프리스트레스 측정을 위한 헤테로코어 광파이버 센서의 분해능 검증 기초실험

박 익 태¹ · 최 광 수¹ · 김 태 양¹ · 이 환 우^{1*}

¹부경대학교 토목공학과

Fundamental Experiment to Verify the Resolution of Hetero-core Fiber Optic Sensor for the Prestress Measurement

Eik-Tae Park¹, Kwang-Su Choi¹, Tae-Yang Kim¹ and Hwan-Woo Lee^{1*}

¹Department of Civil Engineering, Pukyong National Univ., Busan, 48513, Korea

Abstract

This is the study for developing the hetero-core optical fiber sensors which are purpose to measure the prestress of PSC bridges during the life cycle period. The goal of this study is to improve the resolution of hetero-core sensors. As a result of the test, it is possible to measure the displacement in 2μm increments. In other words, if the length of the sensor module is 30cm, it is possible to measure the prestress variations in 0.2MPa increments at specified compressive strength of concrete(f_{ck}) of 40MPa by Hook's Law. So it can be useful for development of a sensor module measuring internal prestress measurement.

Keywords : hetero-core, optical fiber sensor, opm(optical power meter), prestress

1. 서 론

1962년 국내에 처음 도입(Lee, 2017)된 이후 PSC(prestressed concrete) 교량 기술은 비약적으로 발전하여 구조적인 효율성, 경제성 및 시공성 등이 우수한 다양한 형식의 공법이 개발되었다. PSC 교량이 도로와 철도에 널리 이용됨에 따라 2000년도 이후에는 공용년수가 30년 이상되는 노후 교량도 급격히 증가하고 있다.

PSC 교량은 강연선 또는 강봉 등을 이용하여 콘크리트에 프리스트레스를 도입함으로써 구조적인 효율성을 향상시킨 교량형식이다. 그러나 프리스트레스는 시공단계에서부터 공용 중 유지관리단계에 이르기까지 생애주기 기간 동안 손실이 발생한다. 따라서 구조적 안정성을 상시 확인하기 위해서는 프리스트레스 변화량의 측정이 필요하다.

특히 2015년 발생한 서울내부순환도로 정릉천고가교의 강연선 파단 사건은 국내 토목기술자들에게 많은 충격을 안겨

주었다. 이를 계기로 시공단계에서의 프리스트레스 긴장력 관리뿐만 아니라 유지관리 단계에서의 유효 프리스트레스 측정 기술에 대한 관심이 증가하고 있다.

최근 IT기술의 발전으로 구조물의 건전성 모니터링(structure health monitoring, SHM) 기술과 IT 기술을 융합하는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 미국, 유럽, 일본 등 주요 국가에서는 PSC 교량의 생애주기 프리스트레스 응력측정을 위해 광파이버(optical fiber)를 활용하는 다양한 연구들이 이루어 졌다(Sumitro *et al.*, 2003; Lee *et al.*, 2015).

기존의 연구사례 등을 종합해 보면 센서를 활용하여 프리스트레스를 측정하는 방법은 크게 2가지로 분류할 수 있다. 첫 번째 방법은 강연선에 도입된 긴장력을 측정하는 방법으로 EM(elasto-magnetic)센서(Wang and Chen, 2000), FBG(fiber bragg grating)센서(Measures *et al.*, 1994; Maaskant *et al.*, 1997; Kim *et al.*, 2015) 등을 쉬스관, 강연선 등에 직접 부착 또는 강연선 내부에 매립하여 강연선의

* Corresponding author:

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

Received July 12 2018; Revised August 22 2018;

Accepted September 27 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.

긴장력을 측정하거나, 양단 정착부에 초음파(ultra sonic)의 발신 및 수신 장치를 설치(Chen and Wissawapaisal, 2001; Ivan *et al.*, 2008)하여 강연선의 긴장력을 측정한다. 이때 측정된 긴장력을 활용하여 콘크리트에 도입된 프리스트레스로 추정하게 된다.

