

부분탈피형 FBG 간극수압계를 이용한 지하시설물 모니터링시스템 Underground Structural Monitoring System with FBG Piezometer using Partially Striped Optical Fiber

노원석¹⁾, Won-Seok Noh, 권형석²⁾, Hyeong-Seok Kwon, 서기원³⁾, Ki-won Seo, 김기수⁴⁾, Ki-Soo Kim

¹⁾ (주)이제이텍 계측사업부 이사, Instrumentation Planning Department Director, EJtech Co., Ltd

²⁾ (주)이제이텍 계측사업부 전무이사, Instrumentation Planning Department Executive Managing Director, EJtech Co., Ltd

³⁾ (주)이제이텍 계측사업부 과장, Instrumentation Planning Department Sectional Chief Engineer, EJtech Co., Ltd

⁴⁾ 홍익대학교 재료공학부 교수, Professor, School of Materials Engineering, Univ. of Hongik

SYNOPSIS : FBG fiber-optic sensor, which has excellent durability against corrosion, can be used for the long-term monitoring system on structure. The technology of FBG fiber-optic sensor come to the fore to monitor on large-scale structures, tunnels, dams, bridges, slopes, high-rise buildings, and etc for their lifetimes by one-time installation. FBG piezometer has been developed by domestic design, manufacture, and test for localization of FBG fiber-optic sensor. Pressure performance test was carried out with portable pressure calibrator(DPI610) and field application test was performed. Result of tests show that it can be replaced for electric or vibrating wire piezometer and also can be used for a variety of applications due to good linearity and small error.

Keywords : FBG Sensor, Partial Striped, FBG Piezometer, Measurement, High Durability

1. 서 론

첨단 계측기술로 대두되고 있는 FBG 광섬유센서는 계측기 및 측정 시스템의 국내 기술 부족으로 인해 대부분 외산 제품들에 의존했으나, FBG 광섬유를 이용한 계측기 및 측정 시스템의 기술을 국산화함으로써 국내·외적으로 새로운 수요를 창출하고 외산 광섬유 센서 및 측정 시스템을 대체하며, 이를 통한 수출에 의한 외화를 획득할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 부분탈피형 FBG광섬유센서 제작기술의 적용을 통하여 FBG 광섬유 간극수압계 시제품 설계 및 제작을 하였고, 실내실험의 수행을 통해 부분탈피형 FBG 간극수압계의 현장 적용이 가능한 수준까지 개발하였다.

개발된 FBG 간극수압계의 실내실험 및 현장 측정 데이터는 선형성이 좋고, 오차가 적어 터널, 댐, 연약지반 등과 같은 분야에 사용이 가능한 기술로 여겨진다. 녹색성장사업의 추진에 따라 고속철도, 지하철, 경전철 등의 철도사업 등이 활발하게 이루어지는 시점에서 기존의 전기식 및 진동현식 센서를 이용한 계측 시스템의 단점을 보완가능하며, 고내구성을 갖는 FBG 광섬유센서를 이용한 계측기기 시장이 확대가능한 상황이며, “4대강 살리기” 사업, 댐, 터널 건설 사업과 관련된 현장에서 부식에 대한 영향을 최소화 할 수 있는 FBG 간극수압계를 반영할 수 있을 것으로 판단된다.

특히 본 연구에서 수행한 경시변화 시험과 현장에서의 데이터를 고려해 볼 때 기존의 진동현식 및 전기식 센서를 대체하여 지하구조물의 제측관리가 적합한 센서인 것으로 판단된다.

2. FBG 광섬유센서의 구성 및 원리

2.1 광섬유센서의 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.

