

광섬유 브래그 격자를 이용한 촉각센서용 유연 단위 힘 센서 개발

허진석 · 김만섭 · 이정주[†]

Development flexible force sensor using fiber bragg grating

Jin-Seok Heo, Man-Sub Kim, and Jung-Ju Lee[†]

Abstract

This paper describes the flexible force sensor using fiber Bragg grating (FBG) and silicone rubber for the tactile sensation to detect the distributed normal force. The newly designed FBG flexible force has simple structure and can be easily multiplexed with simple wiring compared with the other electric mechanical sensors. We designed the flexible silicone rubber transducer and found the optimum embedding position of FBG in the transducer using the finite element analysis. This flexible force sensor has good performance and is immunity to the electromagnetic field compared with any other kinds of small force sensors for tactile sensation.

Key Words : fiber bragg grating (FBG), flexible force sensor, tactile sensation

1. 서 론

인간의 오감을 최근 지능로봇(intelligent robot)에 적용하기 위한 많은 연구가 진행 중이다. 특히 접촉을 통한 주변 환경의 정보-접촉력, 진동 표면의 거칠기, 온도 변화 등을 획득할 수 있는 촉각센서(tactile sensor)는 차세대 정보수집 매체로 인식되고 있어 많은 연구가 진행 중이다^{1)~4)}. 이러한 촉각센서는 지금까지 미소기전 집적시스템(micro electric mechanical system, MEMS) 제작기술을 이용한 센서를 중심으로 많이 연구 개발되었다. 하지만 이러한 센서들은 유연성이 부족하여 곡면에 장착이 어렵거나, 센서의 개수의 증가에 따른 많은 배선의 문제 등이 지적되고 있어 이를 해결할 수 있는 방법이 요구되고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제를 유연성이 보장된 광섬유 브래그 격자 센서를 이용하여 간단한 구조를 가지면서 배선이나 유연성의 문제를 해결할 수 있는 촉각센서용 소형 유연 단위 힘 센서를 개발하고자 한다.

2. 유연 힘 센서의 원리 및 구조

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 사용온도 범위가 넓으며 전자기파의 영향을 받지 않는다는 장점이 있어 많은 관심과 연구가 집중되고 있는 광섬유 센서이다.

광섬유 브래그 격자는 Fig. 1에서와 같이 광대역광원(broadband light source)을 광섬유에 입사시킬 경우 식 (1)과 같은 브래그 조건(Bragg condition)에 의해 결정된 파장 성분만이 브래그 격자 부분에서 반사되며 그 외의 파장대역의 값은 진행방향으로 계속 투과된다. 이렇게 반사된 광의 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.

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

즉 격자에서 반사되는 브래그 파장은 유효 굴절률과 격자 간격의 함수이며 광섬유 격자에 온도나 변형률

한국과학기술원 기계공학과 (Dept. of Mechanical Engineering of KAIST)

[†]Corresponding author: jungjulee@kaist.ac.kr

(Received : February 24, 2006, Accepted : March 7, 2006)

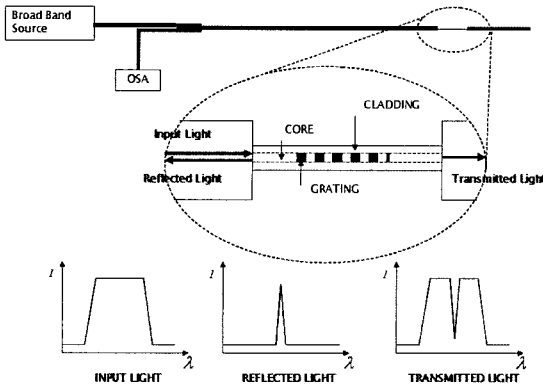


그림 1. FBG 센서의 작동원리
Fig. 1. FBG sensor encoding operation.

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 광탄성 상수이고, 일반적으로 0.22의 값을 가진다^[5]. p_{11} 과 p_{12} 는 변형률 광학 텐서(strain-optic tensor) 성분이며 n 은 광섬유 코어의 굴절률, ν 는 광섬유의 포아송 비이다. α 는 광섬유의 열팽창 계수(thermal expansion coefficient)이고 ξ 는 온도변화에 따른 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열광학 계수(thermo-optic coefficient)이다.

