

Elasto-Magnetic 센서를 이용한 강재 케이블 국부 단면 감소 손상 탐지

Elasto-Magnetic Sensor-Based Local Cross-Sectional Damage Detection for Steel Cables

김주원*, 남민준*, 박승희*[†], 이종재**

Ju-Won Kim*, Min-Jun Nam*, Seunghee Park*[†] and Jong-Jae Lee**

초 록 강재 케이블 부재는 부식, 파단 등으로 인한 단면손실이 발생할 수 있고, 이로 인한 손상부의 응력 집중으로 인해 시설물 전체의 붕괴로 이어질 수 있는 위험성을 가진다. 따라서 조기에 단면손실을 찾아 사고를 미연에 방지할 수 있는 강재 케이블 비파괴검사 기술이 필수적이다. 이에 본 연구에서는 E/M 센서를 이용한 강재 케이블 모니터링 기술을 제안하고자 한다. E/M 센서(elasto-magnetic sensor)는 본래 케이블의 장력측정을 위해 개발되었지만 본 연구에서는 강재의 국부 단면손상 검사를 위해 적용하였다. 제안된 기술의 실험적 검증에 대해 E/M 센서를 이용하여 4가지의 다른 직경을 가지는 강봉시편을 자화시켜 출력전압을 계측하였고, 그 결과 강봉의 직경이 감소함에 따라 출력전압이 감소함을 보였다. 반복실험을 통해 해상도 및 선형성이 확보되는 최적의 입력전압과 워킹포인트를 선정하였고, 선정된 조건에서 다양한 국부적인 손상이 주어진 강봉시편에서 출력전압을 계측한 결과 손상의 깊이 및 너비가 커짐에 따라 출력전압의 감소가 커짐을 확인하였다. 본 실험을 통해 제안된 E/M 센서를 이용한 강재 케이블 모니터링 기술의 적용가능성을 확인할 수 있었다.

주요용어: E/M 센서, 강재 케이블, 국부 단면적 손상, 비파괴검사, 구조물 건전성 평가

Abstract The Elasto-magnetic sensor is applied to detect the local cross-sectional loss of steel cables in this study while it was originally developed for measuring the tensile force in the previous works. To verify the feasibility of the proposed damage detection technique, steel bars which have 4-different diameters were fabricated and the output voltage value was measured at each diameter by the E/M sensor. Optimal input voltage and working point are chosen so that the linearity and resolution of results can ensure through repeated experiments, and then the E/M sensor was measured the output voltage values at the damage points of steel bar specimen that was applied the 4 types of damage condition based on the selected optimal experimental condition. This proposed approach can be an effective tool for steel cable health monitoring.

Keywords: Elasto-Magnetic Sensor, Steel Cable, Local Cross-Sectional Damage, Non-Destructive Test, Structural Health Monitoring

1. 서 론

최근 건설기술의 발전과 함께 시설물이 대형화
 첨단화됨에 따라 강재 케이블을 이용한 시설물의

시공이 점점 많아지는 추세이다. 특히 현수교, 사장교와 같은 초장대 교량이나 PC (prestressed concrete) box, PC beam, 옹벽 등의 시설물의 건설시에 사용되는 강재 케이블 재료인 강선 또는

강봉은 교량의 주거더와 상판의 하중을 매달거나 주거더 속에 포함되어 지탱하는 핵심부재로 이용되고 있다.

한편 이러한 시설물들은 그 대부분이 해안, 산악 지형 등 환경이 열악한 곳에 건설되기 때문에 풍하중과 같은 동하중에 의한 과다변위나 해수에 의한 부식 등으로 인하여 부분적인 단면손상이 일어날 확률이 높다. 이는 손상부의 응력집중으로 이어져 구조물 전체에 심각한 위험을 초래할 수 있다. 하지만 이러한 강재 케이블의 상태나 이로 인한 구조물의 안전성을 외관상으로는 판단하거나 예측하기가 거의 불가능하다는 문제점이 있다. 따라서 이러한 손상을 정량적이고 객관적으로 감시할 수 있는 비파괴진단 기술 및 이에 기반한 건전성 모니터링 기법을 도입, 적절한 유지관리를 통하여 구조물의 붕괴를 미연에 방지하는 것이 필수적이다.

