

광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 텐서그리티 구조물의 변형 계측

Deformation Measuring of Tensegrity Structure by Optical Fiber Bragg Grating Sensor

이 승 재*
Lee, Seung-Jae

요 약

본 연구는 광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 텐서그리티 구조물의 실시간 모니터링 결과를 보고한다. 기존의 간접적인 계측 방식에서 탈피하여 케이블에 직접적으로 센서를 부착하여 케이블의 변형율을 측정하였다. 우선, 텐서그리티 구조모형을 시험체를 제작하고, 시험체에 광섬유 브래그 격자 센서를 부착하여 외력을 가하였다. 그 결과 하중의 증가에 따라 광섬유 브래그 격자 센서는 케이블의 변형을 정밀히 측정할 수 있었으며, 계측의 안정성 측면에서 탁월함을 알 수 있었다. 또한 텐서그리티 구조물과 같이 케이블로 구성된 구조물의 변형 측정 및 상시 모니터링에는 광섬유 브래그 격자 센서가 유용함을 확인하였다.

Abstract

The object of this paper is to verify possible to monitor the deformation of cable in the tensegrity structure. Also, always monitoring system of tensegrity structure using Fiber Bragg Grating Sensor is described. We carry out experiments with measuring deformation of cable in the tensegrity structure based on loading conditions. In the result of experiment, the Fiber Bragg Grating Sensors shows accurate response to the loading conditions. Therefore, we can make sure the possibility of Fiber Bragg Grating Sensor in health monitoring of the cable structure like tensegrity structure.

키워드 : 광섬유 브래그 격자 센서, 변형율, 텐서그리티 구조물, 상시 모니터링

Keywords : Fiber Bragg Grating(FBG)Sensor, deformation, Tensegrity structure, Health monitoring

1. 서 론

국가경제의 발전과 이에 따른 생활의 질적 향상에 따라 초대형 공간에 대한 욕구가 증대되면서 전 시공간, 관람시설과 같은 문화공간의 대형화가 요구되고 있다. 교토의정설 협약에 따른 각 국가의 이산화탄소 배출 규제에 의해 건축 분야는 장수명, 친환경 구조물을 요구하고 있다. 대공간구조물은 일반 건축물과 달리 초기 공사비의 막대함과 공사과정의 부실 및 부적절한 사용으로 인하여 붕괴 및 파괴가 일어날 경우 사회의 큰 손실이 수반된다. 따라서 막

재료 및 케이블로 구성되는 연성형 대공간구조물의 대표적 구조형식인 텐스그리티 구조물의 상시 모니터링 및 유지관리는 매우 중요하다. 텐서그리티 구조물은 막재료 및 케이블의 인장력으로 구조물의 형태를 구성하며, 이와 같은 구조물은 태풍 및 폭설 등과 같은 혹한환경에서의 유지관리는 구조물의 수명을 좌우한다고 할 수 있다. 이 중에서 텐서그리티 구조물의 케이블의 장력측정법은 고유진동수를 측정하여 장력을 구하는 진동법, 로드셀(Load cell)과 유압잭을 이용하여 측정하는 방법이 있으나, 측정 결과에 대한 재현성과 신뢰성이 부족하여 많은 연구가 진행 중이다.

본 연구에서는 대표적인 연성형 대공간구조물의 일종인 텐스그리티 구조물의 케이블을 대상으로, 광

* 정회원 · 한국기술교육대학교 건축공학부, 교수, 공학박사
Tel: 041-560-1334 Fax: 041-560-1224
E-mail : leeseung@kut.ac.kr

파이버 브래그 격자센서를 사용한 구조물 상시모니터링 방법을 제안한다.