두 번째 방법은 콘크리트의 구조체의 변형량(률)을 측정하는 방법으로 쉬스관 주변 콘크리트 또는 콘크리트 표면에 진동현(vibrating wire) 센서(Roller *et al.*, 2011), 간접계 광파이버(interferometric optical fiber) 센서(Inaudi, 1994; Idriss, 2001) 등을 매립 또는 부착하여 측정된 변형량(률)로부터 콘크리트에 도입된 프리스트레스를 추정하는 방법이다.

이 연구는 헤테로코어(hetero-core) 광파이버 센서를 활용하여 콘크리트 구조체의 변형량(률)을 측정할 수 있는 내부 매립형 센서모듈을 개발하기 위한 목적으로 헤테로코어 광파이버 센서를 통해 측정된 광손실 특성이 변위와 갖는 상관관계를 분석하고 정밀도를 검증하고자 한다. 이를 위해 PSC 구조물이 갖는 프리스트레스 변화 범위 내에서 유의미한 프리스트레스 변화량을 측정하기 위한 적합한 분해능을 검토하고 실험을 통해 헤테로코어 광파이버 센서가 갖는 분해능, 선형성 및 오차를 등을 검증함으로써 헤테로코어 센서를 PSC 구조물의 프리스트레스 측정용 센서로 활용이 가능함을 확인하고자 한다.

2. 헤테로코어 광파이버 센서

Fig. 1은 헤테로코어 광파이버 센서의 개요도이다. 헤테로코어 광파이버 센서는 큰 코어직경을 갖는 광파이버를 절단한 후 절단부위에 작은 직경의 코어를 연결하여 융착한 센서이다. 헤테로코어 광파이버의 양 끝단을 고정시킨 후 압축 변위를 유발하게 되면 광파이버 센서에서는 곡률변화와 함께 광 손실(optical loss)이 발생된다. 이때의 광 손실량과 변위의 관계는 Fig. 2와 같이 선형적인 관계를 갖게 된다(Kim *et al.*, 2007). 이러한 선형관계는 헤테로코어 광파이버를 센서로 활용할 수 있도록 하는 중요한 특성이다.

헤테로코어 광파이버 센서는 센서모듈을 세팅하는 방법에 따라 콘크리트의 인장과 압축변형 모두 측정이 가능하다. FBG 등 기존의 광파이버 센서는 일반적으로 인장변형량 측정에 사용되는데, 압축변형량을 측정하기 위해서는 광파이버에 프리텐션을 도입해야 하며 이러한 과정에서 광파이버의 파단이 발생할 수 있고, 압축변형량 측정범위가 제한적이다. 반면 헤테로코어 광파이버는 압축변형에 의해 발생하는 곡률변화에 의한 광 손실량을 측정하므로 이러한 문제점을 개선할 수 있다.

그리고 FBG 등의 광파이버 센서는 미소변화량을 민감하게 계측할 수 있는 반면 온도변화에 극도로 민감하기 때문에 온도

Fig. 1 Hetero-core sensor

Fig. 2 Experiment result(loss to displacement) (Kim *et al.*, 2007)

Fig. 3 (a) Point, (b) Intrinsic distributed, (c) Quasi-distributed sensing(Grattan *et al.*, 2000)

보정에 관한 고도의 기술이 요구된다. 반면 헤테로코어 센서는 원리상 온도 의존성이 거의 없어 온도보상이 필요없는 것도 가장 큰 장점 중의 하나이다(Kim *et al.*, 2007).

광파이버 센서는 Fig. 3(a)와 같이 특정한 위치를 측정하는 포인트 센서(point sensor), Fig. 3(b)와 같이 일정 구간을 연속적으로 측정하는 분포형 센서(distributed sensor) 및 Fig. 3(c) 일정 구간 내 다수의 특정 위치를 연속적으로 측정하는 유사 분포형 센서(quasi-distributed sensor) 등으로 구분할 수 있다(Grattan *et al.*, 2000). 이러한 분류방법은 헤테로코어 센서에도 동일하게 적용할 수 있다. Fig. 4와 같이 변위, 압력, 온도, pH 등을 측정하는 헤테로코어 센서가 특정 위치에 단일 센서로 구성이 되면 포인트형 센서이며, Fig. 5처럼 멀티환경 모니터링 시스템과 같이 일정 간격으로 헤테로코어 센서부가 분포하고 있다면 유사분포형 센서가 된다.

