

## 광섬유 격자 센서 기술



**이 상 배 (KIST 광기술연구센터)**

'75 - '83 서강대학교 물리학(학사)  
 '83 - '85 서강대학교 물리학(석사)  
 '89 - '92 서강대학교 물리학(박사)  
 '85 - 현재 KIST 책임연구원  
 '00 - 현재 KIST 광기술연구센터 센터장

### 1. 서 론

광섬유 센서는 광섬유를 통과하는 빛의 진폭, 위상, 혹은 편광 등을 이용하여 측정하고자 하는 물리량의 변화를 감지함으로써 구조물의 거동관측, 자기장의 세기, 회전율, 온도, 압력, 수위, 음향, 가스농도 등을 측정할 수 있다. 광섬유 센서는 빛의 변화된 신호를 측정하는 방식에 따라, 단순히 광섬유를 통과하는 빛의 양을 측정하여 변화된 물리량을 판정하는 세기형(intensimetric)센서와 Mach-Zender형, Michelson형, Fabry-Perot형 등의 간섭형(interferometric)센서 두 가지로 나눌 수 있다. 세기형 센서는 현재는 그리 많이 사용되지 않으나, 간섭형 센서는 보통 단일 모드 광섬유를 사용하여 일반 케이블들 보다 높은 감도로 측정되어야 하는 음향(acoustic)센서나 자기장(magnetic field)센서 등에 사용된다.

이와 다른 형태인 광섬유 격자(Fiber Bragg Grating, FBG)를 이용한 센서는 새로운 광섬유 센서로 최근 각광받고 있다. 광섬유 격자(FBG) 센서는 광섬유 코어에 주기적인 굴절률 변조를 주어 특정 파장의 빛을 반사시키는데, 삽입 손실이 적고 파장 선택도가 높은 특성을 보이므로 광섬유 센서 기술 중에서 최근 들어 많은 연구가 진행 중인 기술이다. 광섬유 내에서 빛의 전파 원리는 굴절률이 높은 물질에서 낮은 물질로 빛이 진행될 때, 그 경계면에서 일정한 각도 내의 빛이 모두 반사되는 전반사의 원리이며, 광섬유 코어(core)로 입사된 빛은 굴절률이 높은 코

어층과 굴절률이 낮은 클래딩(cladding) 층의 경계면에서 반사되어 광섬유 코어부분을 따라 전파되게 된다. 이러한 광섬유의 주성분은 실리카 유리로 이루어져 있으며, 그 구조는 굴절률이 약간 높도록 게르마늄을 첨가한 광섬유 코어부분과 중심을 보호하는 클래딩 부분으로 구성되어 있다. 광섬유 격자소자는 게르마늄이 첨가된 광섬유 코어 부분이 자외선 영역의 빛에 노출되면, 굴절률이  $10^{-5}$  정도 증가하게 되는 현상을 이용하여 주기적인 굴절률 변화를 갖는 격자를 광섬유에 새긴 것이다. 광섬유 격자소자는 광통신이나 광섬유 센서로 뛰어난 성능을 나타내는 새로운 소자로 개발되었으며, 일부 개발품은 이미 상품화되어 판매되고 있을 정도로 연구가 활발하게 진행되고 있다.

광섬유 격자 센서와 간섭형 광섬유 센서의 큰 차이점은 광섬유 간섭계 센서는 외부 변형에 기인하는 경로차(optical phase)에 의한 간섭 신호로부터 변형률을 측정하는 반면에 광섬유 격자 센서의 경우는 측정된 변형률의 정보가 경로차 대신 파장(wavelength)의 변화로 나타난다는 것이다. 가해진 물리량에 대한 브래그 파장의 변화율은 선형적이며 따라서 파장의 변화량을 정밀히 측정하면 가해진 물리량에 대한 정보를 역으로 계산해 낼 수 있다. 또한 변형률이 파장의 변위로 측정되기 때문에 간섭계 광섬유 시스템에서 흔히 발생하는 광원, 광분할기, 그리고 광 결합기에 의한 광 세기의 요동현상에 무관하고 변형의 절대량 측정이 가능하다. 또한 광섬유 격자 센서는 조금씩 파장을 달리한 광섬유 격자를 이용하여 다중점(multi-point) 센서로의 확장이 용이하며 이를 이용하면 교량 및 건축물의 사전 감시 시스템을 구성할 수 있고, 또한 복합 구조물에 대한 진단이나 음향센서 어레이로서 성공적으로 사용될 수 있다. 이러한 광섬유 격자 센서는 현재 실제 교량이나 터널 등과 같은 토목 구조물의 감시 시스템으로 사용되기 시작하였으며 그 적용 범위는 점차 늘어날 것이다.