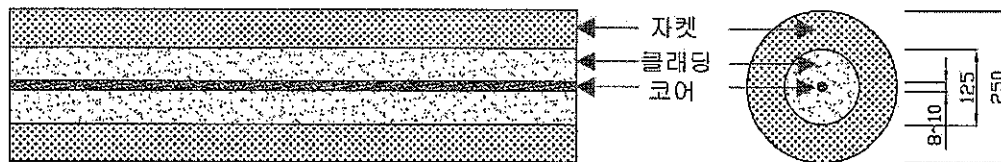


그림 1. 광섬유의 구성(단위 μm)

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

2.2 FBG 광섬유센서 원리

광섬유격자센서(FBG센서)는 Ge가 첨가된 광섬유 코어(Core)에 자외선 영역의 레이저를 주기적으로 조사함으로써 굴절률 변화를 유도하여 격자(Grating)를 생성하며, 이 격자의 간격에 의해 결정되는 특정 파장의 빛을 반사시키는 광소자이다. 그림 2는 FBG의 구조를 나타낸다. 광대역의 스펙트럼을 광섬유에 입사시킬 경우, 아래에 주어진 식(1)과 같은 조건식에 만족하는 파장 성분이 광섬유 격자(Grating)에서 반사되며, 나머지 파장 성분은 그대로 통과하여 광 스펙트럼 분석기에 나타난다.

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (1)$$

위의 식(1)에서 n 은 광섬유 코어의 유효 굴절률(Effective Refractive Index)이며, Λ 는 격자(Grating)와 격자(Grating) 사이의 간격(Grating Period)이다.

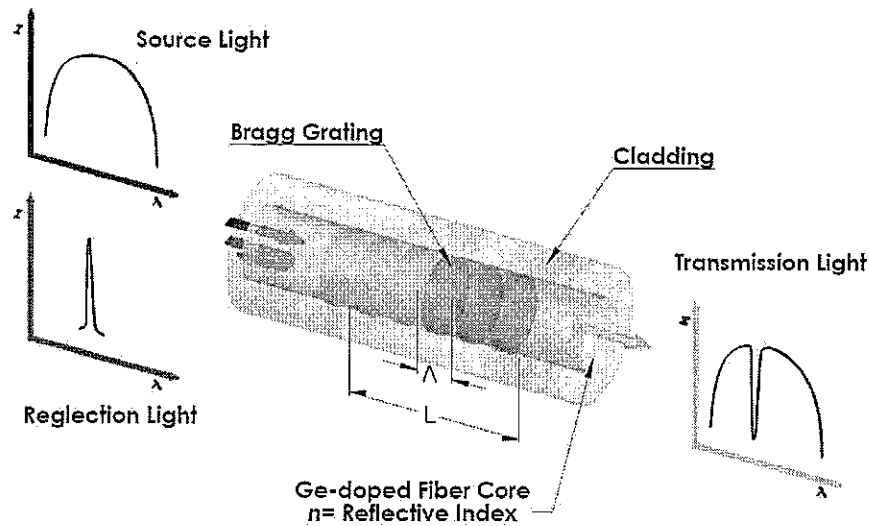


그림 2. 광섬유격자센서(FBG센서)의 원리

격자(Grating)에서 반사되는 브래그(Bragg) 파장은 위의 식(1)과 같이 유효 굴절률과 격자(Grating)간격의 함수이며, 광섬유격자(FBG)에 온도나 압력 등의 외부 물리량을 인가할 경우 브래그(Bragg) 파장이 달라진다. 그러므로 브래그(Bragg) 파장의 변화를 측정한다면 FBG에 가해진 물리량을 구할 수 있다. 변형률(Strain) 변화에 대한 브래그(Bragg) 중심 파장의 변화는 아래의 식 (2)와 같으며,

$$\Delta \lambda_B = \lambda_B (1 - P_e) \epsilon \quad (2)$$

위의 식(2)에서 P_e 는 광탄성 상수(Photo-elastic Constant)이며, 주로 사용되는 게르마늄 실리카 유리(Germano-silicate Glass)의 경우 대략 0.22 의 값을 가지며, ϵ 은 광섬유격자(Grating)에 가해진 변형률(Strain)이다.

