

정책과 기술 02

## 기반시설 첨단관리 기술개발

# : 외부텐던 손상탐지를 위한 전자기 기반 비파괴검사 센서

박광연 | 한국건설기술연구원 수석연구원

### 1. 서론

국내외를 막론하고 문명화(Civilization)가 진행된 국가는 토목공학(Civil engineering)기술의 정수가 담겨있는 각종 교량이 다수 건설되어 물류와 승객이 강과 골짜기를 빠르게 건너갈 수 있게 한다. 대한민국 역시 문명화 된 국가답게 많은 교량이 건설되어 강을 쉽게 건너 하나의 도시로 묶고, 산간지역의 불리함을 극복해 접근성을 크게 키워왔으며, 섬과 육지를 연결해 섬을 육지화 하는 등 많은 역할을 하고 있다. 이러한 교량의 38%는 Pre-Stressed Concrete(PSC) 구조를 사용해 지어진 것으로 조사되었으며, 대한민국의 경제가 급격하게 성장한 1980 ~ 90년대부터 많은 수의 교량이 지어졌음을 고려하면 30년 이상된 노후 PSC구조의 안전진단 기술 개발이 시급하다는 것을 알 수 있다.

PSC구조는 이름에서 알 수 있듯 Pre-Stressing tendon (PS텐던)이 가장 중요한 역할을 하고 있으며, 크게 외부 PS텐던과 내부PS텐던 두 가지로 분류할 수 있다. 이중 외부 PS텐던은 2016년 서울시 내부순환로 정릉천교의 외부

PS텐던 부식사고로 인한 막대한 경제적, 사회적 손실을 발생시킨 사례가 있어 안전진단의 필요성에 대한 경각심을 전 국민에게 일깨워 주었다.

### 2. 외부PS텐던 비파괴검사기술의 현주소

한국건설기술연구원(이하 건설연)에서는 정릉천 고가교 사례를 계기로 외부PS텐던의 건전성을 평가할 수 있는 기술을 조사하기 위해 국내외 비파괴검사 기술을 대상으로 KICT Blind Test(2016)를 실시했다. 외부PS텐던의 건전성은 단면손상, 응력, 공극 등 3가지 지표를 활용하여 확인할 수 있는데, 응력은 국내외를 막론하고 관련 기술을 가지고 있는 곳이 없었고, 공극은 한 프랑스 기업(Advitam)만 응모해 73% 정도의 탐지율을 보여 주었다. 세 개 지표 중 단면손상이 가장 중요하고 직접적인 지표라 할 수 있는데, 관련된 비파괴기술에 지원한 10여 개 국내외 기업 중 일본의 Tokyo-Rope와 러시아의 Instron 두 개 기업만이 유효한 결과를 보여주었고, 국내 기업은 유효한 결과를 내지 못하였다. 유효한 결과를 보

〈그림 1〉 정릉천교 외부텐던 부식사건 관련 사진들: 왼쪽부터 정릉천교가 교통체증으로 인한 교통체증, 외부텐던이 부식된 사진, 정릉천교가 내부에 배치된 외부텐던, 정릉천교가 부식사건 관련 보도



여준 두 개의 기업도 기술 비용, 사용성, 장비의 크기 및 무게 등을 개선하지 못하면 현장적용에 무리가 있을 것으로 판단하였다.

### 3. '기반시설 첨단관리 기술 개발' 연구단의 비파괴검사 전자기센서 개발

이러한 이유로 건설연은 국토안전관리원에서 주관하고 있는 '기반시설 첨단관리 기술개발' 연구단의 한 세부를 맡아 외부PS텐던을 비파괴검사해 파단이나 부식으로부터 유발된 단면감소를 검사하고 응력 상태를 확인할 수 있는 비파괴검사장비를 개발하고 있다. 건설연은 2019년부터 3년간 수행된 'PSC 구조물 비파괴평가기술(PSC 청진기) 개발' 과제에서 비파괴검사 센서의 개발 방향을 잡은 것을 시작으로, 연구를 확장해 외부PS텐던, 사장교 케이블, 출렁다리 케이블 등을 비파괴검사할 수 있는 기술을 동시에 개발하고 있다. 이 중 '기반시설 첨단관리 기술개발' 연구단은 외부PS텐던을 대상으로 하는 비

파괴검사 장비 개발을 담당한다. 단면손상과 응력은 금속으로 만들어진 외부PS텐던의 자기특성을 이용해 측정하는데, 여기서는 외부PS텐던의 건전성을 평가하는데 가장 중요한 지표인 단면손상을 비파괴검사 하는 기술을 간단히 소개하도록 하겠다.

