한국정밀공학회지 제 24 권 제 1 호 (2007 년 1 월)
Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 24, No. 1, January 2007

인간형 로봇의 지능형 발을 위한 6 축 발목 힘/모멘트센서

김갑순#

Development of 6-axis Ankle Force/Moment Sensor for an Intelligent Foot of a Humanoid Robot

Gab Soon Kim #

ABSTRACT

This paper describes the development of 6-axis ankle force/moment sensor for the intelligent feet of a humanoid robot. When the robot walks on uneven terrain, the feet should perceive the applied forces Fx, Fy, Fz and moments Mx, My, Mz from the attached 6-axis force/moment sensor on their ankles. Papers have already been published have some disadvantages in the size of the sensor, the rated output and so on. The rated output of each component sensor (6-axis ankle force/moment sensor) is very important to design the 6-axis force/moment sensor for precision measurement. Therefore, each sensor should be designed to get the similar rated output under each rated load. Also, the size of the sensor is very important for mounting to robot's feet. Therefore, the diameter should be below 100 mm and the height should be below 40mm. In this paper, first, the structure of a 6-axis ankle force/moment sensor was modeled for a humanoid robot's feet newly, Second, the equations to predict the strains on the sensing elements was derived, third, the size of the sensing elements was designed by using the equations, then, the sensor was fabricated by attaching strain-gages on the sensing elements, finally, the characteristic test of the developed sensor was carried out. The rated outputs from the derived equations agree well with the results from the experiments. The interference error of the sensor is less than 2.94%.

Key Words : Humanoid robot(인간형 로봇), Humanoid robot's foot (인간형 로봇의 발), 6-axis ankle force/moment sensor(6 축 발목 힘/모멘트센서), Interference error(상호간섭오차), Rated output(정격출력)

1. 서론

과학자들은 사람의 기능을 가진 로봇을 만들기 위하여 연구하고 있다. 로봇의 기능 중 가장 중요한 것 중의 하나가 지능형 발이다. 지능형 발은 인간형 로봇이 불규칙한 지면에서 넘어지지 않고 인간과 같이 자연스럽게 걷기 위하여 필수적으로 필요하다. 이를 위해서 로봇은 발바닥에 가해지는 3 개 방향의 힘과 3 개 방향의 모멘트를 감지해야 한다. 그 결과로 무게중심이 발뒤꿈치로부터 엄지와 중지 발가락 사이로 이동하도록 지능형 발을 제어해야 한다. 그러나 현재 국내외에서 개발한 인간형 로봇의 대부분은 6 축 발목 힘/모멘트센서를 부착하지 않았거나 산업용 6 축 힘/모멘트센서

☞ 접수일: 2006 년 6 월 12 일; 게재승인일: 2006 년 11 월 19 일
교신저자: 경상대학교 제어계측공학과, ERI
E-mail : gskim@gsnu.ac.kr Tel. (055) 751-5372

를 부착하여 걷는 연구를 수행하고 있다.[1-8] 인간형 로봇에 부착되는 6 축 발목 힘/모멘트센서는 크기가 인간형 로봇의 발목에 부착해야 할 정도로 작아야 하고, 측정 정밀도를 향상시키기 위해서 각 센서의 정격하중(힘 혹은 모멘트)에서 같은 정격축력이 발생되도록 설계되어야 한다. 그러나 선진국에서 판매되고 있는 산업용 6 축 힘/모멘트센서는 인간형 로봇의 발을 위해 설계 및 제작하지 않았으므로 크기와 정격출력 등에서 인간형 로봇에 부착하기에는 적합하지 않다.[9-16] 따라서 인간형 로봇의 지능형 발을 위한 6 축 발목 힘/모멘트센서의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 인간형 로봇의 지능형 발을 위한 6 축 발목 힘/모멘트센서의 구조를 새롭게 모델링하고, 감지부의 크기를 설계하기 위한 이론식을 유도하였다. 그리고 이론식의 결과를 이용하여 센서를 설계 및 제작하였고, 개발된 센서를 특성실험하였다.

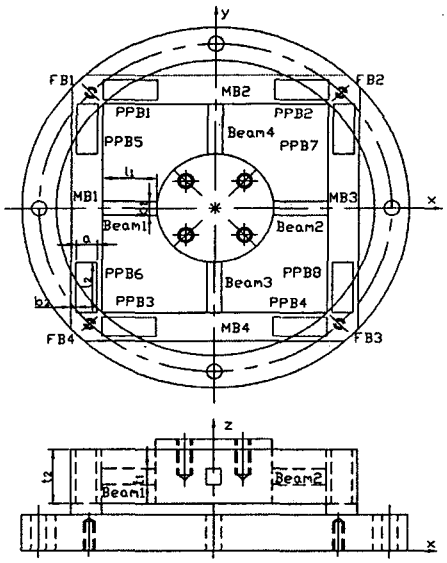

Fig. 1 Structure of sensing element for 6-axis ankle force/moment sensor

2. 6 축 발목 힘/모멘트센서의 설계

2.1 감지부의 구조

Fig. 1 은 6 축 발목 힘/모멘트센서의 감지부 구조를 나타내고 있다. 이 센서는 고정링, 힘/모멘트 전달블록, 고정블록 FB1~4, 이동블록 MB1~4, 평행평판보 PPB1~8, 사각보(sensing element, 1~4)으로 구성되고, 중앙의 힘/모멘트 전달블록을 중심으로 십자형으로 감지부로 사용되는 사각보가 형성되며 사각보의 한쪽 끝에 2 개의 평행평판보가 양쪽으로 결합된 이동블록이 연결된다. 그리고 평행평판보의 양쪽 끝에는 4 개의 고정블록과 조합되고 그것은 고정링과 결합되어 한 몸체로 형성된다. 평행평판보(parallel-plate beams (PPB))는 센서의 적은 처짐과 비틀림을 위해 사용된다. 센서의 설계를 위한 변수는 사각보의 폭 b_1, 두께 t_1, 길이 l_1와 평행평판보의 폭 b_2, 두께 t_2, 길이 l_2 이고 이 변수들의 크기를 결정하기 위해 각 보들의 변형률식을 유도해야 한다.

