

PS 긴장재 긴장력 계측을 위한 PSC 거더 내부 매립용 EM 센서

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

¹성균관대학교 건설환경시스템공학과, ²부경대학교 토목공학과, ³성균관대학교 건축토목공학부

Embedded EM Sensor for Tensile Force Estimation of PS tendon of PSC Girder

Jooung Park¹, Junkyeong Kim¹, Aogi Zhang¹, Hwanwoo Lee² and Seunghee Park^{3*}

¹Department of Civil & Environmental System Engineering, Sungkyunkwan Univ., Suwon, 16419, Korea

²Department of Civil Engineering, Pukyong National Univ., Busan, 48513, Korea

³School of Civil & Architecture Engineering, Sungkyunkwan Univ., Suwon, 16419, Korea

Abstract

In this paper, an embedded EM sensor was researched to estimate prestressing force of PS tendon in PSC girder. Recent methodologies for managing prestressing force loss were staying on verifying a applying prestressing force under construction, namely the loss management can not be controlled after construction. To estimate the tensile force of PS tendon during lifetime of PSC girder, this research proposed a bobbin-type embedded EM sensor that can be embedded in PSC girder is designed and fabricated considering the shape properties of anchorage zone and sheath. To verify the proposed sensor, a small PSC girder test was performed. The embedded EM sensor was connected to a sheath and anchor block, and the concrete was poured. After curing, the change of the permeability of PS tendon under tensile forces of 200, 710, 1070, 1300kN was measured using embedded EM sensor. The permeability of PS tendon had decreased according to the increment of applied tensile force. Also it is confirmed that the change of permeability due to applied tensile force could resolve the applied tensile force values. As a result, proposed embedded EM sensor could be embed into the PSC girder and it could be used to estimate the tensile force variation during lifetime of PSC girder.

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

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 이루어졌다 (Weiher and Zilch, 2006). 검사 결과는 PSC 교량의 노후화되어 물과 염소 이온의 침투로 인한 거더 내부 텐던이 부식이 됨에 따라 초기 응력이 저하되어 PSC 거더의 성능이 저하됨을 보여 주었다 (Youn and Kim, 2006).

따라서 거더 성능 관리에 있어서 PSC 내부 텐던의 긴장력 손실 관리가 매우 중요한 항목임을 알 수 있다. 하지만, 현재 시공 시에만 설계 긴장력 도입 여부만을 검증하고 있어 시공 후 공용 시에는 긴장력 손실 관리가 제대로 이루어지지 않고 있는 실정이다.

그동안 PS (prestressed) 텐던의 장력을 추정하기 위하여 다양한 비파괴 검사 방법이 연구 및 개발되었다. 대표적으로 Lardner (1998)의 실험과 1980년대 이후부터 수평 케이블 장력추정연구를 시작한 Russel은 2000년대에 케이블의 장력 산정 운동방정식을 개발하여 현재까지 사용되고 있는 진동 기반의 장력추정 기법이 있다 (Kim *et al.*, 2008). 이후 자기 투자율 (magnetoelastic permeability)의 변화를 측정함으로써

* Corresponding author:

Tel: +82-31-290-7525; E-mail: shparkpc@skku.edu
Received October 15 2015; Revised November 4 2015;
Accepted November 23 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.

써 텐던과 케이블의 장력을 측정하는 기술이 Wang 등(2005)에 의해 개발되었다. 또한 Chen과 Wissawapaisal(2001)과 Washer 등(2002)는 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 다양한 기법으로 PS 텐던의 긴장력을 계측하는 방법이 제안되었다. 그러나 기존의 긴장력 계측 방법들은 노출된 텐던의 긴장력을 계측하는 기법으로 실제 현장에서 전혀 노출이 되지 않는 텐던의 긴장력을 계측하는 것은 매우 어려워 현장 적용성이 매우 낮다고 할 수 있다.

이에 본 논문에서는 긴장력 계측의 현장 적용성을 향상시키는 PSC 거더 내부에 매립이 가능한 계측 센서의 개발을 위해 기존 기법 중 내부 매립이 가능하고, 내구성이 좋아 이론적으로 영구적인 수명을 가지는 EM(elasto-magnetic) 센서를 제작하여 그 성능을 검증하고자 한다. 이를 위한 기초연구로서 PSC 거더의 정착구의 특성과, EM 센서의 설계 및 장력에 따른 센서의 출력 값의 특성 분석을 통해 EM 센서를 활용한 PS 긴장재 긴장력 계측기법을 연구하고자 한다.

