼 역시 비정형성이 포함된 라이브러리 탬플릿이 포함되지 못하였으나, 본 연구에서는 비정형 모델링 환경 및 라이브러리를 구축하여 다수의 공용교량의 효율적인 모델링 가능하게 함

2. 연구성과의 한계점

○ 유지관리 의사결정 시스템 구축

- 이력데이터를 통한 교량의 유지보수등급 결정 시스템은 구축하였으나, 교량의 유지 및 보수에 관한 의사 결정에는 교량의 성능등급을 포함한 잔존수명 및 가치평가의 결과 역시 활용되어야 함. 교량 유지관리를 수행할 최적시기에 정확한 유지관리 의사결정을 정량적으로 판단해야 함.

○ 모든 점검유형별 이력 표현 방법 이미지화

- BIM을 이용한 모델링 시 공용중인 교량의 기존 열화객체의 모델링의 경우 열화손상 별 서로 다른 객체의 자세한 표현보다는 객체의 위치로 심볼을 통해 나타내었다. 열화별 더욱더 세부적인 표현은 표현 level, 즉 LoD에 맞추어 이후 추가적인 요구사항이 존재할 시 추가연구를 통해 진행해야 할 것으로 판단됨.

○ 기존 이력 자동 연동

- 현 연구단계에서는 교량 모델링 프로그램, Web 기반 교량 유지관리 이력데이터 플랫폼 의 상호 연동을 통하여 객체간의 정보 모델을 주고받고 있다. 그러나 BIM을 통한 데이터 상호간 자동화를 표현하기에는 추가연구가 필요할 것으로 상기됨.

3. 추가 연구의 필요성

○ 유지관리 의사결정 시스템 구축

- 잔존수명 예측 및 가치평가 결과를 활용한 의사결정 시스템 구축 필요
- 적절한 보수·보강 시기 및 정도 등급목표 등의 설정
- 사후 유지보수가 아닌 예방적 유지보수 필요

○ 모든 점검유형별 이력 표현 방법 이미지화

- 점검자 및 관리자의 직관적인 이력 확인을 위해 표현 방법 이미지화 필요
- 현재 각 점검항목별 표현 대표 이미지가 정립화 되어있지 않음
- 외관조사, 조사·재료시험, 보수·보강뿐만 아니라 3D 모델에 위치를 표시할 수 잇는 모든 이력에 대한 대표 이미지 정립 필요

○ 기존 이력 자동 연동

- 기존 안전진단에 의해 누적되어 있는 이력 데이터가 FMS(Facility Management System), FMMS(Facility Maintenance Management System) 등에 누적되어 있음
- 본 프로그램을 범용적인 교량 관리 프로그램으로 확장하기 위해서는 기존에 데이터화 되어 있는 정보들의 자동 연동 기능에 대한 추가연구가 필요함

○ 손상추정 알고리즘 실측 데이터 검증 및 교량형식 확대

- 본 과제에서 개발된 구조해석 빅데이터를 활용한 머신러닝 손상추정 알고리즘을 실측 데이터 검증 필요
- 본 과제의 알고리즘은 라멘교에 국한되어 있으며 교량형식 확장 필요
- BIM 프로그램에서 알고리즘에 의한 손상 추정 내역 표현 방법 구축 필요

4. 사업화 계획

가. 종료 후 1년

○ 프로그램 디버깅 및 사용자 편의성 개선

- 사용자의 불편함을 최소화하기 위한 Web 프로그램의 디버깅 수행
- Web 프로그램의 시설물별, 부재별, 진단종류별 전체 이력 목록 확인 기능 추가

- 데이터 저장/전달 프로세스를 최적화하여 정보 관리에 소요되는 시간 개선
- CIM에서 외관조사, 조사·재료시험, 보수·보강 외의 점검유형에 대한 정보 확인 기능 추가
- CIM상에서의 데이터 입력 및 수정 기능 추가

○ 국기기관과의 지속적인 협의 및 홍보

- 프로그램 범용화를 위한 교량 관리 국가기관(예: 국토교통부, 시설안전공단, 한국건설기술연구원, 각 시청 등)의 프로그램 홍보
- 기존에 공용중인 교량의 BIM화를 위한 후속 연구과제 협의
- 시설안전공단(FMS), 국토교통부(BMS), 한국시설안전공단(FMMS)와 같은 국가기관에서 관리중인 교량 관리 프로그램과의 연계성 검토

○ 계측데이터 관리 기능

- 계측 관리 시스템의 DB와 Web 프로그램과의 연계 기능 추가
- 계측 데이터을 활용한 Depp-Learning 손상 추정 알고리즘 적용
- 실시간 교량 손상 추정 시스템 구축

나. 종료 후 2년

○ 이력 위치 표현 이미지화

- 기존의 Symbol 형태의 CIM상 이력 위치 표현방법을 이미지로 변경
- 국내외 외관조사망도의 손상 이미지 조사/분석
- 외관조사, 조사·재료시험, 보수·보강 등의 이력 위치 정보가 필요한 점검유형에 대한 고유이미지 생성 및 부여
- CIM상에 표현된 이미지를 활용한 2D 외관조사망도 자동 생성 기능 추가

○ 유지관리 의사결정 시스템 구축

- 공용중인 국내 교량 환경을 고려한 목표성능 설정 연구 수행
- 교량의 성능, 잔존수명, 가치평가를 고려한 의사결정 프레임워크 연구 수행
- 효율적인 보수·보강 시기와 정도 결정을 위한 의사결정 시스템 구축

○ 국내 안전진단 업체 프로그램 제공

- 국내 안전진단 업체에서 자사에서 수행한 안전진단 정보 이력을 관리에 활용할 수 있도록 프로그램 제공
- 피드백 수용 및 수정/보완

다. 종료 후 3년 이후

○ 프로그램 제품화

- 안전진단 정보 이력 관리, 계측 데이터 분석, 의사결정 시스템 구축 완료

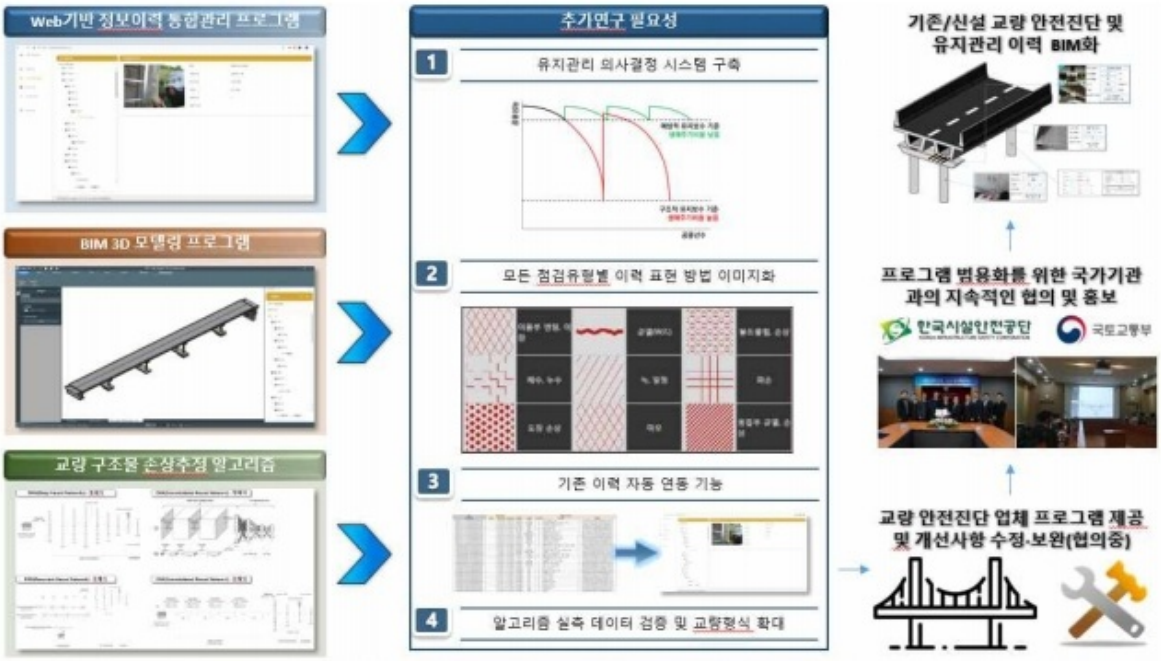
- 국내 안전진단 업체 및 전문가 피드백에 대한 수정/보완 완료
- 일반교량 정보이력 관리 BIM 프로그램 제품화

○ 국가기관과의 협업 수행

- 국가기관(국토교통부, 시설안전공단, 한국건설기술연구원 등)과의 BIM 프로그램 시범 적용 협업 체결
- 시범 대상 지역에 대한 공용중인 교량의 BIM화 수행
- 신설 교량 발주건에 대한 BIM 적용

○ 해외 BIM 사업 진출 및 프로그램 수출

- 해외 안전진단 및 유지관리, BIM 프로세스 조사/분석
- 해외 BIM 사업 수주 및 프로그램 수출을 위한 프로그램 local화



<그림 5.1.1> 연구개발성과의 활용계획

제 6 장 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

제 1 절 BIM 정책 및 가이드라인

1. 미국

○ 미국 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서는 2004년 8월 Cost Analysis of Inadequate Interoperability in the U.S. Capital Facilities Industry라는 제목의 보고서를 통하여 미국 산업의 경우 건설소프트웨어의 정보 호환성 미흡으로 최소 150억 달러 이상의 비용 낭비가 일어나고 있으며 이를 극복하기 위해 통합 환경을 제공하는 정보화 시스템의 필요성을 강조함.