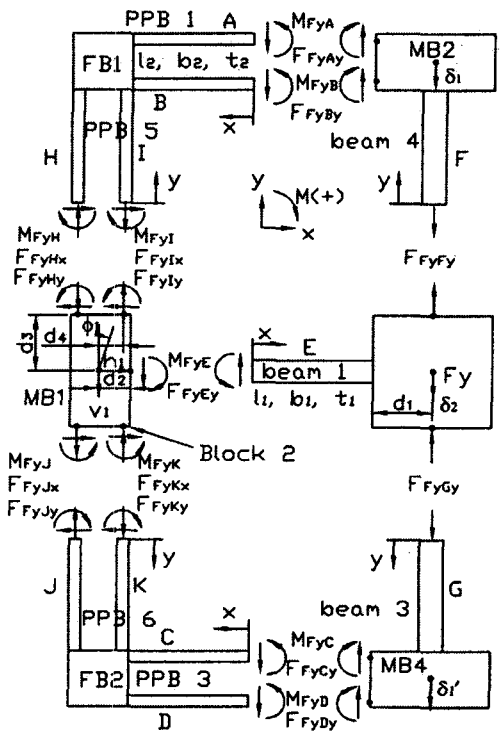

Fig. 2 Free body diagram of the rectangular beams and PPBs under force Fy (or Fx)

2.2 감지부의 이론해석

힘/모멘트 전달블록에 각각의 힘과 모멘트가 가해질 때 사각보의 변형률을 계산하는 이론식을 유도한다.

2.2.1 힘 Fy (혹은 Fx)가 가해질 때

Fig. 2 는 힘 Fy 가 가해질 때 사각보와 형행평판보에 작용되는 힘과 모멘트를 나타내고 있다. 이론해석식은 모델링한 구조가 좌우 및 상하 대칭형이므로 힘 Fy 를 감지하는 사각보 E 와 E'에 대해 변형률 이론식을 유도하고, 그 식을 힘 Fx 를 감지하는 사각보 F 와 G 의 이론식에도 적용한다. 힘 - Fy 를 힘/모멘트 전달블록에 가하면, 힘/모멘트 전달블록, 이동블록 MB2 와 MB4 는 각각 δ_2, δ_1, δ_1' 의 처짐이 발생하고, 이동블록 MB1 은 회전각, 수직 및 수평처짐이 각각 ϕ_1, v_1, h_1 발생한다.

힘/모멘트 전달블록과 이동블록 MB1 의 힘과 모멘트 평형조건식 $\sum Fx=0$, $\sum Fy=0$, $\sum M=0$ 에 의해 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$2F_{FyFy} + 2F_{FyEy} = Fy \tag{1}$$

$$F_{FyJx} + F_{FyKx} - F_{FyHx} - F_{FyIx} = 0 \tag{2}$$

$$F_{FyIy} + F_{FyKy} - F_{FyHy} - F_{FyJy} - F_{FyEy} = 0 \tag{3}$$

$$\begin{aligned} &M_{FyE} - M_{FyI} - M_{FyH} - M_{FyK} - M_{FyJ} + d_2 F_{FyEy} \\ &- 2d_4 F_{FyIy} - 2d_4 F_{FyHy} - 2d_3 F_{FyIx} - 2d_3 F_{FyKx} = 0 \end{aligned} \tag{4}$$

y 축에 따른 PPB1 의 보 A 와 B 에 가해진 힘 F_{FyAy} 와 F_{FyBy}, y 축에 따른 사각보 F 보에 가해진 힘 F_{FyFy}, y 축에 따른 PPB1 의 보 A 와 B 에 가해진 모멘트 M_{FyA} 와 M_{FyB}, y 축에 따른 사각보 E 에 가해지는 힘과 모멘트 F_{FyEy} 와 M_{FyE}, x 축과 y 축에 따른 PPB3 의 보 I 에 가해지는 힘 F_{FyIx} 과 F_{FyIy}, 보 I 에 가해지는 모멘트 M_{FyI}, x 축과 y 축에 따른 PPB6 의 보 K 에 가해지는 힘 F_{FyKx} 과 F_{FyKy}, 보 K 에 가해지는 모멘트 M_{FyK} 식들(부록 A1.1 참조)을 유도하여 위 식(1~4)에 대입하면 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$k_{11}\delta_2 + k_{12}v_1 + k_{13}\phi_1 = Fy \tag{5}$$

$$k_{14}\delta_2 + k_{15}v_1 + k_{16}\phi_1 = 0 \tag{6}$$

$$k_{17}\delta_2 + k_{18}v_1 + k_{19}\phi_1 = 0 \tag{7}$$

여기서, $k_{11} \sim k_{19}$ 은 다음과 같다.

$$k_{11} = \frac{2}{\frac{l_1}{A_1 E} + \frac{{l_2}^3}{48EI_2}} + \frac{24EI_2}{{l_1}^3}, \quad k_{12} = -\frac{24EI_1}{{l_1}^3},$$

$$k_{13} = -\frac{24EI_1}{{l_1}^3}(d_2 + \frac{l_1}{2}), \quad k_{14} = -\frac{24EI_1}{{l_1}^3}$$

$$k_{15} = \frac{4A_2E}{l_2} + \frac{24EI_1}{{l_1}^3}, \quad k_{16} = \frac{12EI_1}{{l_1}^3}(d_2 + \frac{l_1}{2}),$$

$$k_{17} = \frac{24EI_1}{{l_1}^2} + \frac{12EI_1 d_2}{{l_1}^3}, \quad k_{18} = \frac{6EI_1}{{l_1}^2} - \frac{12EI_1 d_2}{{l_1}^3}$$

$$k_{19} = -\frac{12EI_1}{{l_1}^2}(\frac{d_2}{2} + \frac{l_1}{3}) - \frac{48EI_2}{{l_2}^2} - \frac{12EI_1 d_2}{{l_1}^3}$$

$$(d_2 + \frac{l_1}{2}) - \frac{4AEI_2 d_4}{l_2} - \frac{48EI_2 d_4}{{l_2}^3}$$

식(5~7)을 연립하여 풀면 δ_2, v_1, ϕ_1 를 구할 수 있다. 사각보 E 와 E'의 좌측면과 우측면의 변형률을 해석하는 식은 굽힘 변형률식을 이용하여 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{FyE_left} &= \frac{12I_1 x}{{l_1}^3 z_{p1}}\left(\delta_2 - v_1 - (d_2 + \frac{l_1}{2})\phi_1\right) \\ &- \frac{12I_1}{{l_1}^2 z_{p1}}\left(\frac{\delta_2}{2} - \frac{v_1}{2} - (\frac{d_2}{2} + \frac{l_1}{3})\phi_1\right) \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{FyE_right} &= -\frac{12I_1 x}{{l_1}^3 z_{p1}}\left(\delta_2 - v_1 - (d_2 + \frac{l_1}{2})\phi_1\right) \\ &+ \frac{12I_1}{{l_1}^2 z_{p1}}\left(\frac{\delta_2}{2} - \frac{v_1}{2} - (\frac{d_2}{2} + \frac{l_1}{3})\phi_1\right) \end{aligned} \tag{9}$$

