

# 누설자속센서를 탑재시킨 이동로봇을 이용한 사장교 케이블 비파괴검사 시스템의 현장 적용

## Field Application of a Cable NDT System for Cable-Stayed Bridge Using MFL Sensors Integrated Climbing Robot

김주원\*, 최준성\*\*, 이은찬\*\*, 박승희\*\*\*†

Ju-Won Kim\*, Jun-Sung Choi\*\*, Eun-Chan Lee\*\* and Seung-hee Park\*\*\*†

**초 록** 본 연구에서는 사장교의 핵심부재인 케이블 점검을 위한 자동화 검사 시스템을 개발하였다. 강자성 체로 이뤄진 연속체 구조물인 케이블의 내외부 검사에 적합한 비파괴검사법으로는 선행연구를 통해 검증된 누설자속탐상법이 적용되었고, 홀센서와 영구자석을 이용하여 다채널의 누설자속 측정용 자기센서헤드를 제작하였다. 또한 케이블 검사의 자동화로 접근성을 높이기 위해 사장교 케이블을 따라 이동할 수 있는 바퀴굴림 방식의 케이블 등반 로봇을 설계 및 제작하였고, 로봇을 다양한 디바이스에서 모니터링 및 제어하기 위한 컨트롤 프로그램을 제작하였다. WLAN 방식의 무선통신기술을 적용하여 원격으로 계속 데이터 전송 및 로봇 제어를 가능하게 하였다. 최종적으로 본 연구를 통해 개발된 세부 기술들이 연동된 누설자속탐상법 기반 케이블 이동형 진단 시스템을 이용하여 실제 운용중인 서해대교의 케이블을 대상으로 현장 시험을 수행함으로써 본 시스템의 현장 적용성을 검증해보았다.

**주요용어:** 케이블 비파괴검사, 누설자속, 케이블 이동로봇, 원격진단

**Abstract** In this study, an automated cable non-destructive testing(NDT) system was developed to monitor the steel cables that are a core component of cable-stayed bridges. The magnetic flux leakage(MFL) method, which is suitable for ferromagnetic continuum structures and has been verified in previous studies, was applied to the cable inspection. A multi-channel MFL sensor head was fabricated using hall sensors and permanent magnets. A wheel-based cable climbing robot was fabricated to improve the accessibility to the cables, and operating software was developed to monitor the MFL-based NDT research and control the climbing robot. Remote data transmission and robot control were realized by applying wireless LAN communication. Finally, the developed element techniques were integrated into an MFL-based cable NDT system, and the field applicability of this system was verified through a field test at Seohae Bridge, which is a typical cable-stayed bridge currently in operation.

**Keywords:** Steel Cable NDT, Magnetic Flux Leakage, Cable Climbing Robot, Remote Inspection

### 1. 서 론

최근 사장교, 현수교 등의 초장대 교량과 같이 강케이블을 이용한 사회기반시설물의 건설이 활발히 이루어지고 있는데, 이러한 구조물에서 케이블 부재는 구조물의 하중 대부분을 지지하는 핵

심적인 역할을 한다. 이러한 케이블 부재는 부식 또는 단선과 같은 단면적 손상이 발생할 수 있고, 이는 손상부의 응력집중을 야기해 구조물 전체의 붕괴로까지 이어질 수 있는 위험성을 가진다. 이러한 위험을 예방하기 위해 케이블 외부 손상 및 내부 손상을 조기에 찾아낼 수 있는 효과적인 케

[접수일: 2013. 9. 30, 수정일: (1차: 2013. 10. 23, 2차: 2013. 11. 20, 3차: 2013. 12. 2) 게재확정일: 2013. 12. 3] \*성균관대학교 u-City공학과, \*\*㈜한국유지관리, \*\*\*성균관대학교 건축토목공학부, †Corresponding Author: School of Architectural, Civil & Environmental Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea (E-mail: shparkpc@skku.edu)