## 2. 광섬유 격자 센서 원리

광섬유 브래그 격자는 중심파장이 여러 가지 물리량들에 대하여 다양하게 변화하는 소자로, 광섬유 격자에 변화를 일으키는 원인들은 다음과 같다.

### 2.1 변형률(Strain)

가해지는 종방향 변형률  $\Delta \varepsilon$ 에 대하여, 광섬유 격자의 파장이동  $\Delta \lambda_{BS}$ 는 아래의 식과 같이 표현한다.

$$\Delta \lambda_{BS} = \lambda_B (1 - \rho_a) \Delta \varepsilon \dots\dots\dots (1)$$

광섬유의 광탄성 계수  $\rho_a$ 는 다음과 같다.

$$\rho_a = \frac{n^2}{2} \{ \rho_{12} - \nu(\rho_{11} - \rho_{12}) \} \dots\dots\dots (2)$$

여기서  $\rho_{11}, \rho_{12}$  는 변형률 광학 텐서(strain-optic tensor)의 성분이며,  $n$ 은 광섬유 코어의 굴절율이고  $\nu$ 는 포와송비이다. 일반적으로 윗 식의 광탄성 계수  $\rho_a$ 는 Germa-nosilicate glass의 경우 약 0.22값을 가진다. 실리카 광섬유의 경우, 변형률에 대한 파장의 반응도는 800 nm와 1.55  $\mu\text{m}$ 에 대하여 각각 0.64 pm/ $\mu\text{strain}$  과 1.15 pm/ $\mu\text{strain}$  로서 측정되었다고 보고된 바 있다. 위의 식들에 의해 가속도, 초음파, 힘의 측정도 응용 계측될 수 있는 값이다.

### 2.2 온도(Temperature)

온도의 변화에 대하여 파장변화  $\Delta \lambda_{BT}$ 는 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$\Delta \lambda_{BT} = \lambda_B (1 + \xi) \Delta T \dots\dots\dots (3)$$

여기서  $\xi$ 는 온도에 의한 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열 광학 계수(thermo-optic

coefficient)이다. 실리카 광섬유에 대하여 800 nm 와 1.5 $\mu$ m에서의 온도에 대한 파장의 변화는 각각 6.8 pm/ $^{\circ}$ C 와 13 pm/ $^{\circ}$ C이다. 표 1은 광섬유의 파장에 따른 스트레인과 온도에 대한 반응 정도를 나타낸다.

표 1. 광섬유의 파장에 따른 변형을 및 온도에 대한 반응

Wavelength [ $\mu$ m]	Strain sensitivity [pm/ $\mu$ strain]	Temperature sensitivity [pm/ $^{\circ}$ C]
0.83	~0.64	~6.8
1.3	~1	~10
1.55	~1.2	~13

### 3. 광섬유 격자 신호의 복조

광섬유 격자 센서 시스템에서 복조(demodulation or interrogation)는 센서로부터 돌아온 브래그 파장의 변화를 측정하는 것을 말한다. 물리량의 변화에 의한 브래그 파장의 이동을 정확히 측정하는 것은 센서의 성능에 있어서 가장 중요한 문제이다. 보다 정확한 복조를 위한 요구 사항은 다음과 같다. 먼저, 해상도가 높아야 하며, 측정 범위가 넓어야 한다. 많은 응용 분야에서 수 pm의 해상도를 가져야 하며, 그에 따른 파장 범위는 10<sup>3</sup>배 이상은 되어야 한다. 즉 수 nm에서 수십 nm 정도를 요구한다. 또한, 복조 시스템은 기존의 전기 센서와 경쟁하기 위해 가격이 저렴해야 하며, 센서의 다중화가 쉬워야 한다.

