

인간형 로봇의 지능형 발의 발가락 및 뒤꿈치 힘센서 개발

Development of Force Sensors of Toes and Heel for Humanoid Robot's Intelligent Foot

김갑순^{1,✉}

Gab Soon Kim^{1,✉}

1 경상대학교 제어계측공학과 (ERI, Department of Control and Instrumentation Engineering, Gyeongsang National Univ.)

✉ Corresponding author: gskim@gsnu.ac.kr, Tel: 055-751-5372

Manuscript received: 2009.12.18 / Accepted: 2010.7.13

In order to let the humanoid robot walk on the uneven terrains, the robot's foot should have the similar structure and function as human's. The intelligent foot should be made up of toes and heel. When it walks on the uneven terrains, the foot's sole senses the force and adjusts foot's position before robot losing his balance. In this paper, the force sensors of robot's intelligent foot for having the similar structure and function like human are developed. The heel 3-axis force/moment sensor and toe force sensors for humanoid robot's intelligent foot is developed, and the characteristic tests of them are carried out. As a result of characteristic test, the interference error of the heel 3-axis force/moment sensor is less than 2.2%. It is thought that the developed force sensors could be used to measure the reaction forces which is applied the toes and the heel of a humanoid robot.

Key Words: Toe Force Sensor (발가락 단축 센서), Heel 3-Axis Force/moment Sensor (뒤꿈치 3축 힘/모멘트센서), Interference Error (상호간섭오차), Rated Output (정격출력), Robot's Intelligent Foot (로봇 지능형 발)

1. 서론

사람은 불규칙한 지면, 계단 등과 같은 지면에 서 걸거나 떨어질 때 자율신경에 의해 몸의 균형을 잃기 전에 발목을 사방으로 회전하여 발바닥의 대부분의 면이 지면과 접촉한다. 인간형 로봇이 사람과 같이 안전하게 걷기 위해서는 사람의 발과 비슷한 구조와 기능을 가져야 한다. 현재 로봇 선진국에서는 두발로 걷는 여러 종류의 인간형 로봇을 개발하였다. 논문¹의 인간형 로봇은 지면의 상태를 시각적으로 판단하여 평지 및 낮은 경사의 평지, 계단 등에서 자유롭게 걸거나 떨어질 수 있는 가장 지능화되었고, 논문^{2,4}은 간단한 물체를 드는 일을 하거나 네트워크로 연결되어 상호협조 할 수 있고, 평지에서 걸거나 천천히 떨어질 수 있는 정도의 기능

을 가지고 있다. 이와 같이 현재까지 개발된 인간형 로봇은 사람과 같이 불규칙한 지면 등 좋지 않은 지면에서 안전하게 걸을 수 없다.

인간형 로봇이 불규칙한 표면을 포함한 다양한 지면에서 안전하게 걸거나 뛰기 위해서는 로봇의 발이 사람과 같이 발의 뒤꿈치(heel)와 발가락(toe)으로 구성되어야 하고, 뒤꿈치와 발가락의 바닥에 작용되는 힘과 모멘트를 측정할 수 있는 다축 힘/모멘트센서(multi-axis force/moment sensor) (x, y, z방향의 힘 Fx센서, Fy센서, Fz센서와 모멘트 Mx센서, My센서, Mz센서, 총 6개의 센서 중 2개 이상이 조합된 센서)가 부착되어야 한다.

인간형 로봇의 발바닥에 부착되는 다축 힘/모멘트센서는 인간형 로봇의 전체 무게, 좌우측과 전후측 방향의 모멘트(Mx, My)의 용량(capacity), 크

기 등이 고려되어 설계되어야 하고, 그것의 상호 간섭오차(힘 혹은 모멘트가 가해지는 센서 이외의 센서에서 출력되는 오차)가 3%이내로 매우 낮아야 한다. 현재 개발된 다축 힘/모멘트센서⁵⁻⁷ 중 논문⁵은 지능형 발에 장착하기 위해 개발한 6축 힘/모멘트센서이고, 이것은 로봇발의 앞꿈치와 뒤꿈치에 부착되므로 인간형 로봇의 두발에는 총 4개의 6축 힘/모멘트센서가 필요하다. 이것의 총 센서 수가 24개이므로 실제 활용에 있어서 측정 및 제어 시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 그리고 그밖에 개발된 6축 힘/모멘트센서^{6,7}는 인간형 로봇발을 위해 설계되지 않았으므로 크기와 각 방향의 힘과 모멘트센서 용량이 적합하지 않아 지능형 발에 활용하기는 매우 어렵다.

