

# PS 텐던 강종별 긴장력 변화에 따른 자기이력 모니터링

김 준 경<sup>1</sup> · 박 승 희<sup>1</sup> · 이 환 우<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>성균관대학교 건설환경시스템공학과, <sup>2</sup>부경대학교 토목공학과

## Magnetic Hysteresis Monitoring according to the Change of Tensile Force and Steel Class of PS Tendons

Junkeyong Kim<sup>1</sup>, Seunghee Park<sup>1</sup> and Hwanwoo Lee<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil, Architectural and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan Univ., Suwon, 16419, Korea

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, Pukyong National Univ., Busan, 48513, Korea

### Abstract

This paper introduces a magnetic hysteresis monitoring result to apply an EM sensing technique for estimating tensile force of PSC girder to various class of PS tendon. The tensile force of PS tendon is a very important factor in the performance evaluation of PSC bridges. However, in this time, the tensile force was just measured only during construction and it does not monitored after construction. To measure the tensile force of PS tendons, the EM sensing based NDT method was developed but the proposed method cannot be applied to various class of PS tendons. Thus this study performed the magnetic hysteresis measurement according to the tensile force for class B, C and D PS tendons through experimental study. The specific tensile forces(50, 100, 150, 180kN) were induced to the each specimens and the magnetic hysteresis curve was measured at each point. The permeability of specimens were gradually decreased according to increase of tensile force. Especially, the slopes of permeability variation of class B and C were similar while that of class D was different.

**Keywords** : tensile force monitoring, magnetic hysteresis measurement, EM sensor, PS tendon, PSC bridge

### 1. 서 론

현재까지 많은 교량에 사용되고 있는 PSC(prestressed concrete) 거더는 콘크리트 거더에 초기 응력을 도입함으로써 기존의 콘크리트 거더 보다 뛰어난 성능을 가지며 저비용으로 설계 및 제작이 가능한 거더이다(Rens *et al.*, 1997). 하지만, 1985년의 Ynys-y-Gwas Bridge, 1992년의 Malle Bridge의 급작스런 붕괴 이후 PSC 교량에 대한 전반적인 검사가 이루어 졌고 검사 결과를 통해 PSC 교량이 노후하면서 물과 염소 이온의 침투로 인한 거더 내부 텐던이 부식이 됨에 따라 초기 도입 응력이 저하되어 PSC 거더의 성능이 저하됨이 확인되었다(Youn and Kim, 2006). 따라서 거더 성능 관리에 있어서 PSC 내부 텐던의 긴장력 손실 관리가 매우 중요한 항목임을 알 수 있다. 하지만, 현재는 시공 시에만 설계 긴장력 도입 여부

만을 검증하고 있어 시공 후 공용 시에는 긴장력 손실 관리가 제대로 이루어지지 않고 있는 실정이다.

이에 초음파/탄성파 속도, 진동특성 및 자기장을 이용하여 PSC교량의 긴장력을 비파괴적으로 측정하고자 하는 연구가 진행되었다(Chen and Wissawapaisal, 2001; Saiidi *et al.*, 1994; Kim *et al.*, 2004; Baudendistel and Tunner, 2007; Calkins *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2005; Sumitro *et al.*, 2002). 특히 PSC 거더의 긴장력을 추정하기 위해 EM 센서를 통하여 긴장력에 따른 PS 텐던의 비투자율의 변화를 계측하는 기법에 대한 연구가 진행되었다. 해당 연구결과를 통해 도입된 긴장력이 커질수록 자기이력곡선의 기울기인 비투자율이 낮아지는 것을 확인하였으며 이를 통해 EM 센서를 이용하여 PS 텐던의 긴장력 추정이 가능하다(Kim *et al.*, 2015; Park *et al.*, 2015; Shin *et al.*, 2015).

\* Corresponding author:

Tel: +82-51-629-6073; E-mail: hwanwoo@pknu.ac.kr

Received March 7 2018; Revised April 9 2018;

Accepted April 10 2018

©2018 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

따라서 본 연구에서는 EM 센서의 현장 적용성을 향상시키기 위하여 PS 텐던의 강종별 긴장력에 따른 자기이력변화를 모니터링해 보고자 한다. 이를 위해 한국산업표준 KS D 7002 규격에 준수한 PS텐던 12종 중 PSC거더에 주로 쓰이는 7연선 B종 SWPC7BN 12.7mm, 7연선 C종 SWPC7CL 15.2mm, 7연선 D종 SWPC7DL 15.2mm를 대상으로 PS 텐던 강종별 긴장력 변화에 따른 자기이력을 모니터링하였다.