○ 시설물들의 친환경성을 높이고 호환성 부재로 인한 낭비를 줄이기 위하여 2007년 12월에 국가 표준으로서 NBIM(National Building Information Modeling Standard)을 제정하였음. 국가 BIM 표준지침을 개발-보급하고, 시설물의 생애주기 동안 정보를 생성하고 관리하기 위한 가이드를 제공. 또한 정보교환의 개념, 표준개발 프로세스, 정보의 신뢰성, 실무에서 활용 가능한 모델에 대한 정보를 제공하면서 이를 국제적으로 통용 가능한 부분과 미국 내에서 적용 가능한 부분을 구분함.

○ OGC(Open Geospatial Consoltium)활동으로 2008년 2월에 buidingSMART alliance, OGC, AECOO(Architecture, Engineering, Construction, Owner and Operator) 테스트베드의 후원자들은 AECOO 테스트베드에 대한 기술 요청서를 발행함. 기술 요청서에는 소프트웨어 및 연구단체, 사업체 및 관련 회원들에게 다음과 같은 세 가지의 테스트베드와 관련된 기술적인 솔루션을 요구하고 있음.

- ①빌딩모델과 사업과정의 연계를 위한 의사 결정 지원 및 커뮤니케이션 방법
- ②디자인 과정에서의 에너지 분석
- ③디자인 과정에서의 비용 산출
- GCB(CAD, GIS, BIM) Thread와 연관되어 AECOO 테스트베드를 통해 IFC와 지리정보의 연계 및 웹서비스를 통한 통합관련 추가 개발이 진행될 예정임.

○ COBIE(Cnstruction to Operation Building Information Exchange) 프로젝트 진행을 통하여 건설 전체 과정에서 발생하는 프로젝트 데이터들을 확보하고 전달하기 위해 필요한 업무를 표준화하고 단순화함. COBIE 방식의 주요한 혁신은 프로젝트가 끝날 때까지 기다리는 것이 아니라 프로젝트 데이터가 발생하는 건설 전체 생애과정에서 발생하는 데이터를 확보하여 총 잠재적 투자수익을 파악함.

○ 미국 조달청 (GSA: : General Services Administration)의 공공시설국(PBS)는 900만평 규모의 작업공간을 제공하고 있으며, Design Excellence Program에 따라서 GSA PBA의 건축부(OCA: Office of the Chief Architect)는 미국의 주요 설계자들과 함께 건축설계품질 향상을 위하여 노력하고 있음. 2006년 10월부터 GSA 설계 계약시 IFC 기반의 BIM 데이터로 납품하도록 의무화함.

2. 영국

○ 영국 정부는 BIM 기술의 활용도를 높이기 위해 "Push & Pull" 전략을 활용하고 있으며 건설 산업계(Industry Push)와 정부(Client Pull)가 주축이 되어 진행중. Push는 프로젝트의 공급체인 구성원을 밀어주고 지원하는 것을 의미하며 표준, 지침, 교육지원 등을 포함하고 있음. Pull은 BIM 관련 정책과 법을 제정하고 BIM 정보 명세화 등을 통한 요구사항을 정의하여 기술 활용을 요구하거나 유도하는 역할을 함.

○ Push & Pull 정책의 세 가지 핵심 성공 요인은 BIM 활용 이점에 대한 명확한 인식과 건설 산업계의 전반적인 BIM 도입 및 활용이며, 마지막으로 건설 프로젝트의 공급망(supply chain)시스템에 대한 BIM 도입으로 규정하고 있음. 또한 건설 프로젝트의 공급망과 BIM 기술 연계에 따라 발생할 수 있는 각 프로젝트 단계별 이해 관계자들 간의 정보 공유와 연계의 문제점을 해결하고자 노력하고 있음. BIM 성숙도 단계별 Push & Pull 전략 실천방안은 다음과 같음.

<표 6.1.1> Push & Pull 전략

Activity	Push/Pull	Level 1	Level 2	Level 3
BIM road map	pull	- Define requirements for - Managed information exchange between p aricipants	- Define requirements for use of outputs d uring project - Define requirements for post-completion use of outputs	- Define output requir ements for integrate d model - Define requirements for use of outputs d uring project - Define requirements for post-completion use of outputs
BIM road map	push	- Establish targets and program for capabilit y to delivery informa tion exchange and re use - Delivery capability a s required	- Delivery capability a s required	- Delivery capability a s required
BIM protocol	pull	- Use protocol based o n current 2D/3D exc hange standards and project deliverables - Establish Single repr esentative group to deliver BIM protocol	- Standardise BIM pro tocol requirements a s basis for forward development by supp ly chain - Use protocol based o n BIM exchange sta ndard	- Use protocol based o n fully integrated BI M - Protocol describe add itional project deliber ables based on fully integrated BIM
BIM protocol	push	- Contribute to BIM p rotocol through direc t engagement and ca pability development	- Contribute to BIM p rotocol through direc t engagement and ca pability development	- Contribute to BIM p rotocol through direc t engagement and ca pability development
Constructi on contract	pull	- Draft amendment to enact BIM protocol	- Incorporate amendme nt to enact BIM prot ocol	- Use integrated projec t team contract
Schedules of service	pull	- Draft duties for mod el integrator/manager	- Incorporate duties rel ated to use of the m odel and extended o	- Draft duties for appo intment of integrated team

			utputs - Draft duties for mod el integrator/manager	

3. 싱가폴

○ 싱가폴은 전 국가적인 차원에서 BIM에 대한 지원 및 연구개발이 이루어지고 있으며 BIM 활용 및 개발 속도가 매우 빠른 실정임.

○ 특히 2011년 초부터 싱가포르건설성(BCA)은 향후 10년간 매년 최소 2~3%의 성장을 위한 건축 생산성 로드맵을 발표한 바 있으며, 이를 뒷받침하기 위한 기술적 추진 수단으로 BIM 도입을 핵심 전략으로 내세우고 있음.

○ 싱가포르건설성에서는 2015년까지 BIM을 전략적으로 도입하는 것을 장려하기 위해 "5 years plan for BIM adoption"을 발표하고 5가지 로드맵을 제시함

<표 6.1.2> 싱가폴 BIM 로드맵

로드맵	관련 내용
Public sector taking the lead (공공부문에서 선도할 것)	• BIM E-Submission system 구축
Promoting success stories (성공사례를 홍보할 것)	• Skilled Builder Competition 개최 • BIM Competition 개최 • Build Smart Conference 개최 • BuildTech Asis Exhibition 개최 • Build Smart Site Tour 시행
Removing impediments (장애요인을 제거할 것)	• BIM E-Submission template 구축 • Architectural design object library 구축 • M&E component library 구축
Building BIM capability and capacity (BIM 수행 능력을 키울 것)	• BCA Academy 시행
Incentiving BIM adopters (BIM 도입 회사에 인센티브를 지급할 것)	• BIM Fund 지원

4. 핀란드, 덴마크

○ 핀란드에서는 정부 산하 시설물, 핀란드에서는 정부 산하 시설물, 공공 부동산관리(Senate Properties) 분야에 2007년 10월부터 개방형 BIM 표준 납품을 의무화 하고 있음. 이를 위하여 설계 및 시공 프로세스에서 의사결정을 향상시키기 위해 BIM을 이용한 요구 및 유통 정보에 대한 모델링 지침 제공을 주요 목적으로 정부 산하 공공 회사인 Senate Properties에 의해 업무 분야별 BIM 모델링과 요구조건(요구 및 유통정보)들을 수록하고 있으며, 9권의 지침을 발간하였음.

○ 또한 덴마크에서는 2006년 3D CAD Manual을 발간하여 Digital Construction 프로젝트에서 공공공사 분야 BIM 채택과 IFC 포맷 납품을 활성화 하고자 하였으며 그 내용에는 BIM 데이터의 조달을 위한 작성(모델링) 및 납품 기준(데이터 타입, 데이터 납품 기준 등), 납품 폴더 체계, 시뮬레이션, 시각화, 문서화 등의 지침 정보를 포함하고 있음.

