

헤테로코어 광파이버 노출형 센서모듈과 계측 지연현상

송 영 용¹ · 박 익 태¹ · 이 환 우^{2*}

¹부경대학교 토목공학과 박사과정, ²부경대학교 토목공학과 교수

Hetero-core Optical Fiber Exposure Sensor Module and Instrumentation Delay

Young-Yong Song¹, Eik-Tae Park¹ and Hwan-Woo Lee^{2*}

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

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

Abstract

The objective of this study is to develop a new type of buried sensor module that can directly assess pre-stressed concrete by measuring strain using a hetero-core optical fiber sensor. In this regard, experiments were conducted to evaluate the performance of the sensor using an exposure sensor module. Based on the experimental results, when the values of the displacement control velocity were 0.12 mm/min and 1.80 mm/min, the corresponding delays in the measurement were 52.1 s and 2.6 s respectively, which indicated that the maximum delay between the two measurements was a factor of 19. Due to the measurement delay phenomena, the sensor module used in the experiments cannot be employed to check the real-time state of the structure. Thus, additional experiments were needed to develop a new sensor module that can measure the real-time state of the structure. To investigate the cause of the measurement delay phenomena, three experiments were conducted. It was confirmed that measurement delay is mainly attributed to frictional resistance. The measurement delay phenomena were not observed in the experiments using the friction-removed device.

Keywords : hetero-core, optical fiber sensor, prestress, exposure sensor-module, measurement delay

1. 서 론

프리스트레스트 콘크리트(prestressed concrete, PSC)는 교량 및 원자력 발전용 격납구조물 등 중요 사회기반 시설물에 널리 적용되고 있다. PSC 구조물이 설계수명 동안 적절하게 유지 관리되는 것은 시민의 안전을 보장하고 신뢰성 있는 서비스를 제공하기 위해 매우 중요하다(Sumitro *et al.*, 2003).

PSC 구조물의 주요 요소인 프리스트레스는 강연선 등의 긴장재를 이용하여 콘크리트에 도입된 압축응력이다. 구조물 건설시 도입된 프리스트레스는 여러 요인에 의해 손실이 발생할 수 있으며 구조물의 처짐 및 균열 등의 발생을 초래하여 PSC 구조물의 내구성 저하의 원인이 된다. 2015년 서울 내부 순환도로 정릉천 고가도로 내부에서 프리스트레싱 긴장재의

부식으로 인한 절단이 확인되었다. 이로 인해 국내에서도 PSC 구조물 유지관리의 핵심 요소로서 공용 중 구조물의 프리스트레스의 관리의 관심이 증가하고 있다. PSC 구조물의 건전도 모니터링은 프리스트레스 손실에 따른 콘크리트의 응력 상태를 평가하는 것이 중요하다. 프리스트레스를 모니터링 함으로써 구조물의 보수 또는 보강을 위한 방안을 수립할 수 있으며 구조물에 대하여 안정성을 보장할 수 있다(Sumitro *et al.*, 2003; Lee *et al.*, 2015).

프리스트레스는 긴장재에 센서를 부착 또는 삽입하여 긴장재의 인장력을 측정 후 단면해석 등의 계산에 의한 간접적인 방법으로 평가할 수 있다. 또한, 콘크리트의 압축 변형률을 측정하여 프리스트레스를 직접적인 방법으로 평가할 수도 있다. 긴장재의 인장응력을 측정하는 방법에는 탄성자기효과 기반의

* Corresponding author:

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

Received October 7 2019; Revised October 19 2019;

Accepted October 21 2019

©2019 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.

EM센서(Wang *et al.*, 2000)와 격자 브래그 광섬유(FBG) 센서(Measures *et al.*, 1994; Maaskant *et al.*, 1997; Kim *et al.*, 2015)등 광파이버를 긴장재에 설치하여 변형률을 측정하는 것이 대표적인 방법이다.

본 연구는 헤테로코어(hetero-core) 광파이버 센서를 활용하여 콘크리트 내부에서 발생하는 변형(률)의 측정을 통해 콘크리트의 프리스트레스를 직접적으로 평가할 수 있는 새로운 매립형 센서모듈 개발을 최종 목표로 하고 있다. 이를 위하여 선행 연구결과에서는 헤테로코어 센서를 활용한 PSC 교량의 프리스트레스 측정이 가능함을 확인하였다(Park *et al.*, 2018). 이번 연구에서는 노출형 센서모듈의 제작 및 성능시험을 통해 헤테로코어 광파이버 센서모듈의 성능발현 가능성을 가늠하고자 한다.