2. EM 센서를 이용한 PS 텐던 긴장력 추정 이론

이 장에서는 EM 센서에 적용되며 비교적 간단한 비파괴 평가기술(Wang *et al.*, 2001)인 탄성-자기 이론에 대하여 간략히 소개하고, 이를 통하여 PS텐던의 긴장력 추정기법에 대하여 말하고자 한다.

2.1 탄성-자기(elasto-magnetism) 이론

강자성체의 자기 특성은 자기 이론(magnetic domain theory)에 의해 설명될 수 있다. 자기장 또는 기계적 응력이 강자성체에 작용하게 되면 강자성체 내의 자기 구역(magnetic domain)의 물리적인 특성이 변화하게 된다. 응력의 적용에 따라 재료의 자기 특성이 변화하게 되고, 자기 특성 변화의 크기는 그 재료만의 성질을 나타낸다(Sumitro, *et al.*, 2002). 이와 같은 현상은 다음 식과 같이 자기 구역의 내부 퍼텐셜 에너지로 설명될 수 있다.

$$E_{\sigma} = \frac{3}{2} \lambda_s \sigma \sin^2 \theta \quad (1)$$

여기서, E_{σ} 는 자기 변형 에너지(magnetic strain energy),

λ_s 는 포화자기변형(saturation magneto-restriction), σ 는 적용된 응력(applied stress), 그리고 θ 는 그 응력과 자화 방향이 이루는 각을 나타낸다. 또한 위 식에서 σ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, J_s 는 자기 편극(magnetic polarization), μ_r 은 재료의 상대 투자율, μ_0 는 진공 상태의 투자율을 나타낸다.

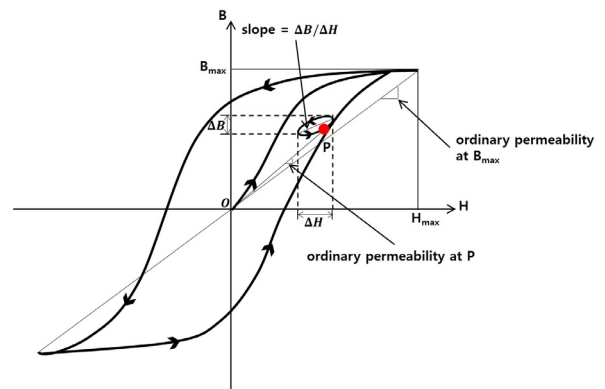


Fig. 1 B-H Curve of a typical ferromagnetic material

한 물질의 자기화는 일반적으로 자기장 세기(H)와 자속 밀도(B)로 나타낼 수 있으며, 어떤 물질이든 일반식으로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$B = \mu H \quad (3)$$

여기서, μ 는 자기 투자율을 나타내며 텐서이다(Kurokawa *et al.*, 2001). 하지만 만약 물질이 균질하고 등방성을 띠면 위 관계는 스칼라 형태로 바뀌며, μ 또한 스칼라 값을 가지게 된다.

Fig. 1은 전형적인 강자성을 띠는 재료의 자기 곡선($B-H$ curve)을 나타낸다. 투자율(μ)은 일정하지 않으며 자기장 강도에 의존함을 알 수 있다. 그러므로 μ 는 자기 곡선의 기울기가 아니며, 단순히 B/H 를 나타낸다. 여기서 자기 특성을 알아보기 위한 방법으로는 자기 유도 원리를 이용하여 원통코일 즉, 전압인가용 코일(1차 코일)과 계측용 코일(2차 코일)을 이용하는 방법이 있다. 전압인가용 코일에 직류 전류를 흘려주게 되면 시편은 자기장(H)와 자속 밀도(B)가 생성된다. Fig. 1에서 $\Delta B/\Delta H$ 는 투자율의 증분이며 본 논문에서는 그 양을 계측하여 PS 긴장재의 긴장력을 추정하는

EM센서를 제작하고자 한다.