이러한 효율적인 건전성 모니터링을 위해 스마트 센서를 활용한 연구가 활발히 이루어지고 있는데[1-5], 그중 대표적인 스마트 센서중 하나인 마그네틱 센서는 높은 신뢰도와 어디에나 적용가능한 재현성 때문에 구조물 건전성 평가에 적용하기 유용한 기술로 그 적용범위가 선박, 항공 등으로 점점 넓어지고 있는 추세이다. 마그네틱 센서는 그 적용대상에 따라 다양한 마그네틱 특성을 활용할 수 있는데, 케이블의 손상탐색을 위해서는 홀센서를 통해 자속밀도를 측정하는 LMA(loss of metallic cross section area)방식의 마그네틱 센서가 널리 사용되고 있으며[6-7], 최근에는 투자를 측정해 케이블의 장력 측정이 가능한 elasto-magnetic 센서가 개발되었고 그 활용성에 대한 연구가 이뤄지고 있다[8-11].

본 연구에서는 기존에 장력측정을 위해서만 사용되고 있는 E/M센서의 활용도를 높이기 위하여 E/M 센서를 이용한 케이블의 자화 및 출력전압 측정 기술을 활용한 강재 케이블의 국부 단면 손상 모니터링 기법을 제안하고 검증 실험을 통해 그 가능성을 확인하고자 한다.

2. E/M 센서의 이론적 배경

Elasto-magnetic 센서는 일반적으로 E/M센서라고 하며, E/M 센서의 주 구성 요소는 Fig. 1과 같이 1, 2차 원통코일(solenoid)이며 원통 형틀에

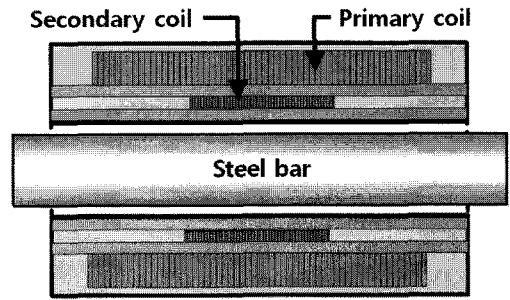


Fig. 1 The concept of elasto-magnetic sensor

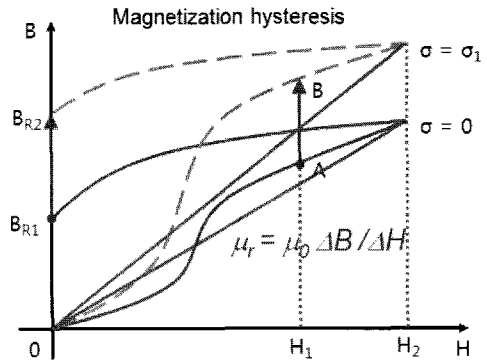


Fig. 2 The variation of magnetization hysteresis curve

1차 코일을 바깥쪽, 2차 코일을 안쪽에 감아 제작한다. 1차 원통코일로는 자기장을 형성하여 강자성체를 자화시키고, 전자기 유도원리(패러데이의 법칙)에 의해 2차 원통코일에 유도된 전압을 측정한다.

본래 E/M센서는 강재 케이블의 장력을 추정하기 위해 고안되었는데 이는 X축을 H(외부자기장의 강도), Y축을 B(시편의 자화강도)로 하는 Fig. 2의 그래프와 같이 자화된 강재케이블에 가해진 인장력에 따라 자기이력곡선이 변화하는 특성을 이용한다[12-15].

강자성체를 자장 내에 놓으면 길이가 변하는 것을 자기변형이라 하는데 이러한 재료는 자화시키면 늘어나고 또 물질이 자화된 상태에서 인장력을 가하면 연신되어 자화를 증가 시키게 된다. Fig. 2과 같이 B-H곡선(자기이력곡선)에서 인장력이 없을때 자기장 H_1 을 가하면 A만큼 자화가 되고 인장력 σ_1 을 이 재료에 가하면 일정한 자장 하에서 자화가 B로 증가한다. 인장력이 없을때 자계를 $H_1 \rightarrow H_2 \rightarrow 0$ 으로 하면 잔류자속밀도는 B_{R1} 이 되며 인장력 σ_1 을 가하면 이것이 B_{R2} 로 증가