2. 실험장비

2.1 헤테로코어 광파이버 센서

헤테로코어 광파이버 센서는 Fig. 1과 같이 큰 코어직경을 갖는 광파이버를 절단한 후 절단부위에 작은 직경의 코어를 연결하여 융착한 센서이다. 헤테로코어 센서는 곡률변화에 따라 광손실량이 발생하며, 이때 광손실량과 변위의 관계는 Fig. 2와 같이 선형적인 관계를 갖는다(Kim, 2010).

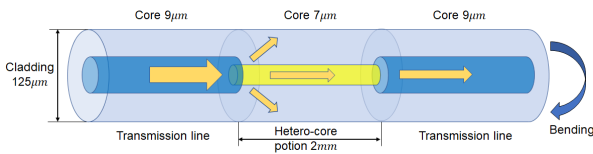


Fig. 1 Hetero-core sensor

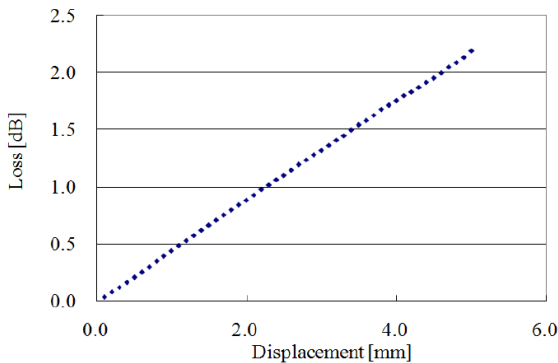


Fig. 2 Experiment result(loss to displacement) (Kim, 2010)

2.2 노출형 센서모듈

본 논문에서 적용한 노출형 센서모듈의 길이는 식 (1), 식

(2) 및 Fig. 3과 같이 응력과 센서모듈의 길이와의 상관관계를 도출하였다.

$$\sigma = E \cdot \epsilon = E \cdot \frac{d}{L} = E \cdot \frac{u_B - u_A}{x_B - x_A} \quad (1)$$

$$L = \frac{E \cdot (u_B - u_A)}{\sigma} \quad (2)$$

여기서, σ : 프리스트레스(MPa)

E : 탄성계수(MPa)

d : $u_B - u_A$, 변위량(m)

L : $x_B - x_A$, 센서모듈의 길이(m)

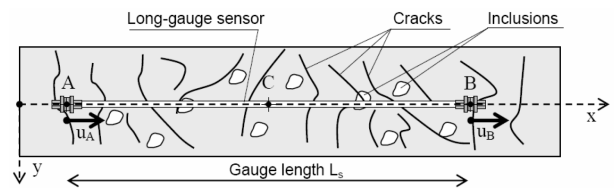


Fig. 3 Schematic representation of a long-gauge sensor in an inhomogeneous material (Glisic and Inaudi, 2007)

콘크리트의 탄성계수는 압축강도에 따라 정해지는 값으로 상수로 볼 수 있어 센서모듈의 양끝단을 고정된 상태에서 프리스트레스를 도입하고 양끝단 구간 내에서 발생하는 변위량을 측정함으로써 응력 크기를 산정할 수 있다. 또한, 센서에서 변위량을 측정할 수 있는 정밀도에 따라 응력의 크기를 측정할 수 있는 정밀도가 변하게 되므로 목표로 하는 응력 크기 측정 정도를 설정하면 센서모듈의 소요 길이를 구할 수 있다.

탄성계수가 30,000MPa($f_{ck} = 40\text{MPa}$)인 콘크리트에서 정밀도가 1 μm , 5 μm , 10 μm , 50 μm 로 계측하는 경우에 측정 응력의 크기와 센서모듈의 소요 길이를 나타내면 Fig. 4와 같다. 선행 연구결과(Park *et al.*, 2018) 헤테로 코어센서를

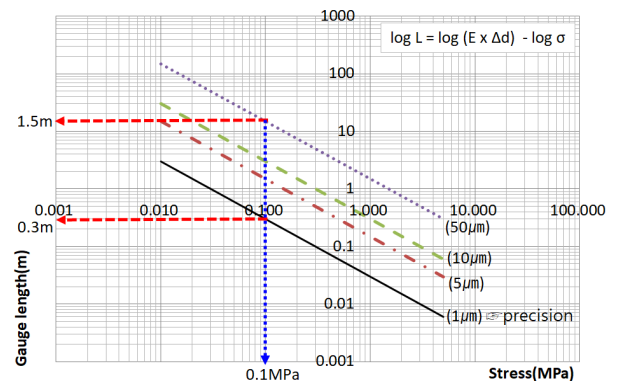


Fig. 4 Correlation between stress and sensor module length

이용한 정밀도는 1 μ m의 측정이 가능하였다. 따라서 센서모듈의 길이는 1 μ m의 정밀도가 확보되고 0.1MPa의 측정이 가능한 센서모듈의 소요 길이는 Fig. 4와 같이 0.3m로 결정할 수 있다.

