

# 토조모형을 이용한 광섬유 센서 성능 시험

## Performance Test of Optical Fiber Sensors Using Embankment Pool Model

박경원\*, 황의호\*\*, 이광만\*\*\*

Kyoung Won Park, Eui Ho Hwang, Gwang Man Lee

### 요 지

제방붕괴에 따른 피해발생을 억제하기 위해서는 제방거동 특성을 사전에 충분한 정보를 통하여 파악할 필요가 있으며, 이를 위해 광섬유를 이용한 제방누수감지 센서를 개발하였다. 광섬유는 내구성 및 유지관리가 우수하고 장기간 사용에도 장점을 가지고 있다. 개발된 센서들은 현장에 적용하기 전에 충분한 실험을 통해 성능과 기능에 대한 검토가 필요하다. 본 연구에서는 개발된 광섬유 센서를 대상으로 제방누수감지 목적으로 설치할 경우 센서의 이행도를 시험하였다. 시험방법은 토조를 설치하여 제체에 작용하는 간극수압, 온도 및 변위 등을 대상으로 하였다. 이를 위해 폭 5m, 길이 7m 및 높이 2m의 토조를 설치하여 가제방의 주요 부위에 기존 계측기와 광섬유 센서를 같이 매설하고 수위와 시간변화에 따른 주요 특성치에 대하여 실험하였다. 실험결과 광섬유 센서가 연구목적에 부합하는 계측치를 보여주어 제방누수감지 센서로 활용 가능성을 확인하였다. 아울러 광섬유 센서의 기능에 대한 전반적인 실험을 통하여 현장적용에 대한 사용성을 입증하였다.

**핵심용어 : 제방누수, 광섬유, 모니터링 기법, 시스템 구축**

### 1. 서 론

기후변화에 따른 대규모 호우와 예측이 어려운 국지성 호우가 빈번하게 발생함에 따라 자연재해에 의한 피해가 속출하고 있다. 자연재해로부터 해안이나 하천주변의 발달된 도시나 사업 및 농업시설을 홍수나 태풍 등으로부터 보호하기 위해 많은 제방이 건설되어 있지만 홍수방어 요구조건을 만족시키기 위해 열악한 기초지반위에 건설되기도 하고 굴착된 흙을 이용하기 때문에 불균질하여 이상적인 조건과 맞지 않는 경우가 허다하다. 그럼에도 불구하고 대부분의 제방관리 형태는 홍수량에 의한 월류여부를 중심으로 이루어져 왔으며, 제방의 안전성과 관련된 구체적인 사실에 근거한 연구가 부족한 현실이다. 흙으로 축조된 제방의 설계인자 적정성, 하중조건이나 다짐조건, 안전진단 등 제방관리에 기초적으로 필요한 연구는 제대로 수행되지 않았으며 콘크리트 집합부의 천이구간(불연속제방구간), 기초부 누수 감지, 사면슬라이딩, 파이핑 현상 등에 대해서는 이론적인 해석 제시에 불가하였다. 따라서 한번 파괴되면 엄청난 피해를 유발하는 제방의 안전성 확보를 위해서는 제방의 내부에서 일어나는 현상을 계측기기를 이용하여 심도있게 모니터링 할 수 있는 시스템이 필요한 실정이다. 본 연구에서는 제방의 거동특성을 사전에 충분한 정보를 통하여 파악하고 모니터링하기 위해 광섬유를 이용한 광섬유격자센서(FBG 센서)를 개발하였으며 대형토조실험을 통해 제방누수감지 센서로 활용할 수 있음을 확인하였다.

\* 정회원 · 한국수자원공사 K-water연구원 연구원 · E-mail : kwpark@kwater.co.kr

\*\* 정회원 · 한국수자원공사 K-water연구원 선임연구원 · E-mail : ehwang@kwater.or.kr

\*\*\* 정회원 · 한국수자원공사 K-water연구원 수석연구원 · E-mail : lkm@kwater.or.kr

## 2. 광섬유격자센서(Fiber Bragg Grating, FBG)

일반 전기식계측기기는 여러 요인에 의해서 고장이 발생하고 이에 따라 계측기기의 수명도 영향을 받는다. 특히 부식은 계측기기의 수명을 결정짓는 가장 중요한 인자가 되는데 일반적으로 기종에 따라 약간의 차이는 있으나 5년에서 10년 정도의 수명을 가지는 것으로 알려져 있다. 이를 보완할 수 있는 방법은 최근 들어 설치되기 시작하는 광섬유센서를 사용하는 방법으로 광섬유센서는 부식이 되지 않고 20년 이상 데이터에 문제가 없이 사용할 수 있다.