2.3 부분탈피 후 광섬유격자센서의 고정방법

아크릴레이트 코팅이 된 광섬유에 장력을 인가하고 접착을 시키면, 부재간의 미끄러짐 현상이 발생하여 측정데이터에 영향을 미치게 된다. 이를 방지하기 위하여 아크릴레이트 코팅을 부분적으로 탈피(Strip)시켜 고정시켜야 한다. 탈피된 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 어려워지기 때문에 그림 3과 같은 부분 탈피된 광섬유 보호용 고정자(Fixture)를 사용하여 충격에 대하여 광섬유를 보호한다. 이러한 고정자를 사용하는 가장 큰 장점은 고정자에 광섬유격자센서를 고정 할 때 광섬유격자센서의 표면 코팅(Coating) 부분이 스트레인을 받아 미끄러짐(Slip) 현상을 방지할 수 있다.

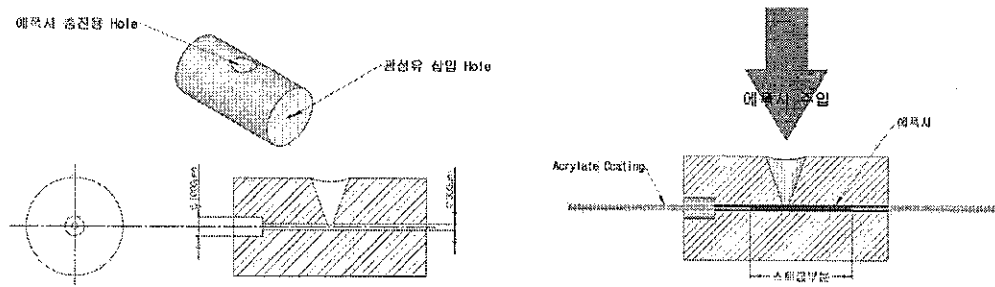


그림 3. 광섬유의 탈피 및 고정자(Fixture)에 접착

3. FBG 간극수압계 시작품 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 $\Phi 30\text{mm}$ 이상의 공간이 필요하다. $\Phi 30\text{mm}$ 이하에서는 광량의 손실이 발생하여, 실효성이 없는 센서로 전락하게 되는 단점이 있다. 개발품은 기존 V/W 간극수압계와 유사한 크기로 제작하였으며, 커플러를 사용하여 FBG 데이터로거의 채널당 최대 2개의 FBG 간극수압계를 연결하는 방안으로 설계하였다.

