

광섬유 브래그 격자를 이용한 촉각 센서용 유연 단축 힘 센서의 개발 및 평가

허진석[#], 이정주^{*}

Development of Flexible Force Sensor Using Fiber Bragg Grating for Tactile Sensor and Its Evaluation

Jin Seok Heo[#], Jung Ju Lee^{*}

ABSTRACT

This paper shows the development of flexible force sensor using the fiber Bragg grating. This force sensor consists of a Bragg grating fiber and flexible silicone rubber (DC184, Dow coming co. Ltd). This sensor does not have special structure to maximize the deflection or elongation, but have good sensitivity and very flexible characteristics. In addition, this sensor has the immunity to the electro magnetic field and can be multiplexed easily, which is inherited from the characteristics of fiber Bragg grating sensor. In the future, this sensor can be utilized the tactile sensor system minimizing the sensor size and developing the fabrication method.

Key Words : Fiber Bragg grating sensor (광섬유 브래그 격자 센서), Force sensor (힘 센서), Silicone rubber (실리콘 고무), Tactile sensor (촉각센서)

기호설명

- n_e = effective refractive index
- Λ = grating pitch along the fiber axis
- p_e = photoelastic constant
- p_{11}, p_{12} = strain-optic tensor
- n = refractive index of the fiber core
- ν = Poisson's ratio of optical fiber

1. 서론

지금까지 인간의 감각 기관을 모사하는 센서로는 주로 시각과 청각에 집중된 반면 촉각, 후각,

미각 기능을 갖는 센서 개발의 연구는 미비한 상태이다. 특히 촉각기능은 외부의 접촉 상태를 직접 감지하는 것뿐만 아니라 감성과 밀접한 관련이 있어 많은 투자와 연구가 이루어질 것으로 기대되는 분야이다. 이러한 촉각 센서는 인간을 모사하는 휴머노이드 로봇의 인공피부에 장착될 수 있으며 혈관 내의 미세수술, 암 진단, 혹은 복강경 수술의 도구에 장착되어 활용될 수 있으며 향후 가상현실 구현을 위한 촉각 제시(tactile display) 기술에 적용될 수 있다.

일반적으로 로봇의 외부에 인공피부를 장착하기 위해서는 인간의 피부와 같은 탄력과 유연성을 가지고 있어야 한다. 하지만 기존의 산업용 힘 센

^{***} 접수일: 2004년 7월 25일; 게재승인일: 2006년 1월 13일

[#] 한국과학기술원 기계공학과

E-mail dandyheo3070@kaist.ac.kr (042) 869-5033

^{*} 한국과학기술원 기계공학과

서나 MEMS 기술을 이용한 압력 혹은 힘센서^{1, 2} 등을 직접적으로 인공피부와 같은 유연한 부분에 적용하기에는 부적합 하며 측정 부분이 늘어질수록 생길 수 있는 회로처리와 외부의 잡음의 영향 등은 전체 시스템에 많은 영향을 끼칠 수 있으리라 예상된다. 따라서 본 연구에서는 유연하면서도 외부 회로 및 잡음에 강인하고 또한 쉽게 확장이 가능한 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating, FBG) 센서를 이용한 유연 힘 센서의 설계 및 제작 방법과 그 평가에 대하여 논하고자 한다.

2. FBG 센서의 원리 및 유연 단축 힘센서의 구조

2.1 FBG 센서의 원리

브래그 격자 광섬유 센서는 변형률과 온도 함수인 반사파장의 변이를 측정함으로써 변형률과 온도를 간단히 측정할 수 있으며 크기가 작아 다른 물체에 삽입되었을 때 물성값에 영향을 주지 않고 사용온도 범위가 넓으며 전자파의 영향을 받지 않는다는 장점이 있어 많은 관심과 연구가 집중되고 있는 광섬유 센서이다.

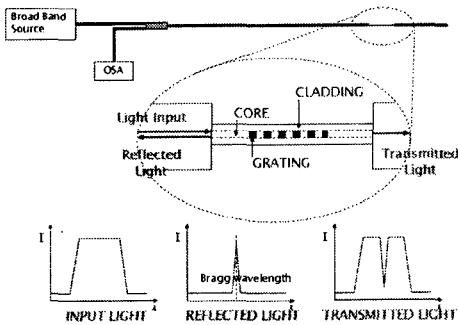


Fig.1 FBG sensor encoding operation

광섬유 브래그 격자는 Fig. 1 에서 설명하고 있는 것과 같이 광대역 광원을 광섬유에 입사시킬 경우 식(1)과 같은 브래그 조건(Bragg condition)에 의해 결정된 파장 성분만이 브래그 격자 부분에서 반사되며 나머지 파장부분은 그냥 통과하게 된다. 이렇게 반사된 파장을 브래그 파장(Bragg wavelength)이라고 하며 식(1)과 같이 표현될 수 있다. 여기에서 n_e 는 광섬유 격자의 유효 굴절률(effective refractive index)이고 Λ 는 광섬유 코어에 새겨진 격자의 간격이다.³