### 2.1 광섬유격자센서의 원리

광섬유격자센서(FBG센서)는 Ge가 첨가된 광섬유 코어에 자외선 영역의 레이저를 주기적으로 주사함으로써 굴절률 변화를 유도하여 격자를 생성하며, 이 격자의 간격에 의해 결정되는 특정 파장의 빛을 반사시키는 광소자이다.

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

여기서  $n$ 은 광섬유 코어의 유효 굴절률이며,  $\Lambda$ 는 격자와 격자사이의 간격이다. 격자에서 반사되는 브래그파장은 위의 식과 같이 유효 굴절률과 격자간격의 함수이다. 온도나 압력 등의 외부 물리량을 인가할 경우 브래그파장이 달라지며 브래그 파장의 변화를 측정한다면 FBG에 가해진 물리량을 구할 수 있다. 변형률변화에 대한 브래그 중심 파장의 변화는 아래의 식과 같다.

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

여기서  $P_e$ 는 광탄성 상수이며, 주로 사용되는 게르마늄 실리카 유리의 경우 대략 0.22의 값을 가지며,  $e$ 는 광섬유격자에 가해진 변형률이다. 굴절률은 스트레인의 함수가 되어 스트레인에 따라 편광특성이 발생하여 빠른 축과 느린 축이 존재하게 되어, 두 방향이 서로 다른 굴절률을 가지게 된다. 초기 굴절률로부터 스트레인 부가시 굴절률 변화는 다음과 같다.

$$\Delta^s n_p^{eff} = -\frac{n_0^3}{2} \left[ p_{12}e_1^s + (p_{22} + p_{23})e_h^s + \frac{p_{22} - p_{23}}{2} \gamma_{max}^s \right] \quad (3)$$

$$\Delta^s n_q^{eff} = -\frac{n_0^3}{2} \left[ p_{12}e_1^s + (p_{22} + p_{23})e_h^s - \frac{p_{22} - p_{23}}{2} \gamma_{max}^s \right] \quad (4)$$

여기서  $n_0$ 는 초기 굴절률이고,  $p_{ij}$ 는 기계광학계수,  $\gamma_{max}^s$ 는 shear strain이다. 이를 평균굴절률 변화  $\Delta^s n_{avg}$ 와 굴절률 차이변화  $\Delta^s n_{dif}$ 로 나타내면 아래식과 같다.

$$\Delta^s n_{avg} = -\frac{n_0^3}{2} [p_{12}e_1^s + (p_{11} + p_{12})e_h^s], \quad \Delta^s n_{dif} = -n_0^3 \frac{p_{11} - p_{12}}{4} \gamma_{max}^s \quad (5)$$

## 2.2 개발된 광섬유계측센서

제방시설물은 특히 통신 및 전원 등의 인프라에 열악하여 현장 여건에 적합한 센서타입으로 선정 및 개발하여 별도의 전원공급 없이 그 자체로 통신 소자의 역할을 수행할 수 있어야 한다. 또한 전자파의 간섭을 받지 않아야 하며 낙뢰가 걱정되는 지역에서도 데이터의 원활한 수집이 가능하고 수분이 많은 지역에서도 부식의 우려가 적은 조건을 만족해야 한다. 이를 고려해 볼 때 적용될 수 있는 계측기기는 광섬유센서 유지 관리시스템이 될 수밖에 없으며 광섬유센서를 이용하여 개발된 간극수압계, 토압계, 온도계는 다음 그림과 같다.



그림 1. 개발된 광섬유센서

개발된 광섬유 간극수압계, 토압계, 온도계 테스트 결과 대단히 양호한 재현성과 선형성을 보였고 0.15%의 오차율 안에 들었으며 며칠에 걸친 데이터가 기존의 전기식센서와 동일한 패턴을 보임을 확인하였다.

## 3. 대형토조실험 및 계측센서의 적용

### 3.1 대형토조

대형토조의 가로폭은 7m로 하였으며 이에 따라 세로폭은 사면기울기 1:2로 결정하고 상부 체체의 가로폭을 1m로 하였으며 지반의 높이는 1.5m로 하였다.

