광섬유 굽힘 손실을 이용한 직물 기반의 광섬유 촉각센서 개발

김주영 · 백상호 · 이정주[†]

Development of fabric-based optical fiber tactile sensor using optical fiber bending loss

Ju-Young Kim, Sang-Ho Baek, and Jung-Ju Lee[†]

Abstract

In this paper the tactile sensor system based on the bending loss of optical fiber sensor is presented. The sensor array was designed with fabric structure. The optical measuring system was composed of LED for light source and CCD camera for the signal light detector. Performance of this tactile sensor system was evaluated in various environments and compared with Harmon's design criteria. The result shows that load range is 3 g~100 g, resolution is 1.5 g, hysteresis error is 1.5%. The response linearity is good and flexibility of sensor array is excellent.

Key Words : bending loss, microbending, fabric, flexibility, resolution

1. 서 론

인간은 시각, 촉각, 청각, 후각, 미각의 5가지 감각을 통해 외부 환경을 인지하게 된다. 따라서 인간을 모방하는 지능형 로봇이 사회체계에서 인간과 함께 공존하고 소통하기 위해서는 이 5가지 감각이 필수적으로 요구된다. 그 중에서도 물건을 잡거나 사람과 악수하는 것 등의 접촉을 할 수 있는 환경이 많은 지능형 로봇의 경우에는 안정적인 작동을 위한 촉각센서가 요구되고 있다^[1,2].

많은 촉각센서들 중에 크기가 작고 좋은 민감도를 장점으로 가지는 실리콘 웨이퍼 기반의 MEMS 기술을 활용한 촉각센서들이 큰 부류를 이루고 있다^[3]. 이들은 압전재료(piezoelectric material), 압저항재료(piezoresistive material) 또는 용량형(capacity type), 인덕터형(inductor type) 등을 이용한 것들이 대부분이다. 이러한 MEMS 기술을 이용한 실리콘 웨이퍼(silicon wafer)를 기본 재료로 사용하는 촉각센서들은 실리콘 웨이퍼 자체가 가지는 외력에 대한 깨지기 쉬운 성질

로 인해 센서의 내구성 문제와 곡면 적용에 필요한 유연성 결핍 문제가 제기되어 왔다. 그러나 최근에는 유연성과 외력에 대한 내성이 좋은 고분자 재료를 함께 사용함으로써 이런 문제들을 많이 보완하고 있다^[4,5]. 그럼에도 불구하고 MEMS 기반의 촉각센서들은 전기적 특성을 띠고 있어 산업전반에 걸쳐 사용되는 전자기시스템의 전자기장에 쉽게 영향을 받을 수 있으며, 단위 센서가 그 수를 늘려 분포형 센서로 확장해 나감에 따라 늘어나는 배선에 대한 부담은 여전히 해결해야 할 문제점으로 남아있다. 압저항을 이용한 촉각센서를 예로 들면, 단위 센서 하나에 입·출력 전압을 위한 배선 2개와 저항 변화 또는 전압차를 감지하기 위한 배선 2개가 필요하므로 단위 센서 하나에 총 4개의 배선이 필요하게 된다. 따라서 200개의 단위 셀(단위 센서)을 가진 분포형 촉각센서의 경우 배선수는 4N, 즉 800개로 그 수가 상당히 많아 진다. 이와 같은 문제점들을 해결하기 위해 본 연구에서는 광섬유의 굽힘 손실(bending loss)^[6-9]을 이용한 직물기반의 광섬유 촉각센서를 제안하고자 한다.