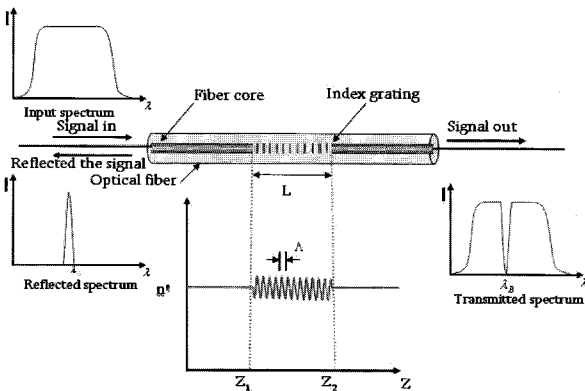
2. FBG 센서의 기본이론 및 특징

광섬유 브래그 격자 센서(Fiber Bragg Grating Sensor, 이하 FBG센서라 칭함)는 전자기적 노이즈가 없고 전자식 센서에 비하여 정확도 및 신호 안전성이 뛰어나다. 또한 광섬유는 250 μ m 직경의 소형경량이므로 구조물에 결합을 주지 않고 설치가 가능하고 80km까지 손실 없이 전송할 수 있어 대공간 구조물의 계측 시스템에 매우 유용하다. 전문의 이유로 현재 국내에서는 구조물의 실험 계측이나 교량이나 도로 등의 토목 구조물 계측에 적용되고 있다. FBG센서의 가장 큰 특징은 내구성이 크기 때문에 상시적인 계측이 가능하다는 점이다.

광섬유의 내면에 248nm 근방의 자외선 레이저를 이용하여 간섭무늬를 형성하면 <그림 1>과 같이 광섬유 코어에 주기적으로 굴절률이 변화하는 격자를 만들 수 있다¹⁾. 브래그 격자라고 불리는 이 격자는 입사된 광폭 스펙트럼에서 식 (1)과 같은 브래그 조건(Bragg condition)에 의해서 결정된 파장 성분만을 격자부분에서 반사시키고 나머지 파장 성분은 통과시키는 특성을 갖는다.

$$\lambda_B = 2n_e A \tag{1}$$

위 식에서 n_e 는 광섬유 격자의 유효 굴절률이고 A 는 광섬유 코어에 새겨진 격자의 간격(grating



<그림 1> FBG센서의 System

period)이다. 식 (1)에서 알 수 있듯이 격자에서 반사되는 브래그 파장은 유효 굴절률과 격자 간격의 함수이고 유효 굴절률과 격자의 주기는 온도와 변형률의 함수이므로 광섬유 브래그 격자에 온도나 변형 등의 외란이 가해지면 이들 값이 변하여 브래그 파장은 달라진다.

브래그 조건에서 브래그 파장의 전미분을 취한 후 온도, 변형률과 굴절률, 격자 간격의 식을 대입하면 식 (2)를 얻을 수 있고 변화된 브래그 파장을 측정하면 식 (2)로부터 광섬유 브래그 격자에 가해진 온도나 변형률을 계산해 낼 수 있다.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B [(\alpha + \xi)\Delta T + (1 - p_e)\epsilon] \tag{2}$$

여기서, p_e 는 광탄성 상수(photo-elastic constant)이며 다음과 같이 표현된다.

$$p_e = \left(\frac{n_e^2}{2} \right) [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \tag{3}$$

식 (2)에서 α 는 광섬유의 열팽창 계수(coefficient of thermal expansion, CTE)이고 ξ 는 온도에 의한 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열광학 계수(thermo-optic coefficient)이다. 그리고, 식 (3)에서 p_{11} 과 p_{12} 는 스트레인 광학 텐서(strain-optic constant)의 성분이며 n_e 는 코어의 유효 굴절률, ν 는 광섬유의 프와송 비(Poisson's ratio)이다. 광탄성 상수 p_e 는 게르마늄이 도우핑된 실리카 광섬유(germanosilicate glass)인 경우 대략 0.22의 값을 가진다고 알려져 있으나 광섬유에 따라 다른 값을 가질 수 있으므로 정확한 변형률을 측정하기 위해 이 값의 측정이 요구된다. 식 (2)에서 만약, 센서들 간의 온도차이가 없다면 $\Delta T = 0$ 으로 둘 수 있고 식 (4)와 같이 간단하게 변형률과 파장의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\epsilon = \frac{1}{1 - p_e} \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \tag{4}$$

