

기술리포트

# TECHNICAL EXCELLENCE

Aug 2021 Vol. 10

## 서울시 교량의 성능중심 유지관리 기술

교량유지관리, 나이에 따른 노후화보다  
성능 취약화에 초점을

4차산업혁명 기술로 시설물 관리 혁신을  
- 센서기반 교량 상시감시

손상점검이 아닌 상태평가로..  
성능중심 관리로의 패러다임 전환

이기세  
박민철  
박준용

Seoul  
Institute of  
Technology

## 서울시 교량의 성능중심 유지관리 기술

- 01 교량유지관리, 나이에 따른 노후화보다 성능 취약화에 초점을
- 02 4차 산업혁명 기술로 시설물 관리 혁신을 - 센서기반 교량 상시 감시
- 03 손상 점검이 아닌 상태 평가로.. 성능중심 관리로의 패러다임 전환



Seoul  
Institute of  
Technology

이기세 연구위원   박민철 수석연구위원   박준용 전임연구위원  
 kslee@sit.re.kr   mcpark@sit.re.kr   junyongpark@sit.re.kr

## 서울시 교량의 성능중심 유지관리 기술

서울에는 약 680여개의 교량이 있으며 그 밀도는 우리나라 지자체 중 가장 높고, 일 교통량 또한 압도적이다. 교량의 손상과 열화는 나날이 그 빈도가 증가할 것으로 예상되며, 한정된 재화와 인력으로 이를 해결할 수 있는 방안이 필요하다. 이에 서울기술연구원에서는 센서, 통신, 소프트웨어 등 다양한 기술과 고전 역학을 융합하여 교량을 보다 면밀하게 관리할 수 있는 시스템을 개발, 적용하였다.

### II 교량 유지관리, 나이에 따른 노후화보다 성능 취약화에 초점을

수년 전부터 서울시는 기반시설물 노후화 문제를 제기해 왔다. 그러나, 시설물 관리에 투자될 수 있는 예산과 인력은 한정되어 있으므로 동시에 노후화 문제를 겪는 수많은 교량에 대하여 일시에 관리 집중도를 높이는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 구조물의 상태와 성능을 기준으로 취약화된 구조물을 선별하여 합리적인 투자를 해야 할 것이다. 서울기술연구원은 이러한 문제를 인식하고, 이를 해결할 수 있는 방안 중 하나로 새로운 형태의 교량 유지관리 기술을 제안하였다.

### II 4차산업혁명 기술로 시설물 관리 혁신을 - 센서기반 교량 상시감시

통신, 컴퓨터, 소프트웨어, 센서 등 다양한 IT기술은 빠른 속도로 발전하여 다양한 분야에 적용되고 있으나, 토목 분야는 새로운 기술과의 융합이 상대적으로 느린 편이다. 서울기술연구원에서는 이러한 기술들을 융합하여 교량 센서들의 데이터 획득 및 제어·관리를 위한 저전력·고성능 무선 네트워크 기기와 모니터링 시스템을 개발하고 한강교량에 적용하였다.

### II 손상점검이 아닌 상태평가로.. 성능중심 관리로의 패러다임 전환

센서 기반 교량 모니터링 시스템은 외부 환경 조건에 대한 교량의 응답을 준실시간으로 관리자에게 전달한다. 이에 대한 활용방법은 상당수 제시되어 왔으나, 실제 현장에 적용된 사례는 매우 적다. 서울기술연구원과 고려대학교 공동연구진은 센싱 데이터 기반 교량 형상 추정 알고리즘을 개발하여 교량의 상태를 보다 면밀히 파악할수 있는 대안으로 제시하였다.

# 01

## 교량 유지관리, 나이에 따른 노후화보다 성능 취약화에 초점을

서울시 교량의 평균 나이는 29세, 교량의 평균 수명은 80년. 노후 시설물 분류 기준 30년은 합당한가

최근 들어 시설물 노후화 대책 마련에 대한 우려의 목소리가 높아지고 있다. 이는 70년대 집중적으로 건설된 대부분 시설물의 공용연수에 비추어 보았을 때 일견 타당해 보인다. 실제 서울시에 위치한 676개 교량의 평균 공용연수는 28.5년(그림1)으로 일반적으로 노후화 시설로 분류되는 30년 기준에 가깝다. 그리고 한국전쟁 이후 비슷한 시기에 건설된 서울의 교량은 몇 년 이내에 대부분 노후화 시설로 분류될 것이다.