## 2. PS 텐던 긴장력변화에 따른 자기이력 모니터링

이 장에서는 본 연구에 사용되는 한국산업표준 KS D 7002 규격에 준수한 PS강연선에 관한 간략한 소개와 EM(elasto-magnetic) 센서에 적용되며 비교적 간단한 비파괴 평가 기술인 탄성-자기 이론에 대하여 간략히 소개하고, 이를 통하여 자기 이력 모니터링을 통한 PS텐던의 긴장력 추정 기법에 대하여 말하고자 한다.

### 2.1 한국산업표준 PC 강연선

한국산업표준 강연선의 종류는 12종류로 그 분류는 Table 1과 같다.

7연선 A종은 인장 강도 1720N/mm<sup>2</sup>급, B종은 1860 N/mm<sup>2</sup>급, C종은 2160N/mm<sup>2</sup>급, D종은 2400N/mm<sup>2</sup>급을 나타낸다. 릴렉세이션 표준값에 따라 보통선은 N, 낮은선은 L의

**Table 1** Kind and mark of PS tendons according to KS D 7002

Kind	Mark	
2 wire strand	SWPC2N, SWPC2L	
3 wire strand	SWPD3N, SWPD3L	
7 wire strand	Class A	SWPC7AN, SWPC7AL
	Class B	SWPC7BN, SWPC7BL
	Class C	SWPC7CL
	Class D	SWPC7DL
19 wire strand	SWPC19N, SWPC19L	

**Table 2** Mechanical properties of 7 wired strand

Mark	Load for 0.2% permanent elongation(kN)	Tensile load (kN)	Elongation (%)	Relaxation	
				N	L
SWPC7BL (12.7mm)	More than 156	More than 183	More than 3.5	Below 8.0	Below 2.5
SWPC7CL (15.2mm)	More than 255	More than 300	More than 3.5	-	Below 2.5
SWPC7DL (15.2mm)	More than 283	More than 333	More than 3.5	-	Below 2.5

**Table 3** Size and permissible tolerance of tendons

Mark	Standard diameter	Permissible tolerance	Difference between diameter of core wire and axial wire
SWPC7BL (12.7mm)	12.7mm	+0.4 -0.2	0.08mm 이상
SWPC7CL (15.2mm)	15.2mm	+0.4 -0.2	0.08mm 이상
SWPC7DL (15.2mm)	15.2mm	+0.4 -0.2	0.08mm 이상

기호를 끝에 붙인다.

PS강연선의 인장하중은 시험 중의 최대 하중으로 하고 0.2% 영구 연신율에 대한 하중은 하중-연신을 곡선의 직선 부분에 대하여 연신율 0.2%의 간격을 가진 평행선을 긋고 원곡선과의 교점을 잡아 정한다.

선의 치수 측정은 임의 위치의 최대 지름과 최소 지름을 측정하여 구하며, 연선의 치수 측정은 임의 위치의 외접원의 최대 지름과 최소 지름을 측정하여 구한다. 7연선의 경우 표준 지름은 연선의 외접원의 지름으로 한다. 선 및 연선의 공칭 단면적 및 단위 무게는 Table 4에 따른다.

**Table 4** Nominal cross-sectional area and weight of tendons

Mark	Nominal cross-sectional area (mm <sup>2</sup> )	Unit weight (kg/km)
SWPC7BL (12.7mm)	98.71	774
SWPC7CL (15.2mm)	138.7	1101
SWPC7DL (15.2mm)	138.7	1101

### 2.2 탄성-자기 효과를 이용한 긴장력 측정

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

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

식에서 Δl은 자기 변형이다. 양의 자왜특성을 갖는 재료는 자화되면 길이가 늘어나고, 또 물질이 자화된 상태에서 인장력을 가하면 연신되어 자화를 증가시키게 된다.

