

지하시설물 유지관리를 위한 부분탈피형 광섬유센서 패키지 및 모니터링시스템

Underground Structural Monitoring System with Fiber Optic Sensors Packages Using Partially Striped Optical Fiber

서기원* · 박권우** · 권형석*** · 조성규**** · 김기수*****

Ki-Won Seo, Kwon-Woo Park, Hyeong-Seok Kwon, Seong-Kyu Cho and Ki-Soo Kim

1. 서 론

시설물 안전 유지 관리 모니터링 시스템 구축 실현을 바탕으로 건설 산업의 고도화 추진 및 국가 경쟁력 향상을 위해 기술 집약적 산업으로 구조 개편이 가능하고, 대형 구조물과 터널 및 교량, 사면, 댐, 고층 건축물 등 구조물별 특화된 분야의 시공 및 안전 유지 관리 실시간 모니터링 시스템으로 활용하여, 삼풍백화점 및 성수대교 등의 구조물 붕괴에 의한 대형 참사를 미연에 방지할 수 있으며, 새로운 첨단 광섬유 센서를 이용한 계측 기술의 일반화와 국산화로 건설 품질 향상 및 구조물의 사용성을 극대화할 수 있다. 특히 광섬유 센서 및 측정 시스템의 국내 기술 부족으로 인해 대부분 외산 제품들에 의존했으나, 광섬유 센서 및 측정 시스템의 기술을 국산화함으로써 국내·외적으로 새로운 수요를 창출하고, 외산 광섬유 센서 및 측정 시스템을 대체하며, 이를 통한 수출에 의한 외화를 획득할 수 있다.

본 연구에서는 부분탈피형 광섬유 센서 제작기술 및 시작품을 활용하여 FBG 광섬유 간극수압계 시작품을 제작하였고, 이의 성능 테스트를 위하여, 압력교정장치(Portable Pressure Calibrator Series, DPI610)를 이용하여 압력 성능 테스트를 실시하였다.

실험결과 보여지는 데이터는 선형성이 좋고, 오차가 적어 간극수압계로 여러 가지 활용이 가능한 것으로 보여지며, 녹색성장사업의 추진에 따라 고속철도, 지하철, 경전철 등의 철도사업 등이 활발하게 이루어지는 시점에서 기존의 전기식 및 진동현식 센서를 이용한 계측 시스템의 단점을 보완가능하며, 고내구성과 고성능의 장점을 갖는 FBG 광섬유센서를 이용한 계측기기 시장이 확대가능한 상황이며, “4대강 살리기” 사업 및 댐 건설 사업과 관련된 다수의 현장에서 부식에 대한 영향을 최소화 할 수 있는 FBG 광섬유격자센서를 반영할 수 있을 것으로 보여진다. 특히 본 연구에서 수행한 경시변화 시험과 현장에서의 데이터를 고려해 볼 때 기존의 진동현식 및 전기식 센서를 대체하여 지하구조물의 계측관리가 적합한 센서인 것으로 판단된다.

2. 광섬유 FBG센서의 구성 및 작동원리

1) 광섬유의 구성

광섬유를 구성은 3개로 나뉘며, 코어(Core)와 클래딩(Cladding) 그리고 코어와 클래딩을 보호하는 피복 자켓(Jacket)으로 구분하며 그림 1과 같으며, 표 1과 같은 구성 물질로 구성되어 있다.

* 정희원 · (주)이제이텍 지반공학부 과장 · 공학석사 · E-mail: sskw12@hanmail.net
** 정희원 · (주)이제이텍 지반공학부 이사 · E-mail: kwonwoop@naver.com - 발표자
*** 정희원 · (주)이제이텍 지반공학부 전문 · 공학박사 · E-mail: kwonhs99@chol.com
**** 정희원 · (주)아이세스 센서기술부 이사 · 공학석사 · E-mail: black9162@hanmail.net
***** 정희원 · 홍익대학교 재료공학부 교수 · 공학박사 · E-mail: kisoo@hongik.ac.kr