제 7 장 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		O
결정 사유	- 본 과제는 교량 유지관리단계에 활용 가능한 BIM 기반 이력 데이터 관리 시스템을 구축하는 연구로써 다양한 교량 유지관리 및 BIM 분야의 전문가들과 공유해야 할 필요가 있음 - 국방 또는 안보관련 기술로 전용 가능한 연구가 아님	

제 8 장 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호

※ 해당 없음

제 9 장 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

※해당 없음

제 10 장 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	BIM 활용을 위한 교량 구조물의 유지관리 항목도출 및 분석	고려대학교	주저자	한국방재학회	-	2017.05.29	단독사사	-
2	논문	강박스 거더의 단면 형상비가 단면의 뒤틀림과 중간 다이아프램 간격에 미치는 영향	고려대학교	주저자	한국강구조학회	-	2018.12.28	중복사사	-
3	논문	교량 유지관리의 BIM 적용을 위한 통합 정보체계 구축 연구	고려대학교	주저자	한국방재학회	-	2019.03.06	단독사사	-
4	논문	딥러닝 기반 교량 손상추정을 위한 Generative Adversarial	인하대학교	주저자	한국BIM학회	-	2019.04.01	단독사사	-

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
		Network를 이용한 가속도 데이터 생성 모델							
5	학술 발표 논문	교량 구조물 안전진단 및 유지관리 BIM 적용 연구	고려대학교	주저자	2016년 한국구조물진단유지관리공학회 학술발표대회	-	2016.10.13	단독사사	-
6	학술 발표 논문	BIM기반 Modeling의 LOD 선정 연구	고려대학교	주저자	2016년 한국구조물진단유지관리공학회 학술발표대회	-	2016.10.13	단독사사	-
7	학술 발표 논문	BIM 적용을 위한 안전진단 및 유지관리 절차 표준화 연구	고려대학교고려대학교	주저자	2017 한국복합신소재구조학회 학술발표회	-	2017.04.20	단독사사	-
8	학술 발표 논문	BIM 활용을 통한 교량구조물의 유지관리 시 프로그램 호환연구	고려대학교	주저자	2017 대한토목학회 정기학술대회	-	2017.10.19	단독사사	-
9	학술 발표 논문	수평곡선 I-형보의 플랜지 국부좌굴에 대한 탄성좌굴계수 연구	고려대학교	주저자	2017 대한토목학회 정기학술대회	-	2017.10.20	단독사사	-
10	학술 발표 논문	Convolution Neural Network를 이용한 노후교량의 균열 위치 파악 방법론	인하대학교	주저자	2017 대한토목학회 정기학술대회	-	2017.10.20	단독사사	-
11	학술 발표 논문	A Study on Shear Buckling of a Curved Rectangular Plate	고려대학교	주저자	The 9th International Symposium on Steel Structures	-	2017.11.03	단독사사	-
12	학술 발표 논문	교대 형식 라멘교에 대한 손상 예측 시스템 개발	고려대학교	주저자	2018년 한국복합신소재구조학회 학술발표회	-	2018.04.19	단독사사	-
13	학술	교량 구조물의	고려대	주저자	2018년	-	2018.04.20	단독사사	-

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
	발표 논문	유지관리를 위한 가치평가 시스템 개발	학교		한국복합신소재구조학회 학술발표회				
14	학술 발표 논문	부유식 초장대케이블지지교량의 계류선 배치에 따른 정적 거동특성분석	고려대학교	주저자	2018년 한국복합신소재구조학회 학술발표회	-	2018.04.20	단독사사	-
15	학술 발표 논문	무도상교량의 내진해석을 통한 지진영향 및 장대레일 부가응력검토	고려대학교	주저자	2019년 한국복합신소재구조학회 학술발표회	-	2019.04.25	단독사사	-
16	특허 출원	파라메틱기반 BIM라이브러리 모듈에 의한 교량 설계 자동화 구축 방법	고려대학교	출원인	대한민국	-	2018.03.20. (출원일)	단독사사	-
17	특허 출원	CNN을 이용한 교량 구조물 손상추정기법의 개발을 위한 시뮬레이션 데이터 처리 방법	인하대학교	출원인	대한민국	-	2018.01.12. (출원일)	단독사사	-
18	S/W 등록	교대 형식 라멘교에 대한 아바쿠스 입력 파일(Abaqus Input File) 자동 생성 프로그램	고려대학교	저작자	대한민국	-	2018.02.23	단독사사	-
19	S/W 등록	라멘교 동해석 빅데이터 생성 프로그램	고려대학교	저작자	대한민국	-	2019.04.01	단독사사	-
20	S/W 등록	Web(웹)기반 유지및관리 이력데이터관리 프로그램	고려대학교	저작자	대한민국	-	2019.04.26	단독사사	-
21	S/W 등록	교량손상위치추정	인하대학교	저작자	대한민국	-	2019.04.01	단독사사	-

제 11 장 기타 사항

제 12 장 참고 문헌

[1] 공병승, 황대형 (2006) 케이블 교량의 시공 중 계측시스템에 관한 연구, 건설환경연구, Vol.5, No.1, 35-44

[2] 국토교통부 (2017) 도로 교량 및 터널 현황조서

[3] 국토교통부 (2018) 도로 교량 및 터널 현황조서

[4] 권성준, 박상순, 이상민 (2006) 신뢰성 해석을 통한 탄산화에 노출된 타설이음부 및 균열부 콘크리트의 내구수명 평가, 한국콘크리트학회 학술대회 논문집

[5] 권성준 (2007) 국내 도심지 콘크리트 교각 취약부의 탄산화 조사에 대한 연구, 한국구조물진단유지관리공학회 논문집, Vol.11, No.3, pp.116-122

[6] 권성준 (2016) 시간의존성 균열 패턴을 고려한 탄산화에 노출된 콘크리트의 확률론적 내구수명 평가, 한국건설순환자원학회 논문집, Vol.4, No.1, pp.10-18

[7] 김이두, 정연석, "건물정보모델링 기술의 실무적용 사례", 한국전산구조공학회 전산구조공학 제 20권 제1호, 2007.3, pp29~36

[8] 김정섭, 김성환, 한진태, 김명모 (2007) 수치해석을 통한 교대 뒤채움부의 침하 개선 방안 연구, 2007 대한토목학회 정기학술대회, pp.941-944

[9] 나석천 (2013), IFC-BIM 기반 강거더교의 부재 식별을 통한 유지관리정보 활용 방법, 연세대학교 석사학위논문.

[10] 박경훈, 이상윤, 김정호, 조효남, 공정식. (2008) 생애주기분석을 통한 강교량 시스템수준의 유지관리 전략. 한국강구조학회 논문집, Vol.20, No.2, pp.259-268

[11] 박연수, 우정하, 전양배, 김용록, 김동현. (2003) 신뢰성 지수를 이용한 교량 구조물의 건설진동 예측에 관한 연구. 한국소음진동공학회 학술대회논문집, pp.442-449

[12] 박연수, 한석열, 강대홍, 서병철. (2004) 확률적인 응력-수명 방법에 의한 강교 부재의 피로신뢰성 평가. 대한토목학회논문집 A, Vol.24, No.3A, pp.593-602

[13] 박종칠, 박찬민, 송필용 (2004) 계측자료를 이용한 서해대교 사장교 구간의 구조거동 평가, 대한토목학회논문집 A, Vol.24, No.2A, 249-257

[14] 박철우, 이민재, 박경훈, 선종완, 이동렬, 김지원, '도로시설물의 효율적인 유지관리를 위한 자산관리 기법 도입 제안', 한국구조물진단유지관리공학회, 구조물진단학회지 제15권 제1호 통권 65호,2011.1

[15] 빌딩스마트 협회 (2016) Module 31. BIM 라이브러리 제작 기준

[16] 서울특별시 도시기반시설본부(2008), "난지도 하늘다리 설치 기본설계 유지관리지침서"

[17] 선종완, 박경훈, 이민재, 박철우, '교량 자산관리의 서비스수준 결정을 위한 성능척도 개발에 관한 기초연구', 한국건설관리학회, 한국건설관리학회 논문집, v.12 n2, 2011.03

[18] 심창수, 이광명 (2009) 토목분야 BIM 기반 3차원 설계 가이드라인, 대한토목학회지 기술기사, Vol.51, No.11, pp.56-65

[19] 심창수, 김성욱, 송현혜, 윤누리 (2011), 지하철 구조물 유지관리 시스템을 위한 BIM 개발, 한국BIM학회 논문집, Vol.1 No.1, pp. 6-12.

[20] 심현보, 안기용 (2011) 염해 환경과 보수된 콘크리트 구조물의 사용수명 예측 및 보수 비용 평가, 구조물진단학회지 Vol.15, No.1

[21] 양영순, 이재옥, 김판영. (1996) 응답면 기법을 이용한 구조 신뢰성 해석. 대한조선학회 논문집, Vol.33, No.1, pp.98-108

[22] 엄준식. (2014) LRFD 설계를 위한 교대의 신뢰성 해석 모델. 한국지반공학회논문집, Vol.30, No.8, pp.5-11.

[23] 유충식 (2010) 보강토 교대 구조물의 하중지지 특성에 관한 3차원 유한요소해석, 한국지반공학회 논문집, Vol.26, No.5, pp.15-26

[24] 이민재, 박경훈, 박철우, 선종완, 이동열, '교량 자산관리를 위한 가치평가방법 및 체계수립에 관한 연구', 한국건설관리학회 논문집, 제11권, 제6호, 2010.11