헤테로코어 광파이버 센서는 계측 센서모듈 내에서 설치 방법에 따라 콘크리트의 인장과 압축변형 측정이 가능하다.

Fig. 5는 이번 실험에 적용한 인장과 압축 변형(률) 측정이 가능한 노출형 센서모듈의 기본 제작도이다.

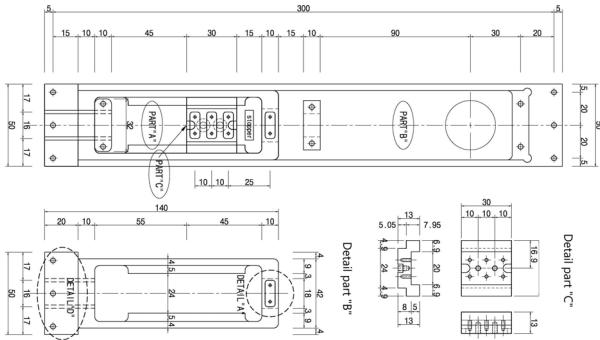


Fig. 5 Exposure sensor module

2.3 변위 측정장치

마이크로미터를 이용하여 측정한 광손실량의 변화량에 따른 변위는 육안판독에 의한 오차가 발생하는 등의 불안정한 데이터 값이 취득되는 것으로 나타났다(Park *et al.*, 2018). 따라서, 이번 연구에서는 자동화 계측(일정구간 수회 반복측정)이 가능한 전동변위 측정장치를 개발하였다. Table 1은 이번 연구에서 개발한 전동변위 측정장치의 제원이며, Fig. 6은 전동변위 측정장치의 제작 모형도이다. 전동변위 측정장치의 특징은 광파이버 센서에서 측정되는 광손실량의 변화량을 육안판독이 아닌 디지털 파일로 직접 저장이 가능하며, 다양한 속도변화에 대한 반복측정이 가능한 실험장비이다.

Table 1 Specifications of electric displacement measuring device

Item	Sensor movement jig specifications	
Motorized stage (SM1-0602-3S)	Table dimension	60mm×60mm
	Resolution	0.002mm/pulse(full step)
	Maximum speed	20mm/sec
X-Stage (SS1-6018C)	Motor	02K-S523W
	Stoke	±6.5
Z-Stage(SS6H-60)	Resolution	10 μ m/division(0.01)
Rotation stage (RDS-60R)	Travel guide	Crossed roller bearing
	Stage surface	Ø60mm
Motion control box (STM-1-USB)	Travel guide	360°/±5°
	Motion controller	1-axis motion
	Communication method	RS-232C/USB

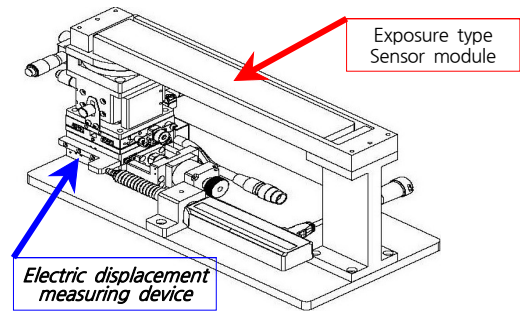


Fig. 6 Configuration of electric displacement measuring device

2.4 실험장비의 조합

헤테로코어 센서를 이용한 광손실량의 측정은 노출형 센서 모듈(SMA-1.20), 전동변위 측정장치(PEMS), light source (SLS203L/M), power sensor(S154C), power analysis (PM-200) 등의 상용화된 장비를 조합하여 가능하다. 특히, 이번 연구에서 개발된 노출형 센서모듈(SMA-1.20) 및 전동 변위 측정장치(PEMS)를 이용하여 센서모듈의 성능실험을 계획 하였다. 실험장비의 구성 개념도는 Fig. 7에서 보여주는 바와 같고 Photo. 1은 성능확인 실험에 적용된 장비조합 사진이다.