그러나 이러한 노후화 기준에 대한 의문을 제기하지 않을 수 없다. Michal Barker(2017)에 따르면 교량의 평균수명은 형식에 따라 다소 차이가 있으나 73년에서 82년에 달하는데, 공용연수 30년은 이의 절반에도 미치지 못하는 수준이다. 뿐만 아니라, 동일한 형식의 교량도 노출된 환경에 따라 성능이 다를 수 있기 때문에, 공용 수명은 교량의 성능을 대표하지 못한다. 따라서 “노후화”된 시설보다는 “취약화”된 시설을 파악하여 관리하는 것이 훨씬 타당하고 효율적인 방법일 것이다.

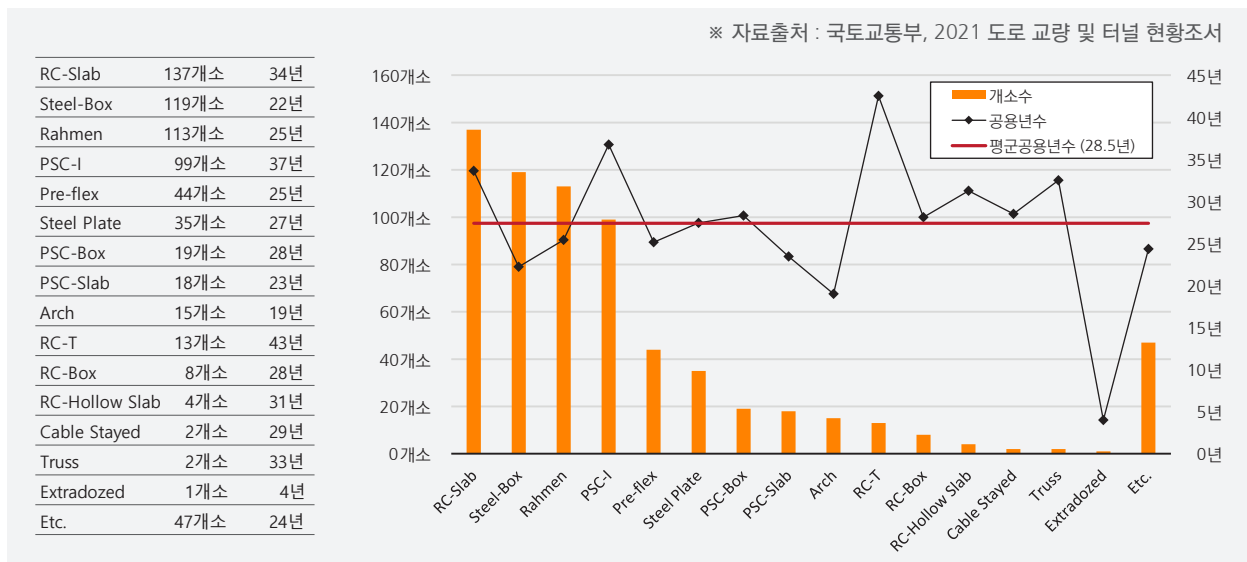


그림1 | 서울시 형식별 교량 분포

### 정밀안전점검 또한 사후 대응책에 불과

시설물의 상태를 판단하는 방법은 현재 안전점검이 유일하다. 시트법에 따라 모든 교량은 주기적으로 정기점검, 정밀정검, 정밀안전진단을 받게 되는데, 그중 가장 면밀한 조사가 실시되는 정밀안전진단의 경우 육안조사 뿐 아니라 각종 측정 및 시험장비가 동원되고, 필요시 특수 기술자까지 투입된다. 조사를 통해 발견된 결함이나 손상은 전부 기록되며, 최종적으로 대상 교량의 안전 등급이 결정된다.

이러한 과정을 되짚어보면 모든 점검과 진단의 목적은 결함이나 손상의 발견에 있다는 것을 쉽게 알 수 있다. 다시 말해 구조물의 상태를 판단하는 기준인 안전등급은 손상의 정도에 따라 결정되게 되고, 후속 조치는 손상 복구 이상의 의미를 지니기 어렵다.

