

## 자기센서에 의한 강재 케이블 장력측정에서 온도특성에 대한 연구

A Study on Temperature Properties Analysis for Tension Measurement of Steel Cables Using Magnetic Sensor

박 해 원\*

안 봉 영\*

이 승 석\*

박 정 학\*

Park, Hae-won

Ahn, Bong-young

Lee, Seung-seok

Park, Jeong-hak

### Abstract

Measuring the tensile strength of steel cables used to support bridges is a critical inspection item in terms of the safety of a bridge. Today, cable tension is measured with the vibration method and loadcell. Recently, some advanced countries have conducted studies on measuring tension with magnetic method and are suggesting prospective results. Since there were no such studies ongoing in Korea, we began a study on measuring tension with magnetic method as we are undergoing researches to improve the precision of measurements. It is necessary to consider the influence for the magnetic field and the temperature of steel cables in tension measurement of magnetic method. In this paper, we tested an output characteristic of tension sensor according to temperature and deduced temperature compensation coefficient in the given magnetic field and applied the compensation coefficient to the tension measurement system in the lab. We analyzed and evaluated testing results for the output voltages of the tension sensor according to cable tensions.

### 요 지

교량 지지용으로 사용되는 강재 케이블에 대한 장력측정은 교량 안전관리의 중요한 측정항목이다. 현재 케이블에 걸린 장력을 진동법과 로드셀로 측정하고 있으며, 최근에는 선진국에서 자기적 방식에 의한 장력측정 방법을 연구하여 이에 대해 여러 가지 결과물을 제공하고 있다. 그러나 아직 우리나라에서는 이에 대한 체계적인 연구가 수행되지 않고 있어 자기적 방식에 의한 장력측정 연구를 시작하였으며 장력측정 정밀도 향상을 위해 연구하고 있다. 자기적 방식의 장력측정에서 강재 케이블 내의 온도와 자기장에 대한 영향을 검토해야 한다. 금번 논문에서는 온도에 따라 장력센서의 출력특성을 시험하였고 주어진 자기장에서 온도보정계수를 도출하였으며 시험실 내의 장력측정 시스템에 보정계수를 적용하여 케이블 장력에 따른 장력센서의 출력특성에 대한 시험 결과를 분석하고 평가하였다.

**Keywords** : Magnetic tension sensor, Steel cable, Tension transfer equation, Temperature compensation coefficient

**핵심 용어** : 자기적 장력센서, 강재케이블, 장력변환식, 온도보정계수

\* 정희원, 한국표준과학연구원 책임연구원

E-mail : hwpark@kriss.re.kr 042-868-5267

• 본 논문에 대한 토의를 2009년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 2009년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

대형 교량 케이블의 장력측정 필요성은 주요 시설물에 대한 안전도 확보가 요구되면서 관리항목이 되었다. 이것은 2000년 미국 북가주에 있는 시공한지 7년 된 PC 고가교가 교량 지지용 고장력 강봉이 그라우트에 흘러들어난 염화칼슘으로 인해 부식되면서 붕괴되었고, 2004년 성수대교 붕괴 및 최근에 발생한 대형 교량 붕괴 등 시설물 안전성 확보의 필요성이 요구되면서 교량을 지지하고 있는 케이블의 장력을 측정하게 되었다.

구조물에서 강재 케이블 장력측정에서 진동법<sup>(8)</sup>은 1980년대 이후 부터 수평 케이블 장력측정 연구를 시작하여 M. S Triantafyllou가 해양 구조물을 지지하고 있는 경사 케이블의 장력을 산정하는 운동방정식을 구하였고 2000년대에 들어와서 Russel과 Lardner의 실험을 통하여 케이블의 장력을 산정하는 운동방정식을 완성하여 현재까지 사용하고 있다.<sup>(6)</sup>

최근에 개발된 자기적 방식에 의한 장력 측정 기술은 미국의 Wang교수에 의해 개발된 기술<sup>(7)</sup>로서 장력에 따라 강재 케이블의 투자율(magnetic permeability)이 변하는 물리적 특성을 이용하여 케이블의 장력을 측정하는 기술이다.

본 논문은 자기적 방식의 장력측정에 대한 연구결과로서 교정 시스템을 구축하고 자기적 장력센서 설계 방법과 강재 케이블 내의 자기장과 온도에 따라 장력센서의 출력 특성을 시험하여 이에 대한 온도보정계수를 구하고 이를 적용하여 장력에 따른 장력센서 출력 특성에 대해 연구하였다.