Fig. 1에서와 같이 B-H곡선(자속밀도-자기장곡선)에서 인장력이 없을 때 자기장 H1을 가하면 A만큼 자화되고 인장력 σ<sub>1</sub>을 이 재료에 가하면 일정한 자장 하에서 자화가 B로 증가

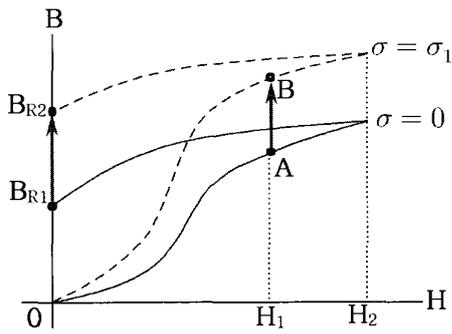


Fig. 1 Effect of tensile force in the magnetic hysteresis curve

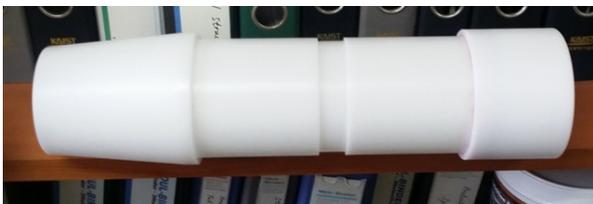
한다. 인장력이 없을 때 자기장을  $H_1$ 에서  $H_2$ 로 증가시킨 후 다시 0으로 내리면 잔류자속밀도는  $B_{R1}$ 인데 반하여,  $\sigma_1$ 의 인장력이 존재하는 경우 잔류자속밀도는  $B_{R2}$ 로 증가한다.

그러나 자기 소거된 시료 즉 자기장  $H=0$  인 상태에서는 인장력이 인가되어도 실선과 점선이 원점에서 교차하므로 어떤 자화의 변화도 일으키지 않는다. 외부인장력에 따라 자화곡선이 달라지는 이유는 투자율이 장력에 따라 변하기 때문이다. 즉 PS강재에 걸린 인장력에 따라 자속밀도의 변화가 발생된다는 것을 의미한다. 이러한 원리를 이용하면 EM 센서를 통해 자기 이력 곡선을 계속함으로써 긴장력의 비파괴 검사가 가능하다.

### 3. EM센서를 이용한 강종별 자기이력 모니터링

#### 3.1 계측용 EM 센서의 제작

PSC 거더의 긴장력 계측을 위하여 PSC 거더 내부이 가능한 EM 센서 시작품을 제작하였다. EM 센서 시작품은 Fig. 2와 같이 한쪽 끝단은 정착구 내부 구멍으로 삽입되기 위하여 사선



(a) Front view



(b) Anchorage connect

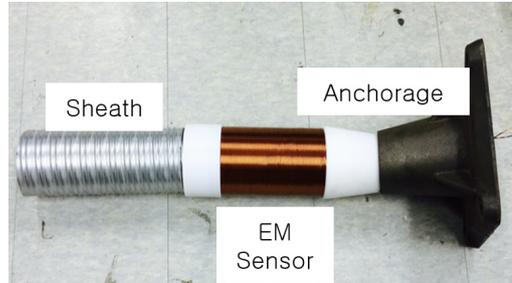


(c) Sheath connect

Fig. 2 Bobbin for EM sensor



(a) EM sensor



(b) Installation of EM sensor

Fig. 3 EM sensor for estimating tensile force of PS tendon

가공을 실시하고 나머지 한 끝단은 쉬스관과의 연결을 위하여 쉬스관의 직경과 맞게 나사선 가공을 통하여 쉬스관-정착구 사이에 조인트 형태로 삽입될 수 있도록 개발되었다.

제작된 EM 센서 시작품용 보빈에 1차 코일 및 2차 코일을 권선하여 EM 센서 시작품을 Fig. 3과 같이 완성하였다. 이때 1차코일은 PEW 1.2t 에나멜동선을 이용하여 300회 권선되었으며 2차 코일은 PEW 0.3t 에나멜동선을 이용하여 100회 권선되었다. 제작된 EM 센서 시작품을 이용하여 긴장력 계측 성능 평가 및 적용성 검증 실험을 실시하였다.

#### 3.2 강종별 자기이력 계측

##### 3.2.1 실험 세팅

EM센서 시작품의 검증을 위하여 실험실 단계에서 1개의 텐던에 긴장력을 변화하면서 강종별 자기이력곡선을 계속하였다.

