

자속투과율을 이용한 부착식 PSC 강선의 긴장응력 추정 타당성 연구

A Feasibility Study for Estimating Prestressed Stress on a Steel Wire Using Permeability of Magnetic Flux

김병화¹⁾ · 조창빈²⁾ · 이도형^{3)*}

Kim, Byeong Hwa¹⁾ · Joh, Chang Bin²⁾ · Lee, Do Hyung^{3)*}

¹⁾경남대학교 토목공학과, ²⁾한국건설기술연구원, ³⁾배재대학교 건설환경철도공학과

¹⁾Kyungnam University, Dept. of Civil Eng., ²⁾KICT, ³⁾Paichai University, Dept. of Civil, Environmental and Railroad Eng.

/ A B S T R A C T /

This work examines the feasibility for estimating existing tensile stress on a stressed wire using the permeability of magnetic flux. A closed magnetic circuit has been constructed to induce magnetic flux inside a steel wire. With different tension stress levels on a wire, the permeability of magnetic flux on the wire has been measured. Two different experimental case studies have been conducted for the examination of sensitivity of permeability of magnetic flux on the stressed wire. One is a varying-length stress test, and the other is a fixed-length stress test. The results show that the permeability of magnetic flux in the varying-length stress test is inversely proportional to the applied stress, while the permeability in the fixed-length stress test is linearly proportional to the applied stress on the stressed wire. It is thus expected that the permeability of magnetic flux on a wire can be a promising indicator for the inspection of its tensile stress.

Key words: Tendon, Tension, Magnetic flux, Prestress, Concrete, Closed magnetic circuit

1. 서론

최근 재료기술 및 설계기술의 급속한 발전에 따라 프리스트레스 콘크리트(Pre-stressed Concrete, PSC) 구조물의 시공은 매우 보편화되었다. PSC 구조체는 콘크리트의 인장에 대한 취약점을 극복하기 위하여, 강연선 등과 같은 PS강재를 이용하여 콘크리트에 미리 압축응력을 도입한 구조체를 말한다. PSC 구조체의 강장재는 상시 조건에서도 높은 응력상태를 유지하고 있으므로, PS강재의 긴장응력 손실은 전체 시스템의 안정성에 직접적으로 영향을 미친다[1].

PS강재의 긴장응력은 긴장시 불가피한 즉시손실뿐 만 아니라, 콘크리트의 크리프 및 건조수축 그리고 PS강재의 릴렉세이션 등과 같은 시간 의존적 손실에 의하여 지속적으로 감소되고 있다. 그러므로 PSC 구조체를 구성하는 핵심 요소부재인 PS강재의 긴장응력에 대한 주기적 모니터링은 반드시 필요하다. 그러나, PSC구조체의 현재 긴장응력을 비파괴적인 방법으로

평가할 수 있는 기술은 아직까지 실용화 단계에 이르지 못하였다. PS 강장재의 잔존 응력 평가 기술이 실무에 적용되기 위해서는 아직 해결되어야 할 많은 문제점들이 있다.

PS 강재의 잔존 응력 평가 기술에 대한 초기의 연구는 대부분 초음파 등의 고주파 펄스를 이용한 비부착식 PSC 텐던의 긴장력 평가 타당성 연구로서, 미국과 유럽을 중심으로 이루어졌다[2-7]. 초기 연구의 이론적 배경은 탄성체 내부의 응력 상태에 따라서 탄성과 속도가 달라지는 물리적 현상에 근거를 두고 있다. 그러나 긴장재와 덕트(Duct) 사이에 시멘트 그라우팅(Cement Grouting)을 처리하는 부착식 PSC구조체의 경우에는 초음파와 같은 고주파 이용법은 적용하기가 어렵다. 왜냐하면, 부착식 PSC구조체는 PS강재와 콘크리트 사이에서 심각한 에너지 감쇠현상이 발생하기 때문이다. 부착식 PS강재의 고주파 이용법을 이용한 최대 진단 범위는 대략 1.5m 정도로 제한적이다[8]. 그러나, 기 시공된 국내 PSC 구조체 형식의 대부분은 부착식 PSC텐던을 가지고 있으며, 교량거더의 경우에는 일반적 경간장이 대략 30m~40m이다. 그러므로 초기 연구에 적용된 고주파 이용법의 국내 적용에는 현실적 한계가 있다.

부착식 PSC구조체의 강장재에 대한 잔존 응력 평가연구는 Kim et al.[9]에 의하여 최초 시도되었다. Kim et al.[9]은 부착식 PSC 구조체의

*Corresponding author: Lee, Do Hyung

E-mail: dohlee@pcu.ac.kr

(Received 10 June 2013; Accepted 24 July 2013)

PS강재에 잔존하는 응력이 증가함에 따라서 종진동수, 탄성파속도 및 탄성계수 등이 비선형적으로 증가함을 보고하였다. Kim et al.[10]은 PSC 강연선의 종진동은 종방향 직선변위와 비틀림 변위가 상호 연동되어 거동한다는 메커니즘을 규명하였다. 김병화 등[11]은 PSC 텐던의 충격 탄성파속도를 가장 효율적으로 계측 할 수 있는 방법을 제안하였으며, 김병화 등[12]은 PSC 구조체의 긴장재에 잔존하는 응력상태를 충격 탄성파의 도달속도를 이용하여 추정할 수 있는 추정식을 제안하였다. 또한 Jang et al.[13]은 김병화 등[12]이 제안한 탄성파속도법을 국내 원자력발전소 격납건물의 부착식 PSC 수직텐던에 적용하여 PS강재의 잔존응력을 추정하는데 성공하였다.