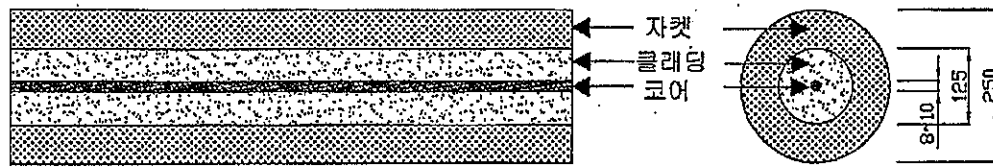


그림 1. 광섬유의 구성(단위 μm)

광섬유의 빛의 전달은 코어(Core)부와 클래딩(Cladding)부에서 이루어지며, 이를 구성하는 물질은 유리질이다. 빛(광)의 전송은 굴절률이 높은 유리질의 코어(Core)부를 통해 전달되며, 굴절률이 낮은 유리질의 클래딩(Cladding)부에서는 코어(Core)부로 전달되는 빛(광)의 손실을 막는 역할을 한다. 코어(Core)부와 클래딩(Cladding)부의 직경은 $125\mu\text{m}$ 의 크기로 매우 작으며, 외부에서 가해지는 충격에 약하기 때문에 폴리머(Polymer)또는 아크릴레이트(Acrylate)와 같은 피복 자켓(Jacket)을 이용하여 보호한다.

표 1. 광섬유의 구성 재료 및 물성

구분	구성 재료	직경(μm)	비고
코어(Core)	SiO_2 와 GeO_2	8~10	굴절률 높은 유리질
클래딩(Cladding)	SiO_2	125	굴절률 낮은 유리질
자켓(Jacket)	Polymer, Acrylate	250	코어 및 클래딩 보호

3. 광섬유센서 고정방법 및 패키징 방법

1) 부분탈피 후 광섬유격자센서의 고정방법

고정하기 위해 탈피(Strip)된 광섬유는 탈피하지 않은 광섬유에 비하여 강도가 떨어지기 때문에 변형이 발생하게 되면 쉽게 끊어질 수 있으며, 광섬유격자센서의 다양한 목적으로 사용하기 위한 패키지(Package) 제작할 때 다루기가 매우 어려워진다. 본 연구에서는 이를 보완하기 위해 다음의 그림 6과 같은 부분 탈피된 광섬유 보호용 고정자(Fixture)를 사용하게 되었다. 고정자의 모양이나 크기는 패키지의 형태 및 부착방법이나 실험체의 표면모양 및 용도에 따라 다양하게 제작하여 광섬유를 보호할 수 있다. 이러한 고정자를 사용하는 가장 큰 장점은 고정자에 광섬유격자센서를 고정 할 때 광섬유격자센서의 표면 코팅(Coating) 부분이 스트레인을 받아 미끄러짐(Slip) 현상을 방지할 수 있다.