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

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

주위 온도의 급격한 변화가 없고 센서들간의 온도차이가 없는 상태에서 변형을 측정하면 식 (2)에서 $\Delta T = 0$ 으로 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.

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

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 브래

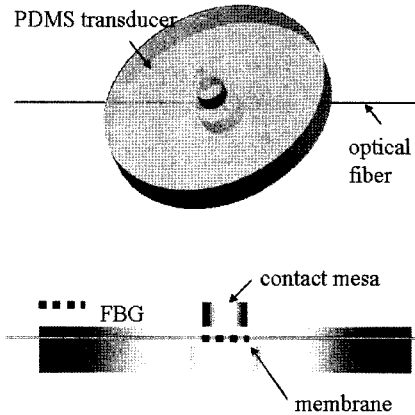


그림 2. 유연 힘 센서의 구조
Fig. 2. Structure of flexible force sensor.

그 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. 유연 힘 센서의 구조

유연 힘 센서의 감지부는 그림 2와 같이 외부의 수직하중에 의해서 변형이 용이한 다이어프램 구조로 설계되었다.

이러한 구조의 감지부는 크게 센서가 장착되는 막막(membrane)과 하중을 받는 부분인 돌출부(mesa)로 이뤄져 있다. 센서의 감지부 중 돌출부에 외부 하중이 전달 되게 되면 감지부 내부에 삽입된 광섬유 브래그 격자는 변형이 생기게 되고 이는 곧 브래그 파장의 변화를 야기한다. 따라서 변화된 브래그 파장의 이동을 측정하여 외부에 작용한 힘을 측정할 수 있게 된다. 센서의 재질은 유연성을 최대한 부여하기 위하여 실리콘 고무인 PDMS(Polydimethylsiloxane)를 사용하였다.

2.3. 유연 힘 센서 감지부 설계

센서를 설계하기에 앞서 먼저 센서의 용량을 설정해야 한다. 본 센서는 촉각 감지를 목적으로 하는 센서로 외부 하중에 대해 인간의 피부가 민감하게 느끼는 하중구간 5 N을 센서의 용량으로 설정하였다. 본 연구에서 사용되는 브래그 격자의 길이는 10 mm이며, Phase Mask기법을 사용하여 제작하였다. 센서의 크기가 작을수록 공간분해능(spatial resolution)도 높아질 수 있으며 최근 브래그 격자의 길이를 수십 μm 까지 줄이는 연구들이^[6] 보고되고 있어 향후 센서의 크기를 더욱 더 줄일 수 있을 것으로 예상된다. 본 연구에서는 브래그

격자의 길이(10 mm)를 감안해서 인간의 등과 같은 둔감한 부분에 적용될 수 있도록 센서 감지부의 크기를 20 mm 이내로 설정하였다. 따라서 하부의 빈 공간은 광섬유 브래그 격자의 길이와 감지부 최대 크기를 고려하여 15 mm로 설정하였다. 돌출부의 두께는 센서의 성능에 크게 좌우되지는 않지만 너무 두껍게 제작하게 되면 자중에 의해서 박막이 처지는 현상이 생길 수도 있다. 따라서 본 연구에서는 3 mm의 두께로 설계되었다. 센서의 PDMS 박막의 두께는 돌출부의 자중에 의해서 쉽게 처지지 않는 충분한 두께인 4 mm로 설정하였다.

다음은 센서의 감지부 내에 광섬유 브래그 격자가 삽입될 위치를 결정해야 한다. 일반적으로 센서에 많이 적용되는 다이아프램형 감지부에는 가장 큰 변형이 발생하는 곳에 센서를 삽입하게 된다. 하지만 제작된 감지부의 경우에 광섬유 브래그 격자 길이 10 mm 이내에서 비균일한 변형률 분포가 많이 존재하게 된다. 이렇게 광섬유 브래그 격자 센서는 비균일한 하중을 받았을 경우 격자 간격의 길이가 비균일하게 분포되어 그림 3과 같이 브래그 파장의 왜곡이 발생하게 되는 처핑(chirping) 현상이 발생하게 되며 이는 정확한 브래그 파장의 측정을 어렵게 한다.

따라서 그림 4와 같이 유한요소법(finite element method, FEM)을 이용하여 센서 감지부의 하중에 따른 변형률 분포를 확인하여 광섬유 브래그 격자의 길이인 10 mm 구간에서 가장 균일한 변형률 분포를 가지는 위치에 브래그 격자를 삽입하여 처핑 효과를 최소화하였다.

