

< 기술논문 >

# 광섬유 브래그 격자를 이용한 촉감감지용 단축 힘 센서 어레이 개발

허진석\* · 이정주†

(2006년 2월 23일 접수, 2006년 6월 22일 심사완료)

## Development of Uniaxial Force Sensor Array for Tactile Sensation Using Fiber Bragg Gratings

Jin-Seok Heo and Jung-Ju Lee

**Key Words :** Fiber Bragg Grating(광섬유 브래그 격자), Tactile Sensor(촉감 센서), Uniaxial Force Sensors Array(단축 힘 센서 어레이)

### Abstract

In this paper, the 2-dimensional uniaxial force sensors array is introduced to detect the distributed force using fiber Bragg gratings. Uniaxial force transducer was designed to avoid the chirping and micro bending which degrade the performance of the sensor. The Bragg wavelength shift of the sensor was estimated using the finite element analysis. Using this uniaxial force sensor, the uniaxial force sensors array (3X3) was fabricated, and the performance of this sensors array was evaluated. The presented sensors array has very simple configuration and its wiring is very simple compared with any other force sensors arrays.

### 기호설명

- $n_e$  : 브래그 격자 유효 굴절률
- $\Lambda$  : 브래그 격자 간격
- $p_e$  : 광탄성 상수
- $p_{11}, p_{12}$  : 광-변형률 텐서
- $n$  : 광섬유 코어 굴절률
- $\nu$  : 광섬유 푸아송 비

### 1. 서론

인간은 신체의 일부가 다른 물체와 접촉할 때 촉감을 느끼게 되는데 이는 시각, 청각, 후각, 미각과 더불어 오감 중의 하나로서 인간 감성에 중요한 영향을 미치는 요소이다. 이러한 인간의 오

감을 최근 지능로봇(intelligent robot)에 적용하기 위한 많은 연구가 진행 중이다. 특히 접촉을 통한 주변 환경의 정보 - 접촉력, 진동 표면의 거칠기, 온도변화 등을 획득할 수 있는 촉각센서(tactile sensor)는 차세대 정보수집 매체로 인식되고 있다. 이와 같은 촉각감을 대체할 수 있는 생체 모방형 촉각센서는 각종 의료진단 및 시술에 사용될 수 있어 그 중요성이 더해지고 있다. 이러한 촉각 센서들은 지금까지 주로 미소기전집적시스템(micro electric mechanical system, MEMS) 제작기술을 이용하여 압전재료(piezoelectric material)<sup>(1)</sup>나 압저항재료(piezoresistive material)<sup>(2)</sup>를 이용한 센서, 용량형(capacity type)<sup>(3)</sup> 인덕터형(inductor type)<sup>(4)</sup> 센서 등과 같은 센서로 많이 개발되었다. 하지만 이러한 센서들은 유연성이 부족하여 곡면에 장착이 어렵고, 센서의 개수의 증가에 따른 많은 배선의 문제 등이 지적되고 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제를 유연성이 보장된 광섬유 브래그 격자를 이용하여 간단한 구조를 가지면서 배선이나 유연성의 문제를 해결할 수 있는 2차원 분포형 힘 센서를 개발하고자 한다.

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과  
E-mail : leejungju@kaist.ac.kr  
TEL : (042)869-3095 FAX : (042)869-3210

\* 회원, 한국과학기술원 기계공학과

## 2. 광섬유 브래그 격자 힘 센서의 원리

### 2.1 광섬유 브래그 격자의 원리

브래그 격자 광섬유 센서는 변형률과 온도 함수인 반사파장(reflective wavelength)의 변이를 측정함으로써 변형률과 온도를 간단히 측정할 수 있으며 크기가 작아 다른 물체에 삽입되었을 때 물성값에 영향을 주지 않고 사용 온도 범위가 넓으며 전자기파의 영향을 받지 않는다는 장점이 있어 많은 관심과 연구가 집중되고 있는 광섬유 센서이다.

