EM센서를 활용한 PSC 텐던 긴장력 손실 관리

김 준 경¹ · 박 주 영¹ · 장 오 기¹ · 이 환 우² · 박 승 희^{3*}

¹성균관대학교 건설환경시스템공학과, ²부경대학교 토목공학과, ³성균관대학교 건축토목공학부

Prestressing Loss Management for PSC Girder Tendon Based on EM Sensing

Junkyeong Kim¹, Jooyoung Park¹, Aoki Zhang¹, Hwanwoo Lee² and Seunghee Park^{3*}

¹Department of Civil & Environmental System Engineering, Sungkyunkwan Univ., Suwon, 440-746, Korea

²Department of Civil Engineering, Pukyong National Univ., Busan, 608-737, Korea

³School of Civil & Architecture Engineering, Sungkyunkwan Univ., Suwon, 440-746, Korea

Abstract

In this paper, an EM sensing based prestressing force estimation method is proposed, in which it can estimate tensile force of PS tendon for PSC girder. The PSC girder has more improved performance than the general concrete girder by introducing the prestressing to the concrete. Thus the PSC girder bridge is widely constructed due to its high performance and low cost. However, the prestressing force has not been managed nevertheless it is major factor for the maintenance of the PSC girder bridge. The prestressing force was just measured during construction using jacking device and after that, it can not be managed. For this reason, this paper proposes a tensile force estimation method of PS tendon based on EM sensor. The permeability of ferroelectric material is changed according to the induced stress to the material, in which it can be measured using EM sensor. To measure the permeability of PS tendon, the EM sensor was fabricated and verified by performing the MTS test. The test was performed using 7-wire steel tendon under the 0, 40, 80, 120, 160, 200 KN of tensile force. The permeability of PS tendon was gradually decreased according to the increasement of tensile force. The regression method was used to find the relation between permeability and stress. As a result, the permeability has linear relation with the tensile force of PS tendon and the pre-stressing force can be estimated by the derived estimation equation.

Keywords : EM sensor, measurement of permeability, tensile force estimation, PSC girder

1. 서 론

1936년 처음 도입된 PSC(prestressed concrete) 거더는 콘크리트 거더에 초기 응력을 도입함으로써 기존 콘크리트 거더보다 높은 성능을 가지며 보다 저비용의 거더 설계가 가능해짐으로써 현재까지 많은 교량에 사용되고 있는 거더이다(Rens *et al.*, 1997). 그러나 1985년의 Ynys-y- Gwas Bridge, 1992년의 Malle Bridge의 급작스런 붕괴 이후 PSC 교량에 대한 전반적인 검사가 이루어졌다(Weiher and Zilch, 2006). 검사 결과에 따르면 PSC 교량이 노후화됨에 따라 물과 염소이온의 침투로 인해 내부 텐던의 부식이 발생

하여 초기 응력이 저하되어 PSC 거더의 성능이 저하됨이 발견되었다(Youn and Kim, 2006). 따라서 PSC 거더 내부 텐던의 긴장력 관리가 거더 성능 관리에 있어 매우 중요한 항목이나 현재는 시공 시 설계 긴장력의 도입 여부만을 검증한 후 공용 시에는 그 관리가 이루어지지 않는 실정이다.

PS(prestressing) 텐던의 장력을 추정하기 위해서 많은 비파괴 검사 방법이 연구되었다. 진동 기반의 장력추정기법은 1980년대 이후부터 수평 케이블 장력추정연구를 시작하여 2000년대에 Russel과 Lardner(1998)의 실험을 통하여 케이블의 장력을 산정하는 운동방정식을 완성하여 현재까지 사용하고 있다(Kim *et al.*, 2008). 자기 기반의 장력 측정

* Corresponding author:

Tel: +82-31-290-7648; E-mail: shparkpc@skku.edu

Received June 19 2015; Revised July 10 2015;

Accepted July 15 2015

©2015 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.

