

광섬유를 이용한 제방누수감지센서 개발

Development of Levee Leakage Monitoring Sensors Using Optical Fiber

김기수*, 황의호**, 이광만***

Ki Soo Kim, Eui Ho Hwang, Gwang Man Lee

1. 서 론

제방이라 함은 계절적으로 높은 하천수위와 연중 몇 일 혹은 몇 주간의 유량증가에 의한 홍수를 방어할 목적으로 성토된 수리구조물로 정의할 수 있다. 여기서 성토 구조물은 장시간 혹은 영구적인 시설물이 될 수 있다. 따라서 설계기준에 적합하게 건설되어야 하며 유지관리를 위한 조치들이 필요하다. 그러나 여러 가지 이유로 안전성에 문제가 발생할 수 있으며, 파괴에 의한 피해는 경우에 따라서는 천문학적인 숫자가 될 수도 있다. 일반적으로 제방은 소규모 흙댐과 유사한 형태이지만 몇 가지 측면에서 구분이 가능하다. 우선 제방성토구조물은 짧은 기간 동안에 모세관 침투의 한계를 넘는 침투가 일어나며, 제방선은 홍수방어 요구조건을 만족시켜야 하기 때문에 열악한 기초지반위에 건설되기도 한다. 보통 제방 성토재료는 하천주변이나 하천내에서 굴착된 흙을 이용하기 때문에 불균일하여 이상적인 조건과 맞지 않는 경우가 허다하다. 제방단면은 사용되어질 재료의 조건에 따라서 결정되며, 제방건설의 이와 같은 상태는 건설 이후 관리방법에도 영향을 미치게 된다. 따라서 제방의 안전을 유지하기 위해서는 여러 가지 모니터링이 필요하며 이를 수행할 수 있는 계측기기의 개발과 설치운영이 요구하다.

본 논고에서는 근래 4대강 사업 등으로 제방의 안전성이 크게 향상되었으나 항구적인 제방붕괴를 사전에 예방하기 위한 대안으로 제방누수감지를 위한 광섬유를 이용한 센서의 개발 내용을 소개하고자 하였다. 즉 제방 안전의 취약부를 집중적으로 모니터링하고 이들 지역을 제방 전체와의 연계성을 고려하기 위해 흙으로 축제된 제방의 침투 및 콘크리트 구조물 등에 의해 제방불연속부에서의 부등 침하 등을 모니터링 할 수 있는 센서의 개발과 이의 활용방안을 제시하고자 하였다. 결국 제방의 안전관리는 양질의 정보에 의한 합리적 의사결정과정의 필요하므로 현재의 정보획득 수준을 넘어 더 많은 양질의 정보 수집체계가 마련되어야 한다. 제방의 안전에 관한 보다 양질의 정보는 “조기에 그리고 지속적인(early and continually) 감지”에 의존하게 된다.

2. 하천제방 계측기기

제방축조사업의 토질공학은 흙과 암반재료의 광범위한 탐사와 분석을 필요로 한다. 실제 잘 설계된 제방도 불확실한 조건에 놓여 있을 수 있기 때문에 기기를 이용한 시각적 조사나 적절한 계측기기를 이용하여 모니터링을 통한 사전 위험예방이 필요하다. 오늘날 계측기기는 정보와 결합된 시각적 관찰과 제방과 기초의 상태 그리고 실제 운영기간중 안전관리의 기본정보를 제공할 수 있다. 특히 제방 구조물은 선형적으로 장대 구조물이며 사람이 현장에서 집중감시하기란 사실상 불가능하다. 또한 제방은 대부분 토석자료에 의해 축조되어 설계나 시공기준에 부합한다하여도 홍수나 하천수위의 급격한 변화 등으로 항상 붕괴위험에 노출되어 있다. 따라서 제방구조물의 안전성을 판단할 수 있는 지표를 선정하고 기초지반의 현장 변화 상태를 모니터링할 수 있는 관측시스템이 필요하다.

Ralph Peck(USACE, 1995)은 “사업에 있어 모든 계측기기의 활용은 어떤 특별한 문제에 대한 답을 얻

* 정회원 · 홍익대학교 교수 · E-mail : kisoohongik.ac.kr
** 정회원 · K-water연구원 선임연구원 · E-mail : ehwhang@kwater.or.kr
*** 정회원 · K-water연구원 수석연구원 · E-mail : lkm@kwater.or.kr

기 위해 선택되고 설치되어야 한다. 문제가 없으면 계측기기도 없다(Every instrument on a project should be selected and placed to assist with answering a specific question; if there is no question, there should be no instrumentation.)”고 하였다. 그러나 현장 계측이 좋은 설계, 장애없는 시공, 장기 안정적 운영관리를 보장하지는 않는다. 부적절한 지역에 잘못 설치된 계측기기는 혼란스런 정보를 제공하게 되고 대응 방안을 문제의 본질에서 벗어나게 할 수 있다. 그리고 현장 계측이 모니터링하는 동안 알려지지 않은 모든 결점을 찾아내고 임박한 붕괴조짐을 경고해 주는 것은 아니다. 또한 현장 계측 모니터링은 필요한 지점에 정확히 설치되지 않으면 임박한 위험이나 붕괴의 징조를 알 수 없다.

