

ICT 기반 교량 안전 진단 및 통합 유지 관리 기술

ICT Based Bridge Health Diagnosis and Integrated Maintenance Techniques



손 훈^{1)*}
Sohn, Hoon



정 형 조²⁾
Jung, Hyung Jo



공 정 식³⁾
Kong, Jung Sik



이 종 재⁴⁾
Lee, Jong Jae



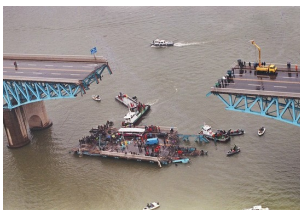
심 성 한⁵⁾
Sim, Sung Han

1. 개요

1983년 벨기에 Malle 교량, 1994년 성수대교, 2007년 미국 미네소타주 미니애폴리스 I-35W 교량, 2013년 미국 위싱턴주 I-5 교량 등 교량 붕괴사고는 국내·외에서 끊임없이 일어나고 있다. 교량 붕괴사고의 원인으로는 설계오차, 장기간 사용으로 인한 노후화 및 효과적이지 못한 유지·보수·보강 기법/시스템에 의한 교량 부재의 손상 등을 꼽을 수 있으며, 현재 미국과 같이 산업화가 일찍 진행된 국가의 경우 설계수명에 가까워진 노후 교량의 숫자

가 계속해서 증가하고 있는 실정이다.

이렇듯 막대한 인적·경제적 피해를 발생시키는 교량 붕괴사고가 잇달아 발생함과 동시에 붕괴 위험에 노출되어 있는 노후화 교량의 숫자가 증가하면서, 교량의 건전성을 실시간으로 모니터링함으로써 대형사고를 예방할 수 있는 교량 건전성 모니터링 기술에 대한 필요성이 부각되어 왔다. 이에 부합하여, 많은 국가 및 지자체에서는 지난 수십 년간 교량 건전성 모니터링 관련 연구에 대한 지원을 계속 해왔으며 국내·외의 많은 연구진에 의해 연구가 수행되어 왔다.



(a) 1994년 붕괴된 성수대교
(32명 사망, 17명 부상)



(b) 2007년 붕괴된 I-35W 교량
(13명 사망, 145명 부상)

Fig. 1 국내·외 교량 붕괴사고 사례

2. ICT 교량 연구단 소개

ICT교량 연구단은 국토교통부 산하 국토교통과학기술진흥원에서 발주한 총 연구기간 5년 (2013.06 ~ 2018.05) 총 연구비 280억원 (정부출연금 210억원 + 민간지원금 70억원)의 교량 기술 연구단으로 “교량 생애주기에서 발생하는 탄소발생량의 30% 절감 및 공용수명 100년을 보장하기 위한 중경간 (200m 이내) 교량 기술 개발”을 최종 목표로 한다.

국내 최대의 연구중심 대학인 한국과학기술원(KAIST)을 주관연구기관으로 국내 최고의 바닥판 교체시공 기술을 보유한 (주)대우건설과 다수의 교량 관련 국가과제를 성공적으로 수행한 포항산업과학연구원(RIST)을 협동연구기

- 1) 한국과학기술원, 건설 및 환경 공학과 교수
- 2) 한국과학기술원, 건설 및 환경 공학과 교수
- 3) 고려대학교 건축사회환경공학과 교수
- 4) 세종대학교 건설환경공학과 교수
- 5) 울산과학기술대학교 도시환경공학부 교수

* E-mail : hoonsohn@kaist.ac.kr



Fig. 2 ICT교량 연구단 최종목표

관으로 국내 최고 수준의 연구수행 컨소시엄을 구성하였다.

ICT교량 연구단은 (주)대우건설 중심의 “정밀 급속시공/부분조립 및 교체기술”, 포항산업과학연구원 중심의 “저탄소 고성능 소재활용 친환경 교량기술” 및 한국과학기술원 중심의 “ICT 기반 교량 안전진단 및 통합관리 기술”로 크게 총 세 개의 세부로 구분되어 있으며, 각 세부는 타세부와의 연계를 통해 ICT교량 연구단의 네 가지의 통합지표 (1) 장수명화, (2) 탄소저감, (3) 공기단축, (4) 비용절감 실현을 목표로 하고 있다.

특히, 세 번째 세부인 “ICT 기반 교량 안전진단 및 통합관리 기술”은 교량의 부재에 발생 가능한 국부손상을 진단하는 교량 안전진단 기술뿐만 아니라 교량의 내하성능 평가를 통한 교량 생애주기 성능 (LCP) 모델 및 생애주기 비용 (LCC) 모델을 구축함으로써 교량의 전 생애주기에 걸쳐 통합적 유지관리를 가능하게 한다. 또한, 구축된 LCP 및 LCC 모델을 통해 연구단의 타 세부에서 개발된 조립부재 교체기술 및 저탄소 소재활용 교량기술의 적용에 의해 향상된 교량의 성능 및 비용을 평가함으로써, 전체 연구단의 연구성과를 하나로 통합하는 ICT교량 연구단의 중심이 되는 기술이다.