## 2. 자기적 장력센서 특성 및 설계

### 2.1. 표준 인장 시험기(standards tensile testing machine) 제작

교량에 사용되는 동일한 케이블에 장력센서를 설치하고 장력에 따른 장력센서의 특성을 시험하기 위해서는 장력을 가할 수 있는 장치를 만들고 장력 시험용 샘플케이블을 설치하여 장력을 시험해야 한다. 이것을



Fig. 1 표준장력측정장치

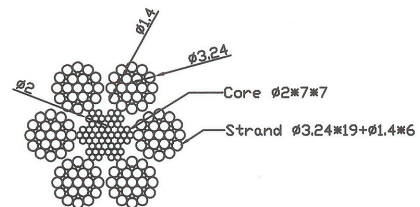
Table 1 표준인장시험기

| 항 목                          | 규 격              |
|------------------------------|------------------|
| Max Tensile Force            | 3.0 MN           |
| Max Cable Length             | 3000 mm ± 400 mm |
| -. 가압 실린더의 스트로우크 거리=300 mm   |                  |
| -. shuft nut에 의한 이동거리=100 mm |                  |
| Hydraulic system             | 정압 유압방식          |
| 장력 제어 능력                     | 1 % 이내           |
| 장력 표시장치                      | Load cell        |
| reading error                | 0.5 % 이내         |

표준인장시험기(standards tensile testing machine)라 하였고 표준인장시험기에 강재 케이블을 연결할 수 있는 구조로 만든 시편을 샘플케이블이라 하였다. 제작된 표준인장시험기는 Fig. 1, 규격은 Table 1과 같다.

### 2.2. 시험용 샘플케이블 제작

교량에서 콘크리트 내부에 사용되는 긴장재(stressed materials)를 텐던(tendon)이라 하고, 콘크리트 외부에 사용되는 긴장재를 케이블이라 한다. 텐던이나 케이블 모두 긴장되는 단위체로 그 구성은 다발의 와이어, 강봉, 강연선으로 이루어지며, 구조는 Fig. 2와 같다.



6\*FK(25)+IWRC  
1+6+6Fi+12

Fig. 2 D=50 mm 강재 케이블 구조

Table 2 시험용 50 mm 케이블 특성

| 항 목                         | 규 격  |
|-----------------------------|--|
| Maker                       | Manho Rope & Wire Ltd<br>in korea                        |
| Commodity                   | Galvanized Steel Wire Rope                               |
| Construction                | 6x37 IWRC  |
| Specification               | KSD3514  |
| Rope Dia                    | 50 mm(actual=51.300 mm)                                  |
| Tensile Strngth<br>of wires | Min=182 kg/mm <sup>2</sup><br>Max=188 kg/mm <sup>2</sup> |

Fig. 2에서와 같이 굵기 50 mm 케이블에서 스트랜드는 직경 3.24mm의 강선 19가닥과 직경 1.4mm의 강선 6가닥으로 구성되어 있으며 모두 6개의 스트랜드가 있고, 코어는 직경 2.0mm 강선이 7가닥으로 구성되어 있으며 전체적으로 7개의 코어로 구성된다.

또한 본 연구에서 사용한 시험용 케이블의 특성은 Table 2와 같다.

### 2.3. 장력센서 설계

강자성 재료는 자기장 내에 놓이면 길이가 변하며 이를 자기변형(magnetostriction)라 한다.

변형률(strain)  $\lambda$ 는 식(1)과 같다.

$$\lambda = \frac{\Delta \ell}{\ell} \quad (1)$$

식(1)에서  $\Delta \ell$ 은 자기변형이다. 양의 자기변형 특성을 갖는 재료는 자화되면 길이가 늘어나고, 또 물질이 자화된 상태에서 인장력을 가하면 연신되어 자화를 증가시킨다.<sup>(4)</sup> 장력센서의 개념도는 Fig. 3과 같다.

1차 코일에 전류  $i_1(t)$ 를 가하였을 때 2차 코일에 유기되는 전압은 패라데이 법칙(Faraday's Law)에 의해 식(2)로 나타낼 수 있으며 이것이 장력센서 출력 전압이 된다.

