

광섬유를 이용한 각도 측정 연구

A Study on Angle Measurements Using an Optical Fiber

김 아 희* · 김 지 선* · 오 한 별* · 김 준 식* · 고 봉 준* · 이 은 숙* ·
정 현 철* · 최 주 현* · 백 진 영* · 전 재 훈*

(A-Hee Kim · Ji-Sun Kim · Han-Byeol Oh · Jun-Sik Kim · Bong-Jun Goh · Eun-Suk Lee ·
Hyon-Chel Jung · Ju-Hyeon Choi · Jin-Young Baek · Jae-Hoon Jun)

Abstract - The measurement and analysis of angular change have been studied in many fields. This study developed an angle measurement technique with optical fiber and photodiode. The position and attached angle of photodiode were investigated to find the proper combination of parameter. The results showed that the increased measuring range was achieved when the position of detector was away from the center of rotation. Inverse mathematical model was used to obtain angular changes with an optical fiber. The applications of this study include in optical sensor, joint angle measurement, and sport science.

Key Words : Angular sensor, Optical fiber, Photo diode

1. 서 론

각도 측정은 임상, 산업, 연구 분야에서 폭 넓게 사용되고 있고 이에 따라 현재 각도를 측정하고 비교분석하는 기술들이 많이 연구 되고 있다. 특히 산업이 인간의 편의성을 중심으로 발전하면서 사용하기 쉽고 편리한 제품, 정확한 성능을 가지는 제품에 대한 기대가 높아지면서 산업 분야에서 각도를 정확히 측정하는 방법이 요구되고 있다.

임상에서 각도 측정은 관절의 각도를 측정하고 수술이나 재활 후의 치료 정도를 판단할 때 사용하는데 이때 일반적으로 의료용 측 각도기(goniometer)를 사용한다. 이는 측정이 간단 하지만 각도 측정에 검사자의 주관적인 요소가 개입될 수 있고, 정적일 때만 측정이 가능하므로 객관적이고 정확하게 측정하기에는 어려움이 있으며 데이터를 디지털화하여 저장할 수 없다는 단점이 있다 [1-2]. 이에 따른 대안으로 전자 각도기(electro-goniometer)를 사용하지만, 이 경우 잦은 사용 시 전기 저항부분의 마모가 올 수 있으며 정확성이 낮아 질 수 있다[3-4].

산업 분야에서는 NC기계(Numerical Control Machine)나 로봇의 위치 결정 등 디지털 소자로서 중요한 위치를 차지하는 광전식 인코더(optical encorder)를 사용하여 각도를 측정한다[5]. 이는 회전각의 변위를 부호판과 광전소자를 사용하여 측정하는 센서이다. 빛의 투과부분과 불 투과 부분을 갖는 스케일판과 판독 격자판으로 구성되어 있어 스케일 판이 움직이면 광전소자에 주기적으로 명암이 나타나기 때문에 이것을 계수하여 각도를 측정한다. 측정범위도 넓고 매우 정밀하지만 각도의 분해도를 높이기 위해서는 판독 격자판의 신호처리를 더 추가해야 하며, 스케일 판의 슬릿열을 증가 시켜야 하기 때문에 복잡하고 고가이다 [6]. 군사 분야 및 현대단말장치에 사용되고 있는 관성센서(inertial sensor)의 경우 자세나 위치를 추정할 수 있는 장점이 있지만 노이즈 제거, 파라미터 오차보상, 온도 드리프트 보상 등의 각종 신호 처리 기술들이 따라야 한다는 단점이 있다[7].

본 연구에서는 크기가 작고 가벼우며 가격이 저렴한 광섬유와 광 다이오드를 사용하여 각도를 측정 할 수 있는 시스템을 연구 하였다. 빛을 이용하여 각도에 따른 빛의 미세한 양의 차이로 각도를 정밀하게 출력할 수 있도록 민감도가 높은 광 다이오드를 사용하여 디자인하고 기초 데이터를 얻었다. 광섬유 자체를 굽히거나 파손시켜 빛의 손실 양으로 데이터를 얻는 방법이 아닌 [8-9], 발광부와 수광부의 위치를 변경하여 서로 다른 센서에서 받아들이는 광량의 차이를 이용하여 각도를 검출 할 수 있는 시스템을 구성하였다. 궁극적인 목표는 광 다이오드를 다양한 형태로 구성하여 광량의 차이를 분석하여 모델링하고, 새로운 각도 측정 방법으로써의 정밀도를 평가해 보았다. 고안한 시스템을 실제 각도 측정에 적용한다면 사용자가 보다 정확하고 간편하게 각도를 검출해 낼 수 있는 장점이 있다.

* Corresponding Author : Dept. of Biomedical Engineering,
BK21 Plus Research Institute of Biomedical Engineering,
College of Biomedical and Health Science, Konkuk University,
Korea.