기술은 Wang 등(2005)에 의해 개발된 기술로써 장력에 따라 강재 케이블의 투자율(magnetic permeability)이 변화하는 물리적 특성을 이용하여 케이블의 장력을 측정한다. 또한 Chen과 Wissawapaisal(2001), Washer 등(2002)은 초음파의 평균값을 통한 장력 추정 기법에 대한 연구를 진행하였으며 Kim 등(2009)은 정착판의 임피던스를 이용한 긴장력 추정 기법에 대한 연구를 진행하였다. Kim 등(2012)은 텐던 내부에 FBG 센서를 매립하여 PS 텐던의 장력을 추정하는 기법을 제안하는 등 많은 기법으로 PS 텐던의 긴장력을 측정하는 방법이 제안되었다. 그러나 기존 기법의 경우 노출된 PS 텐던의 긴장력 측정기법으로써 이는 실제 현장에 서 적용하기 어려운 상황이다.

이에 본 논문은 긴장력 측정 센서를 PSC 거더 내부로 매립하여 현장 적용성을 향상시키기 위한 기법을 개발하기 위해 기존 기법 중 PSC 거더 내부로 매립이 가능하고 비교적 높은 내구성을 가진 EM(elasto-magnetic) 센서를 이용한 긴장력 측정 기법을 활용하여 현장적용성이 높은 긴장력 측정 기법을 제안하고자 한다. 이를 위한 기초연구로써 PSC 거더 내부로 매립하기 위한 EM 센서 설계 및 장력에 따른 센서 출력 특성 분석을 통해 EM 센서를 활용한 PSC 텐던 긴장력 손실 관리 기법에 대해 연구하였다.

2. EM센서를 활용한 PS 텐던 긴장력 추정 기법

본 장에서는 PS 텐던의 긴장력을 추정하기 위해 적용된 EM(elasto-magnetic) 센서에 대한 이론 및 이를 통해 PS 텐던의 긴장력을 추정하는 기법에 대해 소개하고자 한다.

2.1 탄성-자기효과에 의한 긴장력 측정

탄성-자기(elasto-magnetic) 효과는 자기력과 응력의 상호작용으로 인해 발생한다. 자기장이 강자성체에 작용할 때 강자성체의 자기구역(magnetic domain)은 초기 자화 방향에서 가해진 자기장의 방향으로 회전하며 이때 자기구역의 크기와 방향이 변화한다. 이때 발생하는 자기변형에 의한 응력은 다음과 같은 식으로 나타난다(Jiles, 1991).

$$\sigma = \frac{1}{\mu_r} \cdot \frac{J_s^2}{3\lambda_s\mu_0} \quad (1)$$

여기서, σ 는 응력(mechanical stress), J_s 는 자기편극(magnetic polarization) 값이며 λ_s 는 포화자기변형(saturation magnetostriction)을, μ_r 은 강자성체의 투자율

Fig. 1 Typical B-H curve for a ferromagnetic material

(permeability)을 나타내며 μ_0 는 진공의 투자율을 나타낸다.

강자성체의 자화는 일반적으로 Fig. 1과 같이 자기장의 세기(H)와 자속밀도(B)의 관계로 나타내며 이는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$B = \mu H \quad (2)$$

여기서, μ 는 자기 투자율 텐서를 나타낸다(Kurokawa *et al.*, 2001). 만약 강자성체가 균질하고 등방성을 가지고 있다면 자기 투자율은 스칼라 값을 가지게 된다.

EM 센서는 기술적 자기 포화상태에서 발생하는 강자성체의 탄성-자기 특성 변화를 통해 강자성체에 도입된 응력을 추정한다(Wang and Chen, 2000). EM 센서는 강자성체를 자화시키기 위한 1차 코일(primary coil)과 가해진 자기장과 비투자율에 따라 변화하는 자속밀도를 측정하기 위한 2차 코일(secondary coil)로 구성된다. 자기장이 강자성체를 기술적으로 포화시킨다고 가정하면 비투자율(relative permeability)은 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다(Wang *et al.*, 2001).