이불 비파괴 검사법이 요구되고 있지만 여러 가닥의 와이어로 이루어져 내부를 확인하기 힘든 케이블 부재의 구조적 특성과 검사 장비 및 인력의 낮은 접근성으로 인해 적절한 검사법이 미비한 상황이다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 본 연구에서는 강케이블 부재에 적합한 비파괴검사(non-destructive test: NDT) 기술로 자기센서를 선정하여 적용하였다. 자기센서는 뛰어난 신뢰도와 재현성의 장점을 가져 항공, 선박 등을 포함한 다양한 구조물의 모니터링에 널리 사용되고 있다[1-4]. 자기센서는 그 종류가 다양하며 대상 구조물의 특성에 맞춰 사용하게 되는데[5], 본 연구에서는 현재 배관구조물 및 엘리베이터 와이어 등의 연속체 구조물을 대상으로 빠른 속도의 검사가 가능한 장점을 가져 폭넓게 적용되고 있는 누설자속탐상법(magnetic flux leakage: MFL)을 강케이블에 적합한 검사법으로 선정하였다[6-10].

이의 적용가능성 검증을 위해 본 연구에 앞선 선행 연구로서 다채널의 누설자속 측정용 자기센서를 이용하여 강 케이블에 발생한 국부단면손상을 검색하고, 일반극치분포 기반의 임계값 설정을 이용하여 객관적으로 손상을 구분하는 실험을 수행하였다[11]. 그런데 대부분의 누설자속 기반 비파괴검사 시스템은 주로 고정식으로 설치되어 시험체가 이동하는 구조물에 주로 적용되고 있으나, 최근 이동형 로봇에 검사 장비를 탑재하여 수행하는 방식이 고정된 구조물을 대상으로 시도되어지고 있다. 본 연구에서는 인력 검사가 어려운 사강교의 케이블 부재를 대상으로 검사 장비의 접근성을 확보하기 위해 케이블 전역에 걸쳐 이동하며 비파괴검사를 수행할 수 있는 바퀴 굴림 방식의 케이블 등반 로봇을 설계 및 제작하였다. 또한 시·공간상에 제약없이 관리자가 데이터를 수집할 수 있게 원격의 컨트롤 디바이스와 무선으로 실시간 데이터 송수신이 가능한 통신 시스템을 탑재하였다. 마지막으로 서해대교 내부의 케이블 부재를 대상으로 자기센서 헤드와 케이블 등반로봇의 연동 실험을 통해 시스템의 성능을 검증하였다.

## 2. 이동로봇 탑재용 누설자속 측정 자기센서 기반 NDT 시스템 개발

이동형 누설자속 탐상법 로봇을 개발하기 위한

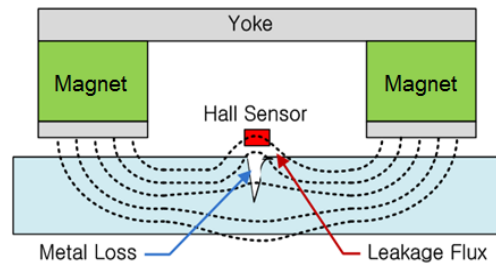


Fig. 1 MFL based damage detection

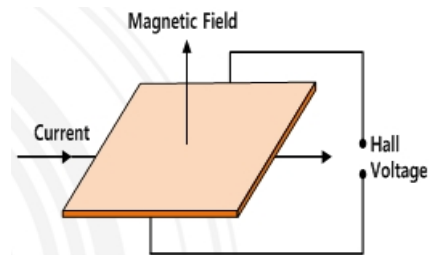


Fig. 2 Hall effect

선행 연구로 누설자속 측정용 자기센서 개발을 수행하였다[11]. 누설자속 측정용 자기센서의 국부손상 검색 원리는 다음과 같다. 강재 시편이 자화되어 있을 때 강재는 자석과 같은 특성을 띄게 되는데, 이러한 강재에 국부손상이 발생했을 때 손상 틈의 공기는 자석보다 자기저항이 매우 크기 때문에 Fig. 1과 같이 손상부에 누설자속이 발생하게 된다.