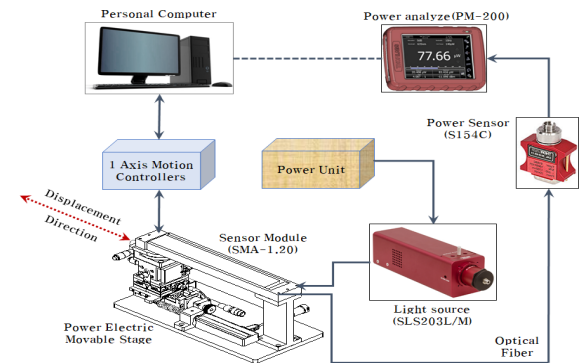


Fig. 7 Schematic diagram of strain measurement using hetero-core sensor

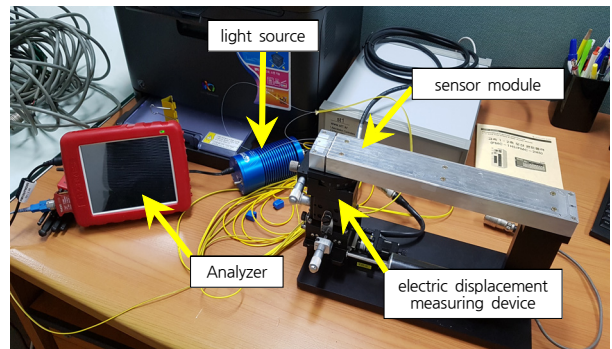


Photo. 1 Experimental equipment setting (time-displacement-power)

센서모듈의 성능실험에 적용된 사용 장비 중 power analyzer, light source, power sensor의 세부 제원은 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Equipment specifications for experiment of power-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 (S154C)	Wavelength range	800~1700nm
	Detector type	InGaAs Photodiode
	Power range	100pW to 3mW (-60dBm to +13dBm)
	Linearity	±0.5%

3. 노출형 센서모듈 성능실험

3.1 실험계획

노출형 센서모듈의 성능실험은 헤테로코어 센서가 장착된 계측장치의 구성성을 확인하는 기초실험이다. 프리스트레스의 변형(률)은 PSC 시공과정에 따라 최초 콘크리트 타설 직후 콘크리트는 무응력 상태에서 긴장 작업 시 압축응력 상태가 되며 가설단계, 공용하중 단계를 거치면서 압축응력의 감소 및 인장응력 상태로 진행된다. 이러한 과정을 실험단계로 모사하기 위하여 노출형 센서모듈의 성능실험을 계획하였다.

3.2 실험방법

헤테로코어 센서는 측정범위 0~5,000μm에서 선형성이 확인되었다(Kim, 2010). Kim의 실험방법은 동일구간에서 한 방향의 변형에 대한 실험으로서 실제 구조물에서 발생하는 다양한 변화량의 대응에 관해서는 신뢰성이 부족한 것으로 판단되었다. 따라서, 이번 연구에서는 계측범위(5,000μm)의 중간에 해당하는 2,000~3,000μm 구간을 자동화 변위측정이 가능한 방법으로 4회 왕복하여 노출형 센서모듈의 성능확인 실험을

하였다.

노출형 센서모듈의 성능확인에 적용한 변위 제어속도는 별도의 기준이 없어 콘크리트의 표준공시체 탄성계수실험(KS F 2438)에서 적용하고 있는 표준속도 0.125mm/min을 기준을 적용하였다. 변위 제어속도는 전동변위 측정장치의 특성을 고려하고 계측 증분량의 분석이 가능한 0.12mm/min, 0.60 mm/min, 1.20mm/min, 1.80mm/min을 적용하여 시간-변위-전력량 실험을 하였다. Fig. 8은 변위 제어속도 0.12 mm/min에 대한 실험계획이며 그래프는 변위량 2,000μm를 기준한 증분실험 변위량과 측정 누계시간을 나타내었다.

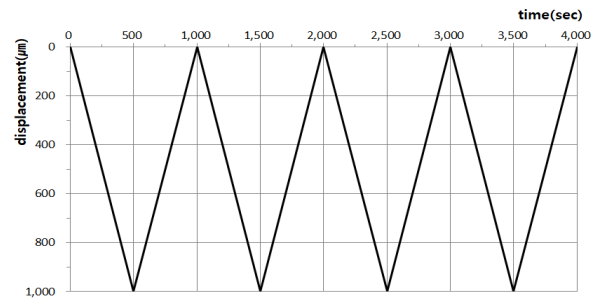


Fig. 8 Round-trip test plan using an electric displacement measurement system

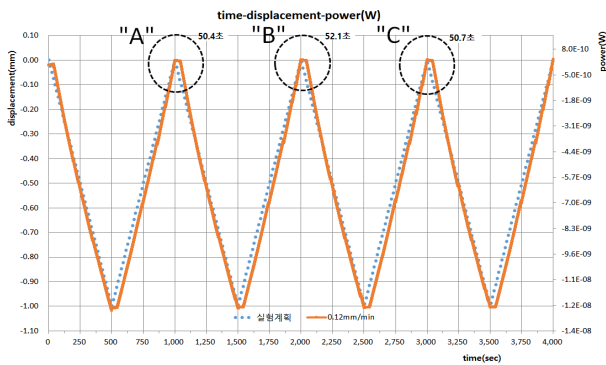
3.3 실험결과

Fig. 9는 변위 제어속도 0.12mm/min에 대한 실험결과이다.

