

사회기반 콘크리트구조물의 성능평가 통합 시스템 구축

Development of Integrated System for Performance Assessment of Concrete Infra Structures



김진근*
Jin-Keun Kim



이방연**
Bang-Yeon Lee



설현철**
Hyun-Cheol Seol

1. 연구단 총괄 소개

급속한 성과 위주의 사회기반 시설물의 건설로 인하여 구조물의 부실은 물론 구조물의 노후화 또한 급격히 증가시켜 사용 내구연한의 감소를 초래하게 되었다. 특히 구조물의 대다수를 차지하고 있는 콘크리트구조물의 경우 내구성을 저해하는 영향 인자가 강구조물에 비해 현저히 많으며, 공용 기간 동안 발생되는 문제점 또한 더 빈번하게 나타나고 있다. 이와 같은 구조물의 부실 시공 및 노후화 문제는 대형 구조물의 붕괴(성수대교, 삼풍백화점)와 조기 철거(당산철교)라는 형태로 표면화되면서 기반시설물의 안전성 확보를 위한 통합 관리 시스템의 필요성을 부각시키게 되었으며, 이를 위한 구조물의 유지관리와 관련된 다양한 기술은 물론 구조물의 내구연한을 종합적으로 평가할 수 있는 통합 기술에 대한 관심이 증가하게 되었다.

이러한 연구의 대상 구조물은 공공성이 큰 구조물로서 성능평가를 위해서는 공공 기관을 통한 관련 기술의 체계화가 요구되며, 성능평가와 관련된 객관적이고 공통적인 지침서의 작성까지도 함께 이루어져야 할 필요가 있다. 따라서 체계적인 연구의 통합화를 위해 이 연구단에서는 “(사)한국콘크리트학회”에서 주관하고, 연구 관련 내용과 직접적인 연관성을 갖는 두 기관인 “(사)한국구조물유지관리공학회”와 “한국과학기술원 소재 스마트사회기반연구센터”를 협동 기관으로 하여 연구를 수행하고 있다. 또한 현장 적용 및 검증을 위하여 “대우엔지니어링”과 “내경엔지니어링”이 협동 기관으로 연구를 수행 중이며, 동부건설을 비롯한 15개 기업이 참여하고 있다. 소기의 목적을 달성하기 위하여 광범위한 관련 연구 분야와 대상 구조물 가운데 가장 문제가 되고 있는 구조물과 그 기반 기술을 중심으로

연구 방향을 설정하고, 이를 바탕으로 사회기반 시설물의 성능평가와 더불어 사용연한을 체계적이고 합리적으로 예측하기 위한 기술의 통합화를 추진 중에 있다. 다양한 구조물 가운데 그 중요도가 상대적으로 큰 대표적인 구조물인 교량, 건축물, 지하구조물, 해양항만구조물을 연구의 대상으로 선정하였으며, 나아가 각 구조물에 공통적으로 적용이 가능한 관련 기반 기술들을 내구성, 내하성, 사용성, 건전도와 비파괴 시험 및 검사의 5개의 주 연구 분야로 구분하여, 각 분야와 관련한 핵심 기반 기술의 개발, 개선 및 발전에 초점을 맞추어 연구를 진행하고 있다<그림 1>.

2. 연구 목적 및 내용

이 연구단의 비전은 ‘올바른 평가·건강한 구조물’로서 올바른 평가란 도덕적 양심에 따라 이루어진 정확한 평가를 의미하며, 건강한 구조물이란 안전성, 사용성, 내구성 등을 확보할 수 있는 구조물을 의미한다. 이러한 비전을 향하여 이 연구단에서