사후대응 방식은 작업자의 접근이 어려운 점검 사각지대에서 이루어지는 손상이나, 정밀한 검사가 아니면 발견되기 어려운 손상, 점검 공백 간 일어나는 불시의 손상 및 파괴 거동에 대비하기 어렵다는 단점이 있다. 실제로 보수 보강이 지연되거나 안전점검에서 고려하지 못한 요소로 각국에서는 시설물이 붕괴되는 참사를 겪기도 한다.

2016년 일어난 정릉천고가 텐던 파단은 이러한 사후대응체계의 단점을 매우 잘 보여주는 일례라 할 수 있다. 해당교량은 2013년, 2015년 정밀안전진단시 안전등급은 B로, 사실상 사용에 지장이 없다고 판단되었으나 주요부재가 파단되는 사고가 발생하였다. 본 사고 이후 정부는 시트법 시행규칙에서 중대한 손상에 케이블을 고려하도록 수정하였으며, 서울시는 지속가능한 기반시설 관리 조례를 발표하는 등 시설물 관리에 무게를 더했다. 그러나 이러한 정책적 대응에도 불구하고 시설물의 관리는 아직까지도 점검 이후 손상에 대처하는 기존의 방식에 의존할 수밖에 없는 실정이다.



그림2 | 미국 미네소타주 교량붕괴



그림3 | 대만 난팡아오대교 붕괴

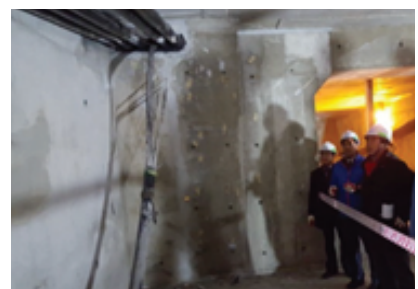


그림4 | 정릉천고가 텐던 파단

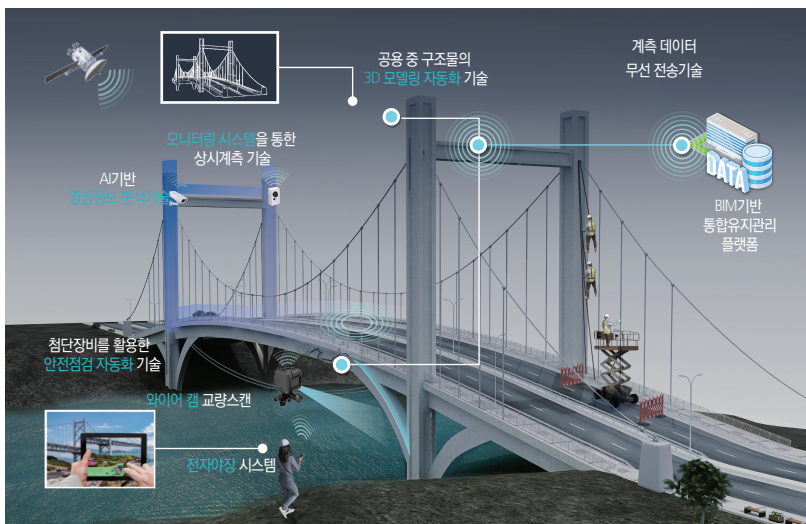
# 02

## 4차산업혁명기술로 시설물 관리 혁신을 - 센서기반 교량 상시감시

### 4차산업혁명과 교량 유지관리 업무의 결합

성능 중심 유지관리는 구조물의 정확한 상태 파악에서 출발한다. 구조해석시 구조물의 상태는 강성(Stiffness)으로 표현되는데, 강성은 재료적 특성과 구조물의 형상으로 결정된다. 설계는 이상화된 재료와 완벽한 형상의 가정 위에서 이루어지므로, 준공도면은 수년 혹은 수십 년간 사용되어 변형된 공용 중 교량의 상태를 정확히 반영하지 못한다. 따라서 교량의 상태는 환경조건에 따른 반응으로 추론할 수밖에 없다. 여기서 반응은 주로 변형된 형상을 말하며 처짐이나 처짐각 등 하중에 의해 즉각 발생하는 역학적 결과뿐 아니라 균열이나 부식과 같은 손상도 포함된다. 손상은 앞서 언급한 안전 점검에서 주로 조사되므로, 상태파악을 위한 부차적 요소는 처짐, 처짐각, 변형률, 가속도와 같은 특별한 계측을 요구하는 물리량이 남는다.