3. ICT 기반 교량 안전진단 및 통합관리 기술

“ICT 기반 교량 안전진단 및 통합관리 기술”은 이름에서 알 수 있듯이 교량의 안전진단 및 통합관리 기술에 정보통신기술 (Information and Communication Technology, ICT)를 융합한 형태으로써, ICT에 기반한 연구개발을 통해 기존 교량 안전진단 및 관리 기술과 비교하여 효율성과 적용성을 증대시키는 데에 그 목적이 있다.

예를 들어, 기존의 교량 안전진단 기술이 교통 혼잡을 유

발하는 통행차단 및 인력의 상시적인 투입을 요구하였다면 ICT의 적용을 통해 통행차단 없이 교량의 내하성능 평가가 가능하며 교량 내부에 상시적으로 작동하는 무선 센서 노드를 설치함으로써 사람의 접근이 어려운 곳까지 인력의 투입 없이 효율적인 교량의 안전진단이 가능하다. 또한, 교량 생애주기 단계별 (설계, 시공, 유지관리, 교체) 수행조직들 간 정보공유에 한계가 있고, 유지관리 시 얻어지는 정보 및 이력의 체계적 관리 시스템이 확보되지 않았던 기존의 교량 관리시스템과는 달리, ICT 기반의 정보 융합·관리 기술을 통해 방대한 교량 관리 정보를 관리할 뿐 아니라 LCC 예측 모델 개발과 교량의 최적 유지관리의사결정 기법을 개발함으로써 통합적 교량 유리관리를 실현할 수 있다.

4. ICT 기반 교량 안전진단 기술 예시

4.1 입출력관계 기반 교량 내하성능 평가

교량의 내하성능을 평가하기 위한 재하시험은 통행교통 차단을 요구하므로 사회적 비용이 소요되고, 교량의 처짐 및 변형률을 측정하는데 많은 제약이 존재하며 교량의 상태 평가에 소수의 측정 값만을 사용하므로 구조적 성능평가 결과의 신뢰성에 문제점을 갖고 있다. 이에 대한 대안으로 상시진동계측 데이터를 이용하여 교량의 동특성을 추정하고 이로부터 교량의 초기 유한요소모델을 개선하여 개선된 모델로부터 내하성능을 평가하기 위한 연구가 수행되어져 왔다. 이 기법은 통행교통 차단을 요구하지 않는 장점을 가지고 있으나, 다양한 종류의 입출력 데이터를 활용하고 있지 않으므로 교량의 성능을 정량적으로 평가하기에 한계를 가지고 있다.

이에 따라 본 연구에서는 차량하중입력-변위출력관계, 온도입력-변위출력관계, 진동입력-가속도출력관계 등 여러 가지의 입력하중 정보와 출력응답을 함께 고려하는 종합적인 교량 성능평가 기법을 제시하고자 한다. 측정된 여러 가지 입/출력 데이터의 Data Fusion을 통하여 교량의 입출력관계를 규명하고, 규명된 입출력관계는 유한요소모델 개선 프로그램에 사용되어 초기유한요소모델을 개선하고, 개선된 유한요소모델은 교량의 내하성능 평가를 수행하는데 사용된다. 개선된 유한요소 모델은 교량의 내하성능 평가뿐만 아니라 부재별 노후화 정도의 규명, 부분교체 및 보강을 통한 구조성능 개선의 기초자료 제공, 신설교량

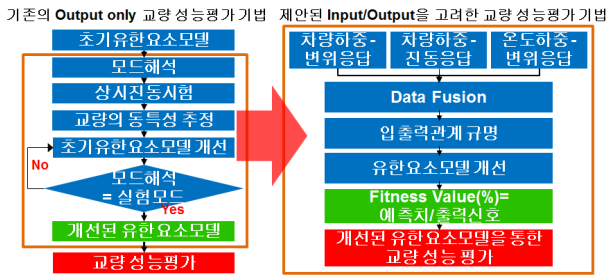


Fig. 3 입출력관계 기반 교량 내하능 평가

의 시공품질관리 등에 활용이 가능하다.

4.2 국부손상 진단용 내장형 센서노드

최근 교량의 전역적인 건전성 모니터링 기술뿐만 아니라, 부식, 균열, 좌굴 등 교량의 부재 단위에서 발생하는 국부손상 진단의 중요성이 부각되고 있다. 이 같이 교량에 발생하는 국부손상의 효과적인 진단을 위해 초음파 기법, 광섬유 기법, 기전 임피던스 기법 등 다양한 비파괴검사 기법 (Nondestructive Testing, NDT)이 개발되었으며, 최근에는 다수의 국내·외 연구진에 의해 무선 센서노드의 형태로 개발되어 그 적용성을 검증하는 연구가 진행 중에 있다.

