

특수교량 안전점검 로봇 활용 기술

서동우 KICT 구조연구본부 수석연구원

들어가며

현재 국내 특수교량(계측시스템이 구축되는 케이블 지지교량을 통칭)으로 건설되는 구조물의 대부분은 사장교 또는 현수교로 건설되는 특수교량은 설계 시 요구되는 사용수명이 100년 이상이므로 구조물의 안정성·내구성·사용성 등이 필수적으로 확보되어야 한다(KSCE, 2006). 특수교량에서 핵심 부재 중 하나인 케이블의 손상은 교량의 안전성 저하 및 사용수명을 단축시키는 주요 요인으로서 환경적인 요인(기후·

하중·지진 등)뿐만 아니라, 화재나 충돌 등과 같은 예측하기 어려운 사고 등이 있다. 공용 중인 교량의 경우 케이블 손상이 발생하여 운용이 중단된다면, 이에 따른 경제적·사회적 손실은 막대하다(Na et al., 2014). 국내에서는 서해대교(사장교) 케이블 화재에 의하여 총 144개의 사장재 중 1개가 완전 파단되고, 2개가 부분적으로 손상되는 사고가 발생한 사례가 있다(Gil et al., 2016). 케이블의 안전 및 유지관리를 위한 다양한 점검기술의 개발