여기서, $z_{p1} = \frac{b_1 {t_1}^2}{6}$ 은 사각보 E 의 극관성 모멘트, l_1 는 사각보의 길이, l_2 는 평행평판보의 길이, $A_1 = b_1 t_1$ 는 사각보의 단면적, $I_1 = \frac{b_1 {t_1}^3}{12}$ 는 사각보의 관성모멘트, $I_2 = \frac{b_2 {t_2}^3}{12}$ 는 평행평판보의 관성모멘트, E 는 탄성계수, δ_2 는 힘/모멘트 전달블록의 수직처짐, v_1 는 이동블록 MB 1 의 수직처짐, ϕ_1 은 이동블록 MB1 의 회전각, d_2 는 이동블록 MB1 의 폭의 1/2, h_1 는 이동블록 MB 1 의 수평처짐, A_2 는 평행평판보의 면적, d_3 는 이동블록 MB 1 의 높이의 1/2, d_4 는 이동블록 MB 1 의 중심으로부터 I 보의 중심까지의 거리를 나타낸다.

2.2.2 힘 Fz가 가해질 때

Fig. 3 은 힘 Fz/4 가 가해질 때 사각보와 평행평판보에 작용되는 힘과 모멘트를 나타내고 있다. 이동블록 MB1 의 모멘트 평형조건식을 적용하면 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$d_2 F_{FzEy} + M_{FzE} - M_{Fz2} = 0 \tag{10}$$

y 축에 따른 사각보 E 에 가해지는 힘과 모멘트 F_{FzEy}과 M_{FzE}, PPB5 와 6 의 비틀림 모멘트 M_{Fz2} 식들(부록 A1.2 참조)를 유도하여 식(10)에 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$k_{21}\delta_3 + k_{22}\phi_2 = \frac{12EI_{21}d_2 v_2}{l_1^3} - \frac{6EI_{21}v_2}{l_1^2} \tag{11}$$

$$k_{23}\delta_3 + k_{24}\phi_2 = \frac{Fz}{4} + \frac{12EI_{21}v_2}{l_1^3} \tag{12}$$

여기서, $v_2 = \frac{Fzl_2^3}{16Et_2b_2^3}$ 이며, $k_{21} \sim k_{24}$ 는 다음과 같다.

$$k_{21} = \frac{12EI_{21}d_2}{l_1^3} + \frac{6EI_{21}}{l_1^2},$$

$$k_{22} = -\frac{12EI_{21}d_2}{l_1^3}(d_2 + \frac{l_1}{2}) - \frac{12EI_{21}}{l_1^2}(\frac{d_2}{2} + \frac{l_1}{3}) - \frac{2G}{\frac{d_3}{I_{PB}} + \frac{l_2}{I_{P2}}}$$

$$k_{23} = \frac{12EI_{21}}{l_1^3},\quad k_{24} = -\frac{12EI_{21}}{l_1^3}(d_2 + \frac{l_1}{2})$$

여기서, δ_3 는 힘/모멘트 전달블록의 수직처짐, v_2 는 이동블록 MB1 의 처짐, ϕ_2 는 이동블록 MB1 의 회전, $I_{21} = \frac{t_1 b_1^3}{12}$ 는 사각보의 관성 모멘트, G 는 회전탄성계수, $I_{PB} = \frac{d_2 b_2^3}{6} + \frac{2b_2 d_2^3}{3}$ 는 블록 2 의 관성 모멘트, $I_{P2} = \frac{2t_2 b_2^3}{12} + \frac{b_2\left[(2d_2)^3 - (2d_2 - 2t_2)^3\right]}{12}$ 는 평행평판보 5 와 6 의 관성 모멘트이다.
δ_3 와 ϕ_2 는 식(11)과 (12)를 연립하므로서 얻을 수 있다. 사각보 E 와 E'의 위면과 아랫면의 변형률식은 굽힘 변형률식을 이용하여 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\varepsilon_{FyE_upper} = \frac{12I_{21}x}{l_1^3 z_{p21}}\left(\delta_3 - v_2 - (d_2 + \frac{l_1}{2})\phi_2\right) - \frac{12I_{21}}{l_1^2 z_{p21}}\left(\frac{\delta_3}{2} - \frac{v_2}{2} - (\frac{d_2}{2} + \frac{l_1}{3})\phi_2\right) \tag{13}$$

$$\varepsilon_{FyE_lower} = -\frac{12I_{21}x}{l_1^3 z_{p21}}\left(\delta_3 - v_2 - (d_2 + \frac{l_1}{2})\phi_2\right) + \frac{12I_{21}}{l_1^2 z_{p21}}\left(\frac{\delta_3}{2} - \frac{v_2}{2} - (\frac{d_2}{2} + \frac{l_1}{3})\phi_2\right) \tag{14}$$

여기서, $z_{p21} = \frac{t_1 b_1^2}{6}$ 는 사각보의 극관성 모멘트이다.

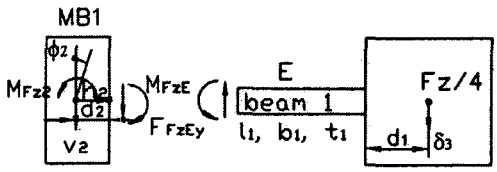

Fig. 3 Free body diagram of the rectangular beam under force Fz/4

2.2.3 모멘트 My (혹은 Mx)가 가해질 때

Fig. 4 는모멘트 My/2(혹은 Mx/2)가 가해질 때 사각보와 평행평판보에 작용되는 힘과 모멘트를 나타내고 있다. 힘/모멘트 전달블록과 이동블록 MB1 의 모멘트 평형조건식 $\sum M = 0$ 과 이동블록 MB1 의 처짐, y 축에 따른 사각보 E 에 가해지는 힘 F_{MyEy} 식에 의해 다음과 같은 식이 유도된다.

$$(l_1 + d_1)F_{MyEy} - M_{MyE} + \frac{M_{My1}}{2} = \frac{My}{2} \tag{15}$$

$$d_2 F_{MyEy} + M_{MyE} - M_{My2} = 0 \tag{16}$$

$$\frac{4Et_2 b_2^3 v_3}{l_2^3} = \frac{12EI_1}{l_1^3}\left((d_1 + \frac{l_1}{2})\theta_3 - v_3 - (d_2 - \frac{l_1}{2})\phi_3\right) \tag{17}$$

y 축에 따른 사각보 E 에 가해지는 힘과 모멘트 F_{MyEy}와 M_{MyE}, 평행평판보 5 와 6 의 회전모멘트 M_{My2} 식들(부록 A1.3 참조)을 유도하여 식(15~17)에 대입하면 다음과 같은 식이 유도된다.

