

## 제방 누수 모니터링을 위한 광섬유센서 개발

황의호

Kwater연구원 선임연구원

### 제 1 장 서론

근래 자연재해에 의한 피해가 속출하고 있다. 자연재해는 홍수뿐만 아니라 지진해일에 의한 피해규모가 확대되고 있다. 따라서 해안이나 하천주변의 발달된 도시나 사업 및 농업시설을 홍수나 태풍 등으로부터 보호하는 가장 확실한 방법으로 많은 제방이 건설되어 있다. 제방은 집중호우 등 비이상적으로 늘어난 하천수, 즉 홍수로부터 인간의 정주지역이나 사회경제시설을 보호하는 역할을 한다. 그러나 대부분의 제방은 하천 주변의 흙으로 축제되어 강도나 내구성 등에서 문제가 될 수 있다. 즉 제방에 의한 홍수로부터의 안전성은 전적으로 제방의 안정성에 의존한다.

본 논고에서 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 불균일하

여 이상적인 조건과 맞지 않는 경우가 허다하다. 따라서 제방단면은 사용되어질 재료의 조건에 따라서 결정된다. 제방건설의 이와 같은 상태는 건설 이후 관리방법에도 영향을 미치게 되며 제방의 안전을 유지하기 위해서는 여러 가지 모니터링이 필요하며 이를 수행할 수 있는 계측기기의 개발과 설치운영이 요구하다.

제방의 안정성은 파괴 형태에 따라 크게 몇 가지로 구분하여 평가할 수 있다. 일반적으로 제방의 파괴는 제방에 작용하는 힘의 종류가 다르고 메커니즘이 상이하다. 그러나 어떤 형태의 제방파괴 작용도 그림 1과 같이 일련의 과정을 거쳐서 일어나게 된다. 우선 제방파괴는 일시적인 공간적, 입체적 붕괴가 아니라 한 지점(failure at one point or location)부터 시작된다. 다음 이것이 확대되어 주변의 제방 구성요소를 파괴(failure of one component)하고, 점차 넓은 구역으로 확대(failure of the entire flood protection system)되어 최악의 상황을 유발한다.

또한 제방파괴는 홍수발생시 짧은 시간동안(몇 시간에서 몇 일)에 발생하는 경우와 장기간(수년에서 수백년)에 걸쳐서 발생하는 경우가 있다. 월류에 의한 파괴의 경우는 홍수기 일시에 불어난 유량에 의해 발생하나 침투나 식생, 구조물 붕괴 등은 상당시간 진행되는 경우가 있다. 결국 홍수방어 시스템의 이행을 확보하기 위해서는 제방시스템의 약한 부위를 확인하고 전체시스템의 연결성(weak links)를 확인할 필요가 있으며 궁극적으로 제방시스템의 장기 유지관리시스템이 가동되어야 한다. 그러나 대부분의 제

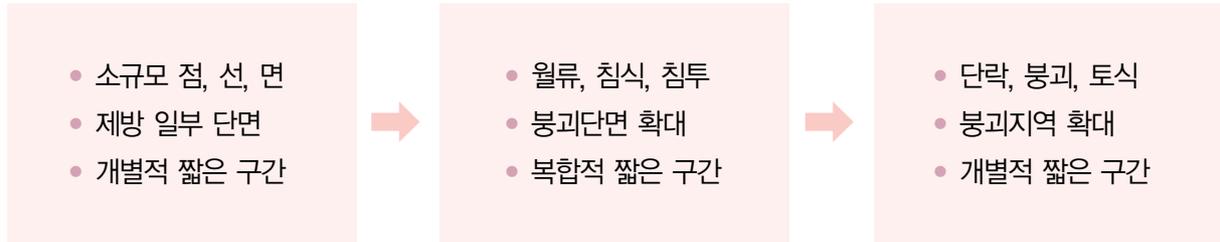


그림 1. 제방의 붕괴 연결 시스템

방관리 형태는 홍수량에 의한 월류여부를 중심으로 이루어져 왔으며, 제방의 안정성과 관련된 구체적인 사실에 근거한 대처는 부족하였다. 게다가 흙 제방의 설계인자 적정성, 하중조건이나 다짐조건, 큰 홍수 후 안전진단 등 제방관리에 기초적으로 필요한 연구는 제대로 수행되지 못했다. 콘크리트 접합부의 천이 구간(불연속제방구간), 기초부 누수 감지, 사면슬라이딩, 파이핑 현상 등에 대하여 이론적인 해석 제시에 불과하였고 실질적 모니터링 평가사례는 거의 없었다. 따라서 한번 파괴되면 엄청난 피해를 유발하는 제방의 안전성 확보를 위해서는 제방의 겉보기 평가에서부터 내부에서 일어나는 현상을 심층 분석할 필요가 있다.

