

Measurements of Tensile Stress and Cross Sectional Area Loss of Tendon by Means of Non-contact Movable Yoke

Changbin Joh, Jungwoo Lee, and Younghwan Park

Structural Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Korea

Derac Son*

Dept. of Photonics and Sensors, Hannam University, Daejeon 34430, Korea

(Received 16 September 2017, Received in final form 19 October 2017, Accepted 19 October 2017)

In this study, We employed Villari effect of ferro-magnetic materials i.e., magnetic properties change on mechanical stress, to develop nondestructive testing of tendons in bridges. To magnetize tendons, we constructed yoke with non-oriented Si-steel with 0.5 mm thickness sheet were laminated and 900 turns of enamelled Cu wire wound on the yoke. To measure magnetic induction and magnetic potential, 10 turns B-Coil and 3225 turns H-Coil were used. Diameter 15.2 mm, 15 numbers of 7 wire strand, was used as test tendon, and tension was applied to 7 wire strand up to 1300 MPa. Peak voltages induced from B-coil decreased linearly as tension increased. Peak voltages induced from B-coil were increased when we applied magnetic potential increased from 3600 Aturns to 7200 Aturns. Loss of cross sectional area of tendon can be measured using both B-coil and H-coil with sensitivity down to 3 % loss of the cross sectional area.

Keywords : tendon, NDT, magnetostriction, Villari effect, cross sectional area loss

비접촉 이동식 요크를 활용한 외부텐던 장력 및 단면손상 측정시스템

조창빈 · 이정우 · 박영환

한국건설기술연구원 구조융합연구소, 경기 고양시 일산서구 고양대로 283, 10223

손대락*

한남대학교 광 · 센서공학과, 대전시 대덕구 한남로 70, 34430

(2017년 9월 16일 받음, 2017년 10월 19일 최종수정본 받음, 2017년 10월 19일 게재확정)

본 연구에서는 교량에 사용되는 텐던의 인장력과 단면적 손실을 비파괴적인 방법으로 측정하기 위하여 강자성체가 응력에 따라 자기적특성이 변화하는 Villari 효과를 이용하였다. 텐던을 자화시키기 위하여 두께가 0.5 mm인 무방향성 전기강판을 적층하여 코어로 사용하였으며, 에나멜동선을 900회 권선하여 자화코일로 사용하였다. 텐던의 자기특성을 측정하기 위하여 B-coil로 텐던에 10회 권선하였고, H-Coil로 반원형 예폭시 포머에 3225회 권선하였다. 제작된 장치는 직경이 15.2 mm이고 15개의 7-wire strand로 구성된 텐던의 7-wire strand에 1300 MPa까지 인장력을 인가하면서 측정을 하였다. 텐던의 인장력에 의한 투자율의 변화는 B-Coil에 유도되는 기전력의 피크전압 값을 측정하여 본 결과 인장력에 따라 선형적으로 감소하였으며, 자화력이 3600 Aturns에서 7200 Aturns 까지 변화시켜 본 결과 자화력이 증가함에 따라 피크전압 값도 증가하였다. 텐던의 단면 손상에 의한 B-Coil과 H-Coil의 기전력 변화는 단면손실이 3 % 정도의 변화를 측정할 수 있음을 알 수 있었다.

주제어 : 텐던, 비파괴, 자기변형, Villari 효과, 단면손실

I. 서 론

프리스트레스트 콘크리트(Prestressed Concrete, 이하 PSC) 교량은 콘크리트 교량보다 가볍고 세장(細長, slender)한 구조가 가능하여 1980년대 이후 세계적으로 많이 건설된 교량이다. 미리 도입된 압축력으로 하중에 의한 인장력을 상쇄하여 인장에 약한 콘크리트 교량의 한계를 극복했다[1]. 일반적으로 콘크리트에 미리 압축력을 도입하기 위하여 고강도 강재(prestressing steel) 다발인 텐던(tendon)을 인장하여 그 반작용을 이용한다. 따라서 PSC 교량에서 텐던의 사용중 상태변화 즉 응력의 변화나 단면손실은 교량의 사용성은 물론 안전성 측면에서도 중요한 관리대상이 된다. 특히 외부긴장 텐던만으로 구조적 일체성을 유지하고 있는 PSC 교량(externally prestressed precast segmental PSC bridge)의 경우에는 텐던 상태에 대한 관리가 더욱 중요하게 된다.

