

대형교량 케이블 장력 측정을 위한 자기센서 개발

Development of Magnetic Sensor for Measurement of the Cable Tension of Large Scale Bridge

박해원*, 안봉영**† 이승석*, 김종우**

Haewon Park*, Bongyoung Ahn**†, Seungseok Lee* and Jongwoo Kim**

초 록 대형 구조물을 지탱하고 있는 케이블은 항상 높은 장력으로 당겨지고 있기 때문에 교량에 과도한 하중이 가해지면 안전에 큰 영향을 미칠 수 있다. 설계 시 하중을 고려하지만 안전관리 측면에서 지속적인 감시의 필요성은 매우 크다. 교량 지지용 케이블이 강자성 재료로 구성되어 있고, 강자성 재료는 자구의 운동이 외부 장력에 매우 민감하기 때문에 케이블의 비투자율을 모니터링하면 현재 장력의 크기를 예측할 수 있다. 본 논문에서는 현장에서 장력측정용 센서의 정확한 성능 평가를 위한 표준 장력 교정 시스템 개발을 목표로 기반 연구를 수행하고 있다. 즉, 교정된 로드셀을 기준으로 시험 케이블에 정확한 힘을 가할 수 있는 시스템을 제작하였으며, 자체 제작한 장력 측정용 자기적 센서를 시험 케이블에 설치하고 케이블에 가한 장력에 따라 센서 출력을 정량적으로 분석하였으며, 주위의 환경이 미치는 영향도 함께 분석하였다.

주요용어: 강재 케이블, 장력, 투자율, 자기적 센서

Abstract Safety of large scale cable in bridge is very important because it may cause the unwanted catastrophic failure. Although the proof load were considered at the design stage, its soundness must be monitored continuously because the cable may be broken cut without warning by the variable external load. The cable tension of in-use structures has been mainly measured by the resonance method and its use has been limited because of relatively large measurement uncertainty. Recently a new magnetic method was developed and its reliability is known to be good for evaluating the cable tension. In this study a system which can deliver the calibrated load to the cable was developed and the measurement reliability of developed magnetic sensor according to the change of external load was analyzed quantitatively. The effect of magnetization frequency, bias magnetic field, and temperature on the sensor output was also evaluated.

Keywords: Steel Cable, Tension, Permeability, Magnetic Sensor

1. 서 론

사장교나 현수교와 같은 장대 대형 교량은 환경이 열악한 곳에 건설되기 때문에, 바람에 의한 교량의 과도변위나 해수에 의한 교각의 부식 등으로 인하여 구조물에 손상이 일어날 확률이 높다. 사장교나 현수교 등 대부분의 장대교량 등은 그 지지구조물로 케이블을 사용하는데, 케이블은 휨 강성

(flexural rigidity)이 거의 없어 압축력(compression)을 받지 못하고 오히려 장력(tension)만을 받는다. 이 장력을 측정하는 방법은 하중계나 가속도계를 이용하는 방법이 알려져 있지만 하중계는 설치가 매우 어려워 실용화에 장애가 되고 있으며, 가속도계는 강 선이나 강 봉의 진동수를 측정하여 이를 장력으로 환산하는 방법으로 측정은 간단하지만 케이블의 구속 조건, 길이, 단면적 등에 따라 장력산

정이 달라질 수 있어 매개변수를 측정하는데 어려움이 있으므로 신뢰성과 재현성 향상을 위한 더 많은 연구가 필요하다. 대형 구조물에 설치되어 있는 케이블의 장력을 현장에서 측정하는 진동법[1]은 1980년대 이후, 경사 케이블의 장력을 산정하는 운동방정식이 완성되면서 이용되기 시작하였다. 2000년대에 들어 실험을 통하여 장력에 따른 케이블의 특성곡선을 얻어 현재까지 사용[2]하고 있으나, 이 기술은 실험식에 의해 추정하는 기술로 실험식과 일치하지 않는 현장의 여러 가지 요인들로 인해 측정 불확도가 크다는 단점이 있다. 최근에 개발된 자기센서에 의한 장력 측정 기술은 미국의 Wang 교수 등에 의해 개발 중인 기술로서[3] 장력에 따라 강제 케이블의 투자율이 변하는 물리적 성질을 이용하여 케이블의 장력을 평가한다. 이들은 현재 효율적인 자기장 형성기술에 대한 연구를 지속하고 있으며, 측정 장치의 저 전력화, 소형화에도 많은 관심을 보이고 있다.

