

〈논 문〉

## 관절형 4족 보행로봇용 발의 설계 및 성능시험

홍예선\* · 이수영\* · 류시복\* · 이종원\*

(1996년 9월 4일 접수)

### Design and Performance Test of a Foot for a Jointed Leg Type Quadrupedal Walking Robot

Y. S. Hong, S. Y. Yi, S. B. Ryu and C. W. Lee

**Key Words :** Robot Foot(로봇 발), Toe(발가락), Parallel Link(평행 링크), Hydropneumatic Shock Absorber(유공압식 충격흡수기), Remote Center of Rotation(원격회전중심), Rough Ground(험로)

#### Abstract

This Paper reports on the development of a new foot for a quadrupedal jointed-leg type walking robot. The foot has 2 toes, one at the front and the other at the rear side, for stable landing on uneven ground by point contact. The toes can move up and down independantly, guided by double-wishbone shaped parallel links which enable the lower leg to rotate with respect to a remote center on the ground surface. The motion of each toe is damped by a hydropneumatic shock absorber integrated in the foot in order to absorb the dynamic landing shock. Furthermore, the new foot can reduce the maximum hip joint drive torque by shortening the moment arm length between the hip joint and the landing force vector on the ground. Intensive experiments were carried out in this study by using a one-leg walking model to investigate the soft landing performance of the foot which could be hardly offered by conventional robot feet such as a flat plate with a gimbal type ankle joint. And it was confirmed that the hip joint torque of the leg walking on the flat surface could be reduced remarkably by using the new foot.

#### 1. 서 론

바퀴로 통과할 수 없는 지형 위를 자유자재로 이동할 수 있는 보행로봇을 개발하고자 하는 체계적 연구의 시발은 1960년대인 것으로 알려져 있다.<sup>(10)</sup> 현재까지 개발되어 온 보행로봇의 대표적인 개발사례는 인간을 모델로 한 와세다대학의 관절형 2족 로봇,<sup>(13)</sup> 곤충을 모델로 한 동경공대와 KAIST의 팬티그래프형 4족 로봇,<sup>(2,5)</sup> Ohio 주립대의 팬티그

래프형 6족 로봇, 말과 같은 동물을 모델로 한 HITACHI사의 관절형 4족 로봇<sup>(8)</sup> 등을 들 수 있다.

보행로봇의 이동속도를 높이기 위해서는 경량화된 고회력의 보행기구 및 보행 구동부 개발과 동적인 걸음새 제어 알고리즘 개발이 해결되어야 하는데, 동적인 걸음새 제어문제를 풀기 위해서는 발끝이 지면과 점접촉을 이룬다는 가정하에 발끝에 작용하는 착지반력이 동적인 보행 안정도에 미치는 영향을 고려한 연속보행 걸음새 설계 등이 이루어져야 하는 반면에,<sup>(4,9)</sup> 실제로 발끝이 슬립과 충격 없이 지면에 착지하여 보행 안정도에 미치는 영향

\* 회원, 한국과학기술연구원 휴먼로봇센터

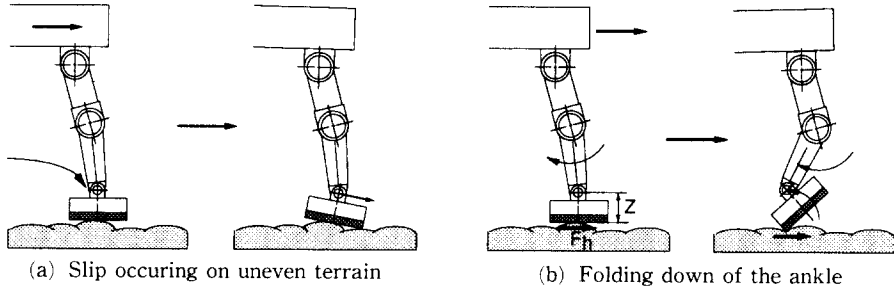


Fig. 1 Problems on a conventional robot foot

이 최소화되도록 하는 기구적인 보완연구도 요구된다. 특히 보행 노면이 평탄하지 않은 경우와 보행 속도가 높아야 하는 경우에는 1차적으로 착지반발력을 감소시키는 것이 동적인 걸음새 제어를 보다 용이하게 해 줄 수 있다. 동적인 걸음새 제어에 관한 연구는 국내의에서 많이 이루어져 왔으나, 충격 흡수 기능과 슬립방지 기능을 갖는 로봇 발의 개발에 대해서는 체계적 연구사례가 거의 없었다.