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

식(2)에서  $\Phi_{21}(t)$ 은 1차 코일에 의해 2차 코일에

유기된 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 정리하여 2차 코일에 전달된 자속을 구하고 이것을 식(2)에 대입하면 식(3)과 같이 2차 코일에 유기된 전압을 구할 수 있다.<sup>(3)</sup>

$$e_2(t) = -k \frac{N_1 N_2}{\ell} (\mu S_c + \mu_o (S_2 - S_c)) \frac{di_1(t)}{dt} \quad (3)$$

여기서  $k = \frac{\ell}{\sqrt{d_1^2 + \ell^2}}$  이며,

식(3)에서 진공투자율(vacuum permeability)  $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m 이며, 투자율( $\mu$ )을 아는 경우 식(3)을 이용하면 2차 코일에 유기된 전압을 계산할 수 있다. 또한 투자율은 장력, 온도, 자기장( $\sigma, T, H$ )에 따라 변하기 때문에 출력전압도 장력, 온도, 자기장에 따라 변한다. 따라서 식(3)은 식(4)와 같이 표현된다.

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

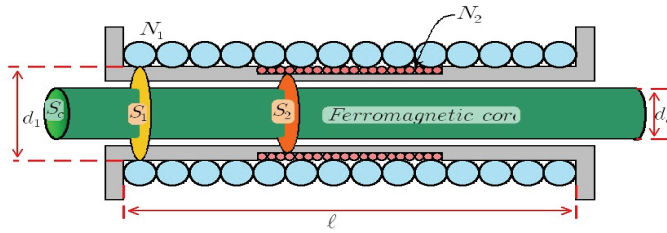
2차 코일 내에 강재 케이블이 없을 때의 유기전압  $e_o(t)$ 는 식(5)와 같다.

$$e_o(t) = -k \mu_o S_2 \frac{N_1 N_2}{\ell} \frac{di_1(t)}{dt} \quad (5)$$

식(4)와 식(5)의 비를 구하고 이것을  $\mu_r(\sigma, T, H)$ 에 대하여 정리하면 식(6)과 같이 된다. 여기서  $\mu_r = \mu/\mu_o$ 로서 비투자율(relative permeability)이다.

$$\mu_r(\sigma, T, H) = 1 + \frac{S_2}{S_c} \left( \frac{e_2(\sigma, T, H, t)}{e_o(t)} - 1 \right) \quad (6)$$

장력센서 내에 케이블이 있을 때와 없을 때의 각각 유기되는 전압을 측정하면 식(6)으로부터 비투자율  $\mu_r(\sigma, T, H)$ 을 구할 수 있다.<sup>(7)</sup>



$N_1$  : number of turns in the primary coil,  $N_2$  : number of turns in the secondary coil  
 $S_1$  : cross-sectional area of primary coil( $m^2$ ),  $S_2$  : cross-sectional area of secondary coil( $m^2$ )  
 $S_c$  : cross-sectional area of cable inside sensor( $m^2$ )  
 $d_1$  : diameter of primary coil(m),  $d_2$  : diameter of secondary coil(m)  
 $d_c$  : diameter of cable(m),  $\ell$  : length of solenoid(m)

Fig. 3 장력측정센서 구조도

## 2.4. 장력센서(tension sensor) 제작

앞의 설계 방법에 따라 장력센서를 Fig. 4와 같이 제작하고 샘플케이블에 설치하여 시험하였다.

본 시험에서 사용된 케이블은 교량용으로 시험실 내에서 수행해야 함으로 취급이 용이한 Table 2의 특성을 가진 직경 50 mm인 Galvanized Steel Wire Rope (6\*37IWRC, Galvanized Steel Wire Rope)로 샘플케이블을 제작하고 시험하였다.

## 3. 강제 케이블의 온도특성시험

### 3.1. 온도특성시험 방법

식(6)과 같이 강제 케이블의 자기적 특성은 장력,

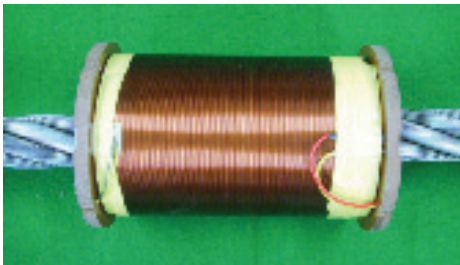


Fig. 4 장력센서(TS-36)

온도 및 자기장에 따라 투자율이 변한다.