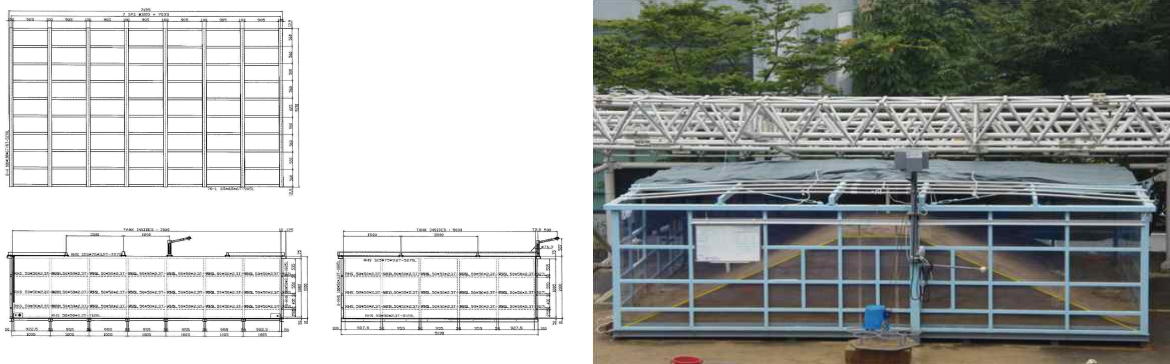


그림 2. 광섬유센서 테스트를 위한 대형조토

토조는 별도의 물탱크를 가지지는 않는 구조로 설계되었으며, 물의 공급은 외부에서 행해지도록 하였다. 하부는 강제로 된 빔을 사용하여 강성을 부여토록 하였으며 벽체는 기본적으로 사각프레이밍으로 보강하고 아크릴 보강판을 붙이도록 하였다. 아크릴 보강판은 투명하여 토조 내부를 볼 수 있도록 하였다.

### 3.2 광섬유 계측센서의 적용

광섬유 계측센서와 유전율 계측센서를 이용한 실험결과는 다음 그림과 같다.