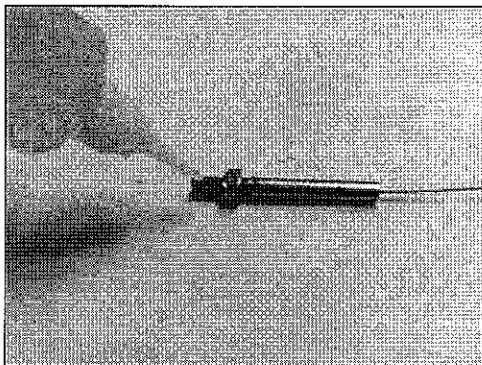


그림 4. FBG 간극수압계 온도센서 고정

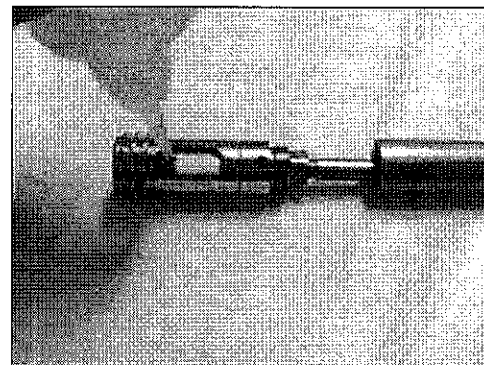


그림 5. FBG 간극수압계 압력센서 고정

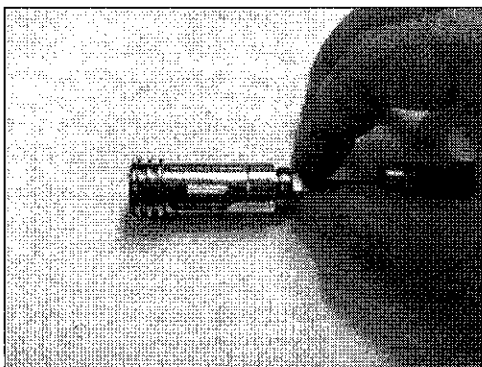


그림 6. 프리스트레인 인가

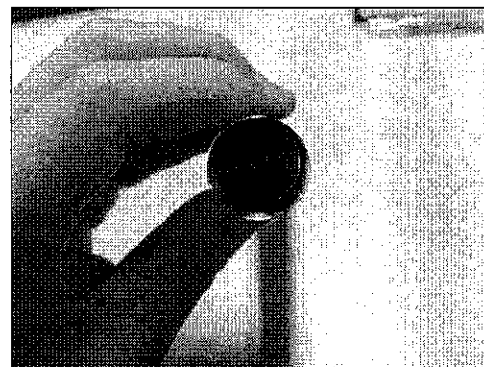


그림 7. 다이어프램 조립 완료

FBG 간극수압계는 크게 3가지 part로 구분된다. 수압의 변화를 FBG 광섬유센서에 전달하는 다이어프램 part와 광섬유센서를 고정하여 프리스트레인이 가능하도록 하는 센서고정부 및 이를 보호하는 외부 케이스로 구분되며, 시작품의 사양은 다음 표 2와 같으며 완성된 FBG 간극수압계는 그림 8과 같다.

표 2. 광섬유의 구성 재료 및 물성

항목	사양	비고
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)	

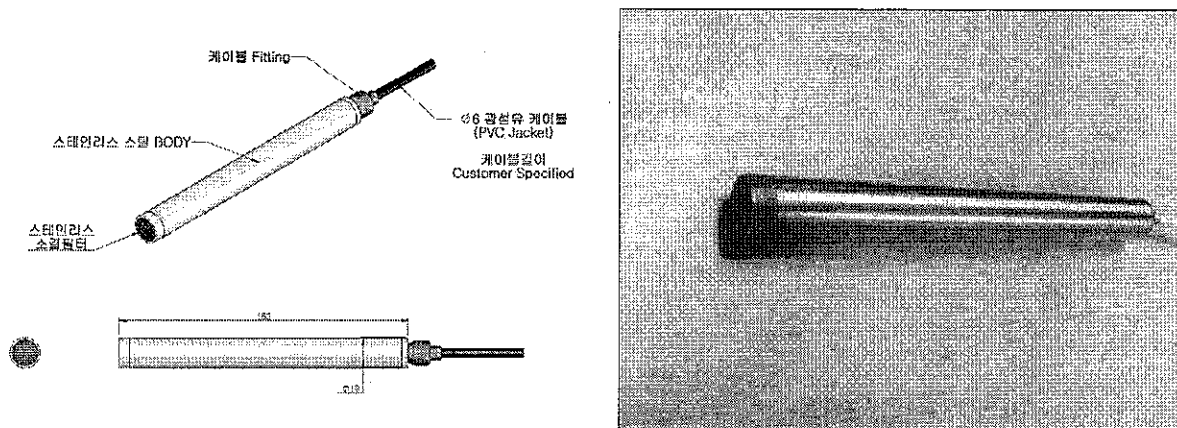


그림 8. FBG 간극수압계 시작품(완성)

4. FBG 간극수압계의 보정(Calibration)

간극수압계는 지반의 수압변화를 측정하는 계측기로써, 지중의 온도변화에 의한 다이어프램의 수축 또는 팽창이 발생할 수 있으며, FBG 센서 소자 자체가 온도에 영향을 받아 수축 또는 팽창할 수 있는 여건이 존재한다. 개발된 FBG 간극수압계의 센싱 부에는 수압측정용 압력센서와 온도 보상용 센서가 구비되어 있어, 지중의 온도변화에 따른 영향을 정밀하게 보상할 수 있다. 그림 9와 같이 온도 수압 측정 센서의 변화폭에, 온도보상용 센서의 변화폭을 빼주어, 순수 수압 변화만을 측정한다.