그럼에도 현장 계측방법이 제방평가를 위한 유일의 정보제공을 의도하지는 않으나 제방의 종합적인 안전 조사와 실시간 현장모니터링 프로그램 내에서 효과적으로 활용할 수 있는 정보를 제공할 수 있다는 큰 장점을 가지고 있다. 우리나라의 경우 하천제방의 파괴원인은 월류, 과대한 유속과 소류력에 의한 세굴, 성토재료의 불량, 파이프현상, 사면활동, 제방기초의 침하, 하천구조물의 접합부 파손 등으로 구분된다. 따라서 이들 현상에 대한 모니터링이 절대적으로 필요하며, 제방붕괴현상을 사전에 예방할 수 있도록 아래와 같이 이들 현상을 감지할 수 있는 센서의 적용이 요구된다.

가. 제방사면의 안전성 모니터링 센서

Table. 1 제방 사면의 안전성 검토를 위한 계측기기

계측항목		계측기기
지표변위	전체적인 표층부 변위	측량법(Surveying), 측점이용 삼각측량, 사진측량, 광학수준 측량, 전자거리 측정기
	표층부 균열측정	균열측정기기(Crack Gage) 변위판, 변위말뚝
	표층부 기울기 측정	기울기 측정기기(Tiltmeter)
지중변위	지중 수평변위 측정	경사계(Inclinometer) 파이프변위계
	지중 수직변위 측정	신장계(Extensometer) 시추공 익스텐소미터(bore hole extensometer) 와이어 익스텐소미터(weir extensometer)
지하수위/ 간극수압	간극수압 측정	간극수압계(Piezometer) 진동철선식(Vibrating wire type), 공압식(Pneumatic type), 개방식(Open stand pipe type)
	지하수위 측정	수위계(Water level meter)
강우량	강우량 측정	우량계(간이 우량계, 자기 우량계)

3. 광섬유를 이용한 제방모니터링 센서 개발

3.1 광섬유센서의 특징

광섬유센서의 원리는 1922년, 프랑스의 Brillouin은 매질 내에 탄성파가 존재할 경우, Bragg 조건을 만족하는 방향으로 입사파가 산란되며, 산란광의 주파수(파장)에 변화가 생기는 것을 예측하였는데 이것을 브릴루앙 산란이라 한다. 탄성파란 Sound Wave로 표현되기도 하지만 가청 주파수 영역의 “소리” 만을 의미하는 것이 아니라 10 GHz 정도까지의 높은 주파수를 가질 수 있으며, 이런 의미에서 Hypersonic Wave로 표현되기도 한다. 또한 고체물리학에서는 격자 진동(lattice vibration), 포논(phonon)이라고도 한다. 탄성파는 물질의 밀도(즉, strain)를 주기적으로 변화하게 하며 그에 따라 굴절률도 주기적으로 변화하게 된다. 이렇게 공간적인 주기를 가지고 변화하는 굴절률 분포는 회절격자의 역할을 하여 입사하는 빛을 회절시킬 수 있다.

광섬유 내에서 빛의 전파 원리는 굴절율이 높은 물질에서 낮은 물질로 빛이 진행할 때, 그 경계면에서 일정한 각도 내의 빛이 모두 반사되는 전반사의 원리에 있으며, 광섬유 코어로 입사된 빛은 굴절율이 높은 코어층과 굴절율이 낮은 클래딩층의 경계면에서 반사되어 광섬유 코어부분을 따라 전파되게 된다. 이러한 광섬유의 주성분은 실리카 유리로 이루어져 있으며, 그 구조는 굴절율이 약간 높도록 게르마늄을 첨가한 광섬유 중심인 코어 부분과 중심을 보호하는 덧겹층인 클래딩 부분으로 구성되어 있다.

광섬유 브래그(Bragg)격자 배열형 센서(FBG)는, 한 가닥의 광섬유에 여러 개의 광섬유 브래그 격자를 일정한 길이에 따라 새긴 후, 온도나 강도 등의 외부 조건변화에 따라 각 격자에서 반사되는 빛의 파장이 달라지는 특성을 이용한 센서이다. 브래그(Bragg) 조건이란 음파(sound wave)의 여러 위치에서 산란된 빛들이 보강간섭을 일으키기 위한 조건으로서 다음 식 (1)과 같고, 반사원리는 Fig. 1과 같다.

$$\text{Bragg조건: } \lambda = 2n\lambda_s \sin(\phi/2) = 2n\lambda_s \sin\theta \quad (1)$$

여기서, λ : 입사광의 파장, n : 입사광에 대한 물질의 굴절율,
 λ_s : 광산란의 원인이 되는 sound wave의 파장
 ϕ 는 산란각도로서 2θ 와 같다.