감지부의 형상이 원형이며, 가운데 축을 중심으로 대칭(symmetric)형상을 가지고 있어 그림 4와 같은 유

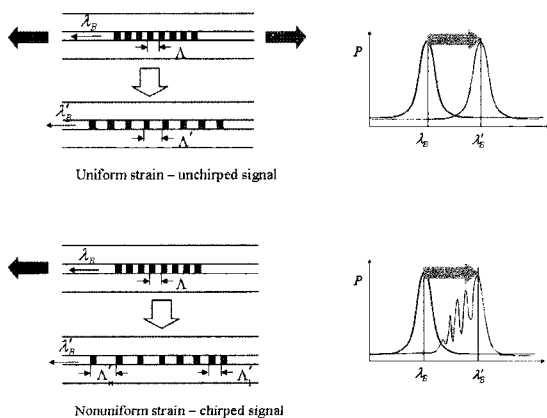


그림 3. Chirping 효과
Fig. 3. Chirping effect.

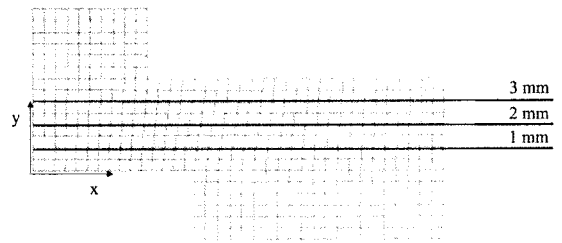


그림 4. 센서 감지부의 유한 요소 해석
Fig. 4. FEA of transducer.

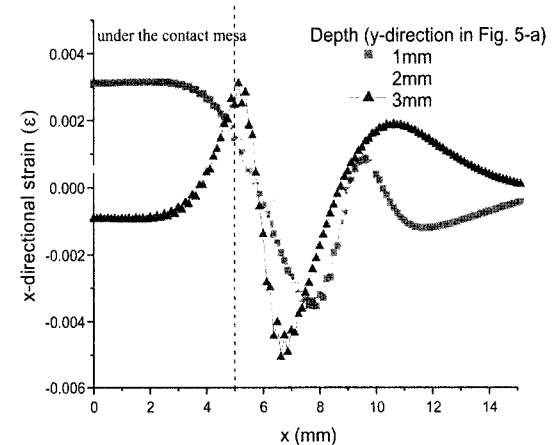


그림 5. 감지부의 광섬유 방향 변형률 분포
Fig. 5. Strain distribution to the optical fiber.

한요소 모델을 이용하여 해석을 수행하였다. 설계 최대 하중인 5 N 이하에서는 감지부의 변형이 크지 않아 재료가 비록 비선형성을 가지는 고무 재질의 PDMS이지만 변형 상태를 탄성이라고 가정하여 0.75 MPa의 탄성 계수(elastic modulus)와 0.49의 포아송비(Poisson's ratio)를 적용하였다. 그림 4에서의 y 방향으로의 깊이 1, 2, 3 mm에 따른 광섬유 길이 방향의 변화량의 해석 결과는 그림 5와 같다. 해석 결과 하중에 대한 변형률의 분포 양상이 균일하게 나타나는 부분은 센서 감지부 돌출부 아래 부분임을 알 수 있었다(그림 5의 그림 4에서의 x와 일치한다).

또한 돌출부 아래부분에서의 삽입 깊이에 따라서 변형률의 크기는 증가하는 것을 알 수 있다. 같이 따라서 단일 모드 광섬유의 직경 250 μm을 고려했을 때 아래부분에서 약 1 mm 정도에 위치 시키게 된다면 감도(sensitivity)를 향상시킬 수 있으며, 브래그 반사 파장의 처핑을 최소화 할수도 있다는 것을 해석을 통해서 확인하였다. 최종적으로 설계된 센서의 치수는 그림 6과 같다.

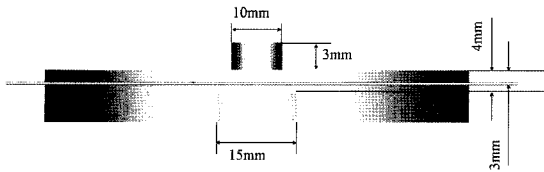


그림 6. 유연 힘 센서의 감지부 치수
Fig. 6. Dimension of designed transducer.