실제로 인간형 로봇의 발바닥에 가해지는 힘과 모멘트가 로봇의 무게방향의 힘 F_z 와 발의 중심축을 기준으로 좌우측의 모멘트를 측정하는 모멘트 M_y , 전후측의 모멘트를 측정하는 모멘트 M_x 이므로 이것들을 측정하기 위한 힘 F_z 센서, 모멘트 M_x 센서, 모멘트 M_y 센서로 구성된 3축 힘/모멘트센서가 필요하다. 그리고 발가락에는 위에서 누르는 힘을 측정하는 단축 힘센서가 필요하다.

본 논문에서는 뒤꿈치 3축 힘/모멘트센서와 발가락 단축 힘센서를 개발한다. 이를 위해 뒤꿈치 3축 힘/모멘트센서와 발가락 단축 힘센서의 구조를 모델링하고, 이 센서들을 설계 및 제작하며, 특성평가를 실시한다.

2. 발가락이 부착된 지능형 발의 제어원리

본 논문에서는 사람의 발과 비슷한 기능을 가지는 인간형 로봇의 지능형 발을 구성하기 위해 뒤꿈치에 부착되는 뒤꿈치 3축 힘/모멘트센서와 발가락에 부착되는 2개의 발가락 단축 힘센서를 개발한다. 이를 위해 2개의 발가락과 1개의 뒤꿈치로 구분되는 인간형 로봇의 지능형 발을 Fig. 1과 같이 가상으로 구성한다. 지능형 발은 발가락 단축 힘센서(toe force sensor)가 부착된 2개의 발가락, 뒤꿈치 3축 힘/모멘트센서가 부착된 뒤꿈치, 4개의 직선운동기구(linear moving structure), 다리 등으로 구성된다. Fig. 1의 (a)는 지능형 발이 장애물(obstacle)을 발가락으로 밟았을 때 발가락의 단축 힘센서가 장애물을 감지하여 제어함으로써 다리의 균형을 유지한 채 안전하게 제어된 모습, (b)는 뒤꿈치의 뒷부분으로 장애물을 밟았을 때 3축 힘/모

멘트센서의 모멘트 M_x 센서가 장애물을 감지하여 제어한 모습, (c)는 뒤꿈치의 좌측부분으로 장애물을 밟았을 때 3축 힘/모멘트센서의 모멘트 M_y 센서가 장애물을 감지하여 제어한 모습을 각각 나타내고 있다. 이와 같이 장애물이 발바닥에 먼저 접촉되는 부분을 발가락 단축 힘센서 혹은 뒤꿈치 3축 힘/모멘트센서가 감지하여 다리의 균형을 유지한 상태로 뒤꿈치와 발가락만 빠르게 제어하여 안전하게 걷는 원리이다.

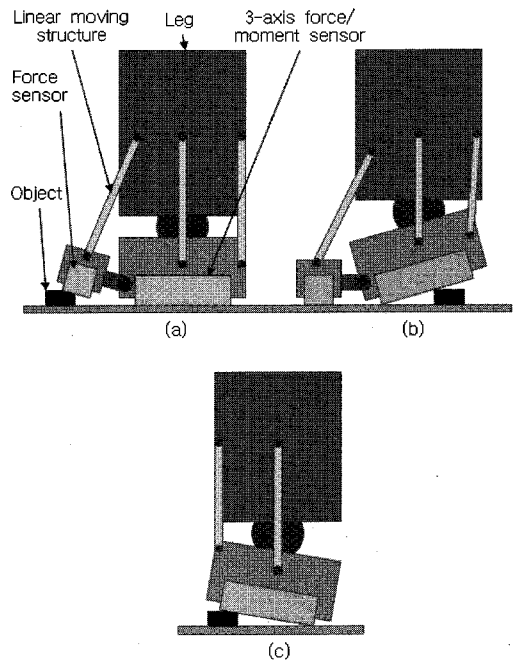


Fig. 1 Control principle of humanoid robot's intelligent foot with toes

3. 발바닥 힘/모멘트감지를 위한 힘센서 개발

3.1 뒤꿈치 3축 힘/모멘트센서의 설계 및 제작
3.1.1 뒤꿈치 3축 힘/모멘트센서 구조

Fig. 2는 뒤꿈치 3축 힘/모멘트센서의 구조를 나타내고 있고, 힘 F_z , 모멘트 M_x , M_y 를 동시에 측정할 수 있으며, 3개의 센서를 제작할 수 있는 감지부가 한 몸체로 구성되어 있다. 센서는 고정링(F1)위에 4개의 고정블록(F2~F5)이 수직으로 부착되어 있고, 4개의 고정블록 위에 평행평판보(PPB1~4)의 한쪽 끝이 고정되어 있으며, 평행평판보(PPB : parallel plate beam)들의 다른 쪽 끝은 힘전달블록(M1)에 십자형으로 고정되어 구성되었다.