[25] 이창수, 박종혁, 김영욱 (2010) 열화물 고정화를 고려한 철근 콘크리트 구조물의 내구수명 예측,

한국방재학회 논문집 Vol.10, pp.15-22
[26] 이철규, 주기범, 김태학 (2004), 체계적 시설물 유지관리를 위한 정보관리 모델 및 시스템 구축, 대한토목학회논문집, Vol. 24, No. 5D, pp. 777-786
[27] 이학수, 권성준 (2017) 균등 표면 염화물량을 고려한 시간 의존적 내구적 파괴확률 해석기법, 한국구조물진단유지관리공학회 논문집, Vol.21, No.2, pp.46-52
[28] 정성윤, 최원식, 김우제, '계층적 분석기법을 이용한 도로시설 자산관리정보시스템 평가에 관한 연구', 대한토목학회, 대한토목학회 논문집 제30권 제 6 D호, 2010.11
[29] 정평기, 지승구, 서종원 (2005) 교량구조물의 확률적 생애주기비용 및 가치분석 방법론, 대한토목학회논문집
[30] 정형준 (2010) 콘크리트 구조물의 확률론적 탄산화 예측 모델 개발 및 내구성 해석, 대한토목학회 논문집
[31] 정형준, 김규선 (2010) 확률론적 기법을 이용한 탄산화 RC 구조물의 내구성 예측, 한국구조물진단유지관리공학회 논문집, Vol.14, No.5, pp.119-127
[32] 조태준, 김이현, 조효남. (2008) 선형 적응적 가중 응답면기법에 의한 현수교의 위험도 분석. 한국강구조학회 논문집, Vol.20, No.1, pp.93-104.
[33] 조태준, 김이현, 조효남 (2008) 콘크리트구조물의 반복적 동결융해에 대한 수치 해석적 열화 예측 및 신뢰성 모델 개발, 콘크리트학회 논문집, Vol.21, No.1, pp.13-22
[34] 조효남, 김인섭. (1991) 교량구조의 체계 신뢰성 해석을 위한 중요도 표본추출 기법. 한국전산구조공학회 논문집, Vol.4, No.2, pp.119-129
[35] 중앙대학교 (2017) BIM기반 특수교량 유지관리를 위한 표준기술 개발 및 실증 연구
[36] 최진웅, 박민석, 김변화 (2017) "등가손상지수와 WIM 데이터를 이용한 잔존 피로수명 예측: 1.간편한 피로수명 평가법 제안, 한국방재학회 논문집 Vol.17, pp.47-52
[37] 한국건설기술연구원 (2007) 건설정보분류체계 매뉴얼
[38] 한국건설기술연구원 (2009) 교량의 성능 및 사용효율 증대를 위한 자산관리 기법 개발, 한국건설기술연구원
[39] 한국건설기술연구원 (2017) 사회기반시설의 성능중심 관리·운영을 위한 한국형 성능등급 산정기술 개발 최종보고서
[40] 한국건설기술연구원 (2017) 시설물 유형별 성능중심 평가 매뉴얼(안) -교량편-
[41] 한국도로공사(2008), 교량상태등급 변화모델 구축을 위한 부재별 LCP 개발
[42] 한국도로공사(2012), 선진구조물 자산관리 체계 연구, 연차보고서
[43] 한국시설안전공단 (2011) 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침 해설서(공통편)
[44] 한국시설안전공단 (2013) 정밀점검 및 정밀안전진단 평가 매뉴얼
[45] 한국시설안전공단 (2014) 교량 유지관리 매뉴얼
[46] 한국시설안전공단 (2017) 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침
[47] 한국시설안전공단 (2018) 시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침(성능평가 편)
[48] 허정원. (2003) 실제 구조물의 유한요소 신뢰성해석을 위한 복합 알고리즘. 대한토목학회논문집 A, Vol.23, No.6A, pp.1321-1329
[49] Addor M. R. A. and Santos E. T., BIM DesignCoordination Room Infrastructure: Assessment ofCommunication Activities, In Computing in Civiland Building Engineering, pages 1-8, Orlando,Florida, 2014
[50] AASHTO (2010) AASHTO Bridge Element Inspection Guide Manual, 1st Editon
[51] AASHTO (2011) The Manual For Bridge Evaluation, 2nd Editon
[52] AASHTO (2013) Manual for Bridge Element Inspection
[53] ACI Commitee 224(2001), Control of Cracking in Concrete Structures, ACI 224R
[54] AIA (2008), AIA Document E202, American Institute of Architects.
[55] Arthaud, G. and Lebegue, E. (2007) IFC-Bridge V2 data model-Edition R7. IAI
[56] Azadeh Bozorgzadeh (2007) Effect of Structure Backfill on Stiffness and Capacity of Bridge Abutments, Dissertation of Doctor Degree, California University, San Diego

[57] ASCE (2013). 2013 Report Card for America's Infrastructure: Bridges.
[58] Chong Y.H., Lopez R., Wang J., Wang X. andZhao Z., Comparative Analysis on the Adoptionand Use of BIM in Road Infrastructure Projects,Journal of Management in Engineering, 2016.
[59] Courtney Moran, 2018, 11 FREE BIM SOFTWARE TOOLS TO CONSIDER, G2CROWD
[60] Department for Transport(2012), Guidance on Road Classfication and the Primary Route Network. UK.
[61] Department for Transport and Highways Agency (2014). Maintaining Strategic Infrastructure: Roads.
[62] Deng, L., and Cai, C. S. (2009) Bridge model updating using response surface method and genetic algorithm. Journal of Bridge Engineering, Vol.15, No.5, pp.553-564
[63] Domingos, P (2016) Master Algorithm, Penguin Books
[64] Estes, A. C., and Frangopol, D. M. (2003) Updating bridge reliability based on bridge management systems visual inspection results. Journal of Bridge Engineering, Vol.8, No.6, pp.374-382
[65] Eyedea Recognition (accessed 2017.11.01.) "http://www.eyedea.cz/make-and-model-recognition/"
[66] FHWA, 'Asset Management : Advancing the State of the Art into the 21'st Century Through Public-Private Dialogue', Publ.No. FHWA-RD-97-046-, D.C., 1997
[67] FHWA (2012) Bridge Inspector's Reference Manual
[68] Frangopol, D. M., Strauss, A., and Kim, S. (2008) Bridge reliability assessment based on monitoring. Journal of Bridge Engineering, Vol.13, No.3, pp.258-270.
[69] Hampshire County Council (2015). Inspection of Highway Structures. [Online]. 26 June 2015
[70] Japan Construction Information Center, The KeyBase Information Station for the ConstructionIndustry to pave way for the Future, 2016.
[71] Japan Society of Civil Engineers (2007), Standard Specifications for Steel and Composite Structures.
[72] Japan Society of Civil Engineers (2007), Standard Specifications for Concrete Structures-2007 "Maintenance"
[73] Japan Bridge & Structure institute Inc. Dainichi Consultant Inc and LandTec Japan.Inc (2012), Data collection survey on primary bridges on national roads and maintenance system of bridges Report
[74] Kim, C.Y., Moon, H.S., Nah, H.S., Kim, J.U.(2014), Case study of Civil Engineering BIM Projects, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society Vol. 15, No. 12 pp. 7430-7437
[75] Kim, B.-G. (2010) Integration of a 3-D bridge model and structured information of engineering documents. Ph. D. Dissertation, Yonsei University
[76] Kong, J. S. and Dan, M. F. (2003) Life-Cycle Reliability-Based Maintenance Cost Optimization of Deteriorating Structures with Emphasis on Bridges, Journal of Structural Engineering Vo.129, No.6, pp.818-828
[77] Lantz, B. (2013) Machine learning with R. Packt Publishing Ltd., pp.123
[78] Lantz, B. (2013) Machine learning with R. Packt Publishing Ltd., pp.273-276
[79] Lee, S.-H. and Kim, B.-G. (2011), IFC extension for road structures and digital modeling. Procedia Engineering, Vol. 14, No. 0, pp. 1037-1042.
[80] Lee, G., Eastman, C.M., and Sacks, R. (2006), Specifying paramteric building
[81] Liu, M., and Frangopol, D. M. (2005) Multiobjective maintenance planning optimization for deteriorating bridges considering condition, safety, and life-cycle cost. Journal of Structural Engineering, Vol.131, No.5, pp.833-842

[82] London Bridges Engineering Group (2010). Bridge Condition Indicators Project.
[83] Micro-Measurements, V. (2007) Strain gage selection: criteria, procedures, recommendations. Online document.
[84] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2010), Architecture BIM Application Guide
[85] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2014), Research on BIM Technology Trend and Introduction of Road Sector
[86] NIBS National BIM Standard Project Committee, "Overview Building Information Models", 2006
[87] National Asset Management Steering Committee(NAMS),International Infrastructure Management Manual(IIMM), 2006
[88] Ntotsios, E., Papadimitriou, C., Panetsos, P., Karaiskos, G., Perros, K., and Perdikaris, P. C. (2009) Bridge health monitoring system based on vibration measurements. Bulletin of Earthquake Engineering, Vol.7, No.2, pp.469
[89] Object behavior (BOB) for a building information modeling system Automation in Construction, Vol. 15, No. 6, pp. 758-776.
[90] Olsson, T., and Magnusson, K. (2016) Training Artificial Neural Networks with Genetic Algorithms for Stock Forecasting: A comparative study between genetic algorithms and the backpropagation of errors algorithms for predicting stock prices.
[91] Peng-Fei Li, Yuan-Feng Wang, Bao-Dong Liu, and Li Su (2014) Damping Properties of Highway Bridges in China, J. Bridge Eng., Vol.19, No.5, pp.04014005-1-04014005-10
[92] REUTERS, 2019, Building Information Modelling (BIM) Market 2019-2023: Global Trends, Sales Revenue, Grow Pricing, Regional Study and Industry Growth
[93] Seo, J.-C. and Kim, I.-H. (2009), Industry foundation classes-based approach for managing and using the design model and planning information in the architectural design, J ournal of Asian Architecture and Building Engineering, Vol. 8, No. 2, pp. 431-438.
[94] Shimonti Paul, 2018, 10 upcoming trends in BIM - What more to expect in 2018, Geospatial World
[95] Stewart, M. G. (2001) Reliability-Based Assessment of Ageing Bridges Using Risk Ranking and Life Cycle Cost Decision Analyses, Reliability Engineering & System Safety, Vol.74, No.3, pp.263-273
[96] Taigman, Y., Yang, M., Ranzato, M. A., and Wolf, L. (2014) Deepface: Closing the gap to human-level performance in face verification. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.1701-1708
[97] US Department of Transportation, Federal Highway Administration (2012), Bridge Inspector's Reference Manual, Publication No. FHWA NHI 12-049
[98] Woo, S.K. and Yun L. (2014) Probabilistic Estimation of Service Life of Box Culvert for Power Transmission Considering Carbonation and Crack Effect, 한국구조물진단유지관리학회 논문집, Vol.18, No.6, pp.30-40
[99] Val, D. V., Stewart, M. G., and Melchers, R. E. (1998) Effect of reinforcement corrosion on reliability of highway bridges. Engineering structures, Vol.20, No.11, pp.1010-1019
[100] Virtual Construction Research Center (2010), BIM Application Design Guideline-3D architectural Design Guidelines Volume 1 [Version 2.0]