E-mail: jjun81@kku.ac.kr

* Dept. of Biomedical Engineering, BK21 Plus Research
Institute of Biomedical Engineering, College of Biomedical and
Health Science, Konkuk University, Korea.

Received : February 03, 2015; Accepted : March 30, 2015

2. 본 론

2.1 광섬유의 특성

Snell's Law는 굴절률 n_1, n_2 의 두 매질의 경계면상의 입사하는 빛의 입사각(θ_i)과 굴절각(θ_r)사이에는 $n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_r$ 의 관계를 나타내는 법칙이다. 일반적으로 굴절률이 큰 매질에서 굴절률이 작은 매질로 진행하면 경계면에서 일부는 투과해 나가고 일부는 반사된다. 그러나 입사각을 점점 증가시키면 특정한 각(θ_c) 이상이 되었을 때 투과하는 빛은 전혀 없고 전부 경계면에서 반사된다. 이것을 전반사(Total Internal Reflection)라고 한다. 이러한 원리를 이용하여 광섬유는 그림 1과 같이 코어 부분의 굴절률(n_{core})이 클래딩의 굴절률($n_{cladding}$)보다 높게 되어 있어서, 빛이 코어 부분에 집속되어 빛이 잘 빠져나가지 않고 손실 없이 진행할 수 있게 되어 광 신호를 효율적으로 전달 할 수 있다.

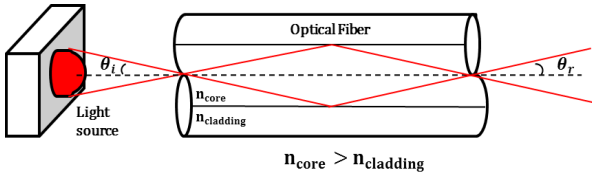
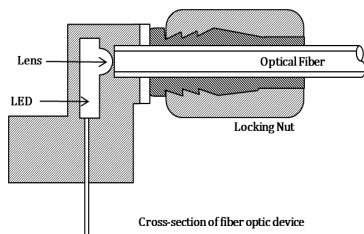


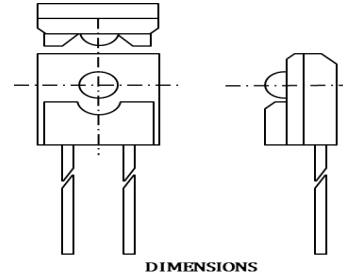
그림 1 광섬유에서의 전반사
Fig. 1 Total Internal Reflection in the optical fiber

2.2 실험 재료

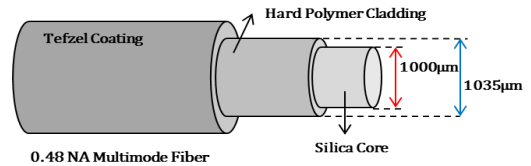
그림 2는 각각 본 실험에 사용된 발광부인 광원, 수광부인 광다이오드와 빛을 전달하는 광섬유이다. 그림 2 (a)는 실험에 사용된 광원인 IF-E96(Plastic Fiber Optics Red LED)으로 약 660 nm에서 peak wavelength를 가진다. 그림 2 (b)는 수광부로 사용된 광 다이오드(ST-23G, Kodenshi)로 500 ~ 1050 nm의 spectral sensitivity와 $\pm 30^\circ$ 의 half angle을 가진다. 수광부로 사용된 광 다이오드의 spectral sensitivity는 발광부의 peak wavelength를 수용 할 수 있으므로 실험에 사용하기에 적당하다. 그림 2 (c)는 광섬유(BFL48-1000, Thorlabs)로 0.48의 개구수(NA: Numerical Aperture)를 가지며 코어(core)는 직경 1,000 μm , 클래딩(cladding)은 직경 1,035 μm 로 coating까지 포함한 전체 직경은 1,400 μm 으로 매우 얇다.



(a) 광원 (IF-E96)



(b) 광 다이오드 (ST-23G)



(c) 광섬유 (BFL48-1000)

그림 2 실험에 사용된 소자
Fig. 2 Device used in the experiment

2.3 실험 방법

2.3.1 실험 셋업

그림 3은 본 논문에서 사용한 실험 셋업을 보여준다. 좌·우 광 다이오드(ST-23G) 센서를 중간센서에 ϕ° 로 부착하고 X-Y축의 변화가 가능한 stage에 설치한 후 회전 중심축에 위치시킨다. 광섬유는 광원(IF-E96)에 연결 한 후 각도가 표시되어 있고 회전이 가능한 rotation stage에 고정하고 중간센서와 일직선상에 있을 때의 회전 각도를 $\theta = 90^\circ$ 라 둔다. 회전 각도가 $\theta = 90^\circ$ 일 때 중간센서와 광섬유 사이의 거리를 d 라 두고 중간센서의

