

## 척수마비 재활훈련용 이족보행 RGO 로봇의 Dynamic PLS 생체역학적 특성분석 <응력해석과 FEM을 중심으로>

김명희\* (연세대학교 대학원), 장대진 (연세대학교 대학원),  
박창일 (연세대학교 의과대학), 박영필 (연세대학교 기계공학과)

### Analysis of a Dynamic PLS of the Biped Walking RGO-Robot for a Training of Rehabilitation

Myung-Hoe Kim\* (Mech. Eng. Dept., Yonsei Univ.), Dae-Jin Jang (Mech. Eng. Dept., Yonsei Univ.),  
Chang-il Park (Rehab. Dept., Yonsei Univ.), Young-pil Park (Mech. Eng. Dept., Yonsei Univ.)

#### ABSTRACT

This paper presents a design and a control of a biped walking RGO-robot and dynamic walking simulation for this system. The biped walking RGO-robot is distinguished from other one by which has a very light-weight and a new RGO type with servo motors. The gait of a biped walking RGO-robot depends on the constrains of mechanical kinematics and initial posture. The stability of dynamic walking is investigated by ZMP(Zero Moment Point) of the biped walking RGO-robot.

It is designed according to a human wear type and is able to accomodate itself to human environments.

The joints of each leg are adopted with a good kinematic characteristics. To test of the analysis of joint kinematic properties, we did the strain stress analysis of dynamic PLS and the study of FEM with a dynamic PLS. It will be expect that the spinal cord injury patients are able to train effectively with a biped walking RGO-robot.

**Key Words** : RGO(왕복보행보조기), Biped Walking Robot (이족보행로봇), Zero Moment Point (균형점), Strain Stress Analysis (스트레인 응력해석), FEM (유한 요소 해석)

#### 1. 서론

통계청 자료에 의하면 우리나라는 OECD 선진국 대열에 합류한 이후 국민의 의료 수준의 향상으로 평균수명이 1985년 69.0세에서 1990년 71.6세로 2000년 74.9세로 증가하였고 더불어 장애인과 노인인구도 점차 증가하여 65세 이상의 노인인구가 1997년 6.3%에서 2000년 7.1% 그리고 2010년에는 10.0%로 증가될 전망이다.<sup>(1)</sup> 미국 국립보건원 산하 장애인 관련연구단체인 NICHD에서는 1999년에 752,178,000 달러 2000년에 859,258,000 달러 2001년에 904,705,000 달러를 재활관련 첨단 연구에 투자하였다.<sup>(2)</sup>

최근 교통사고나 질병으로 중추신경장애 중 척수장애 (Spinal Cord Injury)로 인하여 하반신마비가 되어 고통받는 환자들을 위한 여러 가지 방안이 연구

되고 있다. 하반신마비와 하지마비 환자에게 있어서 보행훈련은 중요한 재활훈련 중의 하나이다.<sup>(3)</sup>

왕복보행보조기는 (RGO : Reciprocating Gait Orthosis) 착용 후 보행속도가 너무 느려서 현실적으로 실용적이지 못하여 보조기 착용을 포기하게 되는 경우가 많았다.<sup>(4)</sup> 기능적 전기자극기 (FES : Functional Electrical Stimulation)를 이용한 하지마비 환자의 보행시스템은 몇가지 문제점 때문에 보편적으로 활용되지 못하고 있다.<sup>(5)</sup> 능동형 왕복보행보조기 (Active RGO, Active Reciprocating Gait Orthosis)는 일반적인 교차보행보조기의 관절부위에 다관절 로봇의 원리를 응용하여 소형의 서보모터를 부착하여 자동제어 하는 연구가 진행되어왔다.<sup>(6)</sup> Fujimoto<sup>(7)</sup>는 ZMP(Zero Moment Point) 와 COG (Center of Gravity)가 발바닥 내부와 신체 중심부위에 존재 한다.

본 연구에서는 척수마비로 인하여 하반신이 마비된 사람을 위하여 새로운 타입의 왕복보행보조기인 이족보행 RGO 로봇을 제작하여 보행훈련과 재활훈련을 실시하고자 한다.