기존의 교량 국부손상 진단을 위한 무선 센서노드와 비교하여 본 연구에서 개발하는 무선 센서노드가 갖는 가장 큰 특징은 내장배터리 혹은 진동, 풍력, 태양열 에너지 기반의 에너지 하베스팅 (Energy Harvesting)에 의한 전력 공급이 아닌, 외부 전력원으로부터 센서노드에 무선으로 전력을 공급함으로써 교량 생애주기 동안 센서노드의 반영구적인 사용이 가능할 뿐만 아니라 측정된 진단 데이터를 무선으로 전송함으로써 센서노드가 내장된 위치에서 구조물 외부로의 전력/데이터 케이블의 사용을 완벽히 배제할 수 있다. 이를 실현시키기 위해서 (1) 무선 센서노드에 탑재/운영되기 위해 저전력의 국부손상 진단기법과 (2) 교량의 콘크리트 부재를 투과할 수 있는 고효율 무선 전력 및 데이터 전송 기술 개발이 요구되므로 기존 NDT 기법과 ICT의 융합을 통한 새로운 기법을 제시하려 한다.

본 연구의 국부손상 진단용 내장형 센서노드의 대략적인 운영전략은 다음과 같다. 국부손상 진단이 요구되는 구조물의 특정 위치에 내장된 무선 센서노드는 내장된 국부손상 진단 기법을 통해 진단 데이터를 수집/저장하고, 진단 이외의 시간에는 수면모드(sleep mode)로 전환되어 전력

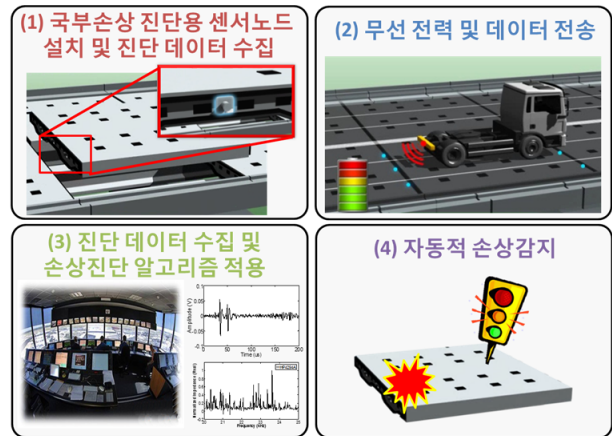


Fig. 4 국부손상 진단용 내장형 센서노드 운영전략 예시

소모를 줄인다. 정해진 주기마다 검사용 차량이 센서노드 설치장소에 접근하고, 차량에 내부에 설치된 외부전력원은 센서노드에 무선으로 전력을 공급함과 동시에 통신모듈을 통해 센서노드로부터 측정 데이터를 전송받는다. 검사용 차량으로 전송된 데이터는 최종 통합관리 센터에 옮겨져 분석됨으로써 자동적으로 국부손상정보를 획득할 수 있으며, 전력을 공급받은 무선 센서노드는 다시 국부손상진단을 수행함으로써 교량의 전 생애주기에 걸쳐 운영될 수 있다.

4.3 LCC/LCP 기반 교량 관리 최적의사결정 기술

오늘날 국내의 공용중인 모든 교량은 Fig. 5와 같은 교량유지관리시스템(BMS)에 의해 안전관리 위주로 유지관리 되고 있다.

하지만 이는 교량의 급격한 노후화에 따른 유지관리 우선순위 결정체계가 구축되어 있지 않고, 유지관리 정보 및 보수보강 이력의 체계적 관리가 부족하며, 교량의 생애주기 각 단계별 관리의 효율성이 떨어진다. 또한, 시설물 평가의 표준화, 예산계획이 포함되어 있지 않기 때문에 예방적 유지관리를 위한 통합시스템 구축이 되어 있지 않다.

반면, 해외의 유지관리 시스템을 살펴보면, 미국의 경우 각 주의 실정에 맞는 구조물 관리체계와 가이드라인을 구축하고 있으며, 특히 유럽의 경우 BRIME(2011)프로젝트를 통하여 기존의 BMS를 검토하고 통합 BMS를 제안하여 Fig. 6과 같이 교량의 성과와 비용을 고려한 의사결정 관리수준을 3단계로 구분하였다.