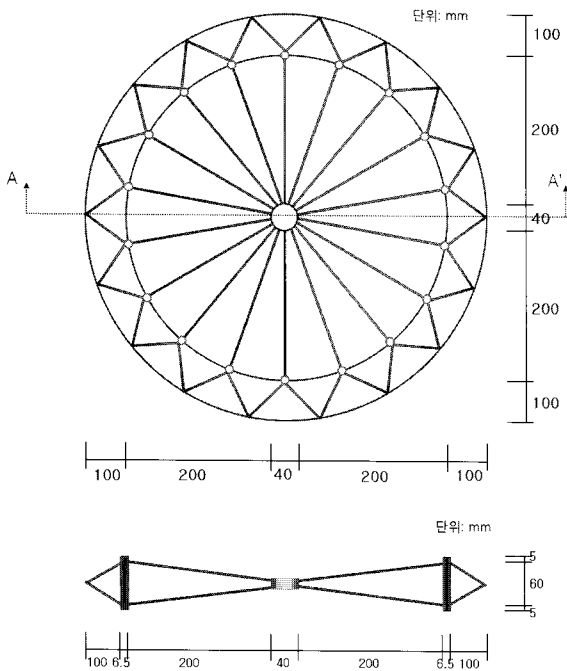
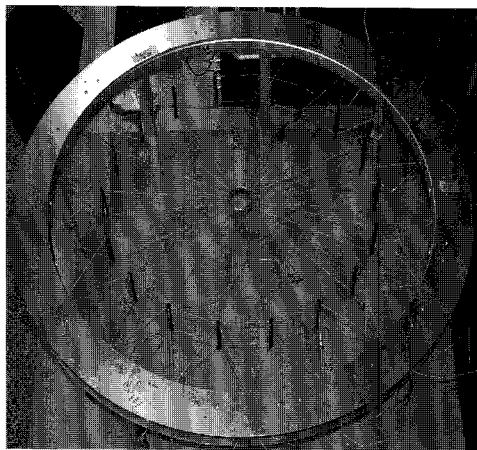
이 식을 이용하여 변형률을 구할 수 있다.

3. 시험체 및 계측계획

3.1 시험체 계획

본 연구에서는 케이블 돔 구조와 같은 텐서그리드형 연성구조물을 대상으로 한다. 이와 같은 구조물은 일반 구조물과 달리 케이블의 장력만으로 평형을 유지하는 구조시스템이다. 텐서그리드 구조의 케이블은 다발의 와이어, 강봉, 강연선 등을 긴장하여 강성을 확보함으로써 구조체를 이루고 있다. 계측 대상의 시험체는 <그림 2>와 같은 형태이다.

외원은 직경 60cm의 알루미늄 휠로 고정되어 있고, 내원은 $\phi 6.5mm$ 의 압축부재인 구리봉 18개가



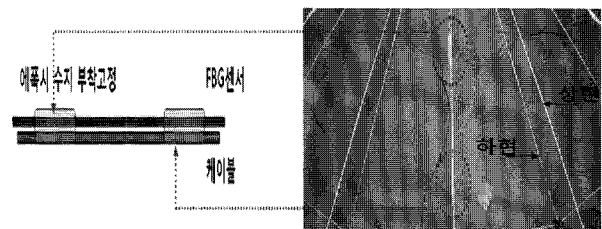
<그림 2> 시험체의 형태

케이블의 인장력으로 지지되어 고정되어 있다. 내원을 이루고 있는 압축부재를 사이에 두고 상현, 하현 각 18개의 직경 0.75mm의 케이블이 중심에 위치한 $\phi 40mm$ 의 원형링에 고정되어 있으며, 또한 외원과 압축부재는 외원의 케이블이 삼각형으로 연결되어 있는 모형시험체이다.

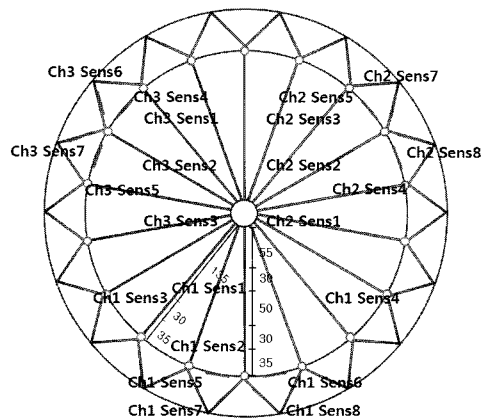
3.2 FBG센서의 부착 및 가력계획

FBG센서의 부착 위치는, 센서의 부착성과 내구성 등을 고려하여, 케이블에 직접 부착하였다. 케이블 부재와의 면밀한 부착을 위하여 내구성과 접착성이 뛰어난 에폭시 수지를 사용하였다. FBG센서의 고정 지점은 <그림 3>와 같이 센서의 길이를 3cm로 규격화하여 고정하였고, FBG센서의 양 끝점을 에폭시 수지로 고정 마감하여 부착 시공하였다.