$$k_{31}\theta_3 + k_{32}v_3 + k_{33}\phi_3 = \frac{My}{2} \quad (18)$$

$$k_{34}\theta_3 + k_{35}v_3 + k_{36}\phi_3 = 0 \quad (19)$$

$$k_{37}\theta_3 + k_{38}v_3 + k_{39}\phi_3 = 0 \quad (20)$$

여기서, $k_{31} \sim k_{39}$ 는 다음과 같다.

$$k_{31} = \frac{12EI_{21}}{l_1^3}(d_1 + l_1)(d_1 + \frac{l_1}{2}) - \frac{12EI_{21}}{l_1^2}(\frac{d_1}{2} + \frac{l_1}{3}) + \frac{2GI_{P1}}{l_1},$$

$$k_{32} = \frac{12EI_{21}}{l_1^3}(d_1 + l_1) + \frac{6EI_{21}}{l_1^2},$$

$$k_{33} = -\frac{12EI_{21}}{l_1^3}(d_1 + l_1)(d_2 - \frac{l_1}{2}) + \frac{12EI_{21}}{l_1^2}(\frac{d_1}{2} - \frac{l_1}{3}),$$

$$k_{34} = \frac{12EI_{21}d_2}{l_1^3}(d_1 + \frac{l_1}{2}) + \frac{12EI_{21}}{l_1^2}(\frac{d_1}{2} + \frac{l_1}{3}),$$

$$k_{35} = -\frac{12EI_{21}d_2}{l_1^3} - \frac{12EI_{21}}{l_1^2},$$

$$k_{36} = \frac{12EI_{21}d_2}{l_1^3}(d_2 - \frac{l_1}{2}) - \frac{12EI_{21}}{l_1^2}(\frac{d_2}{2} - \frac{l_1}{3}) - \frac{2G\phi_3}{\frac{d_3}{I_{PB}} + \frac{l_2}{I_{P2}}},$$

$$k_{37} = \frac{12EI_{21}}{l_1^3}(d_1 + \frac{l_1}{2}), \quad k_{38} = -\frac{12EI_{21}}{l_1^3} - \frac{4Et_2b_2^3}{l_2^3},$$

$$k_{39} = \frac{12EI_{21}}{l_1^3}(d_1 - \frac{l_1}{2})$$

θ_3, v_3, ϕ_3 는 식(18~20)를 연립하므로서 얻을 수 있다. 사각보 E 와 E'의 위면과 아랫면의 변형률 식은 굽힘 변형률식을 이용하여 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\varepsilon_{FyE_upper} = \frac{12I_{21}x}{l_1^3 z_{p21}}\left((d_1 + \frac{l_1}{2})\theta_3 - v_3 - (d_2 - \frac{l_1}{2})\phi_3\right) - \frac{12I_{21}}{l_1^2 z_{p21}}\left((\frac{d_1}{2} + \frac{l_1}{3})\theta_3 - \frac{v_3}{2} - (\frac{d_2}{2} - \frac{l_1}{2})\phi_3\right) \quad (21)$$

$$\varepsilon_{FyE_lower} = -\frac{12I_{21}x}{l_1^3 z_{p21}}\left((d_1 + \frac{l_1}{2})\theta_3 - v_3 - (d_2 - \frac{l_1}{2})\phi_3\right) + \frac{12I_{21}}{l_1^2 z_{p21}}\left((\frac{d_1}{2} + \frac{l_1}{3})\theta_3 - \frac{v_3}{2} - (\frac{d_2}{2} - \frac{l_1}{2})\phi_3\right) \quad (22)$$

여기서, d_1 은 힘/모멘트 전달블록 폭의 1/2, θ_3 는 힘/모멘트 전달블록 의 회전각, v_3 는 이동블록 MB1 의 수직처짐, ϕ_3 는 이동블록 MB1 의 회전각이다.

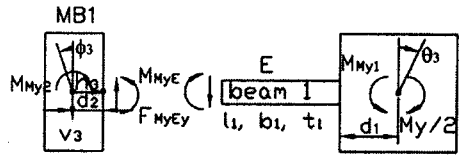

Fig. 4 Free body diagram of the rectangular beams under moment My/2 (or Mx/2)

2.2.4 모멘트 Mz 가 가해질 때

Fig. 5 는 모멘트 Mz/4 가 가해질 때 사각보와 형행평판보에 작용되는 힘과 모멘트를 나타내고 있다. 힘/모멘트 전달블록과 이동블록 MB1 의 힘과 모멘트 평형조건식 $\sum M = 0$, $\sum Fx = 0$, $\sum Fy = 0$ 에 의해 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$F_{MzEy}(l_1 + d_1) - M_{MzE} = \frac{Mz}{4} \quad (23)$$

$$2F_{MzHx} - 2F_{MzJx} = 0 \quad (24)$$

$$2F_{MzHy} - 2F_{MzIy} + F_{MzEy} = 0 \quad (25)$$

$$M_{MzE} - M_{MzI} - M_{MzJ} - M_{MzK} + d_2F_{MzEy} - d_3F_{MzHx} - d_3F_{MzIx} - d_3F_{MzJx} - d_3F_{MzKx} - d_4F_{MzHy} - d_4F_{MzIy} - d_4F_{MzJy} - d_4F_{MzKy} = 0 \quad (26)$$

x, y 축에 따른 사각보 E 의 힘과 모멘트 F_{MzEy} 와 M_{MzE} , y 축에 따른 평행평판보 I, H, J, K 의 힘과 모멘트 F_{MzIy} , F_{MzHy} , F_{MzJy} , F_{MzKy} , F_{MzIx} , F_{MzHx} , F_{MzJx} , F_{MzK} , M_{MzI} , M_{MzH} , M_{MzJ} , M_{MzK} 식들(부록 A1.4 참조)을 유도하여 식(23~26)에 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$k_{41}\theta_4 + k_{42}v_4 + k_{43}\phi_4 = \frac{Mz}{4} \quad (27)$$

$$k_{44}\theta_4 + k_{45}v_4 + k_{46}\phi_4 = 0 \quad (28)$$

$$k_{47}\theta_4 + k_{48}v_4 + k_{49}\phi_4 = 0 \quad (29)$$

여기서, $k_{41} \sim k_{49}$는 다음과 같다.