본 논고에서는 근래 4대강 사업 등으로 제방의 안전성이 크게 향상되었으나 항구적인 제방붕괴를 사전에 예방하기 위한 대안으로 제방모니터링 기법을 제시하고자 하였다. 즉 제방 안전의 취약부를 집중적으로 모니터링하고 이들 지역을 제방 전체와의 연계성을 고려하는 것이다. 주로 흙으로 축제된 제방의 침투 및 콘크리트 구조물 등에 의해 제방불연속부에서의 부등 침하 등을 모니터링 센서와 이를 활용하기 위한 시스템구축방법을 제시하고자 하였다. 즉 주요 취약점에 대한 안전성 평가와 감시모니터링 센서개발과 이들 취약점간 연결성을 감시하기 위한 시스템을 설계하고자 하였다.

또한 제방의 안전관리를 위해서는 양질의 정보에 의

한 합리적 의사결정이 필요하다. 따라서 제방의 안전 관리에 필요한 정보를 얻기 위하여 현재의 정보획득 수준을 넘어서는 더 많고 양질의 정보 수집체계가 마련되어야 한다. 제방의 안전에 관한 보다 양질의 정보는 위험에 대한 인지도를 높이고 이를 사회구성원에 전파하므로써 이로 인한 피해를 예방하고 감소시키는 역할을 한다. 결국 제방의 안전에 대한 정보는 “조기에 감지하면서 지속적인(early and continually)”을 목표로 하였다.

## 제2장 제방파괴 모니터링 기법

### 2.1 우리나라 제방관리의 문제점

우리나라 하천제방은 50년에서 100년, 도시부 국가 하천의 경우 200년 빈도의 홍수를 기준으로 설계되어 70년대부터 축조되어 왔다. 그러나 제방의 노후화와 함께, 하천 지반과 제방의 토질이 견고하지 못하기 때문에 설계기준을 넘지 않는 홍수에 대해서도 충분한 대응과 대비가 부족하다고 할 수 있다. 우리나라의 경우 2000년도 이후 평균적으로 홍수 피해가 일 년에 약 2조 2천억, 피해 복구비가 4조 2천억으로 추정된다. 이중 매년 홍수예방을 위한 하천제방을 쌓고 보강하고 하는 소위 치수사업에 1조 천억이 소요되는 것으로 보고되고 있다. 일본의 경우는 치수를 위한 사업비를 홍수 복구비보다 4배 많이 사용하고 있어 일본은 매년 홍수 피해액과 복구비용이 줄어



(1) 하천구조물 측방 붕괴



(2) 전형적인 제방홍단 붕괴



(3) 도심하천 제방 붕괴



(4) 제방 사면 보호포 설치



(5) 교량 하부 축대 붕괴



(6) 하천제외지 사면 붕괴

들고 있다고 한다. 반면에, 우리나라는 최근 특히 기후 변동에 따른 국지성 호우에 따라 홍수 피해가 지속적으로 늘어나고 있으며, 이에 따른 홍수 피해복구비도 계속 늘어나고 있다.

그러나 우리나라 지자체에서는 하천을 전담하여 점검하고 관리할 수 있는 전담 하천점검원이 거의 없는 실정이다. 자료에 따르면 점검원이 전혀 없는 지자체가 51개(23%), 있는 지자체의 경우도 하천점검원 1인당 담당하천은 법정하천 47km, 소하천 포함시 98km로 실질적인 하천시설물 유지관리에 어려움이 있는 게 사실이다. 재해예방 사각지대에 놓인 비법정 소규모시설 등의 경우, 어려운 지방재정 형편과 투자 우선순위에 밀려, 피해 발생 후에야 복구비를 지원받아 보수하는 등 사전예방 차원의 투자가 거의 이루어지지 못하고 있다. 결국 재해발생 가능성을 줄이지 못하고 복구비를 키우는 결과를 초래하고 있는 실정이다. 따라서 제방이나 하천 수리구조물의 예기치 못한 붕괴사고는 언제 어디서나 상존해 있으며

이를 사전에 예방하는 것이 현실적으로 가장 효율적이다.