국내에서는 김영복 등이 헤테로코어 광파이버를 활용하여 압력센서, 변위센서 등에 대한 응용연구(Kim *et al.*, 2007)가 있었으며, 일본에서는 맥박측정 등 의료분야(Nishiyama *et al.*, 2016), 모션 동작 측정(Koyama *et al.*, 2014) 발바닥 압력 분포 측정(Otsuka *et al.*, 2014) 등의 스포츠 분야, 토양 내 수분 함량 측정(Goh *et al.*, 2014), pH 측정(Atsushi *et al.*, 2007) 등의 다양한 분야에서 연구가 진행 중이다.

Fig. 4 Schematic diagram of hetero-core point sensor (Kim *et al.*, 2007)

Fig. 5 Schematic drawing of multi environmental monitoring system: quasi-distributed sensor (Kim *et al.*, 2007)

3. 실험 연구

3.1 실험 목적

먼저 센서모듈의 측정범위 및 분해능 요구수준을 결정하기 위해 일반적인 PSC 교량에 도입되는 프리스트레스 범위 내에서 발생할 수 있는 유의미한 콘크리트 탄성 압축변형량을 산정하여 반복측정을 통해 예상되는 콘크리트 변형량 내에서 측정값의 선형성을 확인하고 오차범위를 결정하고자 한다. 그리고 분석장비가 측정할 수 있는 분해능의 한계 값을 결정한다.

3.2 센서모듈의 측정범위 및 분해능 요구수준

일반적으로 PSC 교량에 적용하는 콘크리트의 설계기준 압축강도(f_{ck})는 40~60MPa의 범위에 있다. 도로교설계기준 한계상태설계법(2015)에서는 우리나라 콘크리트의 설계기준 압축강도와 평균압축강도(f_{cm})를 Table 1과 같이 제시하고 있다.

평균압축강도를 활용하여 식 (1)로부터 산정한 탄성계수를 후크의 법칙에 대입하면 응력과 변형률의 상관관계를 알 수 있다. Fig. 6은 압축변형 측정을 위해 이 실험에서 사용하는 센서모듈의 개요도이며, 콘크리트 구조체의 변형률을 센서모듈을 통하여 측정함으로써 프리스트레스 변화량을 알 수 있다. Table 2는 이 실험에서 사용하는 센서모듈의 측정 기준길이가 30cm인 경우에 대한 변형량과 응력의 상관관계이다. 센서모듈의 분해능이 1μm인 경우 설계기준 압축강도(f_{ck})가 40MPa일 때 0.10MPa, 60MPa일 때 0.12MPa의 응력 변화량을 측정할 수 있다.

또한 일반적으로 설계에서 적용되는 프리스트레스의 범위는 설계기준 압축강도가 40MPa인 경우 20~30MPa, 설계기준 압축강도가 60MPa인 경우 40~50MPa인 점을 고려하면, 프리스트레스에 의하여 발생하는 최대 변형량은 설계기준 압축강도가 40MPa일 때 200μm, 설계기준 압축강도가 60MPa

Fig. 6 Schematic diagram of compressive deformation measurement

Table 1 Compressive strength and tensile strength of normal concrete

f_{ck} (MPa)	18	21	24	27	30	35	40	50	60
f_{cm} (MPa)	22	25	28	31	34	39	44	56	66

Table 2 Stress measurement accuracy according to displacement measurement accuracy (measurement length of sensor module L=30cm)

Specified compressive strength of concrete (f_{ck})	Relationship between displacement and strength (MPa)			
	1 μ m	5 μ m	10 μ m	100 μ m
40 MPa (E = 30,000 MPa)	0.10	0.50	1.00	10.00
60MPa (E = 35,000 MPa)	0.12	0.58	1.17	11.67