광섬유 브래그 격자는 Fig. 1에서와 같이 광대역 광원(broadband light source)을 광섬유에 입사시킬 경우 식 (1)과 같은 브래그 조건(Bragg condition)에 의해 결정된 파장 성분의 빛이 브래그 격자 부분에서 반사되며 그 외의 파장대역의 빛은 진행방향으로 계속 투과된다. 이렇게 반사된 광의 파장을 브래그 파장(Bragg wavelength)이라고 하며 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

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

즉 격자에서 반사되는 브래그 파장은 유효 굴절률과 격자 간격의 함수이며 광섬유 격자에 온도나 변형률 등의 외란이 가해지면 이들 값이 변화되어 브래그 파장은 달라진다. 따라서 변화된 브래그 파장을 정밀하게 측정한다면 광섬유 격자에 가해진 온도나 변형률 등의 물리량의 변화를 식 (2)와 (3)을 통하여 계산할 수 있으며, 이는 광섬유 브래그 격자가 센서로 사용될 수 있는 기본 원리라고 할 수 있다. 여기서  $p_e$  는 일반적으로 0.22 의 값을 가진다.<sup>(6)</sup>

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B [(\alpha + \xi)\Delta T + (1 - p_e)\Delta\varepsilon] \quad (2)$$

$$p_e = \left(\frac{n^2}{2}\right) [P_{12} - \nu(P_{11} - P_{12})] \quad (3)$$

주위 온도의 급격한 변화가 없고 센서들 간의 온도차이가 없는 상태에서 변형을 측정하면, 식

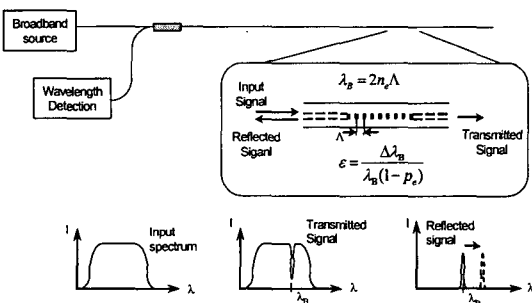


Fig. 1 FBG sensor encoding operation

(2)에서  $\Delta T = 0$  로 가정할 수 있어 식 (3)을 이용하여 스트레인의 변화를 식 (4)와 같이 표현할 수 있다. 즉 광섬유의 변형률을 브래그 파장의 변화량만 측정하면 구할 수 있다.

$$\Delta\varepsilon = \frac{1}{(1 - p_e)} \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad (4)$$

이와 같이 광섬유 브래그 격자 센서는 그 측정량이 브래그 반사파장의 변화량이기 때문에 측정이 간단하고 명확하다. 또한 브래그 반사파장이 서로 다른 광섬유 브래그 격자 센서들은 서로 영향을 받지 않아 파장분할 다중화(wavelength division multiplexing, WDM) 기법을 이용하여 하나의 광섬유 선에 여러 개의 브래그 격자 센서를 배열할 수 있으므로 하나의 광섬유에서 여러 지점의 변형을 측정할 수 있는 장점을 가져 배선에 있어서도 기존의 분포형 센서들에 비해서 유리한 장점을 가진다.

### 2.2 광섬유 브래그 격자 힘 센서의 구조

일반적으로 힘 센서는 높은 분해능을 가지기 위해서 외부의 하중에 따라서 많은 변형이 발생하는 다이어프램(diaphragm)형의 구조물을 센서의 감지부로 많이 사용한다. 하지만 이러한 형태의 감지부에 광섬유 브래그 격자 센서를 삽입하는 경우 광섬유 브래그 격자 센서에서 발생할 수 있는 미소 굽힘(micro-bending)에 의해 발생하는 광섬유 내에서의 광의 누출현상으로 인한 출력 감소와 브래그 격자의 비균일한 변형에 의해서 발생하는 처핑(chirping) 현상이 발생하여 센서의 소형화 및 성능향상에 많은 문제점을 유발할 수가 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 두 가지 현상을 최소화 할 수 있는 감지부를 설계하여 센서의 성능저하를 방지하면서 센서의 소형화를 구현하고자 한다.