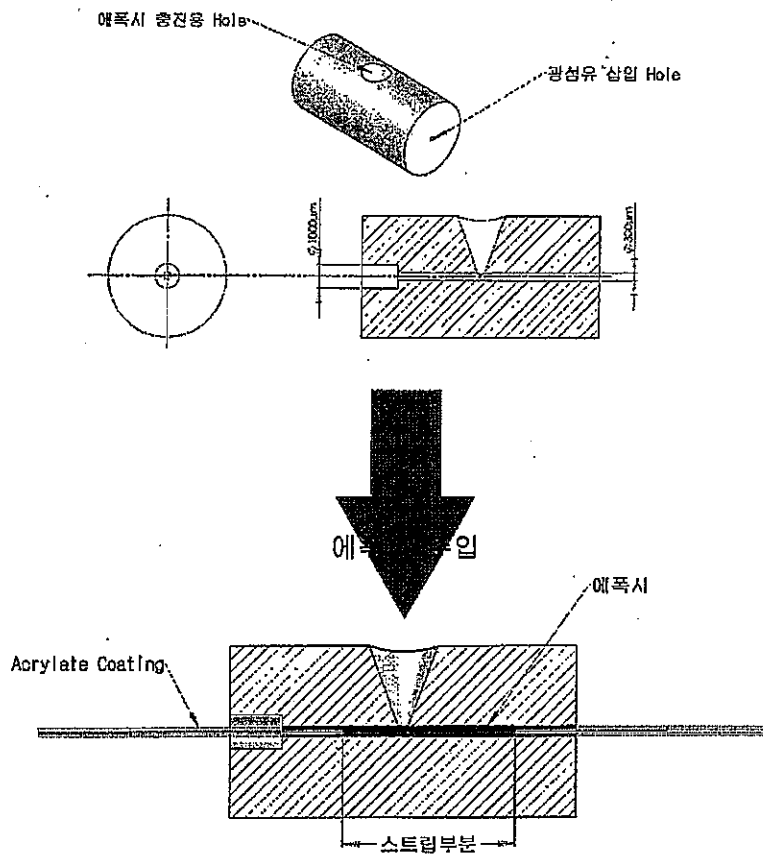


그림 2. 광섬유의 탈피 및 고정자(Fixture)에 접착

4. 간극수압계의 설계 및 제작

FBG 간극수압계의 설계시 중점 목표는 기존 간극수압계와 유사한 크기로 설계하는 것을 중점으로 두었다. 직렬연결이 가능한 FBG 광섬유센서의 장점을 살리기 위해서는 센서 패키지 내부에서 광섬유케이블을 돌려서 나올 수 있는 최소한의 3cm이상의 공간이 필요하다. 3cm 이하에서는 광량의 손실이 발생하여, 실효성이 없는 센서로 전락하게 되는 단점이 있다. 기존 계측기와 유사한 크기로 제작하기 위해 그림 3과 같이 도면을 만들어 센서 채널당 최대 2개(커플러 사용)하는 방안으로 설계를 하였다.