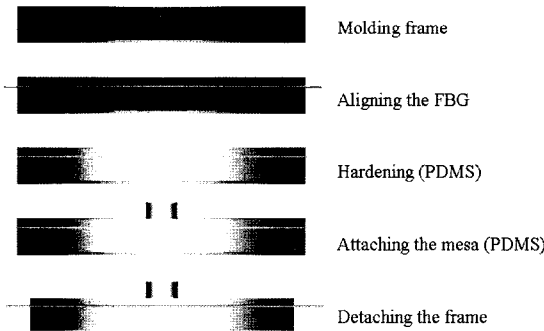


그림 7. 유연 힘 센서의 제작 방법
Fig. 7. Fabrication process of the sensor.

3. 센서의 제작 및 검증

3.1. 유연 힘 센서의 제작

그림 7과 같이 유연 단위 힘 센서는 몰딩(molding) 기법에 의해서 제작된다. 먼저 센서의 틀에 광섬유 브래그 격자를 정렬 시킨 후 액상 PDMS를 주입하여 경화 시킨다. 감지부의 돌출부는 따로 제작하여 정확한 위치에 부착한 후 광섬유 센서가 파손 되지 않도록 틀을 제거하면 센서 제작이 완료 된다.

제작된 센서는 그림 8과 같은 센서 성능 검증 시스템을 통하여 성능을 검증하게 된다. 수직방향으로 움직일 수 있는 스테이지 위에 제작된 센서를 올려놓고 로

드셀을 센서의 돌출부에 정렬하여 수직 축 스테이지를 올려서 로드셀과 제작된 센서가 만나서 센서에 하중이 가해지게 된다. 따라서 로드셀에서 감지되는 힘은 작용 반작용에 의하여 센서에서 반대방향으로 작용하게 되어 그 힘을 비교 측정 할 수 있게 된다.

3.2. 유연 힘 센서의 검증

먼저 앞서 설명한 chirping 현상의 감소를 실험적으로 증명하였다. 그림 9에서의 같이 광섬유 브래그 격자의 위치를 일반적인 다이아프램 형태의 센서와 같이 많은 변형을 가지는 부분에 위치시키면 그림 9-(a)와 같이 외부 하중 5 N 인가시 반사파장의 폭이 상당히 넓어지면서 많은 피크 값을 가진다는 것을 볼 수 있었다. 반면에 앞서 설명한 것과 같이 센서 감지부 내에 가장 균일한 변형을 분포를 가지는 위치에 브래그 격자를 삽입하면 그림 9-(b)와 같이 처핑 현상이 현저히 감소하고 정확한 브래그 파장을 측정 할 수 있음을 알 수 있다.

그림 10은 센서의 출력 특성을 나타내고 있다. 실제 센서에서의 출력신호인 브래그 파장의 변화는 하중에 따라 비선형적인 신호를 나타낸다. 이는 감지부의 재료가 고무라는 비선형성을 가지고 있는 재료로 제작되어 나타나는 현상이라 할 수 있으며 이러한 비선형적인 관계를 실험적으로 확인하여 브래그 파장의 변화를 하중의 변화로 확인할 수 있도록 하였다.

이를 이용하여 계산된 센서의 정확도(accuracy)는 로드셀의 측정값을 참값으로 가정했을 때 약 99.9%의 값을 가졌다. 센서의 분해능은 브래그 파장을 측정하는 가변 패브리 패롯 필터의 성능에 따라 센서의 분해능이 달라질 수 있다. 실험에 사용된 가변 패브리 패롯 필터의 경우 분해능이 약 0.02 nm의 분해능을 가지며 이 경우 0.1 N의 분해능을 가진다. 제작된 센서의 감도