<부록> 안전진단 결과, 잔존수명, 가치평가 산정 예시

1. 안전진단 결과(정기점검, 정밀점검, 정밀안전진단)

가. 상태평가

○ 상태평가 부재 및 점검단위별 등급

부재 분류	상부구조		2차 부재	기타부재				받침	하부구조		내구성 평가			
점검 단위	바닥판	거더	가로보 세로보	포장	배수	난간 연석	신축 이음	교량 받침	하부	기초	탄산화 (상부)	탄산화 (하부)	염화물 (상부)	염화물 (하부)
S01	C	B	A	A	B	B	C				A		B	
S02	A	B	A	A	B	C	D				B		B	
S03	C	A	B	A	A	B	D				C		D	
A01								A	B	B		A		B
P01								B	B	C		B		C
P02								C	C	B		B		B
P03								A	A	B		B		B
A02								B	A	B		C		B
평균														
가중치														
환산 결함도 점수														
상태평가 결과														

○ 각 부재별 평균 결함도 지수 산정

부재 분류	상부구조		2차 부재	기타부재				받침	하부구조		내구성 평가			
점검 단위	바닥판	거더	가로보 세로보	포장	배수	난간 연석	신축 이음	교량 받침	하부	기초	탄산화 (상부)	탄산화 (하부)	염화물 (상부)	염화물 (하부)
S01	0.4	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.4	0.4			0.1		0.2	
S02	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.7	0.7			0.2		0.2	
S03	0.4	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.7	0.7			0.4		0.7	
A01									0.1	0.2		0.1		0.2
P01									0.2	0.2		0.2		0.4
P02									0.4	0.4		0.2		0.2
P03									0.1	0.1		0.2		0.2
A02									0.2	0.1		0.4		0.2
평균	**0.3**	**0.17**	**0.13**	**0.1**	**0.17**	**0.27**	**0.6**	**0.2**	**0.2**	**0.24**	**0.23**	**0.22**	**0.37**	**0.24**
가중치														
환산 결함도 점수														
상태평가 결과														

- 손상 등급에 따른 결함도 지수

등급	A	B	C	D	E
결함도 지수	0.1	0.2	0.4	0.7	1.0

- 평균 결함도 지수 산정식 : (∑점검단위별부재결함도지수)/(점검단위개수)

○ 환산 결함도 점수 및 상태평가 등급 산정

- 환산 결함도 점수 : $[\sum(\text{평균}) \times (\text{가중치})]/100$
- 결함도 점수 범위에 따른 등급

등급	A	B	C	D	E
결함도 지수	$0 \leq X < 0.13$	$0.13 \leq X < 0.26$	$0.26 \leq X < 0.49$	$0.49 \leq X < 0.79$	$0.79 \leq X$

부재 분류	상부구조		2차 부재	기타부재				받침	하부구조		내구성 평가			
점검 단위	바닥판	거더	가로보 세로보	포장	배수	난간 연석	신축 이음	교량 받침	하부	기초	탄산화 (상부)	탄산화 (하부)	염화물 (상부)	염화물 (하부)
S01	0.4	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.4	0.4			0.1		0.2	
S02	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.7	0.7			0.2		0.2	
S03	0.4	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.7	0.7			0.4		0.7	
A01									0.1	0.2		0.1		0.2
P01									0.2	0.2		0.2		0.4
P02									0.4	0.4		0.2		0.2
P03									0.1	0.1		0.2		0.2
A02									0.2	0.1		0.4		0.2
평균	0.3	0.17	0.13	0.1	0.17	0.27	0.6	0.2	0.2	0.24	0.23	0.22	0.37	0.24
가중치	**18**	**20**	**5**	**7**	**3**	**2**	**10**	**9**	**13**	**7**	**2**	**2**	**2**	**1**
환산 결함도 점수													**0.25**	
상태평가 결과													**B**	

나. 종합평가

○ 종합평가 결과 산정

- 종합평가 산정식 : min(상태평가등급, 안전성평가등급)

교량명	상태평가		안전성 평가		종합평가 등급
	결함도 점수	등급	최소 안전율	등급	
STB교	0.25	B	1.12	A	**B**

2. 안전진단 결과(성능평가)

가. 상태적 안전성 평가

○ 상태평가 부재 및 점검단위별 등급

부재 분류	상부구조		2차 부재	기타부재				받침	하부구조	
점검 단위	바닥판	거더	가로보세로보	포장	배수	난간 연석	신축 이음	교량 받침	하부	기초
S01	C	B	A	A	B	B	C			
S02	A	B	A	A	B	C	D			
S03	C	A	B	A	A	B	D			
A01								A	B	B
P01								B	B	C
P02								C	C	B
P03								A	A	B
A02								B	A	B
평균										
가중치										
환산 결함도 점수										
상태평가 결과										

○ 각 부재별 평균 결함도 지수 산정

부재 분류	상부구조		2차 부재	기타부재				받침	하부구조	
점검 단위	바닥판	거더	가로보세로보	포장	배수	난간 연석	신축 이음	교량 받침	하부	기초
S01	0.4	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.4	0.4		
S02	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.7	0.7		
S03	0.4	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.7	0.7		
A01									0.1	0.2
P01									0.2	0.2
P02									0.4	0.4
P03									0.1	0.1
A02									0.2	0.1
평균	**0.3**	**0.17**	**0.13**	**0.1**	**0.17**	**0.27**	**0.6**	**0.2**	**0.2**	**0.24**
가중치										
환산 결함도 점수										
상태평가 결과										

- 손상 등급에 따른 결함도 지수

등급	A	B	C	D	E
결함도 지수	0.1	0.2	0.4	0.7	1.0

- 평균 결함도 지수 산정식 : (∑점검단위별부재결함도지수)/(점검단위개수)

○ 환산 결함도 점수 및 상태평가 등급 산정

- 환산 결함도 점수 : $[\sum(\text{평균}) \times (\text{가중치})]/100$
- 결함도 점수 범위에 따른 등급

등급	A	B	C	D	E
결함도 지수	$0 \leq X < 0.13$	$0.13 \leq X < 0.26$	$0.26 \leq X < 0.49$	$0.49 \leq X < 0.79$	$0.79 \leq X$

부재 분류	상부구조		2차 부재	기타부재				받침	하부구조	
점검 단위	바닥판	거더	가로보세로보	포장	배수	난간 연석	신축 이음	교량 받침	하부	기초
S01	0.4	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.4	0.4		
S02	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.7	0.7		
S03	0.4	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.7	0.7		
A01									0.1	0.2
P01									0.2	0.2
P02									0.4	0.4
P03									0.1	0.1
A02									0.2	0.1
평균	0.3	0.17	0.13	0.1	0.17	0.27	0.6	0.2	0.2	0.24
가중치	**15**	**25**	**4**	**4**	**3**	**2**	**7**	**15**	**13**	**12**
환산 결함도 점수									**0.23**	
상태평가 결과									**B**	

나. 구조 안전성 평가

○ 구조 안전성 평가 결과 산정

항목	항목별 등급	결함도 지수	결함도 점수	등급
안전율	A	**0.12**	**0.48**	**C**
세굴심	C	**0.25**		
기초안전성	B	**0.48**		

- 구조 안전성 등급별 결함도 지수

등급	A	B	C	D	E
결함도 지수	0.12	0.25	0.48	0.78	0.99

- 결함도 점수에 따른 등급

등급	A	B	C	D	E
결함도 지수	$0 \leq X < 0.13$	$0.13 \leq X < 0.26$	$0.26 \leq X < 0.49$	$0.49 \leq X < 0.79$	$0.79 \leq X$

- 구조 안전성 결함도 점수 산정식 : Min(안전율,세굴심,기초안전성)

다. 내구성(강재) 평가

○ 내구성(강재) 항목 및 부재단위별 등급

부재의 분류		상부구조								2차부재				하부구조			
점검 단위	구조 형식	바닥판				거더				가로보/세로보				교각/교대			
		도장 열화	도장 두께	대기 환경	강설 횟수	도장 열화	도장 두께	대기 환경	강설 횟수	도장 열화	도장 두께	대기 환경	강설 횟수	도장 열화	도장 두께	대기 환경	강설 횟수
S01	PSCI	C	B	A	A	A	B	A	A	B	C	A	A				
S02	PSCI	A	B	A	A	B	B	A	A	B	C	A	A				
S03	PSCI	C	A	B	A	A	B	A	A	B	B	A	A				
A01	T																
P01	역T																
P02	약T																
A02	T																
열화 평균																	
항목 가중치																	
부재 평균																	
부재 가중치																	
환산결함도 점수																	
강재 내구성 등급																	