본 연구에서는 이제까지 사용되고 있는 장력 측정 방법 중 가장 신뢰성이 높은 방법이라 알려져 있는 자기센서를 이용한 장력 측정 시스템의 교정 시스템 구축을 목표로 잘 교정된 로드셀을 이용하여 교량 케이블에 일정한 힘을 가하기 위한 시스템을 구축하고, 케이블에 가해지는 힘을 정량적으로 측정할 수 있는 자기센서를 설계하고자 하였으며, 외부 인가 자기장의 주파수와 세기, 그리고 바이어스 전압의 영향 등을 분석하여 최적의 측정 조건을 설정하고자 하였다. 또한 주변 온도의 영향으로 달라지는 유도 자기장 측정결과를 정량적으로 분석하고자 하였다.

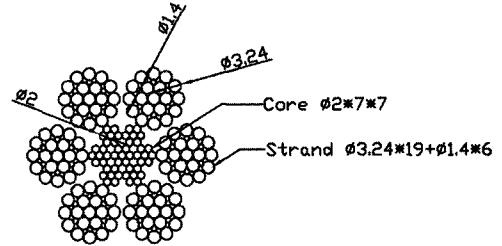
2. 케이블 장력 측정용 센서 설계 및 시험

2.1. 장력 시험에 사용된 케이블 특성

교량에 사용되는 내부 긴장재를 총칭하여 텐던이라 하고, 외부 긴장재를 총칭하여 케이블이라 한다. 텐던이나 케이블 모두 긴장되는 단위체로 그 구성은 다발의 와이어, 강봉, 강연선으로 이루어지며, 구조는 Fig. 1과 같이 중심의 와이어 다발을 코아(Core)라하고 이를 둘러싼 수개의 스트랜드(Strand)로 구분된다.

본 연구에는 직경 50 mm인 케이블이 사용되었으며, 이 케이블의 스트랜드는 직경 3.24 mm의 단

선 19가닥과 직경 1.4 mm의 단선 6가닥으로 구성되어 있으며 모두 6개의 스트랜드가 있고, 코아는 직경 2.0 mm 단선이 7단으로 구성되어 있으며 전체적으로 7개의 코아로 구성된다.



6*F1(25)+IWRC
1+6+6F1+12

Fig. 1 Structure of a cable with 50 mm diameter

2.2. 케이블 장력 측정용 장력 센서 설계

강자성 재료는 자기장 내에 놓이면 길이가 변하는데, 이를 자기변형(magnetostriction)라 하며, 이때 변형률(strain) λ 는 식 (1)과 같다.

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l} \tag{1}$$

식에서 Δl 은 자기변형이다. 양의 자화 특성을 갖는 재료는 자화되면 길이가 늘어나고, 또 물질이 자화된 상태에서 인장력을 가하면 연신되어 자화를 증가시키게 된다.

Fig. 2에서와 같이 B-H곡선(자속밀도-자기장곡선)에서 인장력이 없을 때 자기장 H_1 을 가하면 A 만큼 자화 되고 인장력 σ_1 을 이 재료에 가하면 일정

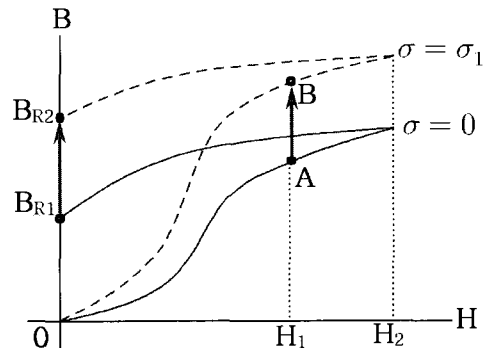


Fig. 2 Effect of tensile stress on magnetization

한 자장 하에서 자화가 B로 증가한다. 인장력이 없을 때 자기장을 H_1 에서 H_2 로 증가시킨 후 다시 0으로 내리면 잔류자속밀도는 B_{R1} 인데 반하여, σ_1 의 인장력이 존재하는 경우 잔류자속밀도는 B_{R2} 로 증가한다. 그러나 자기 소거된 시료 즉 자기장 $H=0$ 인 상태에서는 인장력이 인가되어도 실선과 점선이 원점에서 교차하므로 어떤 자화의 변화도 일으키지 않는다[4].

외부 인장력에 따라 자화곡선이 달라지는 이유는 투자율이 장력에 따라 변하기 때문이다. 즉 케이블에 걸린 장력에 따라 자속밀도의 변화가 발생된다는 것을 의미한다. 이러한 원리를 이용하면 장력의 비파괴검사가 가능하며, 장력 센서의 개념도는 Fig. 3과 같다.