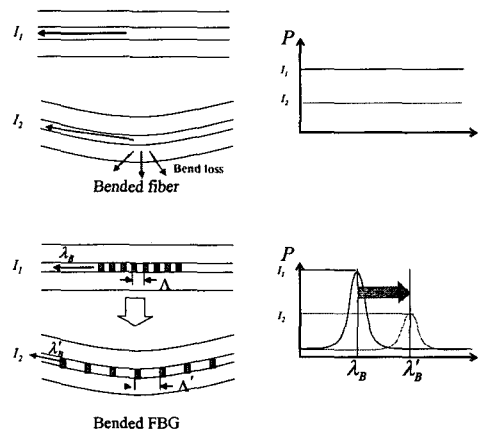


Fig. 2 Micro-bending effect of FBG

먼저 감지부의 크기를 작게 설계하기 위해서는 브래그 격자 내에서의 미소 굽힘 현상을 고려해야 한다. Fig. 2와 같이 광섬유 내를 지나가는 광의 손실 중에 미소 굽힘에 의해서 일어나는 손실은 아주 크다. 따라서, 감지부에 삽입되어 있는 브래그 격자 내에서 미소 굽힘이 발생하게 된다면 정확한 브래그 파장의 측정이 힘들며 이는 곧 센서의 성능저하로 이어진다. 따라서 센서의 감지부를 설계할 때에는 이러한 미소 굽힘 현상이 발생하는 것을 최소화해야 한다.

또한 감지부에 브래그 격자 센서를 삽입하여 적용할 경우에는 Fig. 3과 같이 브래그 격자에 비균일한 변형이 발생하여 기존의 브래그 파장에 외곡이 생기는 처핑(chirping) 현상을 고려해야 한다. 이러한 처핑 현상은 정확한 브래그 파장의 측정을 어렵게 하여 역시 센서의 성능저하를 야기시킬 수 있다.

따라서 이러한 두 가지 현상을 최소화 할 수 있는 센서의 설계가 필요하다. 본 연구에서는 힘 센서의 감지부를 Fig. 4와 같이 외부의 수직하중에 의해서 광섬유 길이방향으로 변위를 야기할 수 있는 구조로 설계하였다. 이러한 광섬유 길이방향의 변위는 돌출부 아래에 위치하고 있는 광섬유 브래그 격자의 변형을 야기하게 되고 이는 곧 브래그

파장을 변화시킨다. 따라서 변화된 브래그 파장의 이동을 측정하여 외부에 작용한 힘을 측정할 수 있다. 특히, 이러한 구조는 돌출부에 외부하중이 수직으로 가해지면 광섬유 방향으로만 변형을 발생하므로 미소 굽힘에 의한 광 손실은 발생하지 않는다. 또한, 대칭구조로 수직 하중을 받았을 경우 균일한 변형이 발생하여 처핑 현상도 최소화할 수 있다.

### 3. 단위 힘 센서의 제작 및 검증

#### 3.1 광섬유 브래그 격자 힘 센서의 설계

센서의 감지부를 설계하기 앞서 먼저 단위 센서의 용량을 설정해야 한다. 제작된 센서는 촉감 감지를 목적으로 하는 센서로 인간의 하중에 대해 인간의 피부가 민감하게 느끼는 하중구간 10 N을 센서의 용량으로 설정하였다. 본 연구에서 사용되는 브래그 격자의 길이는 2 mm이며 센서의 크기가 작을수록 공간분해능(spatial resolution)도 높아질 수 있다. 최근 브래그 격자의 길이를 수십  $\mu\text{m}$ 까지 줄이는 연구들이<sup>(6)</sup> 보고되고 있어 향후 센서의 크기를 상당히 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

설계된 감지부의 치수는 Fig. 5와 같으며 변형을 쉽게 일으켰다가 다시 쉽게 복원할 수 있도록 탄성이 우수한 스프링 재료인 베르쿰동(BeCu)을 이용하여 제작하였다. Fig. 5에서와 같이 돌출부에 외력이 가해졌을 경우 쉽게 변형이 일어날 수 있도록 옆쪽의 두께를 최소화하였으며 가운데 구멍은 광섬유가 통과할 수 있도록 광섬유 직경과 유사하게 0.3mm의 직경으로 제작하였다.