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

즉 격자에서 반사되는 브래그 파장은 유효 굴절률과 격자 간격의 함수이며 광섬유 격자에 온도가 변형률 등의 외란이 가해지면 이들 값이 변하여 브래그 파장은 달라진다. 변화된 브래그 파장을 정밀하게 측정한다면 광섬유 격자에 가해진 온도나 변형률 등의 물리량을 식(2)와 (3)을 통하여 계산할 수 있으며, 이것이 Fig. 1 에 나타난 것과 같이 광섬유 브래그 격자가 센서로 사용될 수 있는 기본 원리이다.³ 여기서 p_e 는 광탄성 상수이고 p_{11} 과 p_{12} 는 변형률 광학 텐서(strain-optic tensor) 성분이며 n 은 광섬유 코어의 굴절률, ν 는 광섬유의 프와송 비이다. α 는 광섬유의 열팽창 계수(thermal expansion coefficient)이고 ξ 는 온도변화에 따른 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열광학 계수(thermo-optic coefficient)이다.

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

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

본 연구에서는 주위 온도의 급격한 변화가 없고 센서들 간의 온도차이가 없는 상태에서 변형을 측정하면 식(2)에서 $\Delta T = 0$ 로 가정할 수 있어 식(3)은 다음 식(4)와 같이 광섬유의 변형률을 브래그 파장의 변화량만 측정하면 구할 수 있다.³

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

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 있다. 식(4)에서의 광탄성 상수는 일반적으로 0.22 의 값을 가진다.⁴

2.2 유연 단축 힘 센서의 구조

유연한 센서를 제작하기 위해서 본 연구에서는 실리콘 고무 (Dow coming Co. Ltd, DC184)에 광섬유 브래그 격자를 삽입하는 단순한 구조의 센서를 고안하였다. 이러한 형태의 센서는 일반적으로 많이 사용되는 다이아프램 형태의 센서에 비해 구조가 아주 간단하고 센서를 정렬후 실리콘 고무를 부어서 경화만 시키면 되기 때문에 제조공정이 복잡하지 않다는 장점을 가지고 있다. Fig. 2 는 제작된 센서의 사이즈와 실제 실험에 사용된 FBG 센서의 사양을 나타내고 있다.

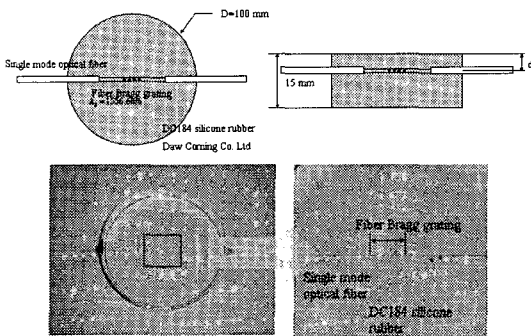


Fig.2 Structure of flexible FBG force sensor

외부에 힘이 가해지게 되면 실리콘 고무는 형상이 변화하게 되고 이는 광섬유 브래그 격자에 변형으로 가해지게 된다. 이러한 변형은 광섬유 브래그 격자의 브래그 파장의 변화를 야기시키게 된다. 이러한 브래그 파장의 변화를 감지하여 외부의 힘을 환산할 수 있다. 제작된 센서는 Fig. 3 과 같이 아주 유연하며 실제 피부와 유사한 질감을 주는 장점을 가지고 있다는 점에서 향후 인공피부에도 쉽게 적용될 수 있으리라 생각된다.