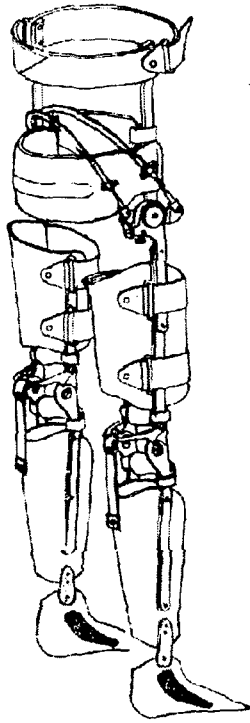


Fig. 1 Assembly RGO with dynamic PLS

## 2. 연구방법

### 2.1 하지의 생체역학적 모델링

인간 하지의 생체역학적 모델링은 고관절(HJ : Hip Joint), 슬관절(KJ: Knee Joint), 족관절(AJ : Ankle Joint)등 3가지 관절들을 마찰이 없는 힌지 시스템으로 Fig. 2 와 같이 설계하였다.

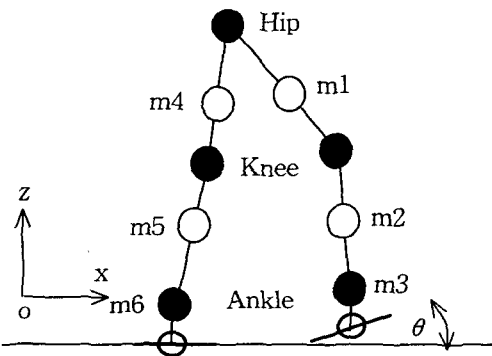


Fig. 2 Model of the biped walking RGO-robot

### 2.1.1 하지의 동역학 모델링

Fig. 3 은 본 실험에 사용된 이족보행 RGO 로봇의 동역학 모델링이다. 인체와 유사한 하지 구조와 보행을 위하여 다리는 6자유도로 하였고 골반 부분은 2자유도로 구성하였다. 본 시스템은 개방형 시스템이며 분지구조(tree structure)로 구성하였다. 또한 지면이 고정되어 있지 않기 때문에 주 물체를 분지구조들의 분기점에 위치한 물체 1로 선정하였다.

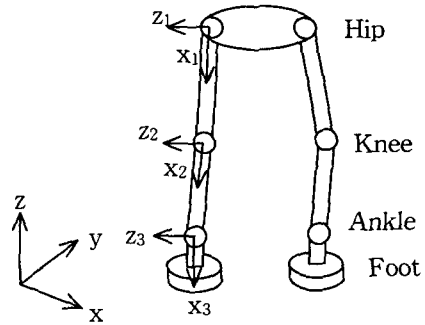


Fig. 3 Coordinate frames of the biped walking RGO

### 2.1.2 하지의 운동방정식.

이족보행 RGO 로봇의 운동방정식은 라그랑지 방정식과 대수방정식인 미분·대수방정식으로 구성하였다. 절대좌표계를 이용한 하지의 운동방정식은 시스템 내의 기구학적 조인트와 시간에 종속된 변수로 보고 다음과 같이 나타내었다.

$$\Phi(u, t) = 0 \quad (1)$$

$$\Phi_u \dot{U} = -\Phi_t \equiv \nu \quad (2)$$

$$\Phi_u \ddot{U} = -(\Phi_{uu} \dot{U})_u \dot{U} - 2\Phi_{ut} \dot{U} - \Phi_{tt} \equiv \gamma \quad (3)$$

여기서  $U = [x, y, z, e_0, e_1, e_2, e_3]$ 는 기구정보를 완성좌표계에 관하여 절대좌표계로 나타낸 것으로  $[x, y, z]$ 는 물체의 절대좌표 위치 벡터이며  $[e_0, e_1, e_2, e_3]$ 는 물체의 오일러 파라미터이다.

$$M\ddot{u} + \Phi_u^T \lambda = g \quad (4)$$

$\Phi_u^T \lambda$ 항은 조인트 반력과 모멘트를 나타내며 식 (3)과 (4)는 구축된 시스템의 미분·대수 방정식이다.

