

論文2001-38SD-8-4

# 코드분할 다중화 방식을 이용한 다중 광섬유 브래그 격자 센서 시스템

## (Multiple FBG Sensor System Using Code Division Multiple Access)

柳 亨 燾 \* , 李 鎬 俊 \*

(Hyungdon Ryu and Hojoon Lee)

## 요 약

과장을 스캐닝하기 위해 Fabry-Perot 필터를 사용하는 기존의 광섬유 브래그 격자(FBG) 스트레인 측정 시스템은 PZT의 히스테리시스 특성과 필터의 느린 스캐닝 시간 그리고 높은 가격으로 인해 응용이 제한적이다. 광원으로 비교적 저가인 발광 다이오드(LED)를 사용하고 FBG 센서를 다중화하기 위해 코드 분할 다중화(CDM) 방식을 도입한 다중 FBG 센서 시스템을 제안하였으며 실험을 통해 특성을 측정하였다. 실험은 정적 스트레인과 동적 스트레인을 측정하기 위한 두 가지 구조의 시스템에 대한 출력과 센서 신호간의 누화를 측정하였다. 구성된 시스템은 매우 저가이고 빠른 응답속도를 갖으며 누화의 레벨은 -30 dB 이하로 측정되었다.

## Abstract

The performance of the ordinary Fiber Bragg Grating(FBG) sensor strain measurement system, which uses Fabry-Perot filter for scanning wavelength, has limitation for application because of hysteresis characteristics of PZT element in the filter, slow scan rate of the filter and the high cost of system. We proposed and experimented a multiple FBG sensor system using light emitting diode(LED) as a light source and adapting Code Division Multiplexing(CDM) method to separating out individual sensor signal. Output signals for a applied static and dynamic strain and crosstalk levels between sensor signals were measured. The price of the system is very low and the response speed is very fast. Crosstalk levels between sensor signals below - 30 dB were demonstrated.

## I. 서 론

광섬유 코어 내의 주기적인 굴절률 변화에 의해 제작되는 광섬유 브래그 격자(fiber bragg grating, FBG)는 현재 광통신 소자로 많이 이용되며, 손실이 적고 전기자기장의 영향을 받지 않으며 부피가 작음은 물론 스트레인, 온도, 진동 등의 물리량 변화에 민감하게 반

응하므로 광섬유 센서로 활발하게 연구가 진행되고 있는 소자이다. 외부로부터의 물리량의 변화는 FBG 중심 파장을 변화시키고 이를 검출함으로써 외부의 물리량을 측정할 수 있으며, 단일 광섬유 내에 FBG를 파장 분할하여 다중화 할 수 있고 부피가 작으므로 구조물 내에 삽입하여 여러 지점의 변형을 감지할 수 있다. 다중 광섬유 센서 시스템의 개발은 저렴한 가격에 얼마나 많은 센서의 신호를 정확하고 빠르게 검출하느냐가 관건이라 하겠으며 이를 이루기 위해 코히어런스 다중화(coherence multiplexing), 시간 분할 다중화(time division multiplexing), 주파수 변조 반송파 다중화(frequency modulated carrier wave multiplexing), 코

\* 正會員, 湖西大學校 電氣情報通信工學部 光通信研究室  
(Optical Comm. Lab., Dept. of Electric & Infor. Comm. Eng., Hoseo Univ.)

接受日字:2000年11月20日, 수정완료일:2001年7月20日

코드분할 다중화(code division multiplexing, CDM)<sup>[1]</sup> 등 다양한 형태의 다중화 방식이 연구되고 개발되었다. FBG를 이용한 다중 광섬유 센서 시스템 중 FBG의 파장변화를 검출하기 위해 Fabry-Perot 필터를 사용한 시스템<sup>[2]</sup>이 개발되었으나 파장 스케닝을 위해 Fabry-Perot 필터에 부착된 PZT의 히스테리시스와 느린 스케닝 시간으로 정확하고 빠른 센서 신호의 검출이 어려워 그 응용에 많은 제한을 받으며 FBG의 파장변화를 검출하기 위해 필수적인 동조 Fabry-Perot 필터가 고가이므로 전체 시스템 역시 고가이다. 또한 광섬유 센서로 FBG를 사용하여 센서 동작 범위를 증가시키기 위해 광원으로 동조 레이저를 사용하고 CDM 방식을 적용한 다중 센서 시스템의 구성 방법에 대한 연구<sup>[3]</sup>가 보고되었으나 동조 레이저는 매우 고가이며 전자 시스템의 구성이 복잡하다. 광섬유 센서로 간접계 센서를 사용하고 CDM 방식을 적용한 다중화 방법<sup>[4-6]</sup>이 보고된바 있으나 센서의 다중화 정도에 따라 센서의 구성이 매우 복잡하고 센서의 매설에 어려움이 있으며, 전자회로의 구성에 의해 다중 센서의 확장이 제한되고 비교적 고가인 레이저를 광원으로 사용하므로 약간의 시스템 가격 상승은 불가피하다 하겠다.