단면적 A_s 를 가지는 강자성체가 n 회 권선되고 단면적 A_t 인 센서 코일을 통과하여 크기 $H(t)$ 를 가지는 균질한 외부 자기장을 받게 되면, 비투자율(relative permeability)은 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$\mu_r = 1 + \frac{A_t}{A_s} \left(\frac{V_{out}}{V_0} - 1 \right) \quad (4)$$

여기서, V_{out} 은 강자성체의 전압 출력 값이며, V_0 는 강자성체가 없을 때의 전압 값이다(Wang *et al.*, 2000). 비투자율과 전압의 관계식에 따라서 본 연구를 통해 제작되는 EM 센서를 이용하여 PS 긴장재의 긴장력 값 추정이 가능하다.

3. PS 텐던 긴장력 계측을 위한 매립형 EM센서 제작

이 장에서는 PSC 거더 내부에 EM센서를 매립하기 위하여 PSC 거더 정착구와 내부의 쉬스관 부분의 구조를 고려한 매립형 EM 센서를 설계 및 제작하며, 그 원리와 구조를 설명한다.

3.1 PSC 거더

일반적으로 국내에 주로 시공되는 부착형 텐던을 사용하는 PSC의 경우 PS 텐던은 거더 내부에 위치하며, 또한 시공이 완료된 후에는 그라우팅 처리를 하므로 그 후에는 텐던에 발생하는 긴장력의 변화를 정확히 예측할 수 없어 유지관리가 어려운 실정이다.

Fig. 2는 교각에 맞물리는 PSC 거더의 정착구를 나타낸 것이다. 기존 EM 센서는 현장에서 시공 전의 단계에서 텐던의 긴장력 변화를 계측하는 시험은 진행된 바가 있지만, 위

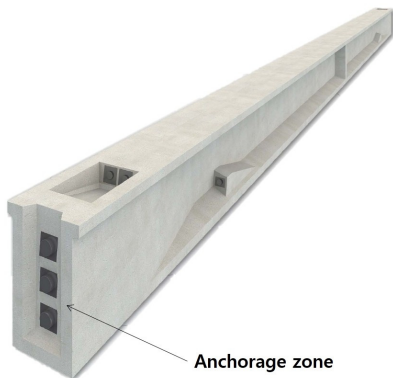


Fig. 2 PSC girder

와 같은 PSC 거더의 경우 시공완료 후 PS 텐던이 정착구에서 전혀 노출이 되지 않으므로 현장 적용성이 어려운 실정이다. 이에 본 논문에서는 PSC 거더와 정착구의 구조와 현장성을 고려하여 PSC 거더 내부에 매립이 가능하며 생애 주기 동안의 PS 텐던의 긴장력 변화 계측이 가능한 매립형 EM 센서를 개발하였다.

3.2 매립형 EM 센서 원리 및 구조

EM 센서의 측정원리는 전압인가용 코일을 통해 외부로부터 전압이 인가되어 자기장(magnetic force, H)을 형성하면, 이에 의해 몸체부를 관통하는 PS 텐던이 자화되며, 자화된 PS 텐던의 자속 밀도(flux density, B)가 계측용 코일에 의해 계측되는 것이다.

이와 같이 계측된 자속 밀도 및 인가된 자기장을 자기 이력 곡선(B-H curve)으로 변환하고 이를 해석하여 투자율(permeability) 및 영의 계수 등과 같은 자기 특성을 추출한 후 회귀분석 및 패턴인식 기법을 이용하여 부식률을 추정할 수 있으며, 또한 초기 긴장력 상태의 투자율과의 상대투자율 변화를 계측하여 본 논문에서 목표를 두고 계측하고자 하는 PS 텐던의 긴장력 손실량을 추정할 수 있다.

본 연구에서는 앞 절에서 설명한 바와 같이 실제 PSC 교량의 내부에 위치한 PS 텐던의 긴장재의 긴장력을 상시 계측하기 위한 PSC 거더 내부 매립형 EM 센서를 Fig. 3과 같이 설계하였다.