$$-\Phi^K(u) = 0 \quad (5)$$

$$-\Phi^M(u) = 0 \quad (6)$$

$$-\Phi_u^K \dot{U} = 0 = \nu^K \quad (7)$$

$$-\Phi_u^M \dot{U} = 0 = \nu^M \quad (8)$$

$$-\Phi_u^K \ddot{U} = -(\Phi_u^K \dot{U})_u \dot{U} \equiv \gamma^K \quad (9)$$

$$-\Phi_u^M \ddot{U} = -(\Phi_u^M \dot{U})_u \dot{U} \equiv \gamma^M \quad (10)$$

$$\dot{U} = B\dot{q} \quad (11)$$

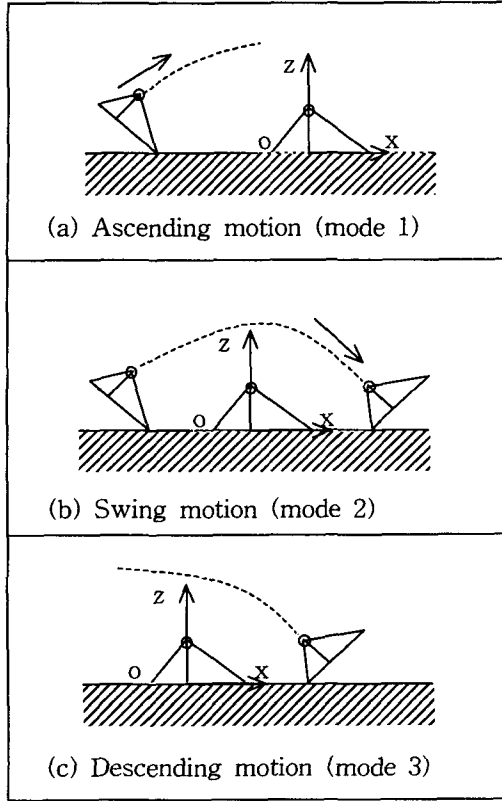


Fig. 4 Three motion modes of dynamic PLS foot

조인트 좌표 벡터  $q$ 와 절대좌표벡터  $u$  사이의 선형변환식은 다음과 같이 나타내었다.

$$-\phi_u^K \dot{U} = -\phi_u^K \dot{q} = 0 \quad (12)$$

$$\phi_u^K B = 0 \quad (13)$$

$$\dot{U} = B\dot{q} = \dot{B}q \quad (14)$$

$$M\dot{U} + \phi_u^{KT} \lambda^k + \phi_u^{MT} \lambda^M = g \quad (15)$$

$$\overline{M}\dot{q} + \phi_q^{MT} \lambda^M = \overline{g} \quad (16)$$

$$\phi_q^M \dot{q} = \gamma^M - \phi_u^M \dot{B}q = \gamma^M \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} \overline{M} & \phi_q^{MT} \\ \phi_q^M & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \lambda^M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{g} \\ \gamma^M \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$f = -\frac{3}{2} \alpha k p \dot{p} - k p \quad (17)$$

$$f_h = -b_h \dot{x}_{ue} - K_h (X_{ue} - X_{org}) \quad (18)$$

$$m'_c = r'_b \cdot f'_{nh} + r'_t \cdot f'_{nt} \quad (19)$$

( $m'_c$  :  $x_c, y_c$ 에 작용하는 모멘트)

하지에 대한 제어입력은 계산-토크제어 알고리즘에 의해 다음과 같이 나타내었다.

$$\ddot{q}_c = H_c^{-1} (\tau_c - G_c a_0 - D_c h_c - n_c) \quad (20)$$

$$\ddot{q}_u = H_u^{-1} (\tau_u - G_u a_0 - n_u) \quad (21)$$

$$Q_c H_c^{-1} \tau_c - \tilde{R} a_0 + \tilde{P}_c h_c + \tilde{g} = 0 \quad (22)$$

$$\tilde{R} = Q_c H_c^{-1} G_c + Q_u H_u^{-1} G_u - R \quad (23)$$

$$\tilde{g} = g + Q_u H_u^{-1} (\tau_u - n_u) - Q_c H_c^{-1} n_c \quad (24)$$

$$\tilde{P} = P_c - Q_c H_u^{-1} D_c \quad (25)$$

$$\tau_c = (Q_c H_c^{-1})^{-1} \{ \tilde{R} a_0 - \tilde{P}_c h_c - \tilde{g} \} \quad (26)$$

$$\therefore \ddot{e}_0 + k_v \dot{e}_0 + k_p e_0 = 0 \quad (27)$$

Fig. 4는 dynamic PLS가 보행시 3가지 모드의 운동유형을 나타내고 있으며 동적 운동시 안정된 보행을 위하여 이족보행 RGO 로봇은 계획된 ZMP의 궤적을 따라서 만족해야 하며 모멘트 평형 방정식을 D'Alembert의 원리를 적용하여 ZMP의 X항, Y항으로 표현하면 다음과 같다.