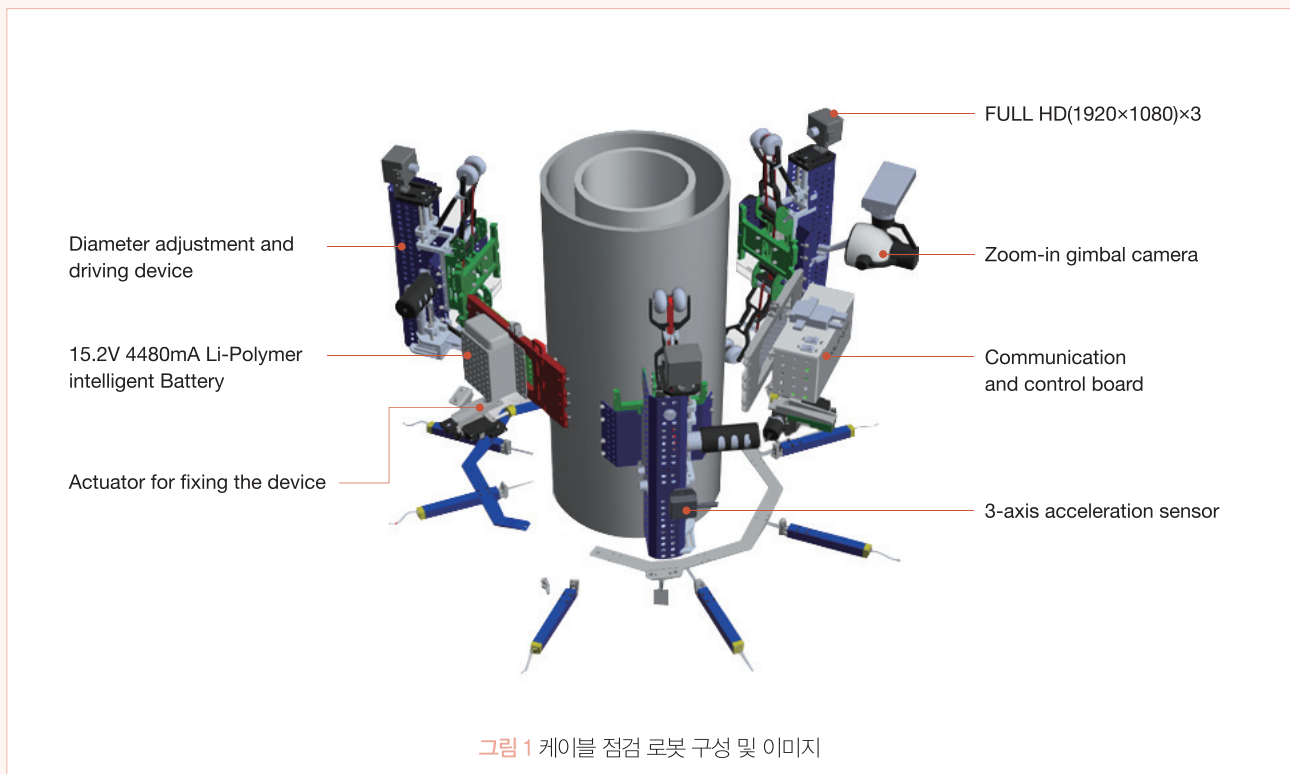


그림 1 케이블 점검 로봇 구성 및 이미지

연구가 진행되고 있지만, 장비의 이동성 및 접근성의 한계로 대형 시설물인 특수교, 특히 케이블에 적용하는 데 한계가 있다. 이를 보완하기 위하여 비파괴검사가 가능한 케이블 점검 로봇 개발이 이루어지고 있다(Kim et al., 2014). 케이블에 적용하기 위해서는 점검 로봇에 무선시스템을 적용하고 자중을 최소화하여 현상 사용성을 확보할 필요가 있다.

이 글에서는 기존 점검 로봇의 단점으로 지적되었던 주행 안정성을 보완하고, 케이블 내부 손상여부를 파악하기 위한 전자기 센서를 탑재한 케이블 점검 로봇을 소개하고자 한다.

케이블 점검 로봇 설계 및 제원

케이블 점검 로봇 제작은 200mm 이상의 대구경 케이블 적용성 및 로봇 주행 안정성 확보에 중점을 두었다. 케이블 점검 로봇의 3차원 이미지 및 주요 장치에 대하여 그림 1에 나타내었다. 로봇의 제원은 510mm×610mm×710mm이고, 무게는 12.8kg으로 경량화하였다. 또한, 내구성을 향상시키기 위하여 로봇의 프레임은 알루미늄으로 제작하였다. 케이블의 외관 촬영을 위해 고해상도 IP카메라(1920×1080 픽셀)를

설치하고 무선 와이파이 공유기로 실시간 케이블 촬영 이미지를 전송할 수 있고, 가속도 센서와 로터리 엔코더를 이용하여 로봇의 이동거리를 계산할 수 있도록 하였다. 등반 시 로봇의 흔들림을 최소화하면서 케이블에서 이동할 수 있도록 3개의 구동부 모터(IIG-32GM, DC12)와 우레탄 바퀴를 장착하고, 가변 직경 조절부(140~300mm)를 만들어 바퀴와 케이블 사이의 부착력을 향상시켰다.

로봇의 무선 원격제어는 IEEE 802.11 an/ac 5GHz 2×2 MIMO를 사용하여 통신거리 10km, 최대 867Mbps 데이터 전송속도를 낼 수 있도록 제작하였다. 케이블 강선 손상 검출은 전자기 센서를 적용하여 검출하는 방식으로 그림 2와 같이 케이블의 파단(혹은 손상)이 발생하였을 경우, 손상 부위에서 양극성이 다시 나뉘는 원리를 이용하였다. 케이블 손상 검출을 위해 점검 로봇에 탑재되는 센싱 장치는 그림 3과 같이 케이블 직경에 따라 조절할 수 있는 관경 조절 장치와 케이블 표면을 이동하기 위한 롤러부로 구성된다. 그리고 케이블 손상 검출을 위한 전자기 센서는 롤러부의 중간 내부에 삽입되어 있다.

