ISSN (Print) 1598-5385
ISSN (Online) 2233-6648
≪연구논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society 25(4), 123-128 (2015) http://dx.doi.org/10.4283/JKMS.2015.25.4.123

Changes of Hysteresis Loop Characteristics of the Tendon Under Tensile Stress

Sunju Kang and Derac Son*
Dept. of Photonics and Sensors, 70 Hannamro, Daejeon 306-791, Korea

Changbin Joh and Jungwoo Lee
Korea Institute of Civil Engin. and Building Tech., 283 Goyangdaero, Goyang 411-712, Korea

(Received 16 June 2015, Received in final form 19 August 2015, Accepted 24 August 2015)

The iron is an element having a high yield strength, mechanical hardness, good electrical conductivity, and also it has been used in various fields because of ease machining. In bridges have been used tendon made of a steel wire for large loads and light weight. Tension measurement of tendon employed in PreStressed Concrete (PSC) bridge is very important for the bridge safety check. NDT (Non-Destructive Testing) is essential for the safety check, however, magnetic NDT is difficult to apply due to the non-linear magnetization curve and hysteresis loop in the magnetic properties. In this work, for basic study of magnetic NDT application, we have constructed a B-H loop measuring system for 7-strand tendon of which diameter is 15.5 mm, and which can apply tensile stress up to 2.0 GPa. We have measured hysteresis loops of two kinds of tendons under different tensile stress. Amplitude permeability and maximum magnetic induction near knee show the most sensitive and high linearity depends on tensile stress. Relative amplitude permeability was decreased from 500 to 200 and maximum magnetic flux density changed 0.6 T.

Keywords : tendon, bridge, incremental permeability, amplitude permeability, NDT

Tendon의 인장응력에 따른 자기이력특성 변화의 측정

강선주 · 손대락*
한남대학교 광 · 센서공학과, 대전 대덕구 한남로 70, 306-791

조창빈 · 이정우
한국건설기술연구원, 경기 고양시 일산서구 고양대로 283, 411-712

(2015년 6월 16일 받음, 2015년 8월 19일 최종수정본 받음, 2015년 8월 24일 게재확정)

철은 강도와 경도가 높고 전기전도도가 훌륭한 원소이며, 또한 가공이 쉽기 때문에 다양한 분야에서 사용되고 있다. 교량에서는 큰 하중이면서도 경량화를 위하여 강철선으로 된 텐던이 사용되고 있다. 철이 구조용 강으로 사용될 경우 중요한 문제 중 하나인 안전 진단을 위해서는 비파괴 검사(Non-Destructive Testing)가 필수적인데 철강의 자기적 특성이 비선형의 자화곡선과 이력(hysteresis)현상이 있는 자기이력곡선으로 인하여 비파괴 검사에 적용이 어렵다. 본 연구에서는 교량에 부착되어 있는 텐던의 인장변형력을 비파괴 적이면서 자기적인 방법으로 측정하기 위한 기초 연구로, 텐던의 인장변형력에 의한 자기이력 특성변화를 관찰하기 위하여 직경 15.5 mm의 7-strand 텐던에 인장력을 0에서 2 GPa까지 인가할 수 있는 자기이력곡선 측정 장치를 제작하였다. 제작 된 자기이력곡선 측정 장치를 이용하여 시판되고 있는 두 제조회사의 텐던에 대하여 자기적 특성을 조사하였고, 인장변형력에 따른 자기적 특성의 변화가 가장 큰 부분은 자기이력곡선 상의 knee 부분 근처에서의 상대 진폭투자율로 500에서 200까지 감소하였으며 최대 자속밀도 또한 0.6 T 정도로 변화하였다. 텐던의 인장변형력을 측정하는 방법으로 knee 부분의 진폭투자율 측정뿐만 아니라 최대 자속밀도의 측정방법도 가능할 것으로 생각된다.

주제어 : 텐던, 교량, 증분투자율, 진폭투자율, 비파괴탐상

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.
*Corresponding author: Tel: +82-42-629-7512,
Fax: +82-42-629-8313, e-mail: deracson@hnu.kr

I. 서　　론

철은 지구에서 가장 풍부한 원소중의 하나로써 비중이 높고, 강도와 경도가 크며 전기전도도 또한 훌륭하다. 철은 가공이 쉽기 때문에 차량, 선박, 교량 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. 오늘 날에는 경제성이 우수한 구조용 강으로도 많이 사용되고 있으며, 교량에서는 큰 하중이면서도 경량화를 위하여 텐던을 사용하고 있다.