실례로 유럽이나 미국 등에서 공용 중인 PSC 교량에서 텐던의 부식이나 이로 인한 붕괴가 발생한 경우가 있다[2-5]. 국내의 경우도 2016년 내부순환도로 정릉천교 박스거더 내부에서 하중을 전달하고 있는 외부긴장 텐던(Fig. 1) 일부가 부식으로 절단되는 사고가 보고되었다[6].

이와 같은 필요 때문에 외부긴장 텐던의 현재 응력이나 단면상태를 측정하기 위한 진동법[7], EM(Electro-Magnetic) 센서[8]나 Magnetic Flux Leakage[9] 등과 같은 기술개발이 지속적으로 시도되어 왔으나, 현장에 적용할 수 있는 편리하고 신뢰성 있는 기술 개발을 위해서는 새로운 연구가 필요한 상태이다.

진동법은 텐던의 응력에 따라 진동특성이 달라지는 원리를 이용하는 것으로, 텐던 양단의 경계조건과 단위질량에 큰 영향을 받는다[7]. 그런데 일반적으로 외부긴장된 PSC 교량의 경우, 4~5 m 간격으로 설치된 텐던의 방향을 변화시키거나 연결하는 디바이터(diviator) 때문에 텐던의 지간이 짧아, 양

단의 경계조건이 불분명하다. 텐던 단위질량도 부식방지 목적으로 덕트 내부를 채우고 있는 그라우팅이 완벽하지 않고 곳곳에 공동이 있어 일정하지 않다. 이 때문에 아직까지 진동법을 통해 정확한 텐던의 현재 응력을 측정하는 것은 쉽지 않다.

EM 센서는 자성체의 응력에 따라 투자율이 변하는 Villari 효과를 이용하는 센서로 신설되는 텐던의 경우가 아니라면 현장에서 솔레노이드 코일을 권선해야 하는 기술적 어려움이 있다. 외부긴장된 PSC 교량의 경우 한 단면을 관통하는 긴장재의 수가 10개 이상이고, 디바이터가 다수 있어, 현재 응력을 측정해야 하는 지점의 수가 지간 당 수 십개가 넘는 상황을 고려하면, 현장에서 권선하는 EM 센서 기술은 현장 적용성이 없다고 판단된다. 또한 대개의 EM 센서의 경우 초기의 증분투자율을 측정하기 때문에, 기존에 다른 측정에 의해 자화된 경우 측정 자체가 어려워 지는 단점도 있다.

단면손실의 경우, 일반적으로 MFL 기법은 단면손실의 측정이 가능하다. 하지만, 텐던이 들어 있는 덕트간 간격이나 덕트와 바닥간의 간격이 30~50 mm에 불과하고 디바이터로 인해 장비를 다시 설치해야 하는 구간이 많은 경우가 대부분인 외부긴장 PSC 교량의 경우, 기존 장비가 아닌 위와 같은 특성을 고려한 새로운 장비의 개발이 필요하다. 게다가 MFL 역시 자기장을 이용하는 방법인 만큼 선시행된 자기장 기법으로 남아 있는 잔류자기장의 탈자화를 할 수 있어야 제 기능을 발휘할 수 있다.

본 연구에서는 기존방법의 단점을 극복하고 효과적으로 텐던의 현재 응력과 단면손실을 측정할 수 있는 비접촉 이동식 요크를 활용한 시스템을 소개하고 실험을 통해 성능을 검증하였다.

II. 센서 제작

본 연구에서는 덕트내 텐던의 응력과 단면손상을 비접촉으로 측정하기 위해 텐던을 축방향으로 자화시킬 수 있는 착탈식 요크와 측정장치를 제작하였다(Fig. 2). 요크의 각 단부는 텐던과의 탈부착을 용이하게 하기 위해 덕트 지름인 110 mm보다 큰 115 mm의 on-off 폴더를 설치하였고 이 폴더의 상부에 텐던의 종방향으로의 이동을 쉽게 하기 위한 비자성체로 제작된 롤러도 부착하였다. 요크는 0.5 mm 두께의 U자형 무방향 전기강판을 적층하였으며, 자화코일은 3 mm × 1 mm인 각형 에나멜 동선을 900회 권선하여 제작하였다. 텐던의 자속밀도의 변화를 측정하기 위한 B-coil은 직경이 0.5 mm인 에나멜 동선을 10회 권선하여 yoke 장치에 부착하여 사용하였다. 텐던의 단면 손상부 전후의 자기포텐셜의 변화를 측정하기 위한 H-coil은 0.5 mm 에나멜 동선을 3225회 권선



Fig. 1. (Color online) Internal of box girder in Jeongrung bridge.