이러한 원리에 기초하여 홀센서를 이용, 누설되는 자속을 계측함으로써 강재의 국부손상을 검색할 수 있다. Fig. 2와 같이 홀센서가 자기장에 놓였을 때 전류와 자기장의 방향에 따라 홀센서의 옆 양단에 전위차, 즉 홀 전압이 발생하게 되는데, 이를 홀효과라고 한다[5]. 누설자속의 세기는 홀효과에 의해 데이터 수집 장치(DAQ, data acquisition system)에서 계측 가능한 전압 값으로 변환되어 계측되어 진다[12]. 실제 시험시 자기장에 놓은 시편의 자화는 Fig. 3과 같은 초기 자화 곡선을 따르게 되는데, 누설자속 탐상법은 일관된 시험결과를 얻기 위해 반드시 포화자화 상태에서의 검사수행이 필수적이다. 따라서 자화를 위해 시편을 충분히 포화자화시킬 수 있는 c 이상의 자기장 강도를 가지는 강력한 영구자석 또는 전자석을 이용한다.

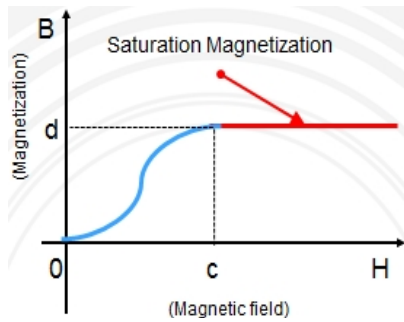


Fig. 3 Initial magnetization curve

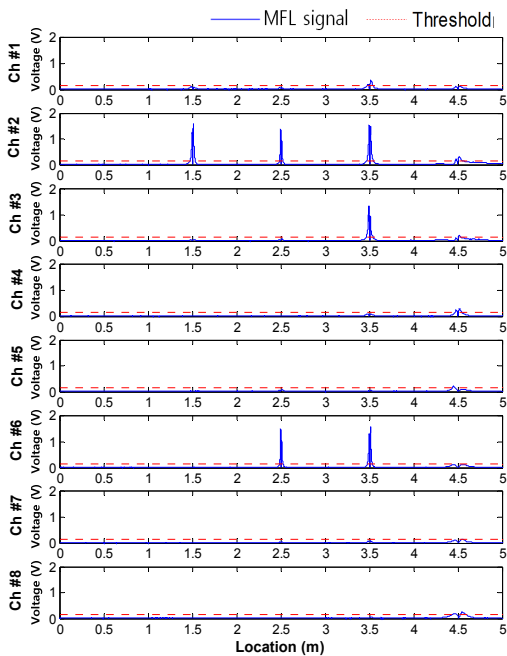


Fig. 4 The magnetic flux signals with threshold

본 연구진은 선행 연구에서 위와 같은 원리에 기초하여 다중채널로 구성된 자기센서를 제작하였고 이를 이용한 실험적 연구를 수행하였다[11]. 그 결과 Fig. 4와 같이 케이블의 손상부위에 해당하는 센싱채널에서는 누설자속 신호가 설정된 임계값을 넘어가는 것을 보임으로써 누설자속탐상법을 이용한 케이블의 국부손상 검색이 가능함을 검증하였다[13].

본 연구에서는 이동로봇과의 연동시험을 위하여 대상 케이블의 직경(15.4 cm)에 적합한 16 cm의 내경을 가지는 누설자속 측정용 자기센서헤드를 선행연구와 유사하게 제작하였다. 홀센서의 경우 자기센서의 바닥면에 위치하였기 때문에 시



Fig. 5 MFL sensor head for field test

편과의 리프트오프는 평균 0.3 cm 였다. Fig. 5와 같이 홀센서를 원주방향으로 배열하여 14채널의 센싱부를 구성하였다. 자화부의 경우 포화자화를 위한 70G의 자기장 세기가 충분히 형성되도록 7000G의 표면자속밀도를 가지는 N35 네오디움 영구자석을 양단에 사용한 요크 2개를 센서헤드의 상하부에 대칭되게 구성되었다.

