u-IT를 이용한 하천제방안전관리 기술 개발

Development of technology for the safety management of embankment using u-IT

황의호*, 이을래**, 채효석***, 박진혁****
Eui-Ho Hwang, Eul-Rae Lee, Hyo-Suck Chae, Jin-Hyeog Park

요 지

본 연구는 치수효과가 높은 하천제방의 안전도 향상을 위한 관리 고도화 기술 개발을 위하여 수위, 유량이 제방의 안전에 미치는 영향을 규명하고 센서 기술 적용하여 실시간 제방 안전관리 모니터링 기술을 확보하는데 있다. 이를 위해, 국내외 기술동향 및 사례분석하고, 변위발생 및 안전성 모니터링을 위한 센서 기술 적용 방안, 센서 적용시 문제점 및 개선방안, 분석방법 등에 대해 정리하였으며, 대형 토조를 이용하여 집중강우 등에 의한 수위 및 유속의 증가에 따른 하천제방에 미치는 영향을 실험적으로 규명하고, 이를 센서 기술을 적용하여 실시간 모니터링을 통한 안전성 평가 방법을 제시하고자 하였다.

하천제방은 종방향으로 긴 구조적 특성을 갖고 있으며 이러한 특성상 모든 구간에 정밀한 계측 장비를 설치하여 운영·관리함에 있어 경제적, 효율적인 측면에 있어 문제가 있는 것으로 사료된다. 따라서 주요 하천시설물 중 구조물이 하천제방을 횡단할 경우 주요 구조물에는 집중형 센서인 FBG 타입을 도입하고, 제방 연통실험 등을 통해 조사 분석된 취약 구간에 대해서는 분포형 센서인 BOTDR 타입의 광섬유 센서를 적용하여 종합적인 관리가 가능하도록 시스템 구성이 필요한 것으로 판단된다.

핵심용어 : u-IT, 광섬유센서, 하천제방

1. 서 론

최근 기상여건의 변화와 이상기후 발생, 제방의 노후화 등으로 인해 홍수피해 급증으로 인한 사회·경제적으로 피해가 매우 크게 나타나고 있으며, '02년 낙동강유역 장기홍수, '02년 태풍 루사 및 '03년 태풍 매미 등에 의한 홍수로 강원 및 영남지역의 제방 붕괴로 인한 막대한 피해 발생하였다. 이러한 피해에 있어 제방붕괴 사례는 758건('87~'03)으로 월류(39.6%), 침식(38.9%), 제체불안정(11.5%), 구조물에 의한 붕괴(10%)로 나타났으며, 막대한 피해에도 불구하고 우리나라의 제방설계기준은 안전측면에 있어 충분히 검증되지 못한 상태로 제방의 유지관리 및 안전진단 기술도 미국이나 일본에 비해 미흡한 실정이다.

* 정회원 · 한국수자원공사 K-water연구원 선임연구원 · E-mail : ehhwang@kwater.or.kr
** 정회원 · 한국수자원공사 K-water연구원 책임연구원 · E-mail : erlee@kwater.or.kr
*** 정회원 · 한국수자원공사 K-water연구원 수석연구원 · E-mail : chaehs@kwater.or.kr
**** 정회원 · 한국수자원공사 K-water연구원 책임연구원 · E-mail : park5103@kwater.or.kr

우리나라 법정하천의 개수율은 '07년 현재 81.5%에 이르고 있으며, 수자원장기종합계획에 따르면 법정하천의 개수를 완료하는 계획이 포함되어 있다. 즉, 향후 제방이 모두 축조된다고 볼 때, 제방과 관련된 문제는 기존 제방을 어떻게 유지·관리하는가가 중요한 문제로 대두될 것이나, 현재 우리나라에서는 하천 제방의 유지·관리를 위한 기준이나 기법은 물론이고 안전진단기법 및 기기의 개발이 미흡하여 제방 붕괴사고가 발생하여 피해를 입은 후에 조치를 취하는 실정이다. 이는 하천제방에 대한 안전진단 기법 및 기기의 개발이 시급하며, 홍수방어시설로서 가장 치수효과가 높은 하천제방의 안전도 향상을 위한 선진 고도화 기술 개발이 시급하다. 이를 위해 본 연구에서는 u-IT 센서 기술을 이용하여 제방안전관리 적용방법을 도출하고 실시간 계측 정보를 이용하여 안전성 평가 방법 정립하며, 하천제방 안전성 실시간 모니터링을 위한 확산 적용 방법을 제시하고자 한다.

