

제방 안전관리를 위한 Flex센서와 FBG센서의 적용성 검토

Suitability Examination of Flex sensor and FBG Sensor for Levee Safety Management

이 인 제* / 이 은 태** / 강 정 훈*** / 김 동 민**** / 장 기 태*****

Lee, In Je / Lee, Eun Tae / Kang, Jeong Hoon / Kim, Dong Min / Chang, Ki Tae

Abstract

Collapse of the levee surrounding structure(culvert) accounts for 10 % of collapse factors of the river levees. In particular, in 2002, the levee collapse that happened at "Nakdong River" at flood usually happened around culverts. This levee collapse has mechanism that the cavity expands with internal erosion at flood after the pore and cavity are formed between culvert and levee copula which are heterogeneity material. The study regarding the cavity or flowing detection around a culvert for safety management of a river levee is in the proceeding. In this study, the characteristic of two sensors could be figured out through an experiment about displacement measure of Flex sensor and FBG sensor and the decision of more suitable sensor was possible for safety supervision of river levee. According to an experiment result, several characteristics of FBG sensor could be known in consistency of the measure data and minute displacement measure part regarding displacement measure and this characteristic may supplement a shortcoming of Flex sensor at this time.

keywords : levee, Safety management, FBG sensor, Flex sensor

요 지

하천제방의 붕괴 요인중 구조물(배수통문) 주변 제방의 붕괴는 전체 요인의 10% 이상을 차지하고 있으며, 특히 2002년 홍수시 낙동강에서 발생한 제방 유실 지점은 거의 배수통문 주위에서 발생하였다. 이러한 제방 파괴는 이질 재료인 통문 구조물과 제체 접합부 사이에 공극이나 공동이 형성된 후 홍수시 내부 침식으로 인해 공동이 확대되어 발생하는 파괴구조를 가지고 있다. 이러한 상황에서 하천제방의 안전관리를 위해 배수통문 주변의 공동발생 여부 혹은 공동내의 흐름 인지 등을 목적으로 한 연구가 진행되고 있으며, 본 연구에서는 Flex센서와 Fiber bragg grating 센서의 변이 계측에 대한 실험을 통해 두 센서의 특징을 파악하고, 하천제방의 안전관리를 위해 보다 적합한 센서의 결정이 가능하도록 하였다. 실험결과 현 시점에서 변이 계측과 관련하여 계측치의 일관성, 미소변이 계측 등 Flex센

* (주) 한국종합기술 수자원부 상무

Director, Dept. of Water Resource., Korea Engineering Consultants Corp.
(e-mail: lij@kecc.co.kr)

** 경희대학교 토목건축공학부 토목공학과 교수

Pfor., Dept. of Civil Engrg., Kyung Hee Univ., Seoul 446-701, Korea

*** (주)한국종합기술 수자원부 차장

Deputy General Manager., Dept. of Water Resource., Korea Engineering Consultants Corp.,
Dong-Seoul Terminal 6F, 546-4, Guui-dong, Gwangjin-Gu, Seoul, 143-715, Korea

**** (주)한국종합기술 수자원부 전무

Senior Managing Director., Dept. of Water Resource., Korea Engineering Consultants Corp.,

***** 금오공과대학교 토목환경공학부 교수

Pfor., Dept. of Civil Engrg., Kumoh National Institued of Technology Univ., Gumi 703-701, Korea

서의 단점을 보완할 수 있는 FBG센서의 여러 특징을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 하천제방, 안전관리, FBG센서, Flex센서

1. 서 론

하천 제방은 댐, 교량 등과 같이 계획, 설계, 시공, 유지관리 등 모든 측면에서 안전성의 확보가 가장 우선시 된다. 아직까지 국내에서는 제방 붕괴로 인한 초대형 수해는 없었지만 홍수시 크고 작은 제방붕괴가 사회문제화 되어 왔다. 특히 최근 2002년 낙동강 홍수, 태풍 루사, 2003년 태풍 매미로 인한 피해 발생의 주요 요인 중 하나가 바로 제방 붕괴이다.

하천제방의 붕괴 요인중 구조물(배수통문) 주변 제방의 붕괴는 전체 요인의 10% 이상을 차지하고 있으며, 특히 2002년 홍수시 낙동강에서 발생한 제방 유실은 거의 배수통문 주위에서 발생하였다. 이러한 유형의 파괴는 이질 재료인 통문 구조물과 제체 접합부 사이에 공극이나 공동이 형성된 후 홍수시 내부 침식으로 인해 공동이 확대되어 발생하는 파괴구조를 가지고 있으며, 하천제방의 안전관리를 위해 배수통문 주변의 공동발생 여부 혹은 공동내의 흐름 인지 등을 목적으로 한 연구가 진행되고 있다.