보통 사용되는 방법은 optical spectrum analyzer를 이용하여 파장을 검출하는 방법이지만 이 계측기의 해상도가 일반적으로 0.05nm 정도이므로 고해상도를 요구하는 센서 시스템에서는 사용하기가 힘들다. 따라서 고해상도의 복

조 방법을 이루기 위한 많은 연구가 진행중이다. 일반적으로 파장 이동을 측정하는 방법은 선형 필터(linear edge filter)를 이용하는 방법, 파장 가변 필터(tunable filter)를 이용하는 방법, 간섭계를 이용한 방법, 레이저를 이용하는 방법이 있다.

그림1-(a)와 같은 선형 필터(linear edge filter)를 이용하여 복조하는 방법은 돌아오는 빛을 파장에 따라 선형적으로 증가하는 필터에 통과시켜 그 빛의 세기로서 빛의 파장을 측정하는 방법이며 이 방법은 동적 물리량의 변화를 측정할 수 있고, 저렴하게 시스템을 구성할 수 있지만 해상도가 그리 높지 않다. 또한 다중화 할 경우에 각 센서의 브래그 파장마다 선형 필터가 있어야 하므로 경쟁력이 떨어진다. 그림 1-(b)는 선형 필터 대신 파장 가변 필터를 사용하여 필터와 반사된 빛이 합쳐져 그 빛의 세기를 측정하는 방법으로 필터의 중심 파장과 반사된 빛의 중심 파장이 일치할 경우 가장 큰 출력이 나타나며, 민감도가 매우 좋으며, 다중화 하기에 편리하지만 일반적인 파장 가변 필터의 스캐닝 속도가 매우 느리며 필터의 파장 가변을 조절하는 전자회로가 필수적이다. 또 그림 1-(c)와 같이 돌아오는 빛을 Mach-Zender 와 같은 간섭계를 통과시켜서 나온 두 빛의 위상 차이를 이용해 파장 이동을 측정하는 방법으로 해상도가 매우 높지만 측정할 수 있는 파장 범위가 좁아 다중화 하기가 매우 어렵고, 주위 환경에 많은 영향을 받고 값이 비싼 단점이 있다.

광섬유 격자 센서를 이용한 인장력의 측정에서는 높은 해상도를 위해 간섭계를 이용한 방법이나 광원 또는 센서 헤드로서 레이저를 이용한 방법을 사용한다. 동적인 인장력 측정에는 선형 필터를 사용하는 것이 매우 유리하다. 하지만 선형 필터를 사용하는 방법은 센서의 다중화를 위해서는 적합하지 않다.