일 때 428 μ m으로 예상된다. 따라서 이 실험에서는 센서모듈이 0~500 μ m 변형량 내에서는 반복측정에 따른 선형성 및 오차 범위 등의 정밀도를 확보하는 것을 목표로 하였다.

$$E_c = 0.077 m_c^{1.5} \sqrt{f_{cm}} \quad (1)$$

여기서, m_c : 콘크리트 단위질량

(보통콘크리트인 경우 $m_c = 2,500\text{kg/m}^3$)

f_{cm} : 평균압축강도(MPa)

3.3 전압-변위 실험 및 결과분석

3.3.1 전압-변위 실험

정밀도 및 분해능 검증을 위해 전압-변위 실험을 하였다. 헤테로코어 광센서부에 빛을 조사하고 검출하기 위한 제품으로는 상용화되어 있는 A社の I-Line 시리즈 전용 컨트롤러(controller)와 아날로그 전압 측정장치(voltage meter)를 사용하였다.

헤테로코어 센서는 코어직경이 9 μ m-5 μ m-9 μ m인 광파이버를 사용하였으며, 변위를 제어하기 위한 마이크로미터는 1 μ m 단위로 조절이 가능한 장비를 사용하였다. 또한 30cm 센서모듈은 측정범위가 0~5,000 μ m로 3.2절에서 언급한 바와 같이 센서모듈의 소요 측정범위 0~500 μ m보다 10배 여유를 갖는다. 실험에 사용된 장비의 구성과 제원은 Fig. 7 및 Table 3과 같다.

PSC 거더에 초기 프리스트레스가 도입되면 즉시 손실과 함께 건조수축, 크리프 및 릴랙세이션 등 시간 의존적인 손실이 발생되고, 완전 프리스트레스 설계개념에 따라 제작된 PSC 거더는 사용하중이 최대로 작용하게 되면 영응력 상태에 근접하게 된다. 따라서 프리스트레스 도입 즉시 콘크리트는 최대

Fig. 7 Experimental equipment setting (volt-displacement)

Table 3 Equipment specifications for experiment of volt-displacement relationship

Item	Specifications	
Hetero-core optical fiber	Core diameter	9 μ m-5 μ m-9 μ m, SMF ¹⁾
	Optical output	LED 1 Channel
Controller (LED ²⁾ , PD ³⁾)	Optical input	PD 1 Channel
	Operating temperature	-10~+50 $^{\circ}$ C
	Data output	Analogue voltage
Voltage meter	Resolution ⁴⁾	0.1mV at 400mV range 0.001V at 4V range 0.01V at 40V range
	Accuracy ⁵⁾	3.0% + 3 at 400mV range 1.0% + 3 at 4V range

1) SMF: Single Mode Fiber

2) LED: Light Emitting Diode

3) PD: Photo Diode

4) At operating temperatures of 18 $^{\circ}$ C to 28 $^{\circ}$ C, relative humidity at 0% to 75%

5) $\pm$ % of Reading + Number of Least Significant Digits

압축변형량이 발생되고 이 후 프리스트레스 감소 및 하중재하에 따라 변형량이 점진적으로 줄어들며, 영응력상태에 근접하면 변형량은 설치 초기시점으로 복원될 것이다. 그리고 활하중이 재하되면 지속적으로 인장과 압축변형이 반복적으로 발생되게 된다. 이러한 특성을 고려하여 센서모듈의 인장과 압축 변위를 반복측정한 후 센서에서 감지되는 변위와 전압과의 상관관계에 대한 선형성과 오차를 확인함으로써 정밀도를 확인할 수 있다.

이 실험에서는 먼저 센서모듈의 가동범위인 0~5,000 μ m에 대해 1,000 μ m의 변위 증분량을 적용하여 4회 반복 측정한다. 또한 임의구간을 설정하여 점진적으로 변위 증분량 100 μ m, 10 μ m 및 1 μ m로 축소시키면서 반복 측정을 하고 선형성이 확인되지 않는 시점에서 실험을 종료한다. 이때의 변위 증분량은 분석장비 성능에 의존하게 되는 분해능의 한계 값으로 정의한다.