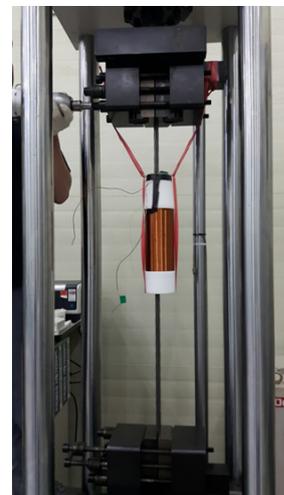


Fig. 4 Test setting

실험은 Fig. 4와 같이 1개의 텐던을 MTS를 이용하여 긴장력을 변화시키면서 제작된 EM 센서 시작품을 이용하여 긴장력에 따른 신호 변화를 계측하는 방법으로 진행되었다. 현재 사용되고 있는 여러 가지 종류의 텐던에 대한 적용성을 검증하기 위하여 B종 12.7mm, C종 15.2mm, D종 15.2mm 세가지 종류의 텐던을 각각 3개의 시편을 이용하여 계측을 실시하였다. 각 텐던별로 50, 100, 150, 180kN의 긴장력을 도입하면서 긴장력에 따른 신호 변화를 관찰하였다.

### 3.2.2 계측 결과

각 강중별 긴장력에 따른 자기이력곡선의 변화를 Figs. 5~7에 나타내었다.

B, C, D종 모두 긴장력이 증가함에 따라 B-H loop의 기울기가 줄어드는 것을 확연히 파악할 수 있었다. 이를 정량화

하기 위하여 B-H loop의 기울기인 투자율을 추출하여 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 8의 투자율 변화 결과를 보면 B, C, D종 모두 긴장력에 따라 투자율이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 강연선의 직경에 따라 강연선이 자화되는 전체량이 감소하므로 12.7mm의 강연선은 15.2mm의 강연선보다 투자율이 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 같은 직경을 가진 C종과 D종의 경우에도 동일한 긴장력에서 종별로 나타내는 투자율 값이 다른 것을 확인할 수 있다. 계측된 긴장력과 투자율의 관계를 확인하기 위하여 Fig. 9와 같이 긴장력과 투자율의 관계를 회귀분석을 실시하였다. 각각의 강중별 선형회귀분석식은 다음과 같이 나타냈다.