$$\mu(\sigma, T) = 1 + \frac{A_0}{A_f} \left[\frac{V_{out}(\sigma, T)}{V_0} - 1 \right] \quad (3)$$

여기서, T 는 온도, A_0 는 2차 코일의 단면적, A_f 는 강자성체의 단면적을 나타내며 V_{out} 은 강자성체가 있을 때 발생한 전압을 적분한 값이며 V_0 는 강자성체가 없을 때 발생한 전압의 적분 값이다. 위 식에 따라 EM 센서를 통해 PS 텐던의 비투자율 및 자속밀도 변화를 측정함으로써 강자성체인 PS 텐던에 가해지는 긴장력 값을 추정할 수 있다.

2.2 PS 텐던 긴장력 측정을 위한 EM 센서 제작

국내에 주로 시공되고 있는 부착형 텐던을 가지는 PSC의 경우 PS 텐던이 PSC 내부에 위치하고 시공 완료 후 그라우팅 처리됨으로 인해 시공 후 유지관리 방안이 없는 상태이다. 이에 본 연구는 PSC 내부에 매립이 가능한 EM 센서를 제작하여 PSC 거더 내부에서 PS 텐던의 긴장력을 상시 계측할 수 있는 시스템을 개발하기 위해 EM 센서를 제작하고 제작된 EM 센서의 성능을 검증하였다.

성능 검증을 위해 제작된 EM 센서는 Fig. 2와 같이 PVC 재질의 보빈을 이용하여 제작되었다. 1차 코일은 직경 1.2mm의 코일을 이용하여 300×φ150mm의 PVC 보빈에 287회 권선되었다. 2차 코일은 직경 0.3mm의 코일을 이용하여 제작되었으며 300×φ100mm의 PVC 보빈에 102회 권선되었다. 1차 코일과 2차 코일은 각각 200mm, 20mm의 폭으로 권선되었으며 2차 코일이 권선된 보빈을 1차 코일이 권선된 보빈의 가운데에 사각 블록을 이용하여 고정시켜 EM 센서를 제작하였다.

Fig. 2 EM sensor for PS tendon

Table 1 Spec of EM sensor

Spec	Primary Coil	Secondary Coil
Diameter(mm)	150	100
No. of turns	287	102
Resistance(Ω)	9.82	11.92

3. EM 센서를 이용한 PS 텐던 긴장력 계측 기법 검증

3.1 검증 실험 세팅

EM 센서를 이용하여 PS 텐던의 긴장력에 따른 자기이력 변화를 파악하기 위해 MTS를 이용한 단일 텐던 실험을 실시하였다. 사용된 텐던은 Relaxation 2종(Low) 7연선 15.2(mm) 138.70(KSD-7002)이며 MTS의 하중재하를 통해 각각 0, 40, 80, 120, 160, 200KN의 인장력을 도입한 후 EM 센서를 이용하여 자기이력곡선(B-H Loop)을 2개의 시편을 이용하여 계측을 실시하였다. 실험 시 온도에 따른 계측 값의 오차를 방지하기 위해 실험실의 온도를 20℃로 유지하여 실험을 실시하였다.

EM 센서를 이용하여 PS 텐던의 자기이력곡선을 계측하

Fig. 3 Test Setting

Fig. 4 Instruments for measurement of EM sensor

기 위하여 DAQ(NI PXI-6251, BNC-2120), DC Power Amplifier 및 Integrator를 사용하였으며 Labview 2013 기반의 계측 프로그램을 사용하였다. 입력전압의 주파수는 0.02 HZ, 전압은 ±3V인 삼각파를 사용하여 1차 코일에 자기장을 형성하였다.