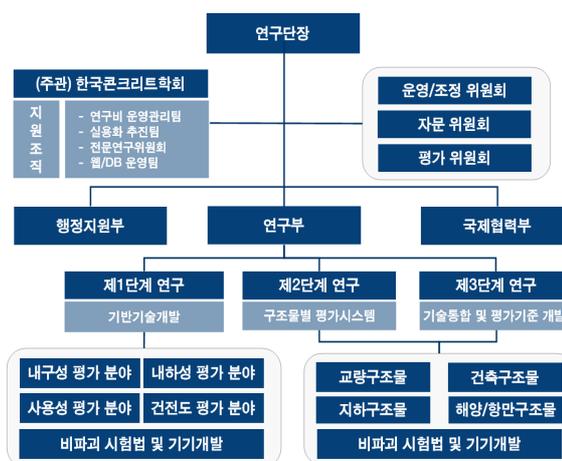


그림 1. 연구 조직 및 연구 항목

* 정회원, 한국과학기술원 건설및환경공학과 교수, 사회기반 시설물 평가 중점연구단 연구단장
kinjinkeun@kaist.ac.kr

** 정회원, 한국과학기술원 건설및환경공학과 대학원생

는 현재 사용 중인 사회기반 콘크리트구조물에 대하여 대상 구조물(교량구조물, 건축구조물, 지하구조물, 해양/항만구조물) 별로 구조물의 특성을 고려하여 구조물 성능(내구성, 내하성, 사용성, 건전도)을 정량적으로 평가하고 이러한 성능평가 결과를 바탕으로 구조물의 잔존수명을 예측하기 위한 '성능평가 통합 시스템 구축'을 연구 목표로 설정하였다. 이러한 최종 목표를 효과적으로 달성하기 위해 다음과 같은 4가지 세부 연구 목표를 설정하였으며, 단계적 전략을 <그림 2>와 같이 수립하였다.

- 구조물 성능평가 기준 및 지침 작성
- 성능평가 시스템 개발
- 잔존수명 예측 기법 개발
- 비파괴 시험 및 검사 체계화

2.1 구조물 성능평가 기준 및 지침 작성

1단계(2년간) 연구는 관련 기반 기술 개발을 통해 내구성, 내하성, 사용성, 그리고 건전도와 같은 구조물 성능을 정량적으로 평가하기 위한 기반 기술 평가 지침을 작성하는 것이며, 2단계(2년간) 연구는 대상 구조물(교량구조물, 건축구조물, 지하구조물, 해양/항만구조물) 별로 구조물의 특성을 고려할 수 있는 구조물 별 평가 기준을 작성하는 것이다. 3단계(1년간) 연구는 1, 2단계에서 작성한 구조물 성능평가 기준 및 지침을 수정보완하여 학회와 건교부의 심의 작업을 거침으로서 평가 기준 및 지침을 공인화 하는 것이다.

2.2 성능평가 시스템 개발

1단계(2년간) 연구는 구조물의 정량적인 성능평가를 위해 내구성, 내하성, 사용성, 그리고 건전도와 관련된 평가 모델식 개발 및 기반 기술 성능평가 프로그램을 개발하는 것이며, 2단계(2년간) 연구는 구조물 별 특성을 고려하여 성능평가를 수행하기 위해 구조물 별 성능평가 프로그램을 개발하는 것이다. 또



그림 2. 비전과 연구 목표

한 2단계 연구에는 1단계에서 수행된 성능평가 기반 기술의 현장 적용을 통한 수정/보완이 포함되어 있다. 3단계(1년간) 연구는 개발된 기반 기술을 통합화하여 각 대상 구조물의 특성을 고려한 성능평가 및 잔존수명 예측 통합 시스템을 구축하는 것이다.

2.3 잔존수명 예측 기법 개발

1단계 연구는 잔존수명 예측 모델식 개발, 수명 예측 방법론 결정 및 프로그램을 개발하는 것이며, 2단계(2년간) 연구는 구조물 별 잔존수명 예측 프로그램을 개발 중이며 실 구조물에 적용하기 위한 검증 작업을 수행 하는 것이다. 3단계(1년간) 연구는 관련 기반 기술 개발에서 수행된 성능평가 시스템과 통합하여 성능평가 및 잔존수명 예측 통합 시스템을 구축하는 것이다.