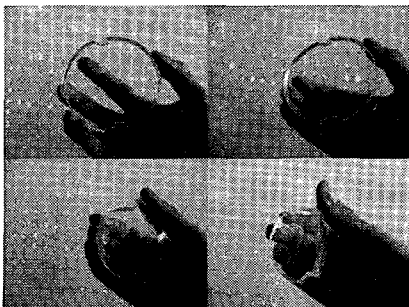


Fig.3 Flexible FBG sensor

3. 유연 3축 힘 센서의 설계

3.1 실리콘 고무의 유한요소 해석

앞서 기술한 힘 센서의 타당성을 검증하기 위해서 상용 유한요소 해석프로그램인 ABAQUS 6.3 을 이용하여 유한요소 해석을 실행하였다. Fig. 4 는 2 차원 평면 요소로 제작된 실리콘 고무 DC184 의 유한요소 모델을 보여준다. 대칭형상으로써 원래 형상의 1/2 모델로 제작이 가능하며 해석시 바닥 부분을 모두 구속하는 경계조건을 사용하였고 하중은 실제 실험과 동일한 크기의 볼타입의 강체를 설정하여 0~10N 의 하중을 주어 내부의 응력상태와 광섬유 축방향의 변형을 확인해 보았다. 실제 광섬유의 크기는 실리콘 고무에 비해 매우 작으며 이는 하중에 따른 실리콘 고무의 거동에 영향을 받지 않는다고 가정을 하고 해석을 수행하였다. 즉 실제 모델에서는 실리콘 고무 모델만 존재하게 된다. 일반적으로 실리콘 고무는 하중에 따라 비선형적인 거동을 나타내어 일반적인 재료의 해석과 달리 Mooney-Rivlin 식을 이용한 해석을 주로 수행한다.⁵ 하지만 본 연구에서의 응력상태는 외부에서 가해주는 힘과 그에 따른 변형량이 아주 미소하여 일반적인 선형 해석을 수행하였다. 선형거동을 가정한 DC 184 의 탄성계수는 9.2MPa 이며 프와송 계수는 0.49 를 사용하여 수행하였다.

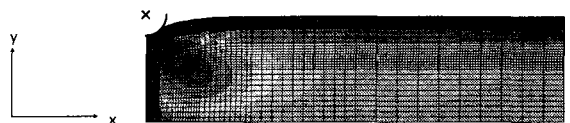


Fig. 4 Finite Element Model and FEA (Finite Element Analysis) of DC 184

Fig. 5 는 10N 의 하중을 가했을 때 깊이에 따른 실리콘 고무 내부의 광섬유 축 방향(Fig. 4 에서의 x 축 방향) 변위 해석 결과를 나타낸 것이다. 그래프에서도 잘 알 수 있듯이 실리콘 고무 표면에 광섬유가 위치했을때는 광섬유 축 방향으로 인장 되는 것을 알 수 있고 실리콘 고무 내부에 광섬유가 위치할 경우 압축이 되는 것을 알 수 있다. Fig. 5 에서 알 수 있듯이 표면에서 1.5mm 깊이(Fig. 4 에서의 y 축 방향) 이하에서부터 광섬유 축 방향으로 인장이 일어나는 영역은 없어지고 광섬유

축 방향으로 압축에 의한 변형만이 생기는 것을 확인할 수 있었다.

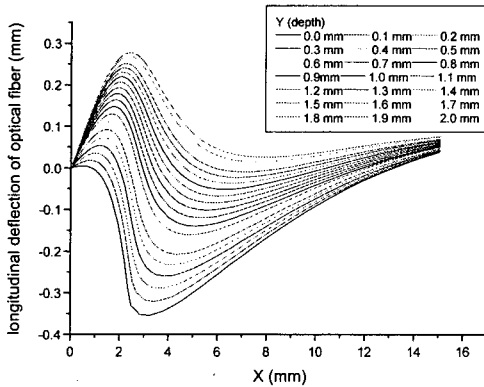


Fig. 5 x-directional deflection of DC184 according to the depth (Load: 10N)

3.2 FBG 센서의 제작

앞서 수행한 유한요소해석의 결과를 이용하여 출력신호가 가장 효과적으로 나타날 수 있는 구간을 설정할 수 있다. Fig. 6 에서 나타난 바와 같이 변형량은 깊이에 따라 조금씩 다르지만 하중이 가해진 점에서 약 1~4mm 부근에서 가장 큰 변형량을 가진다. 또한 이때의 응력상태 또한 가장 큰 값을 가지게 되며 FBG 센서의 출력 신호에도 가장 큰 영향을 주게 된다. 가급적 표면에 FBG 센서를 부착하게 가장 큰 감도를 가질 수 있겠지만 광섬유의 원재료인 실리카가 취성이기에 내부로 삽입할 수 있는 부분 중 가장 큰 변형을 가질 수 있는 곳을 선정하는 것이 용이하다. 따라서 본 연구에서는 동일한 방향의 변형을 일으키며 주변의 변형이 영향을 가장 작게 받는 영역인 2mm 깊이에 광섬유 브래그 격자 센서를 삽입한 센서를 이용하여 실험을 수행하였다.