각 센서간의 감도차를 보정하기 위해 둘레방향으로 동일한 깊이의 손상을 가진 강봉을 이용하여 자속신호를 계측하였고, 이때 각 채널에서 동일한 크기의 누설자속신호가 출력되도록 DAQ의 게인 값을 조절하는 과정을 통해 센서간의 감도를 실험적으로 보정하였다.

### 3. 사장교 케이블 등반 로봇 개발

#### 3.1. 이동로봇 하드웨어 설계 및 제작

본 연구에서는 인력의 접근이 힘든 케이블 검사에 있어 접근성의 문제를 해결하고 무인 자동화 비파괴검사의 수행을 위해 등반 로봇을 개발하였다. 고정되어있는 사장교 케이블의 경사면을 이동하며 탑재된 자기센서 기반의 비파괴검사를 수행할 수 있도록 Fig. 6과 같이 바퀴굴림 방식의 케이블 등반 로봇을 제작하였고 로봇의 주요 사양은 Table 1과 같다.

제작한 이동로봇은 AC 220V의 상용전원을 사용하여 구동되며 최대 60도의 경사를 최고속도 0.2 m/s로 이동가능하다. 약 20kg 내외의 검사 장비를 충분히 수송하기 위해 최대 45kg까지의 유효탑재 중량을 확보하였다.

교량 케이블과 이동로봇간의 부착력은 공압식, 모터 제어식, 자석 부착식으로 나눌 수 있는데

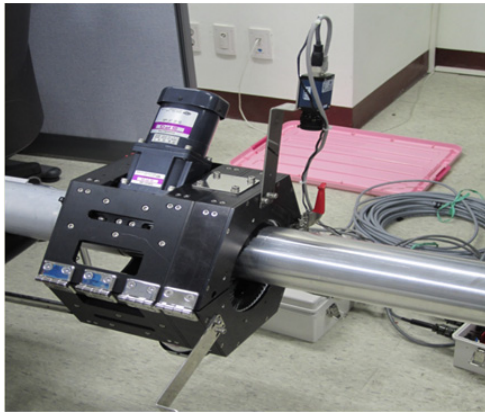


Fig. 6 Cable climbing robot

Table 1 Specification of cable climbing robot

Specifications of cable climbing robot	
Power	AC 220V
Driving motor	DC Servo Motor
Control system	Wireless remote control
Weight	27 kg
Disposable weight	45 kg
Roller type	Urethane roller
Maximum climbing angle	60°
Climbing speed	0~0.20m/s (Program control)
Controller	Tablet PC, Laptop
Data transmission distance	0~600m

본 연구에서는 자유구간에 대한 이동 성능이 우수한 모터제어식을 채택하였으며, 이동 방식은 이동 속도가 우수하고 원하는 구간에 로봇을 위치시키기 수월한 바퀴 이동 방식을 선정하였다. 케이블과 바퀴의 접촉에 의한 손상을 최소화하기 위해 우레탄 바퀴를 적용하였으며, 바퀴와 케이블간의 부착력을 향상시키기 위하여 우레탄 바퀴를 U형으로 설계/제작 하였다. 또한 경사면에서의 슬립을 최소화하기 위해 케이블 상단 부착면에 두 개의 구동발생부를 “^”형으로 배치하고 하단에 두 개의 부착력 발생부를 설계 적용하여 이동의 안정성을 확보하고 슬립을 최소화하였다.