서울기술연구원에서는 기존의 안전진단 결과뿐 아니라, 구조물의 응답 계측데이터 등을 취득하고 이를 유지관리에 활용하는 방안을 제시하였다. 이를 구성하는 대부분의 요소기술은 빠른 속도로 발전하여 현장 적용 검증 단계에 있으나, 계측기는 몇몇 교량에 제한적으로 사용되고 있을 뿐, 경제적, 기술적 문제로 확대 적용 되지 못하고 있었다.



### 교량에 적합한 통신망을 구현하는 센서 네트워크 개발

한강교량의 경우 1km가 넘는 연장을 가지고 있으며, 필요한 측점에서 계측을 하기 위해 센서를 배치할 경우 전력공급 및 계측 데이터 전송이 곤란하게 된다. 이를 해결하기 위해서는 무선 센서망을 구축하여야 하는데, 일직선 형태(Linear Topology)의 센서망을 무선으로 구축하기에는 많은 어려움이 있다. 특히 일직선 형태의 센서망은 각 노드끼리의 통신이 필수적인데, 현재 기성품은 이러한 기능을 제공하지 않는다.

서울기술연구원에서는 이러한 단점을 보완, 해결하기 위하여 교량 계측용 모니터링 시스템을 설계하고 이를 구성하는 저전력·고성능 센서 노드 및 게이트웨이(제어관리 컴퓨터)를 자체 개발하였다. 각 센서 노드는 센서들의 아날로그 신호를 디지털 값으로 변환하고 샘플링하는 데이터 로거 기능과, 인근 센서노드에 무선으로 계측데이터와 제어정보를 송수신하는 통신기능을 갖는다. 센서 노드는 최대 100m의 무선 통신거리를 지니며, 배터리팩으로 전력을 공급받아 1시간 1회 측정 기준 최대 18개월까지 상시 모니터링에 활용될 수 있다. 센서노드의 데이터 로거 기능은 실내시험으로, 통신 기능은 실외시험으로 검증되었으며, 그 결과는 상용 데이터로거 및 이론값과 거의 일치하였다.

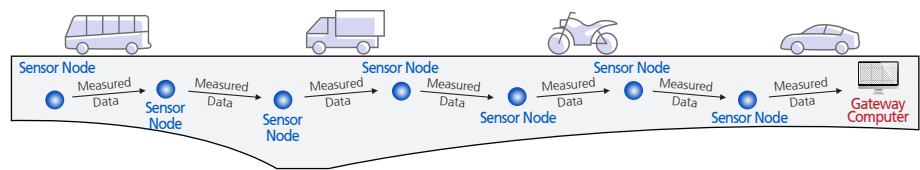


그림6 | 교량 상시 계측을 위한 센서 배치 예시(Linear Topology)

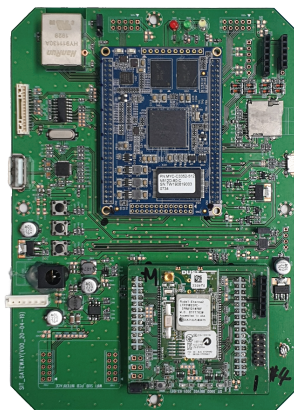


그림7 | 게이트웨이

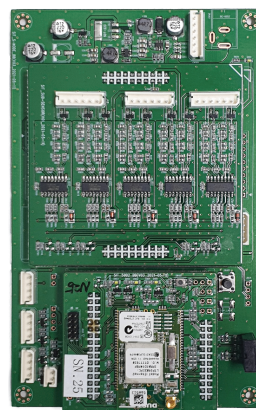


그림8 | 센서노드



그림9 | 실내시험 검증

**실제 교량에 상시감시 시스템을 적용하여 상시 모니터링 수행**

개발된 모니터링 센서 노드는 변형률계, 경사계와 결합되어 현재 가양대교에서 실시간 모니터링 운영 중에 있다. 이와 더불어 서울기술연구원에서는 지난 2020년 시설물 상시감시를 위한 GNSS 시스템을 개발하였다. 이는 ±2mm의 수직오차를 지니고 있어 정밀하게 교량 처짐을 예측할 수 있다. 결과적으로 현재 가양대교는 GNSS 6기, 변형률계 및 경사계 40여 기에 의해 중앙 3경간이 상시 모니터링되고 있다.

