

광섬유센서를 이용한 콘크리트 구조물의 유지관리 동향

Monitoring Systems for the Concrete Structure Using Fiber Optic Sensors



김기수*
Ki-Soo Kim



조성규**
Seng-Kyu Cho



김명세***
Myong-Se Kim



김학연****
Hag-Youn Kim



서기원****
Ki-Won Seo

1. 서 론

일반적으로 구조물은 설계, 시공 및 유지관리 등의 과정을 통하여 구조물의 기능을 발휘하게 되는데, 합리적이고 정확한 설계, 시공과 함께 구조물 시공이후의 안전점검이나 효과적인 보수, 보강 그리고 안전도 감시체계의 확립 등은 구조물의 사용성을 극대화시킬 뿐만 아니라 구조물의 사용수명을 연장하고 아울러 구조물의 파괴나 붕괴 등에 대한 불안감을 해소할 수 있어 매우 중요한 요소라 할 수 있다. 즉 사용단계의 구조물은 설계, 시공 상태뿐만 아니라 작용하중이나 구성 재료의 열화 그리고 환경 등 외부조건 of 지속적인 변화 등으로 인하여 구조물 본연의 성능을 점차 상실하게 된다. 현행의 안전진단체계는 그 일회성과 함께 관리자의 주관적 판단에 의한 임의성으로 인하여 매번 안전진단 시 진단비용을 소모하여 구조물 유지관리비용을 늘리고, 대상 구조물의 안전도를 상시 점검할 수 없는 문제점을 가지고 있다.

따라서, 이러한 현재의 안전진단체계에서 안고 있는 문제점을 극복하기 위해서는 구조물을 상시 모니터링하여 구조물의 상황을 상시 점검하고, 잔존수명을 예측하며 아울러 보수시기를 알려줄 수 있는 온라인(on-line) 안전진단기술 개발이 반드시 필요하다. 더욱이 근래의 대형화 추세에 따른 교량, 터널, 고층아파트 및 초고층 주상복합건물 등은 끊임없이 하중의 변화, 구성재료의 열화, 바람, 온도변화, 지진, 태풍 등의 자연적 환경변화에 보다 극심한 변화 및 손상에 노출되어 있으며 만일 파괴 및 붕괴 시에는 그 피해가 매우 크므로 교량을 포함한 구조물의 온라인 안전진단을 통한 유지관리시스템의 필요성이 보

다 절실히 요구되는 상황이다. 통상 구조물은 설계, 시공, 및 유지관리 등의 과정을 통하여 구조물의 기능을 발휘하게 되는데, 합리적이고 정확한 설계, 시공과 함께 구조물 시공이후의 안전점검이나 효과적인 보수, 보강 그리고 안전도 감시체계의 확립 등은 구조물의 사용성을 극대화시킬 뿐만 아니라 구조물의 사용수명을 연장하고 아울러 구조물의 파괴나 붕괴 등에 대한 불안감을 해소할 수 있어 매우 중요한 요소라 할 수 있다. 즉 사용단계의 구조물은 설계, 시공상태뿐만 아니라 작용하중이나 구성재료의 열화 그리고 환경 등 외부조건 of 지속적인 변화 등으로 인하여 구조물 본연의 성능을 점차 상실하게 된다. 그런데 현행의 안전진단 체계는 그 일회성과 함께 관리자의 주관적 판단에 의해 임의성으로 인하여 매 번의 안전진단 시 진단비용을 소비하여 구조물 유지관리비용을 늘리고, 구조물의 안전도를 상시 점검할 수 없는 문제점을 가지고 있다. 또한 구조물의 내구성에 영향을 끼치는 문제들은 예기치 않게 연속적으로 발생하므로 단기간의 보수로는 복합적인 문제점을 해결할 수 없는 경우가 많다. 현행 교량과 같은 구조물의 안전감시시스템은 눈에 보이는 균열, 처짐 등과 같은 결점들에 의하여 안정성을 대체로 판단하였으며, 따라서 구조물 내에 명확히 눈에 보이지 않는 요소들에 따른 구조물의 불안정성은 아직 정량화 체계화 되어있지 않은 실정이다. 이에 따라 최근에 현재의 안전진단체계에서 안고 있는 문제점을 극복하게 위해서 구조물을 상시적으로 온라인하여 구조물의 상황을 상시 점검하고, 잔존수명을 예측하며 아울러 보수시기를 알려줄 수 있는 상시 안전진단기술 개발의 필요성이 대두되고 있는 상황이다.

구조물의 운용 중에 실시간으로 감지할 수 있도록 하여 구조물 상태의 이상 유무에 따라 적절하게 대처할 수 있는 기능이 구조물 자체에 부가되도록 하는 구조물을 일컬어 스마트 구조물(smart structure)이라고 한다. 이러한 기능은 무엇보다 막대한 재산과 인명 피해가 발생하는 구조물의 파괴를 미연에 경고

* 정희원, 홍익대학교 재료공학부 교수
kisoookim55@paran.com

** (주)아이세스 개발팀장

*** (주)아이세스 개발팀 연구원

**** 정희원, (주)아이세스 개발팀 연구원

할 수 있고 구조물의 유지 및 보수에 따른 비용 절감 효과를 얻을 수 있는 장점이 있다. 구조물의 안전성과 잔존수명을 예측하기 위해서 변형률 온도 등을 측정하는 것이 중요하다. 변형률은 구조물의 외부, 내부의 결점 혹은 스마트 구조물의 형태까지도 수정할 수 있는 요소이다. 지금까지 전자식 스트레인 게이지 등을 통하여 구조물 외부의 변형률을 측정해 오고 있다. 그러나 이러한 센서들은 단기간의 구조물 외부의 변형률을 측정하는데 적합하며 장기적인 내부의 결점이나 거동을 표시하고 예측하기에는 적합치 않은 것으로 알려져 있다. 전자식 스트레인 게이지를 건물 내 매입(embedding)하는 경우, 구조물의 잔존기간동안 전자식 스트레인 게이지와 리드선 사이에 예상치 못한 결점이 생길 수 있으며 또한 전자식 스트레인 게이지는 병렬 측, 하나의 센서에 하나의 리드선이 생긴다는 단점 때문에 구조물의 장기 계측용 시스템(on-line system)에는 문제가 있는 것으로 판단되고 있다. 더욱 높은 정확성과 신뢰성을 바탕으로 구조물의 상태를 파악 또는 예측 할 수 있는 기술적인 체제가 대두되고 있는 시점에서, 점차 세계적으로 광섬유 센서를 이용한 시스템이 구조물의 안정성과 잔존수명을 판단하는 기준으로 중요한 역할을 할 것으로 기대되고 있다^{1~7)}. 광섬유 센서의 필요성은 위에 언급한 사실 외에 신뢰성 있는 온라인(one-line) 모니터링을 위한 재료로서 다음과 같은 장점을 가지고 있다.