현재 미국을 비롯한 영국, 덴마크, 핀란드 등이 수준 3의 시스템 구축을 위한 다양한 연구개발이 진행 중이며, 여기서 3단계는 비용/편익 비를 고려한 교량의 서비스 수준 및

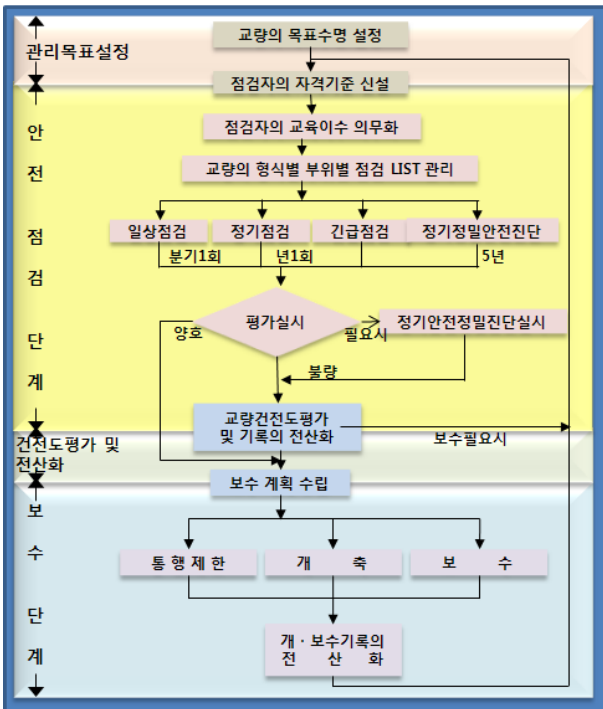


Fig. 5 한국의 교량유지관리체계

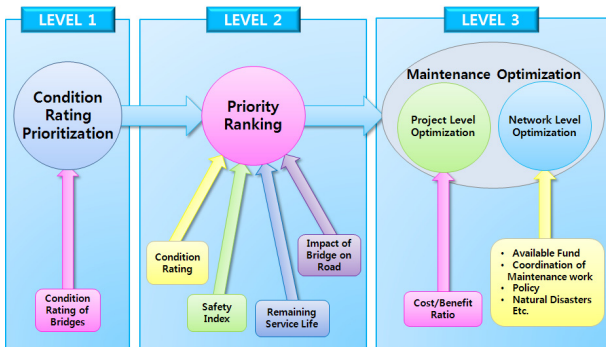


Fig. 6 의사결정 수준에 따른 교량관리 수준의 구분

예산정책, 자연재해 등 자산관리개념이 고려된 교량군 수준의 최적화를 통한 유지관리를 뜻한다.

그러므로 ICT교량연구단에서는 이러한 기존의 임기응변식의 사후적 조치 관리시스템을 탈피하고 개축, 개량, 보수/보강 등의 여부를 판단할 때 생애주기분석 수행을 통한 경제적인 안전 및 유지관리의 필요를 만족시키는 정량적 LCP/LCC 통합 모델 기반의 교량관리 기술 및 최적 의사관리 선정기법, 교량관리 시나리오 분석 모듈 및 우선순위 산정 알고리즘 등의 개발을 수행하고 으며, 해당 알고리즘

은 구조물 건전성 모니터링 기술 및 첨단 센싱 기술로부터 획득한 교량 성능관련 데이터를 활용함으로써, 보다 신뢰도 높은 의사결정이 가능하다.

5. 결론

ICT교량 연구단은 궁극적으로 연구 성과의 실용화·상용화를 목표로 하고 있는 연구단으로써, 2014년~2015년 동안 기본 기법개발을 완료하고, 2016년~2017년에는 시제품 제작을 통한 실제 현장 적용성 평가/검증뿐만 아니라 기술이전을 통한 상용화를 목표로 하고 있다.

본 기고에서 소개한 "ICT 기반 교량 안전진단 및 통합관리 기술"이 개발된다면, 교량의 전역적인 내하성능 평가뿐만 아니라 부재 단위의 국부손상을 진단함으로써 교량 통합적 건전성 평가가 가능하다. 나아가, 수집된 전역적/국부적 손상정보와 개발된 교량 성능평가 및 생애주기 비용모델을 기반으로 대상 교량의 보수·보강 및 교체 등의 최적 의사를 결정함으로써, 교량의 안전진단 및 통합관리 시스템을 구축할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 글은 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술 연구사업의 연구비지원(13건설기술A01)에 의해 작성되었습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. J. P. Lynch et al., (2006), "A Summary Review of Wireless Sensors and Sensor Networks for Structural Health Monitoring", The Shock and Vibration Digest, Vol. 38, No. 2, pp. 91-128.
2. T. I. Miller et al., (2010), "Solar Energy Harvesting and Software Enhancements for Autonomous Wireless Smart Sensor Networks", NSEL Report Series, Report No. NSEL-022, ISSN: 1940-9826.

담당 편집위원: 성택룡
(RIST 강구조연구소 수석연구원)
trseong@rist.re.kr