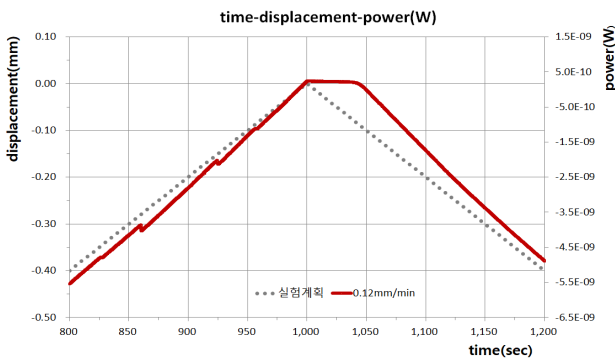
Fig. 9에서 점선의 의미는 실험계획을 나타낸 것이며, 실선의 의미는 전동변위 측정장치를 이용한 시간-변위 측정결과를 나타낸 것이다. 그래프의 하단부는 측정 누계시간(sec)을 나타낸 것이며, 좌측 눈금의 표기는 실험계획 변위량(0~1mm)을 나타내었으며, 우측의 눈금은 광누설량을 전력량(W)으로 환산한 값을 취득하여 그래프로 나타내었다. 실험결과 그래프의 상하 정점에서 계측 지연을 나타내는 수평구간이 기록되었다. Fig. 9(b)는 Fig. 9(a)의 원형점선 "A"를 확대하여 나타낸 것으로 최대 50.4sec의 계측 지연시간이 나타났다.

계측 지연시간의 분석은 Table 2의 power sensor(S154C)가 가지고 있는 분해능의 한계 값(100pW이하)이하의 적은 전력량에 대한 측정시간을 계측 지연시간으로 산정하였다. Table 3은 분해능의 한계값을 초과하는 계측 지연시간을 나타낸 것이며, 노출형 센서모듈에서 발생한 계측 지연시간은 변위 제어속도별 2.6~52.1초의 계측 지연현상이 발생하는 것으로 확인되었다.

실험결과 변위 제어속도가 빠를수록 계측 지연시간은 짧고 변위 제어속도가 느릴수록 계측 지연시간은 길게 나타났다. 또한, 계측시간의 차이는 변위 제어속도별 최대 약 19배가 발생



(a) Performance test of sensor module : displacement control velocity(0.12mm/min)



(b) Detail "A"(transverse axis spacing 50sec)

Fig. 9 Test results of performance test & detail of part "A"

하여 교량 구조물에 있어 다양한 차량 이동 속도에 대한 교량의 거동분석을 위한 센서모듈의 기준성능으로 부적합한 것으로 판단할 수 있다. 따라서 계측 지연현상의 해결은 실시간 교량의 거동을 측정하기 위해서는 매립형 센서모듈의 요구 성능을 위한 제작 조건으로 반드시 필요하다.

Table 3 Analysis of measurement delay time for displacement control velocity

Displacement control velocity	Measurement delay time(sec)				Remarks
	Detail "A"	Detail "B"	Detail "C"	Average	
0.12 mm/min	50.4	52.1	50.7	51.1	
0.60 mm/min	9.1	9.3	9.6	9.3	
1.20 mm/min	4.5	4.3	4.0	4.3	
1.80 mm/min	2.6	2.8	2.7	2.7	

4. 계측 지연현상 원인분석 실험

계측 지연현상의 원인 규명을 위해 다음과 같은 추가실험을 계획하였다.