이러한 상황에서 도로사면, 터널, 교량, 하천제방 등의 안전관리에 타 센서에 비해 상대적으로 내구성, 경제성, 유지관리 등에 장점이 있는 광섬유 센서의 이용이 활발히 추진되고 있다. 광섬유는 원래 통신용 케이블로 사용되어 왔지만, 요즘에는 이와 같은 광섬유의 계측 및 정보전달성을 이용하여 구조물의 성능을 계측하는 사례가 국내 및 국외에서 활발하게 진행되고 있다. 스웨덴, 영국, 독일, 스위스 등 여러 국가에서 이미 추진하고 있고, 그 중 스웨덴과 영국은 공동으로 20곳 이상의 댐, 제방의 누수·변위 감시시스템 구축에 참여하여, 댐 내부의 광섬유 배치 기술을 포함한 각기 다른 설치기술을 개발하고 있다.

이와 같은 해외 기술수준 및 적용활동에 비해 국내에서는 광섬유센서를 국가 기반시설물의 안전관리에 적용함에 있어서 원천기술과 응용 핵심기술적인 측면에서 기본단계의 수준이며, 아직 실용화 단계로는 접어들지 못하고 있는 실정이어서 시설물 안전관리에 최대한 활용할 수 있는 핵심기술의 개발이 우선적으로 선행되어야 할 필요성이 절실한 시점이다.

특히, 국내 수리시설물에서 광섬유센서의 활용은 극히 미미한 상황이며, 하천제방에 광섬유 센서를 적용하

여 시설물의 안정성 및 위험 사전예측에 대한 실제적인 적용사례는 찾아보기 힘든 경우이다.

본 연구는 Flex센서와 광섬유 센서중 FBG센서의 변이 계측에 대한 실험을 통해 두 센서의 특징을 파악하고, 하천제방의 안전관리를 위해 보다 적합한 센서의 결정이 가능하도록 하였다. 센서를 하천제방에 적용시 요구되는 여러 특성을 검토한 결과 현 시점에서 변이 계측과 관련하여 계측치의 일관성, 미소변이 계측 등 Flex센서의 단점을 보완할 수 있는 FBG센서의 여러 특징을 확인할 수 있었으며, 하천제방에 적용이 용이한 것으로 판단되었다.

2. 하천제방 안전관리

2.1 제방붕괴 원인 및 피해사례 분석

제방은 통상 흙으로 축조되며 홍수위가 제방높이보다 높아지면 월류(overtopping)에 의한 제방붕괴가 발생하고, 또한 계획홍수위 이하의 홍수에 있어서도 침투나 침식으로 인하여 제방이 붕괴되는 경우가 발생한다. 침식 및 월류로 발생하는 제방 붕괴는 홍수시의 유수나 월류수의 소류력에 의해 제체 표면이나 비탈면이 침식되어 제체를 구성하는 토립자가 이동되는 것에 의해 발생하는 것으로, 강우의 침투에 의한 제체 표면의 강도 저하도 깊이 관계하고 있는 것으로 추정된다. 하천제방 관련 선진기술 개발 최종보고서(건설교통부, 2004)에서는 1987 ~ 2003년까지 총 758건의 제방붕괴를 검토하여 제방붕괴 유형을 크게 침식에 의한 붕괴(295건, 38.9%), 월류에 의한 붕괴(300건, 39.6%), 구조물 주변 제방붕괴(76건 10%), 제체 불안정에 의한 제방붕괴(87건, 11.5%)와 같이 크게 4가지 유형으로 구분하고 있다.

특히 구조물 주변 제방붕괴는 수문 등의 제방 횡단 구조물의 주변에서 이질재료의 구조물과 제방의 접촉부간의 부등침하로 인한 공동(空洞)이 형성되어 홍수시에 누수가 발생하고 이 때문에 제방이 붕괴되는 사례도 적지 않다. 본 연구에서는 이와 같이 하천제방 구조물 주변의 파괴양상에 관심을 가지고 세굴에 의한 공동발생 및 변이의 정도를 계측하여 제방 붕괴의 사전징후 파악 방법으로 활용하고자 하였다. Table 1에 구조물 주변 제방붕괴 사례를 구분하여 나타내었고, Fig. 1에 붕괴 메카니즘을 나타내었다.