평행평판보는 힘 F_z 와 모멘트 M_x, M_y 를 감지하는 센서의 감지부(sensing element)이고, 힘 F_z 센서의 감지부는 PPB2와 3, 모멘트 M_x 센서의 감지부는 PPB1과 4, 모멘트 M_y 센서의 감지부는 PPB2와 3이며, 평행평판보의 두께(t), 길이(l), 폭(b)는 센서의 설계변수로 사용된다. 3축 힘/모멘트센서는 고정링을 고정하고 이동블록에 힘과 모멘트를 가하면 3개의 센서가 그것들의 양을 감지한다.

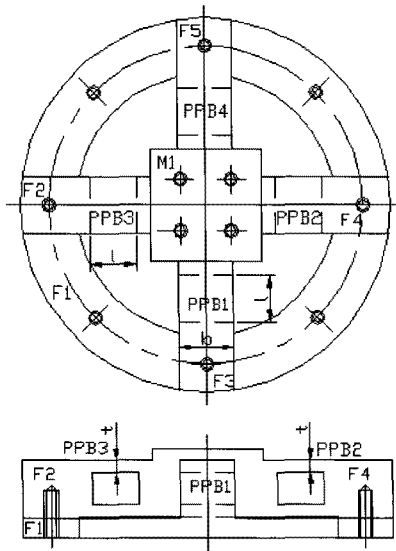


Fig. 2 Structure of 3-axis force/moment sensor

3.1.2 뒤꿈치 3축 힘/모멘트센서 설계 및 분석

뒤꿈치 3축 힘/모멘트센서를 설계하기 위해 유한요소법(FEM : Finite Element Method)을 적용하였으며, 사용된 소프트웨어는 ANSYS이다. 설계변수는 각 센서의 최대변형률(maximum strain), 힘 F_z 센서, 모멘트 M_x 센서와 M_y 센서의 용량, 평행평판보의 크기인 보의 두께 t 와 길이 l , 이동블록의 크기와 센서의 전체 크기 등이다. 센서의 최대변형률(각 센서의 최대용량(maximum capacity)을 가했을 때 4개의 스트레인지지를 이용하여 휘스톤브리지를 구성하였을 때 변형률의 합)은 일반적인 센서와 같이 $1000\mu\text{m}/\text{m}$ 로 결정하였다. 힘 F_z 센서의 용량은 인간형 로봇의 무게 약 50kg 과 안전성을 고려한 여유 무게 약 20kg 을 추가하여 약 700N , 모멘트 M_x 센서와 M_y 센서의 용량은 약 50kg 의 로봇 무게 25kg 이 뒤꿈치의 중심으로부터 0.02m 떨어진 위치에 작용되는 모멘트 5Nm 와 안전성을 고려한 여유 모멘트 약 3Nm 를 추가하여 약 8Nm

로 결정하였다. 그리고 힘전달블록의 크기를 $20\text{mm}\times 20\text{mm}$, 센서의 전체 크기를 지능형 로봇의 발의 크기를 고려하여 직경 80mm , 높이 19mm 로 결정하였고, 감지부의 크기인 폭(b)는 센서의 크기를 고려하여 12mm 로 결정하였다.

감지부의 크기인 두께 t 와 길이 l 의 크기를 결정하기 위해 결정된 설계변수들을 소프트웨어에 대입하여 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 3은 유한요소해석(FEM analysis)을 위해 매쉬(mesh)한 모습을 보여주고 있고, Fig. 4는 힘 F_z 를 700N 가했을 때 변형된 모습, Fig. 5는 모멘트 M_x (혹은 M_y)를 8Nm 가했을 때 변형된 모습을 각각 나타내고 있다. 유한요소 해석결과, 감지부의 크기인 두께 t

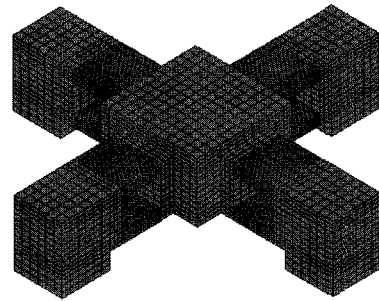


Fig. 3 Mesh shape for FEM analysis

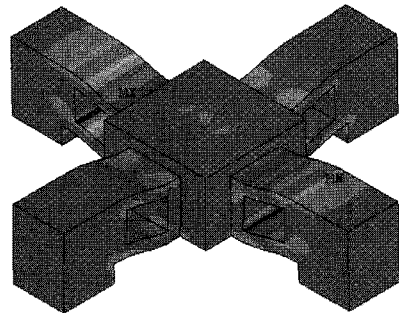


Fig. 4 Deformed shape under force F_z

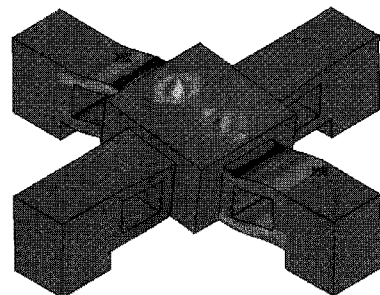


Fig. 5 Deformed shape under moment M_x (or M_y)