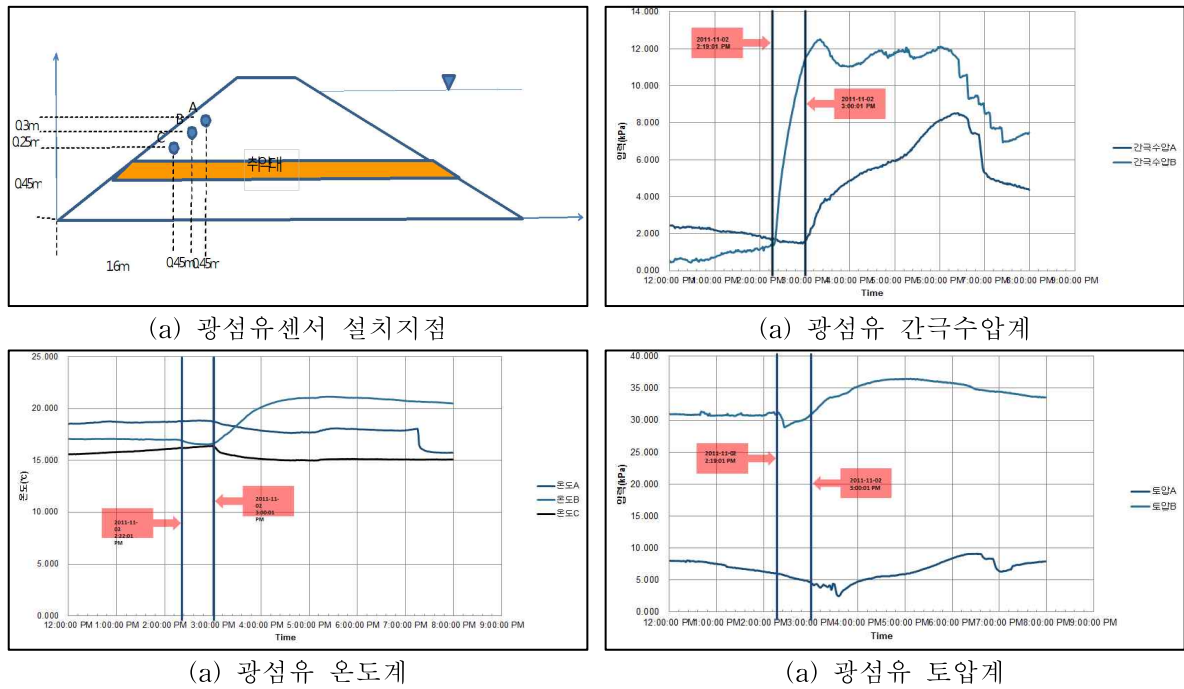


그림 3. 광섬유센서 테스트

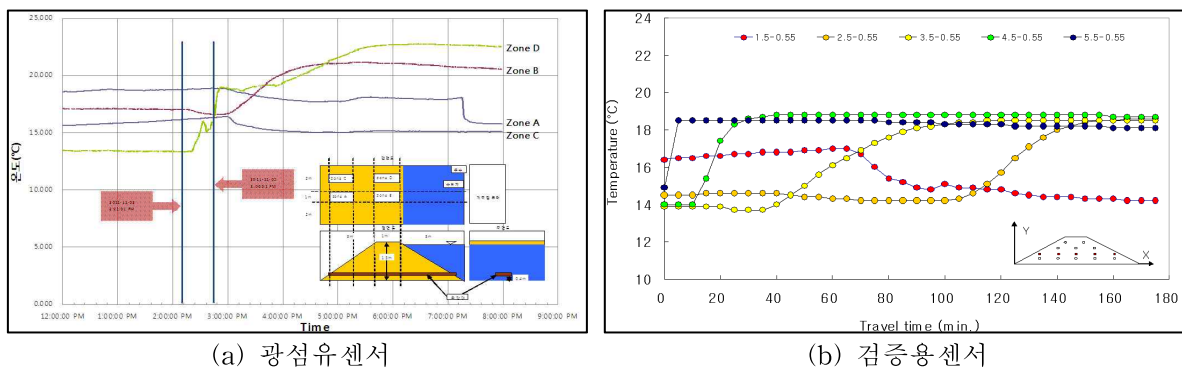


그림 4. 광섬유센서와 유전율센서 테스트

간극수압 비교 결과 검증용 센서와 집중형 광섬유형 센서가 유사한 경향을 보임을 확인하였으며 센서의 설치지점에 따라 간극수의 침투에 의해 빠르게 상승하는 것을 확인하였다. 온도분포의

경우 제방의 온도보다 수온의 영향이 크기 때문에 이에 따른 테스트결과를 확인할 수 있었으며 검증용센서와 경우 유사한 경향을 보이는 것을 확인하였다. 토압계의 경우 제방의 사면 붕괴에 따라 압력이 감소하다가 증가하는 현상을 나타냈는데 물의 침투에 따라 전압이 변화하는 것을 확인할 수 있었으며 검증용센서 또한 유사한 현상이 나타남을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 론

대형모형토조를 제작하여 광섬유센서의 검증을 위해 검증용센서인 유전율센서를 이용하여 실험을 수행하였으며 실험을 통해 최종 실험결과들로부터 실제 제방에서 광섬유센서의 현장 적용성을 높이고자 하였다. 실험결과 유전율센서는 온도와 습윤율을 동시에 측정할 수 있는 센서로서 온도보다는 습윤율 분포결과가 물의 침투현상을 더 빠르게 감지한 것으로 나타났다. 그러나 광섬유센서의 경우 아직 온도분포측정만큼 신뢰성 있게 습윤율을 측정하는 것이 어렵지만 온도분포변화에 따른 데이터를 활용하면 충분히 누수탐지측정이 가능할 것으로 사료된다.

#### 참 고 문 헌

1. 건설교통부(2004), “하천 제방 관련 선진기술최종보고서”, 2001건설교통기술혁신사업, 최종보고서.
2. 건설교통부(2007), “하상재료를 이용한 하천제방 축조기술연구”, 2005건설기술기반구축 사업 최종보고서.
3. 김규호, “하천제방 관련 선진기술 개발”, 2001 건설교통기술혁신사업 최종보고서, 2004. 8.
4. 김기수, “댐 계측기 사용년수 및 내구성 향상방안”, 수자원공사 자문보고서, 2009. 4.
5. 김기수, “댐 계측분야 광섬유 센서 활용기술 조사 및 성능규격 제시”, 수자원공사 자문보고서, 2010. 9.
6. 김기수, “부분탈피 고정방식 프리스트레인 가변형 광섬유격자센서를 이용한 지하철 구조물 변위 모니터링시스템”, 전산구조공학회 논문집 제 21권 6호, pp 607 - 613, 2008. 12.
7. 김기수, “A Model of Embedded Fiber Optic Fabry-Perot Strain and Temperature sensors” Ph. D. Dissertation, Stanford University, 1993. 4.
8. 류권규, 이남주, “침투에 대한 일본의 제방 안전성 평가 방법.” 한국수자원학회지, 제44권, 제3호, pp 68-72. 2011.
9. 송정탁 (2011). “Design of Intelligent Levee Monitoring System”, 첨단 ICT기술과 홍수 및 하천관리 국제심포지엄, Kwater.
10. 윤광석, “하천제방 붕괴 유형분석 및 설계방안”, 한국수자원학회지, 2004. 1.
11. 윤광석, “하천제방 붕괴원인에 따른 안전성평가.” 한국수자원학회지, 제36권, 제5호, pp 25-31. 2003.4