Table 1. Levee Collapse Due to a Structure Surrounding Water Leakage

Collapse Type	Culvert Surrounding	Bridge Surrounding	Weir Surrounding
Number	48	12	16
Ratio	63.2%	15.8%	21.0%



주) Total : 76, Period : 1987~2003(Development of Advanced Technologies for Levees, 2004)

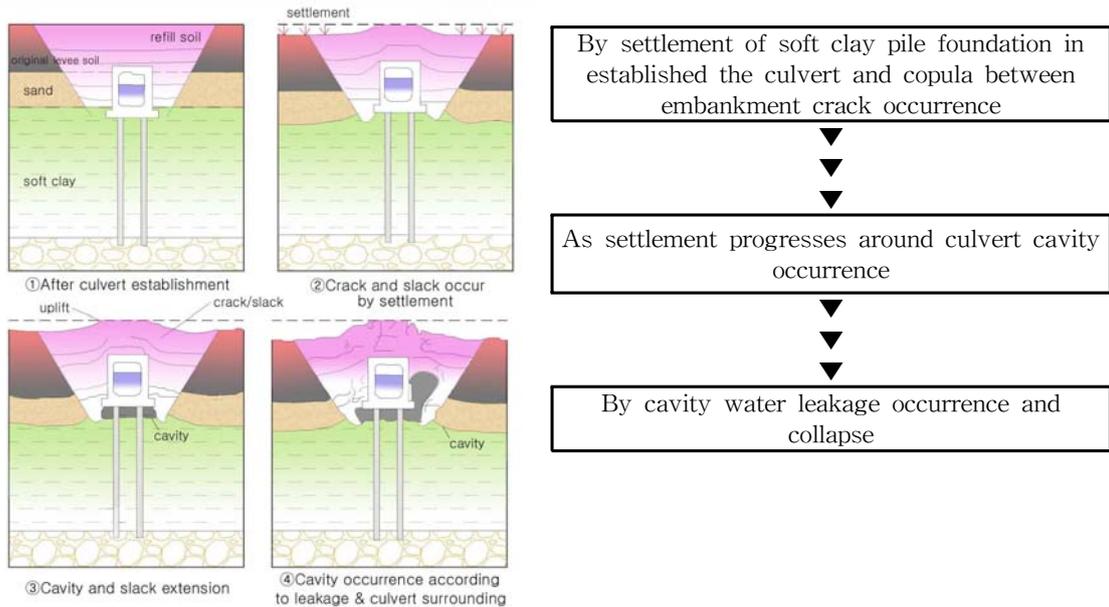


Fig. 1. Levee Collapse Type and Mechanism in Structure Surrounding(Development of Advanced Technologies for Levees, 2004)

2.2 계측센서의 설치

전절에서 언급한 제방 횡단구조물과 제체와의 접속부 공동발생으로 인한 Piping 현상으로 발생하는 제방 붕괴 현상의 안전관리를 위해 Fig. 2와 같은 형태의 센서 설치를 계획하였다. 적용대상으로는 하천횡단 구조물(배수문)이 설치된 제체 특히, 연약지반상의 배수구조물에 적합할 것이며, 계측인자로는 공동 발생을 야기하

는 침하 혹은 변이, 공동으로의 유수 침입(흐름) 인지를 목적으로 하였다. 추가적으로 센서에 의한 이상 징후 감지 후 누수로 인한 piping 현상의 사전징후인 제외지층의 나팔관형 소용돌이, 제외지층의 토사유출, boiling 현상 등의 사전징후를 지능형 CCTV로 감시함으로써 2 단계의 감시활동이 가능하도록 계획하였다. 구체적 센서설치 구상은 다음과 같다.

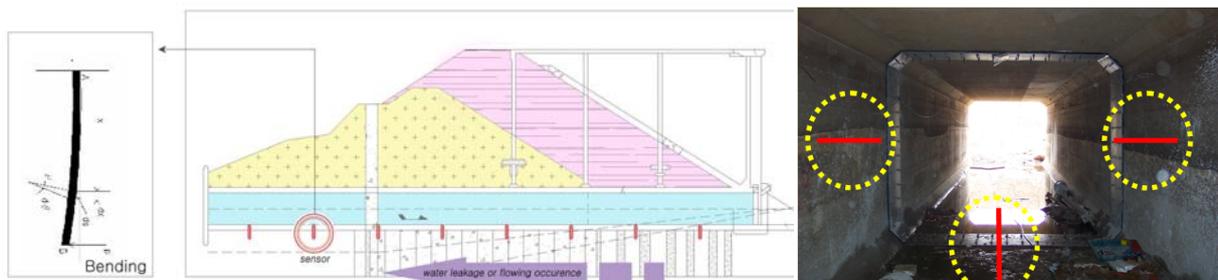


Fig. 2. Sensor Establishment Conception

- 1) 구조물 내부의 바닥과 측면에 직경 20~30mm 크기의 Hole
- 2) 센서 삽입 후 밀봉
- 3) 구조물의 바닥 및 측면의 지반변형(변이) 측정
- 4) 기 형성된 공동내 유수의 흐름인지 혹은 유속 측정