(1) 내구성

재질 이석영이므로 부식이 되지 않아 장기계측에 적합하다.

(2) 전자기적 중성(electro-magnetic neutrality)

광섬유센서는 센서로서의 기능을 수행하기 위해 빛 또는 광파가 등이 필요한데, 빛의 가장 중요한 특성중의 하나는 전자기파에 의해 영향을 받지 않는다는 점이다. 따라서 측정값이 무선 송신기 등과 같은 전자기적 잡음에 의하여 방해나 간섭을 받지 않으므로 계측의 안정성이 높다. 특히 고속철도와 같은 전자기적 잡음이 측정신호에 영향을 주는 환경에는 필수적으로 광섬유 센서가 적용되어야 한다고 판단된다.

(3) 측정정보 전달능력

정보가 빛의 속도로 전달되므로 엄청난 양의 정보처리가 가능하다.

(4) 작은 크기

광섬유의 직경이 1mm 보다 작으므로 측정범위와 정도에 따라 광범위하게 센서가 사용될 수 있고 구조물 거동에 영향을 거의 미치지 않는다.

상시 안전진단기술은 통상 하중부, 센서부, 제어부로 이루어지는 시스템을 통하여 이루어지는데 현재 센서부에 사

용되는 센서로는 반도체센서, 금속박막센서, 압전센서 그리고 광섬유 센서 등이 있다. 이중 광섬유센서는 전술한 여러 장점 때문에 미국 등 선진국의 경우 복합재료와 소형구조물에 대한 연구가 진행되어 왔으나 교량 등에 대한 적용은 아직 초기단계라 할 수 있다. 따라서 이의 적용을 위해 센서의 패키지(package)기술과 센서의 부착 및 매설기술, 매설 시 특성평가 등의 연구가 추가적으로 더 진행되어야 한다. 성능실험 및 평가에는 아래의 <표 1>과 같은 종류의 센서를 사용하였고 평가방법은 <표 2>에서와 같이 실내에서 수행한 기본적인 특성시험에서 R.C 보 시험, 고강도 콘크리트 보-기둥 접합부에서의 반복하중에 의한 성능평가 등을 수행하였다.

2. 광섬유 센서의 기본 원리

2.1 광섬유 격자의 원리

FBG 는 Ge가 첨가된 광섬유 코어에 자외선 영역의 레이저를 주기적으로 조사함으로써 굴절률 변화를 유도하여 격자의 주기 에 의해 결정되는 특정 파장의 빛을 반사시키는 광섬유 소자이다. <그림 1>는 FBG의 구조를 나타낸다.

표 1. 평가대상 상사감시용 센서

센서의 종류	제조사	제품규격	측정값	측정범위
Strain Gage	Kyowa(일본)	1G120Ω 67mm	변형률	<20000 με
		1G120Ω 5mm		
광섬유 FBG 센서	ICES(한국)	1310 nm	변형률	<5000 με
LVDT	Kyowa(일본)	DT-50	변위	<50 mm

표 2. 성능평가를 위한 실험개요

시험종류	시험체	시험목적
기본 특성 시험	광섬유 센서, Strain gage, LVDT	신호응답 특성시험
부착 기구	접착제 사용시의 광투과율 시험	- 광섬유센서의 기본 신호응답 특성 평가 - 각종 접착기구의 안정성 및 광투과율 비교 - 매설, 부착 시의 응답특성 분석
기둥 응답 특성 시험	단순 R.C보 정적하중시험, 보-기둥 접합부시험	단순보 (15×25×180 cm) -기둥단면 (400×270 mm) -보 단면 (270×370 mm)
		- pre-tension Grip의 성능평가 - strain gage와 비교 - 보기 등 접합부의 반복하중 상태에서 의 거동을 계측

〈그림 1〉와 같이 광대역의 스펙트럼을 광섬유에 입사시킬 경우, 아래에 주어진 식 (1)과 같은 브래그 조건식에 만족하는 파장 성분이 광섬유격자에서 반사되며, 나머지 파장 성분은 그대로 통과하여 광 스펙트럼 분석기에 나타난다

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (1)$$

위의 식에서 n 은 광섬유 코어의 유효 굴절률(effective refractive index)이며, Λ 는 격자와 격자 사이의 간격(grating period)이다.

격자에서 반사되는 브래그 파장은 식(1)과 같이 유효 굴절률과 격자 간격의 함수이며, FBG에 온도나 압력 등의 외부 물리량을 인가할 경우 브래그 파장이 달라진다. 그러므로 브래그 파장의 변화를 측정한다면 FBG에 인가된 물리량을 구할 수 있다. 변형률 변화에 대한 브래그 중심 파장의 변화는 아래의 식 (2)과 같다.

$$\Delta \lambda_B = \lambda_B(1 - P_e)\epsilon \quad (2)$$

여기서 P_e 는 광탄성 상수(photo-elastic constant)로 게르마늄 실리카 유리(germano-silicate glass)의 경우 대략 0.22의 값을 가지며, ϵ 은 광섬유 격자에 가해진 변형률이다.

2.2 신호 처리 시스템의 구성

신호처리 시스템 구성도는 다음 〈그림 2〉와 같다. 시스템 구성은 먼저 광원인 ELED(edge-emitting LED)를 구동하기 위한 LED구동부, 외부의 온도나 변형률 등의 물리적 변화를 감지하는

광섬유 센서부, 센서에서 반사되어 돌아온 신호를 패브리 페로 필터(Fabry-Perot Filter)를 이용하여 검출하는 신호 검출부, 그리고 검출된 신호를 CPU를 이용하여 처리하는 신호 처리부로 구성된다.