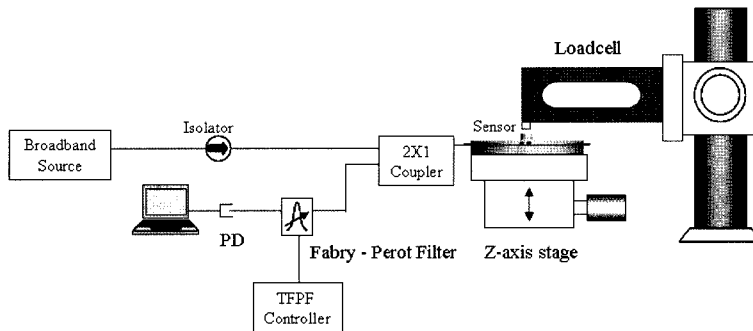
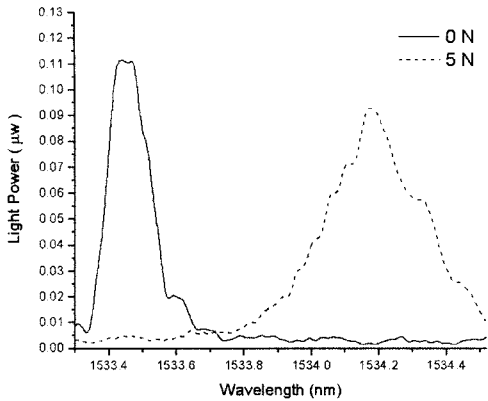
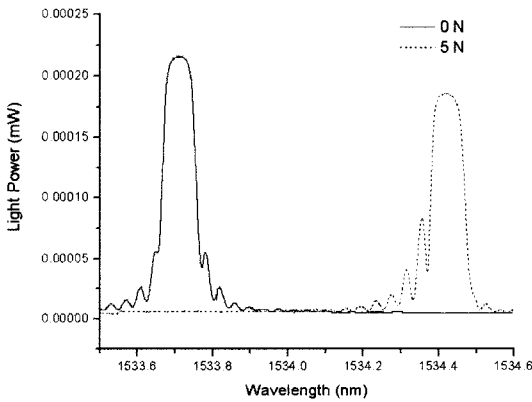


그림 8. FBG 유연 힘 센서 시스템
Fig. 8. Flexible FBG force sensor system.



(a)



(b)

그림 9. Chirping 현상의 감소
Fig. 9. Reduction of chirping effect.

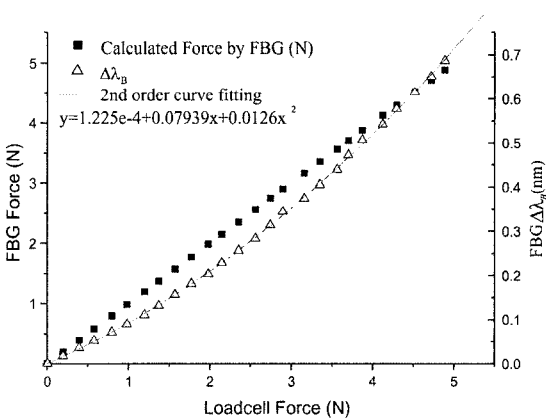
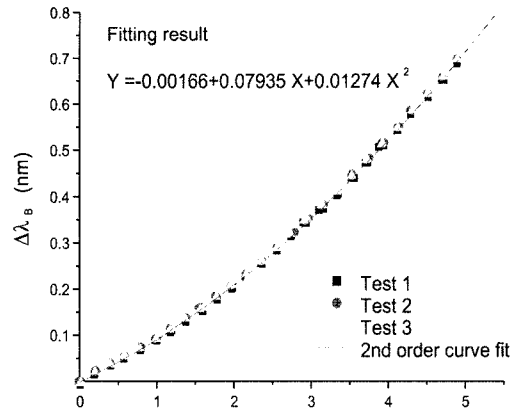
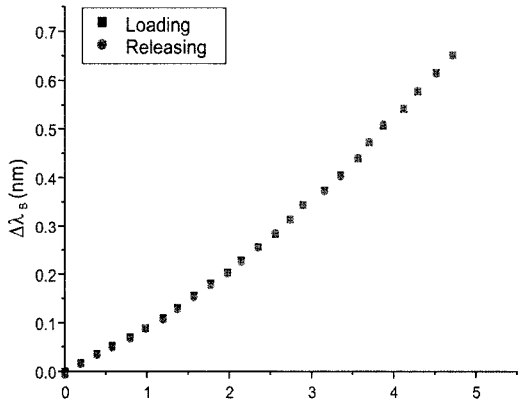


그림 10. 유연 힘 센서의 출력신호
Fig. 10. Output signal of flexible FBG force sensor.