○ 항목 및 점검단위별 결함도 지수 변환 및 열화 평균 산정

- 손상 등급에 따른 결함도 지수

등급	A	B	C	D	E
결함도 지수	0.1	0.2	0.4	0.7	1.0

- 열화 평균 결함도 지수 산정식 : $(\sum$점검단위별항목결함도지수$)/($점검단위개수$)$

부재의 분류		상부구조								2차부재				하부구조			
점검 단위	구조 형식	바닥판				거더				가로보/세로보				교각/교대			
		도장 열화	도장 두께	대기 환경	강설 횟수	도장 열화	도장 두께	대기 환경	강설 횟수	도장 열화	도장 두께	대기 환경	강설 횟수	도장 열화	도장 두께	대기 환경	강설 횟수
S01	PSCI	0.4	0.2	0.4	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.4	0.1	0.1				

S02	PSCI	0.1	0.2	0.4	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.4	0.1	0.1				
S03	PSCI	0.4	0.4	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1				
A01	T																
P01	역T																
P02	약T																
A02	T																
열화 평균		**0.3**	**0.17**	**0.13**	**0.1**	**0.13**	**0.2**	**0.1**	**0.1**	**0.2**	**0.33**	**0.1**	**0.1**				
항목 가중치																	
부재 평균																	
부재 가중치																	
환산결함도 점수																	
강재 내구성 등급																	

○ 환산결함도 점수 및 강재 내구성 등급 산정

- 부재 평균 결함도 지수 산정식 : $\sum$(열화평균×항목가중치)/100
- 환산결함도 점수 산정식 : $\sum$(부재평균×부재가중치)/100
- 결함도 점수에 따른 등급

등급	A	B	C	D	E
결함도 지수	$0 \leq X < 0.13$	$0.13 \leq X < 0.26$	$0.26 \leq X < 0.49$	$0.49 \leq X < 0.79$	$0.79 \leq X$

부재의 분류		상부구조								2차부재				하부구조			
점검 단위	구조 형식	바닥판				거더				가로보/세로보				교각/교대			
		도장 열화	도장 두께	대기 환경	강설 횟수	도장 열화	도장 두께	대기 환경	강설 횟수	도장 열화	도장 두께	대기 환경	강설 횟수	도장 열화	도장 두께	대기 환경	강설 횟수
S01	PSCI	0.4	0.2	0.4	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.4	0.1	0.1				
S02	PSCI	0.1	0.2	0.4	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.4	0.1	0.1				
S03	PSCI	0.4	0.4	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1				
A01	T																
P01	역T																
P02	약T																
A02	T																
열화 평균		0.3	0.17	0.13	0.1	0.13	0.2	0.1	0.1	0.2	0.33	0.1	0.1				
항목 가중치		**60**	**20**	**10**	**10**	**60**	**20**	**10**	**10**	**60**	**20**	**10**	**10**				
부재 평균		**0.24**				**0.14**				**0.21**							
부재 가중치		**27**				**55**				**18**							
환산결함도 점수														**0.18**			
강재 내구성 등급														**B**			

라. 내구성(콘크리트) 평가

○ 내구성(콘크리트) 항목 및 부재단위별 등급

부재의 분류		상부구조						2차부재			하부구조		
점검 단위	구조 형식	바닥판			거더			가로보/세로보			교각/교대		
		탄산화 깊이	염화물 침투량	피복콘 크리트 품질	탄산화 깊이	염화물 침투량	피복콘 크리트 품질	탄산화 깊이	염화물 침투량	피복콘 크리트 품질	탄산화 깊이	염화물 침투량	피복콘 크리트 품질
S01	PSCI	C	B	A									
S02	PSCI	A	B	A									
S03	PSCI	C	A	B									
A01	T										A	B	A
P01	역T										B	C	A
P02	악T										A	A	A
A02	T										B	A	A
열화 평균													
항목 가중치													
부재 평균													
부재 가중치													
환산결함도 점수													
강재 내구성 등급													

○ 항목 및 점검단위별 결함도 지수 변환 및 열화 평균 산정

- 손상 등급에 따른 결함도 지수

등급	A	B	C	D	E
결함도 지수	0.1	0.2	0.4	0.7	1.0

- 열화 평균 결함도 지수 산정식 : $(\sum$점검단위별항목결함도지수$)/($점검단위개수$)$

부재의 분류		상부구조						2차부재			하부구조		
점검 단위	구조 형식	바닥판			거더			가로보/세로보			교각/교대		
		탄산화 깊이	염화물 침투량	피복콘 크리트 품질	탄산화 깊이	염화물 침투량	피복콘 크리트 품질	탄산화 깊이	염화물 침투량	피복콘 크리트 품질	탄산화 깊이	염화물 침투량	피복콘 크리트 품질
S01	PSCI	0.4	0.2	0.1									
S02	PSCI	0.1	0.2	0.1									
S03	PSCI	0.4	0.1	0.2									
A01	T										0.1	0.2	0.1
P01	역T										0.2	0.4	0.1
P02	악T										0.1	0.1	0.1

A02	T									0.2	0.1	0.1
열화 평균		**0.3**	**0.17**	**0.13**						**0.16**	**0.2**	**0.1**
부재 평균												
부재 가중치												
환산결함도 점수												
강재 내구성 등급												

○ 환산결함도 점수 및 콘크리트 내구성 등급 산정

- 부재 평균 결함도 지수 산정식 : $(\sum$열화평균$)/($열화개수$)$
- 환산결함도 점수 산정식 : $\sum$(부재평균×부재가중치)/100
- 결함도 점수에 따른 등급

등급	A	B	C	D	E
결함도 지수	$0 \leq X < 0.13$	$0.13 \leq X < 0.26$	$0.26 \leq X < 0.49$	$0.49 \leq X < 0.79$	$0.79 \leq X$

부재의 분류		상부구조						2차부재			하부구조		
점검 단위	구조 형식	바닥판			거더			가로보/세로보			교각/교대		
		탄산화 깊이	염화물 침투량	피복콘 크리트 품질	탄산화 깊이	염화물 침투량	피복콘 크리트 품질	탄산화 깊이	염화물 침투량	피복콘 크리트 품질	탄산화 깊이	염화물 침투량	피복콘 크리트 품질
S01	PSCI	0.4	0.2	0.1									
S02	PSCI	0.1	0.2	0.1									
S03	PSCI	0.4	0.1	0.2									
A01	T										0.1	0.2	0.1
P01	역T										0.2	0.4	0.1
P02	역T										0.1	0.1	0.1
A02	T										0.2	0.1	0.1
열화 평균		0.3	0.17	0.13							0.16	0.2	0.1
부재 평균		**0.2**									**0.15**		
부재 가중치		**55**			**0**			**0**			**45**		
환산결함도 점수											**0.18**		
강재 내구성 등급											**B**		

마. 종합성능 평가

○ 결함도 점수 및 등급 정의

- 손상 등급에 따른 결함도 지수

등급	A	B	C	D	E
결함도 지수	0.1	0.2	0.4	0.7	1.0

- 결함도 점수에 따른 등급

등급	A	B	C	D	E
결함도 지수	$0 \leq X < 0.13$	$0.13 \leq X < 0.26$	$0.26 \leq X < 0.49$	$0.49 \leq X < 0.79$	$0.79 \leq X$

- 안전성능, 내구성능, 사용성능, 종합성능 평가에 공통 적용

○ 안전성능 평가

- 안전성능 산정식 : Min(구조안전성,상태적안전성)

구조 안전성		상태적 안전성		안전성능	
결함도 점수	등급	결함도 점수	등급	결함도 점수	등급
0.48	C	0.23	B	**0.49**	**C**

○ 내구성능 평가

- 내구성능 산정식 : $\sum$(재료별 결함도 점수×재료별 가중치)

재료	재료별 등급	결함도 점수	재료 가중치	결함도 점수	내구성능 등급
콘크리트	B	0.18	60	**0.18**	**B**
강재	B	0.18	40		

○ 사용성능 평가

- 사용성능 산정식 : $\sum$(항목별 결함도 점수(등급)×재료별 가중치)

항목	포장상태	교량조명	진동사용성	점검시설	교통량	결함도 점수	사용성능 등급
항목별 등급	A	B	B	D	C	**0.32**	**C**
가중치	24.7	15	20.2	20.6	19.5		

○ 종합성능 평가

구분	안전성능 평가		내구성능 평가		사용성능 평가		종합성능 평가	
	결함도 점수	등급	결함도 점수	등급	결함도 점수	등급	결함도 점수	등급
STB교	0.48	C	0.18	B	0.32	C	**0.4**	**C**
가중치	68		21		11			

3. 잔존수명

가. 염해(추정)

변수 값

변수	기호	값(예시)	단위
물/시멘트비	W/C	0.35	-
표면 염화물 농도	C_s	7.0	kg/m^3
초기 연화물 농도	C_i	0.3	kg/m^3
설계피복두께	x_c	100	mm
철근부 임계 염화물 농도	$C_{d,limit}$	1.2	kg/m^3
공용연수	t	16	년

수식

- $D = 10^{[4.5(W/C)^2 + 0.14(W/C) - 8.47]} \times 31536000$
- $C_{d,limit} = (C_s - C_i)\left(1 - erf\frac{0.1x_c}{\sqrt{4Dt_{limit}}}\right) + C_i$ 에서 t_{limit} 역산
- 잔존수명 $T = t_{limit} - t$

계산과정 (예시)

- $D = 10^{[4.5(0.35)^2 + 0.14(0.35) - 8.47]} \times 31536000 = 0.4257$
- $C_{d,limit} = 1.2 = (7.0 - 0.3)\left(1 - erf\frac{0.1 \times 100}{\sqrt{4 \times 0.4257 t_{limit}}}\right) + 0.3$