광섬유는 빛을 정보전달의 매개체로 하므로 전자기에 영향을 받지 않으며 뛰어난 유연성과 열·화학적으로 높은 내성을 가지고 있다. 하지만, FBG^[10] 광섬유 촉각센서의 경우 광섬유에 격자를 새기는 등의 제작비

[†]한국과학기술원 기계공학과(Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology)

[†]Corresponding author: leejungju@kaist.ac.kr
(Received : January 07, 2009, Revised : March 17, 2009
Accepted : April 07, 2009)

Table 1. Main Cause of the Light Loss in Optical Fibers

종 류	원 인
광섬유의 고유한 성질	흡수, 산란, 구조의 불완전
외력에 의한 손실	광섬유의 찌그러짐, 굴곡(굽힘)
인위적 원인에 의한 손실	광섬유 끝 단의 용착 접속

및 광 측정장비가 고가이고 측정장비의 부피가 크다는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 굽힘 손실에 유리한 언덕형 굴절률의 다중모드 광섬유(graded-index multimode optical fiber, GIMM(62.5/125 μ m) fibre, YOFC社)를 사용하여 저렴하고 간단한 센서를 제작하고 그 성능을 평가하였다.

2. 광섬유의 광손실

광섬유의 광손실은 정보전달을 목적으로 하는 광통신에서는 절대적으로 줄여야 하는 문제점이다. 그러나 광섬유의 광손실을 이용하는 촉각센서에서는 광손실이 센서의 작동에 없어서는 안될 요소이다.

광섬유의 광손실 원인은 Table 1과 같다. 이를 살펴보면 광섬유의 제작과정에서의 결함이 원인이 되어 발생하는 흡수·산란·구조의 불완전에 의한 광손실이 있으며, 인위적 원인에 의한 손실은 끊어진 두 가닥의 광섬유를 잇는 과정에서 발생하는 광섬유의 굽힘(거시적, 미시적 굽힘)·찌그러짐(미소굽힘)에 의한 광손실이 있다. 3가지 광섬유의 주요 광손실 원인 중에서 본 연구에서는 광섬유가 외력을 받아 굽힘 또는 찌그러짐을 경험할 때 발생하는 광손실을 촉각센서의 작동 메커니즘(mechanism, 작동기구)으로 이용할 것이다.

Fig. 1에서와 같이 광섬유가 굽힘을 받게 되면 빛의 이동 경로가 바뀌게 되고, 이동 경로가 변한 빛이 코어와 클래딩의 경계면에 부딪힐 때 전반사가 일어나는 최대 각도인 θ_c 보다 큰 각도로 입사하게 되면 빛은 빠른 속도로 클래딩 밖으로 유출되게 된다^[6].

$$\sin\theta_c = \frac{n_c}{n_f} \quad (1)$$

식 (1)은 전반사 조건을 이용하여 스넬의 법칙으로부터 나오고, 여기서 n_f 는 코어 굴절률이고, n_c 는 클래딩 굴절률이다.

이를 다르게 설명하면, 빛이 광섬유의 코어와 클래딩의 경계에 부딪힐 때 경계에서부터 측정된 입사각이 상대적으로 크면 높은 차원의 모드(high order mode)라고 하고 그 보다 상대적으로 작으면 낮은 차원의 모드(low order mode)라고 하는데, 굽힘에 의하여 낮은 차원의 모드를 가진 빛이 높은 차원의 모드를 가진 빛

Jeff Hecht, "Understanding Fiber Optics", PEARSON/Prentice-Hall, 2006

Fig. 1. Light loss caused by optical fiber bending. **Fig 2.** Experimental setting to measure bending loss in optical fibers.

으로 결합되기 때문에 광손실이 발생하게 된다^[7].

3. 광섬유의 곡률반경에 따른 광손실 특성

광섬유의 굽힘손실을 알아보기 위해 곡률반경에 따른 광손실 측정 실험장치를 Fig. 2와 같이 구성하였다. 광섬유에 빛을 공급하는 광소스(light source)는 5 W LED를 사용하고, 광섬유로부터 나오는 빛의 강도(intensity) 측정은 CCD 카메라를 사용하며, CCD 카메라로 촬영된 이미지(image) 정보는 컴퓨터로 전송되어 랩뷰 프로그램(LabView program)을 사용하여 빛의 강도 변화 여부를 분석한다. 이때 빛의 강도는 밝고 어두운 정도를 나타내는 그레이 스케일 값(gray scale value, gsv)으로 표현된다. 본 실험에서 가장 중요한 변수인 광섬유의 곡률반경은 광섬유를 완전한 원으로 한 바퀴 회전 시킴으로써 신뢰성 곡률반경을 바꾸었고, 광섬유가 정해진 반지름을 가지는 원을 잘 따라 갈 수 있도록 원주에 일정한 간격으로 핀(pin)을 박아 광섬유에 가이드라인(guide line)을 부여하였다.