$$k_{41} = \frac{12EI_1}{l_1^3}(d_1 + l_1)(d_1 + \frac{l_1}{2}) - \frac{12EI_1}{l_1^2}(\frac{d_1}{2} + \frac{l_1}{3}),$$

$$k_{42} = -\frac{12EI_1}{l_1^3}(d_1 + l_1) + \frac{6EI_1}{l_1^2},$$

$$k_{43} = \frac{12EI_1}{l_1^3}(d_1 + l_1)(d_2 - \frac{l_1}{2}) - \frac{12EI_1}{l_1^2}(\frac{d_2}{2} - \frac{l_1}{3}),$$

$$k_{44} = \frac{12EI_1}{l_1^3}(d_1 + \frac{l_1}{2}), \quad k_{45} = -\frac{4A_2E}{l_2} - \frac{12EI_1}{l_1^3},$$

$$k_{46} = -\frac{12EI_1}{l_1^3}(d_2 - \frac{l_1}{2}),$$

$$k_{47} = \frac{12EI_1}{l_1^3}(\frac{d_1}{2} + \frac{l_1}{3}) + \frac{12EI_1d_2}{l_1^3}(d_1 + \frac{l_1}{2}),$$

$$k_{48} = \frac{6EI_1}{l_1^2} - \frac{12EI_1d_2}{l_1^3},$$

$$k_{49} = -\frac{12EI_1}{l_1^3}(\frac{d_2}{2} - \frac{l_1}{3}) - \frac{48EI_2}{l_2^3}(\frac{d_2}{2} + \frac{l_2}{3})$$

$$-\frac{12EI_1d_2}{l_1^3}(d_2 - \frac{l_1}{2}) - \frac{48EI_2d_3}{l_2^3}(d_3 + \frac{l_2}{2}) - \frac{4A_2Ed_4^2}{l_2}$$

θ_4, v_4, ϕ_4는 식(27~29)를 연립하므로서 얻을 수 있다. 사각보 E 와 E'의 우측면과 좌측면의 변형률식은 굽힘 변형률식을 이용하여 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\varepsilon_{MzE_left} = \frac{12I_1x}{l_1^3z_{p1}}\left((d_1 + \frac{l_1}{2})\theta_4 - v_4 - (d_2 - \frac{l_1}{2})\phi_4\right)$$

$$-\frac{12I_1}{l_1^2z_{p1}}\left((\frac{d_1}{2} + \frac{l_1}{3})\theta_4 - \frac{v_4}{2} - (\frac{d_2}{2} - \frac{l_1}{2})\phi_4\right) \quad (30)$$

$$\varepsilon_{MzE_right} = -\frac{12I_1x}{l_1^3z_{p1}}\left((d_1 + \frac{l_1}{2})\theta_4 - v_4 - (d_2 - \frac{l_1}{2})\phi_4\right)$$

$$+\frac{12I_1}{l_1^2z_{p1}}\left((\frac{d_1}{2} + \frac{l_1}{3})\theta_4 - \frac{v_4}{2} - (\frac{d_2}{2} - \frac{l_1}{2})\phi_4\right) \quad (31)$$

여기서, θ_4 는 힘/모멘트 전달블록의 회전각, v_4는 이동블록 MB1 의 처짐, ϕ_4는 이동블록 MB1 의 회전각이다.

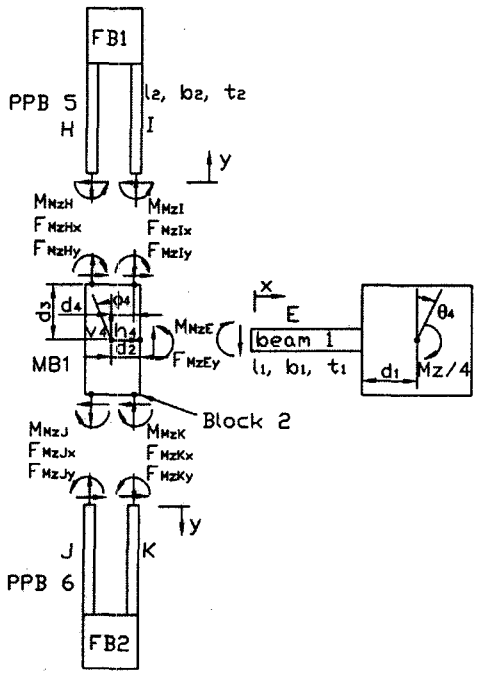

Fig. 5 Free body diagram of the rectangular beam and PPBs under moment Mz/4

2.3 센서설계

본 논문에서 모델링된 6 축 발목 힘/모멘트센서의 설계변수는 몸체의 크기, 각 센서의 정격축력, 정격하중, 사각보의 폭 b_1, 두께 t_1, 길이 l_1, 평행평판보의 폭 b_2, 두께 t_2, 길이 l_2 이다. 그러므로 설계변수의 정격출력은 $0.5\,mV/V$, 정격하중은 힘 Fx, Fy, Fz 센서가 각각 200N(20kg 이내의 소형 로봇의 무게를 고려하여 결정되었음), 모멘트 Mx, My 센서가 2.5Nm, Mz 센서가 5.0Nm, 고정링의 직경이 100mm, 센서의 사각형상의 크기와 높이가 각각 74×74mm, 32 mm, 힘/모멘트 전달블록의 직경이 30 mm, 스트레인게이지의 부착위치가 길이방향으로는 3mm 또는 5mm, 폭방향으로는 1/2, 스트레인게이지의 부착위치에서의 변형률은 약 $250\,\mu m/m$ 로 결정하였다.

각 센서는 4 개의 스트레인게이지로 휘스톤브리지를 구성한다. 정격변형률은 정격하중이 가해

질 때 휘스톤브리지에서 출력되는 총변형률을 의미하고 이것의 값은 다음과 같은 식으로부터 계산된다.

$$\varepsilon = \varepsilon_{T1} - \varepsilon_{C1} + \varepsilon_{T2} - \varepsilon_{C2} \tag{32}$$

여기서, ε 은 휘스톤브리지의 총 변형률, ε_{T1} 은 인장 스트레인게이지 T_1 의 변형률, ε_{C1} 은 압축 스트레인게이지 C_1 의 변형률, ε_{T2} 은 인장 스트레인게이지 T_2 의 변형률, ε_{C2} 은 압축 스트레인게이지 C_2 의 변형률이다.