교량에 설치된 수십여 개의 센서로부터 측정된 데이터는 서울기술연구원에서 구축한 서버에 자동으로 저장·관리되며, 여기서는 데이터 다운로드뿐 아니라 설치된 센서들의 제어 및 관리가 가능하다. 그러나 이는 개발자용 소프트웨어로 구성되어있기 때문에 보다 편리하고 접근성이 뛰어난 관리 시스템이 필요하다. 이에, 추가적으로 웹기반의 관리 프로그램을 개발하였다. 여기서는 센서들이 설치된 실질적 위치를 3D모델 기반으로 나타내어 직관적인 이해가 가능하며, 센서 ID나 별도의 이름과 상관없이 모델에서 직접 센서를 선택하여 계측값을 그래프로 나타내거나 계측값을 다운로드할 수 있다. 뿐만 아니라, 센서들이 설치된 곳의 온습도나 각 노드의 배터리 상태도 직접 확인할 수 있다.



그림10 | GNSS

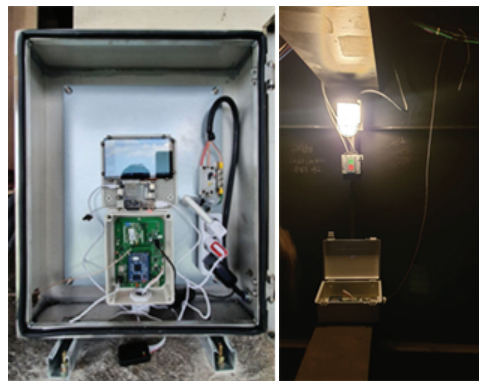
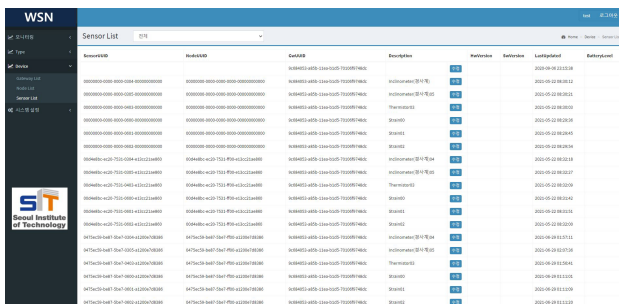


그림11 | 노드 및 게이트웨이 설치



그림12 | 설치센서(변형률계, 경사계)



# 03

## 손상점검에서 상태평가로.. 성능중심 유지관리로의 패러다임 전환

### 단순 알람 시스템에서 계측데이터 분석 시스템 으로의 전환

서울기술연구원에서 개발한 센서가 적용되기 이전에도 서울시의 한강 교량에는 지진계, 변형률계, GNSS등 다양한 센서가 설치되어 있었으며, 이는 서울시 한강교량 온라인 감시시스템과 연계되어 있었다. 이들은 일정 범위 이상의 신호를 감지하여 관리자에게 알림을 주는 기능을 수행하고 있다. 그러나 교량의 형식은 매우 다양하여 계측 허용값을 명확히 규정하기 어려울 뿐 아니라, 재료 또한 선형 범위에서 거동하도록 설계/시공되기 때문에 이러한 방법으로는 매우 특수한 경우를 제외하면 효율성이 떨어지게 된다.

서울기술연구원과 고려대학교 김승준 교수 연구팀은 현장에서 취득된 변위, 변형률, 경사 데이터를 기반으로 공용 중 교량의 형상을 역으로 추정할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 개발된 알고리즘은 3경간 연속 교에 대하여 GNSS 3기만으로도 5% 이내의 오차로 형상을 추정할 수 있으며, 경사계와 변형률계를 동시에 사용할 경우 GNSS 2기와 경사계 3기, 변형률계 3기 만으로도 약 3% 내외의 오차로 전경간 처짐을 추적할 수 있다. 또한, 형상을 추정하기 위한 계측기의 위치를 최적화하는 알고리즘을 추가하여, 실적용시 계측기의 개수를 최소화할 수도 있다.