그러나, 김병화 등[12]의 탄성파속도법은 PS 강재의 응력이 인장강도의 40% 이상이 되면, PS강재의 응력에 대한 탄성파속도의 민감도가 급격히 감소하는 문제가 있다. 일반적으로 공용중인 PSC 구조체의 PS강재에 잔존하는 응력은 인장강도 대비 60~70% 정도이다. 그러므로 탄성파속도법으로 추정응력이 40% 이하가 나오면 PSC 구조체의 안정성에 심각한 문제가 있음을 확인할 수 있다. 그러나, 탄성파속도법을 이용하여 추정된 40% 이상의 잔존 응력은 정확도에 다소 한계가 있다.

반면, 자기장을 이용한 응력센서 분야에서 최근 주목할 만한 연구성과가 [14-15] 보고되었는데, 상기 탄성파속도법의 한계를 극복할 수 있는 대안으로 고려할 수 있다. 자성체는 외부 자기장이 도입되면, 물리적 변형을 일으킨다. 이 현상은 자기장 도입 전에는 무작위 하게 (Randomly) 분포되었던 재료 내부의 작은 자구(Magnetic Domain)들이 자기장이 도입되면서 자기장의 방향으로 회전하기 때문이며, 자구들의 회전은 재료에 변형을 일으키는 것으로 추정된다. 자기변형(Magnetostriction)은 모든 자성체(Ferromagnetic Materials)의 고유특성으로써 1842년 James Joule에 의해서 발견되었고 줄효과(Joule Effect)로 알려져 있다. 줄효과와 반대현상이 1975년 Villari 에 의해서 발견되었으며, 자성체에 응력이 가해지면 자속특성이 변하는 역자기변형(Inverse Magnetostriction)효과를 말한다. 자기 응력 센서의 기본원리는 자성체의 자속특성 중에서 투자율(Magnetic Permeability)을 모니터링 하여 자성체에 가해진 응력을 추정한다.

Baudendistel and Tunner[14]의 연구성과 중에서 주목할 점은, 자성체의 투자율과 응력 사이의 실험적 관계가 전체 응력 구간에서 선형 비례한다는 것이다. 이는 앞서 언급한 탄성파속도법의 민감도 문제를 해결할 수 있는 핵심 단서이다. 또한, PSC 구조체는 비자성체인 콘크리트와 강자성체인 PS강재로 이루어져 있기 때문에, PS강재의 투자율을 계측할 수 있다면, 콘크리트의 응력 상태를 배제한 PS강재 만의 개별적 현존 응력상태를 추정할 수 있다는 것이다.

자기 응력 센서는 자성체 시편에 종방향으로 도입된 응력이 증가함에 따라서 시편 길이가 변화하게 되고, 이에 상응하는 종방향 투자율이 변하게 된다. 그러므로 시편의 투자율 계측을 통한 시편의 도입 응력 추정이 가능하다. 그러나, PSC 구조체의 비자성체인 콘크리트의 영향은 논외로 치더라도, 일반적으로 PSC 구조체의 PS 강재는 응력 도입시 늘어난 길이를 정착구 단부에서 절단하고 고정하게 된다. 그리고 공용 중인 PSC 구조체의 경우에는 응력구간에 있는 PS 강재에 접근이 불가능하다. 그러므로 PS 강재 정착구 외부에서 종방향 접근만 허용된다. 이와 같이 PSC 구조체와 자기 응력 센서 구조체의 계측 조건이 다소 차이가 있다.

비파괴 부식 진단분야에서는 Moriya et al.[16]가 자성체의 자속투과

율을 이용하여 와이어의 부식을 정량화할 수 있는 방법을 제안하였으며, 외부 긴장 PSC 구조체의 텐던에 대한 부식 진단에 적용하기도 하였다. 그러나 자성체의 응력 변화에 대한 자속 투과율에 대한 연구는 현재까지 보고된 바 없다.

본 연구에서는 PSC 구조체에 PS 강재의 자속투과율을 계측하여 잔존하는 응력의 추정이 가능한지 여부를 간단한 자기장 실험을 통하여 도출하고자 한다. 이를 위하여, PS 강재에 도입응력을 변화해 가면서 두 가지 자기장 실험이 수행되었다. 첫 번째는 PS 강재의 가변길이 응력 재하 조건에서 종방향 자속투과율 계측실험이 수행되었다. 현재 상용화된 자기 응력 센서의 조건은 일반적인 인장강도 실험조건과 동일하므로 PS 강재에 도입응력이 증가함에 따라 PS 강재의 길이 변화가 허용된다. 두 번째는 PS 강재의 고정 길이 응력재하 조건에서 종방향 자속투과율 계측실험이 수행되었다. PSC 구조체의 특성상 PS 강재에 긴장응력이 도입된 직후에는 정착구 단부에서 PS 강재 단부를 절단하는 상황을 모사한 것이다. 상기 두 가지 자속투과율 실험을 위하여 폐자기회로(Closed Loop Magnetic Circuit)가 구성되었으며, PS 강재에 도입된 다양한 응력 단계별 자속투과율 결과를 비교 분석하였다.