2.2.1 송신부

본 연구의 송신부는 다음과 같다. FBG 센서의 압력을 측정하기 위한 송신부의 광대역(Broadband) LED는 1300 nm의 파장을 갖는 유리섬유로 봉지된 반도체를 사용하며 드라이버의해 구동된다. LED로부터의 광은 WDM coupler를 거쳐 다중모드 광섬유를 통과한 후, 하나의 FBG센서에 물리량을 가하지 않을 경우 수신부에 1550nm가 검파된다. 물리량 즉 압력을 가할 경우는 FBG센서의 중심주파수는 천이를 일으키고, 수신부에서 패브리 페로 필터 간섭기술과 신호처리 시스템으로 파장변이에 관한 데이터를 얻을 수 있다.

2.2.2 파장 선택기(interferometer technology)

WDM 결합기를 통과한 시분할 된 한 개의 데이터와 원 신호, 즉 파장 천이된 주파수와 원 신호는 대역통과 필터에서 한 개의 원하는 파장을 선택하게 된다. 검출된 파장 천이된 주파수를 고 분해능으로 분석하고, 소형이며 광섬유와 연결하여 사용할 수 있고 높은 정도를 얻을 수 있으며 기계적으로 안정성이 있는 패브리 페로 필터를 사용한다.

2.2.3 신호처리부

광 검출기에서는 검출된 광 신호를 전기적인 신호로 변환하여 FBG 센서에 가한 압력, 즉 데이터를 분석한다. 파장 변화 추적기에서는 레이저 다이오드의 파장 변화를 감지하는 기능을 한다. 파장 천이 선택기에서 중요한 점은 레이저 파장의 증가 또는 감소의 방향 즉 압력의 감소, 증가를 알아내고, 신호 처리

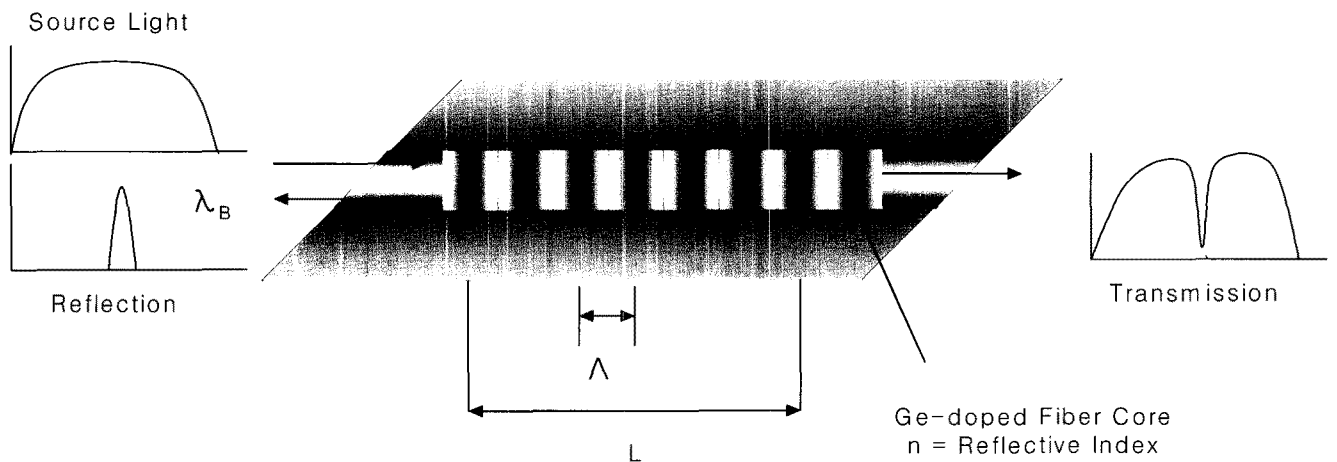


그림 1. 광섬유 격자(Fiber Bragg Grating)의 구조

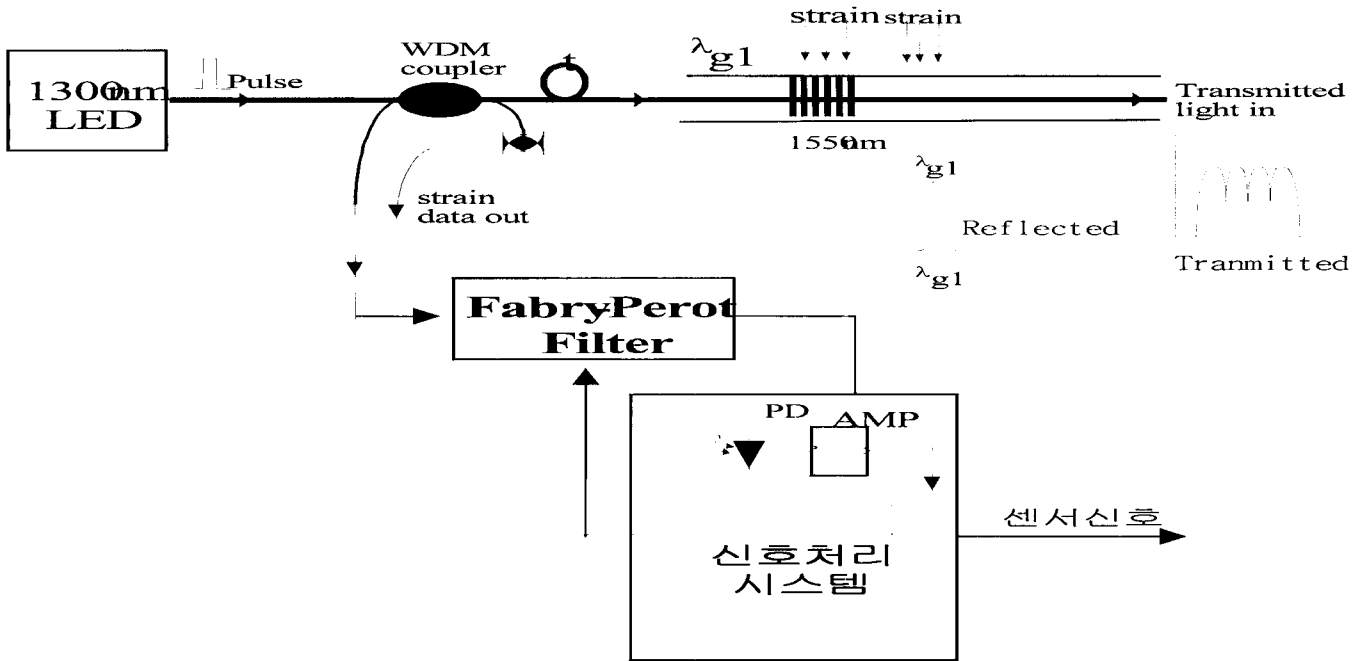


그림 2. 광섬유 격자 센서 시스템(Fiber Bragg Grating Sensor System)의 전체 블럭도

부에서는 파장 천이된 압력의 변화량을 고속의 분해능을 갖고 빠른 시간 내에 처리하기 위해서 최근에는 32 Bit 프로세서를 사용함으로써 신호의 분해능을 향상시키고 신호처리의 속도를 향상한다.