#### 3.2 유한요소해석을 이용한 힘 센서 출력 예측

센서 감지부에서 광섬유가 고정되어 있는 부분의 광섬유 방향의 변형을 알게 된다면 광섬유 브래그 격자 센서의 반사파의 변화추이를 식 (4)를

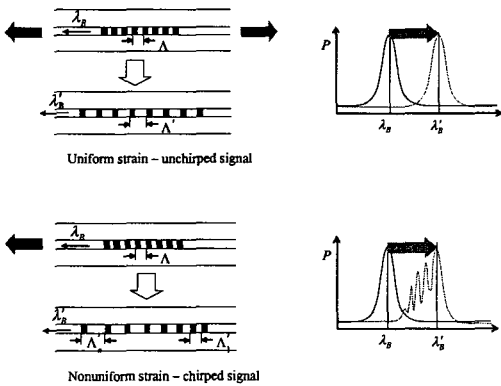


Fig. 3 Chirping effect of FBG

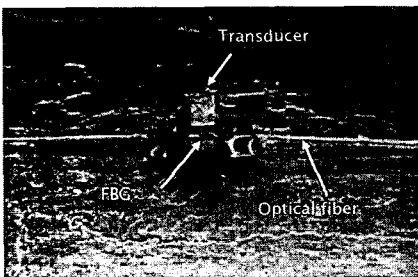


Fig. 4 Force sensor using FBG sensor

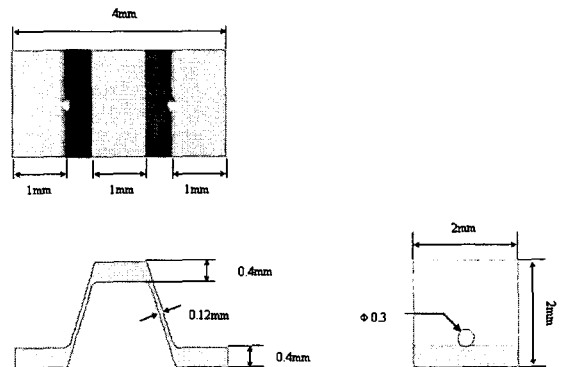


Fig. 5 Dimensions of transducer of FBG force sensor

이용해서 예측할 수가 있다. 따라서, Fig. 6과 같이 유한요소법(finite element method, FEM)을 이용하여 감지부의 변형을 계산하였으며 이에 따른 브래그 파장의 변화를 Fig. 7에 나타냈다.

3.3 광섬유 브래그 격자 힘 센서의 검증

센서를 제작하기 위해서는 제작된 감지부의 구멍에 광섬유 브래그 격자를 정확하게 정렬해야 한다. 감지부의 구멍과 광섬유의 직경이 거의 동일하여 제작과정 중 광섬유 브래그 격자의 파손을 방지하기 위해서 Fig. 8과 같이 광학 현미경과 스테이지를 이용한 정확한 정렬 장치를 이용하여 센서를 제작하였다. 즉, 광섬유 브래그 격자 센서를

정렬장치를 이용하여 감지부의 정확한 위치에 정렬한 후 광섬유와 감지부를 에폭시를 이용하여 고정하였다.

제작된 센서는 Fig. 9와 같은 센서 성능 검증 시스템을 통하여 성능을 검증하게 된다. 수직방향으로 움직일 수 있는 스테이지 위에 제작된 센서를 올려 놓고 로드셀을 센서의 돌출부에 정렬하여 수직 축 스테이지를 올리면, 로드셀과 제작된 센서가 만나 제작된 센서에 하중이 가해지게 된다. 따라서, 로드셀에서 감지되는 힘은 작용 반작용에 의해 센서에 반대방향으로 작용하여 비교측정할 수 있다.

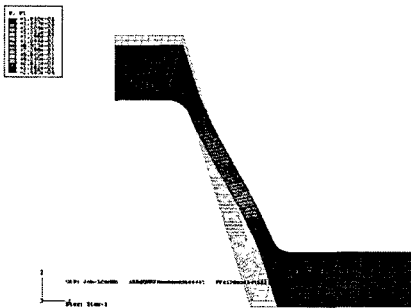


Fig. 6 Finite element analysis of transducer

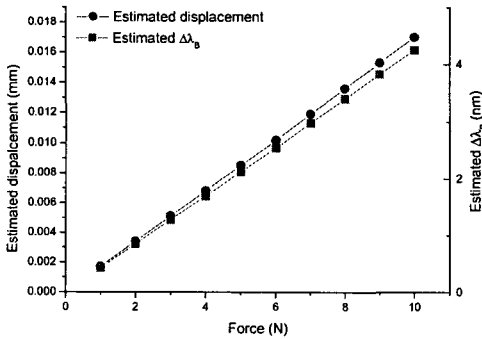


Fig. 7 Estimated Bragg wavelength shift of FBG force sensor using finite element analysis