2. 전자기학의 기초

본 절에서는 PS 강재의 투자율 실험에 앞서 전자기학의 기초 지식이 필요하다. 본 연구의 실험 설정과 관련된 몇 가지 전자기학의 기초를 간략하게 되짚어 보고자 한다.

자기장은 전류가 흐르거나 영구자석에 의해 발생한다. 코일(Coil)에 전류가 흐르면 코일 주변에 자기장이 발생한다. 이 때 자기장의 세기는 코일의 도심으로부터 거리가 멀어질수록 작아지며, 자기장의 방향은 암페어의 오른손 법칙(Ampere's Law)에 의해 결정된다. 전류의 방향으로 엄지를 제외한 나머지 손가락으로 회전 방향으로 감싸는 때 엄지손가락이 가르키는 방향이 자기장의 방향이다. 코일을 촘촘하고 균일하게 원통형으로 길게 감아 만든 구조를 솔레노이드(Solenoid)라고 한다. Fig. 1과 같이 코일을 N회 감아서 길이 L(m)인 솔레노이드를 만들고, 코일에 전류 I(A)를 흐르게 하면 솔레노이드 내부에 발생하는 자기장의 세기(Magnetic field) H(A/m)는 다음 식(1)과 같다.

$$H = \frac{NI}{L} \tag{1}$$

그러므로 전류가 흐르는 자기장 세기는 코일의 단위길이당 감은 횟수가 많을수록 증가한다. 솔레노이드 내부가 진공상태일 경우의 솔레노이드 내부

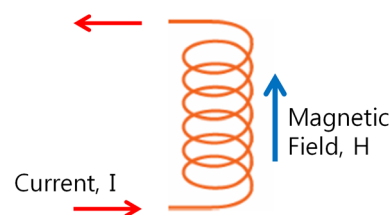


Fig. 1. Current and magnetic field

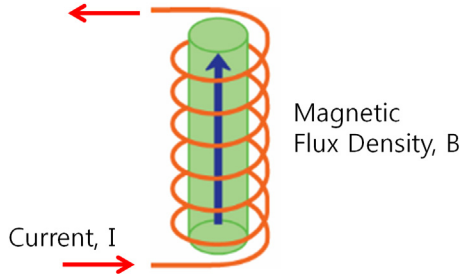


Fig. 2. Current and magnetic flux density

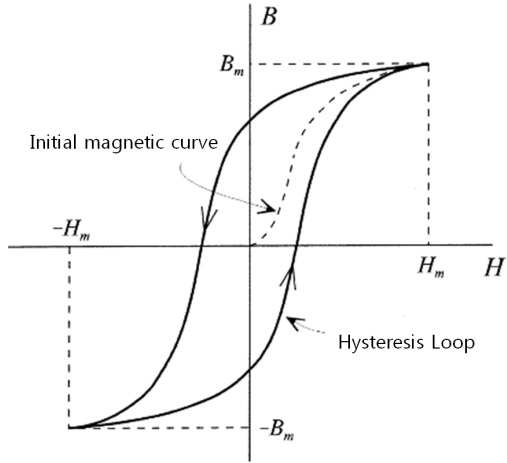


Fig. 3. Magnetic hysteresis loop

의 자속밀도(Magnetic Flux Density) $B(T=Wb/m^2)$ 는 다음 식(2)와 같다.

$$B = \mu_0 H \tag{2}$$

여기서, $\mu_0=4\pi \times 10^{-7} H/m$ 는 진공상태에서의 투과율(Magnetic Permeability of Vacuum)이며, 투과율의 단위는 H/m 이며 H 는 인덕턴스의 단위로 헨리라고 한다.

Fig. 2와 같이 솔레노이드 내부에 자성체가 존재하면 자기유도(Magnetic Induction)가 발생하고, 자성체는 자화된다. 자기유도된 자성체의 자속밀도(Magnetic Flux Density) B 는 다음 식(3)과 같다.

$$B = \mu H = \mu_0 \mu_r H \tag{3}$$

여기서, μ 는 전체 투자율 (H/m)이며, μ_r 는 상대 투자율로서 무차원 단위이다.

상대투자율은 물질 내에서 진공상태 대비 자화가 어느 정도 발생하였는지 측정하는 것이다. 강자성체인 철, 강철, 니켈, 코발트 등은 자화가 잘 일어나며, 강자성체의 상대투자율은 수백에서 수천 사이이다. 강자성체의 상대투자율은 비선형으로 일정하지는 않지만 특정 조건에서 자기장의 세기에 비례한다. 이 때 자기장의 세기 H 와 자속밀도 B 사이의 관계는 식(4)와 같고 전체 투자율 μ 는 자기장의 세기 H 에 대한 함수이다.