철이 이러한 구조용 강으로 사용 될 경우에는 안전진단이 중요한 문제가 된다. 안전 진단을 위해서는 비파괴 검사(Non-Destructive Testing)가 필수적인데 철강의 자기적 특성이 비선형의 자화곡선과, 이력(hysteresis)현상이 있는 자기이력곡선으로 인하여 비파괴 검사에 적용이 어렵다. 때문에 최근 20년 동안 초음파를 이용하는 방법이나[1], 피 측정 대상체를 포화 자화 시킨 후 와전류 탐상을 하는 방법[2], Barkhausen 잡음 측정[3] 및 누설 자속을 탐지하는[4] 정도로 자기적 특성을 활용한 비파괴 탐상이 진행되어 왔다.

또 다른 예로는 강철의 고유 자기특성인 자기변형(magnetostriction)현상을 이용하는 것으로 철관에 영구자석을 사용하여 자화 시키고 펄스 자기장을 인가하면 철관에 펄스 형태의 음파가 발생하고 수신부 코일에서는 이 음파에서의 자기변형의 역현상에 의하여 자기유도의 변화가 발생하여 전압이 유도된다. 이 유도되는 전압의 시간차로부터 송신부와 수신부 사이에 존재할 수 있는 기계적 결함을 검사하는 방법이 있다[5,6].

본 연구는 교량에 사용되고 있는 텐던의 인장응력에 따른 자기 특성을 측정하여 이 기술을 역으로 활용하여 텐던의 장력을 측정하는 기술을 개발하기 위한 것으로, 현재 EM 방법으로 널리 사용되고 있는 초기 투자율 측정방법은 텐던이 자기소거상태가 되어 있는 상태에서 측정을 하여야 되기 때문에 어려움이 많다. 이를 보완하기 위하여 인장응력에 따른 최대 자속밀도의 변화를 측정하는 방법에 대한 연구를 하였다. 7개의 strand로 구성된 직경이 15.5 mm인 텐던을 2.0 GPa까지 인장 변형력을 인가 할 수 있는 자기이력곡선 측정 장치를 제작하고, 교량에 사용되고 있는 텐던에 대하여 인장응력에 따른 자기이력곡선을 측정하고 분석하였다.

II. 측정 장치의 제작

본 연구에서는 텐던에 인장응력을 인가한 상태에서 자기적 특성을 측정하기 위해 텐던에 인장응력을 2 GPa까지 인가할 수 있는 자기이력곡선 측정 장치를 제작하였다. 제작된 자기이력곡선의 측정 장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 자기 폐회로를 구성하기 위한 yoke는 길이가 50 cm인 double yoke를 사용하였고, yoke 앞부분의 pole은 텐던의 직경에 맞추어 3%Si강을 사용하여 제작하였다. 시편을 자화시키기 위한 1차 코일 N_1은 직경 1.0 mmϕ의 에나멜 동선을 3561회 권선하였고, 자속밀도를 측정하기 위한 2차코일 N_2는 직경 0.2 mmϕ의 에나멜 동선을 906회 권선하였다. 시편에 인장응력을 인가하기 위하여 수동 유압장치를 사용하여 30,000 kgf까지 줄 수 있게 하였고, 힘은 측정범위가 50,000 kgf인 load cell을 사용하였다. 자화시키기 위한 일차코일에 인가하는 전류의 삼각파형 합성은 파형합성장치(Agillent U2541A)를 프로그램하여 사용하였다.