본 논문은 위에서 언급한 시스템들의 단점을 보완하기 위하여 광원으로 발광 다이오드(LED)를 사용하였고 단일 광섬유 내에 FBG의 파장을 분할하여 센서를 다중화 하였으며 여러 센서의 신호를 동시에 관측하기 위해 코드 분할 다중화(Code Division Multiplexing, CDM) 방식을 적용하였으나 그 방식을 새롭게 하여 시스템을 구성하였다<sup>[7]</sup>. CDM 방식의 적용은 다중 광섬유 시스템의 가격을 낮출 뿐만 아니라 광대역의 광섬유 대역폭을 효과적으로 사용하여 센서의 다중화에 매우 유용하다고 할 수 있다.

## II. 코드 분할 다중화(Code Division Multiplexing)

다중화한 광섬유 센서의 신호를 분리하기 위하여 스펙트럼 확산 통신 이론에 기초를 둔 CDM 기술을 적용하였다. CDM 시스템은 pseudo random binary sequence(PRBS)의 자기상관(autocorrelation) 현상을 기초로 하며, PRBS는 쉬프트 레지스터(shift register)를 이용하여 간단히 만들 수 있다. 본 논문에서는 사용한 쉬프트레지스터에서 발생 가능한 최대 길이의

PRBS를 사용하였는데, PRBS의 최대 길이( $L$ )는  $L=2^m-1$  이 되며  $m$ 은 쉬프트 레지스터의 갯수를 나타내고  $L$ 은  $m$ 에 의해 결정된다. 또한 PRBS는 주기적으로 반복되는데 0과 1이 균일하게 발생되므로(실제로 PRBS를 발생시키면 bit의 수는 항상 홀수가 되므로 0 또는 1이 하나 더 많음) 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$p_i' \in \{0, 1\} \forall i, 1 \leq i \leq K \quad (1)$$

$$p_i \in \{-1, 1\} \forall i, 1 \leq i \leq K \quad (2)$$

$K$ 는 PRBS의 주기이고  $p_i'$ 와  $p_i$ 는 주기적으로 반복되는 광 PRBS와 전기적인 PRBS를 나타낸다. 그러므로 자기상관함수  $R(m)$ 은

$$R(m) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K p_i' p_{i+m} = \begin{cases} 1, & m=0 \\ 0, & 0 < |m| < K \end{cases} \quad (3)$$

과 같이 정의되고, 연속적인 신호에 대한 자기상관함수  $R(\tau)$ 는 적분형태인

$$R(\tau) = \frac{1}{K_T} \int_0^T p'(t) p(t+\tau) dt = \begin{cases} 1, & \tau=0 \\ 0, & |\tau|>0 \end{cases} \quad (4)$$

와 같이 정의된다. 여기서  $K_T$ 는 정형화된 주기를 나타낸다.

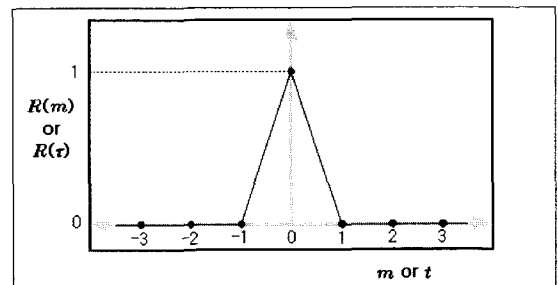


그림 1. 이산신호와 연속신호의 자기상관함수  
Fig. 1. Autocorrelation function.