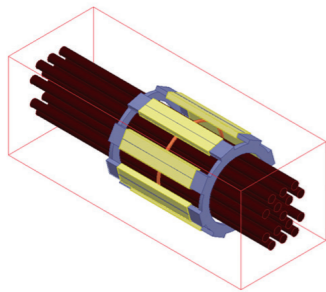
### 4. 외부 PS텐던 비파괴검사 전자기센서의 기본 개념

〈그림 2〉는 개발된 전자기센서가 외부PS텐던에 설치된 개념도를 보여준다. 외부PS텐던(적갈색)은 실제로 덕트와 그라우트로 포장되어 있지만, 덕트와 그라우트의 자기적 성질은 공기(혹은 진공)와 거의 같기 때문에 없는 것으로 가정할 수 있다. 전자기센서는 크게 1차코일(노란색), 2차코일(주황색), 고정틀(보라색) 3개 부분으로 이루어져 있다. 고정틀은 자기장에 반응하지 않는 플라스틱으로 만들어져 있다. 1차코일은 일종의 전자석으로 전기를 흘려 센서 내부에 자기장을 형성하는데, 발생된 자기장의 크기는 센서 내부를 관통하는 금속성분인 외부



PS텐던의 단면적에 대한 함수이다. 2차코일은 외부PS 텐던을 수회 감싸도록 감겨있는데, 1차코일에 가해지는 전류에 변화를 주어 센서 내부의 자기장에 변화를 주면 2차코일에 자기장 변화량에 비례하는 유도전류가 발생한다. 이러한 원리를 이용해 1차코일에 일정한 진폭을 갖는 sine파 형상의 교류전기를 흘리면, 2차코일에는 외부 PS텐던의 단면적 크기와 양의 상관관계를 갖는 진폭의 교류전기가 유도된다. 유도된 교류전기의 진폭을 분석하면 외부PS텐던의 단면적을 추정할 수 있다. 외부PS텐던이 파단되거나 녹슨 경우(산화철은 자기장에 반응하지 않는다) 금속성분을 가진 부분의 단면적이 감소하므로, 단면감소로부터 부식과 파단을 추정하는 것이 가능하다.

〈그림 2〉 전자기센서의 개념도



### 5. 현장 작업에 최적화된 센서의 개발

〈그림 2〉를 보면 알 수 있듯, 이러한 원리를 이용한 센서는 외부PS텐던을 감싸는 폐쇄회로 형태를 갖추어야 한다. 글의 앞에서 소개한 일본의 Tokyo-Rope와 러시아의 Instron도 위에서 소개한 개념과 기본적인 아이디어는 공유한다(물론 세부 내용을 뜯어보면 꽤나 다르다). 하지만 일본과 러시아의 기술은 외부PS텐던을 감싸는 폐쇄회로를 만들기 위해 〈그림 3〉과 같이 현장에서 권선 작업 혹은 그에 준하는 작업을 해야 하며, 이는 상당한 시간을 소요하기 때문에 작업성이 떨어진다. 또한 센서의 상태가 설치할 때마다 바뀌기 때문에 센서의 신뢰도가 떨어지며 센서 부품을 모두 따로 들고 이동해야하기 때

문에 비좁은 교량 내부 통로에서 작업하기에 불리하다.

〈그림 3〉 현장 권선작업 전경



〈그림 4〉 전자기 센서의 분리/조립 된 모습 (실물사진)



반면, 건설연에서 개발한 전자기센서는 〈그림 4〉와 같이 2개로 분리되어 있어 조금만 숙달되면 1~2분 이내에 설치 가능하고, 주요 접합부를 신뢰도 높은 기성 커넥터로 구성해 아무리 반복 설치해도 센서의 신뢰도가 감소하지 않게 했다. 무게도 총 5kg 수준으로 사람이 들고 다니기에 무리가 없는 무게이다. 이 센서를 〈그림 5〉와 같이 설치하고 외부PS텐던을 따라 적당한 속도로 스캔하면 해당 구간을 비파괴 검사하여 단면적의 변화를 확인할 수 있다.