$$T_B(kN) = -1304 \times \mu_B + 348.7 \quad (2)$$

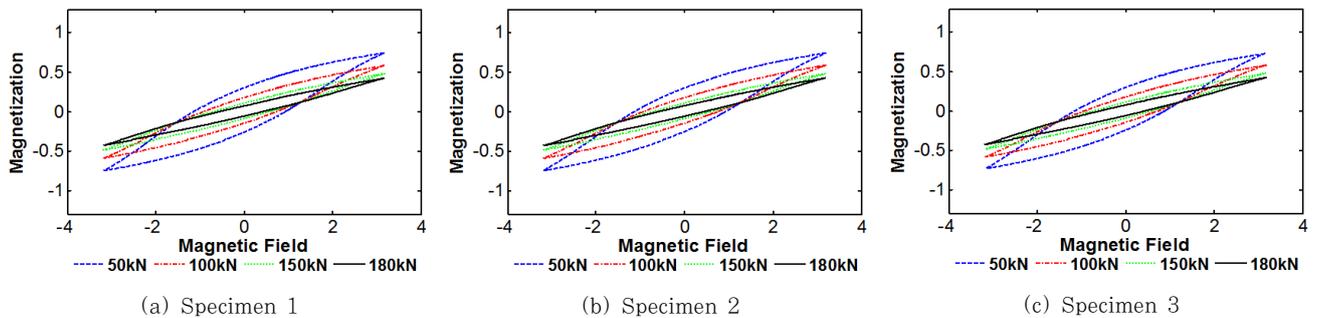


Fig. 5 B-H loop of class B tendon

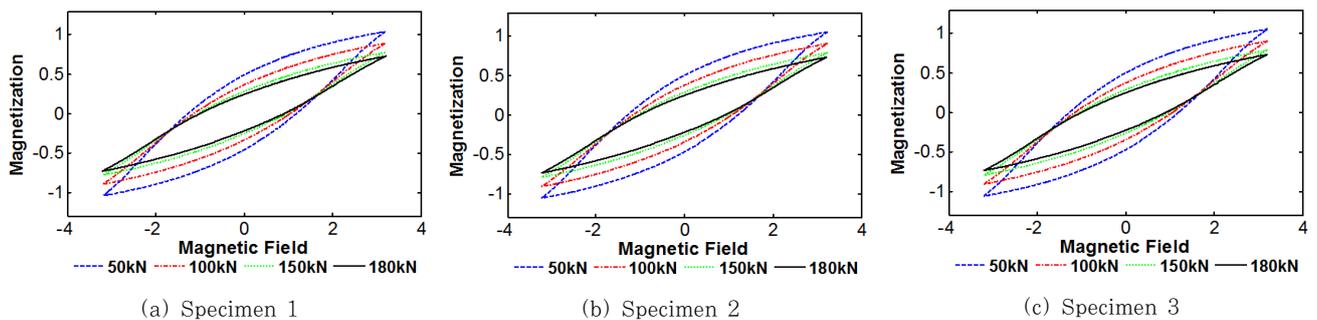


Fig. 6 B-H loop of class C tendon

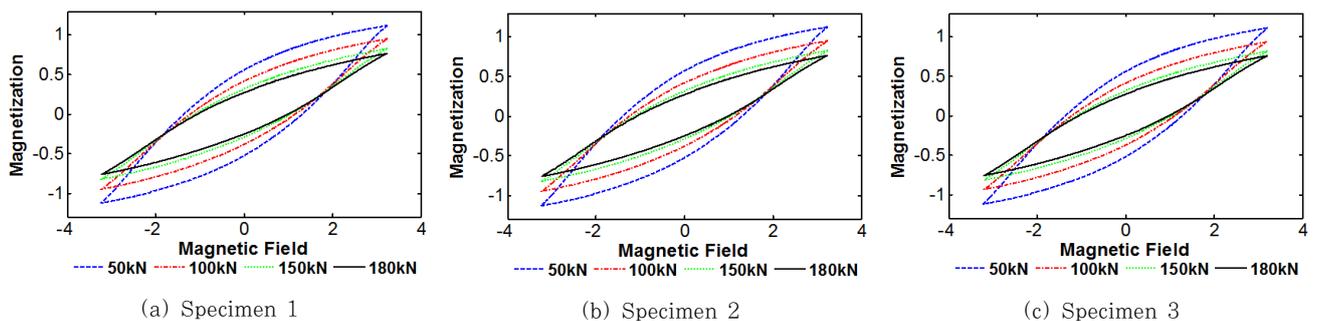


Fig. 7 B-H loop of class D tendon

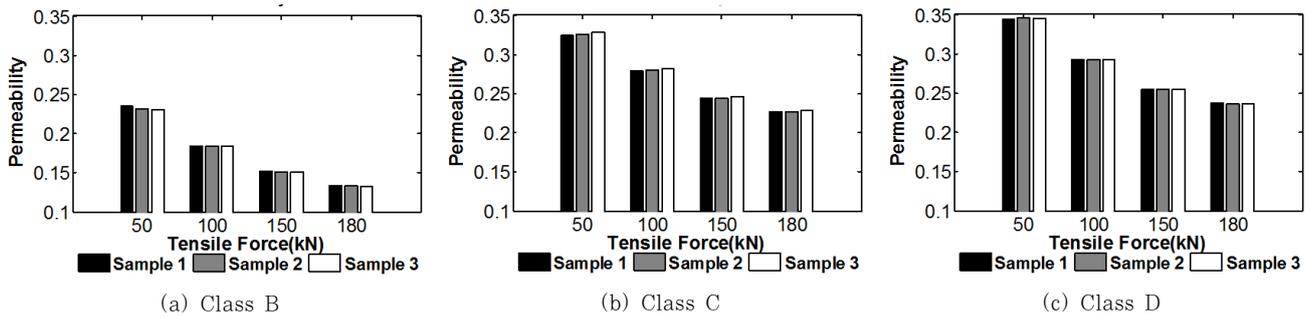


Fig. 8 Permeability change of PS tendons

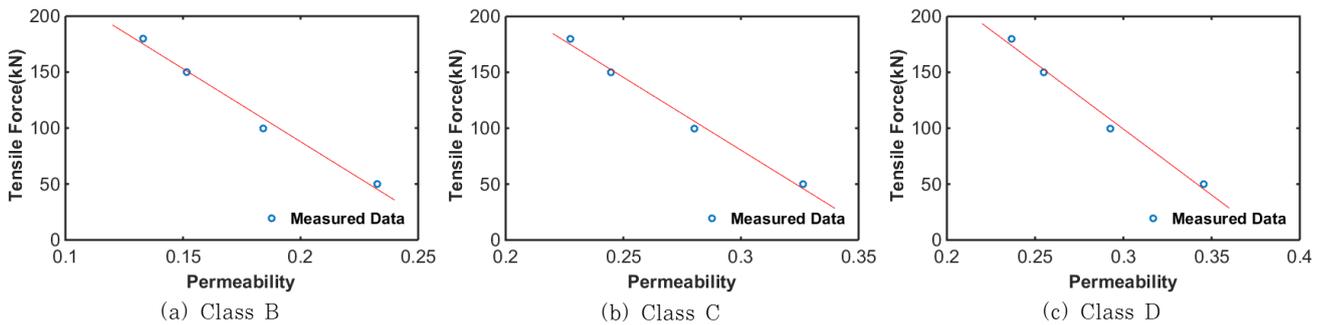


Fig. 9 Relationship between permeability and tensile force

$$T_C(kN) = -1303 \times \mu_C + 471.4 \quad (3)$$

$$T_D(kN) = -1179 \times \mu_D + 452.9 \quad (4)$$

여기서,  $T$ 는 도입된 긴장력이며  $\mu_B, \mu_C, \mu_D$ 는 각 강종별 측정된 투자율 값이다.

회귀분석 결과를 보면 강연선의 직경이 달라 상수값은 다르지만 B종과 C종은 유사한 기울기를 가지고 변화하는 것을 확인할 수 있었으며 D종은 B, C종과 다른 기울기를 가지고 긴장력에 따라 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 B종과 C종은 긴장력 변화에 따라 그 자기이력의 변화량은 유사하게 변화하는 것을 확인할 수 있으며 D종은 다른 종과 다른 양상으로 긴장력에 따라 자기이력이 변화한다. 따라서 실제 현장에서 긴장력 변화를 측정하기 위해서는 사용되는 강종 및 단면적을 확인하고 해당 종의 Reference 값을 이용하여 긴장력 추정이 이루어져야 한다.