- ① 마찰저항 확인실험 : 노출형 센서모듈의 구동 시 마찰저항이 계측 지연현상에 미치는 영향을 파악하기 위한 실험으로

노출형 센서모듈의 가공오차에 대한 여유량(+0.1mm)을 확보하기 위하여 센서모듈의 접촉면을 절삭 후 세척제(WD-40)를 사용하여 센서모듈 구동부 접촉면을 세척하고 윤활유(SA-300)를 1mm 두께로 도포 후 계측 지연현상을 확인

- ② 광원장치 변경실험 : 계측 지연현상이 발생하는 구간에서 전력량이 100pW이하에서 측정된 지연시간이 확인되어 해결방법으로 광원의 광량을 증가시켜서 광원장치의 영향에 따른 계측 지연현상 확인
- ③ 센서규격 변경실험 : 광원장치의 영향을 확인하는 방법과 유사하게 헤테로코어부의 광량을 증가시키는 방법의 일환으로서 헤테로 코어 중간부 센서규격을 변경(5μm→7μm)하여 코어부 광량에 따른 계측 지연현상 확인

노출형 센서모듈의 성능 확인 실험결과 3가지의 계측 지연현상에 대한 원인을 확인하였다. Table 4는 앞서 실험한 계측 지연현상을 발생시키는 원인들 중 ① 마찰저항 확인실험 결과이다. 표에서 ▼29.2, ▼1.9의 의미는 전동변위 측정장치의 가력 속도별 마찰저항 저감 방법 적용 전·후의 계측결과에 대한 차이를 나타낸 것으로 추가 확인 실험결과 계측 지연시간이 줄어드는 효과를 보여주고 있다.

Table 4 ① Results of the friction resistance experiment

Displacement control velocity	Measurement delay time(sec)				Remarks
	Detail "A"	Detail "B"	Detail "C"	Average	
0.12mm/min	25.0	21.2	19.6	21.9	▼29.2
1.20mm/min	2.1	2.6	2.6	2.4	▼1.9

Table 5는 앞서 실험한 계측 지연현상을 발생시키는 추정 원인들 중 ②, ③의 결과로서 실험결과 계측 지연에 대한 효과는 크지 않은 것을 확인하였다. 따라서 계측 지연현상을 발생시키는 추정 원인들 중 계측 지연효과가 명확하게 확인된 ① 마찰저항 확인실험 결과를 활용하여 마찰저항이 제거된 장치를 이용한 실험을 계획하였다.

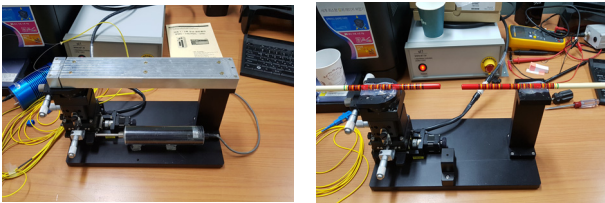
Table 5 Results of the experiment on change of ② light source and ③ sensor specifications

Displacement control velocity	Average measurement delay time at the top and bottom of the graph(sec)				Remarks
	② Light source device change experiment		③ Sensor specification change experiment		
	HL-2000	SLS-203	9-5-9μm	9-7-9μm	
0.12mm/min	23.3	21.9	19.6	21.9	
1.20mm/min	2.0	2.4	2.6	2.4	

5. 마찰저항이 제거된 센서모듈의 계측 지연현상

5.1 실험계획

센서모듈 계측 지연현상 확인실험은 성능실험에서 확인된 계측 지연현상을 해결하기 위하여 센서모듈의 마찰저항이 제거된 검증용 센서모듈을 제작하여 실험하였다. Photo. 2는 노출형 센서모듈 및 검증용 센서모듈의 설치 모습이며, Photo. 3은 검증용 센서모듈을 이용한 실험장비의 구성도를 나타낸 것이다. 검증용 센서모듈은 Photo. 3과 같이 Ø8mm의 견고한 장치를 수평으로 30~35mm 작동될 수 있도록 단단하게 고정된 상태를 유지하여 센서모듈 계측 지연현상 확인실험을 계획하였다.



(1) exposure sensor module (2) revised sensor module
Photo 2 Types of sensor module

5.2 실험방법

계측 지연현상을 위한 실험방법은 노출형 센서모듈의 성능 실험에서 적용된 실험방법과 동일하게 실험하였다. 다만, 전동 변위측정 장치의 변위 제어속도는 노출형 센서모듈의 성능 실험에서 적용한 4가지 변위 제어속도 중 계측 지연시간이 많은 경우와 중간인 경우를 적용하여 0.12mm/min, 1.2mm/min 의 변위 제어속도를 적용하여 실험하였다.