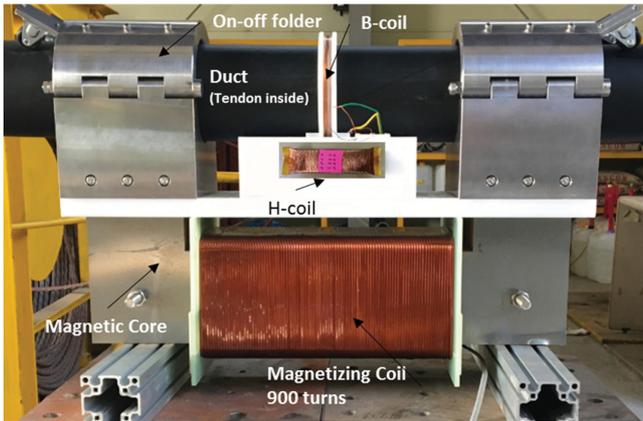


Fig. 2. (Color online) Measuring apparatus for the tension and the cross sectional area loss of the tendon using non-contact yoke.

하여 제작하였다. 텐던을 자화시키기 위한 전류공급장치는 교량현장에서 사용할 수 있도록 중량과 부피가 작은 고출력의 on/off가 가능한 DC 전류공급장치를 사용하였다.

제작된 요크는 텐던을 안정적으로 자화 시키면서도 탈착이 쉽고 빠라, 측정 소요 시간이 절약되는 특징이 있다. 또한 축 방향을 따라 이동하면서 자속밀도의 변화를 측정할 수 있어 단면의 변화 즉 손실을 측정할 수 있는 기능과 입력전류의 방향을 변화시켜 자화된 텐던을 탈지할 수 있는 기능도 있다.

요크를 이용한 측정시스템의 구성은 Fig. 3과 같다. 착탈식 요크는 직류전원공급장치와 연결되었고 요크 양단 사이에 설치된 H-coil과 B-coil은 24 bit ADC가 내장된 DAQ(Data Acquisition) 장치와 연결하여 자기포텐셜과 자속의 변화를 측정하였다. 텐던의 인장에 따른 텐던의 자속밀도를 측정하기

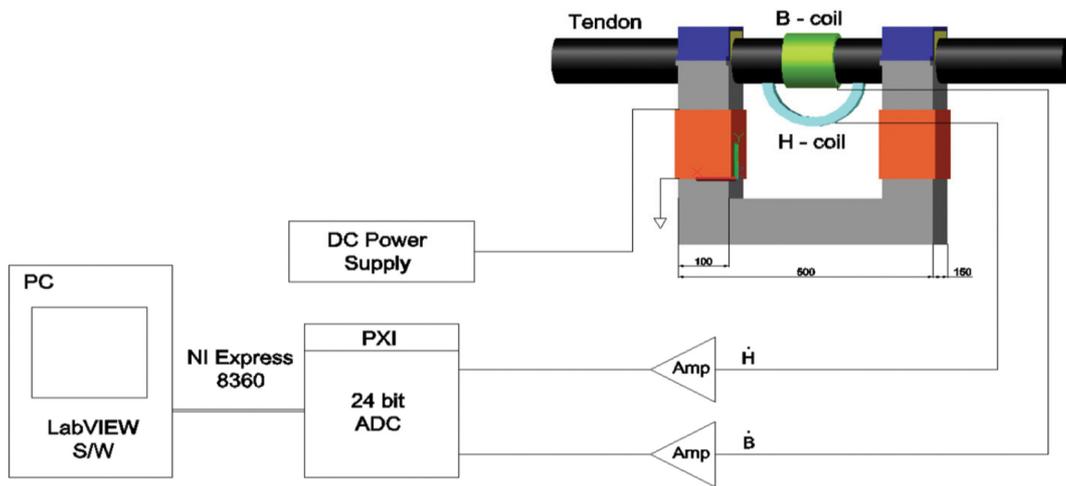


Fig. 3. (Color online) Schematic diagram of the measuring system for the tension and the cross sectional area loss of the tendon using non-contact yoke.