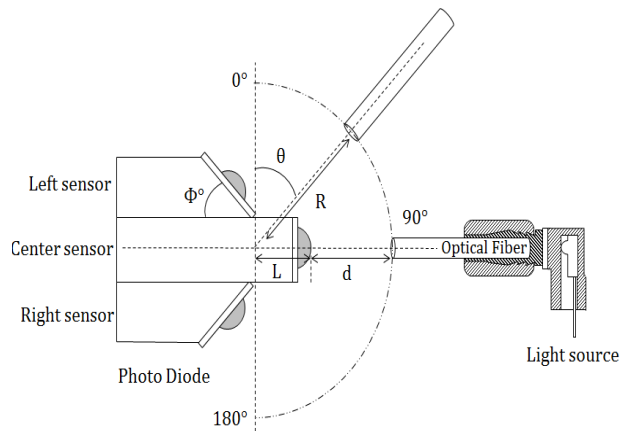


그림 3 본 논문에서 사용된 실험 셋업
Fig. 3 Experimental set-up used in this paper

돌출 거리를 L이라고 두었을 때 $d + L$ 을 회전 반경 R이라 정의하였다. 중간센서가 L만큼 돌출 되면 중간센서와 광섬유사이의 거리 d가 변하게 되고 이는 회전각도(θ)에 따라 변화하는 $d(\theta)$ 이다. 즉, 회전각도가 $0^\circ \sim 180^\circ$ 일 때 중간센서와 광섬유사이의 거리 d가 최대치이고, 90° 일 때 최저치를 갖는다.

실험에 사용된 변수는 회전반경 ($R = 8 \text{ mm} \sim 15 \text{ mm}$), 중간센서의 돌출거리 ($L = 0 \text{ mm} \sim 3 \text{ mm}$), 좌·우 센서의 부착각도($\phi = 45^\circ, 60^\circ$) 그리고 광섬유의 회전각도 ($\theta = 0^\circ \sim 180^\circ, 5^\circ$ 간격)이다. 광원에서 나온 빛은 광섬유를 통해 손실 없이 전송되고, 회전각도마다 세 개 센서에서의 광 출력신호(V) 변화를 LabVIEW(National Instruments)를 통해 실시간으로 측정하였다.

2.3.2 역변환 모델링 및 실시간 각도 검출 방법

센서에 수광되는 광량의 변화로 각도를 측정하기위해 MATLAB을 사용하여 세 개의 광 다이오드의 출력신호에 대해 모델링하였다. 각도 검출방법은 역변환 방법을 사용하였다. 역변환 모델링(inverse mathematical model)은 계속적으로 증가하거나 감소하는 경향을 보이는 영역에서 사용이 가능하기 때문에 [10] 각 센서마다 범위를 나누어 모델링하였다. 측정되는 전압 값을 이용하여 각도를 알아내기 위해 각 범위마다 여러 다항식으로 모델링을 하고 측정하지 않은 중간 값도 추정할 수 있도록 n차 함수식을 만들었다. 역변환 식에서 x는 전압 값을 의미하고 y는 각도를 나타낸다. 즉, 역변환을 하여 주어진 전압 값이 각도로 환산 될 수 있도록 하였고 이로 인하여 전압 값의 미세한 변화만으로도 각도를 검출 할 수 있다.

또한 원 데이터와 모델링을 통해 얻어진 회귀식(Regression equation)의 적합도를 재는 척도인 결정계수(Coefficient of determination, R2)를 구하였다. 결정 계수는 0과 1사이 값을 가지는데 값이 1에 가까울수록 모든 데이터가 해당 수식에 근접하다는 것을 나타내고 이는 식 (1)로 구할 수 있다.

$$\frac{\sum(\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{\sum e_i^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

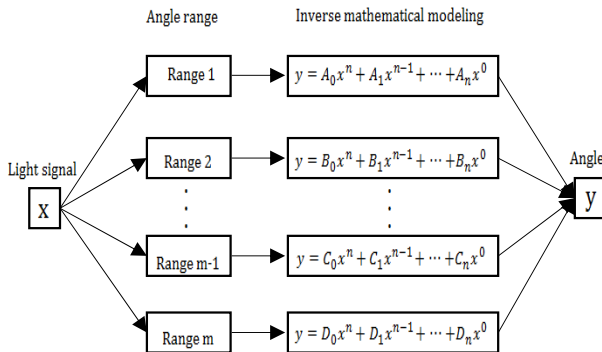


그림 4 실시간 각도 검출 방법 모식도
Fig. 4 Real-time angle measurement method

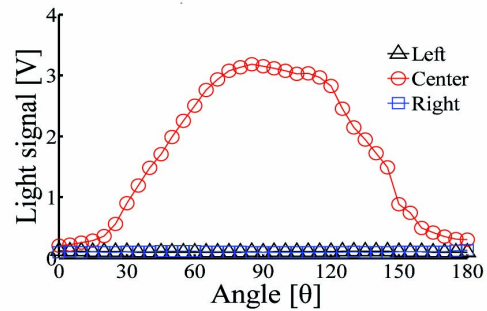
실시간으로 각도를 검출하기 위해 역변환 모델링으로 구한 n차 함수식을 LabVIEW로 연동시켰다. 각 센서의 범위에서 구한 역변환 n차 함수식을 그림 4의 방법을 사용하여 실시간으로 측정되는 전압 값을 각도로 변환하여 출력되도록 하였다.