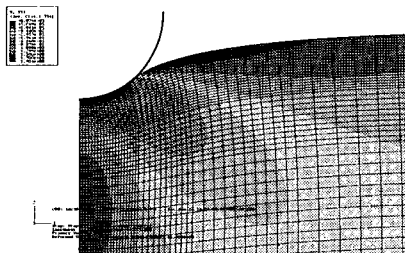


Fig. 6 Stress analysis using FEM

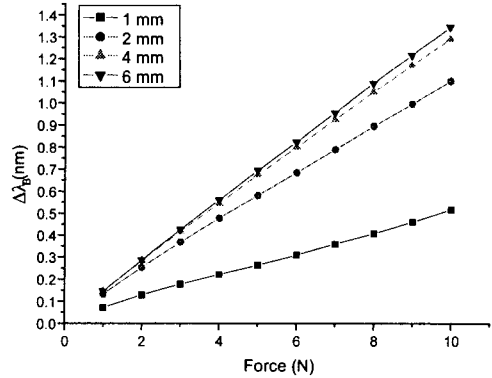


Fig. 7 Bragg wavelength shift analysis using FEM

FBG 센서는 앞서 기술한 것과 같이 기계적인 변형률에 대한 파장 이동량의 상관관계를 나타내는 광탄성 상수와 온도 변화에 대한 파장 이동량의 상관관계를 나타내는 열광학 계수, 그리고 센서 자체의 열팽창 계수의 세가지 상수값에 의해 외란에 대한 중심파장의 이동량이 결정되며 이들 값은 FBG 센서의 재료 상수라고 할 수 있다. Fig. 7 은 외부의 하중에 따른 광섬유 축 방향 변형량을 식(2)에 대입하여 계산한 FBG 센서의 브래그 파장의 변화를 나타낸 그래프이다. 해석 결과에서 알 수 있듯이 깊이가 2mm 이내의 경우 같은 하중에서 광섬유 축방향 평균 변형량이 거의 변화하지 않는 것을 알 수가 있다. 또 2mm 이상의 깊이에서는 하중이 가해지는 부분외의 부분에서의 변형량이 점점 증가하게 되어서 여러지점의 힘을 측정하기 위한 센서로 적용될 경우 그 영향이 클 것으로 예상된다.

4. 유연 3축 힘 센서의 신호 특성 및 평가

4.1 실험장치

Fig. 8 과 같이 1527 ~ 1602nm 대역의 파장을 가지는 광원에서 광섬유를 통해 빛을 전달되고 이는 아이소레이터(isolator)를 거쳐 커플러(coupler)를 통과하여 센서에 전달된다. 브래그 격자에서 반사된 빛은 다시 커플러를 통해서 광파장 분석기(optical spectrum analyzer, OSA)에 전달되어 반사된 빛의 파장을 측정할 수가 있다.

센서의 신호를 보정하기 위해 Fig. 9 와 같은 보정 시스템을 구성하였다. 일반적인 광학 크램프에 상용 로드셀(CASS BCL-1L)을 부착하여 제

작된 센서를 축방향 스테이지위에 올려놓고 로드 셀에서 일정한 힘의 출력이 발생할때까지 스테이지를 올려준다. 이때 광파장 분석기에 출력되는 광파장의 변화를 측정하여 힘과 출력신호를 보정하였다.

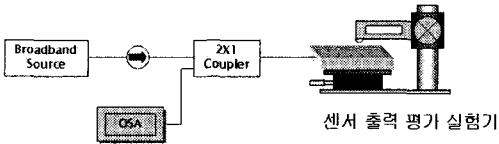


Fig. 8 Experimental setup

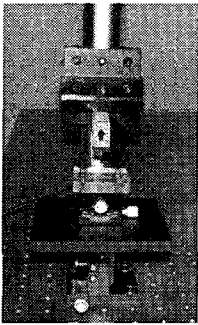


Fig. 9 Calibration system of flexible FBG force sensor

4.2 유연 힘 센서 출력 신호의 정량적 평가

센서는 성능을 확인하기 위해서 10N의 하중을 단계적으로 가하면서 브래그 파장의 변화를 측정하였다. 센서 모두는 10N의 힘에 약 1.0nm의 브래그 파장의 변화를 가졌다. 즉 1mN의 힘에 약 0.001nm의 파장의 변화를 나타내는것이나 실제 광파장 분석기의 분해능이 0.01nm로 실제 센서의 분해능은 10mN의 힘을 측정할 수 있다는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 7에서 나타난 유한요소 해석으로 실행한 결과치와 거의 동일한 결과를 가지는 것을 알 수 있다. Fig. 10에서 확인할 수 있듯이 기존의 MEMS 촉각 센서와 비교했을 때 제작된 광섬유 브래그 격자를 이용한 유연 힘 센서는 좋은 선형성(0.1% 오차)을 나타내고 있으며 우수한 반복성(3% 오차)을 나타내고 있다.