실험 시에는 광섬유의 끝 단으로부터 나오는 빛을 정확하게 촬영하기 위해 CCD 카메라 주변을 외부의 빛이 침입하지 못하게 암실로 만들어 주어야 하고, LED의 경우 안정적인 광 공급을 위해 전원을 켜 후 워밍업(warming up) 시간이 약 3~4시간 정도 필요하다

Fig 3. Radius of curvature-light loss curve.

며, 온도의 변화에 따라 빛의 강도가 달라지는 특성을 가지고 있으므로 온도를 일정하게 유지 시키며 실험을 진행해야 한다. 본 연구에서는 27 °C를 전·후한 온도에서 실험을 수행하였다. 컴퓨터로 전송된 광 이미지의 분석에 있어서 랩뷰 프로그램을 이용하여 59×59 화소(pixels)의 광강도를 평균하여 화소 1개에 대한 광 밝기로 광강도를 나타내어 분석하였다.

Fig. 3은 곡률반경-광손실을 선도로써 광손실율은 다음과 같이 구해진다.

$$\text{광손실율}[\%/mm] = \frac{\text{광손실량}}{\text{초기 광강도} \times \text{원주}} \times 100$$

여기서 광손실량은 초기 광강도(곡률반경 150 mm)에서 현재 곡률반경에서의 광강도를 뺀 값이고, 원주는 광섬유의 원둘레를 의미한다.

4. 광섬유 촉각센서 시스템

본 연구에서 제안하는 직물 기반의 광섬유 촉각센서는 Fig. 4와 같은 직물구조를 가진다. 두 가닥의 광섬유를 서로 직교하면서 바느질 하듯 직물의 아래·위를 관통하도록 하여 고정 시킨 후, 더미 광섬유(dummy fiber)를 이 두 광섬유가 서로 교차하는 지점의 아래를 통과하도록 위치 시킨다. 이와 같은 방법으로 여러 가닥의 광섬유를 원하는 배열만큼 확장하면 넓은 공간에 적용할 수 있는 광섬유 촉각센서가 만들어 진다. 세 가닥의 광섬유가 서로 교차하는 지점이 단위 셀(taxel)이 되며, 이 지점에 외부 하중이 작용하게 되면 광섬유들이 서로 눌러 미소굽힘(microbending)^[11]이 발생하게 되어 광섬유 내부를 통과하는 빛이 외부로 발산하게

Fig. 4. (a) Schematic of fabric-based optical fiber tactile sensor, (b) Section of fabric-based optical fiber tactile sensor, (c) Taxel (tactile element).

된다. 따라서 광섬유를 통과하는 빛의 강도 변화를 측정함으로써 외부 하중을 측정할 수 있으며, XY축을 따라 진행되는 광섬유들의 배열 순서를 조합하여 하중이 작용한 위치를 파악할 수 있게 된다.

Fig. 5는 제작된 촉각센서 및 광 측정모듈을 보여주고 있다. 센서는 10×10 배열을 가지며 공간분해능(spa-

Fig. 5. (a)Fabric-based optical fiber tactile sensor(10×10 array), (b)Connector, (c)Light measuring module.

tial resolution)은 10 mm이다. 광섬유의 직경이 $250\ \mu\text{m}$ 이므로 공간분해능은 최소 2 mm까지 제작 가능하나 로봇의 팔(arm), 어깨(shoulder), 등(back) 등의 비교적 넓은 부위에 대한 촉각센서로의 활용은 오히려 비효율적이라 할 수 있다. 분포형 촉각센서 제작에 필요한 여러 가닥의 광섬유는 광섬유들을 광의 입력단과 출력단으로 나누어 플라스틱 튜브(plastic tube)를 사용하여 각각 묶은 뒤, Fig. 5(b)와 같이 광섬유 끝단을 광의

Fig. 6. CCD output image diagram.