결국 사후복구 위주의 임시방편적 투자로 인해 복구비 중심의 비효율적 예산 운영의 악순환이 반복되고 있는 것으로 지적되고 있다. 최근 6년간 예방투자 비중은 일본의 절반에도 미치지 못하고 있다. 우리나라의 경우 방재예산의 98.9%를 사후 재해 복구비용으로 집행하고 있는 반면에 일본은 2005년 방재 총예산의 45.87%인 1조 5850억 엔을 재해예방인 '재해예방시스템' 구축에 사용하고 있다. 하천제방 안전관리 기술 개발에 있어서 기술 발전이 거의 없는 상태이며, 정기적인 점검 및 보수 미 시행으로 시설물 노후로 인한 구조물 안정성 저하되고 있으며, 관련 기관별 관리방법이 상이하고, 관리주체가 지방국토관리청, 지자체 등으로 이원화되어 재난사고에 대비한 통합 관리가 이뤄지고 있는 못하고 있어 체계적인 관리 시스템이 요구된다.

## 2.2 제방 모니터링 센서 종류

제방축조사업의 토질공학은 흙과 암반재료의 광범위한 탐사와 분석을 필요로 한다. 이들 재료들은 기초와 구조물에 이용되기 위해서는 적절성이 고려되어야 한다. 흙과 암반은 철근이나 콘크리트와 같은 일정한 재료의 강도를 보이는 건설재와는 달리 자연적으로 만들어지는 것들이다. 이는 자연재료를 이용한 축조는 예기치 못한 문제에 봉착할 수 있으며, 항시

위험에 노출될 수 있다. 그러나 현장에서 실제로 일어나는 이런 변동성과 위험을 사전에 감지할 수 있는 능력이 부족하다. 그러나 제방이 불확실한 조건에 놓여 있다하여도 기기를 이용한 시각적 조사나 적절한 계측기기를 사용하여 얻어진 정량적인 정보를 활용하면 위험을 예방하는데 도움이 될 수 있다.

계측기기의 정보와 결합된 시각적 관찰방법은 제방과 기초의 상태 그리고 실제 운영기간중 안전관리의 기본정보를 제공할 수 있다. 특히 제방 구조물은 선

형적으로 장대 구조물이며 사람이 현장에서 집중감시하기란 사실상 불가능하다. 또한 제방은 대부분 토석자료에 의해 축조되어 설계나 시공기준에 부합한 다하여도 홍수나 하천수위의 급격한 변화 등으로 항상 붕괴위험에 노출되어 있다. 따라서 제방구조물의 안전성을 판단할 수 있는 지표를 선정하고 기초지반의 현장 변화 상태를 모니터링할 수 있는 관측시스템의 구축이 요구된다.

현장계측은 토질공학의 실체를 이해하는데 매우 중

표 1. 제방사면 안전성 검토를 위한 계측기기

계측항목	계측기기
지표변위	· 측량법(Surveying), 측점이용 - 삼각측량 - 사진측량 - 광학수준측량 - 전자거리 측정기
	· 균열 측정 기기(Crack Gage) - 변위판 - 변위말뚝
	· 기울기 측정 기기(Tiltmeter)
지중변위	· 경사계(Inclinometer) · 파이프 변위계
	· 신장계(Extensometer) - 시추공 익스텐소미터 - 와이어 익스텐소미터
지하수위/ 간극수압	· 간극수압계(Piezometer) - 진동 철선식(vibrating wire type) - 공압식(pneumatic type) - 개방식(open stand pipe type)
	· 수위계(Water level Gage)
강우량	· 우량계(Rainfall Gage) - 간이 우량계 - 자기 우량계

요한 수단으로 축조에 사용된 재료를 관찰하고 관련 특성의 변화과정을 판단하는데 유익하다. 따라서 현장계측기기의 활용에 대한 이해와 그 중요성을 깨달아야 한다. 그러나 대부분의 경우 모니터링에 대해 이해하고 있으나 기기의 현장 적용성 및 취득정보의 신뢰성 등의 문제로 적극적이지 못하다. 또한 현장 모니터링 계측기기가 모든 것을 해결해 줄 수 없으며 유일한 대안이 아니다. 따라서 현장계측기기의 필요성에 대한 판단은 신중하게 이루어져야 한다.