한다. 따라서 $\mu_0 \Delta B / \Delta H$ 로 정의되는 상대투자율 μ_r 이 변하게 된다. 그러나 자기 소거된 시료 즉 자기장 $H=0$ 인 상태에서는 인장력이 인가되어도 실선과 점선이 원점에서 교차하므로 어떤 자화의 변화도 일으키지 않는다. 따라서 강자성체에 적당한 직류자계를 가해주는 것이 필수적이다. 이러한 원리를 이용하여 E/M 센서를 이용하여 1차 원통코일로는 자기장을 형성하고 2차 원통코일로 유도된 전압을 측정하는 과정에서 상대투자율은 다음 식(1)과 같이 나타내어진다[16].

$$\mu_r = 1 + \frac{A_0}{A_f} \left[\frac{V_{out}(\sigma, T, H)}{V_0} - 1 \right] \quad (1)$$

여기서 μ_r 은 상대투자율, A_0 는 2차 코일의 내부단면적, A_f 는 강자성체의 단면적, V_{out} 은 측정된 출력 전압, V_0 는 강자성체가 없는 상태의 출력전압을 나타내고 V_{out} 은 장력(σ), 온도(T), 자기장강도(H)의 함수이다. 식(1)과 같이 본래의 E/M 센서는 나머지 변수가 고정된 상태에서 장력이 변하면 위 식에 의해 상대투자율이 변하는 원리를 이용하여 만들어 졌지만 본 연구에서는 장력이 일정한 상태에서 강자성체의 단면 A_f 의 감소를 살펴보고자 함으로 다음 식(2)와 같이 식을 재정의 하였다.

$$V_{out} = \left[\frac{A_f}{A_0} (\mu_r - 1) + 1 \right] V_0 \quad (2)$$

강자성체의 상대투자율 μ_r 은 1이상의 값을 가지므로 A_0 와 V_0 가 일정한 조건에서 강자성체의 단면적이 감소하면 식(2)에 따라 V_{out} 도 함께 감소하게 된다. 이에 V_{out} 의 변화를 살펴으로써 강자성체의 단면적 변화를 검색할 수 있다.

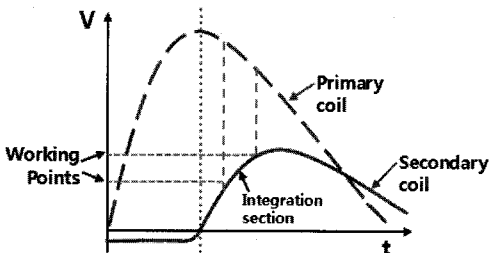


Fig. 3 The variations of output voltage value

Fig. 3은 1차코일과 2차 코일의 시간에 따른 전압의 변화를 나타내고 있는데 1차 코일의 전압이 감소하기 시작하면서 2차 코일에 전압이 가해짐을 볼 수 있다. 이때 실제 센서장비에 의해 측정되는 값은 워킹포인트 구간을 설정 하고 그 구간 내 2차코일로 유도되는 출력전압을 적분한 값이기 때문에 피시험체의 상태에 따른 2차 코일 전압의 변화 및 특성을 잘 나타낼 수 있는 워킹포인트 구간을 선정하는 것이 중요하다.

3. 실험연구

3.1. 실험 장비 및 구성

E/M센서를 이용한 케이블의 단면감소 손상 검색을 위한 실험을 수행하였다. Fig. 4와 같은 내경 60 mm 길이 200 mm 의 원통형 POWER EMTM E/M 센서 헤드가 강봉의 직경에 따른 출력전압 측정에 사용되었고, 측정된 출력전압은 Fig. 5과 같이 센서헤드와 유선으로 연결된 Intelligent Instrument System 사의 power-stress 컨트롤러장비를 통해 나타내어진다. E/M센서의 원활한 이동을 위하여 강봉 시편을 Fig. 6과 같은 외경 40 mm의 PVC 관에 삽입한 상태로 실험을 진행하였다.