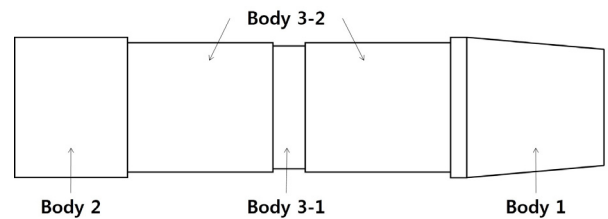


Fig. 3 Bobbin of embedded EM sensor

본 연구에서 설계한 매립형 EM 센서는 보빈형 몸체부를 가지고 있다. 몸체부는 Fig. 3과 같이 정착구에 연결되는 몸체부 1, 쉬스관과 연결이 되는 몸체부 2, 신호를 계측하는 계측용 코일(2차 코일)과 전압인가용 코일(1차 코일)이 감겨져 있는 몸체부 3-1, 3-2로 구성된다.

본 연구에서는 몸체부 1과 같이 몸체부 3 부분의 중앙 지점에서 멀어질수록 직경이 작아지도록 설계하여 본 EM 센서를 설치하는 과정에서 정착구가 몸체부 3까지 밀려들어가 강자성체인 정착구가 계측용 코일 사이에 위치하여 계측값에 영향을 미치는 것을 방지하였다. 몸체부 2 부분에서 쉬스관

이 본 센서와 연결이 될 수 있도록 쉬스관의 외경과 몸체부 3의 내경이 같도록 설계하였다. 해당 부분의 내부에는 나사산을 뚫으므로 쉬스관 내부에 돌려서 끼워질 수 있도록 하여 시공 중 편의성을 고려하였을 뿐만 아니라, 시공과정에서 EM 센서와 강자성체인 쉬스관이 분리되거나 쉬스관이 밀려들어와 계측용 코일과 PS 텐던 사이에 위치하여 계측 값에 오차를 유발할 수 있는 인자를 제거하였다. 또한, 몸체부 3-1에 감겨져 있는 계측용 코일과 몸체부 3-2에 감겨져 있는 전압인가용 코일 사이에 절연 커버를 씌워 서로 절연되도록 하였고, 전압인가용 코일에는 외부 커버를 덮어 코일의 외부로의 노출을 방지하였다.

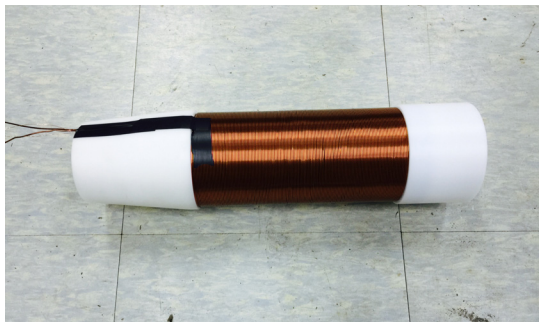


Fig. 4 Fabricated EM sensor

본 연구에서는 본 센서의 성능 검증을 위하여 Fig. 4와 같이 매립형 EM 센서를 제작하였다. 제작함에 있어 각 코일은 연결될 쉬스관과 PSC 거더 정착구에 의해 측정값이 영향을 받지 않도록 쉬스관과 PSC 거더 정착구와 중첩이 되지 않는 몸체부의 중앙에 위치하였다. EM 센서는 아세탈 재질의 보빈에 1차코일 및 2차코일을 권선하여 제작되었다. 전압인가용 코일은 직경 1.2mm의 코일을 사용하여 길이 380mm 아세탈 보빈의 ϕ 90mm인 몸체부 3-2에 280회 권선되었다. 계측용 코일은 직경 0.3mm의 코일을 이용하여 제작되었으며 아세탈 보빈의 ϕ 86mm인 몸체부 3-1에 120회 권선되었다. 전압인가용 코일과 계측용 코일 사이에 절연을 위해 절연 커버를 부착