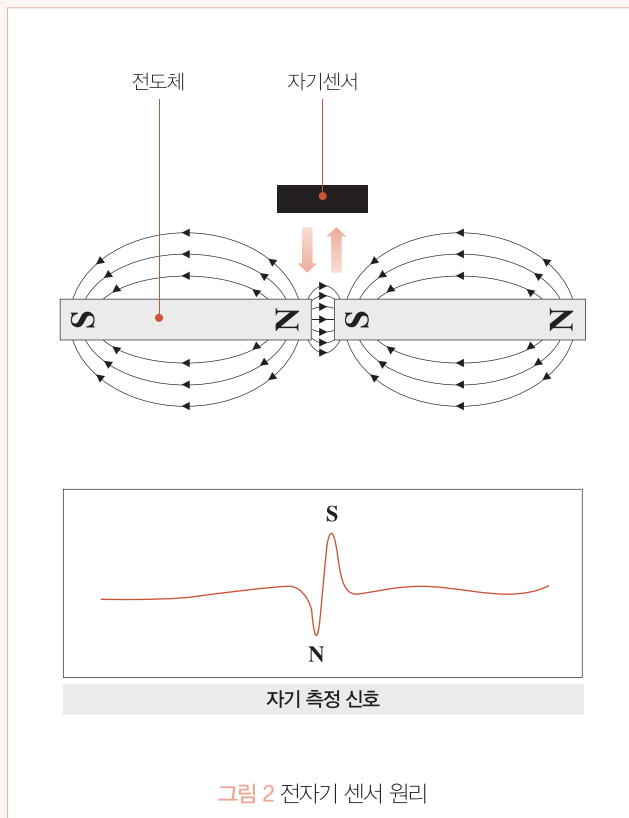


그림 2 전자기 센서 원리

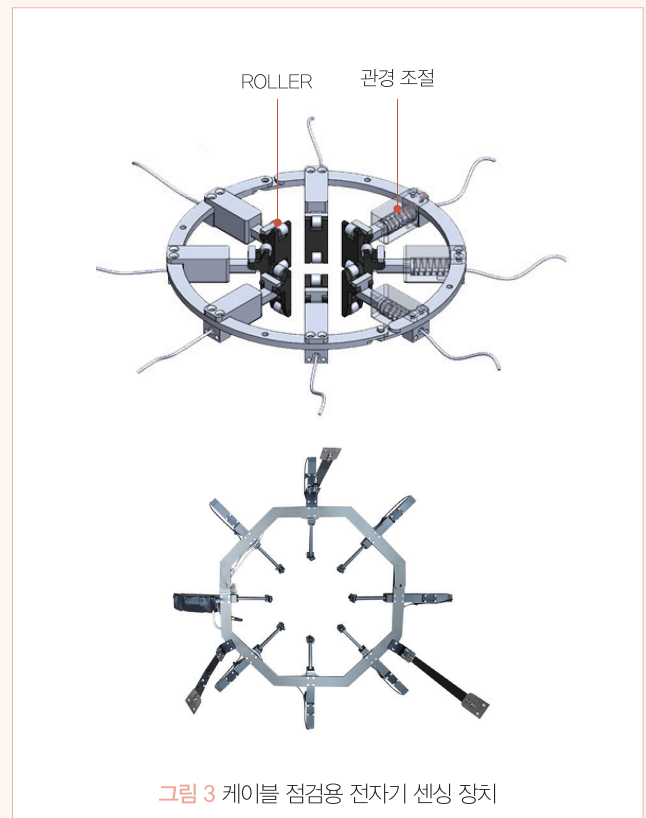


그림 3 케이블 점검용 전자기 센싱 장치

케이블 점검 로봇 성능 평가

케이블 점검 로봇의 주행 성능 평가를 위한 실내외 실험을 그림 4와 같이 실시하였다. 공용 중 교량의 현장 실험을 위하여 케이블 사교 이력이 있는 사장교 1개를 테스트베드 교량으로 선정하였다. 해당 교량은 단경간 타정식 강합성 사장교로서 경간장 400m, 너비 23.9m의 왕복 4차로로 되어있다. 현장 케이블(φ200mm)은 경사각도 27.3도, 실내 실험은 45도에서 수행되었다.

검증 실험결과 등반속도(19cm/s)와 하강속도(20cm/s)로 평가되었으며, 하강 시 발생될 수 있는 미끄러짐에 의한 속도 증가의 경우 로봇이 효과적으로 제어하고 있음을 확인할 수 있다. 그리고 경사각도에 상관없이 주행 속도가 일정한 것을 확인하였다. 추가로 현장 실험에서는 3개의 카메라로 케이블 표면을 실시간 이미지 촬영하였는데, 그림 5와 같이 케이블 육안 점검이 가능한 수준임을 확인하였다. 성능 검증 실험 중 통신 관련 문제는 발생하지 않았다.

케이블 손상 검출 실험은 실내에서 실시하였다. 실내 실험에서 사용된 케이블 실험체는 현재 교량에 사용되고 있는 케이블의

한 종류로 내부 케이블은 1.57mm 강연선 7개로 구성된 1개의 번들(Bundle) 20본으로 구성되어 있다. 케이블 케이스의 경우, 주행 능력 실험에서 사용된 동일한 HDPE(고밀도 폴리에틸렌)관을 사용하였다. 케이블 손상 검출을 위하여 인위적으로 손상유형을 그림 6과 같이 모사하였다. 절단 손상의 경우는 단면 절단 정도에 따라 30%, 50% 그리고 100% 절단(파단)으로 세분화하였고, 이탈 손상은 케이블이 정리된 상태에서 외부로 돌출된 경우를 재현하였다. 단절의 경우 1개의 케이블을 짧게 제작하였다.