2.4 실험결과 및 고찰

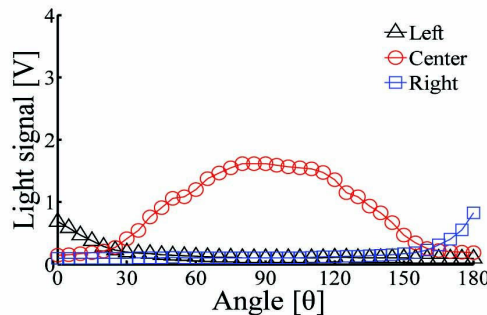
2.4.1 각도 측정 결과

그림 5는 그림 3의 실험 방법을 사용하여 중간센서의 돌출거리 $L = 0 \text{ mm}$, 좌·우 센서의 부착각도 $\phi = 45^\circ$ 에서 회전 반경 R에 따른 빔 출력 신호 결과를 보여준다.

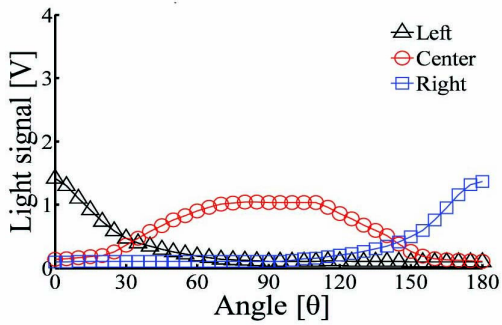
그림 5(a)는 회전반경 $R = 8 \text{ mm}$ 일 때의 결과로 회전 반경이 너무 작기 때문에 중간센서를 제외한 좌·우 센서로 빛이 들어가지 않아 출력이 나오지 않는다. 이를 보완하기 위해 그림 5(b)와 같이 $R = 10 \text{ mm}$ 로 회전 반경이 증가시킨 결과 좌·우 센서의 출력이 나오기는 하나 그 값이 미미한 것을 볼 수 있다. 좌·우 센서의 출력 향상을 위해 그림 5(c)와 같이 $R = 13 \text{ mm}$ 로 더 증가시키면 좌·우 센서의 출력은 향상되나 중간센서의 출력이 일그러짐을 확인하였다. 그러나 그림 5(d)와 같이 $R = 15 \text{ mm}$ 로 회전반경이 더 커진 결과 중간 센서의 출력은 큰 변화가 없지만 좌·우 센서의 출력 peak가 그림 5(c)보다 감소하는 것을 볼 수 있다. 그림 5(c)의 경우 좌·우 센서의 출력의 peak가 1.4 V이고, 그림 5(d)의 경우 peak가 0.8 V이므로 이 조건 ($L = 0 \text{ mm}$, $\phi = 45^\circ$)에서는 회전반경 R이 13 mm일 때가 최적이라 판단된다.



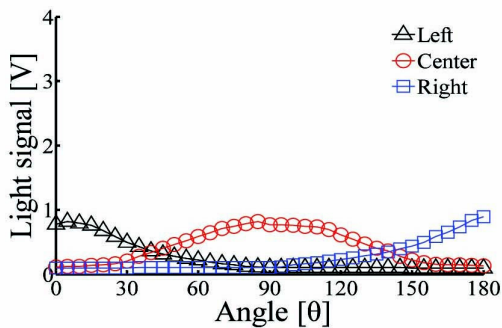
(a) R=8mm



(b) R=10mm



(c) R=13mm



(d) R=15mm

그림 5 L = 0 mm, $\phi = 45^\circ$ 일 때, 회전반경 R에 따른 빔 출력 형상

Fig. 5 Output beam shape according to the rotation radius (R) when L = 0 mm, $\phi = 45^\circ$

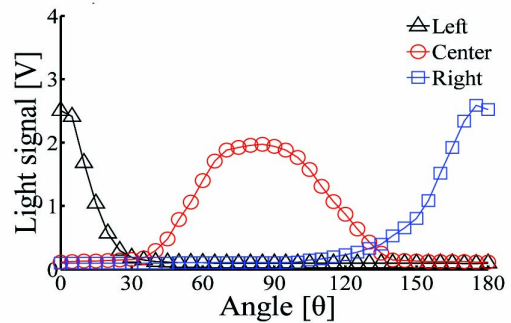
그림 6은 그림 5(c)에서 중간 센서의 출력이 가우시안 빔 형태를 이루지 않고 약 $80^\circ \sim 110^\circ$ 구간에서 광 출력 신호에 따른 각도를 검출할 수 가 없는 점을 보완하기 위해 그림 3에서 회전반경(R)을 13 mm로 고정하고 중간센서를 L만큼 돌출시킨 후, 좌·우 센서의 부착 각도에 따른 빔 출력 형상을 확인하기 위해 좌·우 센서의 부착각도(ϕ)를 변형시켰을 때의 결과 그래프이다.