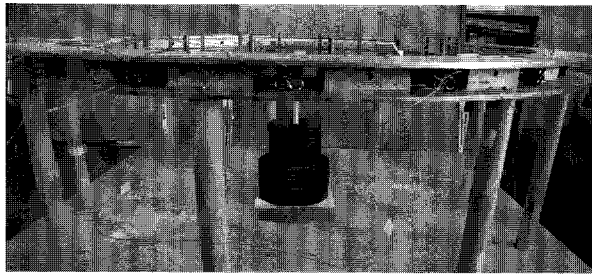
FBG센서의 부착 위치는 하중 재하지점과의 거리, 케이블 부재의 위치를 고려하여 <그림 4>와 같이 부착하였다. 먼저 하중재하지점을 고려하여 시험체 중심으로부터 5.5cm 떨어진 지점에 FBG센서를 부착하였다. 내원 안의 케이블 부재중 상현에 모형 시험체 중심으로부터 13.5cm 떨어진 지점에 9개 케이블



<그림 3> FBG센서 부착형태



<그림 4> FBG센서 부착위치



<그림 5> 하중재하방법

블에 부착하였고, 내원 부재에 6개의 센서를 부착하였다. 내원과 외원 사이의 삼각 케이블에 6개의 센서를 부착하여 총 22개의 변형을 계측을 위한 FBG 센서를 부착하였다. 온도에 민감한 FBG 센서의 특징을 고려하여 온도센서를 장착하였다. FBG 센서는 고유의 파장값을 가지는데 정확한 시험결과 도출, 파장값의 침범 위험성을 고려하여 세 채널의 광원을 이용하였다. 각 채널당 센서를 나누어 연결하여 시험 데이터를 수집하였다.

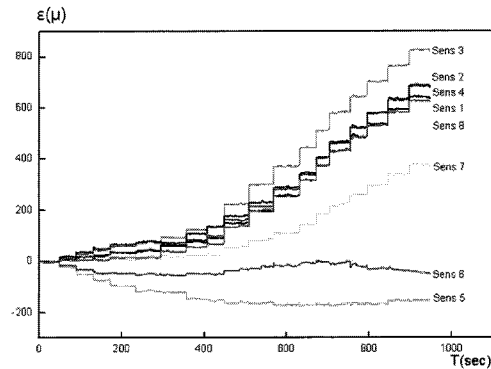
가력 계획은 <그림 5>와 같이 케이블 시험체의 중심점에 가력을 위하여 무게추 거치대를 설치하여 가력을 하였다. 하중재하방법은 1N, 2N, 3N, 4N, 5N, 9N, 10N, 15N, 20N, 25N, 30N, 35N, 40N, 44N, 49N, 54N, 59N의 하중을 순차적으로 주어 실험결과를 도출하였다.

4. 실험결과

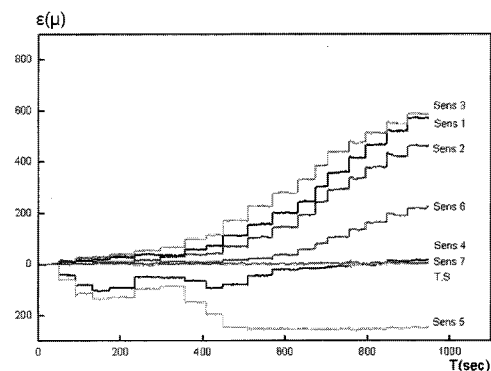
본 연구에서는 FBG 센서를 이용한 케이블 구조물의 상시 계측이 가능한지를 입증하기 위한 연구로서 변형을 연구대상으로 한다. 케이블에 하중이 작용하는 경우, 그 발생장력은 케이블의 변형율을 이용하여 초보적인 탄성이론에 의하여 쉽게 구할 수 있다.

현재 인장 구조물의 재료인 케이블의 거동 계측은 주로 장력 계측으로 이루어진다. 사용되어지고 있는 진동법이나 로드 셀 등은 정확성이나 상시성에 문제점이 있기 때문에 사용과 더불어 지속적인 연구가 진행 중이다.