$$X_{zmp} = \frac{\sum_{i=0}^n m_i (\ddot{z}_i + g_z) x_i - \sum_{i=0}^n (\ddot{x}_i + g_x) z_i}{\sum_{i=0}^n m_i (\ddot{z}_i + g_z)} \quad (28)$$

$$Y_{zmp} = \frac{\sum_{i=0}^n m_i (\ddot{z}_i + g_z) y_i - \sum_{i=0}^n (\ddot{y}_i + g_y) z_i}{\sum_{i=0}^n m_i (\ddot{z}_i + g_z)} \quad (29)$$

Fig. 5는 이족보행 RGO 로봇의 자세균형제어, PID 제어 이론을 적용하여 발과 지면의 절대구속 상태를 표현하였다. 그러나 실제 이족보행 RGO 로봇의 보행은 단일 방향 구속의 특징을 나타내며 보행 중 전복현상을 막기 위하여 지면반력의 수직력을 조정하였다.

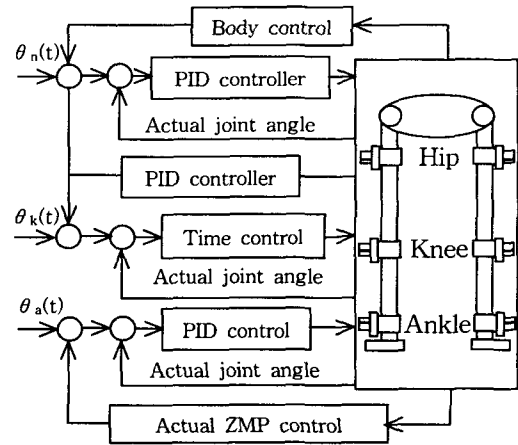


Fig 5. Blockdiagram of RGO-robot balance control

## 2.2 dynamic PLS의 실험방법.

### 2.2.1 dynamic PLS의 응력해석 실험장치

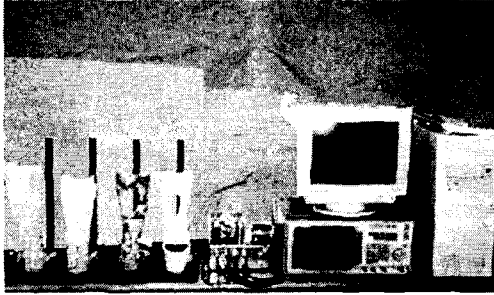


Fig. 6 Four types of PLS with strain gage sensor

Fig. 6와 같은 실험장치와 연구의 목적은 일정 하중 하에서 PLS의 재질과 구조에 따른 기계적 성질과 발생하는 각 부위별 응력해석을 해서 설계시 이를 반영 하고 안정성을 높이 고자 한다.

4가지 종류의 PLS에 Strain Gage Sensor는 발목 바깥쪽(1, 2, 3번 gage)과 안쪽면(4, 5, 6번 gage) 각각 3부위는 보조기 목을 중심으로 아래위 2.5cm 떨어진 곳에 부착하였다. 8개의 Strain gage, amplifier, A/D converter, PC, oscilloscope로 구성하였다. Strain Gage Sensor는 Wheastone 브리지 회로에 의해서 기계적 피로응력의 크기를 정확히 알아내기 위하여 사용하였다. A/D converter는 Darim에서 생산되는 16 channel 변환 가능한 것을 사용하였다(모델명: DR8330, PC 내장형). Data처리는 A/D converter를 통하여 PC로 들어온 응력신호를 C 프로그램으로 저장한 후 Matlab 그래프로 표시하였다.