정격출력은 다음과 같은 식에 의해 계산될 수 있다.

$$\frac{E_o}{E_i} = \frac{1}{4} K\varepsilon \tag{33}$$

여기서, E_i 는 휘스톤브리지의 입력전압, E_o 는 휘스톤브리지의 출력전압, K 는 스트레인게이지의 상수(약 2.0), ε 는 식(32)으로부터 얻은 총 변형률이다. 센서의 각 감지부는 식(8), (9), (13), (14), (21), (22), (30), (31)들을 이용하여 제작된 프로그램에 결정된 설계변수들을 입력하여 감지부의 크기를 결정하였다. 그것들은 l_1 과 l_2 는 각각 14mm, b_1 는 3.8mm, b_2 는 4.6mm, t_1 는 1.3mm, t_2 는 15mm, a 는 5.4mm 이다.

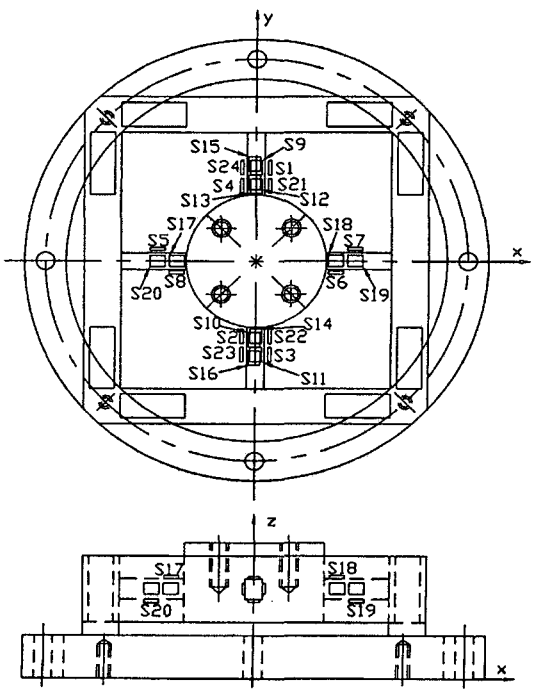

Fig. 6 Attachment location of strain-gages for each sensor

3. 게이지의 부착위치와 이론해석 결과

Fig. 6 은 각 센서의 스트레인게이지의 부착위치를 나타내고 있다. 스트레인게이지의 부착위치는 Fx 센서가 S1~S4, Fy 센서가 S5~S8, Fz 센서가 S9~S12, Mx 센서가 S13~S16, My 센서가 S17~S20, Mz 센서가 S21~S24 이다. 스트레인게이지의 정확한 부착위치는 길이방향으로는 힘/모멘트 전달블록으로부터 3mm 혹은 5mm 이고, 폭방향으로는 중심선상이다. 이 위치는 각 센서의 정격하중에서 상호간섭오차가 0%이고, 최대의 정격출력이 발생되는 지점으로 결정되었다. Table 1 은 이론해석식을 이용하여 각 스트레인게이지 부착위치에서의 계산된 변형률을 나타내고 있다. 식(32)에 의해 계산된 정격변형률은 Fx 센서와 Fy 센서가 1110 $\mu m/m$, Fz 센서가 976 $\mu m/m$, Mx 센서와 My 센서가 1112 $\mu m/m$, Mz 센서가 1100 $\mu m/m$ 이다.

Table 1 Strains in the attachment location of strain-gages for each sensor

Sensor	Strain ($\mu m/m$)				
	T_1	C_1	T_2	C_2	ε
Fx	207	-348	207	-348	1110
Fy	207	-348	207	-348	1110
Fz	191	-297	191	-297	976
Mx	341	-341	215	-215	1112
My	341	-341	215	-215	1112
Mz	345	-345	205	-205	1100

4. 센서제작 및 특설실험 결과와 고찰

6 축 발목 힘/모멘트센서는 각 센서 감지부의 스트레인게이지 부착위치에 스트레인게이지(N2A-13-S1452-350, Micro-Measurement Company 사 제작, 게이지 상수 2.06, 크기 3×7.2mm)를 부착하고 휘스톤브리지를 구성하여 제작하였으며, 제작된 센서의 사진을 Fig. 7 에 보이고 있다. Fig. 8 은 6 축 발목 힘/모멘트센서의 특성실험을 위한 실험장치를 나타내고 있으며, 이것은 암, 몸체, 전압측정기(ADCANTEST, R6552), 전압공급기(UNICORN, UP-100DT)로 구성되었다. 센서는 정격하중 Fx=Fy=Fz=200N 과 모멘트 Mx=My=2.5Nm, Mz=5.0Nm 를 가하고 정격출력을 측정하였으며,

총 세 번을 실시하여 평균값을 각 센서의 정격출력으로 결정하였다.

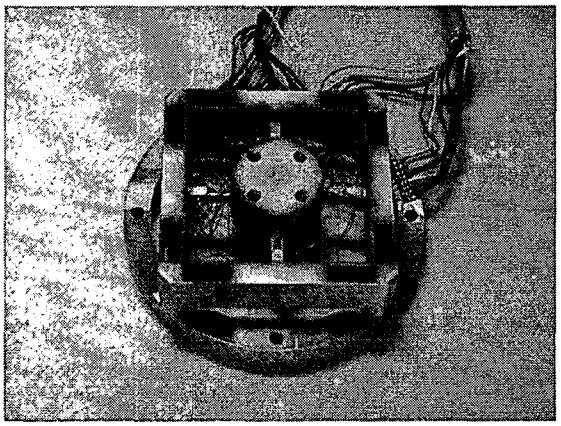

Fig. 7 Photograph of developed 6-axis ankle force/moment sensor

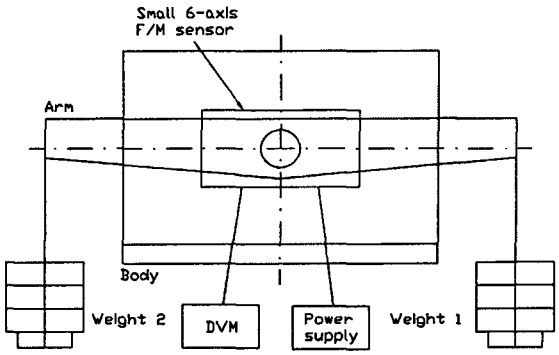

Fig. 8 Experimental set up for developed 6-axis ankle force/moment sensor

Table 2 는 이론해석과 실험결과의 정격출력 및 오차를 나타내고 있다. 이론해석식과 식(33)에 의해 계산된 정격출력은 Fx 센서, Fy 센서, Fz 센서, Mx 센서, My 센서, Mz 센서가 각각 0.555 mV/V , 0.555 mV/V , 0.488 mV/V , 0.556 mV/V , 0.556 mV/V , 0.550 mV/V 이고, 실험에 의한 정격출력은 Fx 센서, Fy 센서, Fz 센서, Mx 센서, My 센서, Mz 센서가 각각 0.549 mV/V , 0.541 mV/V , 0.508 mV/V , 0.539 mV/V , 0.531 mV/V , 0.568 mV/V 이었다. 이론해석결과를 기준으로 실험결과의 오차는 Fx 센서가 -1.08%, Fy 센서가 -2.52%, Fz 센서가 4.10%, Mx 센서가 -3.06%, My 센서가 -4.50%, Mz 센서가 -3.27%이었다. 이들 오차는 스트레인게이지의 부착오차, 감지부의 가공오차 등으로 생각된다.