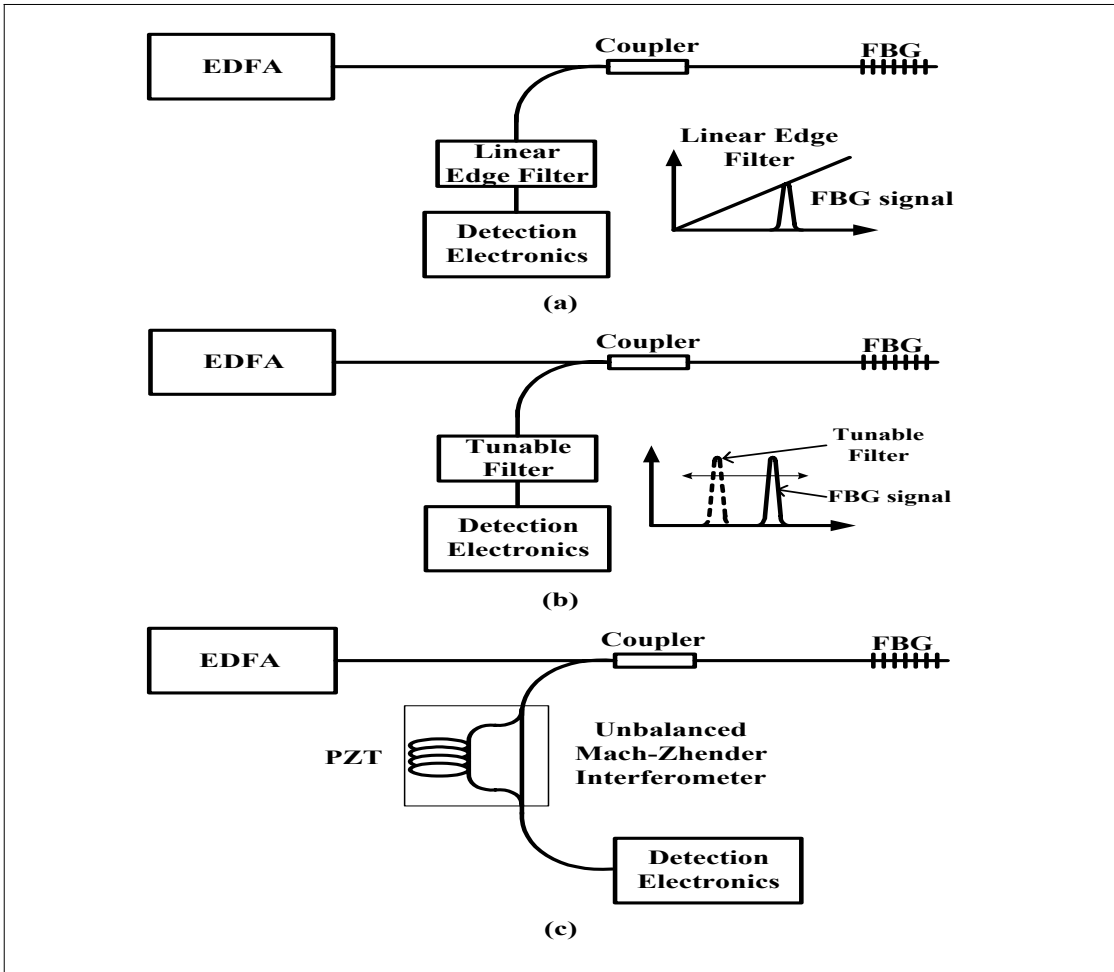


그림 1. 광섬유 격자 센서의 복조 방법 : (a) Linear Edge filter방법, (b) Tunable filter 방법, (c) MZI 방법

#### 4. 광섬유 격자 센서 시스템

광섬유 격자 센서를 이용하여 실 구조물의 변형을 측정하기 위해서는 실 구조물에 따라 변형률과 그 크기가 각각 다르기 때문에 분해능이 높고, 측정대역이 넓어야 하며, 다중 센싱이 가능한 센서시스템을 필요로 한다. 다중 센싱은 광섬유 격자의 성질에 따라 항상 가능하며, 한 예로서, 광섬유 격자 센서시스템을 아래 그림 2와 같이 제작할 수 있다.

광대역 광원으로써 EDFA(Erbium Doped

Fiber Amplifier)를 사용하며, 광원에서 출력된 빛은 circulator를 이용하여 FBG array로 진행되고, 각각의 FBG에서 반사되어 나온 신호는 circulator를 통과한 후 파장가변 필터에 입사된다. 파장가변 필터는 14bit binary code의 디지털신호에 의해 정밀하게 제어되며, 파장가변 필터를 통과한 계측 신호는 광검출기에 의해 측정된다. 그림 3은 제작된 광섬유 격자센서 시스템을 보여주고 있으며, 모든 신호는 LabVIEW를 통해 실시간으로 제어 및 측정되며, 측정 데이터는 worksheet에 온라인으로 저장된다(그림 4).