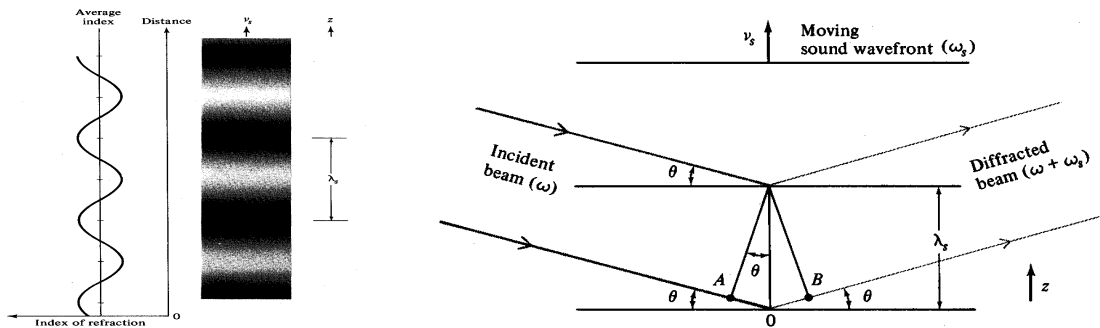


Fig. 1 BOTDR 센서의 개요

이때 Bragg 조건은 정해진 파장의 빛을 입사시키고, 관측 각도가 결정되었을 때 그 방향의 산란을 일으키는 음파(acoustic wave)의 파장에 관한 조건이 되기도 하며, 음파의 파장과 진행방향이 주어졌을 때 어떤 파장의 입사각이 어떤 방향으로 산란될지를 결정하는 조건도 된다. 이에 대한 측정원리는 Fig. 2와 같다.

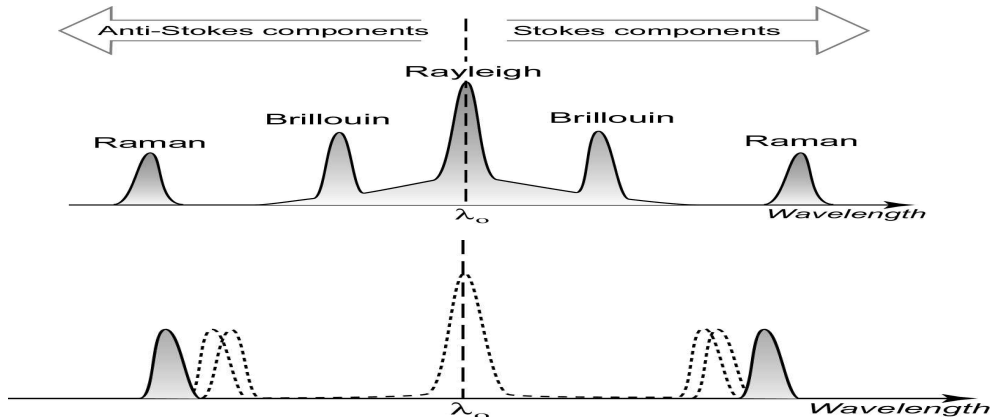


Fig. 2 측정원리

토목분야에서 많이 사용되는 광섬유 센서는 제작방법에 따라 크게 분포형광섬유센서(BOTDR)와 집중형 광간극수압센서(FBG)로 구분할 수 있으며, 주요 특징은 Table 4와 같다.

3.2 개발된 광섬유센서

위와 같은 원리를 이용하면 다양한 센서를 개발할 수 있는데 대표적인 것들을 열거하면 다음과 같다. 이 중 가장 일반적인 것은 그림 3~6과 같이 간극수압, 변위, 침하를 모니터링할 수 있는 센서들이다. 이들 센서들은 Kwater와 홍익대학교 김기수 교수팀이 연구용역으로 일환으로 실제 개발된 시제품이다. 왼쪽 그림은 센서의 작동원리를, 오른쪽은 개발된 시제품의 실물사진이다.