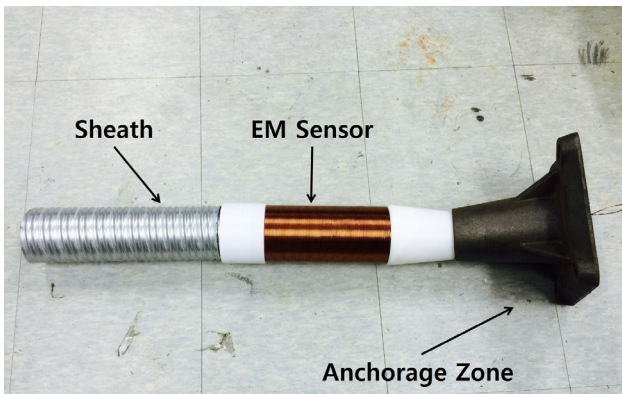


Fig. 5 Assembled EM sensor

하고, 각각 200mm, 20mm의 폭으로 권선하였다. 또한, 몸체부 1의 끝 부분에 현장 실험 시 EM 센서 계측용 장비와 연결이 될 수 있도록 전압인가용 코일과 계측용 코일을 노출시켜 놓았다.

Fig. 5는 제작된 EM 센서의 성능 검증 시 본 매립형 EM 센서의 몸체부 1과 몸체부 2가 각각 정착구와 쉬스관에 연결될 수 있도록 조립된 모습을 나타내었으며, 이는 다음 장에서 거더 모형을 이용한 검증 실험을 위하여 사용되었다.

4. 매립형 EM 센서의 매립 가능성 검증

이 장에서는 매립형 EM 센서를 이용하여 PS 텐던의 투자율 변화 측정을 통한 PS 텐던의 긴장력 변화값을 추정하는 거더 모형을 이용한 검증 실험 세팅을 설명하였으며, 이를 바탕으로 EM 센서의 콘크리트 매립 가능성 검증을 실시하였다.

4.1 검증 실험 세팅

PS 텐던의 긴장력을 추정하기 위하여 제작된 EM 센서를 실제 거더의 축소 모형을 제작하여 자기 이력 변화를 파악하는 실험을 진행하였다. 거더 축소모델은 기본 배근 및 정착구, 쉬스관, 그리고 정착구-쉬스관과 연결된 EM 센서를 설치한 후 콘크리트를 타설하였으며 양생 28일 완료 후 7가닥의 텐던을 삽입한 후 긴장력을 도입하며 Power Amplifier, Integrator, DAQ 및 Controller를 이용하여 긴장력에 따른 EM 센서 계측 신호 변화를 계측하였다.

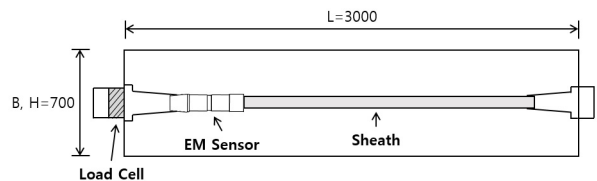


Fig. 6 Specification of fabricated girder(unit :mm)

Fig. 6은 거더 모형의 치수를 나타낸 것이며, 이를 기반으로 실제 거더 모형을 Fig. 7과 같이 제작하였다.

그림과 같이 매립형 EM 센서의 양단은 거더의 끝단에 위치한 정착구와 쉬스관에 각각 연결되었고, 연결 후 배합된 콘크리트를 거더 모형에 타설하여 양생시켰다. 양생 종료 후 쉬스관 내부에 강연선 7가닥을 삽입하고, 유압잭을 이용하여 PS 텐던에 200, 710, 1070, 1300kN의 긴장력을 주어 긴장을 실시하면서 EM 센서의 몸체부로부터 노출된 전압인가용 코일과 계측용 코일을 계측용 장비에 연결하여 PS 텐던

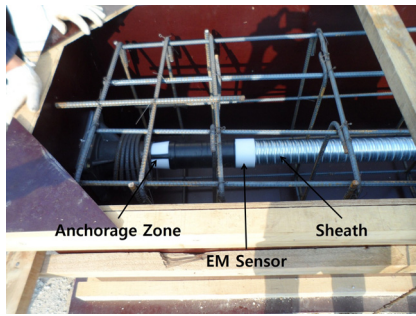


Fig. 7 Sensor embedded in PSC girder

의 긴장력 변화에 따른 자화 성질의 변화를 계측하였다. 가해진 긴장력은 정착구와 정착판 사이에 설치된 로드셀값을 이용하여 계측하였으며 슈스관과 정착구가 선형형태로 설치되었으므로 슈스관-텐던 사이의 마찰 손실은 없는 것으로 가정하여 로드셀을 이용하여 계측된 끝단의 긴장력 값이 EM 센서가 설치된 부분의 긴장력 값과 동일한 것으로 판단하였다.