Ralph Peck은 “사업에 있어 모든 계측기기의 활용이 어떤 특별한 문제에 대한 답을 얻기 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. 현장 계측이 좋은 설계, 장애없는 시공, 장기 안정적 운영 관리를 보장하지는 않는다. 부적절한 지역에 잘못 설치된 계측기기는 혼란스런 정보를 제공하게 되고 대응방안의 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. 토질공학적 계측은 제방평가를 위한 유일한 정보제공을 의도하지 않으며, 제방의 종합적인 안전조사와 현장조사 프로그램 내에서 평가할 수 있는 정보제공에 의의가 있다.

일반적으로 토질공학적 계측기기 모니터링 계획의 원칙적 목적은 크게 다음과 같이 4가지로 압축해 볼 수 있다. 제방의 안전성 모니터링은 지하수압, 변형, 전응력, 온도, 지진, 누수 및 수위 등에 대한 정량적

자료를 제공하게 된다. 또한 제체와 제방기초지반의 운동을 모니터링 할 필요가 있다. 제방의 안전성 확보를 위해 필요한 정보를 모두 알기 위해서는 다양한 형태의 모니터링이 이루어져야 한다. 제방사면의 안정성 검토를 위한 계측기기는 표 1과 같다.

### 제 3장 광섬유를 이용한 센서 개발

지난 집중호우에 의한 제방붕괴 사례 및 4대강 사업 등을 통해 보다 홍수에 강한 제방 유지를 위하여 계측관련 사업이 활성화 되고 있다. 이러한 계측은 시공 중인 구조물 뿐만 아니라 완공되어 운영중인 구조물에도 적용되고 있는데, 계측의 기본은 센서의 특성에 있다고 할 수 있다. 계측센서는 성능과 안정성이 가장 중요시되므로, 이를 개선시키기 위한 노력이 계속되고 있다. 특히 광섬유(optical fiber)는 정보통신 분야에서 신호의 송신장치로 사용되어 왔는데, 구조물의 변형률(strain behavior)과 변형(deformation)을 계측하기 위한 센서가 개발되어 최근 국내·외에서 상용화되었다. 이런 광섬유센서의 재질은 순수한 석영(pure quartz)이며, 빛의 속도로 정보를 전달한다. 광섬유센서에서 감지된 신호는 전자기적으로 중성인 광섬유케이블을 통해 컴퓨터로 전송된다. 광섬유 케이블을 인간의 신경조직과 같은 센서로 활용함으로써 구조물 곳곳에서 발생할 수 있는 문제점들을 실시간에 발견할 수 있는 획기적인 기술이다. 광케이블을 제방의 위험부위 혹은 전 구간에 매설하면, 내부균열 등의 이상 징후를 자동적으로 감지해 주의경보 작동이 가능해진다. 특히 구조물에 대한 거리상 제약이 거의 없어 멀리 떨어져 있는 원거리 정보를 손실 없이 모니터링 가능하며, 데이터 획득 등 시스템 구성의 일관성을 유지할 수 있고, 기존의 광통신 인프라를 활용함으로써 인접 구조물과의 통합 네트

워크 구성이 가능한 장점을 가지고 있다. 특히 제방과 같이 불연속 재료인 (discrete material) 흙으로 이루어진 구조물에서는 국소적 흠결이 제체의 심각한 불안정성으로 급격히 전환되며, 위험 특정영역을 사전에 파악하기 어렵다. 이와 같이, 센서의 배치와 밀도가 제체의 건전성 판단에 대단히 중요한 요인이 되는 환경 하에서 광케이블 분포형 센서의 활용은 사고나 재해에 능동적으로 대처할 수 있는 기반을 제공한다. 유비쿼터스 기반의 지능형 센서의 개발은 재해에 신속하게 대응할 수 있고 Smart Levee나 Health Monitoring 시스템 개발의 핵심적 요소기술로 적합하다.