3. 계측센서 검토

본 연구에서는 Flex센서와 광섬유 센서중 FBG센서 두 가지를 검토하였으며, 센서별 특징은 다음과 같다.

3.1 Flex센서

Flex센서는 휘어짐 정도를 측정하는 센서로서, 평평한 상태에서 약 10K Ohm의 저항값을 나타내며 90도 휘어진 상태에서 15K ~ 30K의 전기 저항값을 가진다. Flex센서는 단순기하(직각, 원) 운동계가 아닌 유연한 물체의 움직임 감지용으로 사용하며 생물체의 더듬이와 비슷한 역할을 하므로 Robot 제작시 촉각 센서로 활용되고 있다.

수평방향으로 대칭한 두 조의 도전성 박막이 휘어짐에 따른 변형률이 전기저항의 변화로 나타나는 원리이며, 측정하고자 하는 모재 경사의 변화를 Curvature로 표시가 가능하다. Flex센서의 장점은 과도한 변형이 발생하면 측정이 불가능한 기존 센서와는 달리 90° bending 한계까지 측정가능(수평의 경우도 가능)이 가

능하고, 자동원격 측정이 용이하며, 통합관리 시스템 호환이 우수하여 매우 경제적인 것으로 알려져 있다.

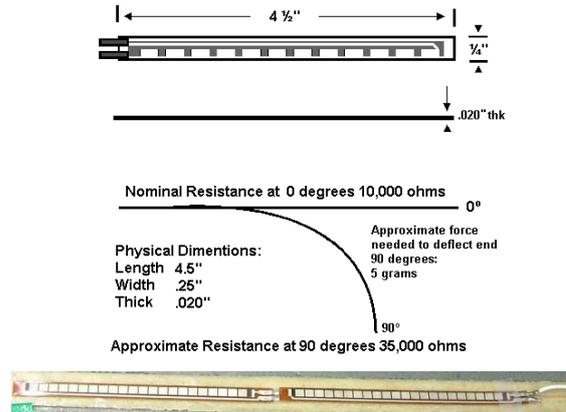


Fig. 3. Flex Sensor

3.2 Fiber Bragg Grating Sensor(FBG Sensor)

광섬유는 유리의 주성분인 실리카(SiO₂)로 구성되어 있으며, 직경 250 μm로 매우 작고, 유연하다. 광원(빛)의 전송로인 Core, Core로부터 빠져나오는 광원을 반사시켜 손실을 막는 Cladding, 유리성분인 광섬유를 보호하는 피복재 Jacket으로 구성되어 있다. 광섬유 센서의 종류는 Brillouin optical time domain analysis, Fiber bragg grating, Optical time domain reflectometry로 구분할 수 있으며 세부 특징은 Table 2와 같다.

Table 2. Type of Optical Fiber Sensor

Division	Feathers		
	BOTDA Sensor (Brillouin optical time domain analysis)	FBG Sensor (Fiber Bragg Grating)	OTDR Sensor (Optical time domain reflectometry)
Theory	scattering change of optical fiber medium measurement	engraving lattice artificially to optical fiber change of wave measurement	damage and fracture measurement of optic fiber cable
Sensor	optic fiber cable (distribution sensor)	point lattice sensor	optic fiber cable (point sensor)
Size(diameter)	Φ0.25mm	Φ0.25mm(5-20mm)	Φ0.25mm
Value	strain(με)	strain(με)	loss(dB)
Range	1%(10,000με)	0.6%(6,000με)	
Time	1~5 minute	200Hz ~	30~60 second
Distance	30km	20km	150km
Merit /shortcoming	<ul style="list-style-type: none"> • strain ratio and temperature simultaneous measurement • start and end point should be linked in equipment. 	<ul style="list-style-type: none"> • strain ratio and temperature simultaneous measurement 	<ul style="list-style-type: none"> • strain measurement • If loss occurs in forehead of optic fiber cable, measurement is impossible in back.