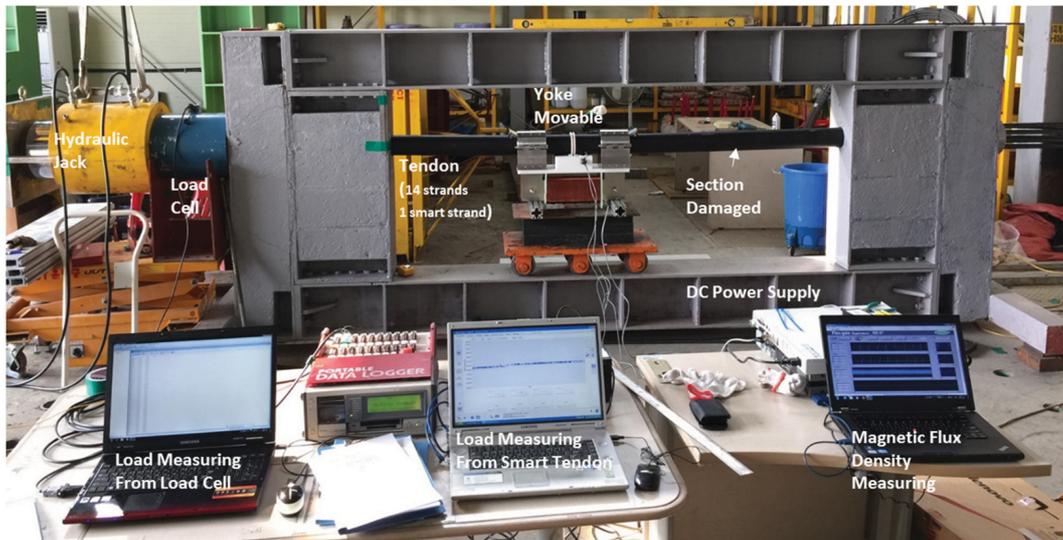


Fig. 4. (Color online) Stress applying apparatus and measuring system.

위하여 DC 전원장치의 출력을 on/off 하면서 B-coil에 유도되는 기전력을 24 bit DAQ로 측정하고, 텐던의 단면손실에 의한 자기 포텐셜 변화는 요크장치를 이동시키면서 측정하였다.

한편 측정시스템 성능 검증에 필요한 가력프레임과 응력측정 장비도 제작하였다(Fig. 4). 가력프레임 내부에 지름 110 mm의 덕트를 설치하고, 덕트내에 지름 15.2 mm의 7-wire strand 15개(이중 하나는 응력검증을 위한 스마트텐던)를 텐던으로 배치하였다. 텐던의 한쪽은 앵커블럭을 통해 고정하였고, 하중을 도입하기 위한 반대쪽에는 로드셀과 유압잭을 배치하였다. 하중은 유압잭으로 단계적으로 도입하였고 도입된 하중은 500 ton 로드셀로 측정하였다. 또한 보다 정확한 도입 응력을 측정하기 위해, 광섬유를 기반으로 한 스마트텐던[10]을 독립적으로 사용하였다. 요크의 종방향 이동을 위해 요크를 대차위에 설치하였다.

응력변화 측정 후, 단면손실을 측정하기 위해, 15개의 strand 중 하나에 인위적인 손상(7개 소선 중 3, 6개 절단)을 주고 요크를 덕트의 종방향으로 이동시키면서 자기포텐셜과 자속의 변화를 측정하였다.

텐던의 응력변화에 따른 자속밀도의 변화를 측정하기 위해, 텐던의 응력을 일정하게 유지한 상태에서 요크에 직류전류를 0 A에서 목표인가전류까지 인가하고 B-coil 출력전압의 변화를 측정하였다. 동일한 목표 인가전류에 대해 텐던의 응력을 7-wire strand의 극한하중인 $f_{pu}(=1860 \text{ MPa})$ 의 배수로 증가시키면서 반복하였다. 이 과정을 목표인가전류 4 A, 6 A, 8 A에 대해서 수행하였다.

Fig. 5는 자기포텐셜을 3600 Aturns 인가했을 때, B-coil의 유도전압을 나타내고 있다. 텐던의 응력이 증가함에 따라 최대유도전압이 감소하는 것을 알 수 있다. 텐던의 응력값은 스마트텐던의 값을 기준으로 하였다. 이러한 경향은 5400 Aturns (Fig. 6), 및 6300 Aturns(Fig. 7)를 인가한 경우에서도 같은 결과를 얻을 수 있었다.