그림 1은 식 (3)과 식 (4)를 그림으로 표현한 것으로 점으로 표시된 것은 이산신호의 자기상관함수  $R(m)$ 을 나타내고 실선으로 표시된 것은 연속신호의 자기상관함수  $R(t)$ 을 나타낸다. 여기서 주목할 점은 자기상관함수는 두 신호가 한 비트 이상 차이가 나게되면 '0'의 값을 갖는 것인데, 바로 이러한 성질을 이용하여 여러 센서들의 신호를 분리하게 되는 것이다.

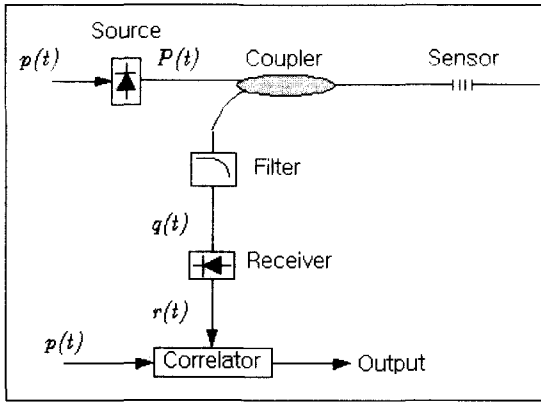


그림 2. 코드 분할 다중화  
Fig. 2. CDM Technique.

그림 1은 자기상관함수의 일반적인 성질을 표현한 것이고 그림 2와 같은 시스템에서는 다음과 같이 표현할 수 있다. 광원으로 출력되는 광 신호를  $P(t)$ , 입력 신호를  $p(t)$ , 전달 임피던스와 전광변환 효율의 임펄스 응답을  $h_s(t)$ 라 하면 광 출력 신호  $P(t)$ 는  $p(t)$ 와  $h_s(t)$ 의 컨벌루션(convolution,  $\otimes$ )으로 다음과 같다.

$$P(t) = p(t) \otimes h_s(t) \quad (5)$$

광 결합기를 통과하고 센서에서 반사되어 다시 광 결합기를 통하는 빛의 임펄스 응답이  $f_s(t)$ 이면 광 결합기의 출력  $q(t)$ 는

$$q(t) = P(t) \otimes f_s(t) \quad (6)$$

와 같이 된다. 광 필터의 임펄스 응답을  $f_f(t)$ , 수신기의 광전변환 효율과 트랜스 임피던스의 임펄스 응답을  $h_r(t)$ 라고 하면 광 검파기의 출력  $r(t)$ 는

$$r(t) = h_r(t) \otimes f_f(t) \otimes q(t) \quad (7)$$

이고 식 (5), 식 (6), 식 (7)을 정리하면  $r(t)$ 는

$$r(t) = h(t) \otimes p(t) \otimes f(t) \quad (8)$$

가 된다. 여기서  $h(t)$ 는 시스템 전체의 전광·광전변환 효율로  $h_s(t) \otimes h_r(t)$ 이고,  $f(t)$ 는 전체 광센서부의 임펄스 응답으로  $f_s(t) \otimes f_f(t)$ 를 나타낸다.  $p(t)$ 와  $r(t)$ 의 상관(correlation,  $*$ )은

$$p(t) * r(t) = p(t) * [h(t) \otimes p(t) \otimes f(t)]$$

$$= [p(t) * p(t)] \otimes [h(t) \otimes f(t)] \quad (9)$$

이고,  $p(t)$ 는 자기상관함수이므로  $p(t) * p(t)$ 는  $\delta(t)$ 로 근사화되어  $p(t) * r(t)$ 는

$$p(t) * r(t) \sim \delta(t) \otimes [h(t) \otimes f(t)] = h(t) \otimes f(t) \quad (10)$$

로 표현된다. 시스템에 의해  $p(t)$ ,  $r(t)$ ,  $h(t)$ 가 결정되면 식(10)으로부터  $f(t)$ 를 얻을 수 있으므로 센서 신호를 검출해 낼 수 있다.

### III. 다중 FBG 센서 시스템의 구성 및 실험

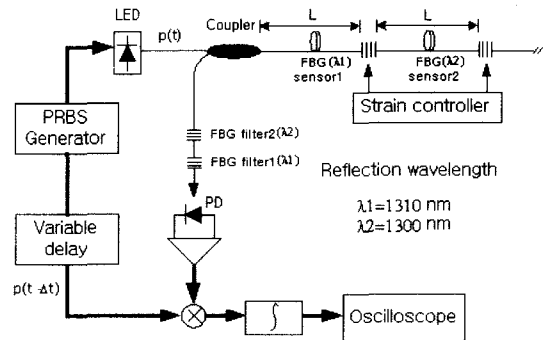


그림 3. 제안한 다중 FBG 센서 시스템의 실험 구성도  
Fig. 3. Experimental setup for proposed multi FBG sensor system.