그림 6(a)와 (b)는 좌·우 센서의 부착각도가 $\phi = 45^\circ$ 일 때 로 그림 6(a)는 돌출거리가 L = 1.5 mm이고 그림 6(b)는 돌출거리가 L = 3 mm일 때 결과 그래프이다. 그림 6(a)와 (b)에서 볼 수 있듯이, 같은 부착각도($\phi = 45^\circ$)일 때, 돌출거리(L)가 1.5 mm일 때 보다 3 mm일 때 중간 센서의 출력이 가우시안 빔과 유사한 형태를 이룬다.

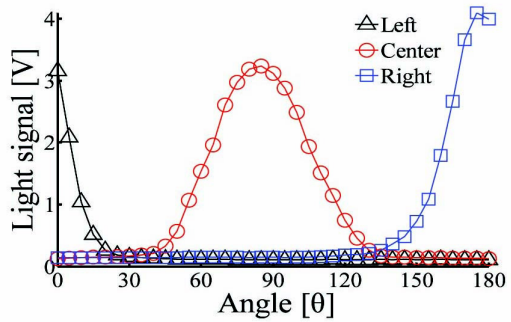
그림 6(c)와 (d)는 부착각도가 $\phi = 60^\circ$ 일 때 로 그림 6(c)는 돌출거리가 L = 1.5 mm이고 그림 6(d)는 돌출거리가 L = 3 mm일 때 결과 그래프이다. 이 결과 역시 같은 부착각도($\phi = 60^\circ$)일 때, 돌출거리(L)가 1.5 mm일 때 보다 3 mm일 때 가운데 센서의 출력이 가우시안 빔과 유사한 형태를 이루는 것을 확인할 수 있었다.

또한 그림 6(b)와 (d)를 비교하여 부착각도(ϕ)에 따른 빔 출력 형상을 보았을 때, 부착각도(ϕ)가 60° 일 때 보다 45° 일 때 세계 센서 출력의 증가영역과 감소영역이 구분되는 구간이 더 적으며 좌우 센서의 peak가 60° 일 때 보다 더 높아 각도 측정 범위가 넓어지는 것을 알 수 있다. 그림 6(b)의 경우 peak는 3 V ~ 4 V, 측정가능 범위가 $\theta = 0^\circ \sim 180^\circ$ 에서 180° 를 제외한 175° 이고, 그림 6(d)의 경우 peak는 약 1.3 V, 측정 가능 범위는 좌측 센서의 증가 부분($0^\circ \sim 15^\circ$)과 우측센서의 감소 부분($175^\circ \sim 180^\circ$)을 제외한 $\theta = 15^\circ \sim 170^\circ$ 로 155°의 그림 6(b)의 175° 보다 좁은 측정범위를 가진다.

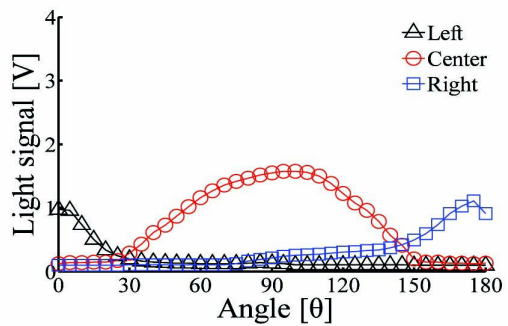
최종적으로 그림 6(b)와 같이 회전 반경 R = 13 mm 이고 돌출거리는 L = 3 mm, 부착각도는 $\phi = 45^\circ$ 일 때, 가운데 센서 출력의 해상도가 좋으며 측정범위가 넓어져 각도를 측정하는데 가장 적합하다.



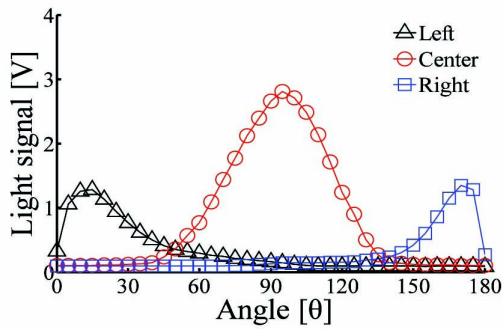
(a) $\phi=45^\circ$, L=1.5mm



(b) $\phi=45^\circ$, L=3mm



(c) $\phi=60^\circ$, L=1.5mm



(d) $\phi=60^\circ, L=3\text{mm}$

그림 6 돌출거리(L)와 부착 각도(ϕ)에 따른 빔 출력 형상
Fig. 6 Output beam shape according to the projected distance(L) and attached angle(ϕ)