### 2.2.2 dynamic PLS의 FEM 실험

본 논문에서 사용된 dynamic PLS의 유한요소해석 실험은 ANSYS사의 프로그램을 사용하였다. 이족 보행 RGO 로봇의 dynamic PLS 유한요소해석 실험은 Shell의 구조해석과 고유진동수 해석을 하였다. 구조적 해석방법을 사용하여 재료의 소성 및 파괴 여부를 해석하였고 수직하중, 10도 경사하중, 20도 경사하중과 같은 세 종류의 충격하중과 진동으로 인한 피로파괴 현상의 응력해석과 모드해석을 하였다. 구조해석방법으로 힘이나 압력을 가했을 때의 응력과 변형율, 변형량을 볼 수 있다.

고유진동수 해석방법으로 구속상태에서 파손의 원인인 공진을 유발하는 고유진동수를 찾아내고 모드 형상도 애니메이션으로 확인하였다.

## 3. 연구결과

### 3.1 dynamic PLS의 응력해석 결과

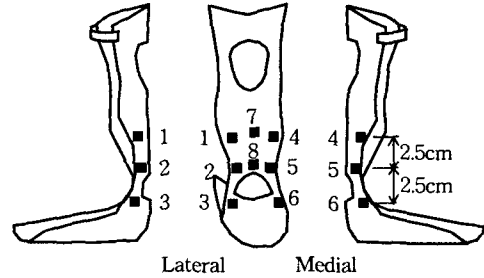


Fig. 7 Eight Strain Gage Sensors of dynamic PLS

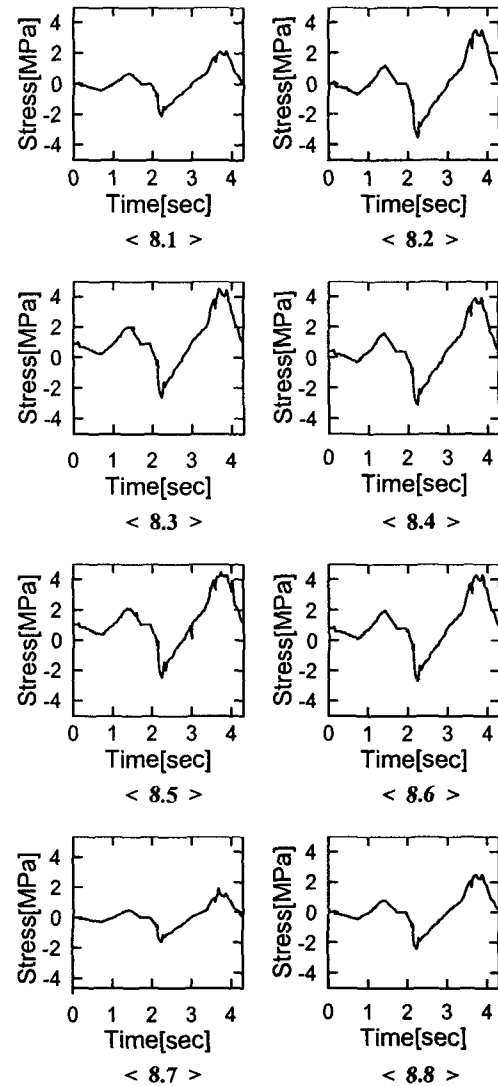


Fig. 8 Strain Stress Analysis of Eight Sensors.