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 그런 의미에서 hypersonic wave로 표현되기도 한다. 또한 고체물리학에서는 격자 진동(lattice vibration), 포논(phonon)이라고도 한다. 탄성파는 물질의 밀도(즉, strain)를 주기적으로 변화게 하며 그에 따라 굴절율도 주기적으로 변화하게 된다. 이렇게 공간적인 주기를 가지고 변화하는 굴절율 분포는 회절격자의 역할을 하여 입사하는 빛을 회절시킬 수 있다.

광섬유 내에서 빛의 전파 원리는 굴절율이 높은 물질에서 낮은 물질로 빛이 진행될 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. 이러

한 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 외부의 조건변화에 따라 각 격자에서 반사되는 빛의 파장이 달라지는 특성을 이용한 센서이다. 브래그(Bragg) 조건이란 음파(sound wave)의 여러 위치에서 산란된 빔들이 보강간섭을 일으키기 위한 조건으로서 다음 식 (1)과 같고, 반사원리는 그림 3.과 같다.

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

여기서,  $\lambda$ : 입사광의 파장,  $n$ : 입사광에 대한 물질의 굴절율,  
 $\lambda_s$ : 광산란의 원인이 되는 sound wave의 파장  
 $\Phi$ : 는 산란 각도로서  $2\theta$ 와 같다.

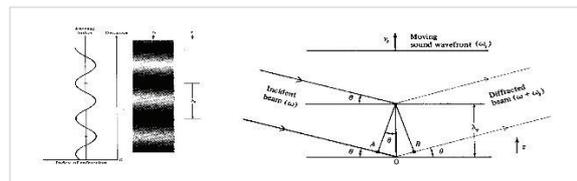


그림 3. BOTDR 센서의 개요

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. 측정원리는 그림 4와 같다.

토목분야에서 많이 사용되는 광섬유 센서는 제작방법에 따라 크게 분포형광섬유센서(BOTDR)와 집중형광섬유센서(FBG)로 구분할 수 있으며, 주요 특징은 표 2와 같다.