$$B = \mu(H)H \tag{4}$$

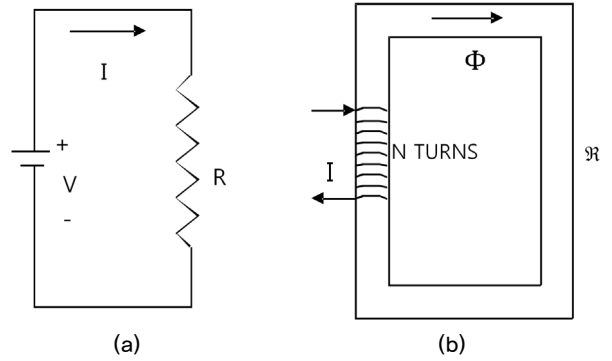


Fig. 4. Electric circuit (a) and magnetic circuit (b)

Fig. 3은 강자성체의 특징을 보여주는 자기이력 곡선(Magnetic Hysteresis Curve)이다. 강자성체 재료가 자화되지 않은 상태는 B 와 H 가 0인 원점을 뜻한다. 점선으로 표시되어 초기 자화곡선(Initial Magnetic Curve)은 강자성체에 자기장의 세기 H 가 증가함에 따라 자속밀도 B 가 비선형적으로 증가함을 보여준다. 어느 시점에서는 자기장의 세기 H 를 증가시켜도 자속밀도 B 가 더 이상 증가되지 않는 포화점(H_m 및 B_m)이 존재한다. 포화된 강자성체는 자기장의 세기를 줄여도 초기 자화곡선을 따라서 감소되지 않고 Fig. 3에 보이는 히스테리시스 루프(Hysteresis Loop)를 따라서 거동하게 된다.

자성체 내에서 자속(Magnetic Flux) $\Phi(Wb)$ 은 자속밀도 B 를 자속이 지나는 균일 단면적 $A(m^2)$ 에 대하여 적분한 것과 같다.

$$\Phi = \iint_s B \cdot ds = BA \tag{5}$$

Fig. 2에서 솔레노이드 내부에 자속 Φ 가 흐르면, 자속의 변화에 의해 솔레노이드 코일에 기전력이 발생하는 현상을 전자기 유도(Electromagnetic Induction)라고 한다. 이때 발생하는 기전력을 유도기전력(Induced Voltage)이라 하며, 코일에 흐르는 전류를 유도전류(Induced Current)라고 한다. 유도기전력은 코일을 관통하는 자력선이 변화하는 속도에 비례한다. 강자성체에 흐르는 자속에 의하여 발생하는 솔레노이드의 유도기전력 V 는 자속의 시간 변화율($\frac{d\Phi}{dt}$)에 음수로 비례하며 코일의 감은 횟수 N 에 비례하게 된다. 이를 패러데이의 법칙(Faraday's Law)이라 하고, 다음 식(6)과 같다.

$$V = -N \frac{d\Phi}{dt} \tag{6}$$

전기회로(Electric Circuit)는 전류가 흐르는 도선으로 이루어진 폐 회로로 구성된다. 이와 유사하게 자속이 통과하는 통로를 투자율이 높은 강자성체로 만들면 자속은 자성체를 통하여 흐르는데 이를 자기회로(Magnetic Circuit)라고 한다. 전류가 흐르는 통로를 도선이라 하고, 자속이 흐르는 자성체 통로를 자속관이라 한다. Fig. 4는 전기회로와 자기회로를 유사점 보여준다. Fig. 4a와 같이 저항이 R 인 전기회로에 기전력 V (Electromotive Force)에 의한 전류 I 가 흐르면 잘 알려진 옴의 법칙(Ohm's Law)은 다음과 같다.

$$V = IR \tag{7}$$

유사하게, Fig. 4b와 같이 자기저항 \mathfrak{R} (Reluctance, H^{-1})인 자기회로에 자기력 \mathcal{F} (Magnetomotive Force, A-turns)에 의한 자속 Φ (Wb)가 흐르면 지배방정식은 다음과 같다.

$$\mathcal{F} = \Phi \mathfrak{R} \tag{8}$$

여기서, 코일을 N회 감은 솔레노이드에 전류 I를 흘리면 발생하는 자기력은 다음과 같이 감은 코일횟수와 흐르는 전류에 비례한다.

$$\mathcal{F} = \oint H \cdot dl = NI \tag{9}$$

길이가 l(m)인 자기회로의 자기저항 \mathfrak{R} 은 전기저항 R과 유사한 역할을 한다. 여기서 주목할 점은, 자기저항은 다음 식과 같이 전체 투자율 μ 에 역비례한다.

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A} = \frac{l}{\mu_0 \mu_r A} \tag{10}$$

Fig. 3과 같이 투자율은 자성체에 고유특성이며, 자성체에 응력이 가해지면 역자기변형(Inverse Magnetostriction)효과에 의하여 투자율이 변하게 된다. 자성체의 투자율이 변하면 식(10)에 의해서 자기저항이 변화하는 것을 알 수 있다. 그러므로 식(8)로부터 자기력이 일정한 폐자기회로에서 자성체의 특정구간에 대한 자속 Φ 를 계측하면 자성체의 잔존 응력 상태를 정량화 할 수 있다.

본 연구에서는 강자성체인 PS 강재의 응력구간에 폐자기회로(Closed Magnetic Circuit)를 구성하고, 자기력(\mathcal{F})이 일정한 조건하에 응력구간 PS강재의 자속투과율을 모니터링 한다.