센서의 히스테리시스(hysteresis)를 확인하기 위해서 10N의 하중을 단계적으로 가했을 때와 단계적으로 하중을 제거했을 때의 센서의 브래그 파장의 변화를 Fig. 11에서 나타내었다. 그래프에서 나타나듯이 하중을 가했을 경우와 하중을 제거했을 때 역시 거의 차이가 나지 않는다는 것을 알 수

있다.

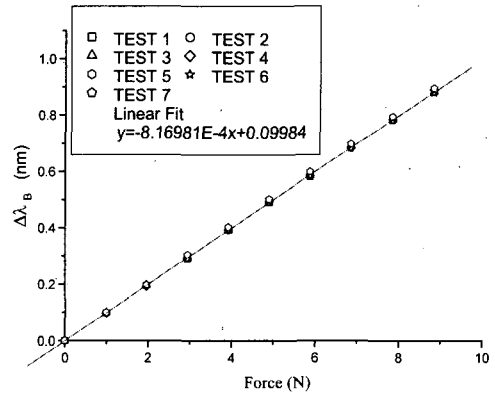


Fig. 10 Shifted wavelength according to the applied force of flexible FBG force sensor (depth 2mm)

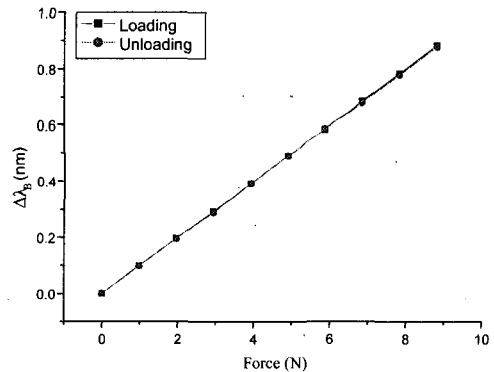


Fig. 11 Shifted wavelength when the load is applied and released

5. 결론

본 연구에서는 광섬유 브래그 격자 센서를 인공피부와 유사한 실리콘 고무에 삽입하여 제작된 유연 힘센서를 설계하고 이를 제작 평가하였다. 일반적인 선형 탄성 해석으로 실행한 실리콘 고무의 유한요소해석의 결과로 예측한 광섬유 브래그 파장의 출력 신호와 실제 광섬유 브래그 격자 힘 센서의 출력 신호는 거의 동일한 출력신호를 나타내었다. 분해능은 광파장 분석기의 분해능을 고려했을 경우 10mN 나타낸다는 것을 확인할 수 있었으며 선형성, 반복성이 우수하면 히스테리시스가 거의 나타나지 않는다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 유연

힘센서는 다중화 기법을 이용하여 하나의 광섬유에 여러 개의 격자를 세길 수 있어 향후 촉각센서로 활용될 경우 유연성과 확장성에 있어서 기존의 센서들에 비해 장점을 가질 수 있으리라 생각된다. 하지만 광섬유 브래그 격자 센서의 길이가 다소 큰 단점을 가지고 있어 향후 브래그 격자의 길이를 줄이면서도 브래그 파장의 변화를 잘 측정할 수 있는 센서에 관한 연구가 개선되어야 할 것이며 외부의 하중을 광섬유 브래그 격자의 균일한 변형을 유도할 수 있는 구조설계가 요구된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 21C 프론티어 사업인 인간지능 생활지원 지능 로봇 시스템 센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로써 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Mei, T., Li, W. J., Ge, Y., Chen, Y., Ni, L. and Chan, M. H., "An integrated MEMS three dimensional tactile sensor with large force range," *Sensors and Actuators (A)*, Vol. 80, pp.155-162, 2000.
2. Wang, L. and Beebe, D. J., "A silicon shear force sensor: development and characterization," *Sensors and Actuators (A)*, Vol. 84, pp.33-44, 2000.
3. Kenaeth, O. H. and Gerald, M., "Fiber Bragg grating technology: fundamentals and overview," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 15, No.8, pp.1263~1276, 1997.
4. Udd, E., "Fiber optic smart structure," JOHN WILLEY & SONS, INC., 1995.
5. Yang, L.M., Shim, V. P. W. and Lim, C. T., "A visco-hyperelastic approach to modeling the constitutive behavior of rubber," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 24, pp.545~560, 2000.