4.2 검증 실험 결과

Fig. 8은 시편에 긴장력에 변화를 주었을 때 투자율의 변화에 따른 자기이력곡선을 나타내었다. 긴장력이 증가함에 따라 같은 자기장이 가해졌을 때에 자화되는 최댓값이 줄어들었다. 즉, 시편에 작용하는 외력이 증가함에 따라 같은 자기장력이 인가되면 자화경향을 나타내는 비투자율(자기이력곡선의 기울기)이 낮아짐을 알 수 있었다.

Fig. 9에 도입 긴장력에 따른 투자율 변화를 나타내었다. 200, 710, 1074, 1300kN의 도입 긴장력에 따라 투자율은 각 도입 긴장력을 충분히 분해해낼 수 있는 분해능을 나타내었으며 2번의 반복 계측에서 동일한 값을 재현해 낼 수 있었다. 이는 기존 Kim 등(2015)이 연구한 노출형 텐던에서 계측한 투자율 변화값과 동일한 양상을 나타내므로 본 연구를 통해 개발한 매립형 EM 센서가 PSC 거더 내부에 매립이

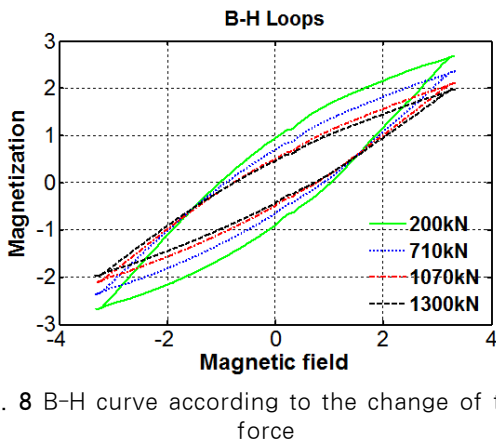


Fig. 8 B-H curve according to the change of tensile force

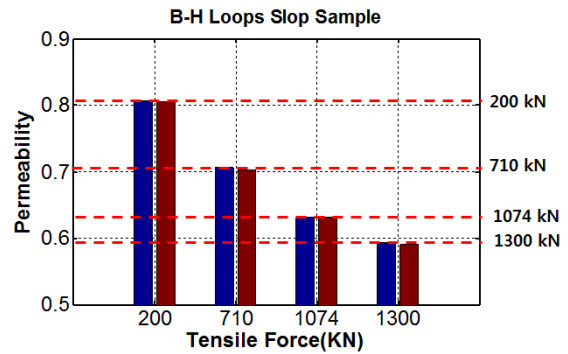


Fig. 9 Permeability variation due to applied tensile force change

가능하고 매립 후 PS 텐던의 긴장력 변화를 투자율 변화를 통해 추정해 낼 수 있음을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 PSC 거더 내부의 PS 텐던의 긴장력 추정을 위한 매립형 EM 센서를 제작하여 그 매립 가능성을 검증하였다. 탄성-자기 이론을 이용하여 강자성체에 자기장이 작용하고 긴장력이 도입되면, 강자성체가 가지는 비투자율 특성이 변화함에 따라 도입된 긴장력의 변화를 추정할 수 있는 기초 이론 연구를 하였다.

기초 이론 연구와 PSC 거더 정착구와 슈스관의 외관 특성을 반영하여 PS 텐던의 긴장력 추정을 위한 PSC 거더 내에 매립이 가능한 EM 센서를 설계하고 제작하였다. 매립형 EM 센서는 PSC 거더 내부에서 정착구와 슈스관 사이에 일체형으로 매립될 수 있도록 정착구 부에는 원뿔형태의 가공을 통해 정착구 내부로 내삽될 수 있도록 하였으며 다른 끝단은 슈스관이 내삽될 수 있도록 슈스관과 동일한 나사선을 형성시킴으로써 실제 PSC 거더 현장에서 정착구와 슈스관 사이에 커넥터 형식으로 연결하여 매립할 수 있도록 설계하였다. 이를 통해 PSC 거더의 정착구 및 슈스관으로 인한 계측 값에 미칠 수 있는 영향을 방지하였으며 전압인가용 코일과 계측용 코일 사이에 절연되도록 절연커버를 두었고, 전압인가용 코일에 외부 커버를 덮어 외부로의 노출을 방지하였다.