케이블의 온도특성을 시험하기 위해 Fig. 5와 같이 온도 챔버에 케이블 길이가 1, 1.5, 2.5 m인 시험용 케이블을 넣고 온도를  $-20 \sim 70^\circ C$ 까지  $10^\circ C$ 씩 증가시키며 온도에 따른 장력센서의 출력전압에 대한 특성을 케이블 길이와 자기장에 따라 시험하였다. 이때 시험 조건은 다음과 같다.

#### ① 측정 온도

$-20, -10, 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70^\circ C$

#### ② 시험시 가해진 자기장

- 바이어스 자기장(Hdc)

28.82, 36.02, 40.23, 50.43, 75.64 kA/m

- 교류 자기장(Hac(t))

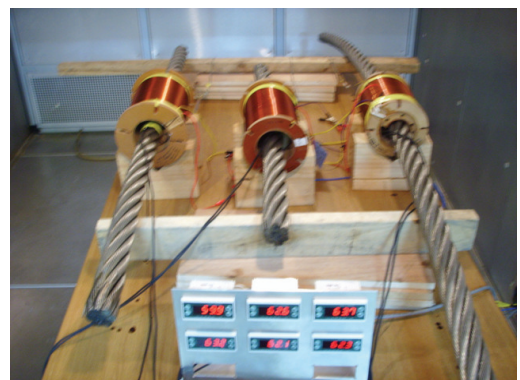


Fig. 5 강제 케이블을 챔버에 설치하고 온도특성시험 사진 (케이블 길이 : 좌부터 1.5 m, 1.0 m, 2.5 m)

$$Hac(t) = 0.7205\sin(2\pi ft) \text{ kA/m}$$

### ③ 시험용 케이블 규격

- 케이블 굵기 : D=50 mm
- 케이블 길이 : 1.0 m, 1.5 m, 2.5 m 3종

## 3.2. 케이블 온도특성시험 결과

시험 방법과 같이 3개의 케이블을 준비하고 각 케이블에 온도센서를 설치하고 온도편차가  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  이내로 될때 장력센서 출력전압( $V_0$ )을 측정한 결과 Fig. 6과 같이 온도특성곡선이 된다.

그림에서 y축 : 장력센서 출력전압( $V_0$ )

x축 : 온도(T)

A/m : 자기장의 단위로 단위 길이당 코일의 권선 전류의 합

Fig. 6에서 바이어스 자기장에 따라 5개의 그룹으로 온도특성이 구분되고 각 그룹마다 케이블 길이에 따라 3개의 특성곡선이 있으며 위로부터 케이블 길이가 1.0m, 1.5m, 2.5m인 경우이다.

그림에서 자기장이 일정하고 온도가 증가하면 투자율이 감소하여 장력센서 출력전압이 감소한다. 온도가 일정하고 자기장이 증가하면 투자율이 감소하여 출력전압이 감소한다. 그리고 케이블 길이가 길어지면 출력전압이 감소하며 이것은 케이블 길이가 자기장에 영향을 주기 때문이다. 따라서 온도에 대한 장력센서의 출력전압 변화를 케이블 길이 별로 외부 자기장에 따라 영향을 분석하였다.

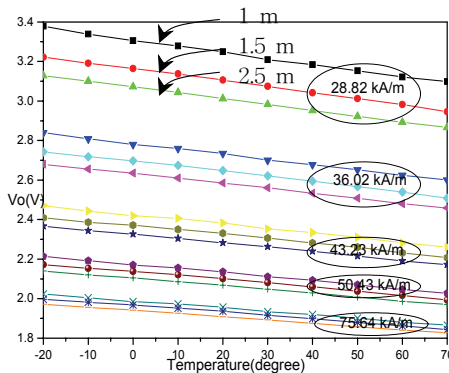


Fig. 6 자기장과 케이블 길이에 따른 온도특성곡선

## 3.3 케이블의 온도보정계수 산출

앞의 시험에서 케이블 온도가  $1^\circ\text{C}$  변할 때 장력센서 출력전압 변화폭을 온도보정계수라 하였다. 온도보정계수는 장력에 따라 변하지 않는다. 즉 장력에 대한 영향은 없으며 자기장에 따라 그 값이 다르다. 따라서 케이블 길이 별로 자기장에 따라 온도보정계수를 구하고 이것으로부터 특성식을 구하였다.

시험 결과 같은 자기장에서 케이블 길이에 따라 온도보정계수가 약간씩 다르다. 이것은 케이블 길이가 짧아지면 자기장에 영향을 주기 때문이며 자기장에 영향을 주지 않는 최소의 케이블 길이를 구하는 방법으로는 가해진 자기장에서 온도보정계수가 일정하게 되는 최소의 케이블 길이를 구하면 된다.