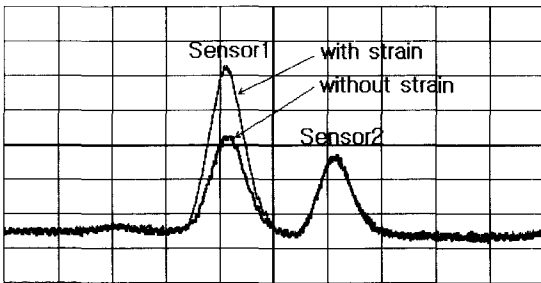
그림 3은 새롭게 제안한 다중 FBG 센서의 실험 구성도이다. 시스템의 구성은 우선 광원을 직접 변조하는 PRBS와 일정하게 지연된 PRBS를 만드는 PRBS 발생 장치, PRBS에 의해 변조된 빛을 발생하는 광원, 외부 물리량을 감지하는 광섬유 센서부, 광전변환과 신호를 증폭하는 광 검파장치와 수신된 신호로부터 센서 신호를 분리해 내는 상관장치(correlator)로 구성되어 있다. PRBS 발생기에서 발생된 PRBS는 광원으로 사용된 1300 nm 대역의 LED를 변조한다. PRBS 발생기는 8개의 쉬프트 레지스터와 논리회로로 구성되어 있으며, 사용한 PRBS는 최대 길이인 255 bit이고, 한 비트(bit or chip)의 시간은 50 ns이므로 PRBS의 반복 주기는 12.75  $\mu$ s 가 된다. 광원의 대역폭이 충분히 넓다면 이론적으로 100개 이상의 센서를 다중화할 수 있다. 광원으로는 1300 nm 대역의 중심파장이 1290 nm, 대역폭이 40 nm인 LED를 사용하였는데, LED로부터 전광 변환된

광 PRBS는 광 결합기(coupler)와 적당한 지연을 위한 광섬유를 통하여 직렬로 연결된 센서 1과 센서 2에 도달하고 센서로부터 반사된 신호는 다시 광 결합기를 통해 필터 1과 필터 2에서 필터링된 후 광 검파기에 의해 수신된다. 센서 1과 필터 1로 사용한 FBG는 중심 파장이 1310 nm 이고 반사율이 60 % 이상이고, 센서 2와 필터 2로 사용한 FBG는 중심파장이 1300 nm 이고 반사율은 60 % 이다.

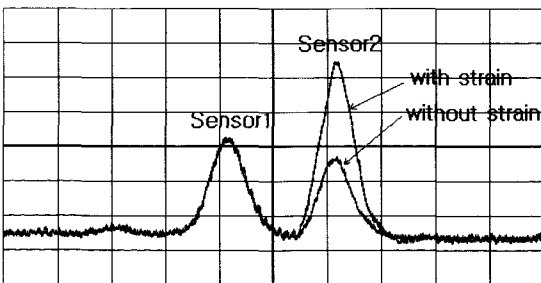
필터를 거쳐 수신된 신호는 증폭기를 통하여 증폭된 후 PRBS 발생기에서 발생시킨 PRBS를 일정한 시간만큼 지연시간이 증가( $\Delta t$ )하며 센서 신호를 스케닝하는 PRBS와 곱셈연산을 하게된다.  $\Delta t$ 는 0부터 PRBS의 주기인 12.75  $\mu s$  까지 12.5 ns 씩 증가하며 스케닝 지연을 통한 PRBS가 수신 신호와 곱하여 지면서 한번 수신 신호를 스케닝하는데 걸리는 시간은 13.005 ms가 된다. 광원으로부터 센서와 필터를 거쳐 수신되는 광 신호는 지연 PRBS 신호와 정확한 동기에서 곱해 지도록 적당한 길이의 광섬유를 통과하게 된다. 곱셈기에서

곱셈 연산된 수신 신호와 스케닝 PRBS는 적분기에서 적분되는데 적분기 출력의 피크 값들은 각각의 센서에 의한 신호이며 이 피크 값들은 외부의 물리량에 의해서 변화하게 되므로 오실로스코프로 그 변화를 측정하였다.