와 길이 l은 각각 2.5mm와 10mm로 결정되었다.

휘스톤브리지를 구성하였을 경우 4개의 스트레인게이지 부착위치에서의 변형률을 계산하는 식은 다음과 같다.⁵

$$\epsilon = \epsilon_{T1} - \epsilon_{C1} + \epsilon_{T2} - \epsilon_{C2} \quad (1)$$

여기서, ϵ 은 휘스톤브리지로부터 출력되는 변형률, ϵ_{T1} 은 인장 스트레인게이지(T_1)로부터 출력되는 변형률, ϵ_{C1} 은 압축 스트레인게이지(C_1)로부터 출력되는 변형률, ϵ_{T2} 은 인장 스트레인게이지(T_2)로부터 출력되는 변형률, ϵ_{C2} 은 압축 스트레인게이지(C_2)로부터 출력되는 변형률이다.

Fig. 6은 힘 $Fz=700N$ 이 가해질 때의 3축 힘/모멘트센서의 유한요소 해석 결과인 변형률분포를 나타내고 있다. 평행평판보의 윗면과 아랫면의 변형률분포(strain distribution)는 고정블록에 가까운 부분보다 이동블록에 가까운 부분에서 더 크게 나타났고, 이로 인해 변형률이 0인 지점이 고정블록 쪽으로 약 0.5mm 치우친 지점인 약 4.5mm 지점이며, 이동블록과 고정블록과 고정된 지점의 변형률은 감소하는 경향이 보인다. 이것은 유한요소해석의 끝 효과 때문이다. Fz 센서의 스트레인 게이지 부착위치는 스트레인게이지의 크기(3mm×5.2mm)를 고려하여 보의 길이 방향으로 고정블록으로부터 1.5mm 지점이고 폭방향으로는 중심선상이며, 이 지점의 변형률은 284 $\mu m/m$ 이다. 이 변형률을 휘스톤브리지를 구성하였을 경우 식(1)에 의해 계산된 총 변형률은 1136 $\mu m/m$ 이고, 이것은 최대변형률로 선정한 1000 $\mu m/m$ 에 비교해보면, 13.6%의 오차를 보인다. 이와 같은 오차는 평행평판보의 가공시 보의 두께를 0.1mm보다 더 정밀하게 가공하기가 어려우므로 가공성을 고려하여 결정하였기 때문이다. 변형률이 큰 이동블록쪽으로 Fz 센서의 스트레인게이지 부착위치를 선정하지 않은 이유는 Mx 혹은 My 의 모멘트를 가했을 때 고정블록 부분보다 이동블록 부분의 변형률이 매우 크기 때문이다.

Fig. 7은 모멘트 $Mx=8Nm$ 가 가해질 때의 3축 힘/모멘트센서의 유한요소 해석 결과인 변형률분포를 나타내고 있다. 평행평판보의 윗면과 아랫면의 변형률분포는 고정블록에 가까운 부분보다 이동블록에 가까운 부분에서 더 크게 나타났고, 이로 인해 변형률이 0인 지점이 고정블록쪽으로 약 2mm 치우친 지점인 약 3mm 지점이며, 이동블록과 고정블록과 고정된 지점의 변형률은 감소하는 경

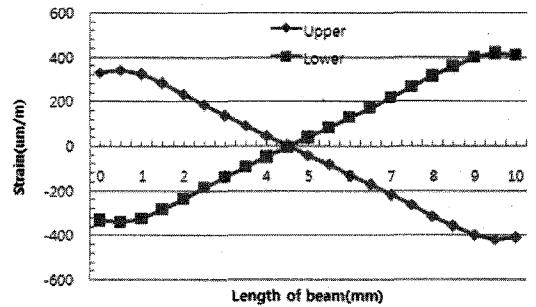


Fig. 6 Stain distribution under force $Fz=700N$

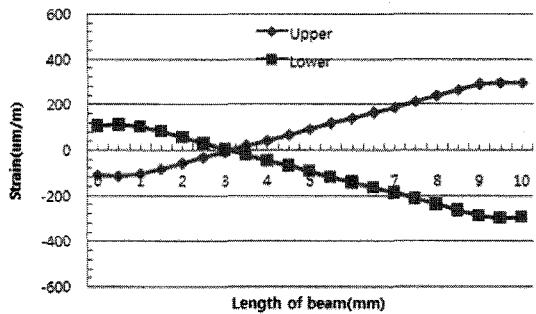


Fig. 7 Stain distribution under moment $Mx=8Nm$ (or $My=8Nm$)