1차 코일에 전류 $i_1(t)$ 을 가하였을 때 2차 코일에 유도되는 전압은 패러데이 법칙에 의해 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$e_2(t) = -N_2 \frac{d\Phi_{21}(t)}{dt} \quad (2)$$

식에서 $\Phi_{21}(t)$ 은 1차 코일에 의해서 2차 코일에 유도된 자속으로 케이블 내에 흐르는 자속($\Phi_c(t)$)과 2차 코일 내부의 에어갭($S_g = S_2 - S_c$)에 흐르는 자속($\Phi_g(t)$)으로 구성된다. 따라서 이것을 정리하면 2차 코일에 전달된 자속은 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} \Phi_{21}(t) &= \Phi_c(t) + \Phi_g(t) \\ &= k \frac{N_1}{\ell} (\mu S_c + \mu_o (S_2 - S_c)) i_1(t) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $k = \frac{\ell}{\sqrt{d_1^2 + \ell^2}}$ 이며, 2차 코일에 유도된 전압은 식 (3)을 식 (2)에 대입하면 식 (4)와 같다.

$$e_2(t) = -k \frac{N_1 N_2}{\ell} (\mu S_c + \mu_o (S_2 - S_c)) \frac{di_1(t)}{dt} \quad (4)$$

식 (4)에서 진공투자율 $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m이며, 투자율(μ)을 아는 경우 식 (4)를 이용하면 2차 코일에 유기된 전압을 계산할 수 있다. 그러나 투자율은 앞에서 설명한 것과 같이 장력, 온도, 자기장에 따라 변하기 때문에 출력전압도 장력, 온도, 자기장에 따라 변한다. 따라서 식 (4)는 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} e_2(\sigma, T, H, t) \\ = -k \frac{N_1 N_2}{\ell} (\mu(\sigma, T, H) S_c + \mu_o (S_2 - S_c)) \frac{di_1(t)}{dt} \end{aligned} \quad (5)$$

한편 2차 코일 내에 케이블이 없을 때의 유도전압 $e_o(t)$ 는 식 (6)과 같다.

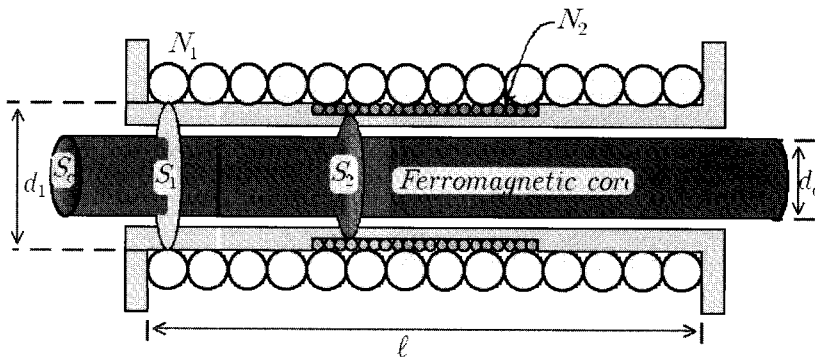


Fig. 3 Schematic diagram of sensor for tension measurement

- | | |
|--------------------------------|-------------------------------|
| N_1 : 1차 코일의 권선수, | N_2 : 2차 코일의 권선수 |
| S_1 : 1차 코일 내부 단면적(m^2), | S_2 : 2차 코일 내부 단면적(m^2) |
| S_c : 강자성체 코어의 단면적(m^2), | d_1 : 1차 코일의 직경(m) |
| d_2 : 2차 코일의 직경(m), | d_c : 강자성체 코어의 직경(m) |
| ℓ : 1차 코일의 길이(m) | |

$$e_o(t) = -k\mu_o S_2 \frac{N_1 N_2}{\ell} \frac{di_1(t)}{dt} \quad (6)$$

식 (5)와 식 (6)의 비를 구하면 식 (7)과 같으며,

$$\frac{e_2(\sigma, T, H, t)}{e_o(t)} = \frac{\mu(\sigma, T, H) S_c}{\mu_o S_2} + \frac{S_2 - S_c}{S_2} \quad (7)$$

로 되고 이것을 $\mu_r(\sigma, T, H)$ 에 대하여 정리하면 식 (8)과 같이 된다. 여기서 $\mu_r = \mu/\mu_o$ 을 비투자율이라 정의한다.

$$\mu_r(\sigma, T, H) = 1 + \frac{S_2}{S_c} \left(\frac{e_2(\sigma, T, H, t)}{e_o(t)} - 1 \right) \quad (8)$$

장력 센서 내에 케이블이 있을 때와 없을 때 각각 유도되는 전압을 측정하면 식 (8)로부터 비투자율 $\mu_r(\sigma, T, H)$ 을 구할 수 있다.