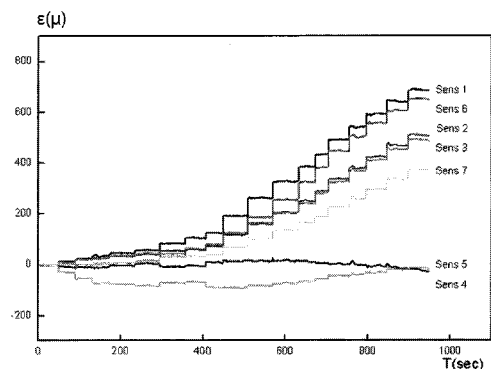
FBG 센서가 케이블 부재의 상시 계측이 용에 가능한지에 대한 사용성, 정확성을 입증하기 위하여 <그림 6>에서 <그림 8>과 같은 변형율-시간의 관계를 얻었다.



<그림 6> CH1 FBG 센서의 시간-변형율 관계



<그림 7> CH2 FBG 센서의 시간-변형율 관계



<그림 8> CH3 FBG 센서의 시간-변형율 관계

<그림 6>에서 <그림 8>의 결과에서 알 수 있듯이 하중의 변화에 따라 정확하고 민감한 변형을 가짐을 알 수 있다. CH2의 T.S는 온도 센서이고 온도 센서의 결과로 온도의 영향을 거의 받지 않았음을 알 수 있다. 본 시험은 텐스그리티형 연성구조물을 대상으로 하고 이와 같은 구조물은 일반 구조물과 달리 케이블의 장력만으로 평형을 유지하는 구조시스템이다. 하지만, 내원에 부착된 FBG 센서가 압축을 받는 것을 알 수 있다. 이 압축은 시험체 제작시

<표 1> 각 Sensor의 변형율 및 λ_B

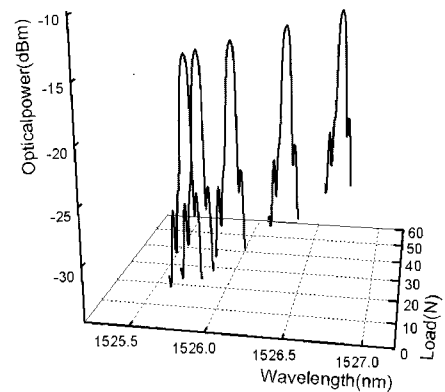
센서하중(N)		0	4	15	35	59		
C H 1	Sens 1	λ_B (nm)	25.893	25.936	26.073	26.342	26.665	
		strain(μ)	0	32.148	145.791	370.740	637.356	
	Sens 2	λ_B (nm)	30.788	30.832	30.984	31.278	31.616	
		strain(μ)	0	33.734	159.652	405.142	684.783	
	Sens 3	λ_B (nm)	35.837	35.910	36.104	36.452	36.830	
		strain(μ)	0	57.365	219.021	509.601	822.058	
	Sens 4	λ_B (nm)	40.468	40.549	40.680	40.958	41.291	
		strain(μ)	0	64.212	172.761	405.393	680.358	
	Sens 5	λ_B (nm)	45.452	45.340	45.259	45.253	45.274	
		strain(μ)	0	-97.611	-165.58	-170.92	-155.72	
	Sens 6	λ_B (nm)	50.656	50.601	50.615	50.653	50.602	
		strain(μ)	0	-49.014	-38.410	-6.847	-52.354	
	Sens 7	λ_B (nm)	56.382	56.391	56.444	56.611	56.836	
		strain(μ)	0	3.841	47.428	187.040	372.243	
	Sens 8	λ_B (nm)	59.994	60.013	60.154	60.450	60.746	
		strain(μ)	0	12.275	129.676	376.335	620.823	
	C H 2	Sens 1	λ_B (nm)	27.232	27.271	27.369	27.603	27.923
			strain(μ)	0	28.557	109.803	305.276	569.721
Sens 2		λ_B (nm)	32.429	32.465	32.517	32.728	32.988	
		strain(μ)	0	26.637	69.389	246.158	460.336	
Sens 3		λ_B (nm)	37.099	37.151	37.308	37.567	37.813	
		strain(μ)	0	39.412	170.507	386.438	589.176	
Sens 4		λ_B (nm)	41.108	41.000	41.017	41.097	41.136	
		strain(μ)	0	-93.520	-79.575	-12.776	16.783	
Sens 5		λ_B (nm)	46.080	45.931	45.790	45.781	45.796	
		strain(μ)	0	-128.00	-246.57	-254.09	-244.65	
Sens 6		λ_B (nm)	51.410	51.427	51.436	51.515	51.686	
		strain(μ)	0	10.772	17.451	83.083	223.029	
Sens 7		λ_B (nm)	56.765	56.769	56.765	56.764	56.780	
		strain(μ)	0	0.167	-4.175	-4.592	5.261	
T.S		λ_B (nm)	1565.125	1565.129	1565.130	1565.130	1565.133	
		strain(μ)	0	3.590	4.091	4.091	7.014	
C H 3		Sens 1	λ_B (nm)	27.895	27.954	28.128	28.420	28.725
			strain(μ)	0	46.092	190.714	434.450	686.203
	Sens 2	λ_B (nm)	33.206	33.252	33.352	33.560	33.822	
		strain(μ)	0	34.569	117.652	290.998	507.346	
	Sens 3	λ_B (nm)	38.166	38.213	38.317	38.507	38.759	
		strain(μ)	0	35.404	122.495	280.477	488.392	
	Sens 4	λ_B (nm)	42.130	42.130	42.149	42.141	42.106	
		strain(μ)	0	-3.423	11.439	5.177	-27.304	
	Sens 5	λ_B (nm)	47.134	47.045	47.029	47.072	47.123	
		strain(μ)	0	-77.905	-91.516	-55.360	-16.032	
	Sens 6	λ_B (nm)	52.157	52.170	52.310	52.620	52.945	
		strain(μ)	0	6.847	122.996	382.514	650.966	
	Sens 7	λ_B (nm)	61.436	61.451	61.524	61.666	61.888	
		strain(μ)	0	9.269	69.556	188.459	370.490	