2. 국내외 하천제방 관리 현황

우리나라 하천제방은 50년에서 100년, 도시부 국가하천의 경우 200년 빈도의 홍수를 기준으로 설계되어 70년대부터 축조되어 왔으며, 제방의 노후화와 함께, 하천 지반과 제방의 토질이 견고하지 못하기 때문에 설계기준을 넘지 않는 홍수에 대해서도 충분한 대응과 대비가 부족하다. 2000년도 이후 평균적으로 홍수 피해가 일 년에 약 2조 2천억, 피해 복구비가 4조 2천억 정도이며, 매년 홍수예방을 위한 하천제방을 쌓고 보강하고 하는 소위 치수사업에 1조 천억이 소요되었다.

일본의 경우는 치수를 위한 사업비를 홍수 복구비보다 4배 많이 사용하고 있어 일본은 매년 홍수 피해액과 복구비용이 줄어들고 있는 반면에, 우리나라는 최근 특히 기후 변동에 따른 국지성 호우에 따라 홍수 피해가 지속적으로 늘어나고 있으며, 이에 따른 홍수 피해복구비도 계속 증가하고 있다. 그러나, 우리나라 지자체에서는 하천을 전담하여 점검하고 관리할 수 있는 전담 하천점검원이 거의 없는 실정이며, 전혀 없는 지자체가 51개(23%), 있는 지자체의 경우 하천점검원 1인당 담당하천은 법정하천 47km, 소하천 포함시 98km로 실질적인 하천시설물 유지관리에 어려움 있다.

일본에서 Takao Uno 등(1998)은 하천제방 안전성 평가를 위하여 제방붕괴사례를 조사하여 분석한 바 있고, Yuichiro Fujita 등 (1984)은 하천제방의 붕괴형상에 관한 2차원 실험을 실시한 바 있다. 그러나 아직까지 제방 붕괴부에 대한 파괴 특성을 명확하게 해석하기에는 어려움이 있는 것으로 판단되며, 일본은 하천제방설계지침(2000, 건설성)에 제방의 안전도평가를 위한 구체적인 침투, 월류, 침식에 대한 내·외력 산정방법을 제시하여 공학적인 판단에 의한 제방설계를 제안하여 경험적인 판단에 우선하도록 하고 있다.

일본과 국내에서 제방붕괴 양상을 실험을 통해서 규명한 바 있으며, 제방의 안전성 검토를 위한 기초 연구로서 수행되었으나 국내외에서 제방에 대한 안전진단 기기 및 기법에 관한 연구는 아직 확립되지 못한 것으로 조사되었다. 따라서, 제방붕괴의 주요 요인에 대한 원인분석을 통한 대책을 수립하여 기준에 반영하고, 안전한 제방설계를 위한 지침 개발을 필요로 하고 있다. 1997년 처음 유럽 등에서 GTC에 의해 댐 및 제방에 광섬유를 이용, 온도측정(라만방식)을 통해 누수점을 찾는 것으로 활용하였으며, 일본의 경우 하천제방 취약부인 배수통문 문제점을 해결하고자 국가관리하천 13,000여개의 배수통문에 대한 대대적인 안전점검을 수행하여 그 중 10%에 해당하는 노후 배수통문을 대한 보수·보강 대책을 수립·시행하였음

3. 적용기술 분석

본 연구에서 적용한 u-IT 센서 기술은 분포형광섬유센서(BOTDR; Brillouin Optical Time Domain Reflectometry)와 광섬유간급수압센서(FBG; Fiber Bragg Grating)이며, 두 센서를 이용하여 하천제방 붕괴 기작의 사전 예측시스템으로 활용 가능한 기술을 적용하기 위한 비교분석 실험을 수행하였다. 적용기술의 특징은 다음과 같다.

분포형광섬유센서는 광섬유 케이블을 인간의 신경조직과 같은 센서로 활용함으로서 구조물 곳곳에서 발생할 수 있는 문제점들을 실시간에 발견할 수 있는 획기적인 기술로 광케이블을 제방의 위험부위 혹은 전 구간에 매설하면, 내부균열 등의 이상 징후를 자동적으로 감지해 주의 경보로 작동 구현이 가능하다. 특히 구조물에 대한 거리상 제약이 거의 없어 멀리 떨어져 있는 원거리 정보를 손실 없이 모니터링 가능하며, 데이터 획득 등 시스템 구성의 일관성을 유지 할 수 있으며 기존의 광통신 인프라를 활용함으로서 인접 구조물과의 통합 네트워크 구성이 가능한 장점을 가지고 있다. 그러나 제방과 같이 불연속 재료인 흙으로 이루어진 구조물에서는 국소적 흠결이 제체의 심각한 불안정성으로 급격히 전환되며, 위험 특정영역을 사전에 파악하기 어려운 단점이 있다.