3. PS강재의 도입 응력과 자속투과율

3.1 실험 개요

Fig. 5와 같이 자체 제작한 2000N 인장시험기에 직경, 길이 및 최대 인장강도가 각각 7mm, 8.98m 및 1860MPa인 KSD 7002 SWPC 7B 고강도 PS강선을 거치하였다. 인장시험기는 강선의 긴장과 해제가 가능하도록 독립된 유압잭 2기가 설치되어 있다. PS 강선의 정착을 위하여 7mm 강선 정착용 특수강 배럴 헛지가 특수 제작되었다. 정착된 강선의 도입 응력을 모니터링 하기 위하여 카스코리아사(CAS KOREA)의 정격용량 300N 모델 HC-CSKB24-T030 로드셀(Load Cell)이 설치되었다.

로드셀의 동적 신호계측은 ㈜뉴컨스텍사(Newconstech)의 데이터로거(Data Logger) 모델 NETPOD을 사용하여 2kHz로 샘플링 하였다. 감



Fig. 5. Tensile stress testing machine and closed loop magnetic circuit

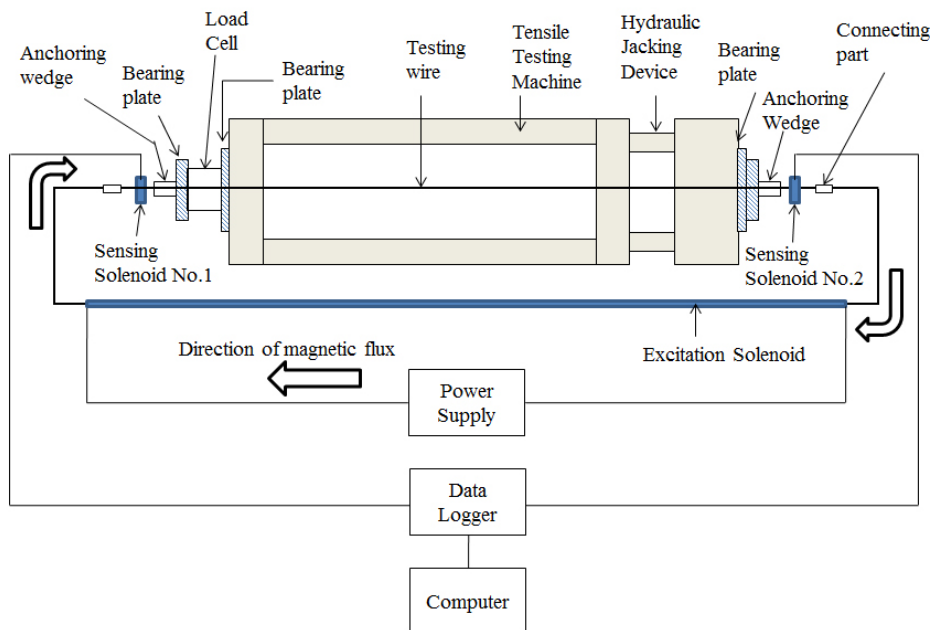
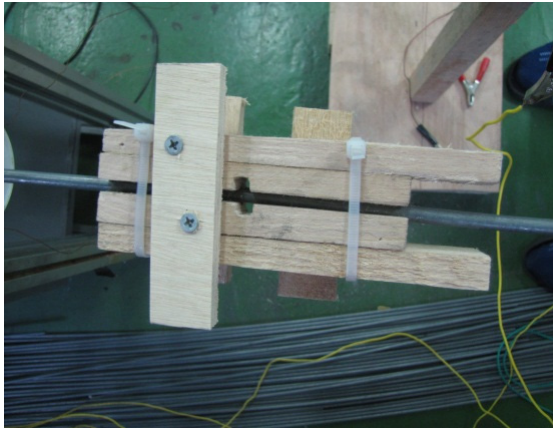


Fig. 6. Test setup



(a) Connecting Wood Part



(b) Sensing Solenoid

Fig. 7. Details for connecting wood part and sensing solenoid

지 솔레노이드를 이용한 자속계측을 위하여 한국내쇼날인스트루먼트(National Instruments)사 전압 측정 모듈 NI 9239을 NI cDAQ-9174 데이터 로거에 연결하여 5kHz로 샘플링 계측하였다. 폐자기회로의 자기력 가지는 KIKUSUI사 모델 PCR-1000L 전원공급기가 이용하여 AC 모드로 가진 하였으며, 가진 전류 측정은 한국내쇼날인스트루먼트사 모델 NI 9227을 데이터로거에 연결하여 5kHz로 샘플링 하였으며, 데이터 수집을 위한 Labview 소프트웨어는 자체 프로그래밍하였다. 데이터로거에 수집된 동적 신호는 노트북 컴퓨터에 저장되었다.

Fig. 6는 자기저항 실험의 전체 개요를 보여준다. 인장구간에 사용된 동일한 PS 강재를 이용하여 무응력 구간에 자기력 가진 구간을 구성하였으며 전체적으로 폐자기회로를 구성하였다. 그러므로 설치된 폐자기회로의 PS 강재는 응력구간과 무응력 구간 두 개로 구분된다. PS 강재의 응력구간은 인장시험기 양쪽 정착구 사이의 구간으로서 응력이 도입되는 구간이다. 반면, PS 강재의 무응력 구간은 감지 솔레노이드 및 가진 솔레노이드가 설치되는 구간이다. 두 구간의 연결을 위하여 Fig. 7a와 같은 목재 지그가 자체 제작되었다. Fig. 7b는 절연 테이프를 이용하여 보호해 놓은 감지 솔레노이드를 보여준다.