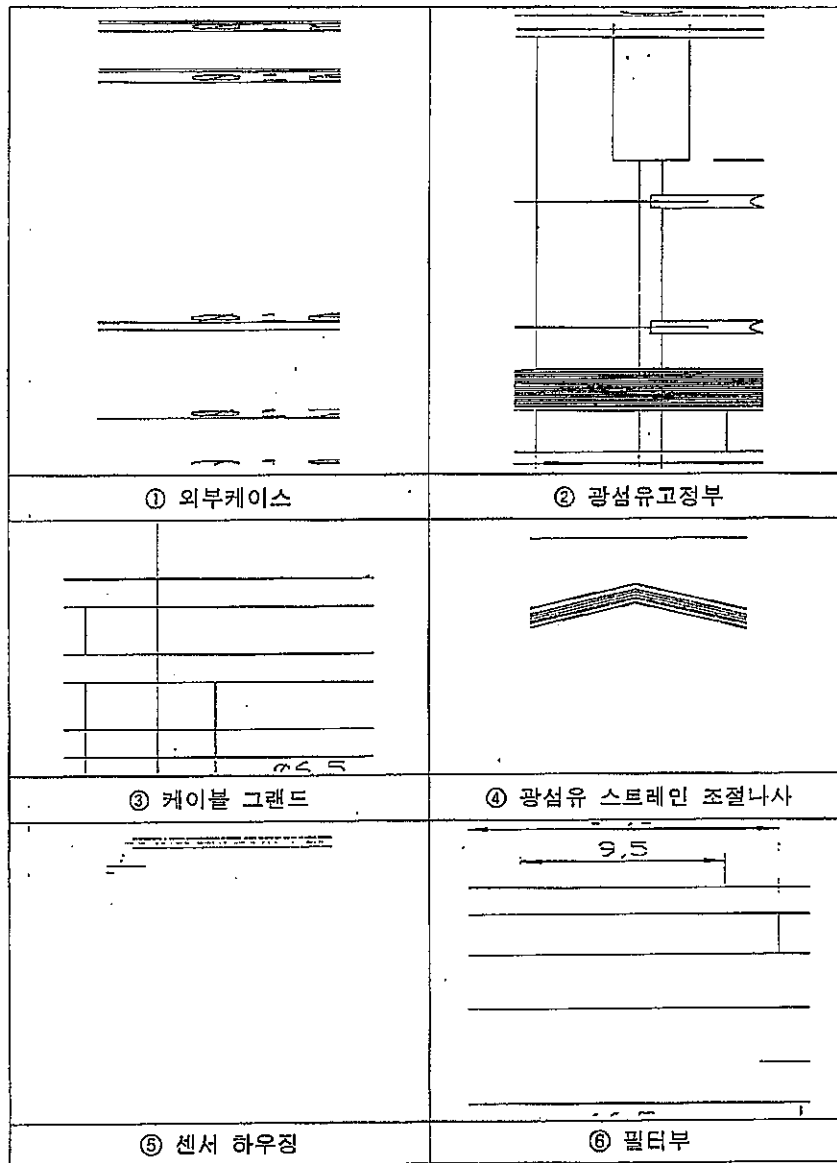


그림 3. 광섬유 간극 수압계의 설계

본 간극수압계 시작품은 크게 3가지 part로 구분되도록 하였다. 수압의 변화를 광섬유센서에 전달하는 다이어프램 part와 광섬유센서를 고정하여 프리스트레인이 가능하도록 하는 센서고정부 및 이를 보호하는 외부 케이스로 구분할 수 있으며, 만들어진 시작품의 다음과 같은 사양을 갖는다.

- 측정범위 : 150psi
- 분해능 : 0.01% F.S
- 정확도 : 0.05% F.S
- 동작온도 : -20℃ ~ 80℃
- 내장온도센서 : FBG Optic Sensor
- 패키지 재질 : 특수 스테인리스 강재
- 적용 필터 : 스테인리스 소결필터(50 μ m)

다음은 상기와 같은 사양을 갖도록 제작된 FBG 간극수압계의 시작품의 형상과 모양이다.

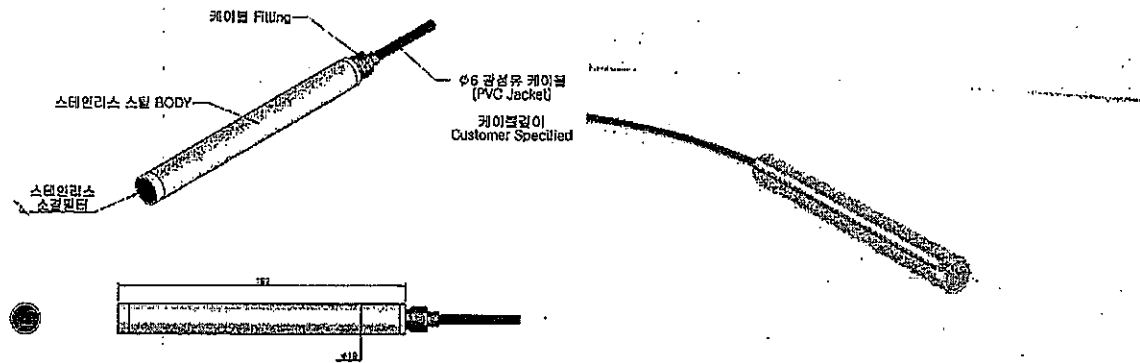


그림 4. 광섬유 간극 수압계 시작품

5. FBG 간극수압계의 Calibration

FBG 간극수압계는 수압을 측정하기 위한 센서로서, 간극수압계 내부에는 2개의 FBG 센서로 구성되어 있다.