실내에서 실시한 실험 결과를 그림 7에 나타내었다. 그래프에서 X축은 시간이며, Y축은 전자기 센서 측정값으로 손상(절단)이 발생한 지점에서는 전자기 센서 측정값의 위상이 180도 변화함을 알 수 있다. 한편 단절에서는 전자기 센서 측정값의 위상이 변화하지 않지만, 자기장의 크기가 커짐을 확인하였다. 실험 결과의 신뢰성 확보를 위해서는 본 연구에서 진행된 것보다 더 다양한 손상 유형 및 반복성을 확보한 추가 실험이 필요하다고 여겨진다.



그림 4 케이블 점검 로봇 성능 검증 실험 전경



그림 5 케이블 점검 로봇 영상촬영(외관조사) 성능



그림 6 케이블 점검 로봇 내부 탐상 성능 평가를 위한 실험체 구성

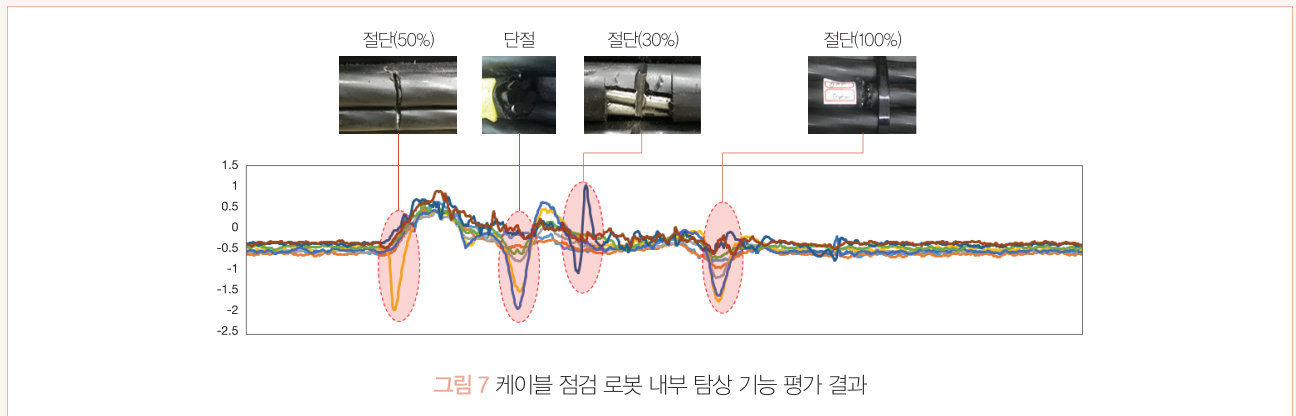



그림 7 케이블 점검 로봇 내부 탐상 기능 평가 결과

맺음말

이 글에서는 200mm 이상의 대구경 케이블 측정이 가능한 케이블 점검 로봇 개발에 대한 내용을 소개하였다. 개발된 케이블 점검 로봇은 주행능력, 주행 안정성 및 무선 통신 성능을 향상시켜 현장 적용성을 확대시켰다. 전자기 센서를 이용한 케이블 내부 손상 유무의 검출 가능성이 실내 실험을 통하여 검증되었다. 하지만 추가적인 실험을 통해 케이블 손상 유무 이외에 손상 정도 및 손상 종류를 판단할 수 있는 분석 알고리즘을 개발함으로써 점검 효율성을 보다 향상시킬 필요가 있다고 판단된다. 점검 로봇을 활용한 시설물 유지관리 기술이 지속적으로 발전되어 적용된다면 시설물 안전관리에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대한다. 본 케이블 점검 로봇은 국토교통부의 예산 지원으로 개발되었으며 현재 국토안전관리원으로 인계되어 일반국도 특수교 유지관리에 활용되고 있다. 

참고자료

- KSCE, Specification on Design of Cable-supported bridge, Technical Report, Korean Society of Civil Engineers, Korea, 2006.
- Na, H.H., Kim, Y.H. and Shin, S.(2014), Analytical Method to Determine the Dynamic Amplification Factor due to Hanger Cable Rupture of Suspension Bridges, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 18(6), 301-308.
- Gil, H., Hur, H. and Kwon, H.(2016), Cable Fire due to Lightning and Repair of Seohae Bridge, Korean Society of Civil Engineers Magazine, 64(7), 16-19.
- Kim, J.-W., Choi, J.-S., Lee, E.-C. and Park, S.-H.(2014), Field Application of a Cable NDT System for Cable-Stayed Bridge Using MFL Sensors Intergrated Climbing Robot, Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, 34(1), 60-67.