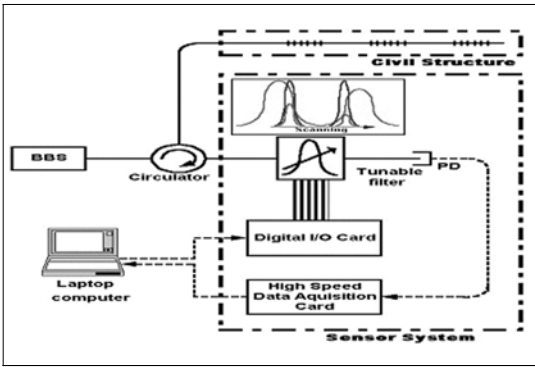


그림 2. 제작된 광섬유 격자 센서 시스템의 개략도



그림 3. 광섬유 격자 센서 시스템

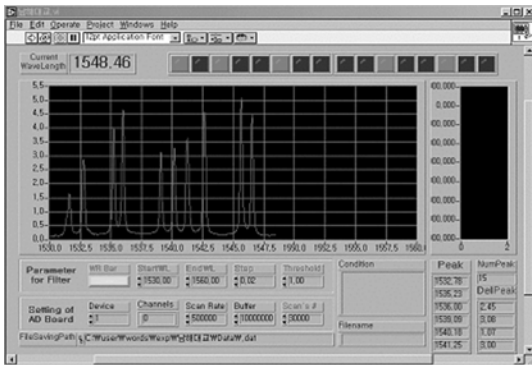


그림 4. 시스템 구동용 LabVIEW 화면

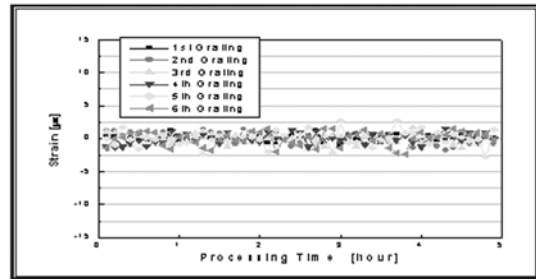


그림 5. 광섬유 격자 센서 시스템의 안정도

이 시스템의 성능은 파장가변 필터의 주사속도와 선폭분해능에 의해 좌우되며 수일간의 안정성 실험을 수행한 결과 그림 5에서 보는 바와 같이 최대  $\pm 2\mu\epsilon$ 의 오차를 갖는 것을 보였다.

## 5. 광섬유 격자 센서의 실교량에의 적용실험

### 5.1 남해대교의 하중재하 실험

FBG 센서 시스템을 적용한 남해대교는 1973년 5월 현대건설에 의해 완공된 국내 유일의 현수교로서 두 개의 주탑에 의해 상판이 3부분으로 나누어져 있다. 다리의 상판은 강상판 주형이며, 두 주탑과 하동, 남해와 연결된 측경부는 각각 128m씩이며, 두 주탑 사이의 중앙상판의 길이는 404m이다.