2.4 비파괴 시험 및 검사 체계화

1단계(2년간) 연구는 보다 효과적이고 정량적인 비파괴 시험 기술 개발을 위해 관련된 기반 기술을 연구하는 것이며, 2단계(2년간) 연구는 시제품 개발과 현장 적용을 통한 시제품의 수정 및 보완하는 것이다. 3단계(1년간) 연구는 실용화 단계로서 개발된 비파괴 시험법을 체계화하고 비파괴 시험기기를 제품화 하는 것이다.

2.5 세부 과제 별 연구 내용

위의 4가지 연구 목표를 달성하기 위한 세부 과제 별 연구 내용은 다음과 같다.

2.5.1 1단계 - 기반 기술 별 평가 기법 개발

- ▶ 1-1 세부 : 구조물의 내구성 평가 기법 개발

| 연구 수행 기관 | 한국콘크리트학회 |
|----------|--|
| 세부 연구 | 콘크리트 염해 예측 기법 연구 콘크리트 동결융해/화학적 침식에 의한 성능 저하 예측 기법 연구 콘크리트 중성화 예측 기법 연구 다수준 통합 잔존수명 평가 기법 개발 |

- ▶ 1-2 세부 : 구조물의 내하성 평가 기법 개발

| 연구 수행 기관 | 한국콘크리트학회 |
|----------|--|
| 세부 연구 | 구조물의 휨 내하성 평가 시스템 개발 구조물의 전단 내하성 평가 시스템 개발 철근콘크리트 교각의 내진 성능 평가 기법 개발 스트럿 타이 모델을 이용한 비선형 해석 및 전단 강도 평가 방법 연구 |

▷ 1-3 세부 : 구조물의 사용성 평가 기법 개발

| 연구 수행 기관 | 한국콘크리트학회 |
|----------|---|
| 세세부 연구 | 인장 증강 효과를 고려한 균열 단면 평가 및 제어 기법 개발 화해를 입은 철근콘크리트구조물의 손상도 평가 콘크리트구조물의 장기 변형 및 비구조 균열 해석 진동 영향에 대한 사용성 평가 기법 개발 초고층 건축물의 장기변형 평가 기법 개발 |

▷ 2 세부 : 구조물의 건전도 평가 기법 개발

| 연구 수행 기관 | 한국구조물유지관리공학회 |
|----------|--|
| 세세부 연구 | 정적/동적 구조 거동 계측에 의한 건전도 평가 내구 손상된 부재의 건전도 평가 기술 보수/보강된 구조물의 건전도 평가 기술 표면 조사 및 모니터링에 의한 구조물 건전도 평가 기술 비파괴 시험을 통한 교량 건전도 평가 기술 개발 해양/항만구조물의 건전도 평가 기법 개발 |

▷ 3 세부 : 구조물의 비파괴 시험 및 검사 체계화

| 연구 수행 기관 | 한국과학기술원 |
|----------|---|
| 세세부 연구 | 탄성과 전파 특성을 이용한 콘크리트 비파괴 검사 시스템 구축 레이더 계측 기술을 이용한 콘크리트구조물의 상태 평가 균열 상태 평가 기법 개발 적외선 열화상 데이터를 이용한 철근 부식률 측정 기법 실용화 연구 압전센서를 이용한 구조물의 이상 상태 평가 광섬유센서를 이용한 스마트 계측 기술 개발 |

2.5.2 2-3단계 - 구조물 별 평가 기법 개발

▷ 1-1 세부 : 구조물 평가 기준 통합

| 연구 수행 기관 | 한국콘크리트학회 |
|----------|---|
| 세세부 연구 | 구조물 평가 기준의 체계 완성 건축/교량 구조물의 내구성, 내하성, 사용성 평가 자료 정리 및 분석 |