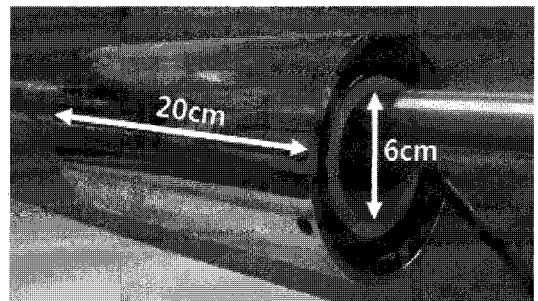


Fig. 4 A elasto-magnetic sensor head

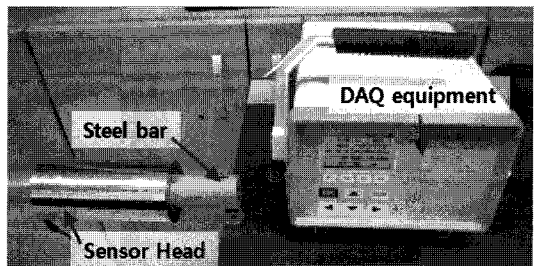


Fig. 5 The experimental setup

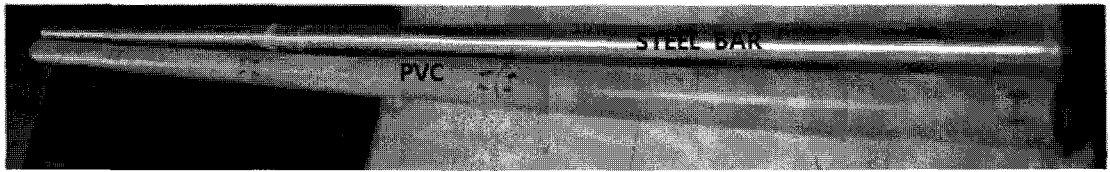


Fig. 6 A used steel bar specimen and PVC pipe

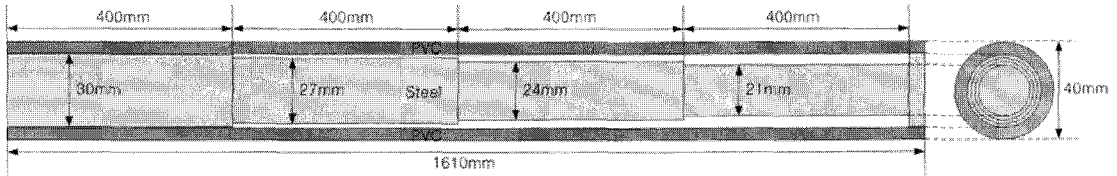


Fig. 7 The specification of steel bar specimen #1

3.2. 실험연구 1: 강봉 단면손실 검색 실험

3.2.1. 강봉 단면손실 검색 실험 구성

E/M 센서를 이용한 단면손실 탐색 실험을 위한 강봉 시편을 Fig. 7과 같이 제작하였다.

일정한 단면감소에 따른 출력 전압의 변화를 보고 적절한 워킹포인트를 선정하기 위해 Fig. 7과 같이 직경 30 mm, 27 mm, 24 mm, 21 mm인 단계별로 직경이 3 mm 씩 감소하고 각 직경별로 400 mm 길이를 가지는 4가지의 강봉이 연결된 총 1610 m 길이의 강봉시편 #1을 제작하였다.

강봉의 직경에 따른 출력전압의 변화를 확인하고 출력전압 변화의 선형성과 해상도가 확보되는 최적의 입력 전압과 워킹포인트를 선정하기 위한

1차 실험의 경우 센서헤드를 각 직경마다의 강봉 길이중심에 위치시켜 출력 전압을 5회씩 반복 측정하였다.

본 강봉시편을 충분히 자화 시킬 수 있도록 선형연구를 통해 도출된 400V의 입력전압을 사용하였고[17], 최적의 해상도를 나타내는 워킹포인트를 찾기 위해 워킹포인트 구간을 다양하게 변경해가며 반복 실험하였다.

3.2.2. 강봉 단면손실 검색 실험 결과

1차 실험은 400V의 입력전압 조건에서 워킹포인트를 다양하게 변경해가며 반복 수행되었다.

강봉시편 #1의 각 직경별 중앙지점에서 출력전압을 5회 반복 측정하여 그 평균값을 Table 1과 Fig. 8에 나타내었다.

Table 1과 Fig. 8를 통해 모든 워킹포인트 구간에서 강봉의 직경이 감소함에 따라 출력전압도 감소함을 확인할 수 있었다. 그러나 Fig. 8과 같이 여러 워킹 포인트 조건 중 0.8V-1.0V 구간 워킹 포인트에서의 출력전압 계측 값이 단면감소에 따라 가장 민감하게 변화함을 보여줬다. 따라서 입력전압 400V, 워킹 포인트 0.8V-1.0V 구간을 국부 단면손상 탐색을 위한 2차 실험 조건으로 선정하였다.