2.4.2 역변환 모델링을 이용한 실시간 각도 검출 결과

전압 값(V)으로 각도(θ)를 검출하기 위해 역변환 방법을 사용하였다. 역변환 모델링은 계속적으로 증가하거나 감소하는 경향을 보이는 영역에서 사용이 가능하기 때문에 그림 7과 같이 센서마다 범위를 나누어 모델링을 하였다. 이때, 최적의 측정범위와 해상도, 높은 전압 값을 가지는 그림 6 (b)의 조건 $R = 13 \text{ mm}$, $L = 3 \text{ mm}$, $\phi = 45^\circ$ 를 선택하였다. 각 센서의 범위는 (a)는 좌측 센서로 $\theta = 0^\circ \sim 35^\circ$, (b)와 (c)는 중간 센서로 (b)는 증가 영역인 $\theta = 40^\circ \sim 80^\circ$, (c)는 감소 영역인 $\theta = 85^\circ \sim 130^\circ$, (d)는 우측 센서로 $\theta = 135^\circ \sim 175^\circ$ 이다. 영역 (d)의 경우 175° 까지는 계속적으로 증가하나 180° 의 경우 감소하고 데이터 개수가 하나이므로 모델링에서 제외하였다.

그림 8은 측정되는 미세한 전압 값(V) 차이를 이용하여 각도를 알아내기 위해 각 센서의 측정 가능 범위(그림 7의 a ~ d)마다 여러 다항식으로 모델링을 하고 측정하지 않은 중간 값도 추정할 수 있도록 n차 함수식을 구한 결과를 보여준다. 또한 모델링 결과 얻어진 원 데이터와 모델링을 통해 얻어진 회귀식의 적합도를 재는 척도인 결정계수(R^2)는 각각 (a) $R^2 = 0.9999$, $p <$

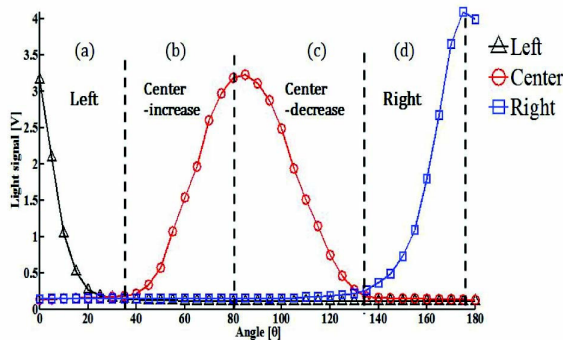
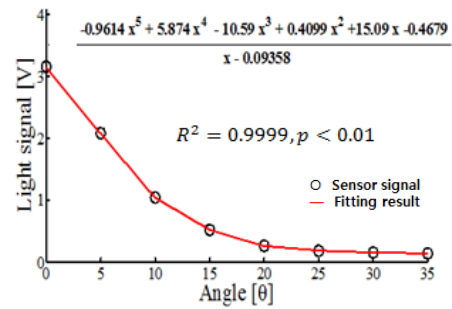
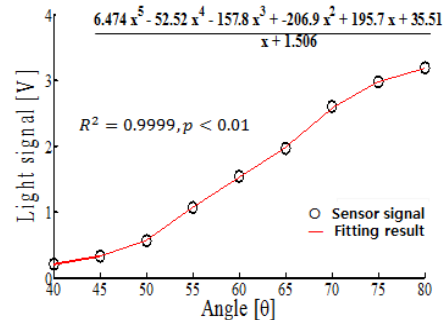


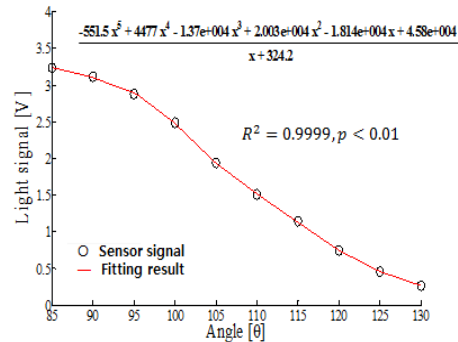
그림 7 모델링 구간 설정
Fig. 7 Modeling section set



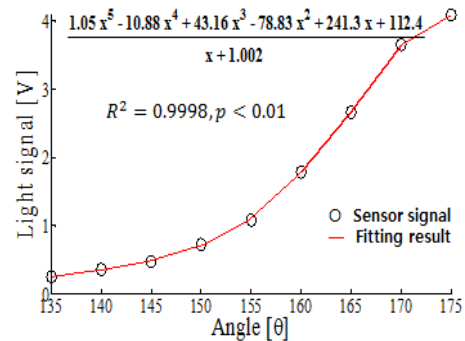
(a) 좌측 센서 모델링



(b) 중간센서(증가영역) 모델링



(c) 중간센서(감소영역) 모델링



(d) 우측 센서 모델링

그림 8 $R = 13 \text{ mm}$, $L = 3 \text{ mm}$, $\phi = 45^\circ$ 일 때, 각 센서에 대한 역변환 모델링