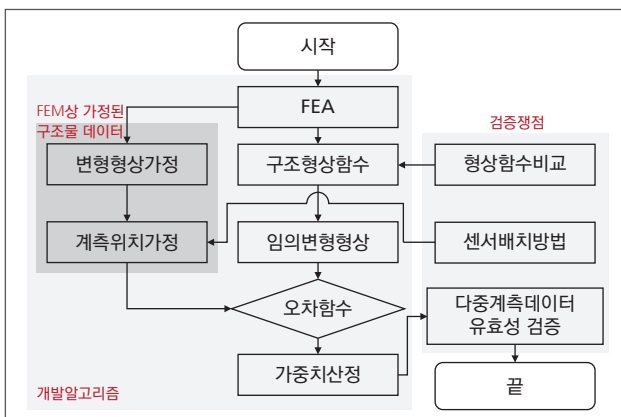


그림15 | 형상추정 알고리즘 개발

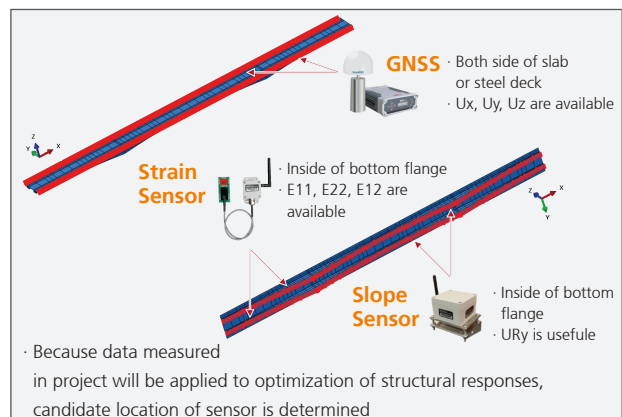


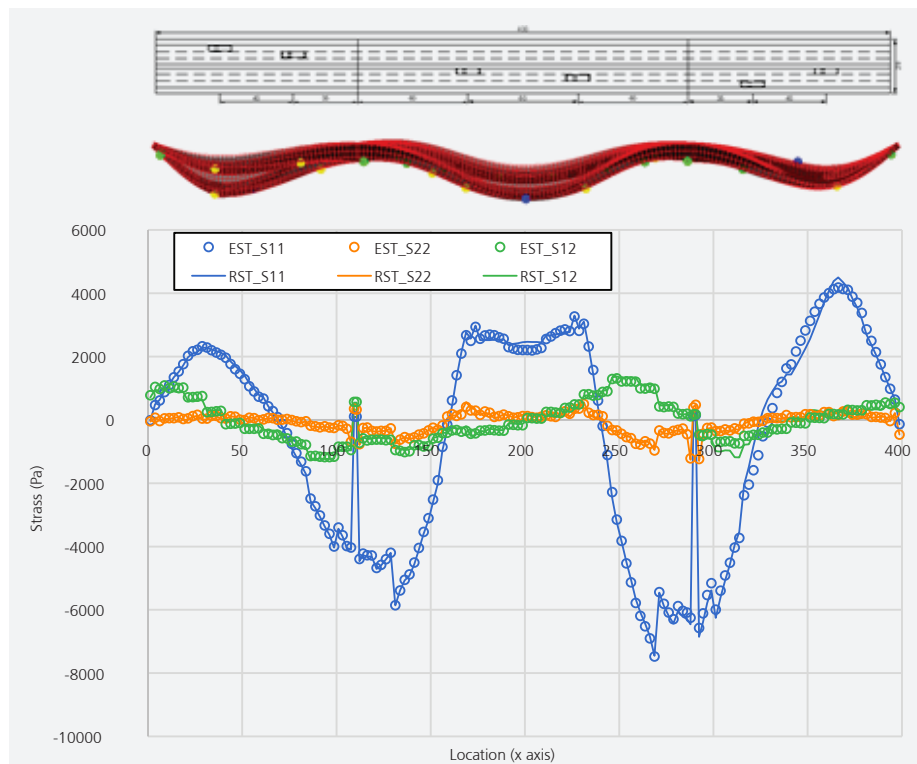
그림16 | 구조해석 및 측정 위치 최적화

**공용 중 교량의 상태를  
 평가할 수 있는 형상  
 추정 알고리즘 개발**

구조해석은 주어진 구조 시스템에 하중이 가해졌을 때 변형되는 구조물 형상(변위)을 계산하고 그로부터 각 부재에 발생하는 내력을 도출해 내는 데에 그 목적이 있다. 이때 구조 시스템은 앞서 언급한 바와 같이 이상적인 재료와 완벽한 기하형상(시공오차 및 국부 손상 무시)을 가정하게 되므로 실제 구조물과는 다소 상이한 결과를 도출하게 된다.