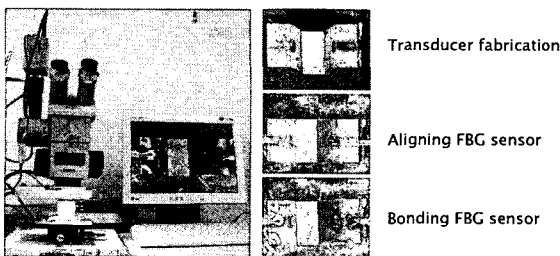


Fig. 8 Fabrication of FBG force sensor

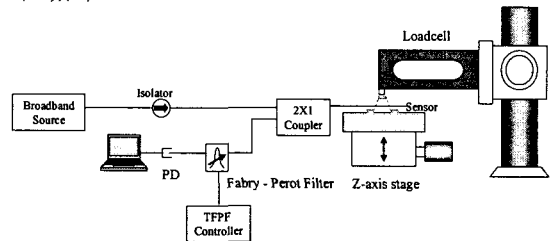


Fig. 9 FBG force sensor system

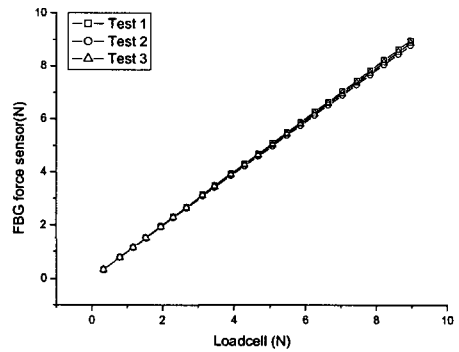


Fig. 10 Repeatability of FBG force sensor

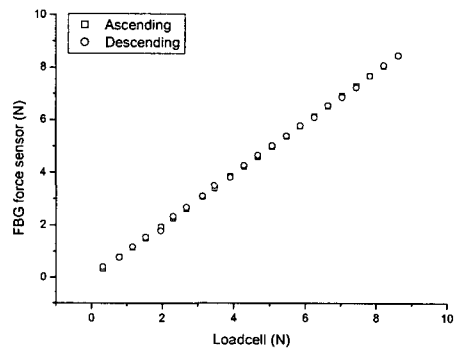


Fig. 11 Hysteresis test of FBG force sensor

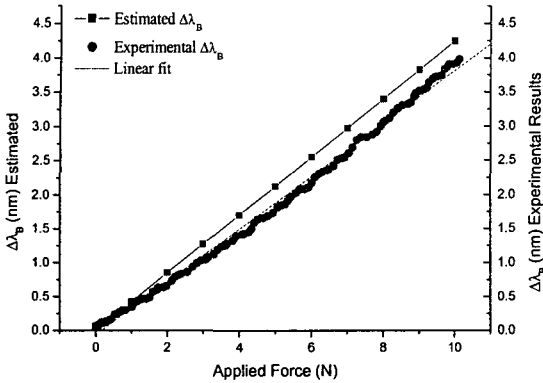


Fig. 12 Comparison of estimated Bragg wavelength and experimented Bragg wavelength