시편에 인가되는 자화력 H를 측정하기 위한 1차 코일의 전류는 shunt 저항 R_s를 사용하여 전압 신호 V_s로 변화시킨 후 digitizer를 사용하여 digital 신호로 변환하여 컴퓨터에서 계산하였다. 시편의 자속밀도 B는 Faraday의 전자기 유도법칙에 의하여 2차 코일에 유도된 기전력을 자속계(fluxmeter)로 측정하여 digital 신호로 변환시킨 후 컴퓨터로 가져와서

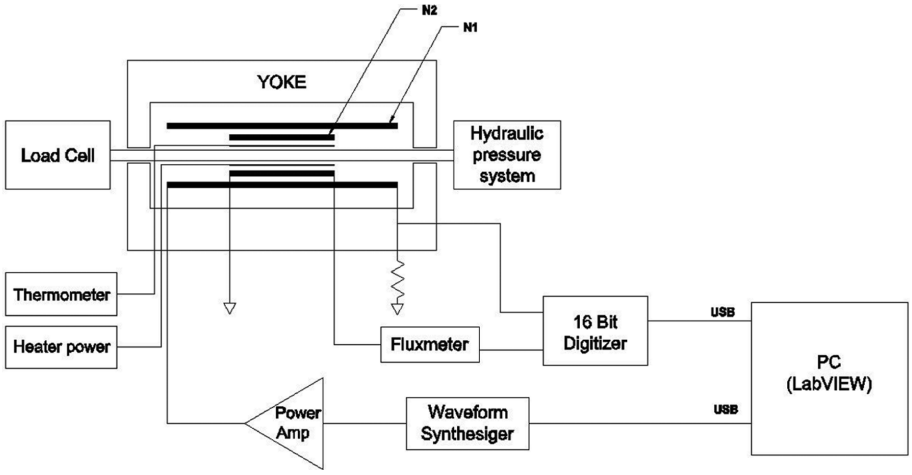

Fig. 1. Schematic diagram of the hysteresis loop tracer for tendon under different tensile stresses.

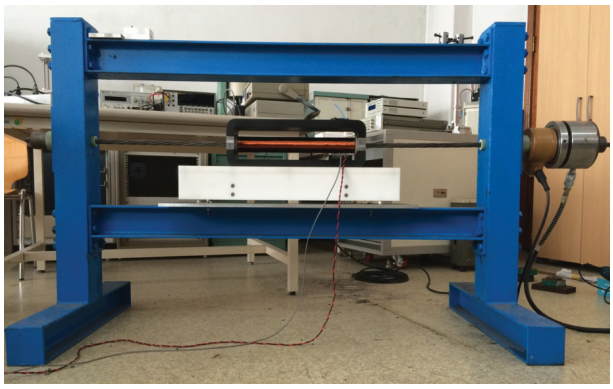

Fig. 2. (Color online) Photograph of the double yoke type B-H loop tracer for tendon with hydraulic system and load cell.

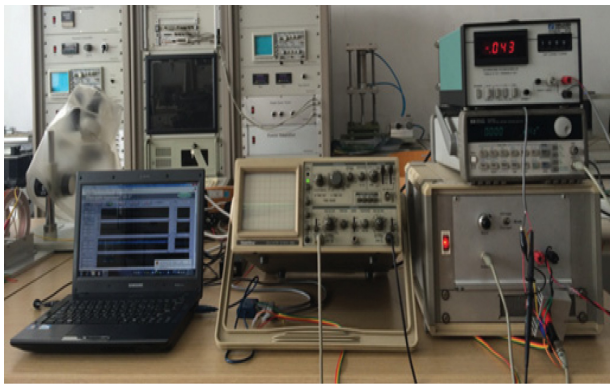

Fig. 3. (Color online) Photograph of the electronic instruments of the constructed B-H loop tracer.

단면적과 코일 권선수를 나누어 계산하였다[7].

Fig. 2는 본 연구에서 제작한 텐던의 자기이력곡선 측정 장치의 기구부 사진이고, Fig. 3은 자기이력곡선 측정 장치의 전자부 사진이다.