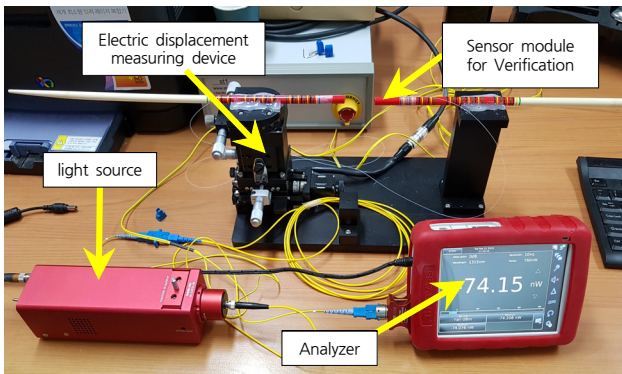
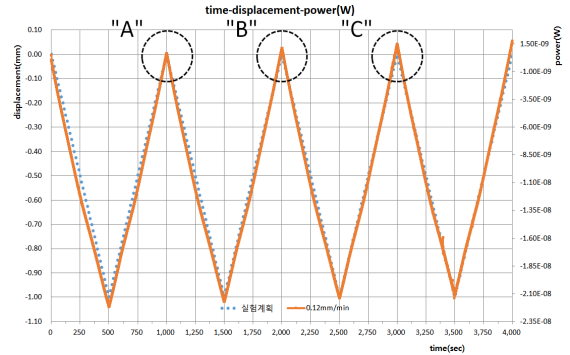


Photo 3 Experimental equipment setting (time-displacement-power)

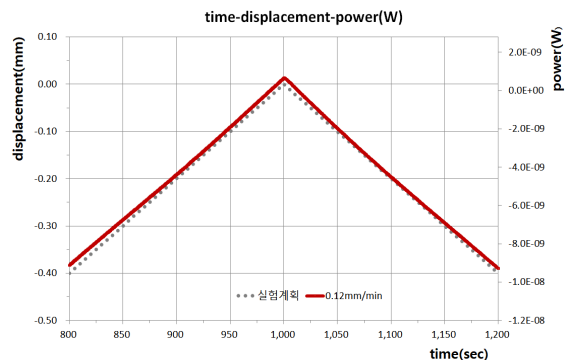
5.3 실험결과

마찰저항이 제거된 센서모듈의 계측 지연현상 확인실험은

Fig. 10에서 보여주는 바와 같이 노출형 센서모듈에서 계측 지연현상 시간이 가장 많이 나타나는 변위 제어속도 0.12 mm/min에 대한 실험결과이다. Fig. 10(a)는 계측 지연현상에 대한 실험결과이며, 원형 점선 부분은 계측 지연시간에 대한 상세 "A"를 확대하여 나타낸 그림으로 Fig. 10(b)에서 보여주는 바와 같다.



(a) Verification experiment of measurement delay : displacement control velocity(0.12mm/min)



(b) Detail "A"(transverse axis spacing 50sec)

Fig. 10 Test results of performance test & detail of part "A"

Table 6은 마찰저항이 제거된 센서모듈의 계측 지연시간을 나타낸 것이며, 변위제어 속도별 0.1~0.3sec의 계측 지연현상이 발생하는 것으로 확인되었다. 노출형 센서모듈에서 발생한 계측 지연시간의 비교결과 마찰저항이 제거된 센서모듈과 실험계획의 예상 실험결과는 크게 차이가 없는 것으로 나타났다.

Table 6 Analysis of measurement delay time for displacement control velocity

Displacement control velocity	Measurement delay time(sec)				Remarks (limit value)
	Detail "A"	Detail "B"	Detail "C"	Average	
0.12mm/min	0.1	0.3	-	0.2	(0.50)
1.20mm/min	-	-	-	-	(0.05)

표의 내용 중 (한계값)의 의미는 전동변위 제어속도에 대한 1µm의 정밀도가 측정되는 최대시간(sec)을 나타낸 것이다.

6. 결 론

본 연구의 최종 목표는 매립형 센서모듈을 이용하여 콘크리트 내부에서 발생하는 변형(률)을 측정하는 것이다. 이번 연구에서는 매립형 센서모듈의 제작을 위한 노출형 센서모듈을 통한 성능발현 가능성 실험이다.

센서모듈이 가지는 요구 성능을 만족하기 위하여 노출형 센서모듈에 대한 성능실험을 실시하였다. 실험방법은 변위 제어속도 0.12mm/min, 0.60mm/min, 1.20mm/min, 1.80mm/min을 4회 왕복 결과 변위 제어속도별 52.1sec, 9.1sec, 4.5sec, 2.6sec로 최대 19배의 차이로 측정지연 현상이 발생하였다.

측정 지연현상 원인 규명을 위한 실험은 ① 센서모듈 마찰 저항 실험 ② 광원장치의 변경실험 ③ 헤테로코어 중심코어 직경 확대 실험과 같이 3가지를 실시하였다.