Table 1 The mean output voltage values measured from the first experiment

Working Point	30mm	27mm	24mm	21mm
0.8V-1.0V	674.2V	544.9V	484.2V	467.6V
1.4V-1.7V	508.4V	476.6V	457.4V	451.6V
1.7V-2.0V	467.7V	447.9V	438.0V	433.8V

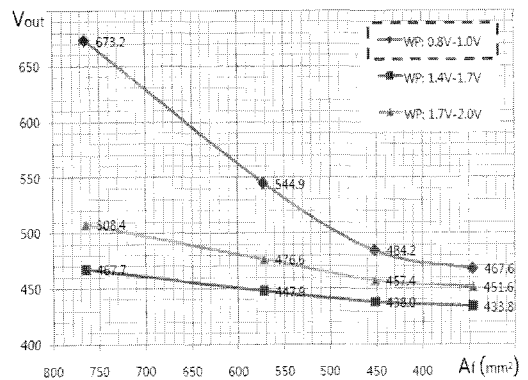


Fig. 8 The variation of output voltage value according to diameter of specimen

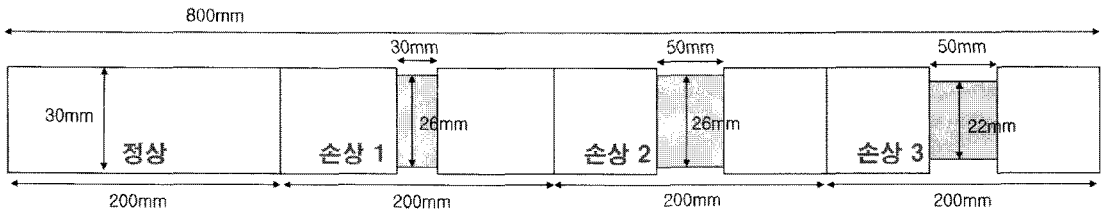


Fig. 9 The specification of steel bar specimen #2

3.3. 실험연구 2: 강봉 국부 단면손상 검색 실험

3.3.1. 강봉 국부 단면손상 검색 실험 구성

국부적인 손상의 검색 가능성과 이에 따른 출력전압의 변화를 살펴보기 위해 Table 2와 같이 3가지의 국부 손상을 가지는 직경 30 mm, 총 길이 80 cm의 강봉시편 #2를 제작하였다. 그 상세도는 Fig. 9에 나타내었다.

시편에 발생한 다양한 국부 단면손상의 검색 가능성을 알아보기 위한 2차 실험의 경우 E/M 센서헤드의 중심에 각 손상단계별 중심부가 오게 위치시키고 정상부에서 손상1~손상3 까지 차례대로 센서헤드를 이동하며 출력전압을 계측하였다. 입력전압은 1차 시험과 동일한 400V의 입력전압을 사용하였고, 1차 실험을 통해 선정된 0.8 V-1.0 V 구간을 2차 실험의 워킹포인트로 설정하였다. 또한 반복실험을 통하여 본 기술의 재현성을 확인하기 위해 위 과정을 7회 반복 수행하였다.

Table 2 The local cross-sectional damage types of specimen #2

손상 1	단면감소 깊이: 2 mm 너비: 3 cm	
손상 2	단면감소 깊이: 2 mm 너비: 5 cm	
손상 3	단면감소 깊이: 4 mm 너비: 5 cm	

3.3.2. 강봉 국부 단면손상 검색 실험 결과

먼저 강봉에 발생한 국부 단면손상의 너비 증가에 따른 출력전압의 변화를 보기 위해 강봉시편에 2 mm로 일정한 깊이의 손상을 각각 3 cm, 5 cm로 너비를 증가시켜가며 제작하였고, 그 손상부의 중심에서 출력전압을 계측하였다.

계측된 출력전압 값을 Table 3에 나타내고, 그 손상 너비 증가에 따른 평균값 변화를 Fig. 10에 그래프로 나타내었다.