III. 인장변형력에 따른 B-H Loop 측정

제작된 자기이력곡선 측정 장치를 사용하여 서로 다른 두 종류의 7-strand 텐던에 대하여 인장변형력에 따른 자기적 특성을 측정하였다. Fig. 4는 텐던에 인장응력을 0에서 2 GPa까지 인가하면서 B-H loop를 측정한 결과이다. Fig. 4는 특정 자화력 H에서 인장응력에 따른 증분투자율(incremental permeability(μ_Δ))를 함께 측정한 B-H loop이다. 증분투자율은 식(1)과 같이 자기이력곡선상의 한 점에서 자화력을 ΔH 변화시킬 때 자속밀도의 변화 ΔB로부터 구하였다.

$$\mu_\Delta = \frac{\Delta B}{\Delta H} \tag{1}$$

Fig. 4에서 증분투자율의 측정은 자화력을 인장응력이 인가되지 않는 자기이력곡선의 knee 부분 아래에 있게 한 후, 인장응력을 인가한 경우에도 같은 자화력에서 하였다. 식(1)에서 ΔH는 700 A/m로 하였다. Fig. 5에서 보면 인장변형력에 따른 증분투자율 μ_Δ의 변화가 40에서 70으로 비교적 큼을 알 수 있으나 선형성이 낮음을 알 수 있다. 또한 μ_Δ 측정의 경우 텐던을 탈자(demagnetizing)하지 않는 상태에서 특정 크기의 자기장을 인가 할 경우 μ_Δ의 측정점을 알기 어려운 점이 있다. 그러나 Fig. 4에서 보면 knee 바로 윗부분에서 인장응력에 따른 자속밀도 B의 크기가 크게 변화함을 알 수 있다. 이를 좀 더 자세히 조사하기 위하여 텐던에 인장변형력을 인가한 상태에서 서로 다른 최대 자속밀도 조건에서 자기이력곡선을 측정한 결과가 Fig. 6이다. Fig. 6의 경우는 A 회사의 텐던을 인장변형력 0 MPa, 500 MPa, 1000 MPa, 1500 MPa에서 측정한 결과로, 인장응력이 증가함에 따라 보

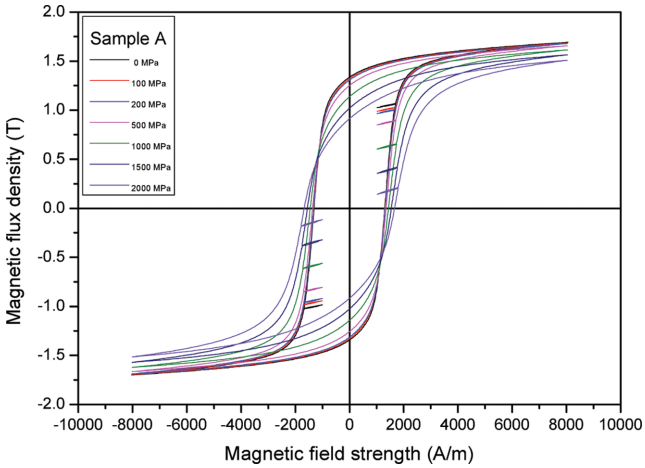

Fig. 4. (Color online) Changes of hysteresis loops of tendon under different tensile stress (company A).

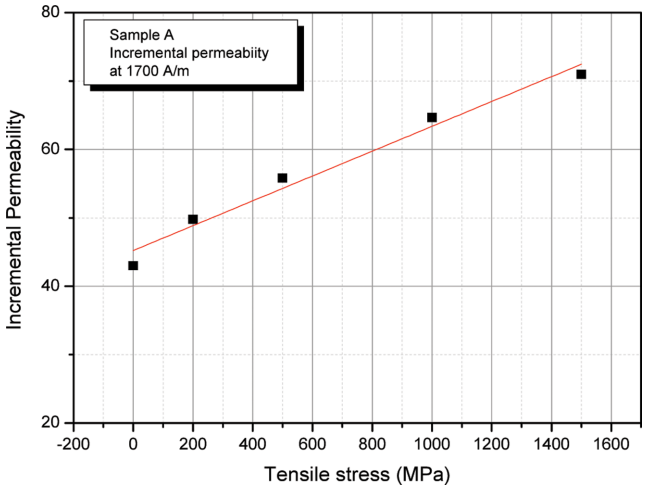

Fig. 5. (Color online) Changes of incremental permeability under different tensile stress of the tendon (company A).