3.3.2 실험결과 및 고찰

Fig. 8은 센서모듈의 측정범위 0~5,000 μm 에서 선형성을 확인하기 위해 변위 증분량을 1,000 μm 로 하여 총 4회에 걸쳐 전압변화를 측정한 결과이다. 가로축은 변위량이며, 세로축은 전압을 나타낸다. 변위는 마이크로미터를 통해 센서모듈에 적용시킨 값이며, 전압은 LED에서 생성된 빛이 헤테로코어부를 통과하여 콘트롤러의 PD에서 감지된 광량을 아날로그 전압으로 변환한 후 전압측정기를 통해 읽은 값이다. 증분량이 1,000 μm 인 경우 측정값에 대한 결정계수(R^2)가 0.9992~0.9993이고 반복측정에 대한 오차율은 0.21~0.49%로 나타났다.

센서 작동범위 중 2,000~3,000 μm 구간에 대해 변위 증분량을 100 μm 로 축소하여 실험을 하였으며, 측정결과 Fig. 9와 같이 결정계수 0.9996~0.9999이고 오차율은 0.0~0.11%로 측정되었다. 또한 Fig. 10과 같이 변위 증분량을 10 μm 로 축소하며 실험한 결과 결정계수가 0.9916 이상, 반복측정 오차 0.03% 이하로 분석장비의 성능과 관계없이 센서모듈의 측정값은 선형적으로 변하면서 정밀한 측정 결과를 나타내었다. 그러나 Fig. 11과 같이 변위 증분량 1 μm 에서는 선형성을

Fig. 8 Voltage-displacement curve (displacement variation 1,000 μm)

Fig. 9 Voltage-displacement curve (displacement variation 100 μm)

Fig. 10 Voltage-displacement curve (displacement variation 10 μm)

Fig. 11 Voltage-displacement curve (displacement variation 1 μm)

확인할 수 없었으며, 최대 7 μm (2.490~2.497mm) 구간에서 측정값이 3.466V로 변화하지 않는 등 분석장비가 갖는 분해능의 한계를 보여주는 것으로 나타났다. 따라서 전압-변위 실험 결과로부터 이 실험에서 사용한 전압 측정장비를 활용하면 10 μm 의 분해능을 확보할 수 있는 것으로 판단되며 센서모듈의 반복측정에 대한 정밀도는 확보가 되는 것으로 판단된다. 그러나 10 μm 의 변위 증분량은 설계기준압축강도가 40MPa인 경우 1MPa의 프리스트레스 변화량을 측정할 수 있음을 의미한다. 이는 도입되는 프리스트레스 대비 1/20~1/30 수준으로 유의미한 변화량을 측정하기 위해서는 보다 분해능을 높일 필요성이 있을 것으로 판단하였다.

3.4 전력-변위 실험 및 결과분석

3.4.2 전력-변위 실험

전압-변위 실험결과와 비교·분석을 위해 분석장비는 B社사의 장비를 사용하였다. 일반적으로 광파이버 센서를 이용한 측정값의 분석을 위하여 OTDR(optical time domain

reflectometer), 광파워미터(optical power meter, OPM), 파장분석기(wavelength analyzer) 등의 장비가 사용된다. 그러나 헤테로코어부를 통과하는 1개소에서의 광량 변화만을 측정하는 것이므로 분포형 센서 타입에 적용되는 OTDR이나, 파장 특성을 분석하는 파장분석기 등은 불필요하다. B社의 제품은 센서용으로 개발되어 측정 목적에 따라 다양한 파워센서(power sensor)를 부착함으로써 온도, 에너지 등의 측정이 가능하다. 이 실험에서 사용된 장비의 제원은 Table 4와 같다. Fig. 12는 실험장비 구성을 나타낸 것이다. 3.3절의 전압-변위 실험결과와 비교·분석하기 위하여 광파이버 및 센서모듈은 동일하게 구성하였다.