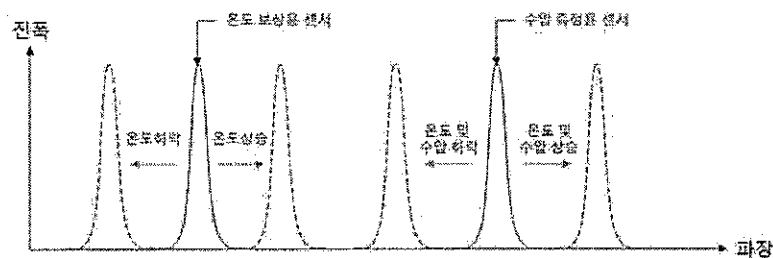


그림 9. 간극 수압계의 온도와 수압에 따른 파장 변화

일반적인 금속재료는 열처리 정도에 따라 열팽창계수가 변화하는 특성을 가지고 있다. 지중에 5m를 천공하여 다이아프램을 열처리한 FBG 간극수압계와 실시하지 않은 경우의 FBG 간극수압계의 시간 경과에 따른 수위 변화를 측정하였다. 열처리를 실시한 경우는 수위의 변동폭이 0.2m 이내에서 측정이 되었으며, 열처리를 실시하지 않은 경우는 변동폭이 0.4m 이내의 범위 인 것으로 나타났다. 이는 열처리를 실시하여 원재료(SUS 630)의 형질을 개선을 통해 다이아프램이 온도에 영향을 적게 받는 것으로 판단된다. 이에 따라 간극수압계의 다이아프램은 열처리를 통해 열적특성을 강화하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

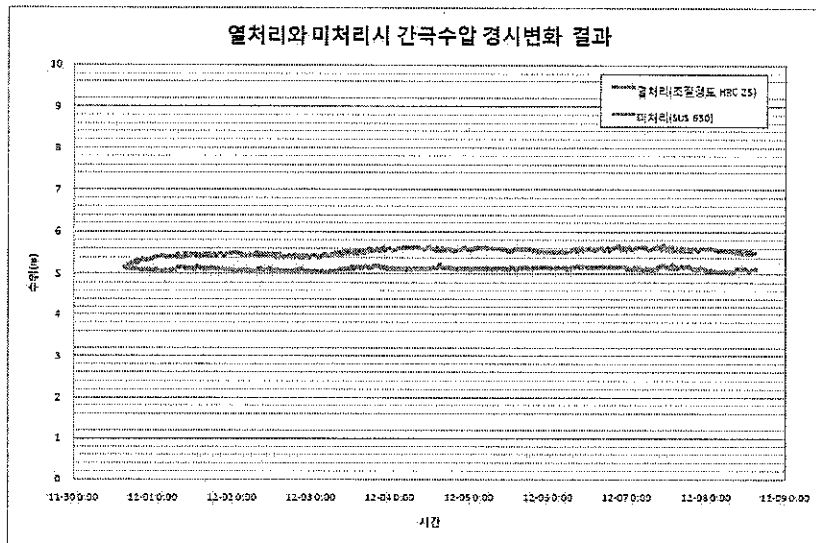


그림 10. 다이아프램의 열처리 유무에 따른 간극수압의 경시변화

5. 현장 비교 실험 결과

일정한 압력하에서의 온도변화에 따른 온도보정계수는 반복적인 실험을 통해 도출이 가능하다. 그러나 압력의 변화와 함께 온도의 변화를 동시에 측정하기 위한 실내시험이 어렵기 때문에 현장 설치 실험을 통해 그 추세를 확인이 가능하다. 계측관리를 수행중인 건설공사 현장에 지하에 천공을 실시하여 FBG 간극수압계 시작품과 V/W Type의 간극수압계를 천공심도에 따른 간극수압 측정치를 비교하는 실험을 실시하였다. 실험의 실험요인은 다음 표 3과 같다.