  $= 6.7\left(1 - erf\frac{10}{\sqrt{1.7028 t_{limit}}}\right) + 0.3$
- t_{limit} 역산 ($t_{limit} = 1 \sim$ 부터 순차적으로 대입)
  - erf(z) 값 : Excel에서 =erf[0.z] 수식으로 산정 가능
  - 오차 = $\left(\frac{C_{d,limit} - C_d}{C_{d,limit}}\right) \times 100$
  - 오차가 가장 작은 $t_{limit} = 52$ 선택

t_{limit}	C_d	오차	t_{limit}	C_d	오차	t_{limit}	C_d	오차
1	0.30	75.00%	21	0.42	64.93%	41	0.91	24.45%
2	0.30	75.00%	22	0.44	63.36%	42	0.93	22.25%
3	0.30	75.00%	23	0.46	61.69%	43	0.96	20.07%
4	0.30	75.00%	24	0.48	59.95%	44	0.99	17.89%
5	0.30	75.00%	25	0.50	58.14%	45	1.01	15.71%
6	0.30	74.99%	26	0.52	56.27%	46	1.04	13.55%
7	0.30	74.98%	27	0.55	54.34%	47	1.06	11.40%
8	0.30	74.93%	28	0.57	52.36%	48	1.09	9.25%
9	0.30	74.83%	29	0.60	50.34%	49	1.11	7.12%
10	0.30	74.66%	30	0.62	48.28%	50	1.14	5.01%
11	0.31	74.39%	31	0.65	46.19%	51	1.17	2.91%
12	0.31	74.02%	32	0.67	44.08%	52	1.19	0.82%
13	0.32	73.52%	33	0.70	41.94%	53	1.22	-1.26%
14	0.33	72.89%	34	0.72	39.78%	54	1.24	-3.31%
15	0.33	72.13%	35	0.75	37.61%	55	1.26	-5.36%
16	0.35	71.24%	36	0.77	35.43%	56	1.29	-7.38%
17	0.36	70.21%	37	0.80	33.24%	57	1.31	-9.39%
18	0.37	69.06%	38	0.83	31.04%	58	1.34	-11.39%
19	0.39	67.79%	39	0.85	28.84%	59	1.36	-13.36%
20	0.40	66.41%	40	0.88	26.64%	60	1.38	-15.32%

- 잔존수명 $T = t_{limit} - t = 52 - 16 = 36$년

나. 염해(조사)

변수 값

변수	기호	값(예시)	단위
염화물 농도	$C_d(x,t)$	3.6	kg/m^3
측정깊이	x	30	mm
공용연수	t	16	년
초기 염화물 농도	C_i	0.3	kg/m^3
표면 염화물 농도	C_s	7.0	kg/m^3
설계피복두께	x_c	100	mm
철근부 임계 염화물 농도	$C_{d,limit}$	1.2	kg/m^3

수식

- $C_d(x,t) = (C_s - C_i)\left(1 - erf\frac{0.1x}{\sqrt{4Dt}}\right) + C_i$ 에서 D 역산
- $C_{d,limit} = (C_s - C_i)\left(1 - erf\frac{0.1x_c}{\sqrt{4Dt_{limit}}}\right) + C_i$ 에서 t_{limit} 역산
- 잔존수명 $T = t_{limit} - t$

계산과정 (예시)

- $C_d(x,t) = 3.6 = (7.0-0.3)\left(1 - erf\frac{0.1\times30}{\sqrt{4D\times16}}\right) + 0.3 = 6.7\left(1 - erf\frac{3}{\sqrt{64D}}\right) + 0.3$
- D 역산 ($D = 0.01 \sim 0.01$간격으로 대입)
  - erf(z) 값 : Excel에서 =erf[0.z] 수식으로 산정 가능
  - 오차 = $\left(\frac{C_d(x,t) - C_d}{C_d(x,t)}\right)\times 100$
  - 오차가 가장 작은 $D = 0.59$ 선택

t_{limit}	C_d	오차	t_{limit}	C_d	오차	t_{limit}	C_d	오차
0.01	0.30	91.67%	0.21	1.96	45.67%	0.41	3.03	15.82%
0.02	0.30	91.63%	0.22	2.03	43.61%	0.42	3.07	14.77%
0.03	0.31	91.26%	0.23	2.10	41.64%	0.43	3.11	13.75%
0.04	0.35	90.18%	0.24	2.17	39.74%	0.44	3.14	12.76%
0.05	0.42	88.37%	0.25	2.24	37.91%	0.45	3.18	11.79%
0.06	0.50	86.01%	0.26	2.30	36.15%	0.46	3.21	10.85%
0.07	0.60	83.29%	0.27	2.36	34.45%	0.47	3.24	9.93%
0.08	0.71	80.35%	0.28	2.42	32.81%	0.48	3.27	9.03%
0.09	0.82	77.32%	0.29	2.48	31.23%	0.49	3.31	8.16%
0.1	0.93	74.26%	0.3	2.53	29.71%	0.5	3.34	7.31%
0.11	1.04	71.23%	0.31	2.58	28.23%	0.51	3.37	6.48%
0.12	1.14	68.26%	0.32	2.63	26.81%	0.52	3.40	5.67%
0.13	1.25	65.36%	0.33	2.68	25.43%	0.53	3.42	4.88%
0.14	1.35	62.56%	0.34	2.73	24.09%	0.54	3.45	4.10%
0.15	1.45	59.86%	0.35	2.78	22.80%	0.55	3.48	3.35%
0.16	1.54	57.26%	0.36	2.82	21.55%	0.56	3.51	2.61%
0.17	1.63	54.75%	0.37	2.87	20.33%	0.57	3.53	1.89%
0.18	1.72	52.34%	0.38	2.91	19.15%	0.58	3.56	1.18%
0.19	1.80	50.03%	0.39	2.95	18.01%	0.59	3.58	0.49%
0.2	1.88	47.80%	0.4	2.99	16.90%	0.6	3.61	-0.19%

- $C_{d,limit} = 1.2 = (7.0-0.3)\left(1 - erf\frac{0.1\times100}{\sqrt{4\times0.59t_{limit}}}\right) + 0.3 = 6.7\left(1 - erf\frac{10}{\sqrt{2.36t_{limit}}}\right) + 0.3$
- t_{limit} 역산 ($t_{limit} = 1 \sim$ 부터 순차적으로 대입)
  - erf(z) 값 : Excel에서 =erf[0.z] 수식으로 산정 가능
  - 오차 = $\left(\frac{C_{d,limit} - C_d}{C_{d,limit}}\right)\times 100$
  - 오차가 가장 작은 $t_{limit} = 37$ 선택

t_{limit}	C_d	오차	t_{limit}	C_d	오차	t_{limit}	C_d	오차
1	0.30	75.00%	21	0.60	50.13%	41	1.31	-9.04%
2	0.30	75.00%	22	0.63	47.26%	42	1.34	-11.80%
3	0.30	75.00%	23	0.67	44.34%	43	1.37	-14.53%

	4	0.30	75.00%	24	0.70	41.37%	44	1.41	-17.23%
	5	0.30	74.98%	25	0.74	38.37%	45	1.44	-19.90%
	6	0.30	74.90%	26	0.78	35.35%	46	1.47	-22.53%
	7	0.30	74.72%	27	0.81	32.31%	47	1.50	-25.13%
	8	0.31	74.37%	28	0.85	29.27%	48	1.53	-27.70%
	9	0.31	73.80%	29	0.89	26.22%	49	1.56	-30.23%
	10	0.32	72.99%	30	0.92	23.18%	50	1.59	-32.73%
	11	0.34	71.92%	31	0.96	20.14%	51	1.62	-35.20%
	12	0.35	70.60%	32	0.99	17.12%	52	1.65	-37.64%
	13	0.37	69.04%	33	1.03	14.12%	53	1.68	-40.04%
	14	0.39	67.25%	34	1.07	11.13%	54	1.71	-42.42%
	15	0.42	65.25%	35	1.10	8.17%	55	1.74	-44.76%
	16	0.44	63.07%	36	1.14	5.23%	56	1.76	-47.07%
	17	0.47	60.72%	37	1.17	2.32%	57	1.79	-49.35%
	18	0.50	58.24%	38	1.21	-0.57%	58	1.82	-51.60%
	19	0.53	55.63%	39	1.24	-3.42%	59	1.85	-53.82%
	20	0.56	52.92%	40	1.27	-6.25%	60	1.87	-56.01%
	• 잔존수명 $T = t_{limit} - t = 37 - 16 = 21$년								

다. 탄산화(추정)

	변수	기호	값(예시)	단위
변수 값	환경영향계수	R	1.6	-
	공용연수	t	16	년
	설계피복두께	x_c	100	mm
	물/결합재비	W/B	0.47	-
수식	• 잔존수명 $T = \left[\frac{x_c}{R(-3.57+9.0\,W/B)}\right]^2 - t$			
계산과정 (예시)	• 잔존수명 $T = \left[\frac{100}{1.6(-3.57+9.0\times 0.47)}\right]^2 - 16 = 8952$년			

라. 탄산화(조사)

	변수	기호	값(예시)	단위
변수 값	탄산화 깊이(측정)	D	63	mm
	공용연수	t	16	년
	설계피복두께	x_c	100	mm
수식	• 탄산화 속도계수 $A = \frac{D}{\sqrt{t}}$ • 잔존수명 $T = \left(\frac{x_c}{A}\right)^2 - t$			
계산과정 (예시)	• 탄산화 속도계수 $A = \frac{63}{\sqrt{16}} = 15.75$ • 잔존수명 $T = \left(\frac{100}{15.75}\right)^2 - 16 = 24$년			