다양한 외경을 가지는 사각교 케이블에 대응하기 위해 부착력 발생부는 Fig. 7과 같이 두 개의 스크류와 너트 방식으로 슬라이더가 이동함으로써 타겟 직경(90~200 mm)에 대응이 가능하도록

하였고 중간에 스프링을 삽입하여 장애물 승월을 가능하게 하였다. 구동력 발생부는 Fig. 8과 같이 설계되었으며 모터의 구동력을 정확히 전달하기 위해 와이어가 내장된 우레탄 타이밍 벨트를 제작하여 적용하였다.

Fig. 9에 나타낸 main frame은 hinge를 사용하여 아래 부분을 개폐 가능하도록 설계하여 탈부착이 용이하도록 하였으며, 착탈이 가능한 전장 제어부를 아래로 설계 배치하여 하중을 아래로 향하게 하였으며, 또한 자동수평제어 기술을 적용함으로써 등반시 main frame의 회전을 최소화하였다. 이동로봇의 이동 거리 측정을 위한

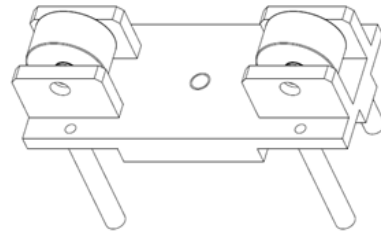


Fig. 7 Adhesion force generator

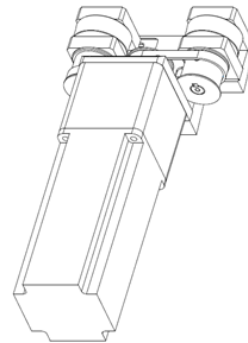


Fig. 8 Driving force generator

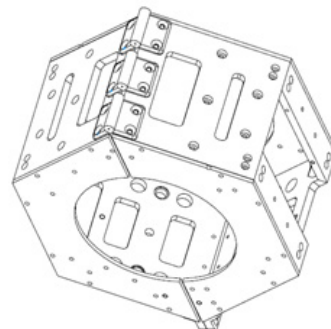


Fig. 9 Main Frame

device로 스프링을 적용하여 케이블에 접촉이 용이하도록 제작한 인코더부를 설치하였다. 또한 시스템의 안전성 확보를 위하여 비상운전시스템을 적용하였는데 주전원 off시 로봇이 자동으로 저속으로 후진하여 장비를 케이블 하단에서 회수할 수 있게 하였고, 주전원이 다시 on되면 이를 자동 감지하여, 후진을 멈추고 정지 상태에서 점검자의 이동명령을 대기하도록 설계하였다.

### 3.2. 이동로봇 제어 소프트웨어 개발

이동로봇을 제어하기 위한 제어 프로그램을 개발하였다. Fig. 10에 나타난 이동로봇 제어 프로그램의 기능 및 구성은 아래와 같다.

이동속도, 이동거리 및 기울기 등과 같은 이동로봇의 작동상태를 실시간으로 표시되게 화면을 구성하였고 데이터의 송수신을 위한 접속 상태를 색상의 구분을 통해(connect: green, disconnect: red) 나타내었다. 또한 이동로봇의 이동속도 제어 뿐만 아니라 반복이동을 위한 구간 설정, 구간 반복 횟수 지정, 지정위치 설정 및 지정위치 이동 기능, 지정구간 무한 반복 이동 기능, 이동거리 초기화 기능 등을 제어할 수 있게 제어 프로그램을 구성하였다.

### 3.3. 데이터 수집 및 무선 통신 시스템 구성

본 연구에서는 케이블 등반로봇에 가중되는 NDT 장비의 하중을 최소화하기 위하여 기존의 시스템에 비해 가벼운 데이터 수집 장비를 제작 및 구성하였다. 센서헤드의 각 홀센서에서 계측된 신호는 Fig. 11과 같이 제작된 16채널의 터미널 보드를 거쳐 Fig. 12에 보인 콤팩트 DAQ에서 디지털신호로 수집된다. DAQ에서 수집된 신호는 TCP/IP의 이더넷 통신을 통해 케이블 등반 로봇의 전장제어 장치로 전송되어지도록 구성하였다.