현재까지 개발된 2족 또는 4족 보행로봇들은 주로 원형이나 사각형의 평판을 로봇 발로 사용하였고, 이 발들은 2자유도 gimbal형태의 조인트에 의해 다리 끝에 연결되는 것이 일반적이었다.<sup>(2,3,6,12,13)</sup>

이러한 구조의 발들은 Fig.1에서 보는 바와 같이 불규칙한 노면 위에서는 착지상태가 불완전하여 슬립을 일으키기 쉽고, 몸체의 가속이나 감속시 발 바닥에 수평반력( $F_h$ )이 작용하면 발 자체에 피칭 모멘트( $M_p = F_h \times Z$ )가 발생되기 때문에 발바닥이 지면과 밀착되지 못하고 들릴 수 있다. 그리고 발이 착지할 때에는 보행속도에 비례하여 몸체의 무게보다 몇배 큰 동적인 충격이 발에 발생하는데, 이 충격이 흡수되지 못하고 관절 구동장치의 부하로 직접 작용하여 관절각 제어오차를 증가시킬 수 있다. 이러한 현상들은 2족 또는 4족 보행로봇에 있어서는 몸체의 균형을 깨뜨려 로봇의 전복을 초래할 수 있다.

본 논문에서는 관절형 4족 보행로봇을 위한 새로운 개념의 발을 소개하고자 한다. 이 로봇 발은 전후 2개의 발가락에 의해 동적인 착지충격을 유압식으로 흡수해 주는 기능을 가지고, 불규칙 노면 위에서 슬립없는 안정된 착지를 가능하게 해주며, 발목조인트가 없이 지면 상의 원격회전중심을 기준으로 피칭회전이 가능하기 때문에 보행 안정성을 크게 높여 줄 수 있는 것이 주된 특징이다.

본 논문에서는 이 로봇 발의 작동원리 및 설계

과정, 다리 하나를 이용한 착지 실험장치의 구성과 실험결과에 대해 보고하고자 한다.

## 2. 발의 구조 및 작동원리

본 논문의 로봇 발은 Fig.2에서와 같이 전후 2개의 발가락을 갖고, 이 발가락들은 특수하게 설계된 링크에 의해 독립적으로 상하 평행이동할 수 있으며, 발가락의 수직이동에 의해 유압피스톤이 오일을 흡입, 또는 압출하게 되어 있다. 전후 두 유압실린더는 서로 유로가 연결되어 있고, 이 유로는 damping orifice를 통해 가스 accumulator와 연결되어 있다.

여기에서 로봇 발이 갖는 발가락들은 불규칙한 지면과 점접촉을 하여 슬립없는 착지를 가능하게 해 주고 몸체의 하중을 분담하여 지지해 준다. 그리고 각 발가락을 발에 연결해 주는 double wishbone형태의 parallel link는 발가락 끝의 궤적이 원호를 형성하도록 함으로써 정강이의 피칭회전시 앞발가락과 뒷발가락의 착지점이 변하지 않도록 해 준다. 즉, 발목조인트가 전혀 필요없게 된다. 그리고 damping orifice와 gas accumulator는 착지충격을 흡수하는 shock absorber를 구성한다. 발가락에 작용하는 착지력은 발가락에 부착된 캠과 유압플런저 끝에 부착된 롤러를 통해 유압 플런저로 전달되는데, 각 발가락은 parallel link에 의해 유압플런저의 대칭축과 거의 평행되게 움직이므로 롤러와 캠의 접촉궤적은 항상 유압플런저의 대칭축 상에 놓이게 된다. 따라서 유압플런저에는 대칭축 방향 성분의 힘만 전달되고 마찰력을 수반하는 side force는 발생되지 않는다.