3. 구조물 거동 응답특성 시험

부착용 광섬유 센서 패키지와 상시감시용 센서의 구조물의 거동에 대한 신호응답 특성시험은 철근콘크리트 보 및 보-기둥 접합부구조와 H-beam 및 강 트러스 구조를 대상으로 하였으며, 각 시험체 제작 및 시험 방법은 다음과 같다.

3.1. 광섬유 센서 패키지의 제작

광섬유 센서를 기존 구조물의 장기계측에 적용하기 위해서는 센서의 성능을 충분히 발휘할 수 있고 구조물의 거동의 변화 상태를 그대로 센서에서 취득할 수 있도록 하지 않으면 안 된다. 이를 위해서는 다음의 요구조건을 만족하여야 한다.

3.1.1 센서의 설치 용이성

기존 구조물에 센서를 설치하는데는 접착제나 앵커볼트에 의한 부착방식이 가장 적합하다. 시공당시에 센서를 구조물에 매설한 경우에는 운용도중에 센서에 이상이 발생하게 되면 복원하기가 불가능하게 되므로 센서의 조정이나 수리 및 교체 등을 손쉽게 할 수 있도록 하는 것이 유리하다.

3.1.2 센서의 내구성

기존 구조물의 장기계측을 위해서는 센서가 장기간 외기에 노출됨에 따라 환경의 급격한 변화에 직접적인 영향을 받게 되므로 이에 대처하기 위해 센서를 보호하지 않으면 안 된다.

3.1.3 센서의 유지관리 편리성

센서의 조정이나 수리 및 교체 등을 손쉽게 할 수 있도록 하

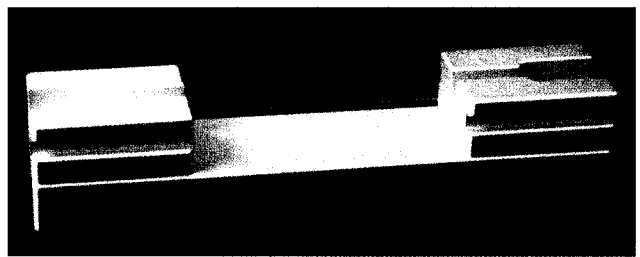


그림 3. 광섬유 격자 센서 패키지 (Fiber Bragg grating sensor package)

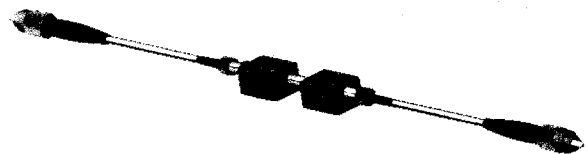


그림 4. 광섬유를 튜브로 보호한 격자센서 패키지 (Fiber Bragg grating sensor package with protecting tube)

표 3. 철근콘크리트 보의 특성치

종류	목적	센서 종류, 위치	개수	크기(cm)	사용재료	
					철근(SD 40)	콘크리트
CTL	콘크리트 인장거동 응답특성 분석	압축 : sg (표면) 인장 : sg, fs (표면)	2			
CFS	콘크리트 압축 및 철근 인장 거동 응답특성 분석	압축 : sg, fs (표면) 인장 : sg, fs (철근)	2	15 × 25 × 180	2@D10(압축) 2@D13(인장)	fck = 270 kg/cm ²
SIF	콘크리트 압축, 인장 및 철근 인장거동 응답특성 분석	압축 : sg, fs (표면) 인장 : sg, fs (표면철근)	1			

sg : strain gauge, fs : 광섬유(FBG) sensor

여 센서 시스템을 <그림 3, 4>에서 보는 바와 같이 패키지로 제작하였다.

3.2. 철근콘크리트 보 실험

3.2.1 시험체 제작

여기서는 전술한 '나'항에서 고찰된 광섬유센서의 기본 특성을 이용하여 광섬유 센서가 실 구조물에 장기계측용 센서로 활용 시에 그 응답특성과 각종 부착기구의 특성을 평가하기 위해서 15 × 25 × 180 cm 크기의 철근콘크리트 보를 제작하고 반복하중을 가하여 얻어지는 변형률 값을 관찰하는 실험을 건설기술연구원 구조시험동에서 진행하였다. 실험에 사용된 철근콘크리트 보의 제원은 아래의 <표 3>과 같다.

3.2.2 시험방법

본 실험에서는 철근콘크리트 시험체의 휨 시험을 통해 구조물의 거동에 대한 광섬유 센서의 신호응답특성을 분석하였다. 휨 시험은 4점 재하방식으로 실시하였으며, 부재의 거동변화는 기존의 스트레인 게이지와 FBG센서를 <표 3>과 <그림 5>에서 보는 바와 같이 시험체 표면과 철근에 부착하여 계측하였으며, 광섬유 센서의 응답특성은 여기서 얻어진 측정치를 서로 비교하여 분석하였다. 시험체의 휨 시험에서 각 센서의 하중의 단계별 변형률의 변화를 파악하기 위해서 재하량을 항복에 이를 때까지 0.5 ton씩 증가시켰다. 또한, 구조물에 작용하는 반복하중에 따른 광섬유 센서의 잔류변형 응답특성을 분석하기 위해

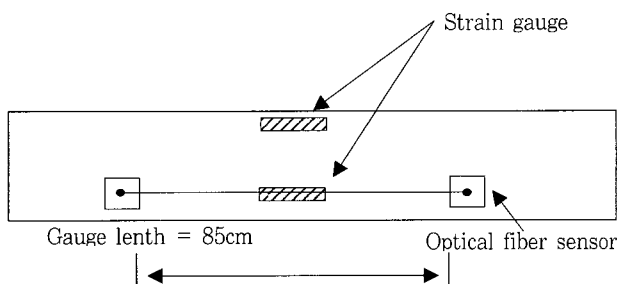


그림 5. 콘크리트의 인장 거동 응답특성 분석용 시험체(CTL)

<그림 6>과 같이 공시체의 예상 파괴하중의 50% 수준에서 재하-제하를 3회 반복하였다. 3개의 광섬유 센서를 동시에 측정하여 센서의 다중화 특성도 확인하였다.