Table 4 Equipment specifications for experiment of dBm-displacement relationship

Item	Specifications	
Power analyzer (PM200)	Optical power range	100pW to 200W
	Optical energy range	3μJ to 15J
	Available sensor wavelength range	185nm to 25μm
	Photodiode sensors accuracy	±0.2% full scale (5μA-5mA) ±0.5% full scale (50nA)
Light source (HL-2000-LL)	Source	Long lifetime tungsten halogen
	Wavelength range	360~2400nm
	Stability of optical output	0.15% peak to peak
	Operating temperature and humidity	5℃~35℃, 5~95% without condensation at 40℃
Power sensor (S155C)	Wavelength range	800~1700nm
	Detector type	InGaAs Photodiode
	Power range	1nW to 20mW (-60dBm to +13dBm)
	Linearity	±0.5%

Fig. 12 Experimental equipment setting (power-displacement)

센서의 가동범위 0~5,000μm에서는 선형적으로 변화하는 것을 전압-변위 실험으로부터 확인하였다. 따라서 프리스트레스에 의해 예상되는 최대 변형량 428μm을 포함하도록 0~500μm 대해 한정하여 실험을 하였다.

변위 증분량을 100μm로 한 실험에서는 센서모듈의 초기치를 0μm로 세팅하여 초기 값을 측정한 후 인장 변위를 500μm까지 100μm단위로 가한 후 다시 500μm에서부터 0μm까지 압축 변위를 가한다. 측정회수는 인장 및 압축변형을 1 사이클로 총 3회 반복 측정하였다. 이는 PSC 교량이 긴장 직후 최대 압축 변형이 발생되므로 센서모듈을 초기 인장변형을 가해 세팅을 하고, 이후 프리스트레스 손실 및 활하중, 온도변화에 의해 변형량이 늘어나거나 줄어드는 특성을 반영하여 정밀도를 확인하기 위함이다. 또한 분해능을 확인하기 위해 변위 증분량을 10μm, 5μm, 2μm 및 1μm로 점진적으로 축소시키면서 인장과 압축을 반복하여 전력(dBm)변화를 측정하였다. 이때 측정이 불가능하거나 선형성이 확인이 되지 않는 변위 증분량을 분해능의 한계로 설정하였다.

dBm은 전력의 절대 측정단위이며 기준 전력레벨 1mW에 대한 상대적인 전력의 크기를 표현한 것으로 식 (2)와 같은 상관관계가 있다.

$$dBm = 10 \log \frac{P}{P_0} \quad (2)$$

여기서, P_0 : 기준 전력레벨, 1mW

P : 전력 측정 값

3.4.3 실험결과 및 고찰

Fig. 13은 초기 인장-압축 변위를 3회 반복 측정한 결과이다. 그래프의 가로축은 변위량을 나타낸 것이며, 세로축은 변위량에 대응하는 전력의 크기(dBm)를 나타내었다. 반복 측정결과 결정 계수 0.9945, 오차 0.04~0.13%로 분석되어 측정 결과의 정합성이 확보됨을 알 수 있다.

Fig. 14는 각각 변위 증분량 10μm, 5μm, 2μm 단위까지 전력-변위 상관관계를 측정한 결과이다. 측정결과 변위 증분량이 10μm일 때 결정계수가 0.9994, 5μm일때 결정계수는 0.9988, 2μm일 때 결정계수는 0.9994로 선형성을 나타내고 있으며, 회귀분석식과의 오차는 각각0.03%, 0.06%, 0.04%로 정밀한 측정이 가능하였다. 그러나 변위 증분량 1μm에서는 광파워 미터에 표시되는 측정값이 불규칙하게 변화하여 측정값을 읽을 수가 없었다. 이는 광원장치의 안정성 및 분석장비가 갖는 분해능의 한계로 판단하였다.