향이 보인다. 이것은 유한요소해석의 끝 효과 때문이다. Mx 센서의 스트레인 게이지 부착위치는 스트레인게이지의 크기를 고려하여 보의 길이 방향으로 고정블록으로부터 1.5mm 지점이고 폭방향으로는 중심선상이며, 이 지점의 변형률은 266 $\mu m/m$ 이다. 이 변형률을 휘스톤브리지를 구성하였을 경우 식(1)에 의해 계산된 총 변형률은 1064 $\mu m/m$ 이고, 이것은 최대변형률로 선정한 1000 $\mu m/m$ 에 비교해보면, 6.46%의 오차를 보인다.

3.1.3 뒤꿈치 3축 힘/모멘트센서 제작

Fig. 8은 뒤꿈치 3축 힘/모멘트센서의 스트레인게이지 부착위치를 나타낸 것이고, 힘 Fz 센서의 부착위치는 S1~S4, 모멘트 Mx 센서는 S5~S8, My 센서는 S9~S12이다. 이것은 유한요소해석 결과를 이용하여 결정하였다. 뒤꿈치 3축 힘/모멘트센서는 각 센서의 게이지부착위치에 스트레인게이지(N2A-13-S1452-350, Micro-Measurement Company사 제작, 게이지 상수 2.03, 크기 3×5.2mm)를 순간접촉제(M-200)을 이용하여 부착하고 휘스톤브리지^{5,7}를 구성하여 제작하였으며, Fig. 9는 제작된 3축 힘/모멘트센서의 사진을 보이고 있다.

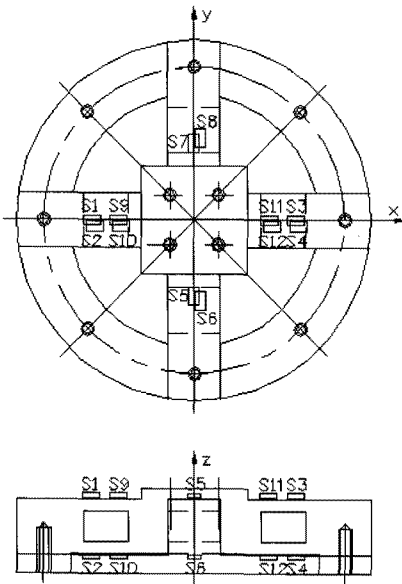


Fig. 8 Attachment locations of strain gages on sensing element of heel 3-axis force/moment sensor

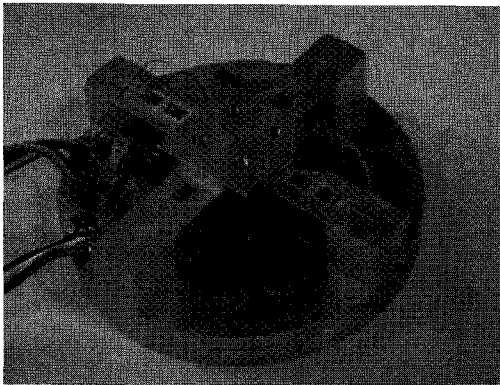


Fig. 9 Manufactured heel 3-axis force/moment sensor

3.2 발가락 단축 힘센서의 설계 및 제작

3.2.1 발가락 힘센서 구조

Fig. 10은 발가락 단축 힘센서의 구조를 나타내고 있고, 수직방향의 힘 Fz 측정한다. 센서는 고정블록(F6)옆에 1개의 평행평판보(PPB5)가 고정되어 있고, 평행평판보의 다른 쪽 끝에 이동블록(M2)가 고정되어 있다. 평행평판보는 힘 Fz을 감지하는 센서의 감지부이고, 두께(t1)와 길이(l1)은 센서의 설계변수로 사용된다. 단축 힘센서는 고정블록을 고정하고 이동블록에 힘을 가하면 센서가 그것들의 양을 감지한다.