Fig. 3 간극수압센서

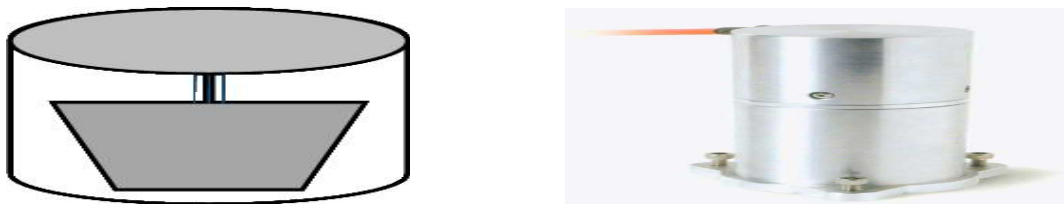


Fig. 4 변형센서

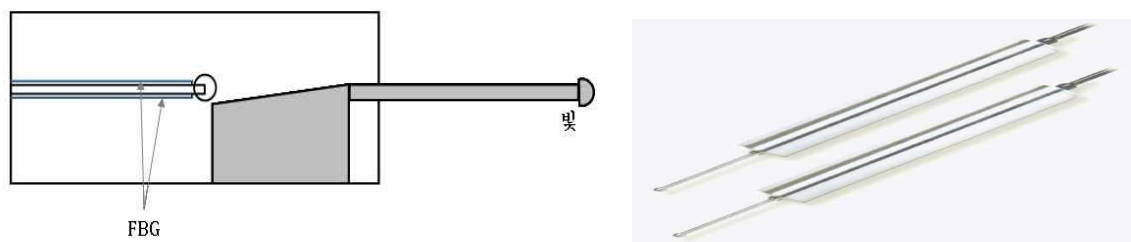


Fig. 5 변위센서

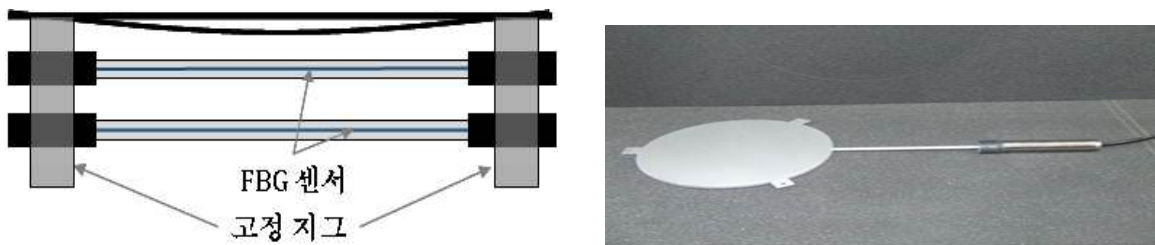


Fig. 6 압력센서

4. 활용방안 및 기대효과

지금까지 제방 모니터링을 위한 다양한 종류의 센서들이 개발되어 왔으며 성공적으로 이용되고 있다. 이

들 센서들은 각각 장점과 단점을 가지고 있으나 제방이라는 장대선형구조물의 특성을 고려할 때 광섬유를 이용한 분포형센서가 보다 적합한 것으로 판단되었다. 또한 다양한 현상에 대한 계측이 가능하여 하천환경에 민감한 제방 모니터링에 매우 유용하게 적용할 수 있을 것으로 판단되었다. 그 중에서도 4대강사업과 관련하여 시설물의 실시간 안전관리 및 홍수대응 시스템에 적용할 수 있을 것이다. 특히 적극적인 홍수대응 전략으로 제방 주변지역 안전성 확보를 위한 기본 정보로 활용하여 홍수 등 비상 혹은 이상 상황시 대처 능력 향상, 댐 및 보 등과 연계된 홍수관리 계획을 지원할 수 있을 것이다. 하천관리 중 제방안전성 실시간 모니터링을 통한 제방 보수보강 및 선 대응 체계 확립을 통한 관리기술 고도화가 가능하며, 대국민서비스 차원에서 제방 제내지에 발달한 주거 및 산업 시설을 보호하기 위한 정확하고 시기 적절한 정보 제공이 가능해 진다. 또한 IT 기반 하천제방모니터링 기술 상품화를 통한 국내외 하천관리기관에 수출도 가능할 것이다.

참고문헌

- 건설기술연구원 (2004). *하천제방관련 선진기술개발최종보고서*.
- Matta, Fabio, Filippo Bastianini, Nestore Galati, Paolo Casadei and Antonio Nanni (2008). "Distributed Strain Measurement in Steel Bridge with Fiber Optic Sensors: Validation through Diagnostic Load Test", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol.22, No.4, pp.264-273.
- Naruse, Hiroshi, Yasuomi Uchiyama, Toshio kurashima, and Shuji Unno (2000). "River Levee Change Detection Using Distributed Fiber Optic Strain Sensor", *IEICE TRANS. ELECTRON.*, Vol.E83-C, No.2, pp.462-467.
- US Army Corps of Engineers (1995). *Instrumentation of Embankment Dams and Levees*.