2.3. 센서 제작

자기장의 세기와 사용주파수, 온도에 따라 측정값이 달라지므로 이들의 영향을 평가하고자 하였다. 케이블 장력 측정을 위한 시험 회로는 Fig. 4와 같이 구성하였다. 교류자기장은 1차 코일에 일정한 정현파 전류를 가하여 만들었다.

본 실험에서는 일반 교량에 사용되는 직경 50 mm, 길이 1,350 mm의 케이블(6*37IWRC)을 시험 케이블로 선정하여 시험 장치를 제작하였다. 시험에 사용된 장력 측정용 센서는 Fig. 5와 같이 제작하여 시험하였다.

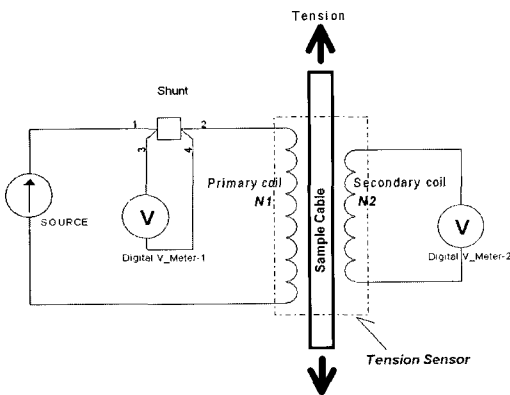


Fig. 4 Circuit diagram for measurement of cable tension

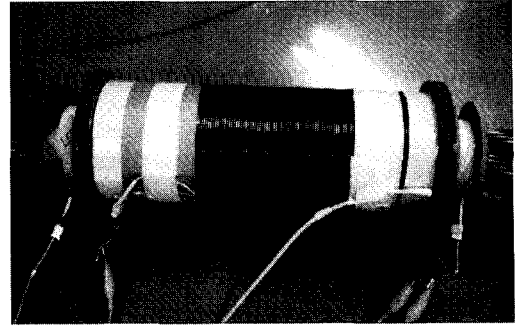


Fig. 5 Sensor for tension measurement

제작된 시험기가 케이블에 전달할 수 있는 최대 인장력은 약 3 MN이고, 시험케이블을 연결할 수 있는 핀과 핀의 거리는 3,000 ~ 3,400 mm이며, 가압 실린더의 이송거리는 300 mm이다. 인장 시험기에서 가압은 자동으로 설정 인장력까지 증가하고 지정된 시간 동안 정지한 후 다음 인장력으로 자동으로 장력을 가해준다.

2.4. 장력 측정

2.4.1. 외부 인가 바이어스 자기장 세기와 자화 주파수 영향 평가

케이블에 걸린 장력을 측정하기 위해서는 장력 센서의 출력이 장력에 따라 변화가 커야하고 또한 재현성이 있어야 한다. 따라서 앞의 Fig. 2에 설명한 바와 같이 적당한 외부 자기장을 케이블에 가한 상태가 출력 특성이 우수하므로 장력 센서 1차 코일에 전류를 흘려 장력 센서 내부 케이블에 일정한 자기장을 공급한 상태에서 센서의 출력전압을 측정하였다. 또한 주파수의 영향을 고찰하기 위하여 교류전류의 주파수도 변화시켜가며 측정하였다.

따라서 먼저 주파수를 일정하게 하고 외부 바이어스 자기장을 0, 9.51, 19.12, 28.68, 38.24 kA/m로 가변하며 반복하여 시험하였으며 시험결과에서 장력에 따른 출력변화가 크며, 반복특성이 좋은 경우가 외부 자기장을 38.24 kA/m를 가할 때 가장 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 여기서 자기장 계산은 공기 중에서의 자기장으로 관련식은