측정 지연현상은 구조물의 실시간 변화 상태를 측정하지 못하는 경우로서 새로운 센서모듈이 실시간 측정이 가능한 센서모듈이 되기 위해서는 반드시 마찰이 제거되어야 한다.

측정 지연현상 원인 규명을 위한 실험결과 센서모듈의 마찰 저항이 측정 지연현상에 미치는 영향이 지배적으로 확인되었다. 마찰이 제거된 검증용 센서모듈을 이용하여 반복실험을 시행한 결과 변곡점 위치에서 측정 지연현상은 나타나지 않은 것으로 확인되었다. 이 연구결과는 향후 계획 중에 있는 매립형 센서모듈의 제작을 위한 기준으로 정립하는데 유용한 자료가 될 수 있을 것이다.

감사의 글

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

References

- Atsushi, S., Hisakazu, K., Toshinori, K., Mitsuhiro, I., Kazuhiro, W. (2007) A Hetero-core Structured Fiber Optic pH Sensor, *Analytica chim. Acta*, 582(1), pp.154~157.
- Bartoli, I., Phillips, R., di Scalea, F.L., Salamone, S., Coccia, S., Sikorsky, C.S. (2008) Load Monitoring in Multiwire Strands by Interwire Ultrasonic Measurements, *Proc. of SPIE*, 6932, 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.
- Glisic, B., Inaudi, D. (2008) *Fiber Optic Methods for Structural Health Monitoring*, John Wiley & Sons, Ltd., Chichester. p.276.
- Idriss, R.L. (2001) Monitoring of a High Performance Prestressed Concrete Bridge with Embedded Optical Fiber Sensors during Fabrication, Construction and Service, *10th Int. Conf. Struct. Faults & Repair*, London, England.
- Inaudi, D., Elamari, A., Pflug, L., Gisin, N., Breguet, J., Vurpillot, S. (1994) Low-Coherence Deformation Sensors for the Monitoring of Civil Engineering Structures, *Sensor & Actuators A*, 44(2), 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. (2010) A Basic Study on Development of the Hetero-core Type Fiber Optic Pressure Sensor, *Trans. Korea Fluid Power Syst. Soc.*, 7(2), pp.1~6.
- Ko, J.M., Ni, Y.Q. (2005) Technology Developments in Structural Health Monitoring of Large-Scale Bridges, *Eng. Struct.* 27(12), pp.1715~1725.
- Lee, J.H. (2015) Prestressed Concrete Strength Design and Limit State Design, *Dong Myeong Publisher*, 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.
- 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(1), 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, *SPIE*, 2294, pp.53~60.
- Michiko, N., Kazuhiro, W. (2016) Unconstrained Pulse Pressure Sensing for Health Management based on a Hetero-Core Fiber Optic Sensor, *Biomed. Opt. Express*. 7(9), pp.3675~3685.
- Park, E.T., Choi, K.S., Kim, T.Y., Lee, H.W.

(2018) Fundamental Experiment to Verify the Resolution of Hetero-core Fiber Optic Sensor for the Prestress Measurement. *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 31(5), pp.259~266.

Sumitro, S., Hida, K., Diouron, T.L. (2003) Structural Health Monitoring Paradigm for Concrete Structures, *28th Conference on Our World in*

Concrete & Structures, pp.525~532.

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

요 지

본 연구는 헤테로코어 광파이버 센서를 활용하여 콘크리트 내부에서 발생하는 변형률의 측정을 통해 콘크리트의 프리스트레스를 직접 평가할 수 있는 새로운 매립형 센서모듈 개발을 최종 목표로 하고 있다. 이를 위하여 노출형 센서모듈을 이용한 성능발현 실험결과는 가력속도 0.12, 1.80mm/min일 때 52.1, 2.6sec로 최대 약 19배의 계측 지연현상이 발생하였다. 계측 지연현상은 구조물의 실시간 변화 상태를 계측하지 못하는 경우로 실시간 계측이 가능한 센서모듈의 개발을 위해서 추가실험이 필요한 것으로 판단하였다. 계측 지연현상 원인규명 실험은 3가지의 실험을 계획하였으며, 실험결과는 마찰저항에 의한 계측 지연이 지배적으로 확인되었다. 마찰이 제거된 장치를 이용한 센서모듈의 실험결과에서는 계측 지연현상이 나타나지 않은 것으로 확인되었다.

핵심용어 : 헤테로코어, 광파이버 센서, 프리스트레스, 노출형 센서모듈, 계측 지연