마. 동해

	변수	기호	값(예시)	단위
변수 값	연간 동결융해 횟수	N_a	15	Cycle/년
	임계 동결 손상 정도	D_l	30	%
	Fresh 콘크리트 공기함유량	w_a	3.6	%
	물/시멘트비	W/C	0.35	-
	공용연수	t	16	년

수식	• 공기함유량 계수 $C_a = \begin{cases} 275w_a + 118.25w_a^2, & w_a \geq 4\% \\ 118.25w_a^2, & w_a < 4\% \end{cases}$ • 물/시멘트비 계수 $C_b = 4.2 - 8.0(W/C) + 3.2(W/C)^2$ • 잔존수명 $T = \frac{D_l}{100N_a}(C_aC_b - 100) - t$
계산과정 (예시)	• 공기함유량 계수 ($w_a = 3.6 < 4\%$) - $C_a = 118.25 \times (3.6)^2 = 1532.52$ • 물/시멘트비 계수 $C_b = 4.2 - 8.0(0.35) + 3.2(0.35)^2 = 1.792$ • 잔존수명 $T = \frac{30}{100 \times 15}(1532.52 \times 1.792 - 100) - 16 = 37$년

바. 피로

	변수	기호	값(예시)	단위
변수 값	단일 노선의 교통량 계수	p	0.85	-
	한방향의 평균 트럭 통행수/일	$ADTT$	315	통행수/일
	응력범위 반복횟수	n	6	회
	피로상수	A	37	$\times 10^{11} MPa$
	활하중 응력범위	$\triangle f$	45	MPa
	공용연수	t	16	년
수식	• 단일 노선의 평균 트럭 통행수/일 $ADTT_{SL} = p \times ADTT$ • 잔존수명 $T = \frac{0.75A \times 10^{11}}{365n(ADTT_{SL})(\triangle f)^3} - t$			
계산과정 (예시)	• 단일 노선의 평균 트럭 통행수/일 $ADTT_{SL} = 0.85 \times 315 = 267.75$ • 잔존수명 $T = \frac{0.75 \times 37 \times 10^{11}}{365 \times 6(267.75)(45)^3} - 16 = 36$년			

4. 가치평가

가. 취득원가(정액법)

○ 현재 취득원가 - <표 3.2.12> 참조

- 초기공사비 $\times \left(1 + \frac{\text{실질할인율}}{100}\right)^{\text{공용연수}} = 4,021,000,000 \times \left(1 + \frac{4.5}{100}\right)^{11} = 6,525,492,097$

○ 유지보수 비용 - <표 3.2.14>, <표 3.2.15> 참조

- $(\text{상시유지관리비} - \text{개선비용} - \text{보전비용}) \times \left(1 + \frac{\text{실질할인율}}{100}\right)^{\text{공용연수}}$
  $= (7,728,000,000 - 3,000,000,000 - 4,000,000,000) \times \left(1 + \frac{4.5}{100}\right)^{11}$
  $= 1,181,437,017$

○ 감가상각액(정액법)

- 잔존가치(실비용)
  재활용비용 − 철거비용 − 해체비용 = 2,000,000,000 − 10,000,000 − 35,000,000 = 1,550,000,000

- 잔존가치(추정) - '교량 LCC 분석기법(한국도로공사, 2009)' 참조

  교량면적 × 면적당 단가 = 3,565 × 61,000 = 217,465,000

- 가용수명(실수명)

  잔존수명 + 공용연수 = 34 + 11 = 45

- 감가상각액(정액법) : 잔존가치(추정), 가용수명(실수명) 값 사용

  $\left(\frac{\text{현재취득원가} - \text{잔존가치}}{\text{가용수명}}\right) \times \text{공용연수} = \left(\frac{6,525,492,097 - 217,465,000}{45}\right) \times 11 = 1,387,765,961$

○ 교량 가치

- 현재취득원가 − 유지보수비용 − 감가상각액(정액법) = 6,525,492,097 − 1,181,437,017 − 1,387,765,961 = 3,956,289,118

항목	세부항목			항목 금액
	세부항목	금액	단위	
현재 취득원가	초기 공사비	4,021,000,000	원	6,525,492,097원
	실질할인율	4.5	%	
	공용연수	11	Yr	
유지보수 비용	개선비용	3,000,000,000	원	1,181,437,017원
	보전비용	4,000,000,000	원	
	상시 유지관리비	7,728,000,000	원	
	실질할인율	4.5	%	
	공용연수	11	Yr	
감가상각액 (정액법)	잔존가치(실비용)			1,387,765,961원
	재활용비용	2,000,000,000	원	
	철거비용	10,000,000	원	
	해체비용	35,000,000	원	
	잔존가치(추정)			
	교량 면적	3,565	m^2	
	면적당 단가	61,000	원/m^2	
	가용수명(실수명)			
	잔존수명	34	Yr	
	공용연수	11	Yr	
	가용수명(추정)			
	내용연수	50	Yr	
교량 가치				**3,956,289,118원**

나. 취득원가(결함도 지수)

○ 현재 취득원가 - <표 3.2.12> 참조

- 초기공사비 $\times \left(1 + \frac{\text{실질할인율}}{100}\right)^{\text{공용연수}} = 4,021,000,000 \times \left(1 + \frac{4.5}{100}\right)^{11} = 6,525,492,097$

○ 유지보수 비용 - <표 3.2.14>, <표 3.2.15> 참조

- $(\text{상시 유지관리비} - \text{개선비용} - \text{보전비용}) \times \left(1 + \frac{\text{실질할인율}}{100}\right)^{\text{공용연수}}$

  $= (7,728,000,000 - 3,000,000,000 - 4,000,000,000) \times \left(1 + \frac{4.5}{100}\right)^{11}$

  $= 1,181,437,017$

○ 감가상각액(결함도 지수)

- 현재취득원가 × 결함도지수 = 6,525,492,097 × 0.25 = 1,631,373,024

○ 교량 가치

- 현재취득원가 − 유지보수비용 − 감가상각액(정액법) = 6,525,492,097 − 1,181,437,017 − 1,631,373,024 = 3,712,682,056

항목	세부항목			항목 금액
	세부항목	금액	단위	
현재 취득원가	초기 공사비	4,021,000,000	원	6,525,492,097원
	실질할인율	4.5	%	
	공용연수	11	Yr	
유지보수 비용	개선비용	3,000,000,000	원	1,181,437,017원
	보전비용	4,000,000,000	원	
	상시 유지관리비	7,728,000,000	원	
	실질할인율	4.5	%	
	공용연수	11	Yr	
감가상각액 (결함도 지수)	현재 취득원가	6,525,492,097	원	1,631,373,024원
	결함도 지수	0.25	-	
교량 가치				**3,712,682,056원**

다. 대체원가(정액법)

○ 대체원가 -<표 3.2.13> 참조

- 건설평균단가 × 교량면적 = 2,570,000 × 3,565 = 9,162,050,000

○ 감가상각액(정액법)

- 잔존가치(실비용)

  재활용비용 − 철거비용 − 해체비용 = 2,000,000,000 − 10,000,000 − 35,000,000

- 잔존가치(추정) - '교량 LCC 분석기법(한국도로공사, 2009)' 참조

  교량면적 × 면적당 단가 = 3,565 × 61,000 = 217,465,000

- 가용수명(실수명)

  잔존수명 + 공용연수 = 34 + 11 = 45

- 감가상각액(정액법) : 잔존가치(실비용), 가용수명(실수명) 값 사용

  $\left(\frac{\text{대체원가} - \text{잔존가치}}{\text{가용수명}}\right) \times \text{공용연수} = \left(\frac{9,162,050,000 - 35,000,000}{45}\right) \times 11 = 1,761,723,333$

○ 교량 가치

- 대체원가 – 감가상각액(정액법) = 9,162,050,000 – 1,761,723,333 = 7,400,326,667

항목	세부항목			항목 금액
	세부항목	금액	단위	
대체원가	건설 평균단가	2,570,000	원	9,162,050,000원
	교량면적	3,565	m^2	
감가상각액 (정액법)	잔존가치(실비용)			1,761,723,333원
	재활용비용	2,000,000,000	원	
	철거비용	10,000,000	원	
	해체비용	35,000,000	원	
	잔존가치(추정)			
	교량 면적	3,565	m^2	
	면적당 단가	61,000	원/m^2	
	가용수명(실수명)			
	잔존수명	34	Yr	
	공용연수	11	Yr	
	가용수명(추정)			
	내용연수	50	Yr	
교량 가치				**7,400,326,667원**

라. 대체원가(결함도 지수)

○ 대체원가 -<표 3.2.13> 참조

- 건설평균단가 × 교량면적 = 2,570,000 × 3,565 = 9,162,050,000

○ 감가상각액(결함도 지수)

- 대체원가 × 결함도지수 = 9,162,050,000 × 0.25 = 2,290,512,500

○ 교량 가치

- 대체원가 – 감가상각액(결함도지수) = 9,162,050,000 – 2,290,512,500 = 6,871,537,500

항목	세부항목			항목 금액
	세부항목	금액	단위	
대체원가	건설 평균단가	2,570,000	원	9,162,050,000원
	교량면적	3,565	m^2	
감가상각액 (결함도 지수)	현재 취득원가	9,162,050,000	원	2,290,512,500원
	결함도 지수	0.25	-	
교량 가치				**6,871,537,500원**