$$H_c = k \frac{N_1 I_1}{\ell} \text{이다.}$$

또한 주파수 특성을 시험하기 위해 케이블에 외

부 바이어스 자기장 0, 25.9, 38.24 kA/m를 각각 가한 상태에서 자화 주파수를 10, 50, 100, 140 Hz로 변화시키면서 장력 변화에 따른 출력전압을 측정하였으며 이 중 특성이 가장 잘 나타난 0, 38.24 kA/m의 경우에 대한 결과를 Fig. 6, Fig. 7에 나타내었다. Fig. 6과 같이 외부 자기장이 없는 경우에는 주파수에 상관없이 장력의 변화에 대하여 센서에 유도되는 전압의 변화가 미미하여 장력의 변화를 구별할 수 없기 때문에 센서로서 활용이 거의 불가능함을 알 수 있다. Fig. 7과 같이 38.24 kA/m의 자기장을 가한 상태에서는 장력 변화에 따라 출력 전압이 거의 직선적으로 변한다. 본 그림에서는 주파수에 대한 특성을 보상하여 표기한 것으로서 변화율은 모든 주파수에서 동일함을 확인할 수 있다. 측정 결과가 약간씩 다른 것은 주

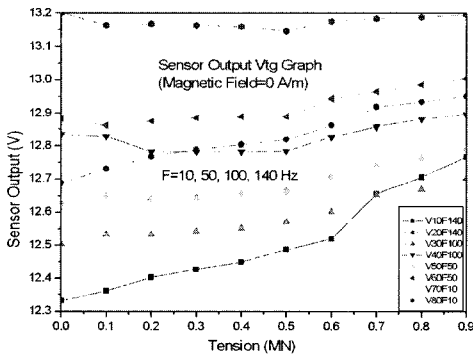


Fig. 6 Sensor output at 0 A/m bias magnetic field according to the change of applied tension

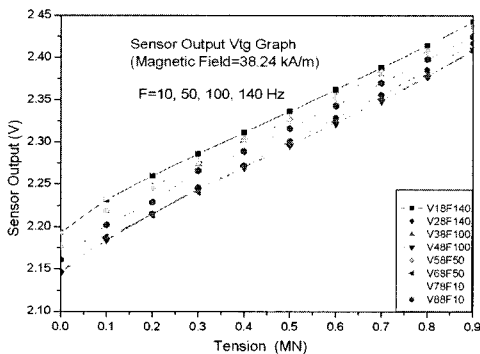


Fig. 7 Sensor output at 38.24 kA/m bias magnetic field according to the change of applied tension

파수의 영향보다는 온도 등 다른 인자에 의한 영향이라고 사료된다.

2.4.2. 온도 변화에 대한 장력 센서 출력 영향

강자성 재료의 자기적 상태가 온도에 따라 달라진다는 것은 이미 알려져 있는 현상이며[3], 이에 따라 장력의 변화에 따른 자기장의 변화도 온도에 따라 달라진다.

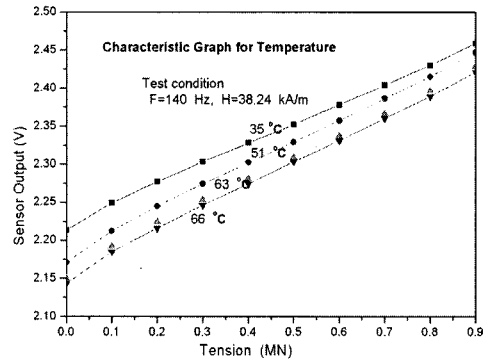


Fig. 8 Effect of the temperature on cable magnetization

Fig. 8은 케이블 온도 변화에 따른 장력 센서의 출력전압 측정 결과이다. 온도가 증가할수록 투자율 감소에 따른 출력전압의 감소가 관찰된다.

따라서 외부 바이어스 자기장이 일정할 때 ($H_c = \text{constant}$), 온도에 따른 투자율 변화는 식 (9)와 같다.

$$\mu_r(\sigma, T, H_c) = \mu_r(\sigma, T_{20}, H_c) + \alpha \Delta T \quad (9)$$

여기서 α 는 투자율의 온도계수로서 투자율 특성시험 결과에서 최적 curve fitting시 구해진다[3]. $\Delta T = T - 20^\circ C$ 로서 케이블의 온도가 $20^\circ C$ 를 기준하여 변화된 값이고, 일정한 자기장 H_c 에서 $\mu_r(\sigma, T_{20}, H_c)$ 는 $20^\circ C$ 에서의 비투자율이다. 센서에 공급되는 전류는 $i_1(t) = \sqrt{2} I_{rms} \sin(\omega t)$ 로서 여기서 I_{rms} 는 전류 실효값이다.