3.2.3 구조물 거동 응답특성

(1) 철근콘크리트 보 시험결과

<그림 7>의 결과는 보 시험체의 상, 하부에 부착한 전기저항식 변형률 게이지와 동일 위에 부착한 길이 85 cm의 장 광섬유 센서의 기본특성을 분석한 것이다. 아울러 본 실험에서는 개발된 부착 그립(grip) 시제품의 성능평가도 병행하여 수행하였다. 이를 위하여 압축변형률의 측정이 가능하도록 광섬유에 미리 2000 με 정도의 긴장(pre-tension)을 가하였다.

상기 실험은 보 시험체의 상, 하부에 부착된 2개의 광섬유 센서와 철근에 매립된 1개의 광섬유 센서를 이용하여 철근의 항복이 일어날 때까지 재하 한 후 철근에 부착된 매설형 광섬유 센서와 보 시험체 표면에 부착된 광섬유센서를 통하여 콘크리트의 균열전 후 및 철근의 항복 시 거동까지를 평가하였는데 시험결과를 분석하면 아래와 같다.

- ① 보 시험체 파괴강도의 약 40%인 4 ton까지를 반복재하한 경우, 재하-제하 시에 변형률 응답이 기존의 변형률센서와 거의 일치하는 것으로 나타나 광섬유센서의 부착기구 적용방법 및 시험방법의 적합성을 확인하였다.

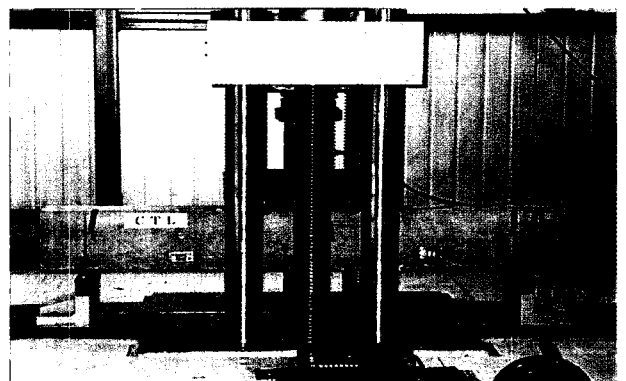


그림 6. 광섬유센서 특성평가를 위한 R.C보의 시험

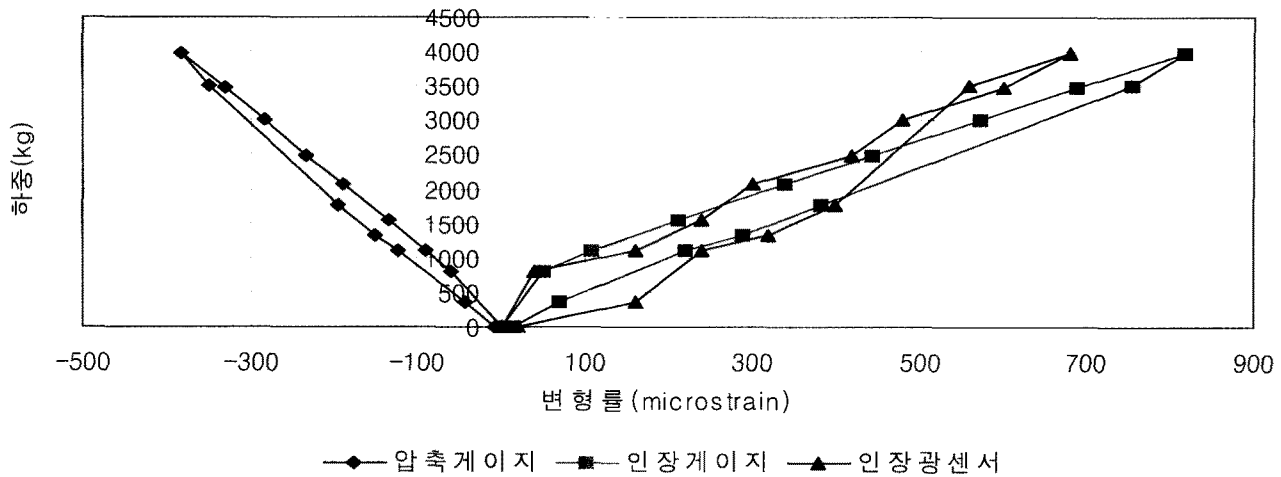


그림 7. CTL1 시험체의 시험결과

- ② 보 시험체의 압축부 변형률을 측정하기 위해서는 광섬유 센서에 미리 약 2000 μe 의 변형률을 갖도록 긴장을 가한 후 센서의 거동을 평가하였다. 시험결과, 초기 4 ton까지는 기본 변형률센서와 거의 일치하나 그 이후의 거동이 다소 작게 나타났다. 7 ton이 가해진 후 전기저항식 변형률게이지는 파손되어 측정이 불가능한 데 비해 광섬유 센서는 제하시의 잔류변형량도 측정이 가능하므로 균열발생 및 대변형 후에도 유효한 센서로 평가할 수 있으며 장기 계측에는 매우 유리할 것으로 판단된다.
- ③ 철근에 부착하여 콘크리트 보에 매립된 광섬유센서의 경우는 매우 근접한 값을 보임을 알 수 있었으며 철근의 항복 후 변형률의 급격한 증가에도 센서가 파손되지 않아 다소 큰 측정범위를 가지고 있음을 확인하였다.
- ④ 압축부와 인장부 및 철근에 부착한 총 3개의 광섬유센서로부터 동시에 신호를 얻어 낼 수 있어 광섬유센서의 다중화가 가능하였다

3.3 보-기둥접합부 실험

3.3.1 실험목적

과거에는 구조물이 사용하중(service load) 범위 내에서부터 최대하중까지의 거동에 관심을 가지고 있었으나, 오늘날에는 주기적 횡하중(cyclic lateral load)에 대한 내진 골조의 거동에 대한 관심과 연구가 활발히 진행되어 오고 있다. 또한 최근 철근콘크리트 구조물의 대형화, 고층화되어 가면서 지진하중 및 풍하중과 같은 심각한 비탄성 변형을 일으키는 반복 주기하중을 받을 때 보-기둥 접합부가 부담하는 응력이 이전보다 높아지게 되었으며 구조적으로 취약한 부분으로 이를 밝히기 위

하여 시설안전공단 건축실과 공동으로 실험하였다⁸⁾.