이중 FBG센서는 격자처리가 된 광섬유의 일종으로 측면에 광대역 광원을 투과시키면, 격자에서 파장을 빛의 반대 방향으로 반사시킨다는 사실이 G.Meltz를 포함한 연구그룹에 의하여 발견되면서 개발되었다. 광원을 광섬유에 입사시킬 경우, 브래그 조건에 의한 파장성분은 광섬유 브래그 격자에서 반사되고 나머지 파장 성분은 그대로 통과한다. 광섬유에 전달된 광원의 대역폭은 1,520 nm~1,560 nm로서 광대역을 형성하며, 브래그 격자의 파장성분은 이 영역 내에서 만들어지고 측정되어진다. 광대역을 광원으로 하여 구성된 이 센서 시스템은 통신상에 이용되던 파장분할 다중화(Wavelength-division multiplexing, WDM) 기법을 사용함으로써 실제구조물의 변형 상태를 배열된 여러 개의 센서로 동시에 (다점측정기술) 구현할 수 있다. 구하고자하는 대상은 파장의 파워값이 아니라 파장변화량으로 이는 다음과 같은 식을 통해 변형률 값으로 전환된다.

$$\epsilon = \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B(1 - P_e)}$$

여기서, ϵ : 변형률, λ_B : 브래그 파장(초기 절대치), P_e : 광탄성 계수, $\Delta\lambda_B$: 파장 변화량

4. 계측센서의 성능 실험

구조물 주변 제방붕괴 현상을 효과적으로 관리하기 위한 센서 결정을 위해 여러 가지 센서 유형을 검토하

였으며, 현장(Test Bed)에 적용할 최적의 센서결정을 목적으로 Flex센서와 광섬유 센서중 FBG센서에 대한 성능 실험을 실시하였다. 실험은 실내실험으로 진행하였고, 실험당시 측정대기 온도는 28℃였으며, 다음과 같은 순서에 의해 실시하였다.

4.1 실험 개요 및 순서

굽힘실험(loading and unloading)을 위해 모래를 선택하였고, 재질이 카본인 판(두께 : 1.2 mm, 폭 : 51 mm)에 Flex센서와 FBG센서를 같은 선상에 각 3개씩 Fig. 4와 같은 형태로 부착하였다.

변이의 대, 중, 소를 고려하여 총 3개의 센서를 각각 모재에 부착하였으며, 구리선을 이용하여 3지점에 위치한 각 Flex센서의 한쪽 끝을 연결하였고, FBG센서는 3개의 센서를 하나의 광섬유로 연결하였다. Flex센서의 중앙에 해당하는 평행지점에 FBG센서를 부착하여(같은 선상) 변위에 대한 두 센서의 반응을 파악하고자 하였으며, 변이의 크기는 센서1, 센서2, 센서3의 순으로 나타나도록 하였다.(센서의 번호는 실험선반 쪽부터 센서3, 센서2, 센서1로 명명함.)

실험 방법은 Fig. 5와 같이 센서가 부착된 판에 인위적인 힘을 가한(loading) 후 제거(unloading)하는 방식으로 변형을 유발시켰으며, 이때의 변위를 Fig. 4와 같은 장비를 이용하여 측정하였다. 변위는 5 mm씩 최대변위 125 mm까지 재하(loading)와 제하(unloading)를 총 4회 반복하여 측정하였으며, 변위발생시 획득되는 데이