3.2 검증실험 결과

Fig. 5와 6에 시편 1번과 2번의 자기이력곡선 계측 결과를 나타내었다. 두 시편 모두 긴장력이 증가함에 따라 PS 텐던에서 계측되는 자속 밀도가 줄어 들었으며, 이에 따라 자기이력곡선의 기울기인 비투자율이 줄어드는 경향을 나타내었다. 이는 사용된 PS 텐던의 자화경향은 외력이 증가함에 따라 줄어드는 경향을 가지고 있다는 것을 확인할 수 있었다. EM 센서를 이용한 자기이력곡선 계측을 통해 PS 텐던의 긴장력을 추정하기 위해 본 연구에서는 자기이력곡선의

(a) B-H Loop of Sample 1

(b) Signal change of B-H Loop of Sample 1

Fig. 5 Result of sample 1

(a) B-H Loop of Sample 2

(b) Signal change of B-H Loop of Sample 2

Fig. 6 Result of sample 2

기울기인 비투자율을 추출하여 긴장력을 추정하였다.

Fig. 7에 각 시편의 긴장력에 따른 비투자율 변화를 나타내었다. 긴장력 단계에 따라 비투자율은 확실히 줄어드는 경

(a) Sample 1 data

(b) Sample 2 data

Fig. 7 Permeability variation according to the tensile force

Fig. 8 Permeability-tension regression result

향을 나타내었으며 계측에 의한 일부 오차가 발생하긴 하나 40KN의 긴장력 단계를 확실히 구분할 수 있는 임계점 (threshold)이 존재하는 것을 확인할 수 있었다.

EM 센서를 이용해 계측한 비투자율과 긴장력과의 관계를 확인하기 위하여 회귀분석기법을 적용하여 비투자율과 긴장력의 관계를 수식화하였다.

$$\sigma = -12920\mu + 1938 \quad (4)$$

본 연구에서 계측한 결과에 따르면 Fig. 8과 같이 비투자

율과 긴장력은 선형 관계를 가지고 있는 것으로 확인되었다 ($R^2=0.9816$). 본 연구에서 도출된 비투자율-긴장력 추정식을 이용하여 PS 텐던의 긴장력을 EM 센서 계측을 통해 추정할 수 있으며 이를 이용하여 시공 중, 그리고 공용 중의 PSC 거더의 긴장력 관리가 가능함을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 EM 센서를 이용한 PS 텐던의 긴장력 추정 기법을 제안하였다. EM 센서는 응력에 의해 강자성체의 자기이력이 변화하는 탄성-자기(Elasto-magnetic) 이론을 이용하여 강자성체에 작용되는 응력을 추정할 수 있다. 본 연구에서는 기존 케이블 교량의 장력을 계측하는 EM 센서를 PS 텐던 긴장력 계측기법으로 활용하는 방안에 대한 기초연구를 실시하였다.

PS 텐던의 긴장력을 계측하기 위하여 PSC 거더 내부로 매립이 가능한 EM 센서를 제작하였으며 제작된 센서의 성능 검증을 실시하였다. 기준 긴장력을 확인할 수 있는 MTS를 이용하여 상용화된 PS 텐던에 0, 40, 80, 120, 160, 200KN의 긴장력을 도입하면서 EM 센서를 이용하여 각 긴장력 단계의 자기이력곡선을 계측하였다.

긴장력 단계에 따른 자기이력곡선의 변화를 분석한 결과 긴장력이 증가함에 따라 자기이력곡선의 기울기인 비투자율이 감소하는 경향을 나타내는 것을 확인하였으며 이를 추출하여 각 긴장력과의 관계를 규명한 결과 비투자율과 긴장력은 선형관계를 가지고 있는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 도출된 비투자율-긴장력 관계식을 이용하여 PS 텐던의 긴장력을 추정할 수 있으며, 이를 이용하여 PSC 거더의 긴장력 관리가 가능함을 확인할 수 있었으며 이를 바탕으로 PSC 거더 내부에 EM 센서를 매립하여 실시간 긴장력을 계측할 수 있는 기법으로의 발전이 가능함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(14CTAP-C078424-01#)에 의해 수행되었습니다.

References

Chen, H.L., Wissawapaisal, K. (2001) Measurement of Tensile Forces in a Seven-wire Prestressing Strands using Stress Waves, *ASCE J. Eng. Mech.*, 127(6), pp.599~606.