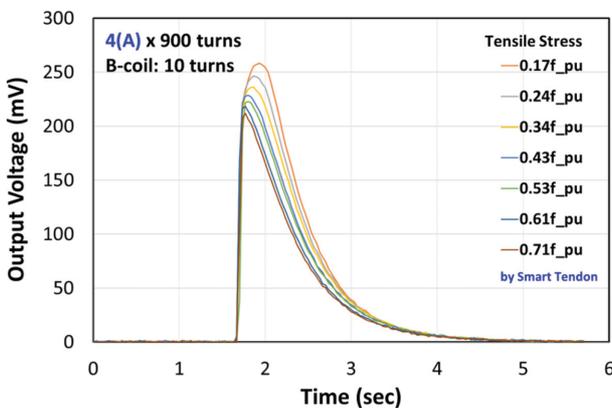


Fig. 5. (Color online) Induced voltages depend on the tensile stress under magnetic potential of 3600 Aturns.

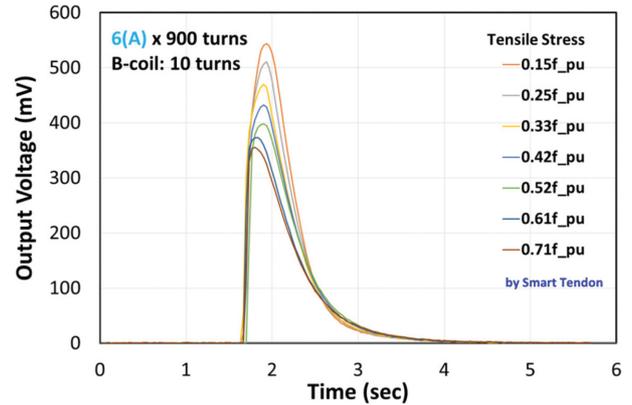


Fig. 6. (Color online) Induced voltages depend on the tensile stress under magnetic potential of 5400 Aturns.

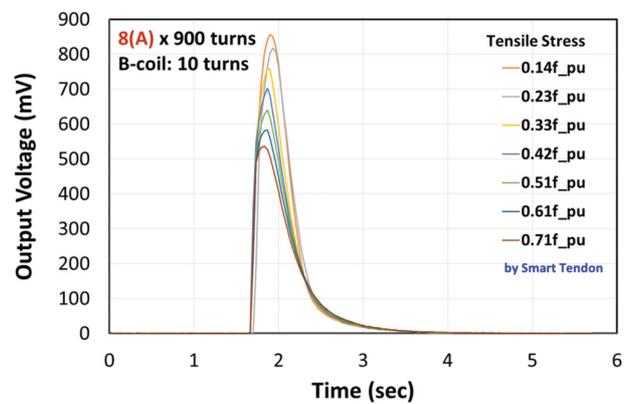


Fig. 7. (Color online) Induced voltages depend on the tensile stress under magnetic potential of 7200 Aturns.

B-coil의 최대유도전압과 텐던 응력과의 관계를 Fig. 8에 나타내었다. 최대유도전압과 텐던의 응력이 매우 우수한 선형성을 보이고 있으며, 자기포텐셜이 증가할수록 최대유도전압

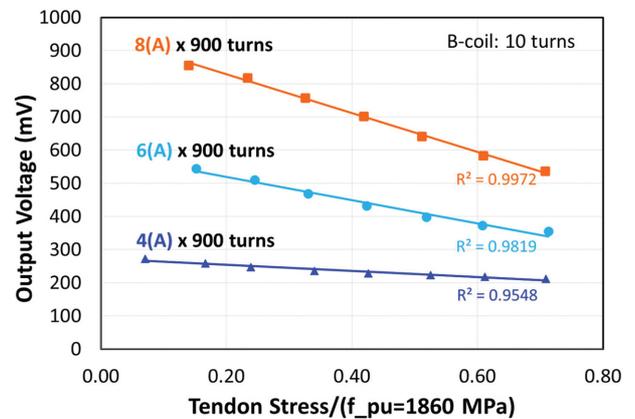


Fig. 8. (Color online) Maximum of Induced voltages depend on the tensile stress.

이 증가하였으며, 그 기울기도 증가하는 것으로 나타났다. 즉 비접촉식 요크를 사용하여 공용 중인 외부긴장 텐던의 최대 유도전압을 측정하면, 이 연구에서 구한 선형성을 이용해 현재 응력으로 변환할 수 있다.