이동로봇의 움직임 및 데이터 전송을 위한 통신 방식은 2.4 GHz WiFi(WLAN)을 사용하였다. WLAN은 2.4/5 GHz 대역을 사용하며 최근 IEEE 802.11n 적용 기술의 발전으로 최대 600 Mbps, 유효전송속도 180 Mbps의 고속데이터 전송이 가능하다. 또한 사정교 케이블의 특성상 등반로봇의 데이터 송신부와 지상의 데이터 수신부 사이에 장애물이 없는 점을 고려하여 Fig. 13과 같이



Fig. 10 Robot operating program

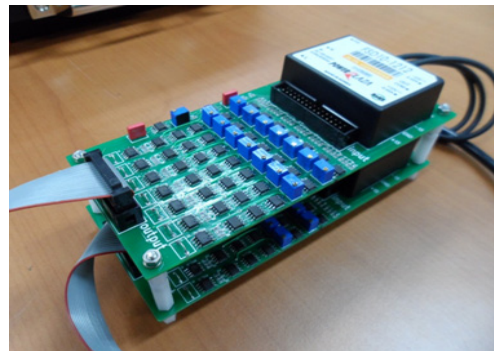


Fig. 11 Terminal board



Fig. 12 Compact DAQ



Fig. 13 Directional antenna

지향성 안테나를 적용함으로써 약 600 m 이상의 통신거리를 확보하였다.

### 3.4. 이동로봇 현장 성능 검증 실험

개발된 이동로봇의 정상 이동 여부를 확인하고, 문제점 등을 파악하여 장비 성능을 보완하기 위해서 사장교 케이블이 시공되어져 있는 인천대교에서 이동로봇 성능 검증 실험을 Fig. 14와 같이 수행하였다.

전원공급은 유선으로 AC 200V 사용전원을 공급해 주었고 모바일 PC를 이용해 로봇의 이동 속도 및 경로를 제어하였다. 총 150 m 점검 구간에서 로봇제어 프로그램에 의한 이동로봇 무선 이동 제어 시험, 자동수평 조절시스템( $\pm 10^\circ$  유지) 및 이동로봇 비상운전 시스템 시험, 이동로봇 케이블 관경 변화 적용 시험을 하였다. 실험 대상 케이블은 기온의 영향으로 표면에 수분이 얼은 상태였으나 실험결과 150 m 이동 시험 중 문제 없이 케이블을 정상적으로 이동하였으며, 무선 통신역시 장애 없이 정상적으로 이뤄졌다.

이동로봇 이동 속도는 주탑 방향 전진에서 0.068 m/s~0.16 m/s로 속도를 가변하여 150 m 도달 시간은 22분이 소요되었으며, 평균이동속도는 0.11 m/s이었다. 거더 방향으로 후진시 0.15 m/s~0.17 m/s로 속도를 가변하여 150 m 도달 시간은 15분이 소요 되었으며, 평균이동 속도는 0.16 m/s 이었다. 무선 시스템간 네트워크 연결상태를 점검하기 위해 PING 테스트를 실시한 결과 패킷 최소 왕복시간은 2 ms, 최대 5 ms, 평균 3 ms로 양호하였으며, 에러율은 0%로 측정되었다.



Fig. 14 Field test for performance of cable climbing robot

### 4. 이동로봇을 이용한 누설자속 NDT 현장 적용 실험

본 연구를 통해 개발된 케이블 등반 로봇과 누설자속탐상장치와의 연동 성능 점검을 위한 실험을 수행하였다. 시험은 아래 Fig. 15와 같이 서해대교 콘크리트 거더 박스 내부의 지름 15.4 cm의 실제 정상적으로 운용중인 케이블을 대상으로 수행하였다. 케이블 등반 로봇은 케이블의 5 m 구간에서 0.1 m/sec의 정속으로 이상 없이 반복적으로 왕복 이동하였고 동시에 200 Hz의 속도로 14채널의 홀센서에서 동시에 이상 없이 자속 신호를 계측하였다.