제작된 센서는 Fig. 10에서 나타난 것과 같이 세 번의 실험에서 거의 동일한 출력값을 나타내고 있으며 이는 센서의 반복성이 우수하다는 것을 나타내고 있다. 반복성 오차는 약 1.8%이며, 선형성 오차는 약 0.3%이다. Fig. 11은 센서에 하중을 가했다가 다시 하중을 제거하였을 때 나타나는 신호의 특성인 히스테리시스를 살펴본 그래프이다. 그래프에서 나타난 것과 같이 히스테리시스(Hysteresis)는 거의 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 12에서 알 수 있듯이 브래그 파장의 변화는 외부의 하중과 거의 일차 함수의 관계를 가진다. 따라서, 제작된 센서들에 대하여 브래그 파장과 외부 하중 사이의 함수 관계를 실험적으로 계산한 후 이를 하중으로 환산할 수 있다. Fig. 12에서는 또한 유한요소해석을 통해서 예측된 외부 수직 하중에 따른 브래그 파장의 변화와 실험적으로 측정된 브래그 파장의 변화를 비교하여 나타냈다. 그래프에서 알 수 있듯이 실제 실험적으로 측정된 센서의 출력신호의 민감도(sensitivity)가 유한요소해석을 통해서 예측된 출력신호의 민감도보다 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 유한요소해석 모델에서는 광섬유의 연결을 고려하지 않고 감지부만을 해석하여 생긴 오차라고 할 수 있다. 즉, 실제 제작된 센서에서는 광섬유가 감지부를 구속하고 있어 유한요소 해석으로 계산된 예측 출력신호보다 감도가 떨어진 것이라고 할 수 있다. 제작된 센서는 브래그 파장을 측정할 수 있는 장비의 성능에 따라 분해능이 달라질 수 있다. 본 연구에서 사용된 광 파장측정장치는 약 0.02nm의 변화를 측정할 수 있으며 이는 곧 제작된 센서는 0.04N의 분해능을 가진다는 것을 나타내는 것이다.

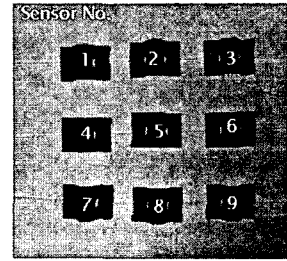


Fig. 13 3x3 FBG sensor array.

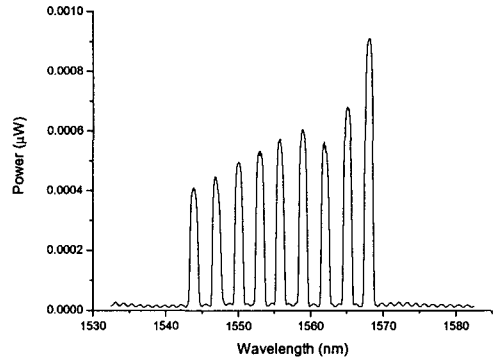


Fig. 14 Bragg wavelengths of each FBG

#### 4. 2 차원 분포형 센서의 제작 및 검증

##### 4.1 2 차원 분포형 센서의 제작

설계된 단위 센서를 이용하여 3x3 분포형 센서를 제작하기 위해서는 단위 센서들의 위치를 결정해야 한다. 본 연구에서는 한 광섬유 내에 위치하고 있는 아홉 개의 센서를 센서 중심간의 간격을 5mm로 하여 Fig. 13과 같이 배열하였다.

Fig. 14는 실제 사용된 9개의 브래그 격자들에서 나온 각각의 브래그 파장의 신호이며, 그림에서와 같이 9개 각각의 브래그 파장의 변화를 감지하여 각각의 센서에 작용하는 외부 하중의 값을 감지할 수 있다.

##### 4.2 2 차원 분포형 센서의 검증

제작된 각각의 광섬유 브래그 격자를 이용한 각각의 힘 센서의 브래그 파장의 변화는 힘에 대한 1차 함수 관계로 표시되며 이를 Table 1에 나타내었다. 제작된 센서는 두 가지 형태의 하중을 주어 성능을 검증하였다. 먼저 분포형 센서들 중 첫번째 감지부에 1N의 하중을 가했을 때 각각의 센서에서 나오는 출력신호를 확인하였다. Fig. 15(a)에서와 같이 하중이 가해진 센서에서만 브래그 파장의 변화가 발생하였으며 나머지 센서의 브래그 파

Table 1 1<sup>st</sup> order approximation of each force sensor

$$y = A + Bx, \quad y = \Delta\lambda_B, \quad x = \text{applied force}$$

Coefficient Sensor No.	A	B
1	-0.0616	0.398
2	-0.0098	0.401
3	0	0.389
4	-0.0079	0.391
5	0	0.406
6	0	0.398
7	-0.0461	0.405
8	0.0316	0.388
9	0.0013	0.399