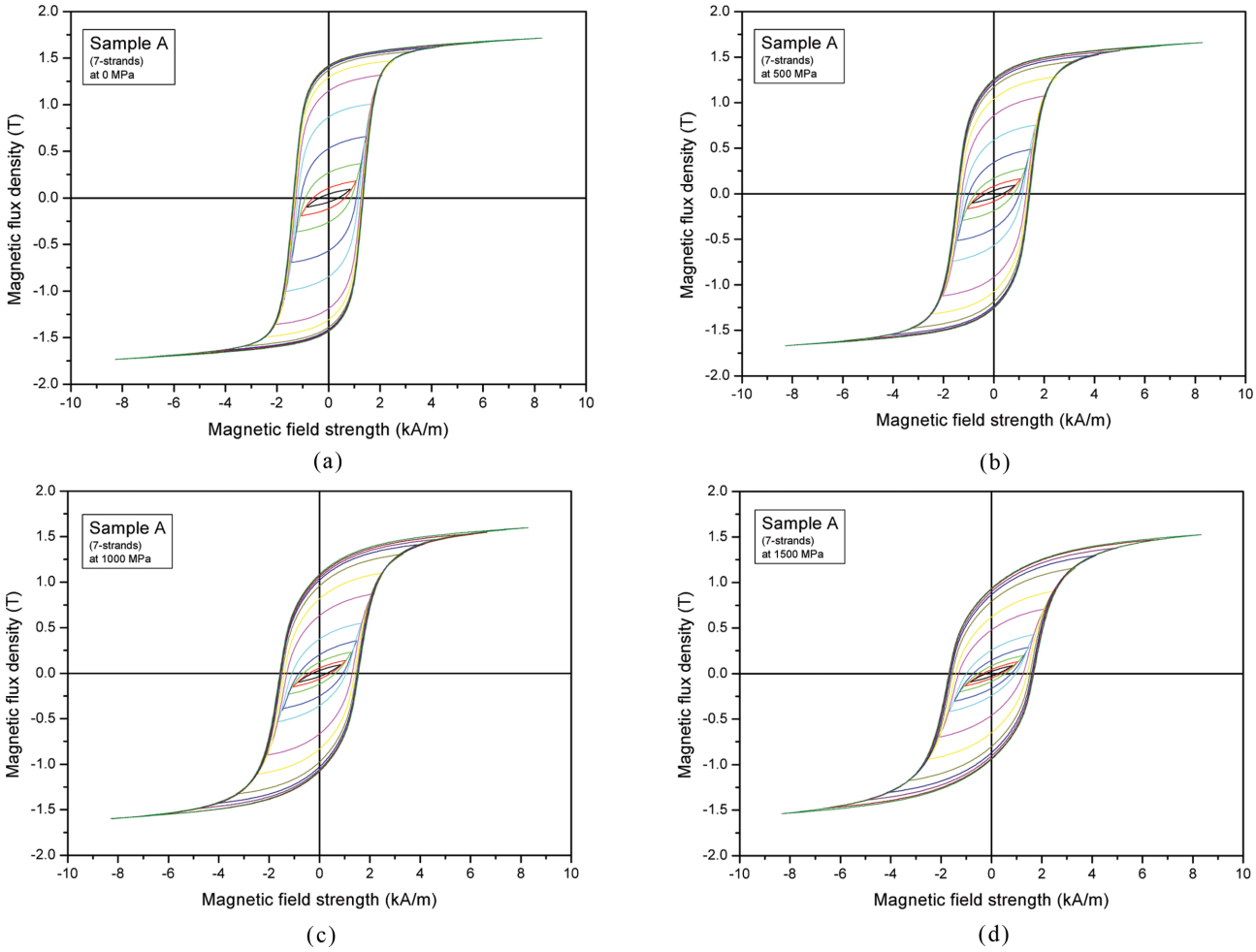

Fig. 6. (Color online) Changes of hysteresis loops under different tensile stress; (a) 0 MPa, (b) 500 MPa, (c) 1000 MPa, (d) 1500 MPa (company A).

자력이 증가하고 knee 부분에서 투자율이 많이 감소함을 알 수 있다. 이 측정 데이터를 바탕으로 진폭투자율(amplitude permeability(μ_a))을 계산 한 것이 Fig. 7의 그래프이다.