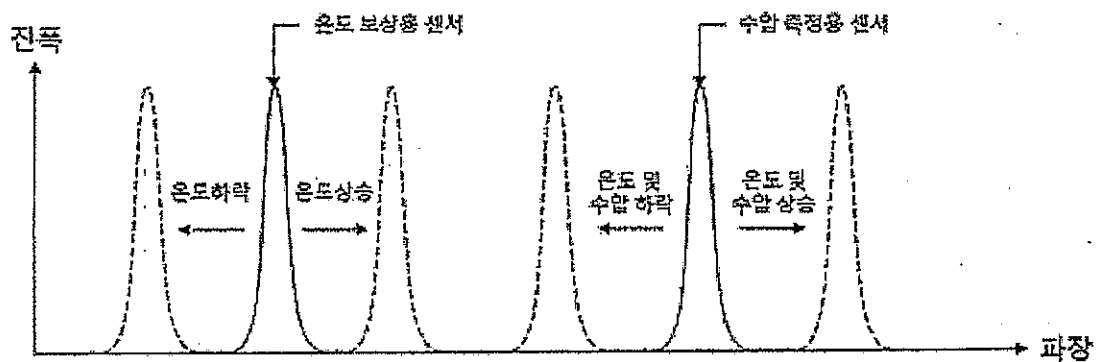


그림 6. 간극 수압계의 온도와 수압에 따른 파장 변화

간극수압계의 수압 측정용 센서는 수압의 변화에 의해서도 파장값이 변화하지만, 온도의 변화로도 파장값이 변화하기 때문에, 정확한 수압 측정을 위해, 온도보상용 센서를 추가하여, 수압 측정 센서의 변화폭에, 온도보상용 센서의 변화폭을 빼주어, 순수 수압 변화만을 측정한다. 간극수압계실험은, 공압측정으로 진행하며, 경시변화는 실제 수조에 물을넣어, 수압으로 측정하게 된다. 공압에 의하여 측정된 데이터의 예를 보면 다음과 같다.

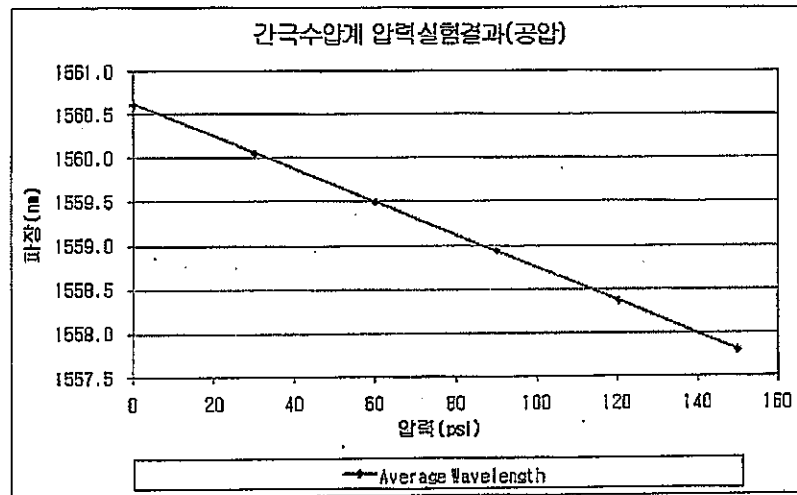


그림 7. 공압에 의하여 측정된 간극수압계의 성능시험 데이터

FBG간극수압계의 경시 변화를 관찰하기 위해, 준비한 간극수압 측정용 수조에 물을 넣은 후, FBG 간극수압계를 살짝 담가서, 하루 동안 수침시킨 후 FBG간극수압계를 아래와 같이 설치하여 약 데이터를 관찰하고, 데이터의 변화폭이 거의 없을 때, 약 1시간 정도 데이터를 저장하여 평균화한다. 수조 안에서 FBG간극수압계를 필요한 깊이만큼 내린 후, 3일 동안 경시 변화를 관찰한다. 이때, 0 수압은 공압 실험에서 얻어진 데이터를 기준으로 하였다. 데이터의 측정 시간은 약 1시간 단위로 하였으며, 데이터를 수압 변환공식에 넣어 들어간 깊이가 지속적으로 나오는지 확인하였다.