#### 4. 결 론

본 논문은 PSC 교량의 긴장력 관리를 위하여 각 강종별 긴장력에 따른 자기이력변화를 모니터링하는 기법에 대한 연구를 진행하였다. EM 센서는 응력에 의해 강자성체의 자기이력이 변화하는 탄성-자기(elasto-magnetic) 이론을 이용하여 강자성체에 작용되는 응력을 추정할 수 있다. 이를 실제 현장에 적용하기 위하여 본 연구에서는 PSC 교량에 사용되는 다양한

종류의 긴장재에 대하여 EM 센서를 적용하기 위한 기초연구로써 각 강종별 긴장력에 따른 자기이력변화에 대한 연구를 실시하였다.

각 강종별 긴장력에 따른 자기이력곡선의 변화를 측정하기 위하여 PSC 교량에 적용이 가능한 EM 센서를 제작하고 제작된 EM 센서를 이용하여 B종 12.7mm, C종 15.2mm, D종 15.2mm 긴장재에 대한 실험을 실시하였다. 기준 긴장력을 확인할 수 있는 MTS를 이용하여 상용화된 B, C, D종 PS 긴장재에 50, 100, 150, 180kN의 긴장력을 도입하면서 EM 센서를 이용하여 각 긴장력 단계의 자기이력곡선을 측정하였다.

긴장력 단계에 따른 자기이력곡선의 변화를 분석한 결과 모든 강종에서 긴장력이 증가함에 따라 자기이력곡선의 기울기인 투자율이 감소하는 경향을 나타내는 것을 확인하였으며 긴장재의 단면적이 증가함에 따라 자화되는 면적이 증가하여 투자율의 절대값이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 각 강종별 긴장력에 따른 투자율의 변화를 회귀분석한 결과 B종과 C종의 강연선은 단면적이 달라 선형회귀분석식의 상수값은 상이하지만 같은 기울기를 가지고 변화하는 것을 확인할 수 있었으며 D종의 경우 다른 강종과는 다른 경향으로 긴장력에 따라 그 자기이력이 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 PSC 거더의 긴장력을 측정하기 위해서는 사용되는 긴장재의 강종 및 단면적을 확인하고 해당되는 기준식을 이용하여 긴장력 추정이 가능함을 확인하였다. 이를 바탕으로 실제 PSC 교량에 적용이 가능한 긴장력 추정 기법 개발이 가능할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2017년)에 의하여 연구되었음.