Fig. 8 Inverse mathematical modeling for each sensor when $R = 13 \text{ mm}$, $L = 3 \text{ mm}$, $\phi = 45^\circ$

0.01, (b) $R^2 = 0.9999$, $p < 0.01$, (c) $R^2 = 0.9999$, $p < 0.01$, (d) $R^2 = 0.9998$, $p < 0.01$ 로 매우 높게 나타나 통계적으로 유의함을 알 수 있다.

그림 9는 광섬유를 이용한 각도측정의 정확성을 검증하기 위한 것으로 실험 셋업에 사용된 Rotation stage에 표시된 기준각도와 LabVIEW에 모델링으로 구한 n차 함수식을 연동해서 실시간으로 출력되는 계산된 각도를 보여준다. 각도 측정이 가능한 $0^\circ \sim 175^\circ$ 범위 내에서 기준각도와 출력되는 각도의 상관관계는 $R^2 = 0.9999$, $p < 0.01$ 로 높은 유의성을 보이므로 본 논문에서 사용한 방법을 이용하여 각도를 검출 할 수 있다는 것을 알 수 있다.

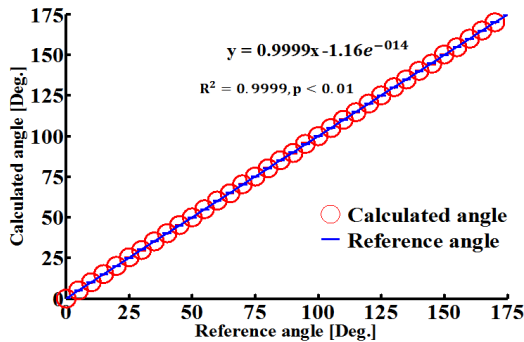


그림 9 기준 각도와 LabVIEW 출력 각도 비교
 Fig. 9 Compare the reference angle and calculated angle

3. 결 론

기존의 각도 측정 방법들은 주관적 판단, 마모, 크기, 비용, 신호처리의 어려움 등의 단점이 존재한다. 본 논문에서는 기존 각도 측정 방법의 단점들을 보완할 수 있는 새로운 측정 기술을 제시하였다. 이를 위해 크기가 작고 가벼우며 전기저항의 마모가 없고 비교적 가격이 저렴한 광섬유와 각도에 따른 빛의 미세한 양의 차이로 세부 각도를 출력할 수 있도록 빛에 민감도가 높은 광 다이오드를 사용하였다. 또한 사용자가 보다 쉽게 사용할 수 있도록 역변환 모델링으로 구한 n차 함수식을 LabVIEW에 연동하여 측정되는 광 출력 신호를 실시간으로 각도로 검출 되도록 구성 하였다. 측정 범위를 넓게 잡기 위하여 광 신호를 받는 광 다이오드를 세 개를 사용하였으며 이 센서들 간의 위치와 부착각도, 광섬유와의 거리 조합으로 출력 해상도를 좋게 하고 측정 범위를 넓힘으로써 각도를 측정하기 쉽게 하였다. 결과적으로 중간 센서가 다른 센서에 비해 돌출되면 가우시안 빔과 유사한 형태를 이루고, 좌·우 센서의 부착 각도가 작을수록 측정 범위가 향상됨을 확인하였다. 본 논문에서 실험을 통해 얻어진 최적의 조건 $R = 13 \text{ mm}$, $L = 3 \text{ mm}$, $\phi = 45^\circ$ 의 결과를 사용하여 모델링을 하였고, 그 결과 각도 측정 범위는 $0^\circ \sim 175^\circ$ 로 총 175° 의 넓은 범위를 가진다. 또한 LabVIEW에 실시간으로 출력되는 전압 값 신호로부터 각도를 측정할 수 있도록 역변환의 n차식을 연동하여 측정된 결과 측정 범위 내에서 각도 측정이 가능한 것을 확인 하였다. 그러나 본 논문의 방법으로는 175° 까지만 모델링

이 가능하며 측정된 광 출력신호를 역 모델링을 한 후, LabVIEW에 연동하여 각도를 측정하기 때문에 광 출력 신호만으로 각도를 측정하기는 어렵다. 또한 각도 측정을 필요로 하는 분야에 실제로 적용하기 위한 디자인이 추가적으로 필요하다.