입출력이 용이하도록 커넥터(connector)로 제작하여 잘 정렬한다. 광 측정모듈은 Fig. 5(c)와 같이 광 소스(light source)는 5 W LED, 광 측정장치(light detector)는 CCD camera, 전원장치(power supply), 팬(fan) 등으로 간단하게 구성된다. 제작된 입출력 커넥터는 LED와 CCD camera 전방에 부착된 커넥터 소켓(connector socket)에 각각 끼워져 사용된다. 즉 LED는 입력 커넥터에 광(light)을 전달하고 CCD는 출력 커넥터에서 출력광의 광강도(light intensity)를 측정한다.

측정된 광 정보는 PC로 전달되고 LabView 프로그램을 사용하여 입출력 광의 광강도 변화 유무 및 정도를 판단하게 된다. 출력 커넥터의 CCD 이미지는 Fig. 6과 같으며, CCD로 한번에 측정된 여러 광섬유 가닥의 광강도는 LabView 프로그램을 통해 각각 개별적으로 해석된다. 따라서 외부 하중의 위치 및 크기를 측정할 수 있게 된다.

5. 광섬유 촉각센서 성능 평가

제작된 광섬유 촉각센서는 Fig. 7과 같이 상하로 움직이는 스테이지(stage) 평판 위에 센서를 위치시키고 센서의 단위셀(taxel)을 로드셀(load-cell)의 프로브(probe)와 상하로 일치하도록 정렬하여 스테이지를 이동시켜 하중을 부하하거나 제하하고, 하중의 크기는 로드셀로 측정한다. 이 때 촉각센서의 광섬유를 통과하는 광강도 변화를 빛의 명암(gray scale value, gsv) 단위로 측정하여 센서의 성능을 평가한다.

센서의 하중응답(load response)과 히스테리시스(hysteresis)는 하중 범위를 0~100 g으로 하고, 하중을 100 g까지 5 g 단위로 증가시켰다가 다시 5 g 단위로 0까지 감소시키며 실험을 수행하였다. 실험결과 Fig. 8와 같이 선형성(linearity)이 우수한 하중응답 곡선을

Fig. 7. Experiment setup for the performance evaluation of tactile sensor.

Fig. 8. Load response and hysteresis curve of optical fiber tactile sensor.

Fig. 9. Resolution curve.

Fig. 10. Test on a manikin's arm & shoulder.

을 얻을 수 있었으며, 센서의 민감도(sensitivity)는 약 -45 gsv/N 이고, 히스테리시스 오차(error)는 1.5% 미만으로 측정되었다. 단위 셀을 구성하는 광섬유1(optical fiber 1)과 광섬유2(optical fiber 2)의 하중응답이 서로 다르게 나타나는 이유는 이들의 경계조건(boundary condition)이 각각 다르기 때문이다.

분해능(resolution)은 센서가 하중을 감지할 때까지 하중을 0에서부터 천천히 증가한다. 이 때 로드셀로 측정된 하중을 기록한 후 센서 감지 시스템을 0으로 초기화 하여 다시 하중을 증가하는 방식으로 하중 100 g 까지 반복 실험하여 구한다. Fig. 9은 2회 시행의 하중 증가 단계(load incremental step)에 대한 감지가능 하중(sensible load) 곡선을 나타낸 것이다. 이를 1차 식으로 근사화(fitting)하면 기울기에 해당하는 값이 센서의 평균 분해능이 되며, 약 1.5 g 또는 0.015 N이 된다.

사람들 사이에서 어깨와 팔을 쳐 상대방에게 친근감이나 의사를 표현하듯이 인간과 로봇 또는 로봇과 로봇 사이에서도 촉각센서를 통해 이와 같은 행동을 가능하게 한다.