는 약 1 nm/N의 감도를 나타낸다고 할 수 있다.
센서의 반복성은 그림 11-(a)에서 나타난 바와 같이



(a)



(b)

그림 11. 유연 힘 센서의 동작 특성: (a) 반복성, (b) 히스테리시스

Fig. 11. Characteristics of flexible force sensor: (a) repeatability, (b) hysteresis.

세 번의 동일 하중을 선형적으로 증가하였을 때 나타나는 브래그 파장의 변화를 추이를 살펴 보았을 때 상당히 우수하다는 것을 알 수 있다. 또한 그림 11-(b)와 같이 제작된 센서에 하중을 가했다가 다시 하중을 제거하였을 때 히스테리시스(Hysteresis)는 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 즉 제작된 센서는 높은 반복성과 작은 히스테리시스를 가진다고 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 광섬유 브래그 격자를 이용한 촉각 센서용 유연 힘 센서를 설계 제작하고 이를 실험적으로 검증하였다. 특히 광섬유 브래그 격자 센서의 처핑

현상을 최소화하기 위하여 유한요소해석을 통하여 외부에 작용한 힘에 의해 발생한 센서 감지부의 변형률 분포 중 가장 균일한 변형률 분포를 가지는 곳에 광섬유 브래그 격자를 위치시켰다. 이에 따라 제작된 센서에서 나온 출력 신호는 처핑 현상이 현저히 줄어든 것을 알 수 있었다. 또한 제작된 센서는 0.1 N의 분해능을 가지며 히스테리시스는 거의 나타나지 않았으며 반복성은 우수하다는 것을 실험적으로 확인 할 수 있었다. 제작된 센서는 몰딩 기법을 이용하여 간단히 제작할 수 있으며, 센서에 사용된 브래그 격자 센서의 길이는 10 mm이며 센서의 용도에 따라 그 크기를 쉽게 줄일 수 있으며 이에 따라 유연 센서의 크기도 줄일 수 있다. 또한 광섬유 브래그 격자 센서의 다중화(multiplexing)를 통해서 2차원 분포형 센서로 제작 가능하며 이를 이용하여 인간의 피부와 유사한 촉각 감지 센서로 적용될 수 있을 것으로 기대된다. 2차원 분포형 센서로 제작될 경우 공간 분해능이 약 20 mm에 적합하도록 설계되었으며 이는 인체에 있어서 등과 같은 둔감한 피부에서 물체를 감지하는 피부의 공간 분해능과 유사하다.

Acknowledgement

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

참고 문헌

- [1] T. Mei, W. J. Li, Y. Ge, Y. Chen, L. Ni, and M. H. Chan, "An integrated MEMS three dimensional tactile sensor with large force range", *Sensors and Actuators (A)*, vol. 80, pp. 155-162, 2000.
- [2] M. J. Yoon, K. H. Yu, G. Y. Jeong, S. C. Lee, and T. G. Kwon, "Development of a distributed flexible tactile sensor system", *J. of KSPE*, vol. 19, no. 1, pp. 212-218, 2002.
- [3] N. Futai, N. Futai, K. Matsumoto, and I. Shimoyama, "A flexible micromachined planar spiral inductor for use as an artificial tactile mechanoreceptor", *Sensors and Actuators (A)*, vol. 111, pp. 293-303, 2004.
- [4] U. Paschen, M. Leineweber, J. Amelung, M. Schmidt, and G. Zimmer, "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, 1998.
- [5] M.-C. Wu, R. S. Rogowski, and K. K. Tedjojuwono, "Fabrication of extremely short length fiber Bragg grating for sensor application", *Sensors Proceeding of IEEE*, vol. 1, pp. 49-55, 2002.

허진석



- 2000년 국립경북대학교 기계공학과 졸업 (공학사)
- 2002년 한국과학기술원 기계공학과 졸업 (공학석사)
- 현재 한국과학기술원 기계공학과 박사과정
- 주관심분야 : 광섬유 센서를 이용한 촉각 감지 센서 시스템 개발

김만섭



- 2003년 중앙대학교 기계공학과 졸업 (공학사)
- 2005년 한국과학기술원 기계공학과 졸업 (공학석사)
- 현재 유한킴벌리 연구원

이정주



- University of Surrey 졸업(공학박사)
- 현재 한국과학기술원 기계공학과 교수
- 주관심분야 : 광섬유 센서, 지능형 재료 및 시스템, 의료용 로봇