표 3. 현장 비교 실험 결과

실험 요인	세부사항	비교
종류별 간극수압계	- FBG 간극수압계	1번, 2번 홀
	- V/W 간극수압계	1번, 2번 홀
천공 심도	- 6.4m	1번 홀
	- 7.0m	2번 홀
실험 시간	- 2010/09/15 23시05분 ~ 2010/09/16 13시 52분	10시간 47분

FBG 간극수압계의 현장 적용성 평가를 위하여 기존 V/W 형식의 간극수압계와 비교실험을 실시하였다. 천공심도는 6.4m와 7.0m이며 각각의 홀에 FBG 간극수압계와 V/W형식의 간극수압계를 동일한 심도에 설치함을 통하여 센서의 신뢰성을 평가하였다. 간극수압계는 안정화가 필요하기 때문에 24시간동안 천공홀에 방치한 후에 측정을 실시하였다.

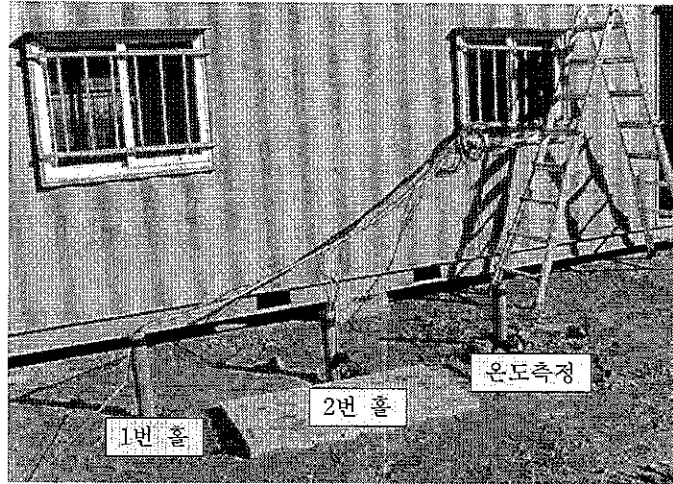


그림 11. 간극수압계 비교실험 측정 사진

천공깊이 6.4m에서의 간극수압계의 측정결과를 살펴보면(그림 12 참조), 기존 V/W 간극수압계의 경우 수압이 약 8,000mm H₂O로 측정되었으며, 최대 약 8,600mm H₂O의 수압이 측정되었다. 천공깊이가 6.4m이므로 최대 1,600mm H₂O의 수압의 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 이에 반하여 FBG 광섬유 간극수압계의 경우 초기 측정값이 약 6,000mm H₂O로 측정이 되고 있으며 5,800~6,200mm H₂O의 범위에서 수압이 나타나고 있음을 나타내었다.

기존의 V/W 간극수압계의 경우는 측정기간 동안 초기측정치에 비하여 600mm H₂O의 수두차이를 보이고 있는 것에 비하여, FBG 간극수압계는 최대 200mm H₂O의 수두차이를 나타내고 있으나 평균적으로 100mm H₂O의 수두차이를 나타내고 있어 온도보정계수의 적용이 적절한 것으로 판단된다.