(λ_B 의 1500nm는 생략하였음)

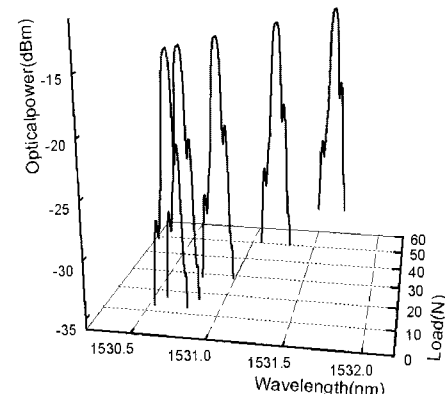
의 균등한 초기장력을 도입하지 못함과 하중재하시의 진동에 의한 것으로 판단된다.

<표 1>은 하중재하 시에 각 FBG센서의 파장 및 변형율의 변화를 나타낸다. 각 하중 중에 0N, 4N, 15N, 35N, 59N시 센서별 변화로 하중증가에 따른 센서의 변화이다. 특히, 채널1의 센서3의 경우 하중이 59N일때 변형율이 882.508 μ strain으로 큰 인장 변형율을 계측할 수 있음을 알 수 있다.

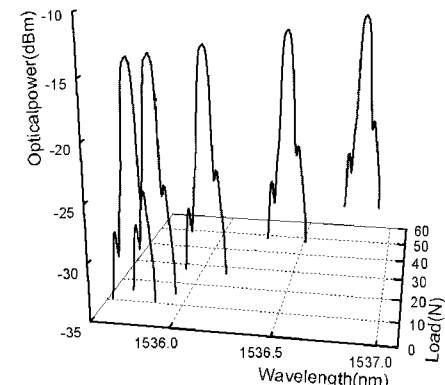
<그림 9>에서 <그림 14>는 채널1의 FBG센서 1-5 번과 온도센서의 0N, 4N, 15N, 35N, 59N시 브래그