본 실험에서는 이와 같은 상황을 연출하기 위해 Fig. 10과 같이 마네킹(manikin)의 팔과 어깨에 제작된 센서를 부착하여 점, 선, 면에 해당하는 형태의 하중을 부과하여 센서의 정성적 성능을 평가하였다. 팔과 어깨는 굴곡이 많아 유연성이 부족한 촉각센서는 적용 자체가 어려운 경우가 발생하게 된다. 그러나 본 연구에서 제안한 직물을 기반으로 하고 광섬유를 사용한 직물구조 광섬유 촉각센서는 광섬유 본연의 유연성을 100% 활용할 수 있어 심한 굴곡에의 적용이 쉽다. 또한 센서의 두께가 1.5 mm 미만으로 로봇에 적용 시 별도의 공간이 필요하지 않으며, 마치 의복과 같은 느낌을 주므로 자연스러운 연출이 가능하다. 이와 같은 장점으로 인해 굴곡이 심한 마네킹의 팔과 어깨에서도 우수한 응답성을 보여 주었다. 하지만, 실제 움직이는 부위에 본 연

Table 2. Sensor Performance Summary and Comparison

	Proposed sensor	Harmon's design criteria
Type	Crossed fiber sewed in fabric	Tactile sensor
Array size	10 × 10	10 × 20
Taxel size(mm)	1 × 1	< 2 × 2
Load range	3 g ~ 100 g	1 g ~ 100 g
Sensitivity or output response	-45 gsv/N	Monotonic, not necessarily linear
Resolution	1.5 g	0.5 g ~ 10 g
Hysteresis error	1.5%	Low
Stability and repeatability	Good	Good
Frequency response	10 Hz	At least 100 Hz

Table 3. The Performance of Existing Sensors

	Heo's sensor	Han's sensor (PDMS, diaphragm)
Type	Crossed fibers embed in PDMS	Crossed fibers embed in diaphragm made of PDMS
Array size	8 × 8	10 × 10
Taxel size(mm)		2 × 2
Load range	-1500 g	8 g ~ 800 g
Sensitivity or output response	-20 gsv/N	-50 gsv/N
Resolution	5 g	2 g
Hysteresis error	6.3%	
Stability and repeatability	Good(2%)	

구에서 제안한 직물 기반의 촉각센서를 적용할 때, 움 직임에 의해 발생 할 수 있는 광섬유 구김에 의한 광손 실 극복 방안과 직물제조 공정의 구현 가능성에 대해 서는 추가적인 연구가 필요하다고 생각된다.

6. 결 론

본 연구에서는 로봇의 팔, 어깨 또는 등과 같은 비교 적 넓은 부위에 적용 가능하며, 광섬유의 굽힘손실을 이용한 직물 기반의 광섬유 촉각센서 및 시스템을 제 작하고 그 성능을 평가하였다. 제안한 센서의 성능은 Table 2에 정리하여 나타내었으며, Harmon^[1,12]이 1982 년에 제시한 촉각센서 디자인 기준(Harmon's design criteria)을 병기하여 본 센서의 촉각센서로서의 적절성

을 평가하였다. 대부분의 항목에서 Harmon이 제시한 디자인 기준을 만족하나 센서의 반응성이 1/10배에 그 치는 것을 알 수 있다. 이는 사용된 60 frams/s 의 CCD 카메라를 보다 고속 촬영이 가능한 것으로 교체 하고 광강도 해석 하드웨어(analysis hardware)의 성능 을 높이면 충분히 해결할 수 있을 것으로 생각된다.

본 연구에서 제안한 촉각센서는 직물을 기반으로 광 섬유들이 바느질되어 있는 것과 같은 구조를 하고 있 어 유연성이 뛰어나 굴곡이 심한 부위에 적용이 유리 하며, 100개의 단위셀(taxel)을 포함하는 센서를 20가 닥의 광섬유만으로 제작 가능한 간단성을 가지고 있다. 또한 센서의 제작이 쉽고 간편하며 비용이 저렴하고 확장성이 좋아 넓은 공간에 적용하기 유리하다.

그리고 Table 3을 통해 기존 촉각센서^[13,14]와 성능을 비교했을 때 거의 모든 항목에서 우수함을 확인 할 수 있다. 특히 허진석 박사가 제안한 동일한 원리의 미소 굽힘을 이용한 광섬유 촉각센서^[13]와 비교 했을 때 본 연구에서 제안한 직물 기반의 광섬유 촉각센서의 우수 성을 쉽게 알 수 있다. 그러나 하중 범위가 다소 협소 한 것이 단점으로 지적될 수 있다.