현행기준에 따라 구조물을 설계할 경우 모멘트연성골조(ductile moment resisting frame)에서 가장 치명적인 피해의 가능성을 내포하고 있는 영역 중의 하나는 보-기둥 접합부이다. 보-기둥 접합부는 그것에 접속되는 기둥과 보의 치수에 의해 단면이 결정되지만, 배근설계를 위해 고려되는 하중조건은 기둥과 보와는 다르기 때문에 주의 깊은 단면설계를 요구하게 된다. 또한, 철근콘크리트 보-기둥 접합부에서의 파괴 형태는 크게 보 주근의 접합부에서의 정착파괴와 접합부의 전단파괴로 분류되고 있으며, 이러한 파괴는 구조물의 내력을 급격하게 저하시켜 취성적인 파괴를 유발시킴으로써 철근콘크리트 구조물 혹은 인명에 치명적인 피해를 입히게 된다.

일반적으로 보-기둥 접합부에서는 구조물이 지지력을 받게 되면, 지진동의 성분이 정, 부 방향으로 반복하여 가해지므로 기둥은 인장과 압축이 교대로 반복되는 변동축력을 경험하게 된다. 이러한 변동축력은 기둥의 내력과 강성을 변화시키고, 접합부내에서의 보 주근의 정착 및 접합부의 전단 거동에 영향을 주어 구조물의 내력 및 변형능력이 변화될 가능성이 있으므로 접합부에서의 보 주근의 정착특성 및 접합부의 전단특성을 명확히 파악할 필요가 있다⁹⁾. 따라서, 고층 골조 구조물의 안전성 및 내진 성능을 적절히 평가하기 위해서 보-기둥 접합부에 반복하중을 적용할 때의 광섬유 센서를 사용한 상시 계측에 대해 연구할 필요가 있다. 보-기둥 접합부의 실제적인 거동을 파악하기 위하여 슬래브가 있는 접합부 시편을 제작하여 실험을 실시하였다.

3.3.2 실험 개요

철근 콘크리트 보-기둥 접합부의 반복하중상태에서의 거동을 계측하기 위하여 슬래브가 있는 보-기둥 접합부 시험체를 2개

제작하였으며, ACI 318-96 및 ACI-ASCE 352 위원회 설계지침에 만족하도록 설계하였다. 시험체의 콘크리트 압축강도는 270 kg/cm²이며, 시험체의 제작은 가능한 실제 조건에 근접하도록 하였으며, 시험체의 상재는 ACI-318-96 지침에 따라 제작하였다.

- 시험체 제작 및 설치

시험체의 기둥단면은 400 mm × 270 mm, 보단면은 270 mm × 370 mm, 슬래브 두께는 95 mm이다. 반복하중상태에서의 접합부의 거동을 얻기 위하여, 기둥부분에 일정한 축력을 유지하면서 보 양끝단에 반복하중을 주어 그에 따른 내력상태를 재현하였다. 기둥의 양 끝단에는 재하판을 설치하고 재하판과 기둥 양 단부사이에는 유압식 가력 장치(hydraulic jack)과 하중계(loadcell)를 설치하여 축력을 도입하였으며, 실제건물 변형에서의 반곡점을 재현하며 비틀림을 방지하기 위해 상하 가력판의 연결점을 힌지로 처리하였다. 각 재하위치에서 하중계를 사용하여 하중을 검출하였으며, 접합부와 기둥, 보 부재가 접하는 위치에서 주근과 보강근의 변형을 측정하기 위하여 주요부위에 9개의 wire strain gage를 이용하여 철근의 변형도를 측정하였고, 접합부 변형 및 부재 회전을 측정하기 위해 접합부 및 보, 기둥의 소성힌지 부분을 LVDT, 포텐시오 메터(potential meter) 등으로 측정하였으며, 보의 끝단에는 Long LVDT(linearvariable displacement transducer)를 사용하여 보의 변위를 측정하였다. 최종설치 상황을 <그림 8>에서 보여주고 있다.

3.4. 보-기둥 접합부구조 시험결과

시험체를 <그림 9>와 같이 반복 하중을 가력하여 실험을 실시하였다. 1차 실험에서 하중이 8 tonf 이상 되었을 때, 광섬유 센서의 파단이 생겼으므로, 2차 실험에서는 1 tonf에서 -1.4 tonf 사이의 낮은 level의 하중을 반복적으로 가력하였고, 광섬유 센서