그림 4는 정적 스트레인을 인가할 수 있도록 에폭시 막대기(epoxy bar)에 부착한 센서 1과 센서 2에 각각 스트레인을 인가하면서 적분기의 출력을 측정 한 것이다. 센서 1에 스트레인을 가한 경우(그림 4(a)) 센서 1에 해당하는 출력 전압 피크 값은 상승하지만 센서 2에 해당하는 출력 전압 피크 값은 변화가 없고, 센서 2에 스트레인을 가한 경우(그림 4(b))도 마찬가지로 센서 2에 대한 출력만 변화한다. PRBS의 지연을 고정 한 상태에서의 각 상관장치(correlator)의 출력은 센서 한 채널에 대한 것으로 다중화한 센서의 수만큼 상관장치가 필요하지만, 스케닝 지연을 사용함으로써 하나의 상관장치가 다중화된 여러 센서의 신호를 출력하게 된다. 이것은 시스템의 전자회로 구성을 매우 단순화시킬 뿐 아니라 차후에 있을 수 있는 센서의 확장에 있어서도 매우 유리한 장점으로 작용한다.



(a)



(b)

그림 4. 적분기 출력 파형의 변화  
(a) 센서 1에 스트레인을 인가한 경우  
(b) 센서 2에 스트레인을 인가한 경우

Fig. 4. Output signal of correlator.  
(a) for applying strain to sensor 1  
(b) for applying strain to sensor 2

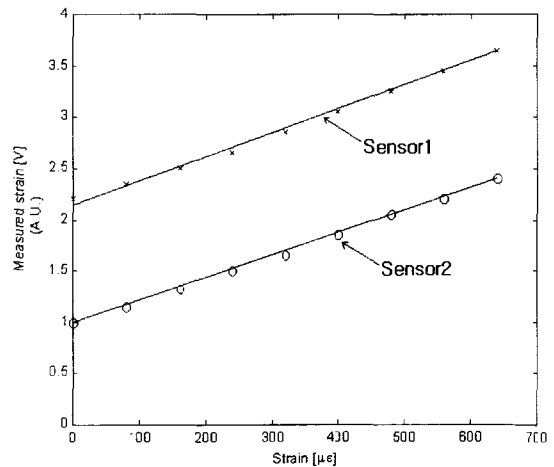


그림 5. 인가 압력에 대한 출력 전압  
Fig. 5. Applied vs. system's output.

그림 5은 그림 4에서 보인 각 센서에 해당하는 출력 전압 피크 값의 변화를 인가한 스트레인에 대한 함수로서 나타낸 그래프인데, 인가한 스트레인의 범위 내에서 각 센서에 대한 출력 전압의 피크 값은 선형적으로 변화하였다.

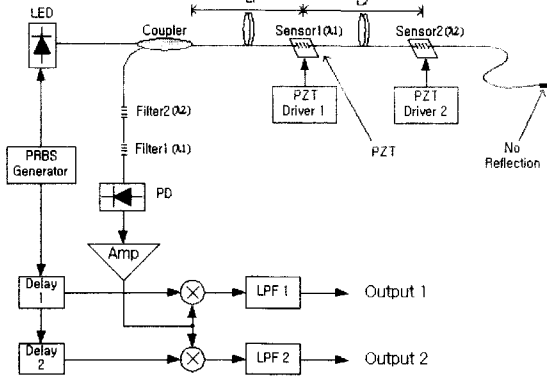


그림 6. 누화측정을 위한 실험 구성도  
Fig. 6. Experimental setup for crosstalk measurement.