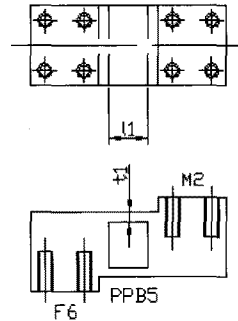


Fig. 10 Structure of force sensor

3.2.2 발가락 힘센서 설계 및 분석

발가락 단축 힘센서를 설계하기 위해 유한요소법(FEM, Finite Element Method)을 적용하였으며 사용된 소프트웨어는 ANSYS이다. 설계변수는 센서의 최대변형률, 힘 Fz센서의 용량, 평행평판보의 크기인 보의 두께 t1과 길이 l1, 센서의 전체 크기 등이다. 센서의 최대변형률은 일반적인 센서와 같이 1000um/m로 결정하였다. 힘 Fz센서의 용량은 인간형 로봇의 무게 약 50kg를 양쪽 발 2개씩의 발가락, 총 4개의 발가락이 지지한다고 가정하여 계산한 125N에 안전 모멘트 75N을 추가하여 200N으로 결정하였다. 그리고 센서의 전체크기를 40mmX16mmX19mm로 결정하였다.

감지부의 크기인 두께 t1과 길이 l1의 크기를 결정하기 위해 결정된 설계변수를 소프트웨어에 대입하여 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 11은 유한요소해석을 위해 매쉬한 모습을 보여주고 있고, Fig. 12는 힘 Fz를 200N 가했을 때 변형된 모습을 나타내고 있다. 유한요소 해석결과, 감지부의 크기인 두께 t1과 길이 l1은 각각 3.0mm와 8.0mm로 결정되었다.

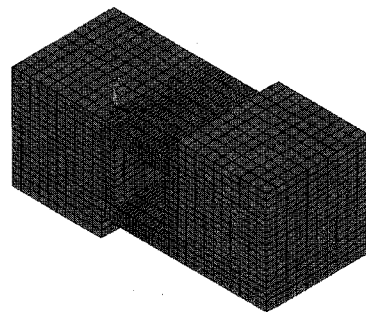


Fig. 11 Mesh shape for FEM analysis

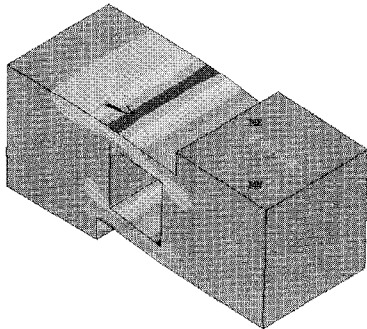


Fig. 12 Deformed shape under force Fz

Fig. 13은 힘 $F_z=200N$ 이 가해질 때의 단축 힘센서의 유한요소 해석 결과인 변형률분포를 나타내고 있다. 평행평판보의 윗면과 아랫면의 변형률분포는 고정블록에 가까운 부분보다 이동블록에 가까운 부분에서 매우 크게 나타났고, 이로 인해 변형률이 0인 지점이 고정블록쪽으로 약 1mm 치우친 지점인 약 5mm 지점이며, 이동블록과 고정블록과 고정된 지점의 변형률은 감소하는 경향이 보인다. 이것은 유한요소해석의 끝 효과 때문이다. 센서의 스트레인 게이지 부착위치는 스트레인게이지의 크기를 고려하여 보의 길이 방향으로 보의 양쪽 끝지점으로부터 1.25mm 지점이고 폭방향으로는 중심선상이며, 이동블록 부근의 보의 변형률은 $349\mu m/m$ 이고, 고정블록 부근의 보의 변형률은 $148\mu m/m$ 이다. 이 변형률을 휘스톤브리지를 구성하였을 경우 식(1)에 의해 계산된 총변형률은 $994\mu m/m$ 이고, 이것은 최대변형률로 선정한 $1000\mu m/m$ 에 비교해보면, 0.6%의 오차를 보인다. 이것은 평행평판보의 가공시 보의 두께를 0.1mm보다 더 정밀하게 가공하기가 어려우므로 가공성을 고려하여 결정하였기 때문이다.

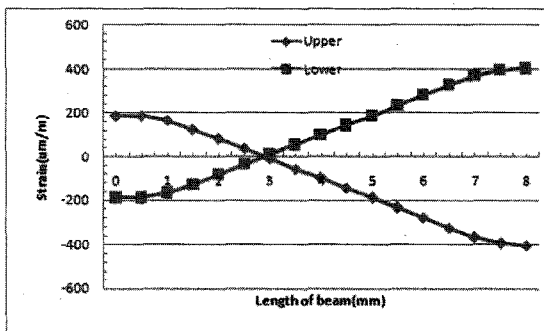


Fig. 13 Stain distribution under force Fz=200N

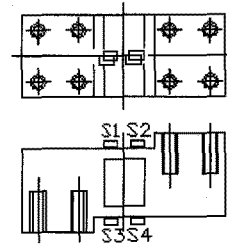


Fig. 14 Attachment locations of strain gages on sensing element of toe force sensor