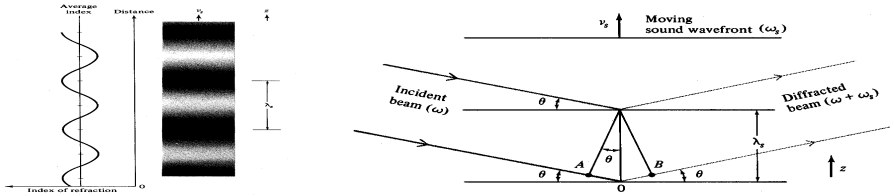


그림 1. BOTDR 센서의 개요

광섬유간급수압센서는 기존의 수압계 방식과는 다른 원리를 적용하여 지중 또는 지하를 포함한 그 어떤 곳이든 장기간 수압계를 매설하더라도 안정적이며 정밀하게 수압 측정 가능하다. 다이어프램(diaphram) 및 광섬유센서와 센서로부터 전달된 빛의 과장현화를 검출하여 압력을 계측하는 제어부와 표시부로 구성되어 장기간 동안 정확하게 수압 측정한다. 특히 광섬유 센서 자체는 유리섬유이므로 화학성과 안정성이 우수하며 장기간 물에 잠겨 있어도 부식이 되지 않아 센서의 망실에 의한 교체 및 유지보수 비용을 절감할 수 있어 유지 관리 계측에 유리하다.

4. 하천제방 안전성 관리를 위한 센서기술 모형실험

현재 하천 제방의 유지·관리를 위한 기준이나 기법은 물론 안전진단 기기의 개발이 미흡하여 제방 붕괴사고 후 조치를 취하는 실정이다. 이는 홍수방어시설로서 가장 치수효과가 높은 하천제방의 안전도 향상을 위한 선진 고도화 기술 개발이 시급하며, 이를 위해, 대형 토조를 사용하여 홍수기 수위, 유량 증가로 제방에 미치는 영향을 실험적으로 규명하고, 이를 센서 기술을 적용하여 실시간 안전성 평가 방법을 제시하였다.

제방붕괴에 미치는 영향 검토를 위한 제방 축조재료의 토성, 투수, 밀도 시험을 수행하였으며, 입도분석 결과 하천설계기준의 제방 구성물의 조건을 충족시키는 하상골재로 센서기술을 이용한 하천제방 안전성 평가를 위한 실험에 적합하였다.

구분		정수위	변수위
흙 분류		GP	
흙 입 자 의 밀 도		2.65	g/㎤
공시체 상태	공시체 직경	10	㎝
	공시체 단면적	78.54	㎠
	공시체 길이	12.73	㎝
	공시체 무게	2,161	g
	젖은 밀도	2.161	g/㎤
	함수비	7.72	%
	건조 밀도	2.006	g/㎤
	간극비	0.32	
	포화도	63.8	%
투수계수		$5.14\times^{E-3}$	㎝/sec

그림 2. 입도분석 및 결과

침윤선 및 제체 변위 모니터링을 위해 FBG 2대(심도 0.8m, 좌우 1.3m), BOTDR 2 layer(지점: 0.4m, 0.7m, 광케이블 길이: 120m) 매설하였으며 실험과정은 그림 4와 같다.

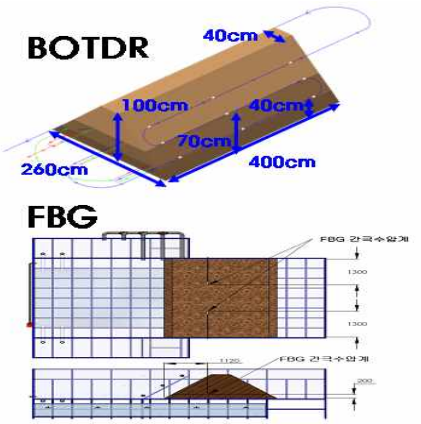
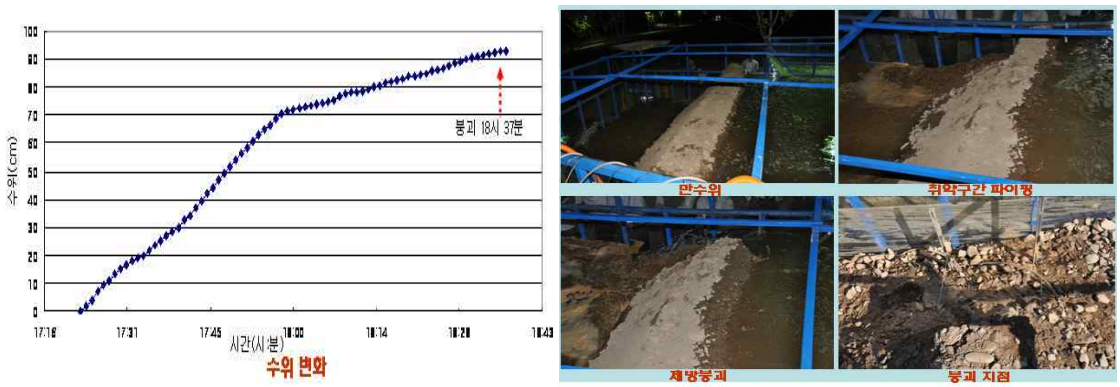