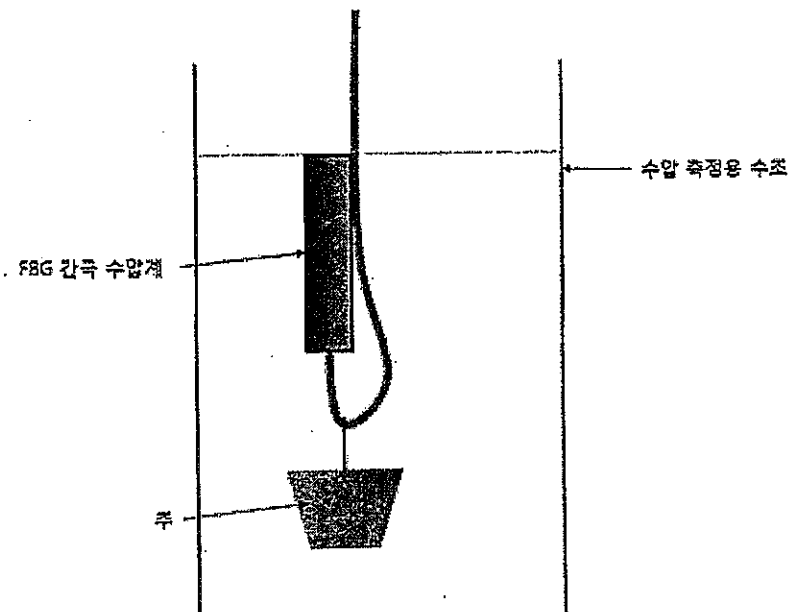


그림 9. 간극수압계 경시변화 측정을 위한 모식도

현재 시험 중인 간극수압계의 경시변화 테스트 데이터의 한 예를 보면 다음과 같다.