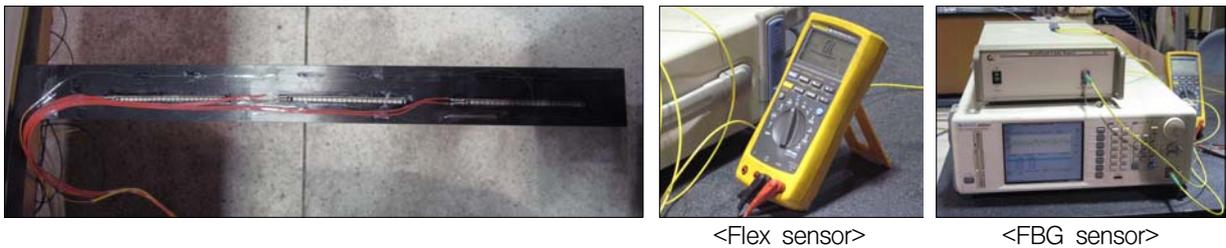


Fig. 4. Manufacture Sensor and Equipment

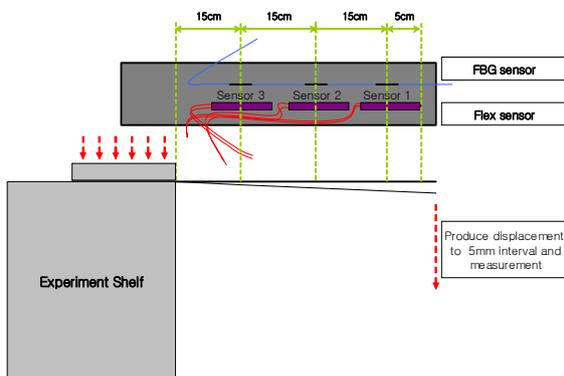


Fig. 5. Experimental Method

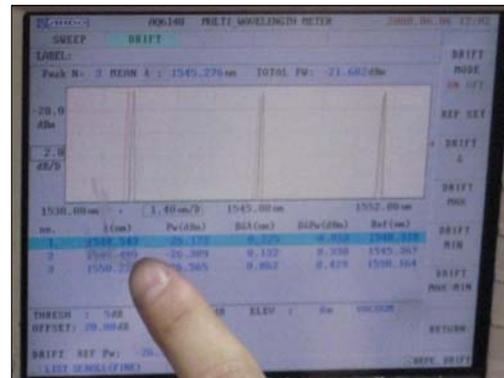


Fig. 6. Wave Change of FBG Sensor

타의 물성치는 Flex센서는 저항(Ω), FBG센서는 파장 λ (nm)을 측정하여, 모재의 변위에 대응시켜 관찰하였다. Fig. 6에 FBG센서의 측정장비에 나타난 쌍봉형태의 파장 변화 양상을 나타내었다.

4.2 결과

4.2.1 실험 결과

본 연구에서는 총 4회에 걸쳐 반복실험을 실시하였으며, Fig. 7에 각 단계별 실험 결과를 나타내었으며,

각 단계의 실험마다 유사한 경향을 확인할 수 있었다. 실험결과를 통해 확인할 수 있는 사항을 종합하면 다음과 같다.

첫째, Fig. 7의 각 회의 실험결과 그래프에서 볼 수 있듯이 센서1과 센서2, 센서2와 센서3의 사이의 변동폭이 FBG센서의 경우 일정한 반면 Flex센서의 경우 일정치 않음을 확인할 수 있어, 일정한 변위 발생에 따른 계측 Data의 이관성에서 FBG센서가 Flex센서보다 상대적으로 우수함을 각 단계마다 확인할 수 있었다.