Table 3과 Fig. 10과 같이 국부 단면손상의 깊이가 일정할 때 단면감소 너비가 정상 → 3 cm

Table 3 The variation of output voltage values by the width level of damages

	정상	깊이 2 mm 너비 3 cm	깊이 2 mm 너비 5cm
1회	709.1V	562.4V	504.0V
2회	710.4V	557.1V	501.3V
3회	708.3V	554.2V	494.2V
4회	713.6V	566.2V	497.8V
5회	708.0V	563.2V	494.6V
6회	705.7V	558.3V	500.2V
7회	712.2V	557.6V	492.5V
평균	709.6V	559.9V	497.8V

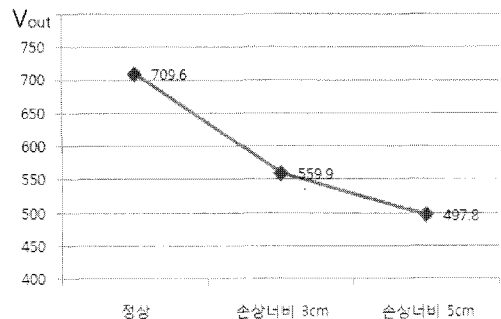


Fig. 10 The variation of output voltage values by the width level of damages

→ 5 cm로 증가함에 따라 E/M 센서에서 계측되는 출력전압 값이 709.6V → 559.9V → 497.8V로 단계적으로 감소함을 확인할 수 있다.

다음으로 국부 단면손상의 깊이 증가에 따른 출력전압의 변화를 보기위해 손상의 너비가 5 cm로 일정하고 손상 깊이가 2 mm, 4 mm로 증가하는 국부 단면손상을 시편에 각각 발생시키고, 각 손상의 중심에서 출력전압을 계측하였다. 그 계측된 출력전압을 Table 4에, 손상의 깊이 단계별 출력전압의 평균값 변화를 Fig. 11에 나타내었다.

Table 4와 Fig. 11에서 보는 것처럼 5 cm 너비의 국부 단면손상의 깊이가 정상 → 2 mm → 4 mm로 점차 증가 할 때 그에 따른 출력전압 값은 손상의 너비가 증가할 때와 마찬가지로 손상 깊이가 깊어짐에 따라 점차 감소하였다.

본 실험을 통해 국부 단면 손상의 너비 및 깊이가 증가할수록 E/M 센서를 통해 계측한 출력전압값이 감소하는 방향으로 변화함을 볼 수 있었고, 이를 통해 강봉의 국부 손상 검색 가능성

뿐만 아니라 손상 정량화의 가능성까지 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 강재 케이블의 국부 단면 손상 모니터링을 위해 E/M 센서의 적용을 제안하고 그 실험적 검증을 수행하였으며 다음과 같은 사실을 확인하였다.

- 1) 강봉 시편의 단면을 감소시켜가며 E/M 센서를 통해 출력전압을 계측한 결과, 단면이 감소함에 따라 출력전압 계측값이 감소함을 확인할 수 있었다.
- 2) 워킹포인트 선정에 따라 출력전압 계측결과와 해상도와 선형성이 달라짐을 확인할 수 있었다.
- 3) 선정된 최적의 입력전압 및 워킹포인트 조건에서 단면손상부의 깊이를 일정하게 하고 너비를 증가해가며 단면손상부의 출력전압을 계측한 결과 단면감소의 너비가 증가함에 따라 출력전압 값이 감소하였다.
- 4) 일정한 너비를 가지는 국부 단면손상의 깊이를 증가해가며 출력전압을 계측한 결과 단면감소의 깊이가 증가함에 따라 출력전압 값이 점차 감소함을 보였다.

위의 사실들을 통해 E/M센서를 활용한 국부 단면 손상 모니터링 기술이 강재 케이블의 국부 손상 검색에 효과적으로 적용 가능함을 입증할 수 있었다.

후후 실제 교량에 사용되는 강재 케이블 시편을 대상으로 내부의 손상, 부식손상 등 다양한 손상유형의 검색 실험 및 장력, 온도 변화 등의 환경적 요인에 대한 보상과 같은 추가 연구를 통해 기술을 발전시킨다면 신뢰 할 수 있고 효과적인 강 케이블의 손상 모니터링이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 건설기술혁신사업 초장대교량사업단의 연구비지원(08기술혁신E01) 및 국토해양부의 u-City 석·박사 과정 지원사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

Table 4 The variation of output voltage values by the depth level of damages

	정상	깊이 2 mm 너비 5 cm	깊이 4 mm 너비 5 cm
1회	709.1V	504.0V	471.0V
2회	710.4V	501.3V	479.5V
3회	708.3V	494.2V	473.4V
4회	713.6V	497.8V	480.0V
5회	708.0V	494.6V	482.6V
6회	705.7V	500.2V	470.1V
7회	712.2V	492.5V	474.2V
평균	709.6V	497.8V	475.8V