현장여건을 고려한 장비 개발을 위해서, 필요한 적정한 자기장의 세기를 파악하고 이를 바탕으로 장비의 무게를 줄이는 추가연구가 필요하다. 물론 전류가 강할수록 선형성이 증가하는 것이 관찰되었으나, 현장측정에서 필요한 정밀도를 감안하면 이보다 낮은 전류 즉 자기장의 세기에도 잔류응력을 의미 있게 측정할 수 있을 것으로 판단된다. 이는 반대로 전류를 고정하고 권선수를 줄이거나 코어를 작게 해도 즉 현재보다 요크의 무게를 줄여도 측정이 가능할 것으로 판단된다.

외부텐던의 현재 응력 측정의 작업환경은 일반적으로 소규모 경량 장비의 활용을 요구한다. 장비를 가지고 높은 교각을 올라가서 비좁은 교량 내부(box girder)에서 작업해야 하기 때문이다. 이 때문에 장비의 경량화가 필수적이다. 또한 온도의 영향에 대한 평가도 필요하다.

III. 텐던 단면손실 측정

상기 시스템에서 요크가 텐던 축방향으로 이동하면, H-coil이 단면 손실이 있는 지점을 지나게되면 자기포텐셜의 변화에 의하여 기전력이 발생하게 된다. B-coil의 경우 단면손실이 있는 부분에 yoke가 지나가면 자기포텐셜변화에 의하여 텐던의 자화상태가 변화되고 이는 B-coil에 기전력이 발생한다. 이를 바탕으로 단면손실이 발생한 장소나 정도를 측정할 수도 있다.

본 연구에서는 덕트내의 15개 7-Wire Strand를 구성하고 있는 105(15×7)개의 소선(wire) 중 1, 2차에 걸쳐 순차적으로 3개씩을 절단하여 인위적인 단면손상(손실률 2.86%, 5.71%)을 만들고 이를 비접촉식 요크 시스템으로 측정하였

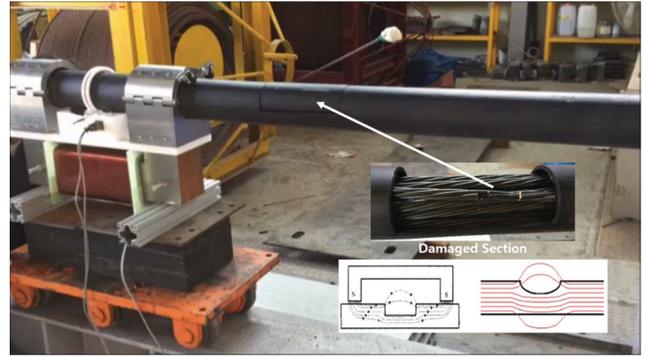


Fig. 9. (Color online) Cross sectional area loss measurement of tendon using movable yoke.

다. 요크의 이동은 요크를 받치고 있는 대차를 이용하였다 (Fig. 9).

Fig. 10은 요크의 이동과 이에 따른 B-coil과 H-coil의 유도전압을 나타내고 있다. 이때 단면손상율은 2.86%이고 길이는 56 mm이다. 입력전류는 6 A이다. 요크가 이동을 시작함에 따라 B-coil에서 유도전압의 변화가 나타났고, 요크의 N극이 손상부 시작점에 도달하면서 유도전압의 피크가 관찰되었다. 이후 요크의 단부가 순차적으로 손상부를 통과하면서 B-coil의 유도전압은 사인곡선 형상을 나타내었다. 한편 자기포텐셜을 측정하는 H-coil의 경우, 요크가 움직이기 시작하는 점에서는 B-coil에 비해 상대적으로 유도전압의 변화가 작게 관찰되었고, 요크 단부가 손상부를 통과하면서 보이는 유도전압의 형상도 B-coil과 유사하였으나 진폭이 상대적으로 작은 것으로 나타났다.