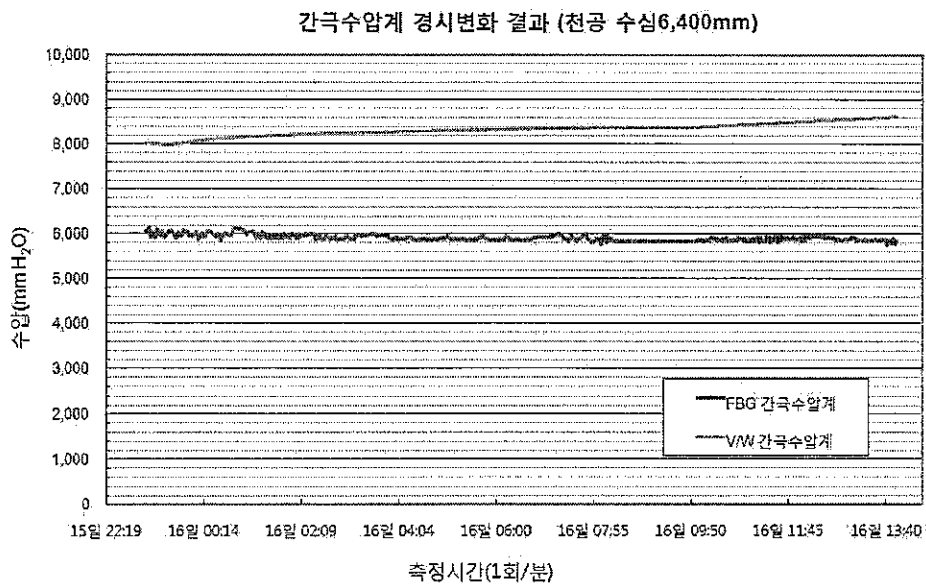


그림 12. 천공깊이 6.4m에서의 간극수압 측정결과

천공깊이 7.0m에서의 간극수압계의 측정결과를 살펴보면(그림 13 참조), 기존 V/W 간극수압계의 경우 초기 수압이 약 9,000mm H₂O로 측정되었으며, 최대 약 9,800mm H₂O의 수압이 측정되었다. 측정시간이 경과함에 따라 측정되는 수두고가 증가하고 있어, 신뢰성이 떨어지는 계측기로 판단된다. 천공깊이가 7.0m이므로 최대 2,800mm H₂O의 수압의 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 이에 반하여 FBG 광

섬유 간극수압계의 경우 초기 측정값이 약 7,000mm H₂O로 측정이 되고 있으며 7,000 ~ 7,200mm H₂O의 범위에서 수압을 나타내었다.

기존의 V/W 간극수압계의 경우는 측정기간 동안 초기측정치에 비하여 800mm H₂O의 수두차이를 보이고 있는 것에 비하여, FBG 간극수압계는 최대 200mm H₂O의 수두차이를 나타내고 있으나 평균적으로 100mm H₂O의 수두차이를 나타내고 있어, 온도보정계수의 적용이 적절한 것으로 판단된다.

이와 같은 실험결과를 종합한 결과, 수온의 변화에 따른 온도보정계수를 적용하기 위한 실내온도평가 시험이 적절한 것으로 판단된다.