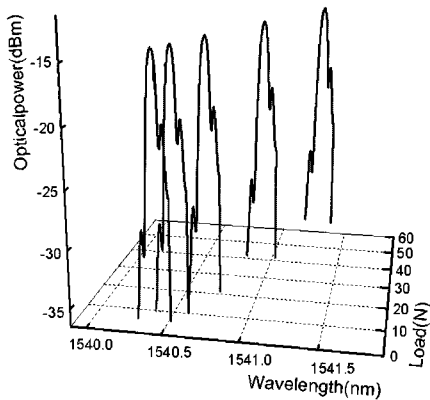
<그림 9> CH1 Sens1의 파장-광출력-하중 관계



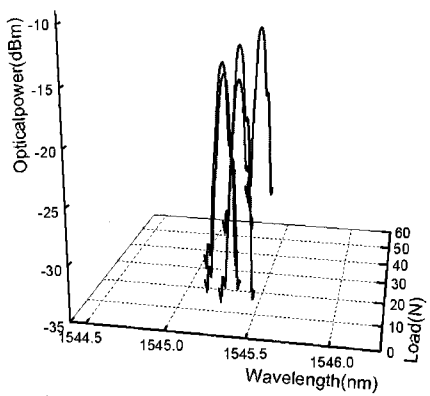
<그림 10> CH1 Sens2의 파장-광출력-하중 관계



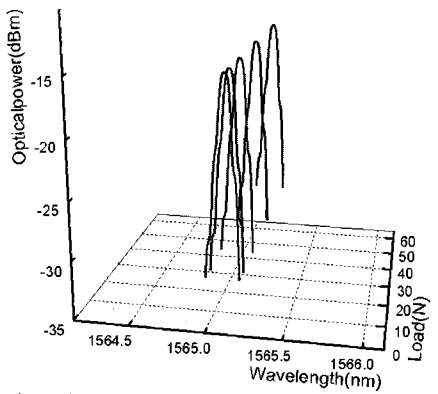
<그림 11> CH1 Sens3의 파장-광출력-하중 관계



〈그림 12〉 CH1 Sens4의 파장-광출력-하중 관계



〈그림 13〉 CH1 Sens5의 파장-광출력-하중 관계



〈그림 14〉 CH2 T.S의 파장-광출력-하중 관계

파장-하중의 관계이다.

각 FBG센서별로 각자의 브래그 파장의 변화가 다르다. 이 브래그 파장의 변화는 각 FBG센서의 변형율과 비례한다. CH1 Sens 3의 파장의 변화가 가장 큼을 알 수 있는데 이것은 변형율에 비례하여 가장 큼을 알 수 있다. 이런 브래그 파장의 변화로 시험체 각 부분의 변형율을 알 수 있다.

FBG센서의 브래그 파장-하중의 관계를 두 가지로 해석 가능하다. 각 FBG센서는 각자의 고유의 위치를 지닌다. 그러므로 각 센서로부터 취득된 브래

그 파장의 변화 및 신호의 세기, 신호 검출 시간 등을 통해 대략적인 위험 위치와 장력을 판단 가능할 것이다. 또한 케이블에 어떤 외력 작용 시에 그 외력에 대한 브래그 파장을 수신하여 장력을 계측할 수 있는 시스템이 형성 가능할 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 연성형 대공간구조물의 일종인 텐서그리티 구조물 모형 시험체를 제작하여, 케이블에 FBG센서를 부착하여 하중재하 시험을 수행하였다. 시험을 수행한 결과 케이블의 외력에 대한 연속적이고 민감하며 정확한 계측이 가능했다. 그러므로 텐서그리티 구조물에 계측용 센서로 사용할 경우, 실시간의 장기적이고 안정적인 계측이 가능하다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비지원(과제번호 # '06 R&D B03)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 이창우, 이승재, 주기수, "광섬유센서를 이용한 대공간 구조물의 상시 모니터링", 한국공간구조학회 논문집, 제 7권 제 3호, 2007, pp.49-55
2. 김기수, 한인동, "광섬유 스마트 구조물의 개념을 이용한 교량상부 내진거동 측정" 한국복합재료학회 학회지 19권 3호, 2006,pp.43-50.
3. 최만용, 박해원, 이규, 장선재, 이승석, "현수시스템의 케이블 장력 측정을 위한 표준 시험장치의 개발" 한국구조물진단학회 2006 봄 학술발표 논문집, 2006.5,pp.7-12.

접수일자 : 2008년 9월 8일

심사완료일자 : 2008년 10월 31일

게재확정일자 : 2008년 11월 6일