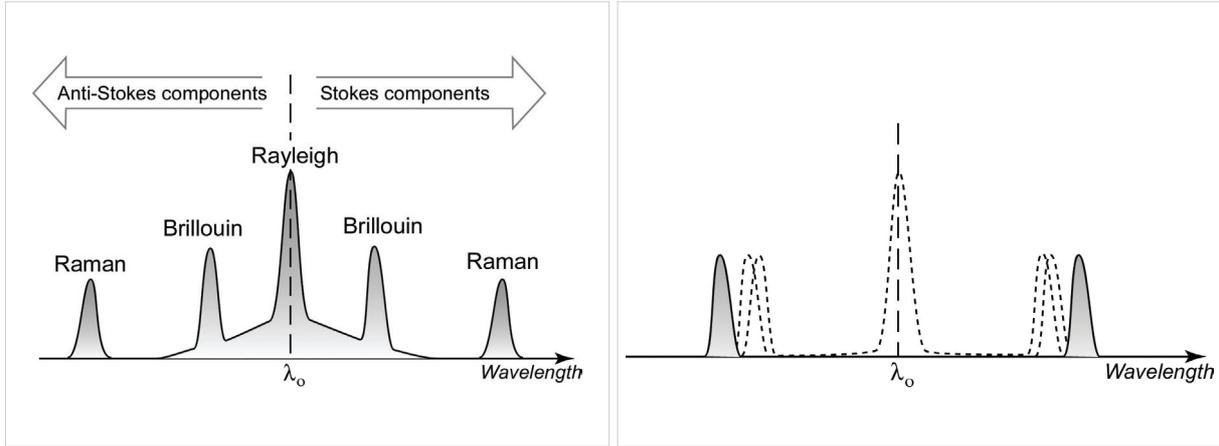


그림 4. 측정원리

표 2. 광섬유 센서 종류 및 특징

구분	BOTDA Sensor (Brillouin Optical Time Domain Analysis)	FBG Sensor (Fiber Bragg Grating)	OTDR Sensor (Optical Time Domain Reflectometry)
측정원리	광섬유 매질의 산란 변화를 측정	광섬유에 격자를 새겨 생성된 파장 변화 측정	광섬유케이블의 손실 및 파장 측정
측정장비	BOTDA(외산)	FBG Interrogation(국산)	OTDR(국산)
센서	광섬유케이블(분포형)	FBG (포인트 격자)	광섬유케이블(포인트)
센서직경	Φ0.25mm	Φ0.25mm(5-20mm)	Φ0.25mm
측정치	변형률(με)	변형률(με)	손실률(dB)
분해능	5-20με(5με: 0.005mm)	1-2με	0.5mm
측정범위	1%(10,000με)	0.6%(6,000με)	
소요시간	수분(~2분)	200Hz이상	수십초(30~60초)
적용대상	장대 구조물	미세 변형 측정 시설물	장대 시설물
측정거리	30km	15km	50km
장단점	· 하나의 케이블에서 변형률과 온도 동시 측정	변형률과 온도 측정을 위해 별도의 센서로 구성됨	· 광원 손실 측정
	· 케이블 센서로서 설치가 용이하며, 전구간 모니터링 가능	지점 센서로서 수량에 따라 시공비 증가	· 광케이블의 앞단에서 손실 발생 시 뒷단 측정이 불가
경제성	장대 시설물 관리 유리	소규모 시설물관리 유리	공학적인 접근이 아닌 ON/OFF 개념의 관리 현장 유리

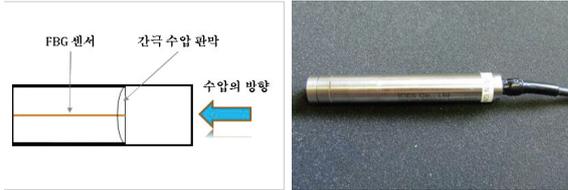


그림 5. 간극수압센서

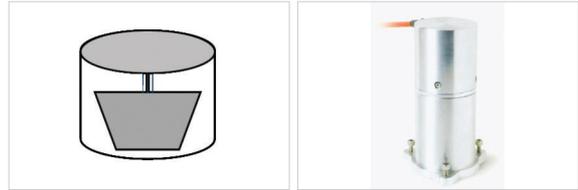


그림 6. 변형센서

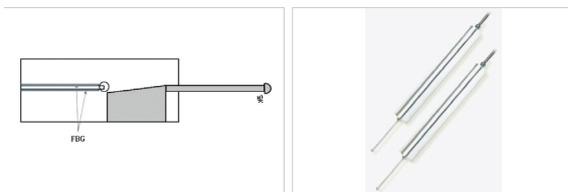


그림 7. 변위센서

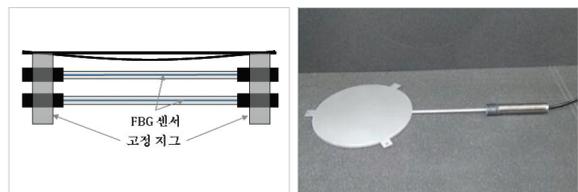


그림 8. 압력센서

### 3.2 광섬유센서 종류

위와 같은 원리를 이용하면 다양한 센서를 개발할 수 있는데 대표적인 것들을 열거하면 다음과 같다. 이중 가장 일반적인 것은 그림 5.~8.과 같이 간극수압, 변위, 침하를 모니터링할 수 있는 센서들이다(아래 소개하는 센서는 현대 홍익대학교 김기수 교수팀이 Kwater의 연구용역으로 개발하고 있는 시제품임).

### 제4장 활용방안 및 기대효과

광섬유를 이용하여 개발된 센서들은 다양하게 활용될 수 있다. 그 중에서도 4대강사업과 관련하여 시설물의 실시간 안전관리 및 홍수대응 시스템에 적용할 수 있다. 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 있다. 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 국내·외 하천관리기관에 수출도 가능할 것이다. 이의 완벽한 완성을 위해서는 국제협력을 연구개발도 하나의 방법이 될 수 있다