3.2 dynamic PLS의 FEM해석 결과

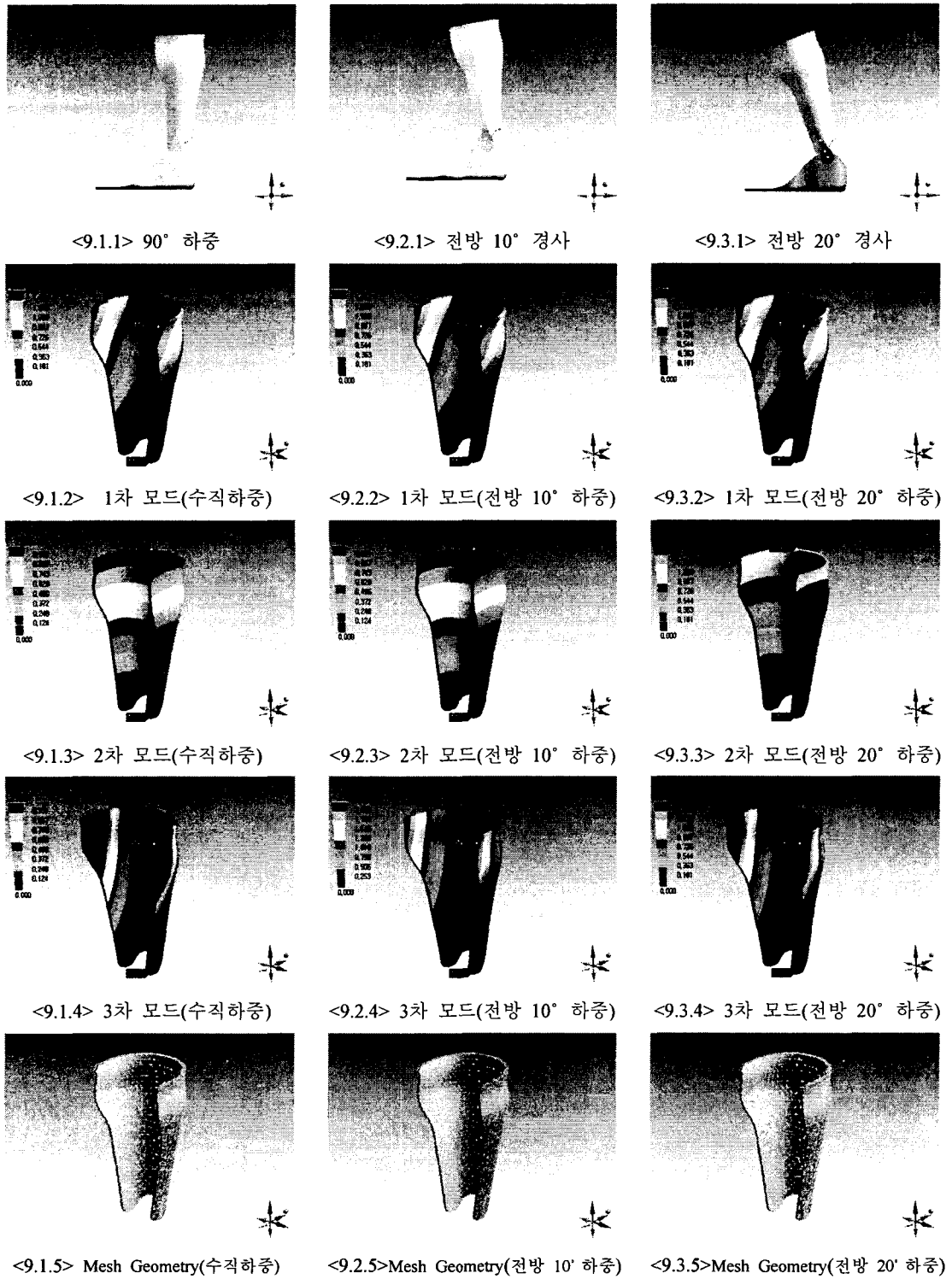


Fig. 9 FEM Analysis of Three Type Angle load

Fig. 7과 Fig. 8은 dynamic PLS의 strain stress 응력 해석 결과이며 1번 sensor의 응력값은  $\pm 2\text{MPa}$ 이며, 2번 sensor의 응력값은  $\pm 4.1\text{MPa}$ 이며, 3번 sensor의 응력값은  $\pm 3.6\text{MPa}$ 이며, 4번 sensor의 응력값은  $\pm 2.1\text{MPa}$ 이며, 5번 sensor의 응력값은  $\pm 3.5\text{MPa}$ 이며, 6번 sensor의 응력값은  $\pm 3.5\text{MPa}$ 이며, 7번 sensor의 응력값은  $\pm 1.5\text{MPa}$ 이며, 8번 sensor의 응력값은  $\pm 2.2\text{MPa}$ 이었다. dynamic PLS의 외측 중간부분인 2번 sensor의 응력값이 8개의 sensor 값 중  $\pm 4.1\text{MPa}$ 로 최대응력을 나타내었다. 네 종류의 PLS중 dynamic PLS를 제외한 나머지 세 종류에서 주로 관찰되는 응력 현상은 PLS의 발목 외측(Lateral)부위에서 최대 인장응력이 나타났다.