전력-변위 실험결과를 정리하면 Table 5와 같다. 최대 2μm의 분해능을 갖는 센서모듈 제작이 가능하며, 센서모듈의 길이가

Fig. 13 tension-compression displacement curve by 3times repeated measurement (displacement derivation 100μm)

Fig. 14 power-displacement curve (displacement derivation 10μm, 5μm, 2μm)

Table 5 result of dBm-displacement measurement

Derivation	Regression Eq	R-square	Error(%)
100μm	$y = 1.3582x - 33.887$	0.9945	0.13
10μm	$y = 1.3732x - 33.899$	0.9994	0.03
5μm	$y = 1.3936x - 33.894$	0.9988	0.06
2μm	$y = 1.3581x - 33.910$	0.9994	0.04
1μm	-	-	-

30cm인 경우 응력 변화량은 설계기준압축강도가 40MPa인 경우 0.2MPa, 60MPa인 경우 0.24MPa 단위로 측정이 가능하므로, 전압측정 분석방식에 비해 유효한 분해능을 가질 수 있음을 확인하였다.

4. 결 론

이 연구는 헤테로코어 광파이버를 이용한 PSC 구조물의 프리스트레스 측정용 센서모듈 개발을 위한 일련의 연구과정 중 선행 기초연구로써 프리스트레스 측정을 위한 요구수준을 분석하고 헤테로코어 센서의 정밀도 및 분해능을 검증하여 그 가능성을 확인하고자 하였다. 30cm의 헤테로코어 센서모듈을 적용하는

경우, PSC 구조물의 0.1MPa 응력 변화측정을 위해 1μm의 분해능을 가져야 하는 것으로 분석되었다. 또한 실험결과 기존의 전압 측정방식이 10μm단위의 변위 증분량에 대한 측정이 가능하였고, 광파워미터를 활용한 전력 측정방식은 2μm의 변위 증분량까지 반복측정에 대한 오차는 최대 0.13%이하로 측정이 가능하였다.

실험 결과로부터 전력 측정방식을 적용하는 것이 효율적이며 2μm의 콘크리트 탄성 압축 변형량을 측정할 수 있는 분해능을 가지므로 센서모듈의 기준길이가 30cm일 때 설계기준압축강도가 40MPa인 경우 0.2MPa, 60MPa인 경우 0.24MPa 단위로 응력 변화량을 측정할 수 있음을 확인하였다. 1μm의 분해능에는 미치지 못하였지만 도입되는 프리스트레스의 범위가 20~50MPa 정도임을 고려하면 1/100~1/200 수준의 변화량을 측정할 수 있으므로 PSC 구조물의 프리스트레스 측정용 센서로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

다만 분해능은 분석 장비의 성능에 직접적인 영향을 받기 때문에 장비의 조합에 따라 그 수준이 달라지며, 상대적으로 낮은 분해능을 가지더라도 변형을 측정의 기준이 되는 센서모듈의 기준길이를 증가시킴으로써 동일한 측정결과를 나타낼 수 있음을 고려할 필요가 있다. 특히 센서모듈의 상용화를 위해서는 정밀도 및 분해능뿐만 아니라 분석장비 등의 가격, 센서모듈의 크기 등도 중요한 고려 대상이므로 이러한 관점에서 이 실험의 결과는 향후 진행될 내부매립용 센서모듈 개발에 유용한 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의글

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2017R1D1A1B03029171).

References

- Bartoli, I., Phillips, R., Scalea, F.L., Salamone, S., Coccia, S., Sikorsky, C.S. (2008) Load Monitoring in Multiwire Strands by Interwire Ultrasonic Measurements, *Proc. of SPIE* 6932, 693209, pp.1~12.
- Chen, H.L., Wissawapaisal, K. (2001) Measurement of Tensile Forces in a Seven-Wire Prestressing Strand using Stress Waves, *J. Eng. Mech.*, 127(6), pp.599~606.
- Goh, L.S., Kumekawa, N, Watanabe, K., Shinomiya, N. (2014) Hetero-core Spliced Optical Fiber SPR