Table 3 은 각 센서의 상호간섭오차를 나타내고 있다. 상호간섭오차는 Fx 센서가 -2.51%, Fy 센서가 2.06%, Fz 센서가 -0.82%, Mx 센서가 2.76%, My 센서가 -2.94%, Mz 센서가 2.16%이었다. 따라서 개발한 6 축 발목 힘/모멘트센서의 최대 상호간섭오차는 2.94%이다.

Table 2 Rated output from theory analysis and characteristic test of each sensor

Sensor	Rated output (mV/V)		
	Theory	Exp.	Error
Fx	0.555	0.549	-1.08
Fy	0.555	0.541	-2.52
Fz	0.488	0.508	4.10
Mx	0.556	0.539	-3.06
My	0.556	0.531	-4.50
Mz	0.550	0.568	-3.27

Table 3 Interference error of each sensor

Sensor / F/M	Interference error (%)					
	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
Fx=200 N	-	0.84	0.13	0.09	-2.94	2.16
Fy=200 N	0.09	-	0.24	2.76	0.11	-0.08
Fz=200 N	2.01	0.31	-	-1.09	1.75	0.64
Mx=2.5 Nm	0.16	2.06	-0.82	-	-0.05	-0.54
My=2.5 Nm	1.96	-0.76	0.19	0.24	-	0.93
Mz=5.0 Nm	2.51	1.80	0.53	0.91	0.37	-

5. 결론

본 논문에서는 인간형 로봇의 지능형 발에 사용될 수 있는 6 축 발목 힘/모멘트센서를 개발하였다. 제작한 6 축 발목 힘/모멘트센서 의 최대 상호간섭오차가 유도한 변형률식에 의해 0%이고, 특성실험결과 2.94%이므로 유도한 이론식(8), (9),

(13), (14), (21), (22), (30), (31)은 모델링한 6 축 발목 힘/모멘트센서의 감지부를 설계하는데 사용될 수 있음을 확인하였다. 개발한 센서는 최대 상호간섭 오차가 선진국에서 이미 판매하고 있는 산업용 6 축 힘/모멘트센서 [15,16] 의 그것과 비슷한 수준이고 크기가 직경이 100mm, 높이가 32mm 이므로 인간형 로봇의 지능형 발을 위해 사용하기에 적합한 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2006-000-10468-0)지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. Hirukawa, H., Kanehiro, F., Kaneko, K., Kajita, S., Fujiwara, K., Kawai, Y., Tomita, F., Hirai, S., Tanie, K. and Isozumi, T., "Humanoid robotics platforms developed in HRP," Robotics and Autonomous Systems, Vol. 48, No. 4, pp. 165-175, 2004.
2. Kagami, S., Mochimaru, M., Ehara, Y., Miyata, N., Nishiwaki, K., Kanade, T. and Inoue, H., "Measurement and comparison of humanoid H7 walking with human being," Robotics and Autonomous Systems, Vol. 48, No. 4, pp. 177-187, 2004.
3. Ogura, Y., Ando, S., Lim, H. O. and Takanishi, A., "Sensory-based walking motion instruction for biped humanoid robot," Robotics and Autonomous Systems, Vol. 48, No. 4, pp. 223-230, 2004.
4. Seara, J. F. and Schmidt, G., "Intelligent gaze control for vision-guided humanoid walking: methodological aspects," Robotics and Autonomous Systems, Vol. 48, No. 4, pp. 231-248, 2004.
5. Ude, A., Atkeson, C. G. and Riley, M., "Programming full-body movements for humanoid robots by observation," Robotics and Autonomous Systems, Vol. 47, No. 2-3, pp. 93-108, 2004.
6. Arkin, R. C., Fujita, M., Takagi, T. and Hasegawa, R., "An ethological and emotional basis for human–robot interaction," Robotics and Autonomous Systems, Vol. 42, No. 3-4, pp. 191-201, 2003.
7. Capi, G., Nasu, Y., Barolli, L. and Mitobe, K., "Real time gait generation for autonomous humanoid robots: A case study for walking," Robotics and Autonomous Systems, Vol. 42, No. 2, pp. 107-116, 2003.
8. Kim, M., Cho, K., You, B. J. and Lee, C. W., "Task planning for humanoid robots using look-up table," Robotics and Autonomous Systems, Vol. 40, No. 2-3, pp. 205-212, 2002.
9. Kim, G. S., "The development of a six-component force/moment sensor testing machine and evaluation of its uncertainty," Measurement Science and Technology, Vol. 11, pp. 1377-1382, 2000.
10. Kim, G. S., "The design of a six-component force/moment sensor and evaluation of its uncertainty," Measurement Science and Technology, Vol. 12, pp. 1445-1455, 2001.
11. Kim, G. S., "Design of 3-component sensor with force/moment ratio of wide range," KSPE, Vol. 18, No. 2, pp. 214-221, 2001.
12. Kim, G. S. and Lee, H. D., "Development of a six-axis force/moment sensor and its control system for an intelligent robot's gripper," Measurement Science and Technology, Vol. 14, pp. 1265-1274, 2003.
13. Kim, G. S., "Development of a small 6-axis force/moment sensor for robot's fingers," Measurement Science and Technology, Vol. 15, pp. 2233-2238, 2004.
14. Kim, G. S. and Park, J. J., "Development of the 6-axis force/moment sensor for an intelligent robot's gripper," Sensors and Actuators, Vol. 118, pp. 127-134, 2005.
15. ATI INDUSTRIAL AUTOMATION, "Multi-Axis Forcre/Torque Sensor," ATI INDUSTRIAL AUTOMATION, pp. 4-45, 2005.
16. BL AUTOTEC, "BL SENSOR, Multi-axis force/torque sensor (BL-FTS-E020)," BL AUTOTEC, pp. 5-50, 2003.