3.2.3 단축 힘센서 제작

Fig. 14는 단축 힘센서의 스트레인게이지 부착 위치를 나타낸 것이며, 이것은 유한요소해석 결과를 이용하여 결정하였다. 단축 힘센서는 스트레인 게이지 부착위치에 스트레인게이지 (N2A-13-S1452-350, Micro-Measurement Company사 제작, 게이지 상수 2.03, 크기 $3 \times 5.2mm$)를 순간접촉제(M-200)을 이용하여 부착하고 휘스톤브리지^{5,7} 구성하여 제작하였으며, Fig. 15는 제작된 단축 힘센서의 사진을 보이고 있다.

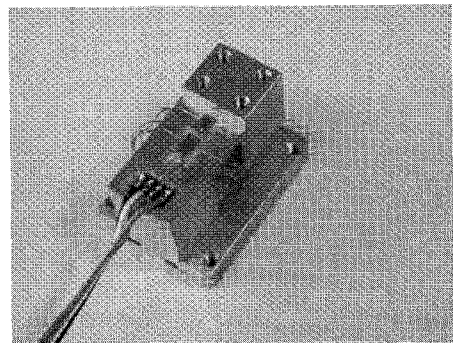


Fig. 15 Manufactured force sensor

4. 힘센서의 특성실험 및 고찰

Fig. 16은 개발한 뒤꿈치 3축 힘/모멘트센서와 2개의 발가락 단축 힘센서의 사진을 나타내고 있다. 뒤꿈치 3축 힘/모멘트센서의 특성실험은 6축 힘/모멘트센서 교정장치⁸를 이용하여 정격하중 $F_z=700N$, 모멘트 $M_x=M_y=8Nm$ 를 가하고 각 센서의 정격출력을 측정하였고, 발가락 단축 힘센서의 특성실험은 정격하중 200N을 가하고 센서의 정격출력을 측정하였으며, 총 세 번의 실험을 실시하여 평균값으로 각 센서의 정격출력을 결정하였다.

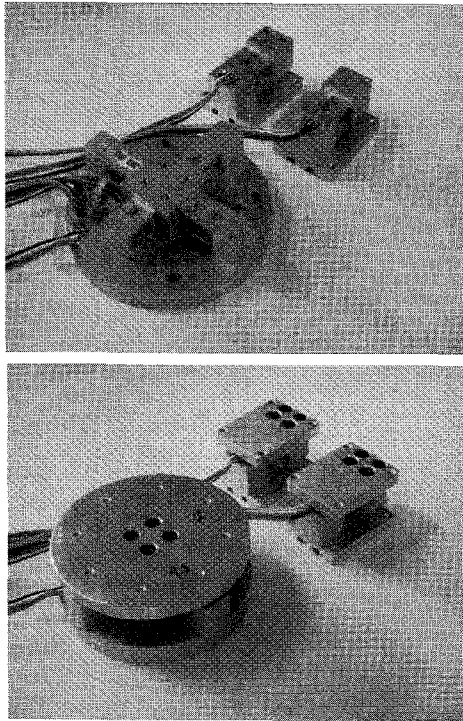


Fig. 16 Photograph of developed force sensors

정격변형률은 실험값과 비교하기 위해서는 정격출력식으로 변경되어야 하고, 그를 위한 정격출력 계산식은 다음과 같다.

$$\frac{E_o}{E_i} = \frac{1}{4} K \epsilon \quad (2)$$

여기서, E_i 는 휘스톤브리지의 입력전압, E_o 는 휘스톤브리지의 출력전압, K 는 스트레인게이지의 상수(약 2.03), ϵ 는 식 (1)로부터 얻은 총 변형률이다.

3축 힘/모멘트센서의 각 센서의 유한요소 해석한 정격출력은 각 센서의 휘스톤브리지를 구성하였을 경우의 식(1)에 대입하여 계산한 최대 변형률과 스트레인게이지의 게이지상수를 식(2)에 대입하여 계산한다. Table 1은 뒤꿈치 3축 힘/모멘트센서의 각 센서의 정격출력의 유한요소해석과 특성실험 결과를 나타내고 있다. 유한요소 해석한 결과를 기준으로 계산한 Fz센서의 정격출력 오차는 0.72% 이하이고, Mx센서는 7.46%, My센서는 7.00% 이하이었다. Table 2는 발가락 단축 힘센서의 정격출력의

유한요소해석과 특성실험 결과를 나타내고 있다. 유한요소 해석한 결과를 기준으로 계산한 힘센서1의 정격출력 오차는 3.91%, 힘센서2는 4.78% 이하이었다. Table 3은 뒤꿈치 3축 힘/모멘트센서의 상호 간섭오차를 나타내고 있고, 최대 상호간섭오차는 2.25% 이내이다. 이것은 상용화된 다축 힘/모멘트센서⁷의 상호간섭오차와 비슷하거나 우수한 것으로 평가된다. 이와 같은 정격출력 오차 및 상호간섭 오차는 감지부의 가공오차, 스트레인게이지의 부착오차 등에 의한 것으로 생각된다.