다음은 센서 채널간의 누화(crosstalk)를 측정하기 위해 그림 6과 같이 실험 장치를 구성하여 실험하였다. 광원으로는 1550 nm 대역의 중심파장이 1555 nm, 대역폭이 60 nm인 LED를 사용하였는데, LED로부터 전광 변환된 광 PRBS는 광 결합기와 적당한 지연을 위한 광섬유를 통하여 직렬로 연결된 센서 1과 센서 2에 도달하고 PZT에 의해 변조된 센서 신호가 각각 필터 1과 필터 2에서 필터링된 후 광 검파기에 의해 수신된다. 센서 1과 필터 1은 중심파장이 1534.5 nm 이고 반사율이 90 % 이상인 가능한 비슷한 특성의 chirped FBG를 사용하였고, 센서 2와 필터 2 또한 중심파장이 1549 nm이고 반사율이 90 % 이상인 비슷한 특성의 chirped FBG를 사용하였다. 지연 1과 지연 2의 시간지연은 각각 200 ns씩으로 지연 1을 통한 PRBS의 지연시간은 200 ns, 지연 2를 통한 PRBS의 지연시간은 400 ns이 된다. 광섬유 내에서의 빛의 속도를  $2 \times 10^8$  %로 계산하면, 필요한 광의 전파 경로 길이는 센서 1의 경우 40 m 이고 센서 2의 경우 80 m이다. 그림 6에서  $L_1$ ,  $L_2$ 는 광원으로부터 광 결합기까지의 거리와 광 결합기부터 광 검파기까지의 거리를 고려하여  $L_1$ 은 12.7 m로 하였고,  $L_2$ 는 20 m로 하여 FBG 센서로부터 반사된 PRBS와 지연기를 통한 PRBS의 동기를 일치시켰다.

그림 7은 FBG 센서에서 반사하는 빛의 양이 매우 작으므로 센서 2를 제거한 후 센서 1에 연결된 커넥터의 단면에서 반사되는 빛에 의해 수신된 PRBS(아래)와 지연 1을 통해 출력된 PRBS(위)를 보이고 있다. 커넥터 단면과 센서 1과의 거리는 약 30 cm 이고 이로 인한 시간 지연은 3 ns정도로 무시할 수 있다. 그림 7에

서 시스템의 설계시에 반전증폭을 하였으므로 두 신호의 위상은 반대이나 동기가 일치하는 것을 볼 수 있으며 이러한 동기는 그림 1에서 보인바와 같이 시스템의 SNR에 많은 영향을 주게 되고 시스템의 구성에 있어서 SNR을 향상시키기 위해 매우 중요하다. 고속의 동적 스트레인을 측정하기 위해 그림 6에서 센서 1과 센서 2에 PZT를 이용하여 서로 다른 동적 스트레인을 인가하고 적분기 1과 적분기 2의 출력을 오실로스코프로 측정하였다. PZT 구동장치는 PZT에 정현파를 공급하여 PZT에 부착된 FBG 센서 신호를 변조하고 함께 부착된 스트레인 게이지로부터 출력되는 신호도 변조하게 된다. 이 신호를 시스템의 출력과 비교하기 위해 시스템의 출력과 함께 오실로스코프로 측정하였다.

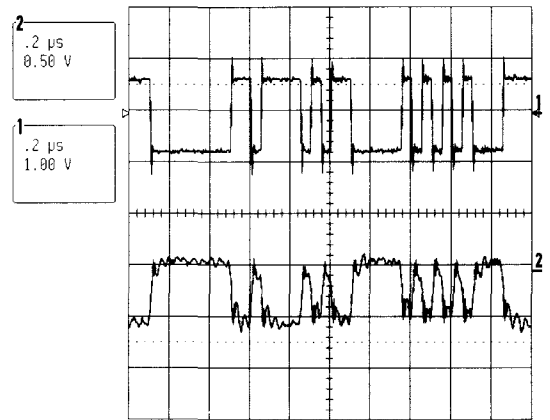


그림 7. 지연 1에 의해 지연된 PRBS(위)와 센서 1의 커넥터 단면에서 반사된 PRBS(아래)  
Fig. 7. Electronically delayed PRBS(upper) and Optical delayed and detected PRBS(lower).

그림 8(a)와 그림 8(b)는 센서 1과 센서 2에 대해 각각의 센서에 해당하는 PZT 구동장치의 출력(위)과 시스템의 출력(가운데), 그리고 센서와 함께 PZT에 부착된 스트레인 게이지의 출력(아래)을 나타내고 있다. 실험에서 PZT 구동장치의 출력 전압은 AC 60 Vp-p 로, 출력 주파수는 각각의 PZT 공진 주파수에 맞게 설정되었는데(센서 1: 800 Hz, 센서 2: 740 Hz), 낮은 주파수 대역의 잡음으로 인한 신호의 일그러짐과 PZT의 응답 특성으로 인한 위상 차는 있지만 가해진 진동 신호가 충분히 복원되고 있음을 알 수 있다. 잡음의 원인은 FBG 센서로부터 반사되는 빛의 양이 매우 작아 광 검파기에서 PRBS의 정확한 복원이 힘든 것과 PRBS

발생기에서 발생하는 PRBS에서의 리플 등을 생각할 수 있는데 광원으로 광 전력이 큰 ASE 광원을 사용하고 리플을 줄인다면 시스템의 SNR은 개선될 수 있으며 현재 보이고 있는 출력신호 또한 신호처리과정에서 평균화와 같은 과정을 거치게 되면 충분히 신호처리가 가능하다.