단면손상율에 따른 B-coil의 유도전압의 변화(Fig. 11)를 보면, 손상정도에 따라 유도전압의 형상은 유사하지만 첨두점의 위치는 약간의 변동이 발생하였다. 하지만 전반적으로 단면손상이 증가하면 유도전압의 크기도 증가하는 것으로 나타났다. H-coil의 경우에도 유사한 경향으로 단면손실의 증가가 유도

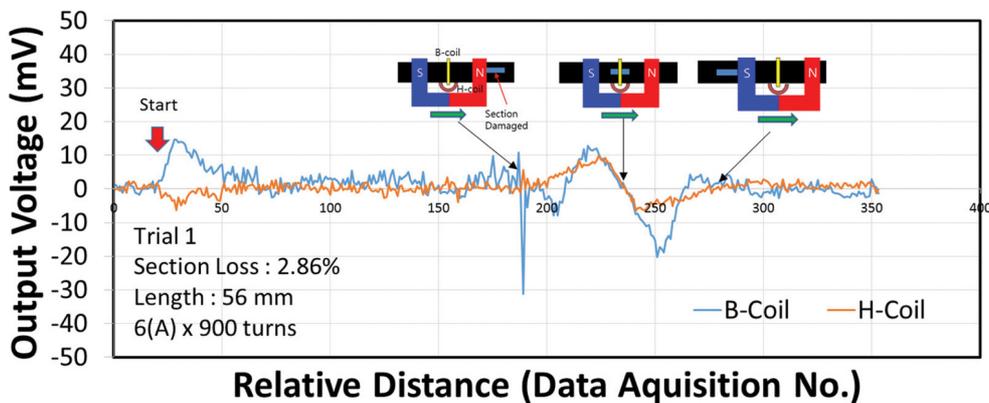


Fig. 10. (Color online) Voltages induced from B-coil/H-coil depend on the cross sectional area loss of tendon and the relative position.

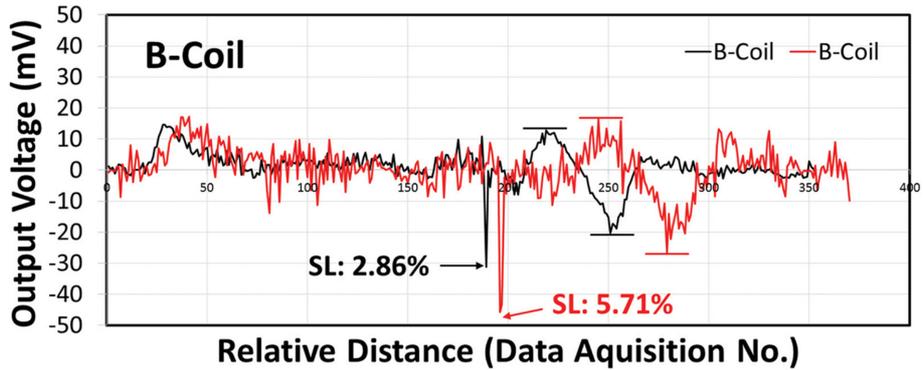


Fig. 11. (Color online) Voltage induced from B-coil depends on the cross sectional area loss of the tendon.

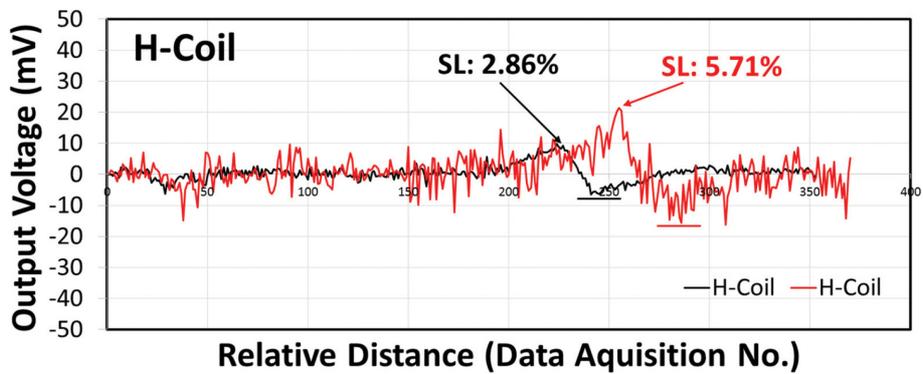


Fig. 12. (Color online) Voltage induced from H-coil depends on the cross sectional area loss of the tendon.