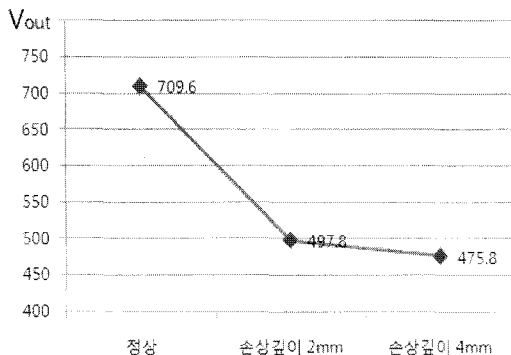


Fig. 11 The variation of output voltage values by the depth level of damages

참고문헌

- [1] 조승현, 박재하, 권휴상, 안봉영, 이승석, "관형 구조물 유도초음파 검사를 위한 SH 파 자기변형 트랜스듀서 모듈 개발", *비파괴검사학회지*, Vol. 29, No. 2, pp. 122-129 (2009)
- [2] 박승희, 윤정방 and D. J. Inman, "Remote impedance-based loose bolt inspection using a radio-frequency active sensing node", *비파괴검사학회지*, Vol. 27, No. 3, pp. 2337-2348 (2007)
- [3] S. Park, C. Lee and H. Sohn, "Reference-free crack detection using transfer impedances," *Journal of Sounds and Vibration*, Vol. 329, pp. 2337-2348 (2010)
- [4] S. Park and S. K. Park, "Quantitative corrosion monitoring using wireless electromechanical impedance measurements," *Research in Nondestructive Evaluation*, Vol. 21, pp. 184-192 (2010)
- [5] S. Park, J. W. Kim, C. Lee and S. K. Park, "Impedance-based wireless debonding condition monitoring of CFRP laminated concrete structures," *NDT&E International*, Vol. 44, pp. 232-238 (2011)
- [6] A. Canova and B. Vusini, "Magnetic analysis of non-destructive testing detectors for ferromagnetic ropes," *The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 27, No. 4, pp. 868-878 (2008)
- [7] C. Jomdecha and A. Prateepasen, "Design of modified electromagnetic main-flux for steel wire rope inspection," *NDT&E International*, Vol. 42, pp. 77-83 (2009)
- [8] M. L. Wang, G. Lloyd and O. Hovorka, Development of a remote coil magneto-elastic stress sensor for steel cables, *Proc. of SPIE 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Material*, Newport Beach, CA, USA, Vol. 4337, pp. 122-128 (2001)
- [9] S. Sumitro, A. Jarosevic and L. Wang, Elasto-magnetic sensor utilization on steel cable stress measurement, *Proceedings of the 1st FIB Congress*, Osaka, Japan, pp. 79-86 (2002)
- [10] 박해원, 안봉영, 이승석, 김종우, "대형교량 케이블 장력 측정을 위한 자기센서 개발", *비파괴검사학회지*, Vol. 27, No. 4, pp. 339-344 (2007)
- [11] M. L. Wang, G. Wang and Y. Zhao, "Application of EM stress sensors in large steel cables, Sensing issues in civil structural health monitoring," Springer, Dordrecht, Netherlands, pp. 145-154 (2005)
- [12] J. P. Joule, "On a new class of magnetic forces," *Annals of Electricity Magnetism and Chemistry*, Vol. 8, pp. 219-224 (1842)
- [13] P. E. Mix, Introduction to Nondestructive Testing, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, NJ (1987)
- [14] M. J. Stablik and D. Jiles, "Coupled magnetoelastic theory magnetic and magnetostrictive hysteresis," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 29, No. 4, pp. 2113-2123 (1993)
- [15] D. C. Jiles and C. C. H. Lo, "The role of new materials in the development of magnetic sensors and actuators," *Sensors and Actuators*, Vol. 106, pp. 3-7 (2003)
- [16] M. L. Wang, Z. Chen, S. S. Koontz and G. D. Lloyd, Magneto-elastic permeability measurement for stress monitoring, *Proc. of SPIE 7th Annual Symposium on Smart Structures and Materials*, Newport Beach, CA, USA, Vol. 3995, pp. 492-500 (2000)
- [17] 김주원, 박승희, 이종재, 임진석, "E/M 센서를 이용한 케이블 단면 손실 모니터링", *한국방재학회 정기학술대회*, Vol. 11 pp. 136-142 (2011)