현대 건설에 의해 위탁 관리된 본 교량이 주



그림 6. 남해대교 전경

표 2. 하중 재하 상태

	Loadcase1	Loadcase2	Loadcase3
재하 상태	L/4+L/2 각1대 재하	L/2 2대 병렬 재하	L/4 2대 병렬 재하

형보강을 완료하여 구조적 안정성이 보장되었고, 이의 확인을 위해 FBG 센서 시스템에 의한 처짐 측정을 수행하였으며 레이저에 의한 처짐 측

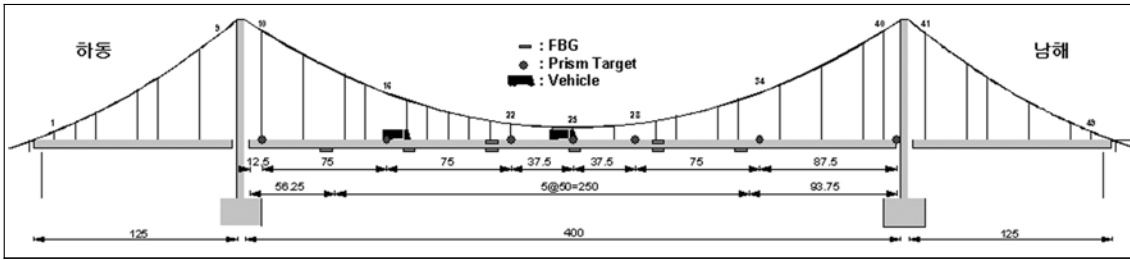


그림 7. 광섬유 격자 센서, 측량 타겟 및 재하차량 위치

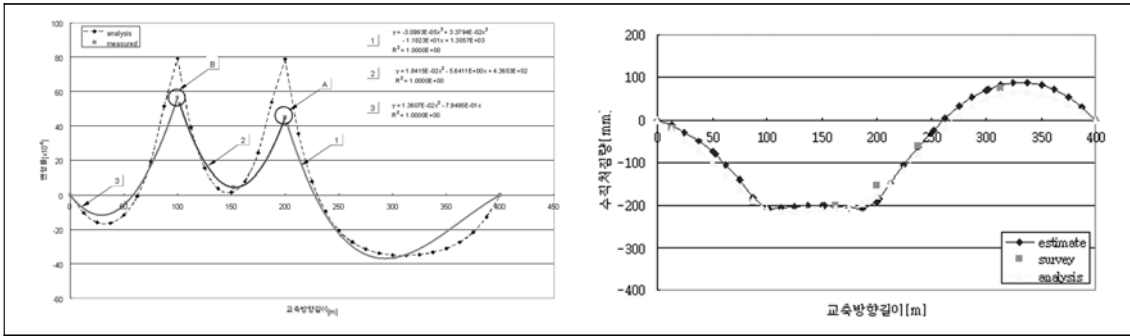


그림 8. Loadcase1에 대한 변형률 함수 및 처짐 곡선

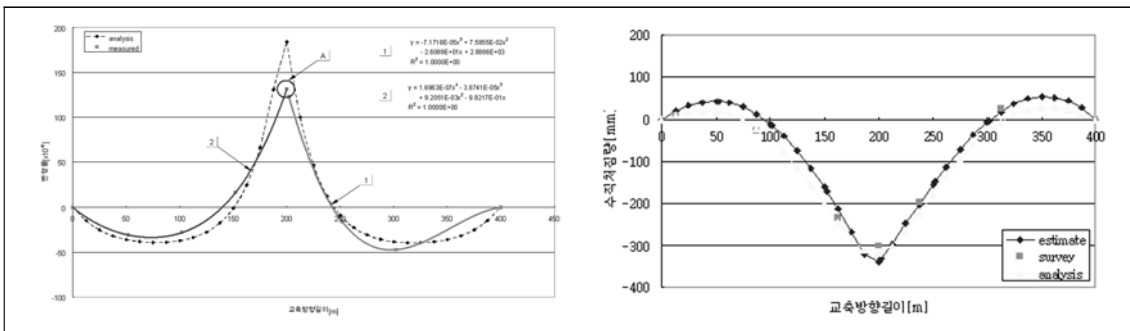


그림 9. Loadcase2에 대한 변형률 함수 및 처짐 곡선

정도 동시에 수행하였다.

현수교의 처짐 추정 기법을 실험적으로 검증하기 위하여 남해대교에 대해 차량 재하 시험을 수행하였다. 현장 재하 시험에서 얻을 가장 중요한 데이터는 보강형의 변형률로서 광섬유 격자 센서를 이용하여 측정하였으며, 추정된 처짐 곡선과의 비교를 위해 초정밀 자동 광학식 측량기를 사용하였고 25톤 트럭 두 대를 재하하였다. 표2는 각각의 Loadcase를 나타내며 그림 7은 광섬유 격자 센서 등의 설치 위치를 보인다.

### 5.2 하중재하에 의한 처짐추정 및 결과분석

현장 재하 시험에서 얻은 이산화된 각각의 변형률을 회귀분석을 수행하여 중앙경간 보강형의 변형률 곡선을 계산하였다. 구한 변형률 함수와 계산한 장력 및 주케이블의 형상은 계산에 의해 처짐을 추정한다. 그림 8,9는 각 Loadcase에 대한 변형률 함수 및 추정된 처짐 곡선을 나타낸다. 변형률 그래프에서 A, B는 구간별 회귀분석을 위한 기점이며, 1, 2, 3은 구간별 변형률 함수를 나타낸다.

처짐 결과를 살펴보면 추정된 곡선은 해석에 의한 처짐 곡선과 실제의 거동을 나타내는 측량값과 동일한 양상을 나타낸다고 할 수 있다. 아래의 표 3은 측량 타겟을 설치한 위치에서의 처짐값과 측량값을 정량적으로 비교한 것이다. 차량이 재하된 인접한 위치에서의 오차는 상대적으로 적었다. 처짐 추정의 적정성에 대한 유효한 판단 기준은 하중 재하점과 같이 대변위를 발생하는 위치에서의 비교가 전체적인 형상을 추정하는데 합리적인 결과를 준다고 할 수 있으며 이러한 위치에서의 처짐 추정 오차는 1~25%의 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

계측된 오차의 원인은 활하중에 의한 장력과 처짐은 서로 연관되어 있는데 이를 해석에 의해 결정된 장력값을 가정하였기 때문에 오차 발생의 원인이 되었다고 판단되며, 이에 대한 면밀한 연구가 필요하다고 생각된다. 그러나 현재의 처짐 형상에 대한 상대적인 변화를 파악하기 수단으로써의 가치를 생각할 때 상대적으로 비선형성의 영향이 적어지기 때문에 처짐 이력을 파악하기 위한 수단으로써의 역할은 충분하다고 사료된다.