▷ 1-2 세부 : 교량 구조물 평가 기술 개발

| 연구 수행 기관 | 한국콘크리트학회 |
|----------|--|
| 세세부 연구 | 콘크리트 교량 구조물의 재료 특성 평가 기술 개발 콘크리트 박스거더(RC, PSC) 교량의 사용성 평가를 위한 해석 엔진 구축 공용중인 콘크리트 교량의 내하력 평가 기술 개발 및 재하 시험 가이드라인 제시 공용중인 콘크리트 교량의 신뢰도 분석 및 종합 평가 레이더를 이용한 콘크리트 교량 바닥판의 상태 평가 기 술 개발 |

▷ 1-3 세부 : 건축구조물 평가 기술 개발

| 연구 수행 기관 | 한국콘크리트학회 |
|----------|---|
| 세세부 연구 | 건축구조물의 사용성 평가 기법 개발 철근콘크리트 부재의 비선형해석 및 성능 평가 열화를 경험한 RC부재의 구조 성능 평가 동적계측을 이용한 건축구조물의 손상 평가 기법 개발 |

▷ 1-4 세부 : 고속디지털 통신을 이용한 동적계측기 및
교량유지관리 시스템 개발

| 연구 수행 기관 | 내경엔지니어링 |
|----------|---|
| 세세부 연구 | 콘크리트 교량 데이터 분석 모듈 개발 교량 관리 시스템의 의사결정 모듈 개발 실내 및 현장 실험에 의한 디지털 동적 계측기 정밀도 검증 교량응답 분석 로직 개발 |

▷ 1-5 세부 : 콘크리트구조물 성능평가 시스템의
교량유지관리 적용성 연구

| 연구 수행 기관 | 대우엔지니어링 |
|----------|---|
| 세세부 연구 | 콘크리트구조물의 성능평가 시 주안점 및 관련 자료 분 석 교량구조물의 특성 파악 및 전반적인 유지관리 방안 자 료 검토 콘크리트구조물 성능평가와 교량구조물의 유지관리의 연계 방안 분석 콘크리트구조물의 성능평가 통합 시스템과 교량 유지관 리시 현장 적용성 및 보완 사항 검토 |

▷ 2 세부 : 지하 및 해양/항만 구조물 평가 기술 개발

| 연구 수행 기관 | 한국구조물유지관리공학회 |
|----------|---|
| 세세부 연구 | 지하구조물 성능평가 기술 연구 해양/항만구조물 성능평가 기술 연구 다수준 통합 잔존수명 평가 기법 개발 해양/항만구조물의 건전도 평가 기법 개발 |

▷ 3 세부 : 구조물의 비파괴 시험 및 검사 체계화

| 연구 수행 기관 | 한국과학기술원 |
|----------|---|
| 세세부 연구 | 탄성과 전파 특성을 이용한 콘크리트 비파괴 검사 시스 템 구축 전자기법을 이용한 콘크리트구조물의 상태 평가 균열 상태 평가 기법 개발 적외선 열화상을 이용한 철근 부식률 측정 기법 실용화 기술 개발 압전센서를 이용한 구조물의 이상 상태 평가 광섬유센서를 이용한 스마트 계측 기술 개발 |

3. 연구 성과

현재 2단계 2차년도(4차년도) 연구를 수행 중이며, 지금까지 연구 성과는 다음과 같다.

3.1 구조물 성능평가 기준 및 지침 작성

1단계(2년간) 연구를 통하여 기반 기술(내구성, 내하성, 사용성, 그리고 건전도)별 평가 지침(안)을 개발하였으며, 2단계 구조물 별 평가 기준 개발 과정에서 수정/보완하고 있다. 현재 교량과 건축구조물의 평가 기준(안)이 개발 되었으며 평가 기준의 재정 방향은 다음과 같다³⁻⁵⁾.

▶ 설계기준과 평가기준의 차이 : 신설 구조물이나 기존 구조물이나에 따라 적용 기준(설계기준, 평가기준), 입력 값(가정 값, 측정된 값), 신뢰도 영향 인자(모델식의 변수, 확보한 입력 값 및 평가 능력), 신뢰도(객관적, 주관적) 등에 차이가 발생한다.