### References

- Baudendistel, T.A., Turner, M.L.** (2007) A Novel Inverse-Magnetostrictive Force Sensor, *IEEE Sensor J.*, 7, pp.245~250.
- Calkins, F.T., Flatau, A.B., Dapino, M.J.** (2007) Overview of Magnetostrictive Sensor Technology, *J. Intell. Mater. Sys. & Struct.*, 18, pp.1057~1066.
- Chen, H.L., Wissawapaisal, K.** (2001) Measurement of Tensile Forces in a Seven-Wire Prestressing Strand using Stress Waves, *J. Eng. Mech.*, 27, pp.599~606.
- Kim, J., Park, J., Zhang, A., Lee, H., Park, S.** (2015) Prestressing Loss Management for PSC Girder Tendon Based on EM Sensing, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 28, pp.369~374.
- Kim, J.T., Yun, C.B., Ryu, Y.S., Cho, H.M.** (2004) Identification of Prestress-loss in PSC Beams Using Modal Information, *Struct. Eng. & Mech.*, 17, pp.467~482.
- Park, J., Kim, J., Zhang, A., Lee, H., Park, S.** (2015) Embedded EM Sensor for Tensile Force Estimation of PS Tendon of PSC Girder, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 28, pp.691~697.
- Rens, K.L., Wipf, T.J., Klaiber, F.W.** (1997) Review of Nondestructive Evaluation Techniques of Civil Infrastructure, *J. Perform. Constr. Facil.*, 11, pp.152~160.
- Saiidi, M., Douglas, B., Feng, S.** (1994) Prestress Force Effect on Vibration Frequency of Concrete Bridges, *J. Struct. Eng.*, 120, pp.2233~2241.
- Shin, K.J., Park, Y.U., Lee, S.C., Kim, Y.Y., Lee, H.W.** (2015) Experimental Evaluation of Prestress Force in Tendons for Prestressed Concrete Girders using Sensors, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 28, pp.715~722.
- Sumitro, S., Jarosevic, A., Wang, M.L.** (2002) Lasto-magnetic Sensor Utilization on Steel Cable Stress Measurement, *Proc. 1st fib Cong.*, pp.79~86.
- Wang, M.L., Wang, G., Zhao, Y.** (2005) Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring, *Springer, Berlin, Germany*, pp.495~504.
- Youn, S.G., Kim, E.K.** (2006) Deterioration of Bonded Post-Tensioned Concrete Bridges and Research Topics on the Strength Evaluation in ISARC, *Proc. JSCE-KSCE Joint Seminar on Maintenance and Management Strategy of Infrastructure in Japan and Korea*.

### 요 지

본 논문에서는 PSC 거더의 긴장력을 계측하기 위한 EM 센싱 기법을 다양한 PS 텐던에 적용하기 위하여 PS 강종별 긴장력 변화에 따른 자기이력 모니터링 결과를 소개한다. PSC 교량의 성능평가에 있어 PS 텐던의 긴장력은 매우 중요한 인자이나 현재는 시공시 설계 긴장력의 도입 여부만을 검증하고 그 이후에는 긴장력 관리가 이루어지지 않는 실정이다. 이를 계측하기 위하여 EM 센서를 이용하여 긴장력을 계측하는 기법에 대한 연구가 이루어지고 있으나 PSC 거더에 사용되는 모든 PS 텐던에 대한 연구는 이루어지지 않았다. 이에 본 연구에서는 PSC 교량에 주로 사용되는 B, C, D종 PS 텐던에 대해 EM 센싱 기법을 적용하기 위하여 각 강종별 긴장력에 따른 자기 이력 변화를 모니터링하였다. 이를 위해 B종 12.7mm, C종 15.2mm, D종 15.2mm PS 텐던 시편에 50, 100, 150, 180kN의 긴장력을 도입하고 각 긴장력 단계마다 자기 이력 곡선을 EM 센서를 통하여 계측하였다. 계측 결과 각 긴장력 단계마다 그 투자율이 정량적으로 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 특히 B, C 종의 경우 단면적이 달라 선형회귀분석식의 상수는 상이하지만 유사한 기울기를 가지고 변화하고 D종의 경우 다른 강종과 다른 기울기를 가지고 변화하는 것을 확인하였다.

**핵심용어** : 긴장력 모니터링, 자기이력계측, EM 센서, PS 텐던, PSC 교량