5. 결론

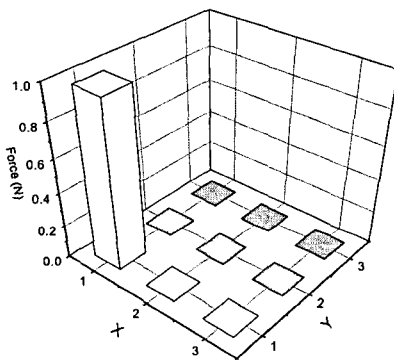
본 연구에서는 광섬유 브래그 격자를 이용한 촉각 센서용 유연 단위 힘 센서를 설계 제작하고 이를 이용하여 분포형(3x3) 유연 단축 힘 센서를 제작 검증 하였다. 제작된 센서는 유연한 광섬유 브래그 격자 센서에 광섬유 길이방향으로 변위를 확대해 줄 수 있는 감지부만을 장착한 센서로 기존의 여러 종류의 센서에 비해 원리가 간단하며, 센서의 성능이 우수하고, 여러 개의 센서를 부착하여도 하나의 광섬유로 신호를 감지할 수 있는 장점을 가지고 있다. 따라서, 향후 좁은 공간에 여러 개의 센서를 장착해야 하는 촉각 센서에 있어서 그 활용도가 증가할 것으로 기대된다. 하지만 아직은 광섬유를 이용한 분포형 촉감감지 센서는 시차단계라고 할 수 있어 공간분해능의 향상 및 광측정장비의 가격 경쟁력 확보 등 많은 부분에 있어서 개선점이 남아있다.

후 기

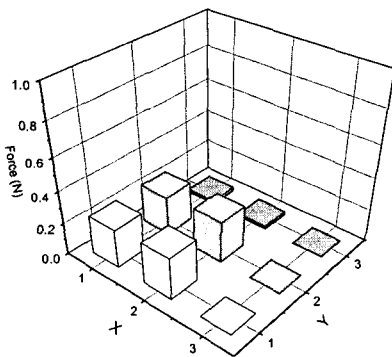
이 연구(논문)는 산업자원부 지원으로 수행하는 21세기 프론티어 연구개발사업(인간기능 생활지원 지능로봇 기술개발사업)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Mei, T., Li, W. J., Ge, Y., Chen, Y., Ni, L. and Chan, M. H., 2000 "An Integrated MEMS Three Dimensional Tactile Sensor with Large Force Range," *Sensors and Actuators (A)*, Vol. 80, pp. 155~162.
- (2) Yoon, M. J., Yu, K. H., Jeong, G. Y., Lee, S. C. and Kwon, T. G., 2002, "Development of a Distributed Flexible Tactile Sensor System," *J. of KSPE*, Vol. 19, No. 1, pp. 212~218.
- (3) Futai, N., Futai, N., Matsumoto K. and Shimoyama, I., 2004, "A Flexible Micromachined Planar Spiral Inductor for use as an Artificial Tactile Mechanoreceptor," *Sensors and Actuators (A)*, Vol. 111, pp. 293~303.
- (4) Paschen, U., Leineweber, M., Amelung, J., Schmidt, M. and Zimmer, G., 1998, "A Novel Tactile Sensor System for Heavy-load Applications Based on an Integrated Capacitive Pressure Sensor," *Sensors and Actuators (A)*, Vol. 68, pp. 294~298.
- (5) Ryu, C. Y., Hong, C. S., Kim, C. G., Lee, S. B. and Choi, S. S., 1998, "Strain Measurement of the Laminated Composite Using Attached Fiber Bragg Grating Sensor," *Proceeding of the 3<sup>rd</sup> Optoelectronics and Communications Conference*, pp. 272~273.
- (6) Wu, M. C., Rogowski, R. S. and Tedjojuwono, K. K., 2002, "Fabrication of Extremely Short Length Fiber Bragg Grating for Sensor Application," *Sensors, Proceeding of IEEE*, Vol. 1, pp. 49~55.



(a) 1N on No. 1 taxel



(b) 1N on No. 1, 2, 3, 4 taxels

Fig. 15 Experimental results of FBG force sensor array

장은 변화하지 않는 것을 확인할 수 있다. 또한 4개의 감지부에 동일하게 분포할 수 있도록 1N의 하중을 가하였다. 외부 하중이 가해진 각각의 감지부에서는 전체 외부 하중의 1/4의 값인 약 0.25N의 값을 출력하는 것을 Fig. 15(b)를 통해 확인할 수 있다.