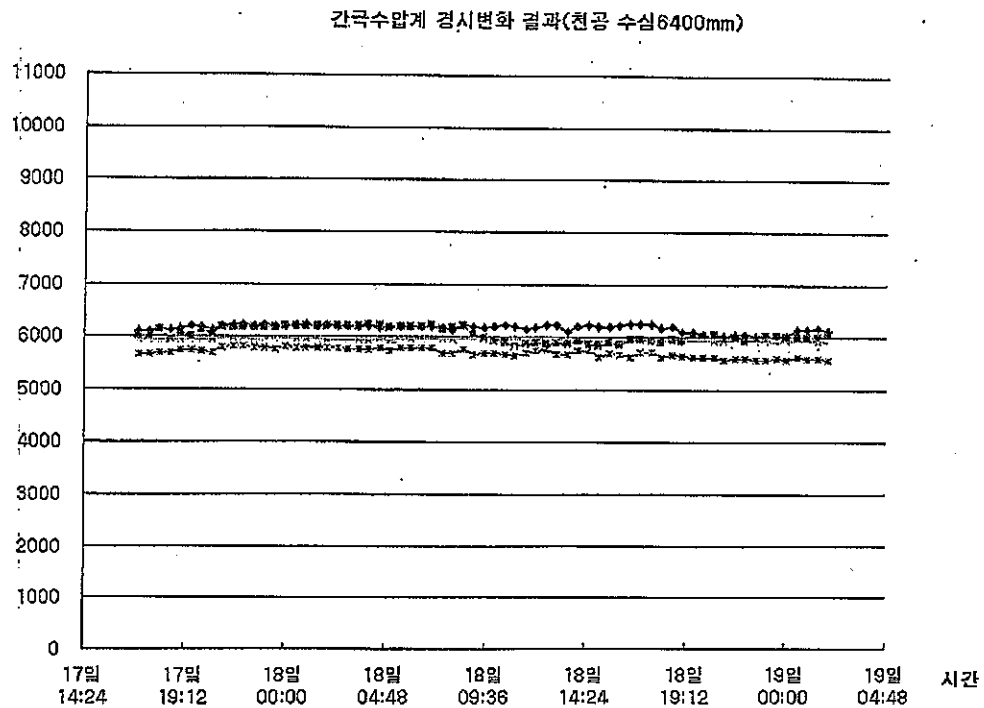


그림 10. 광섬유간극수압계의 경시변화 시험 데이터 예

이 실험에서는 검수를 위하여 간이 시험방법으로 내경이 10cm 가량이고, 길이가 8m 정도 되는 PVC관을 건물에 붙여서 세우고, 물을 채운 후 6m 정도의 깊이에 간극 수압계 5개를 동시에 넣어서 약 3일간량의 경시변화를 보았다. 데이터는 안정적으로 유지되는 것이 보였다. 갑자기 태양이 내려 쬔다던가 혹은 비가 온다던가 하여 온도가 급하게 변하는 경우에는 간혹 데이터가 튀는 경우가 발생하기도 하는데, 이는 간극수압계 내부의 온도 보정용 FBG 부분의 열전도도가 측정용 센서와 상이하여 일시적으로 나타나는 현상이고 온도가 안정이 되면 다시 원위치로 복귀하기 때문에 쉽게 안정화 되는 것을 확인할 수 있으며, 현장의 물속이나 땅속에서는 급속한 온도상승과 하강은 있을 수 없으므로 현장에서는 급격한 온도변화에 따른 데이터 흔들림 현상은 나타나지 않는다.

이 광섬유센서 간극 수압계의 다른 예로 최근 현장의 보에 설치한 후 몇 달간의 데이터를 관찰하였는데 그 데이터를 보면 다음과 같다.

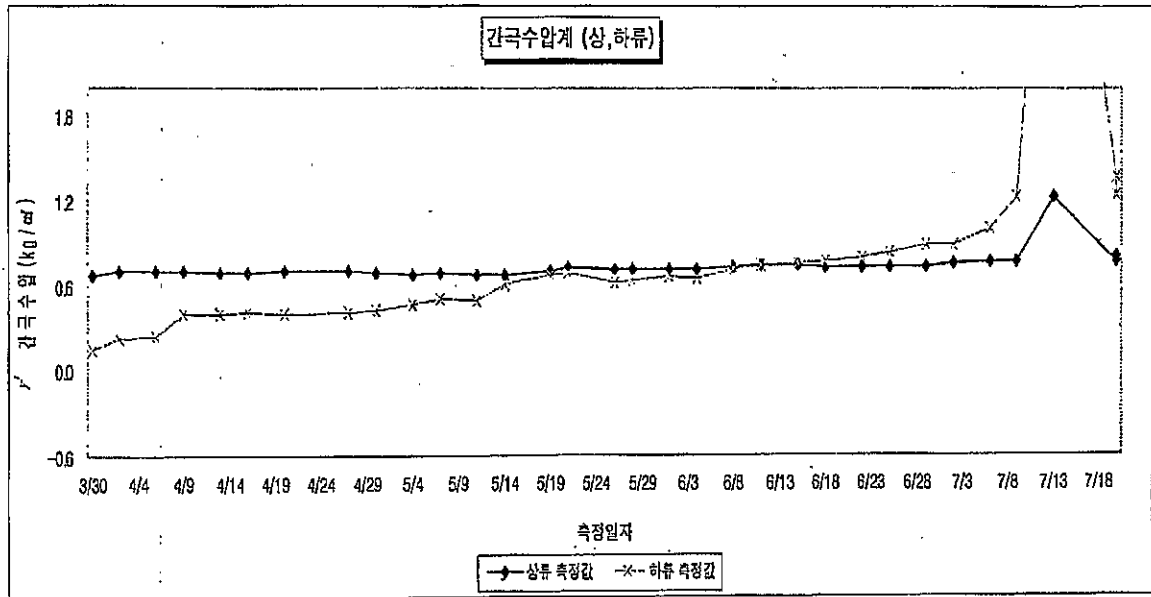


Fig. 11. 현장에 설치된 광섬유 간극수압계 데이터의 예

이 그림에서 보이고 있는 데이터를 살펴보면, 안정적으로 몇 달에 걸쳐서 데이터가 잘 나오고 있고, 특이할 만한 사실은 담수가 있었던 시기에 수압이 크게 증가했다가, 다시 감소하여 제자리로 돌아오고 있다는 것이다.