제작된 EM 센서로 PS 텐던의 긴장력 추정의 성능을 검증하기 위하여 소형 PSC 거더 모형을 제작하였고, EM 센서를 거더의 끝단에 위치한 정착구와 슈스관 사이에 연결한 후 콘크리트를 타설하였다. 콘크리트의 양생이 종료 된 후 7 가닥의 PS 텐던을 설치하여 200, 710, 1070, 1300kN의 긴장력을 도입하였고, 거더 내부에 매립된 센서를 통하여 도입 긴장력에 따른 비투자율의 변화를 계측하였다.

매립된 EM 센서를 통하여 긴장력에 따른 PS 텐던의 비

투자율의 변화를 계측한 결과 기존 노출 텐던과 동일하게 도입된 긴장력이 커질수록 자기이력곡선의 기울기인 비투자율이 낮아지는 것을 확인하였으며, 도입 긴장력에 따른 투자율의 긴장력 분해능을 2번의 반복 계측을 통하여 검증하였다. 이를 통해 본 연구에서 연구된 매립형 EM 센서가 실제 PSC 거더 내부에서 PS 텐던의 긴장력 추정이 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.
- 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(4), pp.369~374.
- 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.
- 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.
- Kurokawa, S., Sumitro, S., Wang, M.L.** (2001) Stress Measurement of Various Cables by EM Sensor, *Proc. of JPCEA 10th Annual Conference*, pp.101~106.
- Rens, K.L., Wipf, T.J., Klaiber, F.W.** (1997) Review of Nondestructive Evaluation Techniques of Civil Infrastructure, *ASCE J. Perf. Const. Facil.*, 11, pp.152~160.
- Sumitro, S., Jarosevic, A., Wang, M.L.** (2002) Elasto-Magnetic Sensor Utilization on Steel Cable Stress Measurement, *The First Fib Congress, Concrete Structures in the 21th Century, Session 15*, pp.79~86.
- Wang, M.L., Chen, Z.** (2000) Magneto-Elastic Permeability Easurement 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.M., 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, *Proceedings of the First International Conference on Advances in Bridge Engineering*, 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, *Proceedings of JSCE-KSCE Joint Seminar on Maintenance and Management Strategy of Infrastructure in Japan and Korea*, 7.

요 지

본 논문에서는 PSC 거더 내부 긴장재의 Prestress 변화를 계측하고, 그 손실을 관리하기 위하여 PSC 거더 내부에 매립이 가능한 매립형 EM 센서를 연구 및 제작하였다. 현재까지의 PSC 내부 긴장재의 긴장력 손실관리는 시공 시 설계 긴장력 도입 여부 검증에 머물러 있으며, 시공 후에는 관리가 제대로 이루어지고 있지 않다. 이에 본 논문에서는 강자성체에 자기장이 작용하면 비투자율인 강자성체 고유의 특성이 변화한다는 탄성-자기 이론을 기초로, PSC 거더의 정착구와 쉬스관 외관의 특성을 반영하여 PSC 거더 내부에 매립이 가능한 매립형 EM 센서를 설계하여 제작하였다. 제작 후에는 그 성능을 검증하기 위하여 소형 PSC 거더 모형에 제작된 매립형 EM 센서를 설치한 후 콘크리트를 타설하였다. 양생이 종료된 후 7가닥의 PS 텐던을 삽입한 후 텐던에 200, 710, 1070, 1300kN의 긴장력을 도입하면서 매립형 EM센서를 통해 비투자율의 변화를 계측하였다. 계측 결과 도입한 긴장력이 커질수록 PS 텐던의 비투자율이 낮아지는 변화가 있음을 확인하였으며, 도입 긴장력에 따른 투자율이 도입 긴장력을 충분히 추정할 수 있음을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 제안한 매립형 EM 센서는 PSC 교량 내부로 매립이 가능함을 확인하였으며 매립형 EM 센서를 통한 비투자율 변화 계측을 통하여 PS 텐던의 긴장력 변화를 추정할 수 있음을 확인하였다.

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