개발된 알고리즘은 제한된 측정점에서 얻어진 계측데이터를 바탕으로 실제 구조물 형상 전체를 함수 형태로 추정한다. 이렇게 추정된 변위는 해당 변형 형상을 만족하는 내력을 계산하는 데 사용될 수 있다. 이를 이용하면 구조물 전체에 작용하고 있는 응력을 도출할 수 있으므로 취약부나 관리가 필요한 부분을 산정해 낼 수 있으며, 접근이 어려워 안전진단이 어려운 부재까지 해석적으로 검토할 수 있어, 보다 면밀한 상태 파악이 가능해진다.

우리나라의 주요교량은 GNSS나 변형률계 등 계측기를 설치, 운영하고 있으며, 특히 사장교나 현수교와 같은 케이블 교량은 주기적으로 구조해석을 실시하고 있다. 이와 같이 계측과 해석이 이미 수행되고 있는 구조물의 경우 적은 예산으로 보다 고도화된 유지관리를 수행할 수 있을 것이라 판단된다.




**그림 17 | 형상추정알고리즘을 이용한 구조물 내력 추정 예시**

## 융합 기술을 활용한 유지관리 업무의 패러다임 변화 선도

2021년 현재 IT기술은 고도로 발전되어 삶의 형태를 무서운 속도로 변화시키고 있다. 그럼에도 불구하고 선진국의 이미지는 여전히 높은 빌딩이나 화려한 교량으로 대변되곤 한다. 그럼에도 불구하고 구조물의 점검은 여전히 육안조사에 많은 부분 의존하고 있으며, 그마저도 손상 발견 이후 대처하는 사후관리의 형태를 고수하고 있다.

구조물의 안전은 재산 및 인명 피해와 직접적인 연관이 있기 때문에 신기술 도입에 다소 보수적인 입장을 취해온 것은 사실이다. 그러나, 구조물의 관리에 적용할 수 있는 요소기술은 매우 빠른 속도로 발전하였으며, 이들을 효율적으로 활용할 수 있는 구체적 솔루션이 개발된다면 토목, 건축분야 또한 IT 기술 못지않은 눈부신 발전을 거듭할 수 있을 것이다.

무선 통신 네트워크를 활용한 계측기술과 형상추정 알고리즘은, 통신, 계측, 고전역학이 융합된 결과로서, 기존에 찾아볼 수 없었던 새로운 해법을 제시하였다. 향후에는 이 또한 빠른 속도로 발전하여 더욱 정확하고 효율적인 시설물 관리 시스템에 기여할 수 있을 것이라 기대한다. 

### 참고문헌

- 1) 국토교통부, 2021 도로 교량 및 터널 현황조사(2021)
- 2) Michal Barker, Bridge Economy and Life Cycle Costs of Steel & Concrete Bridges(2017)
- 3) 한국시설안전공단, 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(2017)
- 4) 서울기술연구원, 서울시 도로시설물 스마트유지관리시스템 도입 방안(2020)
- 5) 서울기술연구원, 시설물 변위정보 획득용 스마트 GNSS 모니터링 기술과 활용 방안(2021)
- 6) 고려대학교, 공용 중 형상추정 기법 개발(2021)
- 7) 한국시설안전공단, 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(2017)
- 8) 한국시설안전공단, 시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침(성능평가 편)(2018)

제 10호 서울시 교량의 성능중심 유지관리 기술

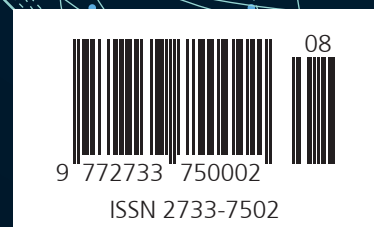
발행인 고인석

편집인 홍보팀 Tel. 02-6912-0934

발행처 서울기술연구원  
03909 서울특별시 마포구 매봉산로37(상암동)  
www.sit.re.kr

발행일 2021년 08월 20일

**SIT** 서울기술연구원  
Seoul Institute of Technology



08

9 772733 750002

ISSN 2733-7502