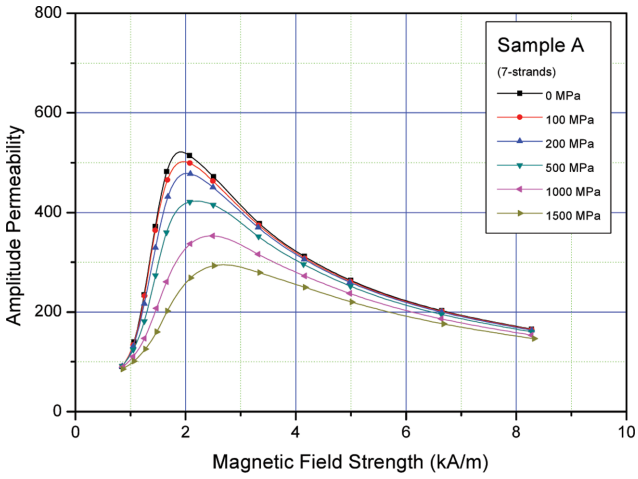

Fig. 7. (Color online) Changes of amplitude permeability of tendon under different tensile stress (company A).

$$\mu_a = \frac{B_{max}}{H_{max}} \tag{2}$$

Fig. 7에서 최대투자율 영역인 자기이력곡선 상의 knee 부분에서 인장응력에 따른 μ_a의 변화가 가장 큼을 알 수 있다. Fig. 8은 최대자화력 H_{max}에 대하여 인장변형력에 따른 진폭투자율을 그린 것 이다. Fig. 8에서 보면 H_{max} = 1700 A/m 일 때 인장변형력에 따른 진폭투자율의 변화가 200에서 500까지 크게 변화하였으며, 반면 초기투자율에 해당하는 H_{max} = 800 A/m에서는 그 변화가 매우 적음을 알 수 있다. 따라서 초기투자율을 측정하여 인장변형력을 측정하는 것은 그 변화가 적을 뿐만 아니라 초기 자화상태를 정확히 모르면 불확도가 크기 때문에 신뢰성이 낮을 것으로 예상된다[2]. 특정 자화력 H_{max}에서 최대자속밀도 B_{max}를 보기 위하여 최대자화력이 knee 근처인 H_{max}가 1700 A/m 일 때 인장변형력에 따른 최대자속밀도 B_{max}의 변화를 나타낸 것이 Fig. 9이다. Fig. 9

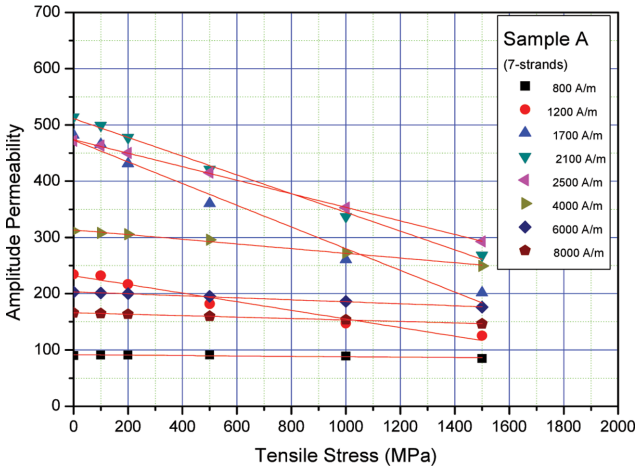

Fig. 8. (Color online) Changes of amplitude permeability depends on the tensile stress for the different peak magnetizing field (company A).

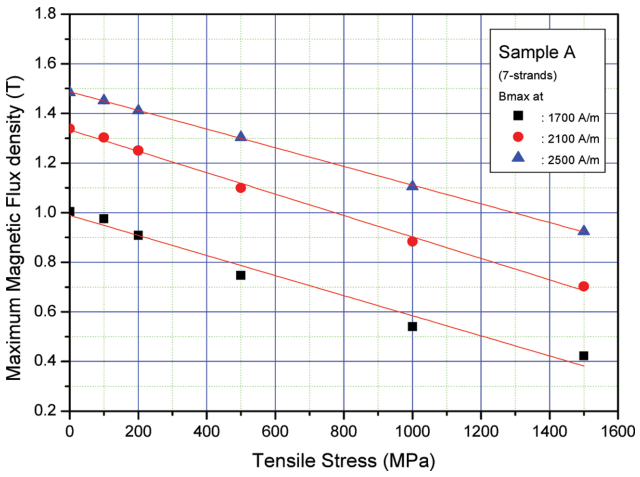

Fig. 9. (Color online) Maximum magnetic flux density depends on the tensile stress under different maximum magnetic field strength at 1700 A/m, 2100 A/m, 2500 A/m (company A).