보행시 로봇 발에 의해 착지충격을 흡수하는 작동원리를 다리 하나에 대해 도시하여 설명하면 Fig. 3과 같다. 발의 swing phase에서 발을 앞으로

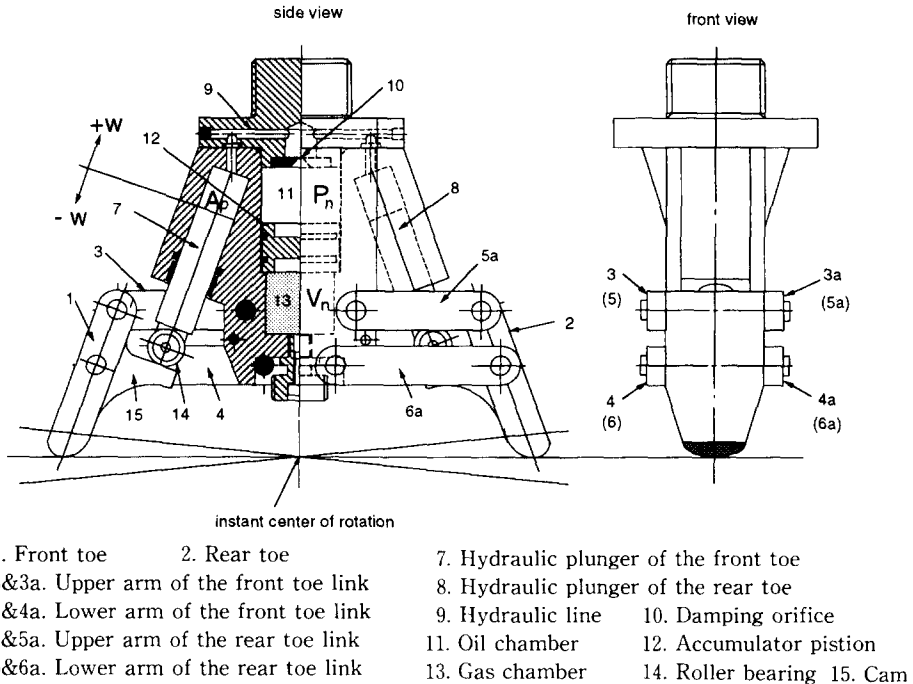


Fig. 2 Structure of a new robot foot

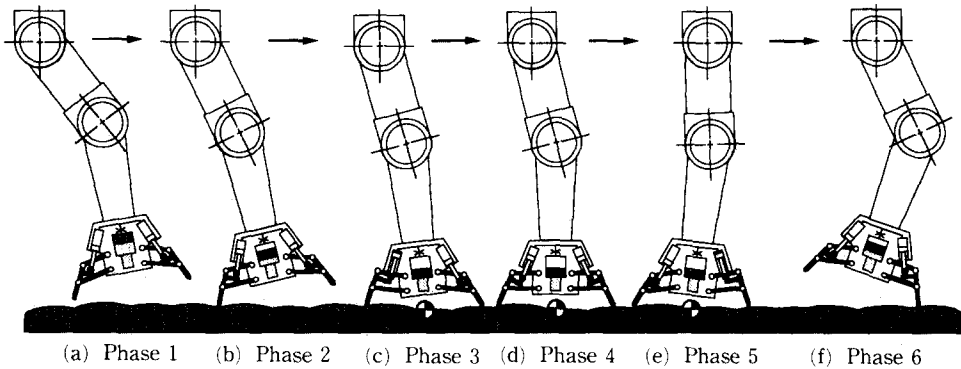


Fig. 3 Working principle of the new robot foot

완전히 들었을 때에는 가스 챔버의 충전압력에 의해 두 발가락은 완전히 하강된 상태가 된다(phase 1). 발이 지면에 착지될 때에는 뒷발가락이 지면과 먼저 접촉하여 몸체의 하중에 의해 뒷발가락이 상승하게 된다(phase 2). 이때에 뒷발가락측 유압실린더에 의해 토출된 작동유가 가스 축압기로 유입되는데, 그 유량에 비례하는 압력손실이 댐핑 오리피스에 발생한다. 이 과정에서 발가락의 상승속도에 비례하는 감쇄력이 유압실린더에 발생된다. 정강이가 전진방향으로 회전함에 따라서 뒷발가락이

상승함과 동시에 앞발가락도 지면에 착지되면 몸체의 하중이 두 발가락에 거의 동일하게 분배되면서 착지가 완료된다(phase 3). 이 과정에서 지면과 점 접촉을 하는 발가락을 전후에 2개 가지므로 노면이 편평하지 않더라도 슬립을 일으키지 않고 안전하게 착지할 수 있는 가능성이 매우 높아진다.