따라서 본 연구에서 제안한 광섬유 굽힘손실을 이용 한 직물 기반의 광섬유 촉각센서는 로봇의 팔, 어깨, 등과 같은 비교적 넓은 부위에 의복과 같이 자연스럽게 적용 가능하여 광역(廣域) 촉각센서로의 활용이 기 대된다.

참고 문헌

- [1] Mark H. Lee, "Tactile sensing: New directions, new challenges", *The International Journal of Robotics Research*, vol. 19, no. 7, pp. 636-643, 2000.
- [2] M.H. Lee and H.R. Nicholls, "Review article tactile sensing for mechatronics-a state of the art survey", *Mechatronic*, vol. 9, no. 1, pp. 1-31, 1999.
- [3] 김진년, 김용국, 이강열, 조우성, 이대성, 조남규, 김 원효, 박정호, 김수원, 주병권, "연성회로기판에 실 장된 실리콘 기반의 유연 촉각센서 어레이 제작 및 평가", *센서학회지*, 제15권, 제4호, pp. 227-283, 2006.
- [4] J. Dargahi and S. Najarian, "Advances in tactile sen sors design/manufacturing and its impact on robot ics applications-A review", *The Industrial Robot*, vol. 32, no. 3, pp. 268-281, 2005.
- [5] 김종호, 박연규, 강대임, "미세 힘 센서 개발 및 응 용에 관한 연구동향", *한국정밀공학회지*, 제19권, 제 3호, pp. 7-12, 2002.
- [6] Jeff Hecht, *Understanding fiber optics*, Pearson

- Prentice Hall, New Jersey, pp. 102-103, 2006.
- [7] Eugene Hecht, *Optics*, Addison Wesley, San Francisco, pp. 193-201, 2002.
- [8] D. Gloge, "Bending loss in multimode fibers with graded and ungraded core in-dex", *Applied Optics*, vol. 11, no. 11, pp. 2506-2513, 1972.
- [9] J. G. Winger and K-M Lee, "Experimental investigation of a tactile sensor based on bending losses in fiber optics", *Robotics and Automation, 1988. Proceedings., 1988 IEEE International Conference on*, pp. 754-759, Philadelphia, PA, USA, 1988.
- [10] 허진석, 김만섭, 이정주, "광섬유 브래그 격자를 이용한 촉각센서용 유연 단위 힘 센서 개발", *센서학회지*, 제15권, 제4호, pp. 251-256, 2006.
- [11] J. W. Berthod III, "Historical review of microbend fiber-optic sensors", *J. Lightwave Technology*, vol. 13, no. 7, pp. 1193-1199, 1995.
- [12] Del T. Jenstrom and C-L Chen, "A fiber optic microbend tactile sensor array", *Sensors and Actuators*, vol. 20, no. 3, pp. 239-248, 1989.
- [13] J-S Heo, C-H Han and J-J Lee, "System design and evaluation of the robot tactile sensor using the microbending fiber optic sensors", *16th IEEE International Conference on Robot & Human Interactive Communication*, pp. 14-18, Jeju, Korea, 2007.
- [14] 한철희, "미소 굽힘형 광섬유 센서를 이용한 촉각 센서 개발", *한국과학기술원 석사학위 논문*, 2008.

김 주 영

- 2007년 경북대학교 기계공학과 졸업(공학사)
- 2009년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학석사)
- 2009년 2월~현재 삼성중공업 풍력제품 개발팀 기계구조파트 재직 중
- 주관심분야: 광섬유 센서를 이용한 촉각 감지 센서

백 상 호

- 2008년 경북대학교 기계공학과 졸업(공학사)
- 현재 한국과학기술원 기계공학과 석사과정
- 주관심분야: 광섬유 센서 & 이종재료 계면의 피로 특성

이 정 주

- *센서학회지* 제15권, 제4호, p. 256 참조
- 현재 한국과학기술원 기계공학과 교수