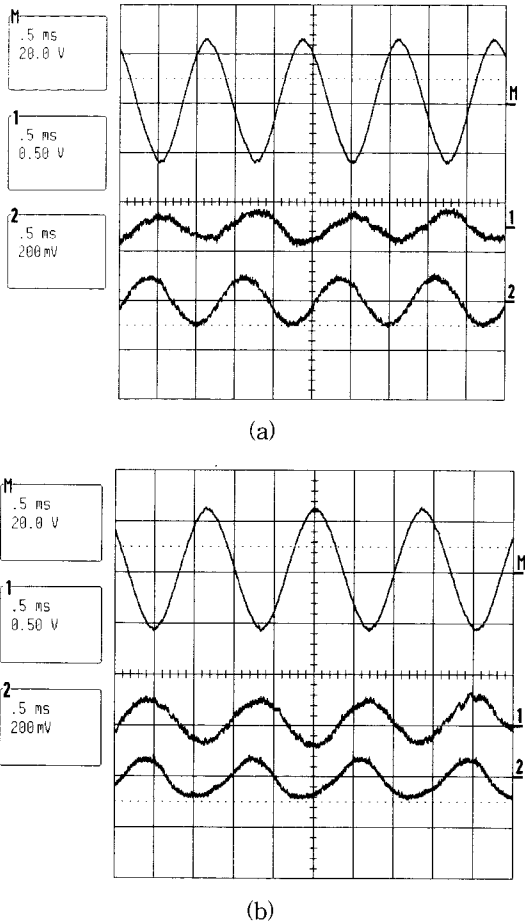


그림 8. 각각의 센서에 인가한 동적 스트레인에 대한 시스템의 출력  
(a) 센서 1 (b) 센서 2  
(위: PZT 구동장치의 출력, 가운데: 시스템의 파형, 아래: 스트레인 게이지의 파형)

Fig. 8. Output waveform of system by applied strain to each sensor.  
(a) sensor 1 (b) sensor 2  
(upper: output of PZT driver, middle: output of system, lower: output of strain gauge)

그림 8에 보인 시스템 출력 신호의 주파수를 분석하기 위해 디지털 오실로스코프에서 지원하는 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform, FFT) 기능을 사용하였다.

그림 9는 각각의 센서 신호에 대한 FFT 결과를 나타낸 것으로 좀더 자세한 관찰을 위해 확대한 그림이다. 센서 1의 전력 스펙트럼(위)에서 센서 1의 주파수 성분은 800 Hz에서 가장 큰 값을 보이고 있으며 센서 2에 의한 주파수 성분인 740 Hz에서는 매우 낮은 값을 보인다. 마찬가지로 센서 2의 전력 스펙트럼은 740 Hz에서 가장 큰 값을 갖으며 센서 1에 의한 주파수 성분인 800 Hz에서는 낮은 값을 갖는다. 측정에 의한 누화의 레벨은 센서 2에서 센서 1로는 약 -30 dB이고 센서 1에서 센서 2로는 약 -33 dB로 다중화한 센서 신호를 훌륭히 분리하고 있음을 알 수 있으며, 사용한 PZT의 특성등을 고려하여 계산한 결과 검출 가능한 최소 스트레인은 약  $0.07 \mu\epsilon/\sqrt{Hz}$  이다.

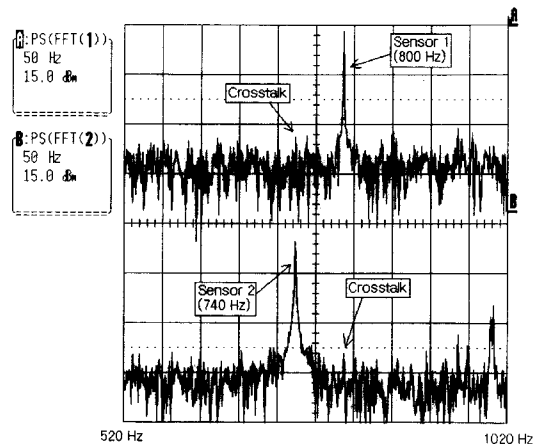


그림 9. 각각의 센서에 대한 시스템 출력의 전력 스펙트럼(위: 센서 1, 아래: 센서 2)