착지 후에는 오일 챔버 내의 압력이 몸체의 정적인 하중과 평형을 이루는 정상상태(steady state) 압력으로 수렴한다. 그리고 정강이가 전진방향으로 계속 피칭회전하면 앞발가락의 유압실린더에서 토

출된 오일이 동일한 단면적의 뒷발가락용 유압실린더로 그대로 유입된다. 따라서 정강이가 양발가락 끝 사이의 노면 상에 위치한 회전중심을 기준으로 저항없이 자유롭게 피칭회전할 수 있다(phase 4, phase 5). 발의 이륙직전 앞발가락이 상사점까지 상승하면 몸체의 하중이 모두 앞발가락에 실렸다가 발이 완전히 상승하면 가스 챔버가 팽창하여 작동유를 damping orifice를 통해 밀어내므로 앞발가락은 다시 밀려 나온다(phase 6).

### 3. 발의 설계

#### 3.1 발가락 링크구조의 설계

발가락의 링크구조 설계에 있어서 요구되는 조건은 전술한 바와 같이 발의 착지기간동안 발의 피칭회전중심이 양발가락 끝 사이의 지면 상에 위치하도록 함으로써 발목조인트가 필요없도록 하고, 유압실린더에 side force가 작용하지 않도록 하며, 두 발가락에는 몸체의 하중이 균등하게 분배되면서 발의 피칭회전시 반력모멘트가 발생되지 않아야 한다는 것이다.

이것을 실현하기 위하여 본 연구에서는 두 발가락의 링크길이를 기본적으로 동일하게 하였고, 발가락의 평행이동을 위해 더블-위시본형태의 parallel 링크를 채택하였으며, 동시에 두 발가락 끝의 궤적이 아크형태를 띠도록 상부 암 및 하부 암의 길이를 도식적으로 선정하였다. 이 때 발가락의 수직이동에 따른 수평이동 변위 ( $\Delta R$ )를 최소화함으로써 모멘트 암( $R$ )의 변화를 최소화하였다(Fig. 4 참조). 그리고 발가락과 유압실린더 간의 접촉은

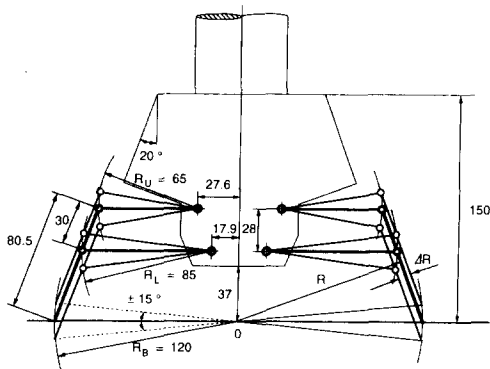


Fig. 4 Design result of a parallel link system for the new robot foot

Fig. 2에서와 같이 구름접촉을 하도록 하였다.

두 유압실린더의 각 대칭축이 이루는 각도는 착지시 뒷발가락의 유압실린더 축이 착지반력의 방향과 일치하도록 선정하는 것이 좋은데, 이것은 발의 이동궤적 및 보행가속도와 연관되는 변수이다. 본 연구에서는 이 각도를 20도로 선정하여 실험조건외의 기준으로 삼았다. 최종적으로 유압실린더의 직경 = 20 mm, 행정 = ±20 mm, 발가락 양끝의 간격 = 240 mm, 발가락의 길이 = 90.5 mm, 발가락의 상부힌지와 하부힌지 간의 거리 = 30 mm, 발의 피칭회전각도 범위는 ±15도로 선정하여 링크를 설계하면, 그 결과는 Fig. 4와 같다.

#### 3.2 유공압식 충격흡수기의 설계

속 업소버의 설계변수는 댐핑 오리피스스의 직경, 축압 피스톤의 직경, 가스 챔버의 초기 충전압력이다. 본 연구에서는 발의 전체 크기를 고려하여 축압기 피스톤의 직경을 40 mm로 선정하였다. 이로 인한 축압 피스톤의 행정은 10 mm에 달한다. 가스 챔버의 충전압력은 로봇 발에 작용하는 하중에 의해 결정된다. 즉, 로봇 발의 설계기준으로서, 다리의 standing phase에서 125 kg의 정하중이 발에 작용할 때 두 발가락, 즉 유압실린더가 모두 중립 위치에 놓이도록 한다면 이때 가스압력은 19.9 bar가 되어야 한다. 두 발가락이 모두 하사점까지 하강하여 가스 챔버의 체적이 최대일때 충전하는 초기압력은 가스의 체적변화에 단열과정을 적용하여 구할 수 있다. 즉,

$$P_n \cdot V_n^{1.4} = P_i \cdot V_i^{1.4}$$

이다. 여기서,

$P_n$ : 양발가락이 중립위치에 있을 때의 오일 압력 (bar)