계측된 신호는 WLAN 무선통신을 통해 실시간으로 에러 없이 하단부의 안테나와 연결된 노트북으로 수집되었고 각 채널에서 수집된 자속 신호를 Fig. 16에 나타내었다.

손상 판단의 객관적 판단을 위해 본 연구에서는 사전 연구를 통해 손상 판단의 기준이 되는 임계값을 설정하였다. 임계값의 설정을 위해 먼저 정상상태의 현장과 동일한 케이블을 대상으로 자속 신호를 수집하였고, 수집된 신호를 통계학적 방법인 일반극치분포를 이용하여 99.99% 신뢰도의 임계값을 구하였다[13]. 임계값은 0.617V였으며 이를 Fig. 16 상에 빨간색의 점선으로 나타내었다.

검사 결과 대상 구간에서는 모든 채널에서 누설자속 신호가 발견되지 않았고, 따라서 설정된 임계값을 초과하는 케이블 손상 의심부 역시 검색되지 않았다. 본 현장 시험을 통해 케이블 등반 로봇과 누설자속탐상장치를 연동한 케이블 진단 시스템은 실제 현장의 케이블에서 정상적으로 이동 및 작동 가능함을 확인하였고 탑재된 검사



Fig. 15 Field test for integrated cable NDT system

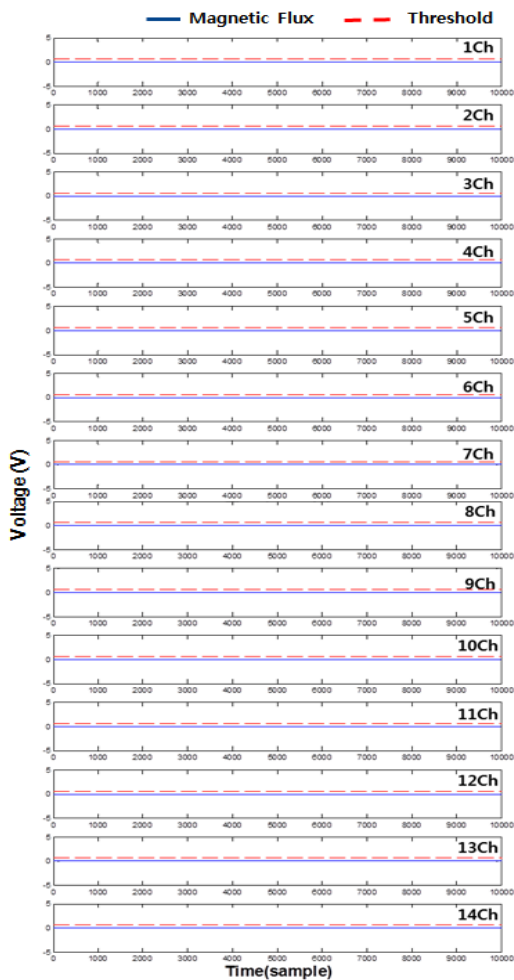


Fig. 16 Cable NDT result from field test

장비의 다채널의 센서에서 이동 중 측정된 자속 신호는 무선통신을 통하여 손실 없이 실시간으로 원거리의 관리자에게 전송 가능함을 확인하였다. 이를 통하여 본 케이블 NDT 시스템의 실제 사장교 케이블 현장에의 적용 가능성을 확인해 볼 수 있었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 사장교의 핵심부재인 케이블 점검을 위하여 자기센서헤드와 케이블 등반로봇의 제작 및 통합을 통하여 자동화된 케이블 NDT 시스템을 개발하였고, 실제 사장교를 대상으로 현장검증시험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 강자성체로 이뤄진 연속체 구조물인 사장교 케이블의 검사에 적합한 비파괴검사법으로는 누설자속탐상법이 적용되었고, 홀센서와 영구자석을 이용하여 다채널의 누설자속 측정용 자기센서헤드를 제작하였다.
- (2) 케이블 검사의 접근성 향상을 위해 사장교 케이블을 따라 이동할 수 있는 바퀴굴림 방식의 케이블 등반 로봇을 설계 및 제작하였고, 이를 원격 제어하기 위한 소프트웨어를 제작하였다.
- (3) 현장시험 결과 제작된 케이블 등반 로봇은 이상 없이 150 m의 사장교 케이블을 안정적으로 이동하였다.
- (4) 원격 계측 데이터 전송 및 로봇제어를 위해 WLAN 방식의 무선통신기술을 적용하였고 현장 시험 결과 데이터의 손실이나 오작동 없이 실시간으로 데이터 송수신이 가능하였다.
- (5) 세부 기술들이 연동된 누설자속탐상법 기반 케이블 이동형 진단 시스템을 이용하여 실제 운용중인 서해대교의 케이블을 대상으로 현장 시험을 수행한 결과 통합시스템은 정상적으로 케이블 검사를 수행하였고 이를 통해 본 케이블 진단 시스템의 현장 적용성을 확인할 수 있었다.

추후 다양한 환경적, 물리적 변수를 고려한 랩 실험 및 현장 적용 실험을 통해 본 연구를 통해 개발된 케이블 NDT 시스템을 검증 및 개선한다면 실제로 미래도시의 다양한 케이블 구조물 모니터링에 효과적으로 사용 가능한 NDT 기술이 될 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 건설기술혁신사업 초장대 교량사업단의 연구비지원(08기술혁신E01) 및 국토해양부의 u-City 석·박사과정 지원사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] K. Mandal, D. Dufour, T. W. Krause and D. L. Atherton, "Investigations of magnetic flux leakage and magnetic Barkhausen noise signals