에서 보면 H_{max}가 1700 A/m, 2100 A/m, 2500 A/m 일 때, ΔB_{max}가 0.6 T 정도 변화한 것을 알 수 있다. 이를 바탕으로 knee 부분에 해당하는 최대자화력 H_{max}에서 최대자속밀도 B_{max}를 측정하면 효과적으로 인장변형력을 측정할 수 있을 것으로 예상되며, 이 방법은 비정질 리본에 적용한 하중 센서에서도 알 수 있다[8].

텐던의 제조회사에 따른 자기특성 변화를 보기 위하여 B사에서 제조된 텐던에 대하여 A사와 같은 방법으로 측정하였다. B사에서 제조된 텐던에 대하여 인장변형력이 0 MPa, 500 MPa, 1000 MPa, 1500 MPa에서 자화력 H_{max}를 변화시키면서 측정한 후 진폭투자율을 계산한 것이 Fig. 10이다. Fig. 10에서 보면 자화력이 낮은 영역에서 진폭투자율은 A사의 측정에서 언급한 바와 같이 초기투자율 영역에서 변화가

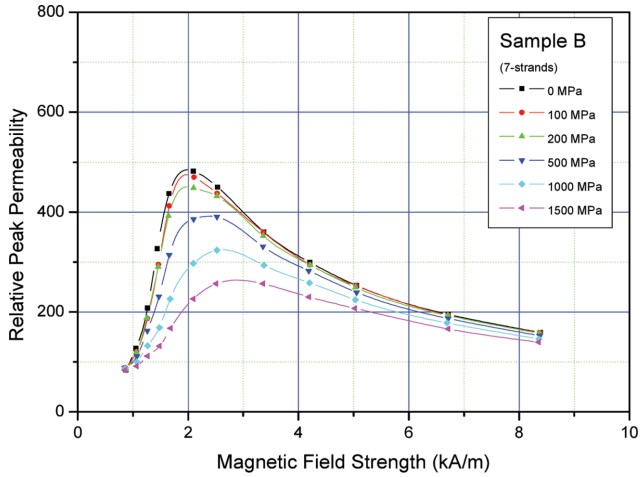

Fig. 10. (Color online) Changes of amplitude permeability of tendon under different tensile stress (company B).

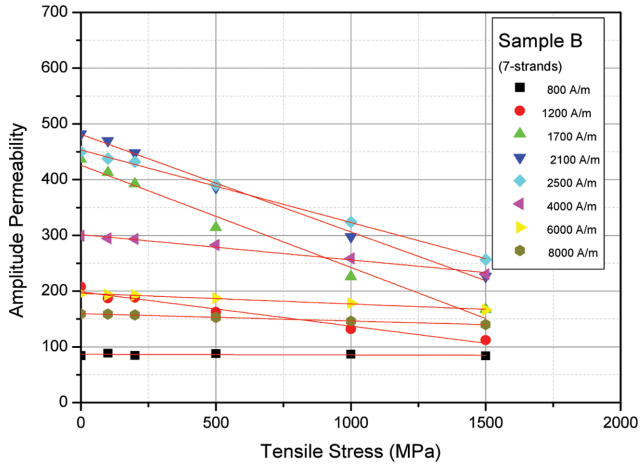

Fig. 11. (Color online) Changes of amplitude permeability depends on the tensile stress for the different peak magnetizing field (company B).