$V_n$ : 중립위치에서의 가스 챔버 체적 (cm<sup>3</sup>)

$P_i$ : 초기 가스 충전압력 (bar)

$V_i$ :  $V_n + 2A_p w_0$  (cm<sup>3</sup>)

$A_p$ : 유압실린더의 단면적 (cm<sup>2</sup>)

$w_0$ : 유압실린더의 중립위치를 기준으로 한 최대 행정 (mm)

중립위치에서의 가스 챔버 체적,  $V_n$ 은 발의 조립시 발의 내부에 채워진 오일의 양에 의해 결정된다. 댐핑 오리피스로는 유량계수가 유체의 온도에 의해 영향을 받지 않는 첨각(sharp-edged) 오리피스를 사용해야 한다. 본 논문에서는 통과유량이 30

l/min일 때 10 bar의 압력손실이 발생되도록 뎀핑 오리피스에 hole 직경을 1 mm로 설계하였다. 이 수치는 발가락의 상승속도가 1 m/s일 때 50 kg의 감소력이 유압플런저에 발생하는 것을 의미한다.

4. 다리 하나를 이용한 보행실험

본 연구에서는 발의 실제 착지특성을 관찰하기 위해 다리 하나를 이용한 보행실험장치를 Fig. 5에서 보는 바와 같이 제작하였다. 이 실험장치는 2관절의 다리와 몸체, 몸체의 수직이동을 안내하는 가이드, 몸체를 수직 가이드에 고정시킬 수 있는 유압식 브레이크, 왕복이동 발판 및 수평 슬라이드, 발판의 복귀구동용 공압실린더로 구성되어, 몸체가 수평이동하는대신 발판이 왕복이동하도록 함으로써 반복되는 보행동작을 모사하였다. 이러한 실험방식은 4족 보행로봇이 정속보행을 함으로써 발바닥에 착지 수평반력이 거의 발생되지 않는 상황에 해당된다고 볼 수 있다.<sup>(8)</sup>

이 실험장치의 특징은 4족 보행로봇의 발에 작용

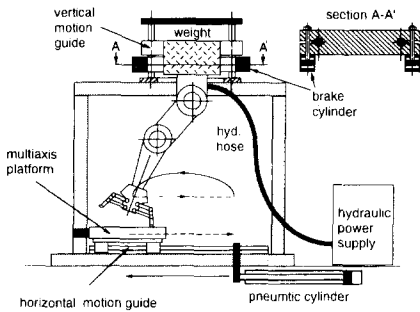


Fig. 5 Experimental setup for a single leg walking test

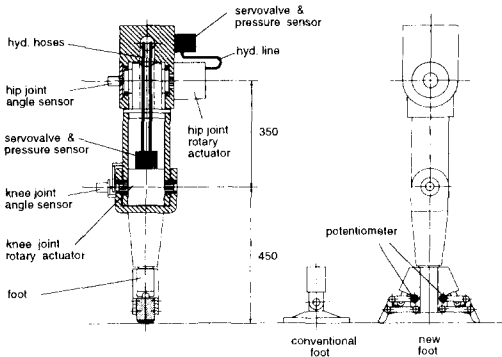


Fig. 6 Leg structure with a servo hydraulic joints

Table 1 Specification of the leg

Length of the upper leg	350 mm
Length of the lower leg including a foot	520 mm
Weight of the leg	50 kg
Weight of the body mounted on the leg	75 kg