그림 3. 설치 위치도

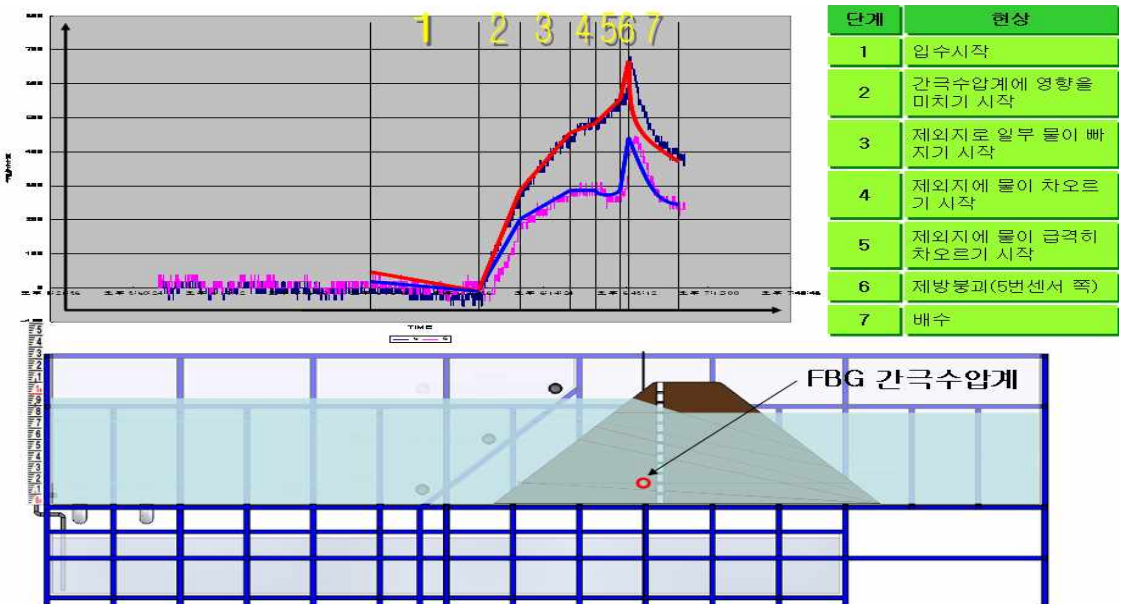
그림 4. 센서설치 과정

실험 결과 유량 변화 및 제방 붕괴에 미치는 영향을 분석하였으며, 실험시간은 1시간20분이 소요되었으며, 고수위 0.9m 이상에서 약 15분 지속시간을 보이다 월류 직전 취약구간 파이핑에 의한 붕괴 기작을 확일 할 수 있었다.