- Sensor System for Soil Gravity Water Monitoring in Agricultural Environments, *Comput. & Electron. Agric.* 101, pp.110~117.
- Grattan, K.T.V., Sun, T.** (2000) Fiber Optic Sensor Technology: An Overview, *Sens. & Actuators A: Physical*, 82, pp.40~61.
- Idriss, R.L.** (2001) Monitoring of a High Performance Prestressed Concrete Bridge with Embedded Optical Fiber Sensors during Fabrication, *Construction and Service, Proceedings of the 9th International Conference Structural Faults Repair*, London, England.
- Inaudi, D.** (1994) Low-Coherence Deformation Sensors for the Monitoring of Civil Engineering Structures, *Sens. & Actuators A*, 44, pp.125~130.
- Kim, H.W., Kim, J.M., Choi, S.Y., Park, S.Y., Lee, H.W.** (2015) Long Term Monitoring of Prestressing Tension Force in Post-Tension UHPC Bridge using Fiber Optical FBG Sensor, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 28(6), pp.699~706.
- Kim, Y.B., Lee, K.S., Watanabe, K., Sasaki, H., Choi, Y.W.** (2007) Hetero-core Spliced Fiber Optical Sensing System for an Environment Monitoring, *J. Ocean Eng. & Technol.*, 21(3), pp.46~51.
- Koyama, Y., Watanabe, K.** (2014) Perceptive Sportswear System with Auditory Feedback Based on Hetero-core Optical Fiber for Running Motion Support, *Procedia Eng.*, 87, pp.552~555.
- Lee, J.H.** (2015) Prestressed Concrete Strength Design and Limit State Design, Dong Myeong Publishers, pp.6~11.
- Lee, S.C., Choi, S.Y., Shin, K.J., Kim, J.M., Lee, H.W.** (2015) Measurement of Transfer Length for a Seven-Wire Strand with FBG Sensors, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 28(6), pp.707~714. 2015.
- Maaskant, R., Alavie, T., Measures, R.M., Tadros, G., Rizkalla, S.H., Guha-Thakurta, A.** (1997) Fiber-Optic Bragg Grating Sensors for Bridge Monitoring, *Cement & Concr. Compos.*, 19, pp.21~33.
- Measures, R.M., Alavie, A.T., Maaskant, R., Ohn, M., Karr, S., Huang, S.** (1994) Bragg Grating Structural Sensing System for Bridge Monitoring, *Proc SPIE* 1994:2294, pp.53~60.
- Nishiyama, M., Sonobe, M., Watanabe, K.** (2016) Unconstrained Pulse Pressure Sensing for Health Management based on a Hetero-core Fiber Optic Sensor, *Biomed Opt Express*, 7(9), pp.3675~3685.
- Otsuka, Y., Koyama, Y., Watanabe, K.** (2014) Monitoring of Plantar Pressure in Gait based on Hetero-core Optical Fiber Sensor, *Procedia Eng.*, 87, pp.1465~1468.
- Roller, J.J., Russell, H.G., Bruer Jr, R.N., Alaywan, W.R.** (2011) Evaluation of Prestress Losses in High-strength Concrete Bulb-tee Girders for the Rigolets Pass Bridge, *PCI J.*, 56(1), pp.110~134.
- Seki, A., Katakura, H., Kai, T., Iga, M., Watanabe, K.** (2007) A Hetero-core Structured Fiber Optic pH Sensor, *Anal. Chim. Acta*, 582(1), pp.154~157.
- Sumitro, S., Hida, K., Diuron, T.Le.** (2003) Structural Health Monitoring Paradigm for Concrete Structures, *28th Conference on Our World in Concrete & Structures*: 28-29, Singapore.
- 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.

요 지

이 실험연구는 PSC 교량의 생애주기 프리스트레스 측정용 헤테로코어 광파이버 센서를 개발하기 위한 선행연구이며, 기존의 헤테로코어 변위센서의 정밀도를 향상하기 위한 실험이다. 실험결과 최대 2 μ m 단위의 변위 변화량을 측정할 수 있었다. 즉, 변위측정 길이가 30cm의 센서모듈을 설계했을 때 설계기준압축강도(fck)가 40MPa인 경우 0.2MPa 단위의 응력변화를 측정이 가능함을 확인하였다. 따라서 본 실험의 결과는 향후 진행될 내부매립용 센서모듈 개발에 유용한 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 헤테로코어, 광파이버 센서, 광파워미터, 프리스트레스