▶ 평가기준에서 규정하여야 할 항목 : 설계기준에서 규정한 것과 유사하지만 (1) 재료, 재료 및 부재 특성값, (2) 하중 및 하중 조합, (3) 구조 해석 및 단면 설계, (4) 한계 값 및 특별 사항 등에 대하여 강조하여 기술하여야 한다.

3.2 성능평가 시스템 개발

개발된 모델식 및 프로그램 목록은 각각 <표 1, 2>와 같다.

3.3 비파괴 시험 및 검사 체계화

비파괴 시험 검사 장비는 하드웨어와 소프트웨어로 개발되었으며 제작된 시제품은 <그림 3>과 같다. 개발된 비파괴 시험 장비는 4차년도에 현장 적용 및 검증을 통하여 장비를 수정/보완하여 상용화할 계획이다.

3.4 기술적/학술적 성과

전술한 연구 성과를 토대로 <표 3>과 같은 기술적/학술적 성과를 얻었다.

3.5 운영 성과

3.5.1 국제 협력

구조물 평가와 관련된 국제적 동향을 파악하고 최신 기술에 대한 아이디어를 획득하고 기술화하기 위하여 5번의 국제 워크숍을 개최하였으며, 타 연구센터 주관의 국제 워크숍을 후원하여 국제적 연구 교류를 활성화 하였다. 특히, 2006년 1월 일본콘크리트

표 1. 개발된 모델식

| 분야 | 개발 및 수정/보완한 모델 |
|------------|--|
| 교량 | RC 교량 하부 구조 저항강도 평가 모델 RC 교량 하부 구조 내진성능 평가 모델 RC 슬래브교 평가를 위한 해석 모델 재료의 통계적 특성 평가 모델 보 부재에서 횡방향 변형에 기반한 전단파괴 기준 |
| 건축 | 균열 거동 모델 RC 보에 대한 변형 능력 평가 모델 RC 기둥에 대한 강도 평가 모델 |
| 지하 및 해양 항만 | 지하구조물 성능 저하 모델 해안/항만구조물 탄산화 속도 계수 분석 균열을 고려한 염화물 확산 모델 균열을 고려한 이산화탄소 확산 모델 표면처리제에 따른 내구성 해석 모델 |

표 2. 개발된 프로그램

| 분야 | 개발된 프로그램 |
|-----------|---|
| 내구성 | 염해에 의한 철근부식 예측 탄산화에 의한 중성화 예측 복합열화 평가 프로그램 |
| 내하성 | 비선형 주기 해석 프로그램 PSC 구조물 해석 비탄성 트러스 모델을 이용한 RC 부재 성능평가 교량 박스거더 횡방향 거동 해석 |
| 사용성 | 초기 재령 균열 평가 해석 초고층 장기 변형 해석 프로그램 교량 상시 진동 측정 및 분석 프로그램 |
| 손상도 평가 | 구조물 동적응답 산출 기법 전단벽식 구조물의 손상식 별 프로그램 |
| 교량 관리 시스템 | 교량 응답 변환 프로그램 교량 데이터 수집 저장 처리 프로그램 |
| 잔존수명 예측 | 염해, 탄산화, 복합 열화를 고려한 부재 단위 잔존수명 예측 프로그램 |



그림 3. 비파괴 시험 검사 장비

표 3. 기술적/학술적 성과

| 기술적 성과 | 특허 출원 | 특허 등록 | 실용 신안 | S/W 등록 | 추진중 | |
|--------|------------|-------|-------|---------|---------|-----|
| | | | | | 특허 | S/W |
| | 5건 | 0 | 1건 | 2건 | 4건 | 10건 |
| 학술적 성과 | 국제저널 (SCI) | | 국내저널 | 국제학술 발표 | 국내학술 발표 | |
| | 32편 | | 64편 | 75편 | 127편 | |

공학회(JCI)와 건축물과 교량 구조물에 대한 공동평가기준 개발을 주제로 MOU를 체결함으로써 국제 협력 인프라를 구축하였다. 현재까지 MOU 체결을 통하여 공동 평가 기준 개발을 위한 국제 워크숍을 3회 개최하였으며 2008년 1월 28일과 29일에 다시 한 번 개최될 예정이다<그림 4>. 또한 ACMC(Asian Concrete Model Code) 2006의 발간을 후원하였다.