Table 1 Rated outputs from FEM and characteristic test of the heel 3-axis force/moment sensor

Force sensor	FEM(um/m)			Test(um/m)		
	Fz	Mx	My	Fz	Mx	My
Rated output (mV/V)	0.5765	0.5399	0.5399	0.5806	0.4996	0.5021

Table 2 Rated outputs from FEM and characteristic test of the toe force sensor

Force sensor	FEM(um/m)		Test(um/m)	
	Sensor1	Sensor2	Sensor1	Sensor2
Rated output (mV/V)	0.5045	0.5045	0.5242	0.5286

Table 3 Interference errors of the sensor for front-part of the sole

Sensor	Interference error (%)		
	Fz sensor	Mx sensor	My sensor
Fz=700N	-	0.62	0.92
Mx=8Nm	-2.17	-	2.25
My=8Nm	-0.55	0.48	-

5. 결론

본 연구에서는 사람의 발과 비슷한 기능을 가진 인간형 로봇의 지능형 발을 위한 뒤꿈치 3축 힘/모멘트센서와 발가락 단축 힘센서를 개발하였다.

개발한 뒤꿈치 3축 힘/모멘트센서와 발가락 단축 힘센서의 특성실험결과 정격출력이 최대 7.46% 이내이고, 뒤꿈치 3축 힘/모멘트센서의 최대 상호 간섭오차가 2.25%이내이므로 상용화된 다축센서⁷

와 비교하여 대등하게 평가되었다. 따라서 본 논문에서 개발한 뒤꿈치 3축 힘/모멘트센서와 발가락 단축 힘센서는 2개의 발가락이 부착된 인간형 로봇의 지능형 발을 위해 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 추후 연구는 본 논문에서 개발한 뒤꿈치 3축 힘/모멘트센서와 발가락 단축 힘센서를 부착한 인간형 로봇의 지능형 발을 개발하는 것이다.

후 기

이 논문은 2008 년도 정부(교육과학기술부)의 지원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R01-2006-000-10468-0).

참고문헌

1. Kanda, T., Miyashita, T., Osada, T., Haikawa, Y. and Ishiguro, H., "Analysis of Humanoid Appearances in Human-Robot Interaction," *IEEE Trans. on Robotics*, Vol. 24, No. 3, pp. 725-735, 2008.
2. Morimoto, J., Endo, G., Nakanishi, J. and Cheng, G., "A Biologically Inspired Biped Locomotion Strategy for Humanoid Robots: Modulation of Sinusoidal Patterns by a Coupled Oscillator Model," *IEEE Trans. on Robotics*, Vol. 24, No. 1, pp. 185-191, 2008.
3. Park, I. W., Kim, J. Y., Lee, J. H. and Oh, J. H., "Mechanical design of the humanoid robot platform, HUBO," *Advanced Robotics*, Vol. 21, No. 11, pp. 1305-1322, 2007.
4. Lim, H. Y., Kang, Y. S., Lee, J. J., Kim, J. W and You, B. J., "Multiple Humanoid Cooperative Control System for Heterogeneous Humanoid Team," *Proceedings of the 17th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, pp. 231-236, 2008.
5. Kim, G. S., Shin, H. J. and Yoon, J. W., "Development of 6-Axis force/moment Sensor for a humanoid robot's Intelligent Robot," *Sensors and Actuators A*, Vol. 141, No. 2, pp. 276-281, 2008.
6. Nagai, K., Ito, Y., Yazaki, M., Higuchi, K. and Abe, S., "Development of a small Six-component force/torque sensor based on the double-cross structure," *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol. 22, No. 3, pp. 361-369, 2004.
7. ATI Industrial Automation, "Multi-Axis Force/Torque Sensor," pp. 4-45, 2005.
8. Kim, G. S. and Yoon, J. W., "Development of multi-force/moment sensor calibration machine, and its uncertainty evaluation," *J. of KSPE*, Vol. 24, No. 10, pp. 91-98, 2007.