부록

A1. 감지부의 이론해석 수식전개

A1.1 "2.2.1 절"의 힘과 모멘트식들 수식전개

$$F_{FyAy} = F_{FyBy} = \delta_2 \Big/ \left(\frac{4l_1}{A_1 E} + \frac{{l_2}^3}{12EI_2} \right) \quad (1)$$

$$F_{FyFy} = \delta_2 \Big/ \left(\frac{l_1}{A_1 E} + \frac{{l_2}^3}{48EI_2} \right) \quad (2)$$

$$M_{FyA} = \delta_2 \Big/ \left(\frac{8l_1}{A_1 EI_2} + \frac{{l_2}^2}{6EI_2} \right) \quad (3)$$

$$F_{FyEy} = \frac{12EI_1}{{l_1}^3} \left(\delta_2 - v_1 - (d_2 + \frac{l_1}{2})\phi_1 \right) \quad (4)$$

$$M_{FyE} = \frac{12EI_1}{{l_1}^2} \left(\frac{\delta_2}{2} - \frac{v_1}{2} - (\frac{d_2}{2} + \frac{l_1}{3})\phi_1 \right) \quad (5)$$

$$F_{Fyly} = \frac{A_2 E}{l_2} (v_1 + d_4\phi_1) \quad (6)$$

$$F_{Flx} = \frac{12EI_2}{{l_2}^3} \left(h_1 + (d_3 + \frac{l_2}{2})\phi_1 \right) \quad (7)$$

$$M_{Fyl} = \frac{12EI_2}{{l_2}^2} \left(\frac{h_1}{2} + (\frac{d_3}{2} + \frac{l_2}{3})\phi_1 \right) \quad (8)$$

$$F_{FyKy} = \frac{A_2 E}{l_2} (v_1 + d_4\phi_1) \quad (9)$$

$$F_{FyKx} = \frac{12EI_2}{{l_2}^3} \left(-h_1 + (d_3 + \frac{l_2}{2})\phi_1 \right) \quad (10)$$

$$M_{FyK} = \frac{12EI_2}{{l_2}^2} \left(-\frac{h_1}{2} + (\frac{d_3}{2} + \frac{l_2}{3})\phi_1 \right) \quad (11)$$

A1.2 "2.2.2 절"의 힘과 모멘트식들 수식전개

$$F_{FzEy} = \frac{12EI_{21}}{{l_1}^3} \left(\delta_3 - v_2 - (d_2 + \frac{l_1}{2})\phi_2 \right) \quad (12)$$

$$M_{FzE} = \frac{12EI_{21}}{{l_1}^3} \left(\frac{\delta_3}{2} - \frac{v_2}{2} - (\frac{d_2}{2} + \frac{l_1}{3})\phi_2 \right) \quad (13)$$

$$M_{Fz2} = 2G\phi_2 \Big/ \left(\frac{d_3}{I_{PB}} + \frac{l_2}{I_{P2}} \right) \quad (14)$$

A1.3 "2.2.3 절"의 힘과 모멘트식들 수식전개

$$F_{MyEy} = \frac{12EI_{21}}{{l_1}^3} \left((d_1 + \frac{l_1}{2})\theta_3 - v_3 - (d_2 - \frac{l_1}{2})\phi_3 \right) \quad (15)$$

$$M_{MyE} = \frac{12EI_{21}}{{l_1}^2} \left((\frac{d_1}{2} + \frac{l_1}{3})\theta_3 - \frac{v_3}{2} - (\frac{d_2}{2} - \frac{l_1}{3})\phi_3 \right) \quad (16)$$

$$M_{My2} = 2G\phi_3 \Big/ \left(\frac{d_3}{I_{PB}} + \frac{l_2}{I_{P2}} \right) \quad (17)$$

A1.4 "2.2.4 절"의 힘과 모멘트식들 수식전개

$$F_{MzEy} = \frac{12EI_1}{{l_1}^3} \left((d_1 + \frac{l_1}{2})\theta_4 - v_4 - (d_2 - \frac{l_1}{2})\phi_4 \right) \quad (18)$$

$$M_{MzE} = \frac{12EI_1}{{l_1}^2} \left((\frac{d_1}{2} + \frac{l_1}{3})\theta_4 - \frac{v_4}{2} - (\frac{d_2}{2} - \frac{l_1}{3})\phi_4 \right) \quad (19)$$

$$F_{MzIx} = \frac{12EI_2}{{l_2}^3} \left(-h_4 + (d_3 + \frac{l_2}{2})\phi_4 \right) \quad (20)$$

$$M_{MzI} = \frac{12EI_2}{{l_2}^2} \left(-\frac{h_4}{2} + (\frac{d_3}{2} + \frac{l_2}{3})\phi_4 \right) \quad (21)$$

$$F_{MzIy} = \frac{A_2 E}{l_2} (v_4 + d_4\phi_4) \quad (22)$$

$$F_{MzHx} = \frac{12EI_2}{{l_2}^3} \left(-h_4 + (d_3 + \frac{l_2}{2})\phi_4 \right) \quad (23)$$

$$M_{MzH} = \frac{12EI_2}{{l_2}^2} \left(-\frac{h_4}{2} + (\frac{d_3}{2} + \frac{l_2}{3})\phi_4 \right) \quad (24)$$

$$F_{MzHy} = \frac{A_2 E}{l_2} (-v_4 + d_4\phi_4) \quad (25)$$

$$F_{MzJx} = \frac{12EI_2}{{l_2}^3} \left(h_4 + (d_3 + \frac{l_2}{2})\phi_4 \right) \quad (26)$$

$$M_{MzJ} = \frac{12EI_2}{{l_2}^2} \left(\frac{h_4}{2} + (\frac{d_3}{2} + \frac{l_2}{3})\phi_4 \right) \quad (27)$$

$$F_{MzJy} = \frac{A_2 E}{l_2} (-v_4 + d_4\phi_4) \quad (28)$$

$$F_{MzKx} = \frac{12EI_2}{{l_2}^3} \left(h_4 + (d_3 + \frac{l_2}{2})\phi_4 \right) \quad (29)$$

$$M_{MzK} = \frac{12EI_2}{{l_2}^2} \left(\frac{h_4}{2} + (\frac{d_3}{2} + \frac{l_2}{3})\phi_4 \right) \quad (30)$$

$$F_{MzKy} = \frac{A_2 E}{l_2} (v_4 + d_4\phi_4) \quad (31)$$