Table 1은 솔레노이드의 제원을 보여준다. 솔레노이드는 피복된 에나멜 선을 감아서 제작하였으며, 솔레노이드의 평균반지름은 자속이 지나는 솔레노이드의 단면적을 구하기 위하여 측정하였다.

Table 1. Dimensions of solenoids

	Exciting Solenoid		Sensing solenoid
Diameter of Enamel Wire(mm)	1		0.5
Number of Winding(N)	First Layer	8394	2720
	Second Layer	8320	
	Total	16714	
Total Length(mm)	9852		59.1
Average Radius(mm)	10.1		38.65

Table 2. Varying-length test conditions

Test No.	Frequency (Hz)	Voltage (V)	Current (A)	Applied Stress(MPa)	Stress Rate(%)
1	10	50.3	1.68	0	0
2	10	50.3	1.66	295.3	15.9
3	10	50.3	1.65	536.5	28.8
4	10	50.3	1.64	652.3	35.1
5	10	50.3	1.64	793.8	42.7
6	10	50.3	1.63	941.1	50.6
7	10	50.3	1.63	1114.1	59.9
8	10	50.3	1.63	1243.4	66.8
9	10	50.3	1.62	1386.5	74.5
10	10	50.3	1.62	1523.4	81.9
11	10	50.3	1.62	1660.7	89.3
12	10	50.3	1.62	1798.0	96.7

3.2 가변길이 응력 재하조건의 자속투과율

가변길이 응력 재하조건은 PS 강재를 긴장하는 과정에서 PS 강재의 길이는 증가하게 되고 단면적은 줄어들게 된다. 그러면 PS 강재의 응력구간 길이가 증가하게 되며, 두 개의 감지 솔레노이드 사이의 길이도 증가하게 된다. 식(10)를 살펴보면, 자기저항은 길이에 비례하고, 투자율과 단면적에 반비례한다. 그러므로 가변길이 응력 재하조건은 PSC 텐션의 구속조건과 다소 차이가 있지만, 상용화에 성공한 기존의 자기 응력 센서의 구속조건과 동일하다.

Table 2와 같이 총 12회의 자속투과율 계측실험이 수행되었고, 두 개의 감지 솔레노이드를 통하여 전압이 계측되었다. Fig. 8은 Test No. 12에서 감지 솔레노이드에서 계측된 전압을 보여준다. 두 개의 감지 솔레노이드 사이에 전압 차이가 있는 것이 확인된다. 감지 솔레노이드에서 계측된 전압으로부터 자속을 산정하기 위하여 식(6)을 적용하였다. 가진 주파수가 10Hz 이므로 적분된 신호들은 $\pm 5\text{Hz}$ 범위의 대역 통과 필터를 이용하여 잡음(Noise)를 제거하였다. 필터링된 자속신호의 최대치 500개를 추출하여 평균값을 산정하여 대표 값으로 설정하였다. PS 강재의 극한강도 대비 도입된 응력 수준별 두 개의 감지 솔레노이드에서 산출된 자속투과율은 Fig. 9와 같다. 여기서, 자속투과율(Permeability of Magnetic Flux)란 다음 식과 정의 하였다.

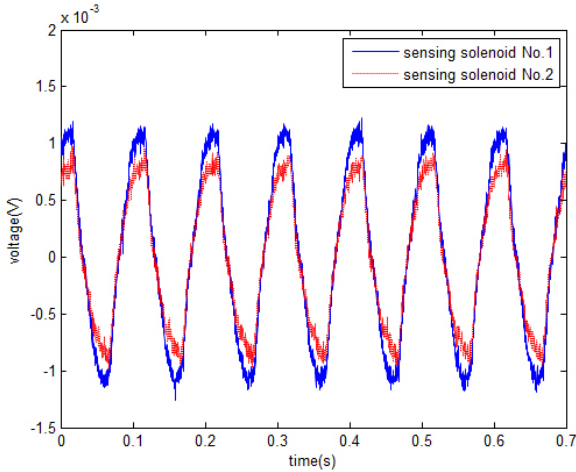


Fig. 8. Measured voltage signal from sensing solenoid at Test No. 12

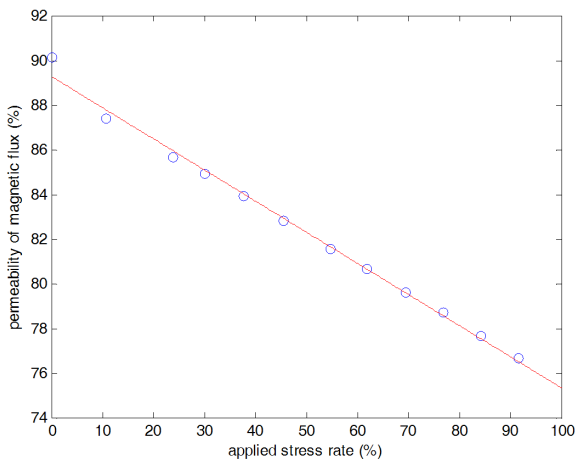


Fig. 9. Varying-length test conditions: applied stress vs. permeability of magnetic flux