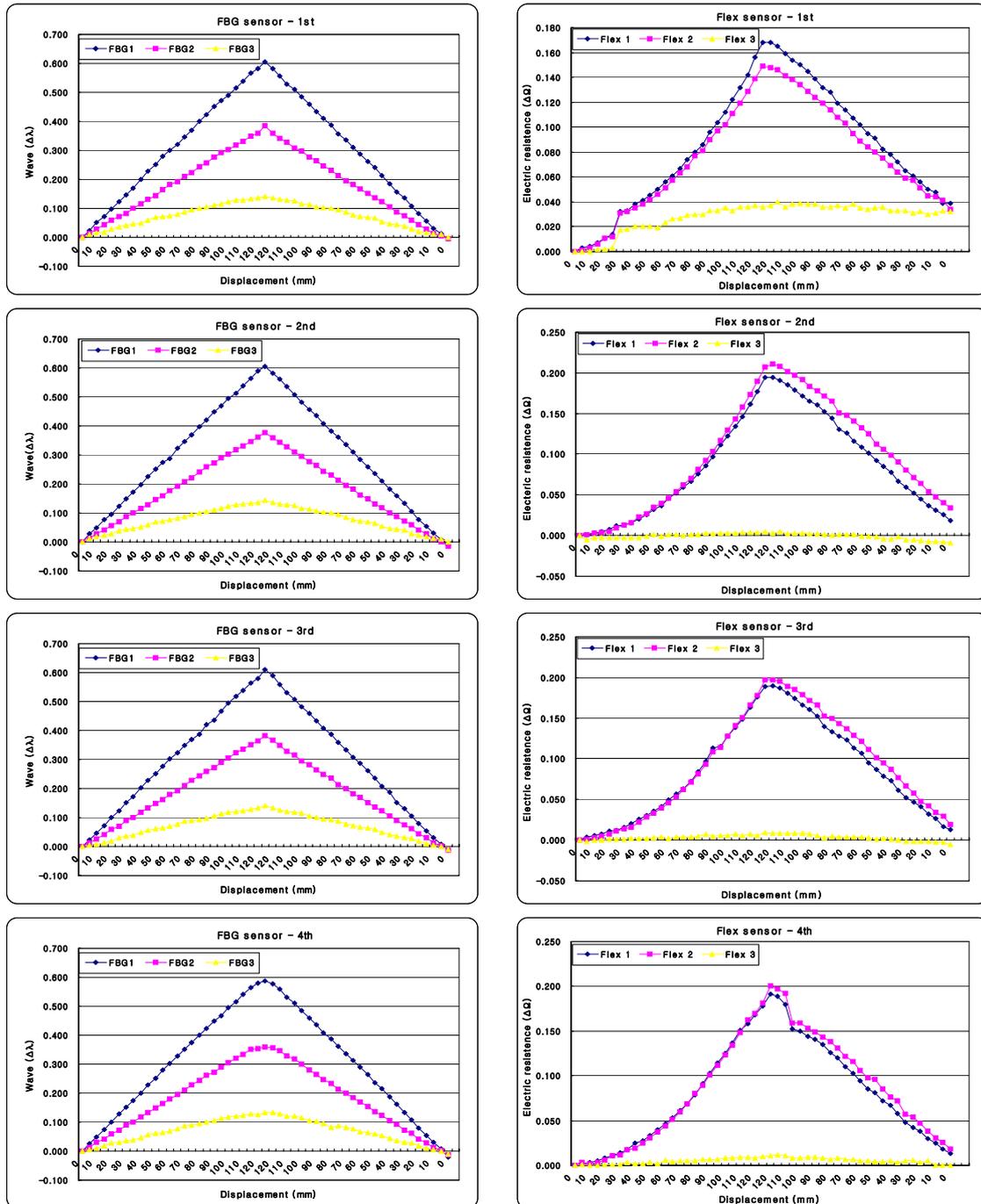


Fig. 7. Flex Sensor and FBG Sensor Performance Comparison Experiment

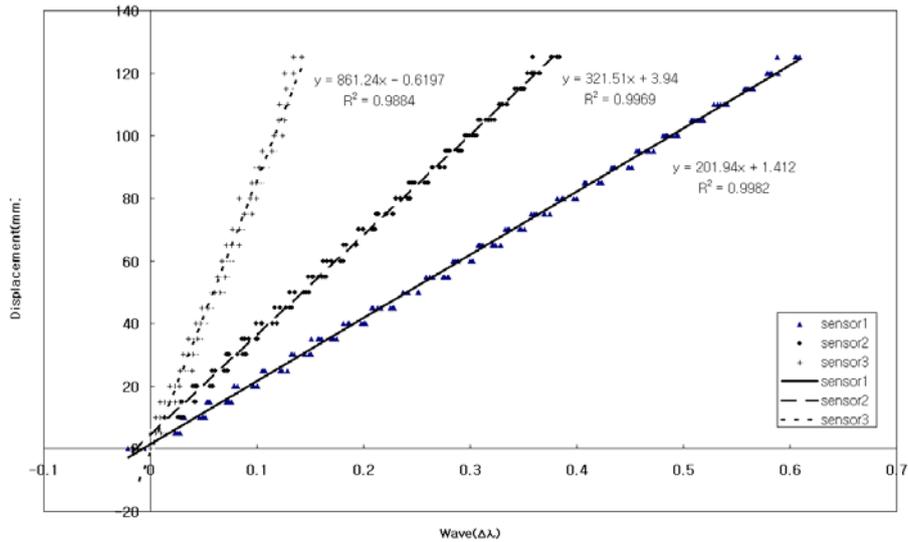


Fig. 8. FBG Sensor Measuring and Relationship of Displacement

둘째, Fig. 7의 왼쪽은 FBG센서의 실험결과, 오른쪽 선상은 Flex센서의 실험결과를 나타내고 있다. 이에서 볼 수 있듯이 왼쪽 FBG센서의 경우 재하(loading) 구간이 변이 증가부와 제하(unloading) 구간의 변이 감소부의 일정 변위에서의 계측값이 거의 동일하여 일정한 경향을 보이는 반면, Flex센서는 재하시(loading) 보다는 제하시(unloading)에 상대적으로 큰 값을 나타내었고, 모든 경우에서 그러한 양상을 나타내었다. 그 중 4회차 실험에 있어서는 변이 증가부와 감소부의 경향이 두드러지게 달리 나타났다.