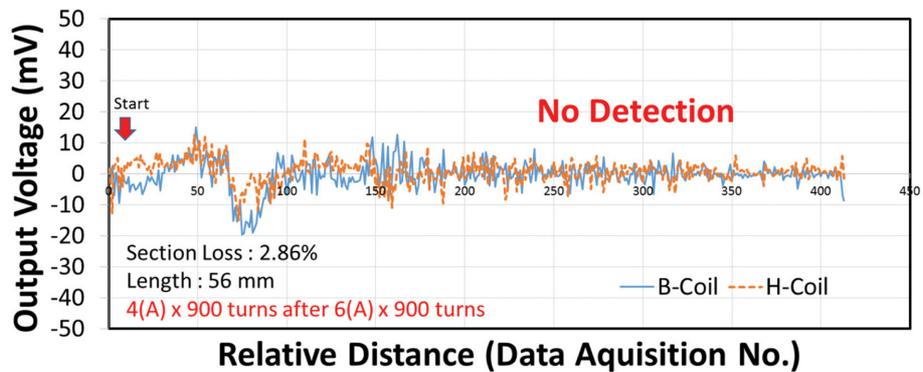


Fig. 13. (Color online) Effect of residual magnetization influence to the cross sectional area loss measurement.

전압의 증가로 나타났다. 다만, H-coil의 경우(Fig. 12) B-coil의 유도전압의 형상이나 첨두치에 비해 변화의 정도가 약한 것으로 판단된다. 단면손실 측정에도 자기포텐셜을 측정하는 H-coil 보다는 손실전후의 지속밀도의 변화를 측정하는 B-coil이 상대적으로 효과적인 것으로 판단된다.

잔류자속밀도의 영향을 보기 위해, 동일한 손상을 주고 6 A 인가 실험 후 4 A을 인가한 실험을 수행하였다. Fig. 13에서 볼 수 있듯이 잔류자속이 남아있는 상황인 6 A 실험 이후 4 A 인가 잔류로 행한 실험결과에서는 손상위치의 측정이 매우 어

려운 것으로 나타났다.

IV. 결 론

자성체의 응력에 따라 투자율이 변화하는 Villari 효과를 활용하여 텐던의 현재 응력을 비파괴적으로 측정하기 위하여, 비접촉식 요크를 통해 텐던에 자기장을 인가하고 지속밀도 변화와 자기포텐셜의 변화를 측정하였다. 이 결과 B-coil에 유도되는 전압이 텐던 긴장력과 선형관계에 있는 것을 관찰할

수 있었으며, 인가전류의 크기에 따라 선형성이 증가되는 경향도 관찰하였다. 현장 적용을 위해서는 개선할 점이 있지만, 이 연구에서 개발한 시스템을 적용하여 외부텐던의 잔류응력을 비파괴적으로 평가할 수 있다고 판단된다.

아울러 요크를 이동시키면서 단면손상부 전후의 자기포텐셜과 지속밀도의 변화를 측정한 결과, 구별할 수 있는 변화를 관찰하였다. 이를 발전시키면 외부텐던 단면 손상을 측정할 수 있는 시스템을 개발할 수 있을 것으로 판단된다.

향후 현장 적용성을 높이기 위하여, 시스템을 경량화하는 방향으로 추가 연구를 수행할 필요가 있다. 교량내부에서 활용하려면 30 kg 전후의 요크가 적정할 것으로 판단된다. 탈부착 장치도 보다 편리하게 개선할 필요가 있다. 그리고 다양한 변수를 대상으로 한 실험을 통해 현장 측정에서 발생할 수 있는 경우에 대한 적절한 데이터베이스를 만들 필요가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(PSC 교량의 스마

트 긴장력 관리 및 고품질 그라우트 기술 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 또한 한남대학교 교비연구비로 일부 지원되었으며 이에 감사 드립니다.

References

- [1] J. Lee, Prestressed Concrete, Dong Myeong Publishers (2015).
- [2] R. J. Woodward and F. W. Williams, Proceedings of the Institution of Civil Engineers **84**, 635 (1988).
- [3] Concrete Society, Durable Bonded Post-Tensioned Concrete Bridges, Technical Report No. 47, Crownthorne, United Kingdom (1996).
- [4] E. Proverbio and G. Ricciardi, Proc. Int. Conf. Eurocorr (2000).
- [5] D. Goins, Materials Performance **36**, 18 (2000).
- [6] http://www.newsis.com/view/?id=NISX20160221_0013910170.
- [7] A. A. Sagüés, S. C. Kranc, and T. G. Eason, J. Bridge Engineering **11**, 582 (2006).
- [8] S. Cho, J. Yim, S. W. Shin, H. J. Jung, C. B. Yun, and M. L. Wang, J. Bridge Engineering **18**, 748 (2012).
- [9] V. V. Sukhorukov, D. A. Slesarev, and A. N. Vorontsov, Materials Evaluation **72**, 1019 (2014).