$i_1(t) = \sqrt{2} I_{rms} \cdot \sin(\omega t)$ 와 식 (9)를 식 (5)에 대입하고 정리하면 식 (10)과 같이 된다.

$$e_2(\sigma, T, H_c, t) = e_2(\sigma, T_{20}, H_c, t) - 2\pi f k \frac{N_1 N_2}{\ell} \mu_o S_1 \alpha I_{rms} \Delta T \tag{10}$$

여기서 $k_1 = -2\pi f k \frac{N_1 N_2}{\ell} \mu_o S_1 \alpha I_{rms}$ 이라 하면 이것은 20 °C를 기준으로 온도 1 °C 변화에 대한 출력전압 보정값으로서 온도 보정계수가 된다. 식 (10)을 k_1 으로 표현하고 정리하면 식 (11)을 얻는다.

$$e_2(\sigma, T_{20}, H_c, t) = e_2(\sigma, T, H_c, t) + k_1 \Delta T \tag{11}$$

식 (11)에서 첫째 항은 센서 출력전압이고 둘째 항은 온도에 비례하는 값으로서 온도 보정값이 된다. 따라서 Fig. 8의 결과에 식 (11)을 적용하여 Fig. 9의 결과를 얻었다. 이때 적용된 온도 보정값은 $k_1 = -1.2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ 으로 적용되었다.

온도를 보상하면 출력 전압의 변화를 확연하게 줄일 수 있으며, 인가 장력 범위에서 제작된 센서의 직진성이 향상되었다. 이 결과는 케이블의 자기적 상태가 측정 온도에 매우 민감하여 보정 없이는 정확한 장력을 평가할 수 없음을 보여주고 있으며, 그러므로 일정한 온도 하에서 측정할 수 있는 장치가 필요하거나 아니면 측정 시의 온도를 정확하게 측정하여 위의 식 (11)을 이용한 보정이 필요하다는 것을 의미한다.

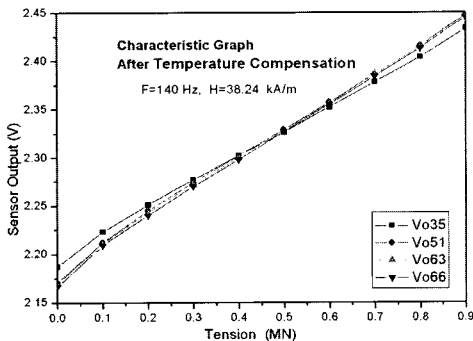


Fig. 9 Induced voltage of sensor according to the variation of tension after temperature compensation

3. 결론

케이블에 장력이 가해지면 투자율이 변한다. 이것은 케이블에 일정한 장력이 가해지고 있을 경우에는 투자율을 측정하면 케이블에 가해지는 장력을 평가할 수 있게된다. 또한 투자율은 자기장과 온도의 함수이기 때문에, 장력의 정확한 평가를 위해서는 자기장과 온도가 일정한 상태에서 장력의 변화에 의한 투자율의 변화만을 측정하여야 한다. 투자율의 변화는 일정한 외부의 바이어스 자기장에 의해 변화의 폭이 달라지므로 장력 변화를 가장 잘 측정하기 위한 최적의 외부 바이어스 자기장의 세기를 설정할 필요가 있다.

참고문헌

- [1] Hiroshi Zui, Tohru Shinke and Yoshio Namita, "Practical formulas for estimation of cable tension by vibration method," Journal of Structural Engineering., Vol. 122, Issue. 6, pp. 651-656 (1996)
- [2] J. C. Russel and T. J. Lardner, "Experimental sertermination of frequence and tension for elastic cable," ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol. 124, No. 10, pp. 1067-1072 (1998)
- [3] M. L. Wang, "Health assessment and monitoring of long span concrete segmental bridge, Bridge Research Center in University of Illinois at Chicago," Presented in a Seminar in the Safety Metrology Group of the Korea Research Institute of Standards and Science, (2001)
- [4] B. D. Cullity, "Introduction to Magnetic Materials," Addison-Wesley Publishing Company pp. 327-375 (1972)
- [5] 김창석 외, "전기/자기의 측정과 표준", KSRI-ET-72, 한국표준과학연구원 (1985).
- [6] 김창석 외, "자기 측정 및 시험", KSRI-ET-33-1, 한국표준과학연구원 (1987)
- [7] 박병우 외, "전자기학", 교보문고 (2000)
- [8] 최만용 외, "현수시스템의 케이블 장력측정을 위한 표준 실험 장치의 개발", 한국구조물진단학회 불학술발표 논문집 pp. 7-12 (2006)