- from pipeline," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 30, No. 6, pp. 962-973 (1997)
- [2] S. Sumitro, A. Jarosevic and M. L. Wang, "Elasto-magnetic sensor utilization on steel cable stress measurement," *Proc. 1st FIB Congress*, pp. 79-86 (2002)
- [3] M. L. Wang, G. Wang and Y. Zhao, "Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring," Springer, Dordrecht, Netherlands (2005)
- [4] J. Lee, J. Hwang, J. Jun and S. Choi, "Nondestructive testing and crack evaluation of ferromagnetic material by using the linearly integrated hall sensor array," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 22, pp. 2310-2317 (2009)
- [5] J. E. Lenz, "A review of magnetic sensors," *Proc. of IEEE*, Vol. 78, No. 6, pp. 973-989 (1990)
- [6] H. R. Weischedel, "The inspection of wire ropes in service: a critical review," *Materials Evaluation*, Vol. 43, No. 13, pp. 1592-1605 (1990)
- [7] H. R. Weischedel and C. R. Chaplin, "Inspection of wire ropes for offshore applications," *Materials Evaluation*, Vol. 49, No. 3, pp. 362-367 (1991)
- [8] D. L. Atherton, "Magnetic inspection in key to ensuring safe pipeline," *Oil and gas Journal*, Vol. 87, No. 2 (1987)
- [9] M. Coktepe, "Non-destructive crack detection by capturing local flux leakage field," *Sensors and Actuator A:Physics*, Vol. 91, pp. 70-72 (2011)
- [10] C. Mandache, B. Shiari and L. Clapham, "Defect separation considerations in magnetic flux leakage inspection," *Insight*, Vol. 47, No. 5, pp. 289-293 (2005)
- [11] S. Park, J.-W. Kim, C. Lee, J.-J. Lee and H.-B. Gil, "Local fault detection technique for steel cable using multi-channel magnetic flux leakage sensor," *Korean Journal of Computational Structural Engineering institute*, Vol. 25, No. 4, pp. 287-292 (2012)
- [12] E. Ramsden, "Hall-Effect Sensors: Theory and Application," Newnes, Oxford, U.K (2006)
- [13] S. Cole, "An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Value," Springer, Berlin, Germany (2001)