적고 자화력이 큰 포화자화영역에서 또한 투자율의 변화가 적었다. 그러나 최대투자율영역인 자기이력곡선 상에서 knee 부분에서 그 변화가 가장 큼을 알 수 있다. Fig. 11은 주어진 최대자화력 H_{max}에서 인장변형력에 따른 진폭투자율을 측정한 결과로 A사와 같이 H_{max} = 1700 A/m 일 때 그 변화가 150에서 450까지 크게 변화 하였다. 따라서 B사의 텐던도 A사의 텐던과 마찬가지로 초기투자율을 측정하여 인장변형력을 측정하는 것은 그 변화가 적을 뿐만 아니라 초기 자화상태를 정확히 모르면 불확도가 크기 때문에 신뢰성이 낮을 것으로 예상된다. Fig. 12는 최대자화력이 knee 근처인 1700 A/m, 2100 A/m 및 2500 A/m에서 인장 변형력에 따른 최대자속밀도의 변화를 나타낸 것이다. 따라서 B사와 A사를 종합하여 보면 knee부분에서 진폭투자율을 측정하거나[4] 또 다른 제안으로 최대자속밀도 B_{max}를 측정하는 것이 효과적으로

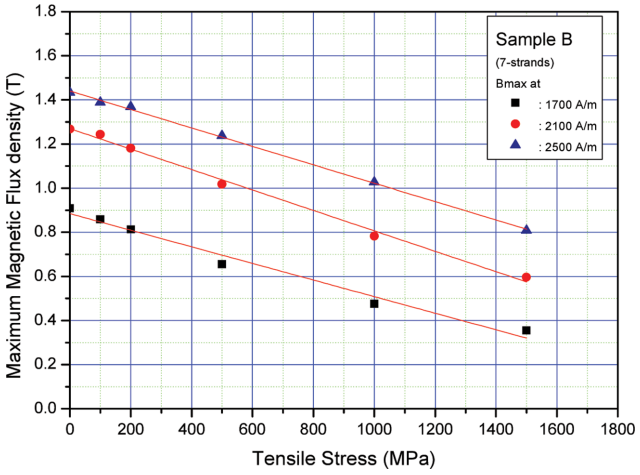

Fig. 12. (Color online) Maximum magnetic flux density depends on the tensile stress under different maximum magnetic field strength at 1700 A/m, 2100 A/m, 2500 A/m (company B).

인장변형력을 측정할 수 있을 것으로 예상된다.

IV. 결　　론

본 연구에서는 교량에 부착되어 있는 텐던의 인장변형력을 비파괴적이면서 자기적인 방법으로 측정하기 위한 기초 연구로, 텐던의 인장변형력에 의한 자기이력 특성변화를 관찰하기 위하여 직경 15.5 mm의 7-strand 텐던에 대하여 인장력을 0에서 2 GPa까지 인가 할 수 있는 자기이력곡선 측정 장치를 제작하였다. 제작 된 자기이력곡선 측정 장치를 이용하여 시판되고 있는 두 제조회사의 텐던에 대하여 자기적 특성을 조사하였고, 인장변형력에 따른 자기적 특성의 변화가 가장 큰 부분은 자기이력곡선 상의 knee 부분 근처에서의 진폭투자율로 상대 진폭투자율의 변화는 500에서 200까지 감소하였으며 최대 자속밀도 또한 1.4 T에서 0.6 T 정도 감소하였다.

텐던의 인장변형력을 측정하는 방법으로 knee 부분의 진폭투자율 측정뿐만 아니라 최대 자속밀도의 측정방법도 가능할 것으로 생각된다.

References

[1] H. J. Shin, S.-J. Song, and Y. H. Jang, Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing **20**, 538 (2000).
[2] D. Son, W. I. Joung, D.-G. Park, and K. S. Ryu, J. Magn. **14**, 97 (2009).
[3] H. Kikuchi, K. Ara, Y. Kammada, and S. Kobayashi, J. Magn. **16**, 427 (2011).
[4] K. S. Ryu, Y. T. Park, D. L. Atherton, and L. Clapham, Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing **23**, 263 (2003).
[5] A. Jarosevic, Nato ASI Series 3 High Technology **65**, 107 (1998).
[6] B. Fernandes, J. D. Wade, D. K. Nims, and V. K. Devabhaktuni, Research in Nondestructive Evaluation **23**, 46 (2012).
[7] S. Kang, C. Joh, J. Lee, and D. Son, Digests of the KMS 2014 Summer Conference **24**, 110 (2014).
[8] D. Son and J. Sievert, IEEE Trans. Magn. **26**, 2017 (1990).