차후 연구에서는 좀 더 다양한 센서들의 조합, 센서의 개수 증가, 광섬유와 센서와의 거리 변화 등에 대한 연구를 수행하여 각도 측정 범위와 해상도를 향상 시키고 더욱 간단하고 정확한 모델링 역변환식을 소프트웨어에 대입하여 추가적 처리 없이 실시간으로 각도를 측정 할 수 있는 프로그램을 구성하여 사용자가 보다 편리하게 할 수 있도록 구축할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2010-0023158).

References

- [1] Al-Abdulwahab SS, Al-Dosry RD, "Hallux valgus and preferred shoe types among young healthy Saudi Arabian females," Ann Saudi Med, vol. 20 no. 3-4, pp. 319-321, 2000.
- [2] D. B. Chaffin, G. Andersson, and B. J. Martin, "Occupational Biomechanics," 4th edition, New York:Wiley & Sons, 2006.
- [3] L. Tesio, M. Monzani, R. Gatti, and F. Franchignoni, "Flexible electro goniometers: kinesiological advantages with respect to potentiometric goniometers," Clinical Biomechanics, vol. 10, no. 5, pp. 275-277, 1995.
- [4] A. Shiratsu and H. J. C. G. Coury, "Reliability and accuracy of different sensors of a flexible electrogoniometer," Clinical Biomechanics, vol. 18, no. 7, pp. 682-684, 2003.
- [5] S. H. Nam, G. M. Baek, W. S. Jung, "Calibration System for Angular Vibration Using Precision Rotary Encoder," Acoustical Society of Korea, vol. 33, no. 1, pp. 31-39, 2014.
- [6] S. H. Lee, "Development of a High-Resolution Encoder System Using Dual Optical Encoders," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, vol. 24, no. 9, pp. 76-85, 2007.
- [7] H. J. Kwak, J. M. Hwang, J. H. Kim, G. T. Park, "Development and Application of Three-axis Motion Rate Table for Efficient Calibration of Accelerometer and Gyroscope," Journal of institute of control robotics and systems, vol. 18, no. 7, pp. 632-637, 2012.

- [8] P. Roriz, L. Carvalho, O. Frazã, J. L. Santos, and J. A. Simões, "From conventional sensors to fibre optic sensors for strain and force measurements in biomechanics applications: A review," *Journal of biomechanics*, vol. 47, no. 6, pp. 1251-1261, 2014.
- [9] S. G. Kim, S. H. Shin, D. Jeon, S. H. Hong, H. I. Sim, K. W. Jang, W. J. Yoo, B. Lee, "Fiber-optic Goniometer to Measure Knee Joint Angle for the Diagnosis of Gait Disturbance," *The Transactions of KIEE*, vol. 62, no. 7, pp. 1009-1013, 2013.
- [10] G. I. Jung, J. S. Kim, D. H. Hur, H. D. Yu, S. H. Lim, J. H. Choi, J. H. Lee, G. M. Eom, and J. H. Jun, "Angular Displacement Measurement Using Optical Sensor," *The Transaction of KIEE*, vol. 60, no. 10, pp. 1959-1965, 2011.

저 자 소 개



김 아 희(A-Hee Kim)

2014년 건국대학교 의학공학부 졸업.
2014년 ~ 현재 동대학원 석사과정 재학 중.



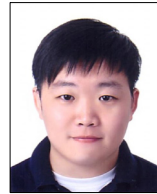
김 지 선(Ji-Sun Kim)

2009년 건국대학교 의학공학부 졸업.
2011년 동대학원 석사
2011년 ~ 현재 동대학원 박사과정 재학 중.



오 한 별(Han-Byeol Oh)

2014년 건국대학교 의학공학부 졸업.
2014년 ~ 현재 동대학원 석사과정 재학 중.



김 준 식(Jun-Sik Kim)

2015년 건국대학교 의학공학부 졸업.
2015년 ~ 현재 동대학원 석사과정 재학 중.



고 봉 준(Bong-Jun Goh)

2015년 건국대학교 의학공학부 졸업.
2015년 ~ 현재 동대학원 석사과정 재학 중.



이 은 숙(Eun-Suk Lee)

2015년 건국대학교 의학공학부 졸업.
2015년 ~ 현재 동대학원 석사과정 재학 중.



정 현 철(Hyon-Chel Jung)

2014년 건국대학교 의학공학부 졸업.
2014년 ~ 현재 동대학원 석사과정 재학 중.



최 주 현(Ju-Hyeon Choi)

2013년 건국대학교 의학공학부 졸업.
2015년 동대학원 석사



백 진 영(Jin-Young Baek)

2012년 ~ 현재 건국대학교 의학공학부 재학 중.



전 재 훈(Jae-Hoon Jun)

1986년 고려대학교 화학공학과 졸업.
1993년 Ms, chemical Eng., Texas A&M University, USA, 2001년 Ph.D., Biomedical Eng., Texas A&M University, USA, 2001년 ~ 2004년 Research Associate, Biomedical Eng., VCU(MCV campus), USA.
2004년 ~ 현재 건국대학교 의학공학부 교수.