### 3.3.1 바이어스 자기장과 케이블 길이에 따른 온도 영향평가

케이블 길이에 따라 자기장이 변하므로 온도특성이 다르게 된다. 따라서 케이블 길이가 1.0m, 1.5m, 2.5m에 대해 자기장에 따라 온도보정곡선은 Fig. 7과 같다. 이것은 Fig. 6의 길이와 자기장에 따른 온도특성곡선을 최적화하면 1차식으로 표현된다. 따라서 각 직선의 기울기는 온도보정계수가 된다. 이것을 케이블 길이 별로 자기장에 대한 온도보정계수를 구한 것이 Fig. 7과 같이 되며 자기장에 따라 온도보정계수가 크게 변하고 있음을 알 수 있다. 그림은 케이블 길이별 온도보정곡선이 된다.

케이블 길이에 따라 온도특성을 시험한 것은 같은

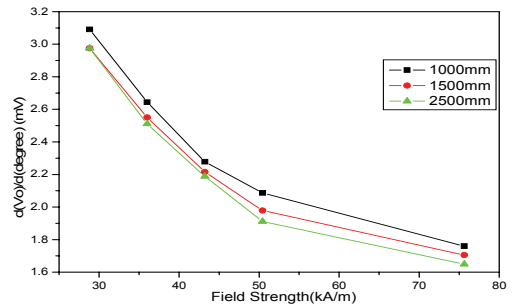


Fig. 7 자기장에 따라 온도  $1^\circ\text{C}$  변화에 대한 전압 변화 크기

자기장에서 동일한 온도보정계수를 갖는 최소의 케이블 길이를 구하기 위해서이며 이것은 온도보정계수가 같아지는 최소의 케이블 길이가 된다.

Fig. 7에서 y축 : 온도보정계수( $\alpha$ )

x축 : 바이어스 자기장(Hdc)

Fig. 7에서 케이블 길이가 1m인 경우가 다른 길이보다 온도보정계수가 크며 1.5m와 2.5m인 케이블은 자기장이 43.23 kA/m까지는 거의 같으나 그 이상이 되면 다르게 된다. 실제 교량에 사용되는 케이블 길이는 1.5m 이상이고 장력측정시 적절한 바이어스 자기장은 굵기 50mm 케이블에 대해서 25~40kA/m 임으로 길이에 대한 온도보정계수는 동일함을 알 수 있다. 따라서 동일한 온도보정계수를 갖는 케이블의 최소 길이는 1.5m이다. 그래서 급변 시험에서는 2.5m 케이블에 대해 온도보정곡선을 구하였다.

### 3.3.2 굵기 50 mm 케이블의 온도보정곡선

Fig. 7에서 케이블 길이가 2.5 m에 대해 자기장에 따른 온도보정계수( $\alpha$ )를 구하고 이것을 최적화한 곡선을 구하였더니 Fig. 8과 같이 되었다.

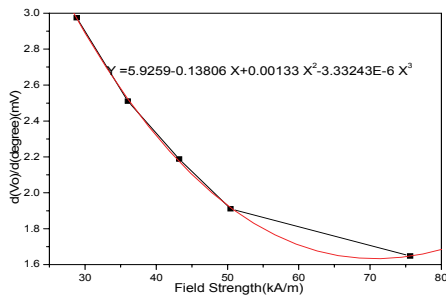


Fig. 8 2500 mm 케이블의 자기장과 온도특성을 3차식으로 최적화한 온도보정곡선

Fig. 8에서 자기장에 따른 최적화된 온도보정곡선은 3차식으로 식(7)와 같다.