Fig. 10. Section cutting of PS wire after stressing

$$p = \frac{\Phi_2}{\Phi_1} \times 100 \tag{10}$$

여기서, Φ_1 와 Φ_2 는 각각 1번과 2번 감지 솔레노이드에서 발생된 자속이다. 식(10)를 살펴보면, 자기저항이 투자율과 반비례 관계이다. 그러므로

Table 3. Fixed-length test conditions

Test No.	Frequency (Hz)	Voltage (V)	Current (A)	Applied Stress(MPa)	Stress Rate(%)
1	10	50.3	1.70	0	0
2	10	50.3	1.71	25.13	1.35
3	10	50.3	1.69	53.93	2.90
4	10	50.3	1.71	208.07	11.19
5	10	50.3	1.70	357.58	1922
6	10	50.3	1.70	520.13	27.96
7	10	50.3	1.70	687.03	36.94

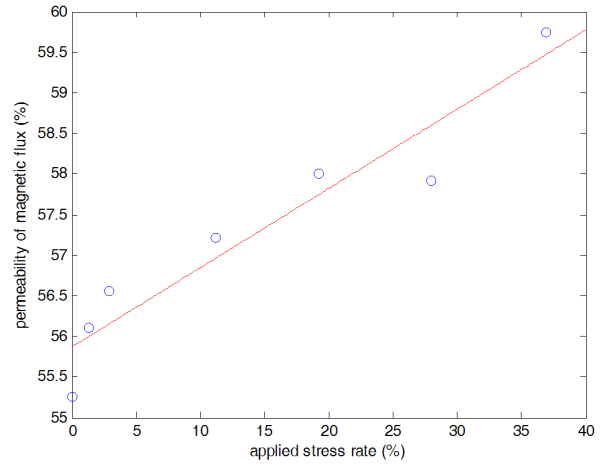


Fig. 11. Fixed-length test conditions: applied stress vs. permeability of magnetic flux

투자율 또는 자기저항을 직접계측하여 PS강재의 도입 응력을 추정 할 수 있다. 그러나, 특정 위치에서 정확한 투자율이나 자기저항을 계측하는 방법은 고가의 계측장비를 필요로하고, 정확도 측면에서 주변 자기환경의 영향을 고려하여야만 하는 단점이 있다. 반면, 본 연구와 같이 자속투과율을 계측하면, 간단한 두 개의 솔레노이드를 이용하므로 저가의 계측장비로 상대적으로 높은 정확도를 얻을 수 있다.

PS 강재에 도입된 응력과 자속투과율이 극한강도까지 선형 역 비례 관계임을 알 수 있다. 실험 결과는 기존의 보고[14, 15]와 동일하다.

3.3 고정길이 응력 재하조건의 자속투과율

고정길이 응력 재하조건은 PSC 구조체 제작 시 PS 강재 정착 후 단부 절단조건을 반영한 것이다. PS 강재에 긴장응력 도입 후에 늘어난 길이를 절단하고 두 개의 감지 솔레노이드 사이의 길이를 일정하게 유지시킨다. 그러므로 PS 강재의 응력구간 길이는 변하지 않으며, 응력구간에는 응력증가 및 그에 따른 단면적 축소가 발생한다. 그 밖의 실험조건은 가변길이 응력 재하조건의 자속투과율 실험과 동일하다.

Fig. 10은 PS 강재에 긴장응력을 도입하여 늘어난 길이를 그라인더로 절단하는 모습을 보여준다. 고정길이 응력 재하조건의 자속투과율 실험의 상세는 Table 3에 보인다. 강재 그라인딩 작업시 정착구 풀림 가능성 때문에 작업원의 안전상 이유로 PS 강재의 극한강도까지 재하되지 못하였다.

Fig. 11은 고정길이 응력 재하조건에서 PS 강재에 도입된 응력과 자속 투과율 사이의 관계이다. Test No.1과 No.6 결과는 보간 곡선으로부터 다소 편차가 있으나, 전체적인 경향은 선형 비례 관계로 보인다. Test No.1의 편차 이유는 PS강선에 도입응력이 없는 경우에 강선이 늘어지게 되는데, 이는 두 개의 감지 솔레노이드 사이의 길이를 증가시키는 요인이 되기 때문이다. Test No. 6의 편차는 그라인딩 작업시 발생하는 진동으로 인한 로드 셀 접촉면의 편심, 감지 솔레노이드 위치 이격, 및 그라인딩 작업에 의한 PS 강재 단부의 잔류 자화 등의 이유 때문인 것으로 추정된다. 보다 정확한 실험을 위해서는 도입응력이 다른 부착식 PSC 구조체를 개별 제작하여 자속 투과율을 계측하여야 할 것이다.