Fig. 9는 이족보행 RGO 로봇의 하부구조인 dynamic PLS의 FEM 해석 결과이며 다음과 같다.

1. 90도 수직하중시 dynamic PLS의 1차 모드해석(Fig. 9.1.2 : 120.19Hz), 2차 모드해석(Fig. 9.1.3 : 147.84Hz), 3차 모드해석(Fig. 9.1.4 : 347.47Hz), Mesh geometry 분포는 Fig. 9.1.5 이었다.

2. 10도 전방하중시 dynamic PLS의 1차 모드해석(Fig. 9.2.2 : 120.19Hz), 2차 모드해석(Fig. 9.2.3 : 147.84Hz), 3차 모드해석(Fig. 9.2.4 : 347.47Hz), Mesh geometry 분포는 Fig. 9.2.5 이었다.

3. 20도 전방하중시 dynamic PLS의 1차 모드해석(Fig. 9.3.2 : 120.19Hz), 2차 모드해석(Fig. 9.3.3 : 147.84Hz), 3차 모드해석(Fig. 9.3.4 : 347.47Hz), Mesh geometry 분포는 Fig. 9.3.5 이었다.

#### 4. 결 론

본 연구는 척수마비로 인하여 하반신이 마비된 장애인을 위하여 새로운 타입의 왕복보행보조기인 이족보행 RGO 로봇을 제작하여 재활운동과 하지의 관절 구축을 예방할 수 있는 시스템을 설계 제어하고자 하였다. 그래서 이족보행 RGO 로봇의 설계와 제어에 필요한 하부구조인 dynamic PLS에 관한 기초적인 strain gage 응력해석과 FEM 유한요소해석을 시행하였다.

첫째, dynamic PLS의 strain stress 응력해석 결과 dynamic PLS의 외측 중간부분인 2번 sensor의 응력값이 8개의 sensor 값 중  $\pm 4.1\text{MPa}$ 로 최대응력을 나타냈으며 네 종류의 PLS중 dynamic PLS를 제외한 나머지 세 종류에서 관찰되는 응력현상은 PLS의 발목 외측(Lateral)부위에서 최대 인장응력이 나타났다.

둘째, 이족보행 RGO 로봇의 하부구조인 dynamic PLS FEM 해석결과 대표적으로 20도 전방하중시 dynamic PLS의 1차 모드해석(Fig. 9.3.2 : 120.19Hz), 2차 모드해석(Fig. 9.3.3 : 147.84Hz), 3차 모드해석(Fig. 9.3.4 : 347.47Hz), Mesh geometry 분포는 Fig. 9.3.5 이었다.

#### 참고문헌

1. 통계연보, 대한민국 통계청, 2001
2. P.J.WOOLAM, B.LOMAS, J.STALLARD, "A Reciprocal Walking Orthosis of Hip Joint Young Paediatric Patients with a Variety of Pathological Conditions", *Prosthetics and Orthotics International*, Vol. 25, pp. 47-52, 2001.
3. R.W.Hussey, E.S.Stauffer, "Sinal Cord Injury Requirements for Ambulation", *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, Vol. 54, pp. 554-547, 1993.
4. M.W.WHITTLE, G.M.COCHRANE, "A Comparative Evaluation of the Hip Guidance Orthosis (HGO) and the Reciprocating Gait Orthosis (RGO)", *National Health Service procurement Directorate*, 1999.
5. D.B.Popovic, R.Tomivic, L.Schwirtlich, "Hybrid Assistive System of the Motor Neuroprosthesis", *IEEE Trans. Biomed.* Vol. 36, pp.729-736, 1999.
6. D.Guiraud, "Application of an Artificial Neural Network to the Control of an Active External Orthosis of the Lower Limb", *Med. Bio. Eng. Comput.*, Vol. 32, pp. 610-614, 1994.
7. Y.Fujimoto, S.Obata, B.Kawamura, "Robust' Biped Walking with Active Interaction Control between Foot and Ground", *Conf. on Robotics and Automation*, p0p. 2030-2035, 1998.