Fig. 9. Power spectrum of system's output for each sensor.(upper: sensor 1, lower: sensor 2)

#### IV. 결론

다중화한 FBG 센서의 신호를 분리하기 위해 CDM 기법을 이용하였다. PRBS의 시간지연을 스캐닝함으로써 단순한 전자 회로의 구성이 가능하였고 전자회로의 변경없이 FBG 센서를 다중화할 수 있으므로 센서의 확장이 매우 편리하며, 구성된 시스템에서 인가한 스트레인에 대해 선형적인 출력을 얻을 수 있었다. 또한 FBG에 800 Hz 대의 동적인 스트레인을 인가하여 시스템의 빠른 응답을 확인하였고 센서 채널간의 누화를 측정하였다. 측정된 누화의 레벨은 -30 dB 이하였으며

검출 가능한 최소 스트레인은  $0.07 \mu\epsilon/\sqrt{Hz}$  로 계산되었다. 광원의 대역이 충분히 넓고 PRBS 의 길이가 충분히 길다면 단순한 전자 회로의 구성으로 매우 많은 수의 FBG 센서를 직렬로 연결하여 다중화 할 수 있으므로 CDM 기법은 FBG 센서의 다중화에 매우 유용하다 하겠다.

참 고 문 헌

[1] H.S. Al-Raweshidy and D. Uttamchandani, "Spread Spectrum technique for passive multiplexing of interferometric optical fiber sensors," *Opt. Commun.*, vol. 80, no. 1, 18-22, 1990.

[2] A.D. Kersey, T.A. Berkoff and W.W. Morey, "Multiplexed fiber Bragg grating strain sensor system with a fiber fabry-Perot wavelength filter," *Opt. Lett.*, vol. 18, no. 16, 1370-1372, 1993.

[3] K.P. Koo, A.B. Tveten and S.T. Vohra, "DWDM of Fiber Bragg Grating Sensors without Sensor Spectral Dynamic Range Limitation using CDMA," *OFC '99*, pp. 168-170, 1999.

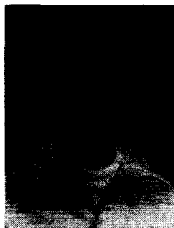
[4] A.D. Kersey, A. Dandridge and M.A. Davis, "Low-crosstalk code-division multiplexed interferometric array," *Electron. Lett.*, vol. 28, no. 4, pp. 351-352, 1992.

[5] S.H. Poland, J.P. Bengtsson, M. Bhatnagar, K.C. Ravikumar, M.J. de Vries and R.O. Claus, "Multi-Measurand multiplexed extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors," *Smart Structures and Materials: Smart Sensing, Processing, and Instrumentation, Proc. SPIE 2191*, pp. 58-66, 1994.

[6] Fredrik Kullander, Claes Laurent, Stan Zyra and Henrik Gels, "Crosstalk reduction in a code division multiplexed optical fiber sensor system," *Opt. Eng.* vol. 37, no. 7, pp. 2104-2107, 1998.

[7] Ryu H., Lee H., Kim K.-S., "Economical and Multiple Fiber Grating Sensor System with Rapid Response Using CDMA," *Proc. of 14th International Conf. on Optical Fiber Sensors*, pp. 712-715, 2000.

저 자 소 개



柳亨燾(正會員)  
1999년 2월 호서대학교 정보통신공학과(학사). 2001년 2월 호서대학교 대학원 정보통신공학과(석사). 2000년 11월~현재 케이엠텔레콤(주) 기술연구소 연구원. <주관심 분야> 광통신시스템, 광센서, 이동통신시스



李鎬俊(正會員)  
1978년 2월 성균관대학교 전자공학과(학사). 1980년 2월 성균관대학교 대학원 전자공학과(석사). 1987년 2월 성균관대학교 대학원 전자공학과(박사). 1980년 6월~1983년 6월 육군사관학교 전자공학과 전임강사. 1992년 6월 Stanford University 교환교수. 1987년 3월~현재 호서대학교 전기정보통신공학부 정보통신전공 교수. <주관심 분야>광통신시스템, 광센서, 광신호처리

템