### 5.3 지반 보강용 파일(pile)의 하중재하 실험

아파트나 구조물의 건설에 있어 지반의 강화를 위해 파일을 설치하는 것이 필요한데 보통

말뚝이라고 부른다. 이러한 파일을 지반에 설치 후에 파일의 거동을 측정하여야 한다. 파일을 설치하는 지반의 상태와 파일 설치 방법에 따라 그 거동은 다른 특성을 나타낸다. 본 실험을 수행하기 전 우선 실내 모형실험을 통해 광섬유 격자 센서의 특성을 파악한 후 현장실험을 수행하였다. 실내시험으로는 FBG 센서와 일반 게이지와의 비교를 위해서 강봉(steel)과 몰탈 공시체에 FBG 센서와 전기저항식 스트레인 게이지를 병행 설치한 후 만능재료시험기를 사용하여 인장실험과 압축실험을 시행하였으며 그 측정 결과로부터 스트레인 센서로서의 FBG 센서의 적합성을 평가하였다. FBG 센서의 스트레인 게이지로서의 적합성을 검증한 후에는 모형 말뚝을 제작하여 말뚝의 하중 전이(load transfer) 해석을 병행하기 위해 말뚝길이에 따라 몇 지점에 FBG 센서와 전기저항식 스트레인 게이지를 함께 설치하여 인장 재하시험과 압축 재하시험을 수행하였다. 몰탈 압축실험에서는 FBG 센서와 전기저항식 스트레인 게이지의 측정값이 약간의 차이를 보이나 전체적인 경향은 유사한 결과를 보이고 있다.

현장 실험은 상계동에 있는 아파트 건설 현장에서 행하여졌는데 말뚝은 직경 400mm, 길이 10m인 PHC 말뚝이며, 시공 방법은 SAIP 공법이다. 그림 10의 개략도와 같이 광섬유 브래그 격자 센서는 총 6개 point에 대해 120cm 간격으

표 3. 오차분석 [mm,%]

하중측주탑 위치[m]		12.5	87.5	162.5	200	237.5	312.5	400
Loadcase1	추정값	-12	-180	-201	-192	-64	83	0
	측량값	-19	-192	-199	-154	-63	75	-2
	오차(%)	35	6	1	25	2	10	-
Loadcase2	추정값	19	13	-212.5	-340	-201	18	0
	측량값	9	-27	-235	-301	-197	25	-2
	오차(%)	113	-	10	13	2	28	-

로 2열을 설치하였으며, 기존 센서인 진동현식 스트레인 게이지(VW)와 함께 설치하였다. 그림 11은 이 모습을 보이고 있는데 가운데 있는 것이 진동현식 스트레인 게이지이고 광섬유 센서는 철근에 홈을 파고 부착하여 보이지 않으며 다만 광신호를 전달하는 광섬유 라인만이 좌우에 설치되어 있다.

본 실험에서는 설치 후 삽입과정에 광섬유가 손상되어 FBG 센서로부터 신호를 측정하지 못할 가능성에 대비키 위해 말뚝의 머리 쪽과 하단의 양쪽으로 광섬유를 유도하여 설치된 1열의 광섬유 line에 2가지 방법으로 입출력 할 수 있게 준비하였다. 즉, 광섬유가 위쪽에서 손상되면 이후의 하부에 있는 격자 부분에서 감지되지 않으므로 이런 경우 반대쪽의 광섬유를 통해서도 측정이 가능하도록 준비하였다. 제작된 나사 철근은 현장에 있는 팔길이가 긴 백호우를 사용하여 기 시공된 PHC 말뚝의 중공 부분에 삽입하고 고강도 몰탈을 타설 하였다. 아울러 재하 하중 작용시 게이지 및 광섬유를 보호하기 위해 말뚝머리의 높이보다 약 30cm 정도 추가 몰탈을 타설하고 10일간 양생 후 표준재하 방법으로 재하 시험을 실시하였다.