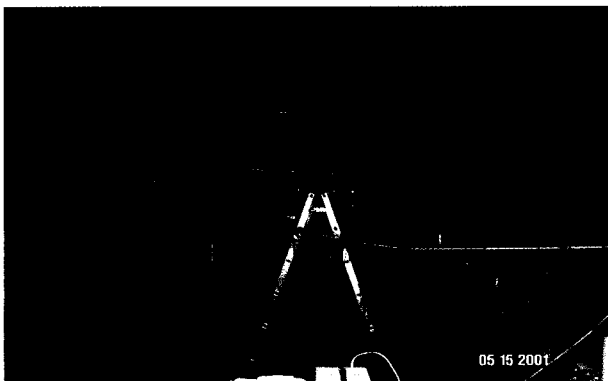


그림 8. 시험체의 최종 설치 상황

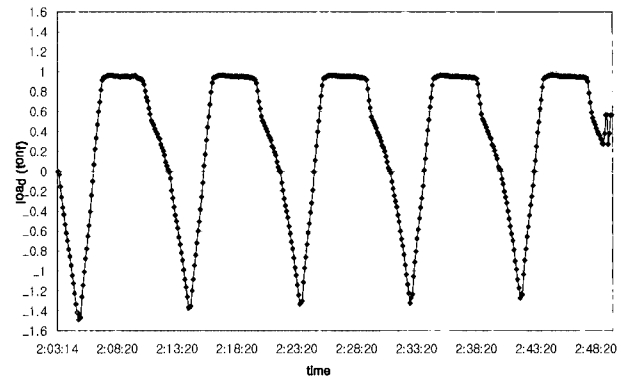
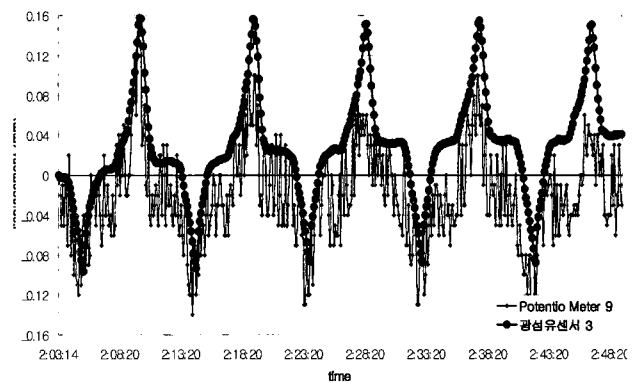
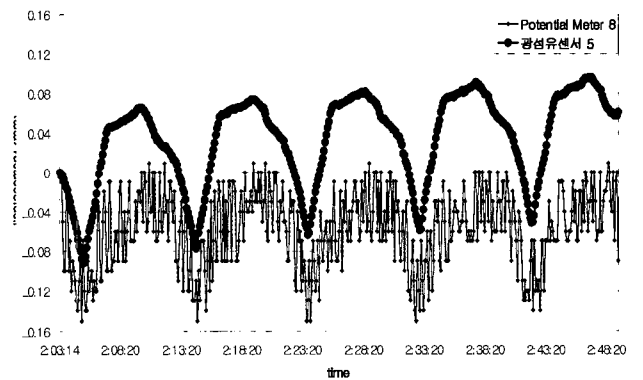


그림 9. 실험에 적용된 하중이력



(a) 광섬유센서 3



(b) 광섬유센서 5

그림 10. 포텐시오 메터(potential meter)와 광섬유센서의 비교 그래프

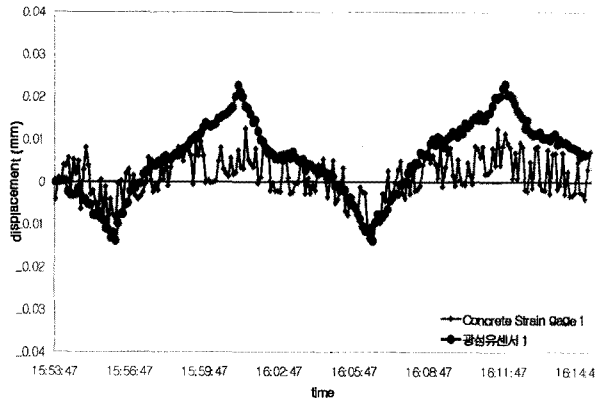
로부터의 데이터는 <그림 10>과 같다.

또한, 접합부의 미소변형부분은 낮은 level의 하중에서 ±0.06 mm 정도의 변형을 보였으며, 대각 방향으로 부착된 광섬유 센서1, 2는 <그림 11>과 같이 반복 하중시 비교적 정확한 대칭형으로 측정되었다.

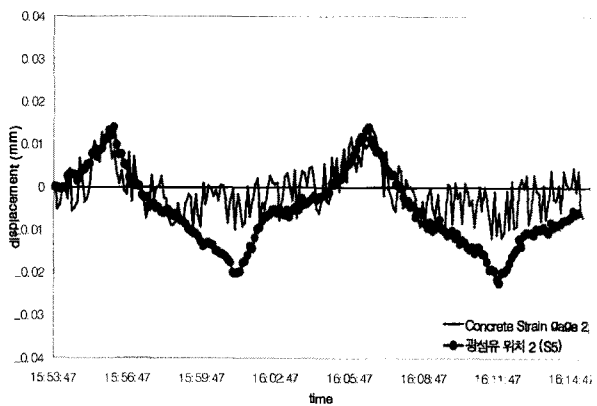
3.4.1 결과분석

이상의 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 연구 목적인 고층구조물의 취약부(보-기둥 접합부)에 대



(a) 광섬유센서 1



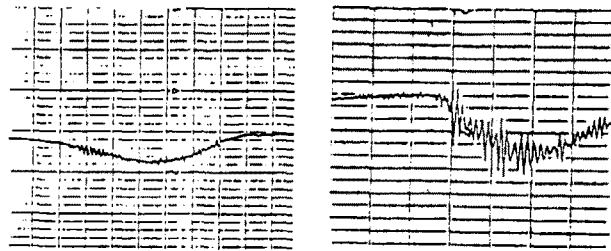
(b) 광섬유센서 2

그림 11. 스트레인 게이지(strain gage)와 광섬유센서의 비교 그래프

한 장기계측을 위한 각 센서의 성능을 비교 평가할 수 있었다. 스트레인게이지와 LVDT, 포텐시오 메터, 광섬유센서 4종의 센서 중 보-기둥 접합부의 거동을 정확하게 계측하기 위해서는 광섬유센서가 가장 적합함을 알 수 있었다.

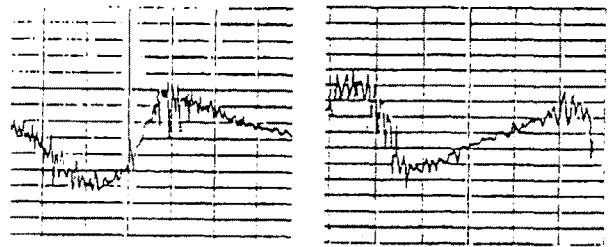
- (2) LVDT의 경우, 보-기둥 접합부에서의 미소변형에 대해서는 그 적용이 용이하지 못한 것으로 보이며, 포텐시오 메터의 경우 적용은 가능하나 신호에서 노이즈(noise)가 많이 측정되었다.
- (3) 스트레인게이지의 경우, 광섬유센서와 가장 유사하게 접합부의 거동을 계측할 수 있었으나 역시 미소변형에서는 노이즈(noise)가 많이 측정되었다.

따라서, 보-기둥 접합부의 장기 계측을 위한 시스템을 구성하기 위하여 접합부의 대각변형계측을 위해서는 광섬유센서를 사용하는 것이 효과적이며, 보나 기둥의 대변형을 계측은 LVDT 타입(type)의 센서를 사용하는 복합적인 시스템이 효과적이라 생각된다.