셋째, 본 연구에서 제작된 실험센서는 변이의 크기가 센서1, 센서2, 센서3의 순으로 나타나도록 하여 그 때의 변이에 대한 전기저항 및 파장변화를 측정하였다. 4회에 걸친 반복실험결과 FBG센서는 의도된대로 센서1에서 최대값, 센서2에서 중간값, 센서3변에서 최소의 변이에 해당하는 파장변화값을 얻을 수 있었다. 그러나 Flex센서의 경우 1회차 시험을 제외한 2, 3, 4회 실험에서 중간값에 해당하는 센서2의 값이 센서1(제일 큰 변위)의 측정값보다 비슷하거나 오히려 큰 값을 나타내는 역전 현상을 나타내었다.

넷째, 변위량이 상대적으로 작은 센서3의 경우 Flex센서의 경우 전회차의 실험에서 반응정도가 FBG센서에 비해 작고 경향 또한 일정하지 않음을 확인할 수 있었다.

4.2.2 FBG센서 계측치와 변위의 관계

실험을 통한 측정 자료 중 FBG센서 1, 2, 3의 계측치를 이용하여 파장변화량($\Delta\lambda$ -X축)과 변위(y축)의 관계를 Fig. 8에 나타내었다. 그래프에서 볼 수 있듯이 $\Delta\lambda$ 와 변위는 Flex센서와는 달리 $\Delta\lambda$ 가 증가함에 따라 변

위량도 증가하는 형태의 비례 선형관계를 갖는 것으로 나타났으며, 센서 1의 경우 $y = 201.94x + 1.412$ 의 식으로 표현할 수 있었다. 이러한 선형적 관계는 현장의 변이 계측에 있어서 상당한 이점을 갖는 특성이라 할 수 있을 것이다. 그러나 본 실험은 실내 실험인 점, 현장의 기후상태, 센서가 물과 접촉했을 경우 등이 센서에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 고려가 없었던 점을 충분히 주지해야 할 것이고, 향후 현장 실험을 통해 고려되어야 할 것이다.

5. 결 론

이상의 실험을 통해 Flex센서와 FBG센서의 성능을 비교하였다. 실험 결과 Flex센서는 일정한 변위 발생에 따른 계측치의 이관성에서 FBG센서에 뒤지는 특성을 나타내었으며, 재하(loading)와 제하(unloading)의 경우 일정 변위에서의 계측값이 일정치 않아 초기변위를 기준으로 일정한 변위가 발생하였을 경우 일관성 있는 데이터의 값을 획득하기 어려운 단점을 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

또한 Flex센서의 경우 각각의 센서마다 일정 변형에 대한 감도 즉, data의 변화 정도가 다르다는 것을 알 수 있었으며, 반복실험에서 각 센서별 반응 정도가 상대적으로 일관성이 떨어짐을 확인할 수 있었다. FBG센서의 계측치와 비교하여 볼 때 Flex센서의 값이 상대적으로 크게 표현되어 Flex센서는 향후에 추가적인 보완을 하여 보다 정확한 센서로 사용가능 하리라 판단되었다. 추가적으로 변위량이 미미한 경우 FBG센서가 Flex센서보다 반응을 감지하는데 상대적으로 장점을 가지고 있음을 실험을 통해 알 수 있었다. 이러한 실험결과로

FBG센서의 상대적 우수성을 확인하였으며, 현장 설치 시 유지관리, 내구성 등의 면에서 FBG센서의 우수성이 지속적으로 발표되고 있는 점 등을 고려할 때 FBG센서의 장점을 확인할 수 있었다. 이러한 실험의 결과는 현재 진행중인 “국가주요시설물 안전관리 네트워크 시범 구축 및 운영시스템개발” 사업중 하천제방 분야에 유용한 자료로 활용될 수 있을 것이며, 사업이 성공적으로 완료될 경우 국가주요시설물 안전관리에 큰 몫을 할 수 있을 것으로 기대된다.

그러나 본 실험은 실내 실험에 국한 되어 있으므로 향후 현장의 기후 및 센서가 물과 접촉했을 경우에 대

한 영향, 하천 수위나 지하수위 변화에 따라 센서가 계측한 제방내 구조물의 변동 기록 분석 등이 현장(Test Bed) 실험을 통해 고려되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

한국건설기술연구원 (2004). **하천제방 관련 선진기술 개발 최종보고서**, 건설교통부, pp. 34-40.

(논문번호:08-83/접수:2008.07.24/심사완료:2008.10.14)