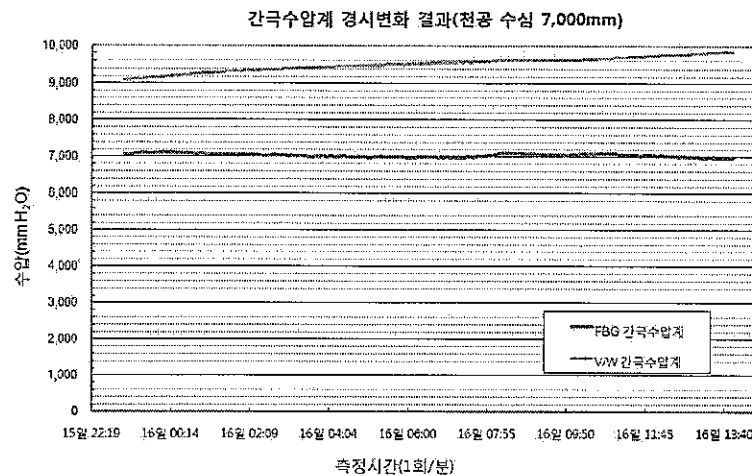


그림 13. 천공깊이 7.0m에서의 간극수압 측정결과

다음 그림 14는 ○○살리기 건설현장에 투입된 FBG 간극수압계의 측정 결과를 나타낸다. 상류측에 설치된 계측기의 설치고와 하류측에 설치된 계측기의 설치고의 차이가 2m 정도로 설치되었다. 초기에 설치된 값을 초기치로 설정한 후에 누적변화량을 그래프로 표현하였고, 수위가 증가함에 따라 상부측과 하부측간의 수위고 차이가 발생하여 간극수압의 차이가 발생하고 있는 것으로 판단된다.

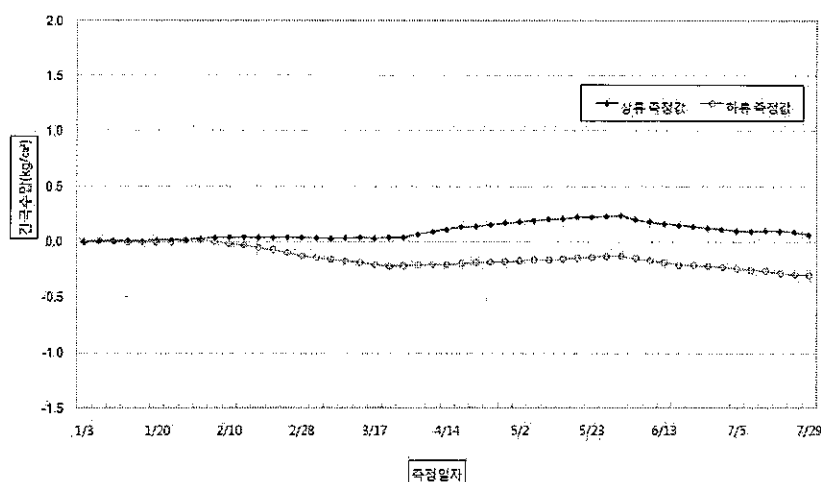


그림 14. FBG 간극수압계 ○○살리기 현장 측정 결과

설치후 경과시간이 약 7개월 이상 지났음에도 측정데이터가 양호하게 나타나고 있으며, 계절의 변화에 의한 온도에 영향을 받지 않는 것으로 판단된다. 이 결과를 바탕으로 연구수행을 통하여 개발된 FBG 간극수압계는 성능이 확보되고 현장 적용의 가능성이 매우 높은 기술인 것으로 판단된다.

6. 결 론

부분탈피하여 고정하고 프리스트레인을 부가한 FBG 간극수압계의 시제품을 제작하여 실내 실험 및 현장 실험을 실시하였고, 이를 통하여 지하시설물 현장의 시공 중 계측 및 유지관리 계측이 가능한 기술임을 보여 주었다.

광섬유 케이블의 유리섬유부분(코어와 클래딩)을 보호하는 재킷과 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 하였다. 특히 온도변화에 영향을 최소화할 수 있도록 온도보상에 중점을 두고 FBG 간극수압계를 개발하였다. 현장 실험 및 적용현장의 계측데이터의 분석을 실시한 결과, 기존 V/W 간극수압계에 비하여 정확도 및 정밀성을 나타내었다. 장기간에 걸쳐 현장에 설치된 측정데이터는 안정적으로 측정되고 있는 것으로 나타났다.

이와 같이 연구수행을 통해 개발된 FBG 광섬유센서는 부식에 대한 내구성능이 매우 뛰어나므로 터널의 배면지반의 간극수압의 측정, 댐의 원지반 안정성 평가, 연약지반의 간극수압을 측정하는 계측기로 적합한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원에서 지원하는 『'09년도 R&D 정책인프라 사업』의 “터널 계측용 광섬유센서 및 모니터링 시스템 사업화”의 연구의 일환으로 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 광섬유 격자센서 지하시설물 변위모니터링시스템" NeT 건설신기술 제 575호.