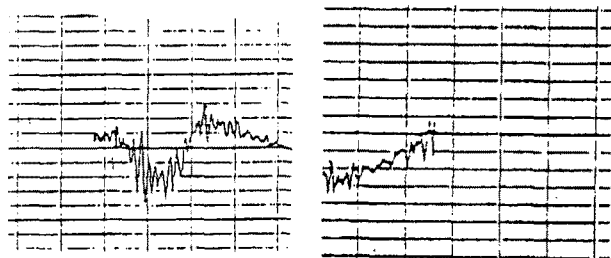
(a) 10 km/h

(b) 20 km/h



(c) 30 km/h

(d) 40 km/h



(e) 50 km/h

(f) 60 km/h

그림 12. 상산대교에 부착시킨 광섬유 센서의 데이터

4. 광섬유 센서의 상산대교 구조물에서의 적용

광섬유센서를 상산대교의 한 경간을 선정하여 거더의 중앙부에 부착시키고 모래를 적재하여 총 중량이 30 ton이 되도록한 차량을 10 Km/h부터 60 Km/h로 속도를 변화시켜가며 측정하였는데, 속도에 따라서 <그림 11>과 같은 스트레인 패턴을 얻었다.

5. 결론

광섬유센서의 연구개발 동향과 광섬유센서의 원리와 시스템을 대하여 리뷰하였고, 이를 통해 모니터링 시스템의 향후방향을 제시하였다. 그리고 실제 광섬유센서를 콘크리트시편과 보-기둥 접합부에 적용하여 좋은 데이터를 얻었으며, 보-기둥 접합부의 장기 계측을 위한 시스템을 구성하기 위하여 접합부의 대각변형계측을 위해서는 광섬유센서를 사용하는 것이 효과적임을 알 수 있었다.

실제 교량인 성산대교에 부착되어진 광섬유센서의 거동도 차
량의 진행을 잘 묘사해 주고 있어 광섬유센서 모니터링 시스템
이 가능함을 보여 주고 있다.

감사의 글

본 연구는 과학재단 우수연구센터인 스마트 사회기반시설 연
구센터의 지원과 건설교통부의 사회기반시설물 평가 중점연구
단의 지원에 의해 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다. □

참고문헌

- Kim, K. S., M. Breslauer and G. S. Springer, "The Effect of Embedded Sensors on the Strength of Composite Laminates", *Journal of Reinforced Plast. and Comp.* Vol. 2, 1992, pp. 949 ~ 958.
- Kim, K. S., A. Segall and G. S. Springer, "The Use of Strain Measurements for Detecting Delaminations in Composite Laminates", *Composite Structures*, Vol. 23, 1993, pp. 75 ~ 84.
- Kim, K. S., Y. Ismail and G. S. Springer, "Measurement of Strain and Temperature with Embedded Intrinsic Fabry-Perot Optical Fiber Sensors", *Journal of Composite Materials*, Vol. 27, 1993, pp. 1663 ~ 1667.
- Kim, K. S., L. Kollar and G. S. Springer, "A Model of Embedded Fiber Optic Fabry-Perot Temperature and Strain Sensors", *Journal of Composite Materials*, Vol.27, 1993, pp. 1618 ~ 1662.
- Kim, K. S., J. Ryu, S. J. Lee and L. Choi, "In-situ Monitoring of Sungsan Bridge in Han River with Optical Fiber Sensor System", *Proceedings of SPIE*, Vol.3043, 1997, pp. 72 ~ 76.
- Kim, K. S., "Smart Concrete Structures with Optical Fiber Sensors", *KCI Concrete Journal*, Vol.11, 1999, pp. 109 ~ 114.
- Lee, S. E., D. Han, H. Lee and K. S. Kim, "Signal Processing System of Mult-Fiber Bragg Grating Strain Sensors using Wavelength Scanning-Locking of a Fabry-Perot Tunable Filter", *한국통신학회논문집*, Vol.24, 1999, pp. 1472 ~ 1479.
- 박홍신, 김기수, 김승진, 송동엽, 홍성걸, 김종우, 이충국, 왕영성, 정철, 전재홍, 조성규, "고층건축물 구조안정성 및 사용성 장기계측시스템을 이용한 상시 안전진단기술 개발" 2002년 건설교통개발과제 보고서, 시설안전기술공단.
- 김기수, "광섬유센서를 이용한 Beam-Column 조인트의 하중에 따른 변위 계측", *소음진동공학회논문집*, Vol.15, No.1, 2004. 9, 3 pp.

콘크리트 기술 기본도서 소개

1	콘크리트표준시방서 해설 -건설교통부 제정 2003년 개정판- · 회원 : 28,500원 · 비회원 : 35,000원
2	콘크리트구조설계기준 해설 -건설교통부 제정 2003년 개정판- · 회원 : 22,500원 · 비회원 : 28,000원
3	콘크리트진단 및 유지관리 · 회원 : 20,000원 · 비회원 : 25,000원
4	현장 콘크리트의 품질관리 · 회원 : 17,500원 · 비회원 : 22,000원
5	콘크리트 건설 제요령 · 회원 : 22,500원 · 비회원 : 28,000원
6	콘크리트 혼화재료 · 회원 : 12,000원 · 비회원 : 15,000원
7	콘크리트의 제조 · 시공 · 품질관리 및 유지관리- 2005년 제2회 기술강좌 교재 - · 회원 : 17,500원 · 비회원 : 22,000원
8	한국의 콘크리트 · 회원 : 10,000원 · 비회원 : 12,000원
9	최신콘크리트공학 · 회원 : 30,500원 · 비회원 : 38,000원
10	특수콘크리트공학 · 회원 : 22,500원 · 비회원 : 28,000원
11	콘크리트 표준시방서 유지관리편 해설 · 회원 : 12,000원 · 비회원 : 15,000원

▶ 도서 구입은 학회 홈페이지(www.kci.or.kr)에서 구입 가능하며, 방문 또는 전화로도 구입하실 수 있습니다. 전화로 구입하시고자 하실 때에는 아래 계좌에 입금을 하시고 학회로 연락 주시기 바랍니다. 우송료는 착불입니다.

씨티은행 : 102-53655-255 (예금주 : 한국콘크리트학회) (TEL 568-5985~7, FAX 568-1918)