고정길이 응력 재하조건의 결과인 Fig. 11은 가변길이 응력 재하조건의 결과인 Fig. 10과 정반대의 결과를 보여준다. PSC 구조체에 매입된 PS 강재의 구속조건이 고정길이 응력 재하조건과 유사하기 때문에, PSC 구조체에 부착식 PS 강재의 자속투과율은 도입응력에 선형 비례한다고 볼 수 있다. 민감도를 분석해보면, PS 강재를 인장강도의 36.94% 긴장하였을 때 자속투과율은 무응력 상태 대비 8.14% 변화하였다. 일반 PSC 구조물의 부착식 PS 강재는 인장강도의 60~70% 정도 상시 긴장되어 있으므로 자속투과율은 무응력 상태 대비 13%~15% 변화하게 된다. 일반적인 계측오차를 5% 정도로 감안하면, PS 강재의 응력구간 자속투과율을 계측하면 PS 강재에 잔존하는 응력을 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 요약과 결론

본 연구의 목적은 PSC 구조체의 부착식 PS 강재에 잔존하는 응력을 자속투과율을 이용하여 추정할 수 있는지 여부를 판단하는 것이다. 긴장된 PS 강재의 자속투과율에 대한 민감도를 파악하기 위하여 폐자기회로가 구성되었으며, 두 가지 자속투과율 실험이 수행되었다. 첫 번째 실험은 가변길이 응력 재하조건에서 PS 강재의 도입응력 대비 자속투과율이 계측되었다. 가변길이 응력 재하조건에서는 PS 강재의 잔존응력과 자속투과율 사이의 관계가 선형 반비례하였다. 두 번째 실험은 고정길이 응력 재하조건에서 수행되었으며, PS 강재의 잔존 응력과 자속투과율이 선형 비례 관계였다.

부착식 PSC 구조체의 PS 강재의 구속조건은 고정길이 응력 재하조건과 유사하다. 그러므로, 두 번째 실험결과를 통하여 다음과 같은 두 가지 결론에 이른다. 첫째, PS 강재의 자속투과율은 잔존응력 추정을 위한 대표적 지표로 활용될 수 있다. PS 강재에 도입된 응력과 자속투과율이 선형 비례관계이며, 일반 부착식 PSC 구조물에 매입된 PS 강재의 자속투과율 민감도는 무응력 상태 대비 13%~15% 정도에 이르기 때문에 자속투과율을 이용한 PS 강재의 잔존응력 추정이 가능하다. 둘째, 실무적용을 위한 후속 연구에는 도입응력이 다른 부착식 PSC 를 다수 제작하여 PS 강재의 도입응력과 자속투과율 사이의 정량적 관계를 도출 되어야 할 것이다.

/ 감사의 글 /

이 논문은 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(2011-00014524) 및 한국건설기술연구원 주요사업(기존 PSC 교량의 텐던 상태평가 기술 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

/ REFERENCES /

1. Tadros MK, Omaishi NA, Seguirant SJ, Gallt JG. Prestress Losses in Pretensioned high-strength concrete bridge girders, NCHRP Report, No. 496, Transportation Research Board; c2001.
2. Chen HL, Wissawapaisal K. Measurement of tensile forces in a seven-wire prestressing strand using stress waves. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 2001;127(6):599-606.
3. Chen HL, Wissawapaisal K. Application of Wigner-Villw Transform to evaluate tensile forces in seven-wire prestressing strands. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 2002;128(11)1206-1214.
4. Washer GA, Green RE, Pond Jr. Velocity constants for ultrasonic stress measurement in prestressing tendons. *Res. Nondestr. Eval.* 2002;14:81-94.
5. Scalea FL, Rizzo P, Seible F. Stress measurement and defect detection in steel strands by guided stress waves. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 2003;15(3):219-227.
6. Rizzo P. Ultrasonic wave propagation in progressively loaded multi-wire strands. *Experimental Mechanics*, 2006;46:297-306.
7. Chaki S, Bourse G. Stress level measurement in prestressed steel strands using acoustoelastic effect. *Experimental Mechanics*, 2009;49:673-681.
8. Beard MD, Lowe MJS, Cawley P. Ultrasonic guided waves for inspection of grouted tendons and bolts. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 2003;15(3):212-218.
9. Kim BH, Jang JB, Lee HP, Lee DH. Effect of prestress force on longitudinal vibration of bonded tendons embedded in a nuclear containment. *Nuclear Engineering and Design*. 2010;240(6):1281-1289.
10. Kim BH, Jang JB, Lee HP, Lee DH. Evaluating longitudinal vibration characteristics of bonded strands embedded in prestressed concrete beams by a system identification approach. *Composite: Part B*. 2012;43:1531-1537.
11. Kim BH, Kim SJ, Lee DH. Estimating longitudinal elastic wave velocity of bonded PSC tendon. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, 2012;12(2):41-45.
12. Kim BH, Jang JB, Lee HP, Lee IK. Estimation of prestressed tension on grouted PSC tendon using measured elastic wave velocity. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 2012;32(5A): 289-297.
13. Jang JB, Hwang KM, Lee HP, Kim BH. An assessment of the prestress force on the bonded tendon by SI and impact signal techniques. *Nuclear Engineering and Design*. 2013;255:9-15.
14. Baudendistel TA, Tunner ML. A novel inverse-magnetostrictive force sensor. *IEEE Sensor Journal*. 2007;7(2):245-250.
15. Calkins FT, Flatau AB, Dapino MJ. Overview of magnetostrictive sensor technology. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2007;18:1057-1066.
16. Moriya T, Sugawara M, Tsukada K. Magnetic nondestructive evaluation of corrosion in wire ropes. *Proceedings of MITTS/IEEE Techno-ocean '04*, IEEE, 2004;4:1910-1917.