3.5.2 기타 성과

국내 비파괴 강도 추정식 개발을 위한 자료 축적, 안전진단 업체의 강도 평가 방법에 대한 신뢰도 평가를 위한 통계 자료 축적 및 신뢰성 제고 방안 강구, 비파괴 검사법에 의한 강도 추정 관련 연구의 중요도 인식 확산 및 관심 제고를 위하여 연구단이 주관이 되어 2006년에 비파괴 강도 추정 콘테스트를 개최하였으며 <그림 5>, 연구단 연구원이 주축이 되어 ‘콘크리트 균열 측정 기법’ 보고서를 발간하였다. 또한 FIDIC-KAIST-KENCA와 공동하여 참여기업 및 연구원 교육을 수행한 바 있다<그림 6>.

3.6 기대 파급효과

3장에서 기술한 성과물을 통하여 특허, s/w 등록, 그리고 실용신안과 관련된 성과물의 경우 연구 개발에 대한 투자와 학제



그림 4. KCI and JCI joint committee



그림 5. 비파괴 강도 추정 콘테스트



그림 6. 참여기업 및 연구원 교육

간의 연구를 통하여 선진 신기술을 국산화하고 기존 기반 기술을 체계화 시킬 수 있을 것으로 예상된다. 또한 저비용 고효율의 비파괴 검사가 가능해지며 상시 모니터링과 관련된 기술의 개발이 앞당겨 질 수 있고, 국내 IT 기술과의 접목을 통하여 세계시장 진입에도 성공할 수 있을 것으로 예상된다.

이와 더불어 현재 작성 중인 구조물 성능평가 지침/기준과 잔존수명 예측 기술 개발을 통해 구조물의 수명이 다할 때까지 단계별 관리가 효과적으로 이루어지고 필요한 경우 보수 또는 보강이 적절한 시점에 이루어질 수 있도록 함으로써 구조물의 내구연한을 최대화하여 사용연한 동안 구조물의 안정성을 확보하게 되므로 대형 구조물의 붕괴 사고나 조기 철거와 같은 사태를 미연에 방지할 수 있음은 물론 구조물의 체계적인 관리를 통해 국내 건설 산업을 비롯한 경제 전반의 안전적 발전에 크게 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

4. 결 언

이 연구단은 ‘올바른 평가, 건강한 구조물’이라는 연구 목표 아래 사회기반 콘크리트구조물의 성능을 평가하고 잔존수명을 예측하기 위한 통합시스템을 구축하고자 연구를 수행 중이며, 이러한 목표를 달성하기 위하여 산학연 공동 연구와 국제 공동 연구 외에 관련 연구자 및 연구 기관과 협동 연구를 수행할 수 있는 체계를 구축해 나가고자 한다. □

참고문헌

1. 사회기반시설물평가 중점연구단, 사회기반 시설물의 성능 평가 통합 시스템 구축, 연구개발 계획서, 2003, pp.12~15.
2. ISO/TC98/SC2/WG6, Bases for Design of Structures - Assessment of Existing Structures, 2003, 36pp.
3. 사회기반시설물평가 중점연구단, 사회기반 콘크리트구조물의 성능 평가 통합 시스템 구축, 3차년도 중간보고서, 2006.
4. 사회기반시설물평가 중점연구단, 사회기반 콘크리트구조물의 성능 평가 통합 시스템 구축, 4차년도 중간보고서, 2007.
5. 김진근, 구조물 평가기준 개발 제정의 필요성, 콘크리트학회지, 19권 2호, 2007, pp.10~13.