Jiles, D. (1991) *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*, Chapman and Hall, London, p.440.

Kim, J.T., Hong, D.S., Park, J.H., Cho, H.M. (2008) Vibration-Based Monitoring of Prestress-Loss in PSC Girder Bridges, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 21(1), pp.83~90.

Kim, J.T., Park, J.H., Hong, D.S., Cho, H.M., Na, W.B., Yi, J.H. (2009) Vibration and Impedance Monitoring for Prestress-loss Prediction in PSC Girder Bridges, *Smart Struct. & Sys.*, 5(1), pp.81~94.

Kim, J.M., Kim, H.W., Park, Y.H., Yang, I.H., Kim, Y.S. (2012) FBG Sensors Encapsulated Into 7-wire Steel Strand for Tension Monitoring of a Prestressing Tendon, *Adv. Struct. Eng.*, 15(6), pp.907~917.

Rens, K.L., Wipf, T.J., Klaiber, F.W. (1997) Review of Nondestructive Evaluation Techniques of Civil Infrastructure ASCE *J. Perf. Const. Facilities*, 11, pp.152~160.

Wang, M.L., Chen, Z. (2000) Magneto-elastic Permeability Measurement for Stress Monitoring in Steel Tendons and Cables, *Proc. of the SPIE 7th Annual Symposium on Smart Structures and Materials*, Health Monitoring of the Highway Transportation Infrastructure, 3995, pp.492~500.

Wang, M.L., Lloyd, G., Hovorka, O. (2001) Development of a Remote Coil Magneto-elastic Stress Sensor for Steel Cables, *Proc. of the SPIE 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Material*, Health Monitoring and Management of Civil Infrastructure Systems, Newport Beach CA, 4337, pp.122~128.

Washer, G.A., Green, R.E., Pond, R.B. (2002) Velocity Constants for Ultrasonic Stress Measurement in Prestressing Tendons, *Res. Nondestruct. Eval.*, 14(2), pp.81~94.

Weiher, H., Zilch, K. (2006) Condition of Post-tensioned Concrete Bridges-assessment of the German Stock by a Spot Survey of Damages, *Proc. First Int. Conf. Advances in Bridge Eng.*, pp.26~28.

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*, 7.

요 지

본 논문에서는 PSC 거더의 Prestress를 관리하기 위하여 EM 센서를 활용한 PSC 텐던 긴장력 손실 관리 기법을 소개한다. PSC 거더는 콘크리트 거더에 Prestress를 도입함으로써 기존 콘크리트 거더보다 높은 성능을 가지며 보다 저비용의 거더 설계가 가능해짐으로 현재 많은 교량에 사용되고 있는 거더이다. 그러나 PS 텐던의 긴장력 관리는 거더 성능 관리에 있어 매우 중요한 항목이나 현재는 시공시 설계 긴장력의 도입 여부만을 검증한 후 공용시에는 그 관리가 이루어지지 않는 실정이다. 이에 본 연구에서는 강자성 재료가 인장력에 따라 비투자율이 변화하는 특성을 이용하여 EM 센서를 이용해 PS 텐던의 투자율을 계측하여 PS 텐던의 긴장력을 계측하는 기법을 제안하였다. PSC 거더 내부에서 PS 텐던의 투자율을 계측하기 위하여 EM 센서 시제품을 제작하였으며 MTS 실험을 통해 PS 텐던으로 주로 사용되는 7연선 1가닥의 0, 40, 80, 120, 160, 200kN의 긴장력에 따른 투자율 변화를 계측하였다. 계측 결과 각 긴장력 단계마다 EM 센서를 통해 계측된 B-H Loop가 정량적으로 변화하는 것을 확인하였으며 계측된 투자율과 긴장력을 회귀분석한 결과 투자율과 긴장력은 선형 관계를 나타내었다. 이를 활용하여 EM 센서를 이용하여 PS 텐던의 긴장력 관리가 가능함을 검증하였다.

핵심용어 : EM 센서, 비투자율 계측, PS 텐던 긴장력 추정, PSC 거더