그림 12는 FBG 센서로부터 해석된 축력분포와 VW 게이지로부터 해석된 축력분포를 함께 그린 결과이다. 이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 현장에서의 측정 결과가 매우 이상적으로 측정되었음을 알 수 있으며 측정값의 절대량도 매우 유사함을 볼 수 있다.

6. 결 론

최근 센서 및 광통신 분야에서 응용이 많이 되고 있는 광섬유 격자를 센서로 사용하여, 현수교와 지반 보강용 말뚝 등의 실구조물에 적용하는 실험을 통하여 광섬유 격자센서 시스템의 현장 적용성 여부를 알아 보았다. 말뚝의 하중전이 측정에 적용한 광섬유 격자센서는 기존 스트레

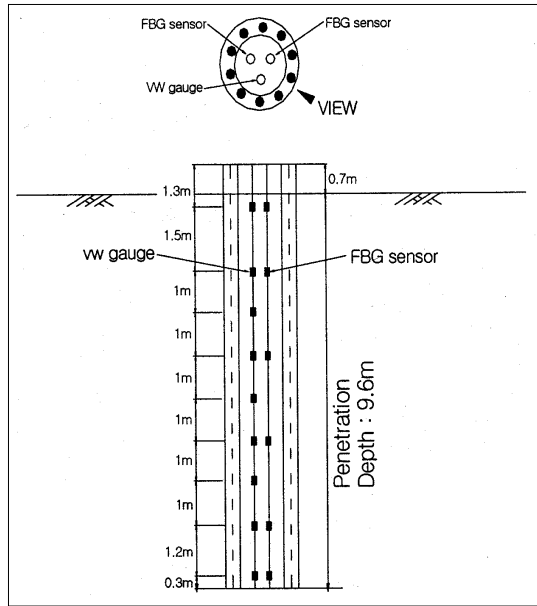


그림 10. 센서 및 게이지 설치 개요도

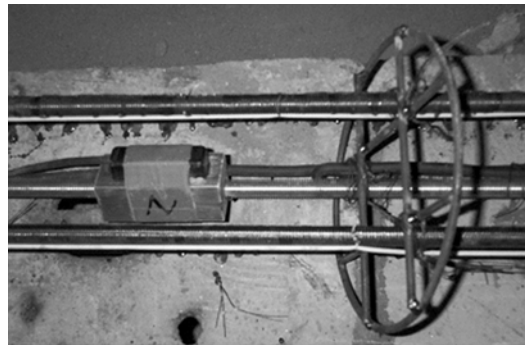


그림 11. 광섬유 격자센서와 진동현식 스트레인 게이지의 설치 모습

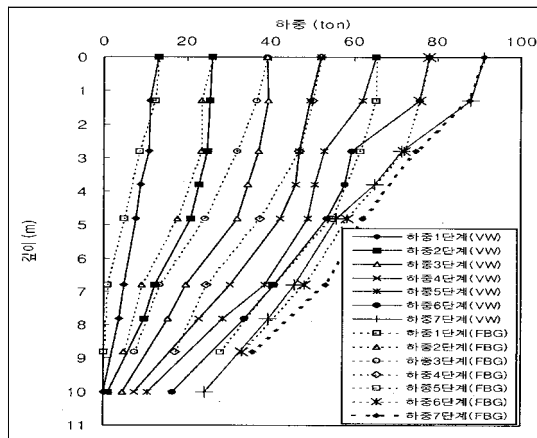


그림 12. 축력분포의 비교



게이지와 비교할 때, ①소형으로 초정밀 광대역 측정이 가능하고, ②전자파의 영향을 받지 않으며, ③재질인 실리카(silica)는 내부식성이 뛰어나므로 계측환경에 의한 영향이 적으며, ④광섬유 한 가닥으로 감지와 전달 매질 두 가지의 역할이 가능하여 다중점(multiplexing) 측정을 할 수 있고, ⑤피 측정 재료에 미치는 구조적 영향이 적으며, 특히 ⑥광신호의 신호 대 잡음비가 높아 노이즈의 영향이 매우 적고 파장변화 스펙트럼의 peak 값을 선택하여 변형율로 환산하는 데에 이용하므로 신호처리가 간편하고 명료한 장점이 있음을 확인할 수 있었다.