여기에 시공된 센서는 건설신기술 제 575호 "부분탈피하여 고정된 프리스트레인 가변형 광섬유격자센서 지하시설물 변위모니터링시스템"과 동일한 방법으로 부착하여 프리스트레인을 가한 광섬유센서로 슬립현상이 나타나지 않아, 오랜 시간이 경과한 후에도 경시변화가 없이 항상 원래 값으로 돌아갈 수 있는 센서로 댐 등의 중요구조물에는 반드시 이러한 광섬유센서를 사용하여야 할 것으로 보여진다.

6. 결 론

부분탈피하여 고정하고 프리스트레인을 부가한 광섬유격자센서, 간극수압계를 제작하여 시험하였고, 현장에 설치하였으며, 이를 통하여 지하시설물 현장의 시공 중 계측 및 시공 후 유지관리 계측이 가능한 기술임을 보여 주었다.

광섬유 케이블의 유리섬유부분(코어와 클래딩)을 보호하는 제킷과 코팅(Coating)을 탈피하여 광섬유의 클래딩 부분을 별도의 고정구에 직접 부착하는 방식으로 고정하여, 변형발생시 광케이블을 구성하는 재료들 사이에서 발생하는 미끄러짐(Slip)현상을 방지하고, 외력에 의해 발생하는 변형을 정확하게 측정이 가능하도록 하였으며 현장에 설치하여 데이터를 살펴보았는데, 안정적으로 몇 달에 걸쳐서 데이터가 잘 나오고 있고, 특이할 만한 사실은 담수가 있었던 시기에 수압이 크게 증가했다가, 다시 감소하여 제자리로 돌아오고 있는 것을 보이고 있다.

이와 같이 광섬유센서는 오랜 시간이 경과한 후에도 경시변화가 없이 항상 원래 값으로 돌아갈 수 있는 센서로 댐과 보 등의 중요구조물의 유지관리에는 반드시 이러한 광섬유센서를 사용하여야 할 것으로 보여진다.

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원에서 지원하는 「'09년도 R&D 정책인프라 사업」의 “터널 계측용 광섬유센서 및 모니터링 시스템 사업화”의 연구결과로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Andreas Othonos and Kyriacos Kalli, (1999) "Fiber Bragg Gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing", *Artech House*.
2. K. P. Koo and A. D. Kersey, (1995) "Bragg Grating-Based Laser Sensors Systems with Interferometric Interrogation and Wavelength Division Multiplexing", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 13, NO. 7, pp. 1243-1248.
3. "Mine operating accurate stability control with Optical Fiber Sensing and Bragg Grating Technology" *Journal of Lightwave Technology*, (1995) Vol. 13, NO. 7, pp. 1303-1311.
4. A. D. Kersey, K. P. Koo and M. A. Davis, (1994) "Fiber Optic Bragg Grating Laser Sensors", *SPIE*, Vol. 2292 *Fiber Optic and Laser Sensors XII*, pp. 102-112.
5. W. W. Morey, J.R. Dunphy, and G. Meltz, (1994) "Multiplexing Fiber Bragg Grating Sensor", *SPIE*, Vol. 1586, Paper #22, Boston, pp. 216-224.
6. Kim, K. S., L. Kollar and G. S. Springer, (1993) "A Model of Embedded Fiber Optic Fabry-Perot Temperature and Strain Sensors", *J. of Composite Materials* Vol. 27, pp. 1618-1662.
7. A. D. Kersey, T. A. Berkoff and W. W. Morey, (1992) "High-Resolution Fiber-Grating Based Strain Sensor with Interferometric Wavelength-Shift Detection", *ELECTRONICS LETTERS*, 30th, Vol. 28, No. 3, pp. 516-518.
8. Kim, K. S., M. Breslauer and G. S. Springer, (1992) "The Effect of Embedded Sensor on the Strength of Composite Laminates" *J. of Reinforced Plast and Comp*, Vol. 2, pp. 949-958.
9. (주)아이세스, (주)이제이텍, (주)대우건설, (2009) "부분탈피하여 고정된 프리스트레인 가변형 광섬유격자센서 지하시설물 변위모니터링시스템" *NeT 건설신기술* 제 575호