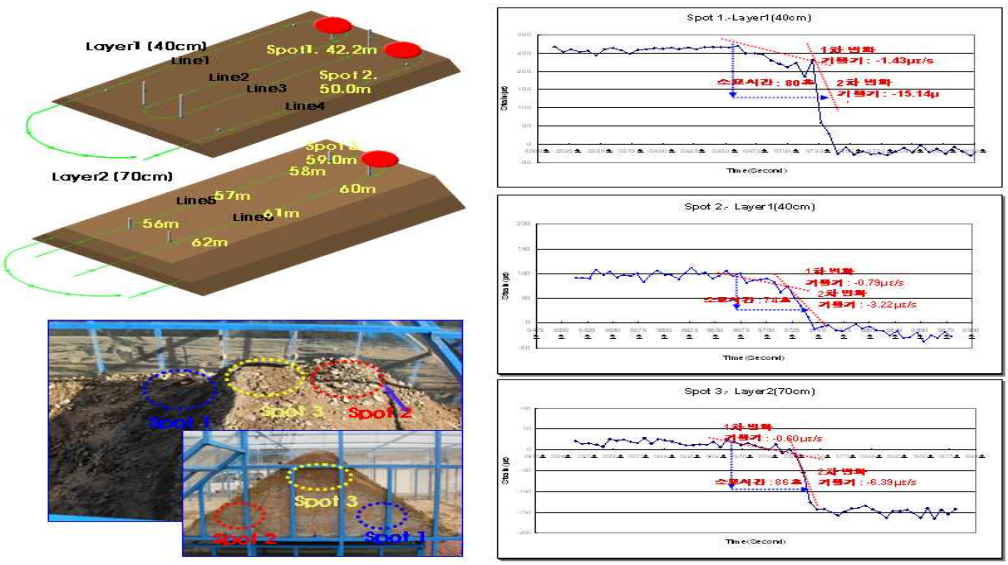
<그림 7> 수위변화 및 제방붕괴 현황

센서별 계측 결과는 FBG 센서의 경우 각 단계별(침투시작에서 붕괴까지)로 구분되는 계측 결과를 나타냈으며, 제방붕괴 직전 수압이 급격히 상승함(단계 6)을 보이고 있으며, 이는 붕괴 조짐을 미리 보여주는 현상이라고 할 수 있다. 따라서 제방붕괴 전 각 센서의 모니터링 결과를 이용하여 제방붕괴 예측 및 사전 조치가 가능할 것으로 판단된다.



<그림 8> FBG 계측 결과

BOTDR 센서는 Layer 1과 Layer 2의 분포형센서 변화는 제외지 수위 상승에 따른 응력 변화와 파괴시 토사 유실로 인한 응력 해방 등 뚜렷한 이력을 보였으며, 붕괴가 발생되어 센서 케이블이 노출된 지점과 인근 2개 지점의 변화를 관찰한 결과 파괴 징후에서 파괴시까지 소요시간이 약 80초로 나타났다.



<그림 10> 분포형 광섬유 붕괴시점 변형률 변화(layer1, 2)

5. 결 론

제방의 안전성 평가 기법 개발을 위해 본 연구에서는 분포형(BOTDR) 센서와 집중형(FBG) 센서 타입을 적용하였다. 적용결과 집중형 센서의 경우 중요 지점에서 간급수압의 변화에 의해 제방 붕괴 양상을 정밀하게 모니터링이 가능한 것으로 나타났으며, 분포형 센서의 경우 광섬유 센서의 온도 변화와 변형에 따라 누수량 및 침식 정도를 정성적으로 계측하는 방식으로 장구간에서 분포적인 특성 모니터링에는 적합하나 제방의 붕괴 기작 예측에는 다소 어려움이 있는 것으로 사료된다.

따라서, 향후 4대강사업 및 하천기본계획 수립시 제방의 안전관리체계 구축을 위해서는 안전성에 위험이 있거나 주요 시설물이 횡단하는 지점에서는 집중형 센서를 적용하고, 장 구간에서의 분포적 특성을 관측에는 분포형 센서를 적용하는 것이 타당한 것으로 사료된다. 또한 하천제방의 취약부의 결정은 취약구간 현장조사 및 연통시험과 더불어 수치모델링을 통하여 사전에 분석하여 선정하여 센서설치 및 운영에 필요한 예산 낭비가 발생하지 않도록 하여할 것이다.

연약지반에 성토되는 제방의 경우, 본 연구 실험과 같이 침하에 대한 영향을 감지할 수 있으므로, 시공 중·후 압밀 침하를 측정하여 제체의 안정성 판단 수단으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 제방 법면부 센서를 설치하여 월류 및 법면부 수위 상승에 의한 침식을 효과적으로 감지 할 수 있도록 하여 안정성 확보가 가능하다. 나아가 제방붕괴 전의 각 센서에서 보여주는 계측치는 사전에 제방붕괴 예측이 가능하며 이를 근간으로 사고예보시스템으로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 건설교통부, “국가하천 배수통문 안전관리시스템 개발 및 운영연구”, 2007.
2. 건설교통부, “하천제방 관련 선진기술 개발”, 한국건설교통기술평가원, 2004.
3. 경북대학교, "센서기술의 현황과 전망", 경북대학교 센서기술연구소 간행, pp. 736-737. 1991
4. 김규호, “도시 하천제방 설계 기술현황 및 문제점 분석”, 도시홍수재해관리기술연구사업단, 2004.
5. 한국시설안전기술공단, “U-Safety for Infrasteructures”, 제5회 국제사회기반시설안전세미나, 2007.
6. Kang Lee, "IEEE 1451: A Standard in Support of Smart Transducer Networking", IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2000.