식(7)를 이용하면 시험에 사용된 장력센서에 대해 자기장에 따른 온도보정계수를 구할 수 있다.

$$\alpha = -3.33243 \cdot 10^{-6} x^3 + 0.00133x^2 - 0.13806x + 5.9259 \quad (7)$$

식(7)에서

x : 바이어스 자기장(단위 : kA/m)

$\alpha$  : 온도보정계수로서 임의의 자기장에서 케이블 온도 1 °C 증가시 출력전압 변화(단위 : mV/°C)

$$\alpha = 2.51 \text{ mV/}^\circ\text{C at H} = 36.02 \text{ kA/m}$$

최대 오차 : 1.5% 이내

(자기장 28.82~50.43 kA/m 범위에서)

### 3.3.3. 장력센서 온도보정식

케이블의 장력측정시 케이블 온도는 변하기 때문에 기준온도를 설정하고 장력센서 출력을 기준온도로 환산해야지만 서로 비교할 수 있게 된다. 따라서 기준온도를 20 °C로 설정하고 출력전압을 기준온도로 환산하는 식을 온도보정식이라 하였고 온도보정식은 식(8)과 같다.

$$Vo(20^\circ\text{C}) = Vo(T) + \alpha \cdot \Delta T \quad (8)$$

여기서

$Vo(20^\circ\text{C})$  : 기준온도 20 °C로 환산한 값(V)

$Vo(T)$  : T °C의 출력전압(V)

$\Delta T = 20 - T$  (°C) : 케이블 온도 변화

사용된 케이블 종류 :

6\*37IWRC, Galvanized Steel Wire Rope

식(8)에서 온도보정계수  $\alpha$ 는 식(7)에서 주어진 것으로 자기장에 따라 다르며

H=36.02 kA/m시  $\alpha = 2.51$ (mV/°C)가 된다.

## 3.4. 온도보정 후 장력 특성 시험

### 3.4.1. 장력 특성 시험 및 장력 변환식 산출

자기적 방식에 의한 케이블의 장력측정에서 적절한 바이어스 자기장을 가해야지만 장력에 따라 장력센서의 출력전압 변화가 커져 재현성이 향상된다.<sup>(5)</sup> 시험 결과 사용된 장력센서의 최적 자기장 동작점은 Hdc=36.02 kA/m였으며 다음과 같이 장력에 따른 장력센서 출력특성을 시험하였다

- 시험기간 : 2008. 4.24~7.31

- 장력 측정 범위 : 0.0 ~ 0.9 MN

0.1 MN 간격으로 장력을 증가하며 장력센서 출력 전압 측정

- 온도보정식 : 식(8) 적용
- 바이어스 자기장 :  $H_{dc} = 36.02 \text{ kA/m}$
- $H_{ac}(t) = 0.7205 \sin(2\pi ft) \text{ kA/m}$

0.1 MN 간격으로 장력을 증가하면서 장력센서 출력 전압과 케이블 온도를 측정하고 측정결과를 기준온도로 환산하여 장력에 따른 장력센서 출력전압을 구하였고 상기 기간 동안 시험 결과를 장력에 따라 출력전압을 평균하였더니 Fig. 9와 같고 이것으로부터 장력 변환곡선을 구할 수 있다.

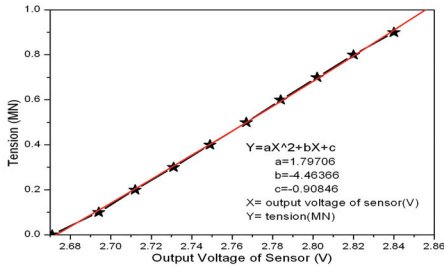


Fig. 9 장력에 따라 장력센서 출력전압을 기준온도로 변환한 장력변환곡선

Fig. 9에서

- 별표로 연결된 선 : 장력에 따른 출력(V)
- 적색선 : 장력변환곡선

Fig. 9의 장력에 따른 출력 특성곡선을 2차식으로 회귀분석하면 식(9)이 되고 식(9)은 기준온도 장력 변환식으로 이 식의 x에 온도 보정된 장력센서 출력전압을 대입하면 장력센서에 의한 장력 표기값이 된다.

$$y = 1.79706x^2 - 4.6366x - 0.90846 \quad (9)$$

- 여기서 y : 출력전압에 대응하는 장력(MN)
- x : 기준온도로 환산된 출력전압 ( $V_o(20^\circ\text{C})$ )

### 3.4.2. 장력특성시험 결과

표준인장시험기를 이용하여 케이블에 가해진 실제 장력은 로드셀에서 측정된 값이고 장력센서 출력전압을 기준온도로 환산하고 이것을 식(9)에 의해 장력으로 표기한 결과 Fig. 10과 같다. 이것은 앞의 시험기간 동안 측정한 것을 장력으로 표기한 것이다.