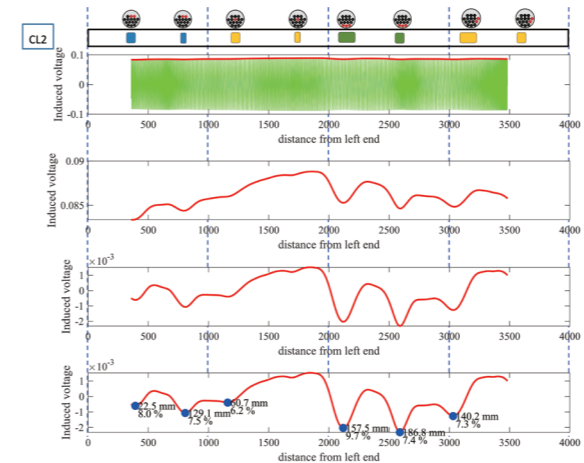
〈그림 5〉 현장 시범 적용 모습 (정릉천교 P20)



### 6. 신호처리 및 인공지능을 이용한 의사결정 기술

〈그림 6〉은 개발된 비파괴장비를 테스트하기 위해 만든 실험체에 적용한 결과이다. 그림 상단에 손상을 모사한 단면적과 손상구간이 도식화되어 있다. 〈그림 5〉와 같은 과정으로 측정 한 결과는 〈그림 6〉의 초록색 선과 같이 나타나는데, 진폭 변화가 미미해 육안으로 구분하기 어렵다. 마그네틱 센서로부터 측정한 결과 분석을 돕기 위해 측정된 신호에 진폭복조 등 몇 단계의 신호처리를 거치면 〈그림 6〉의 빨간색 선과 같은 결과를 얻을 수 있다.

〈그림 6〉 측정된 원시데이터(초록색)와 신호처리 결과(빨간색)



빨간색 선에서는 PS텐던의 손상에 따른 변화가 확연히 구분되는 것을 볼 수 있다(파란색 점). 하지만 이러한 변화가 손상에 의한 변화인지 혹은 잡음인지를 구분하기 위해서는 많은 경험이 필요하다. 이를 해결하기 위해 얇은 신경망을 이용해 측정 구간에 손상이 존재하는지 여부를 판별하는 인공지능을 개발하고 있다. 이를 위해 〈그림 7〉과 같은 다수의 시편을 제작해 인공지능을 학습하는데 사용한다.

#### 참고문헌

1. 한국건설기술연구원, 2022, '전자기를 이용한 텐던 손상탐지 기술개선 보고서', 기반시설 첨단관리 기술개발 연구단, 보고서 원문.
2. 조창빈 등, 2021, 'PSC 구조물 비파괴평가기술(PSC 청진기) 개발', 건설연, KICT 2021-083.

〈그림 7〉 인공지능 학습을 위한 시편들



### 7. 맺음말

건설연은 '기반시설 첨단관리 기술개발' 연구단의 일원으로 PSC구조물의 주요 요소인 외부PS텐던을 비파괴 검사하는 기술을 개발해 2016년 정릉천고가교와 같은 상황이 다시 반복되는 것을 막고자 노력하고 있다.

특히, 자기장원리를 응용해 금속성분으로 이루어진 단면적을 비파괴검사하는 원리를 이용하고 있으며, 외부PS텐던의 파단과 부식을 사전에 감지해 PSC구조물을 사전에 보수보강 할 수 있게 하는 기술이다. 단순히 센서를 개발하는 것뿐 아니라 센서의 사용성을 개선하고 측정된 신호에 신호처리 과정과 인공지능을 적용해 의사결정을 돕는 기술도 함께 개발하고 있다. 또한 같은 원리로 사장교나 출렁다리의 케이블을 비파괴검사하는 기술도 동시에 개발하고 있다. 궁극적으로 본 원고에서 소개한 기술을 완성하여 교량의 선제적 유지보수를 통해 막대한 경제적·사회적 손실을 막는 데 일조할 수 있도록 노력할 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음. (과제번호 RS-2022-00142566)