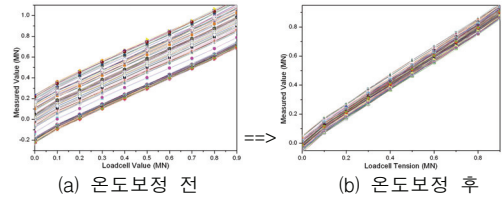


Fig. 10 온도보정 전/후 장력특성 시험 결과 (측정기간 2008.4.24~7.31)

- 여기서 y 축 : 장력센서 표기값(MN)
- x 축 : 실제 장력(MN)

결과적으로 온도보정 후는 최대 오차가  $\pm 0.06 \text{ MN}$  이내로 개선되었으며 이것은 측정범위에 대해 약 7%의 불확도를 갖는다.

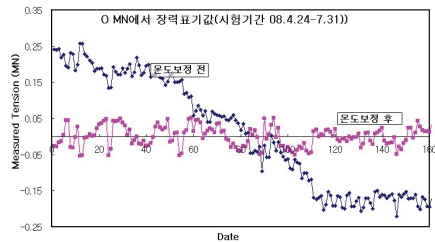


Fig. 11 0 MN에서 온도보정 전/후의 안정도 시험 결과

Fig. 10(a) and 10(b)에서 날자에 따라 0MN의 변화상태를 표기한 결과 Fig. 11과 같았으며 온도보정을 하면  $\pm 0.05 \text{ MN}$  이내로 안정됨을 알 수 있다.

## 4. 결 과

이상의 시험을 통하여 교량에 사용되는 케이블에 대한 자기적 방식의 장력센서를 설계하고 장력센서와 케이블의 온도특성을 시험한 결과 온도가 증가하면 케이블의 투자율이 감소하여 출력전압이 감소하고 있음을 확인하였다. 시험에 사용된 표준인장시험기에서 50 mm 케이블의 온도가  $1^\circ\text{C}$  변할 때 장력센서의 출력은 약 0.03 MN 씩 변한다. 따라서 장력센서의 온도보정계수를 구하고 온도에 따라 이를 적용한 결과 표준인장시험기에서 시험시 측정 범위 0~0.9 MN에서 최대 오차가  $\pm 0.06 \text{ MN}$ 인 안정된 결과를 얻었다. 따라서 이를 교량에 적용하여 특성을 시험하고자 준비하고 있다.

측정오차에 대한 허용범위는 교량 특성과 규격에 대한 검토가 요구되며 참고로 선진국에서 장력센서의 정밀도는 5%로 표기되었다.

향후 교량에 적용시 케이블의 바람 및 차량 이동에 따른 진동 영향 등에 대한 연구가 요구되며 장력센서를 교량에 설치하여 장기간 특성시험을 해야하며 이에 대한 연구를 준비하고 있다.

또한 측정 정밀도를 높이기 위해 장력센서에 가해지는 자기장의 정밀 측정과 장력센서 제작시 동일한 특성을 얻기 위한 제작 공정의 표준화 등이 필요하다.

교량에 사용되는 케이블의 종류는 다양하며 여러 종류의 케이블에 대해 시험하여 케이블 종류에 따른 특성식을 구해야 한다. 이와같이 자기적 방식의 장력측정에 대한 지속적인 연구를 수행함으로써 장력측정 정밀도는 향상될 것이다.

#### 참고문헌

1. 김창석 외, 전기/자기의 측정과 표준, KSRI-ET-72, 한국표준과학연구원, 1985.
2. 김창석 외, 자기 측정 및 시험, KSRI-ET-33-1, 한국표준과학연구원, 1987.
3. 박병우 외, 전자기학, 교보문고, 2000.
4. B.D. Cullity, Introduction to Magnetic Materials,

Addison-Wesley Publishing Company, 1972, pp. 327-375.

5. Park, Haewon, Ahn, Bongyoung, Lee Seung seok and Kim, Jongwoo "Development of Magnetic Sensor for Measurement of the Cable Tension of Large Scale Bridge" Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing Vol. 27, No. 4, 2007. 8, pp. 339-344.
6. Russel, J. C., Lardner, T. J., "Experimental Determination of Frequency and Tension for Elastic Cable," ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol. 124, No. 10, 1998, pp. 1067-1072.
7. Wang, M. L., "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.
8. Zui, H. Shinke, T. Namita, Y., "Practical Formulas for Estimation of Cable Tension by Vibration Method," Journal of Structural Engineering., Vol. 122, Issue 6, 1996, pp. 651-656.

(접수일자 : 2008년 8월 1일)  
(심사완료일자 : 2009년 1월 7일)