하는 착지력을 실제 상황에 가깝게 재현하기 위하여 다리의 landing phase에서는 발의 착지시기에 맞춰 유압식 브레이크를 풀어 줌으로써 몸체의 하중이 다리에 작용하도록 하고, 다리의 swing phase에서는 발의 이륙과 동시에 유압식 브레이크를 작동시켜 몸체가 수직 가이드에 고정되도록 함으로써 다리에 하중이 걸리지 않도록 제어할 수 있는 데에 있다. 그리고 발의 수직 및 수평 착지력을 측정하기 위해 다축 platform을 발판 위에 설치하였는데, 발이 착지를 하면 발과 platform간의 마찰력에 의해 발판이 발을 따라서 직선 베어링 위를 이동하도록 하였고, 발이 들리면 공압실린더에 의해 발의 착지원점으로 발판이 다시 복귀되도록 platform과 발의 동기화를 단순화하였다. 본 연구에서 이 실험을 위해 제작한 다리의 각 관절은 서보 유압식으로 구동되며(Fig. 6 참조), Table 1과 같은 제원을 갖는다. 다리의 관절제어, 측정신호 기록 등은 VME bus 방식의 제어기에 의해 처리하였다.

5. 보행실험 결과

발에 발생하는 착지력은 다리의 보행주기, 보행주기, 몸체의 하중과 밀접한 관계가 있다. 다리의 보행주기적으로는 수학적으로 표시할 수 있는 oval 곡선, sine 곡선, cycloid 곡선 등을 사용할 수 있는데, 본 연구에서는 이들 곡선중 무릎관절의 구동 토크변화가 가장 완만하게 나타나는 composite cycloid 곡선을 사용하였다.<sup>(8)</sup> 이 composite cycloid 곡선은 다음과 같은 수식으로 표현된다.

i)  $0 \leq t < T_y$ 일 때 :

$$X = S_0 \left( \frac{t}{T_y} - \frac{1}{2\pi} \sin 2\pi \frac{t}{T_y} \right) - \frac{S_0}{2}$$

$0 \leq t < \frac{T}{2}$  :

$$Y = 2H_0 \left( \frac{t}{T_y} - \frac{1}{4\pi} \sin 4\pi \frac{t}{T_y} \right)$$

$$\frac{T_y}{2} \leq t < T_y ;$$

$$Y = 2H_0 \left( 1 - \frac{t}{T_y} + \frac{1}{4\pi} \sin 4\pi \left( \frac{t - \frac{T_y}{2}}{T_y} \right) \right)$$

ii)  $T_y \leq t < T$  일 때 ;

$$X = \frac{S_0}{2} - S_0 \left( \frac{t - T_y}{T - T_y} - \frac{1}{2\pi} \sin 2\pi \frac{t - T_y}{T - T_y} \right)$$

$$T_y \leq t < \frac{T + T_y}{2} ;$$

$$Y = -2D_0 \left( \frac{t - T_y}{T - T_y} - \frac{1}{4\pi} \sin 4\pi \left( \frac{t - T_y}{T - T_y} \right) \right)$$

$$\frac{T + T_y}{2} \leq t \leq T ;$$

$$Y = -2D_0 \left( 1 - \frac{t - T_y}{T - T_y} + \frac{1}{4\pi} \sin 4\pi \left( \frac{t - \frac{T + T_y}{2}}{T - T_y} \right) \right)$$

여기에서,

- $T$  : 보행주기
- $T_y$  : 스윙구간
- $S_0$  : 보폭
- $H_0$  : 스윙구간에서의 최대 높이
- $D_0$  : 착지구간에서의 최대 깊이

Fig. 7은 composite cycloid 곡선으로 프로그램된 다리의 stick diagram을 보여준다. 실험에서는 보폭을 450 mm, 발의 최대 높이가  $H_0=100$  mm, 최대 깊이가  $D_0=35$  mm로 한 궤적을 사용하였고, 발이 설계된 원리대로 작동하는지를 확인하기 위하여 보행주기는  $T=30$ 초로 비교적 길게 설정함으로

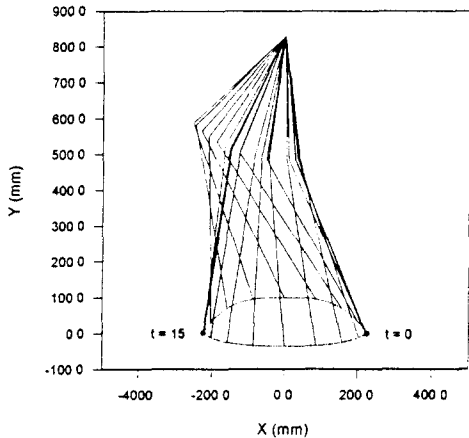


Fig. 7 Stick diagram of walking experiment

써 정적인 역학관계를 위주로 관찰하였다. 여기에서  $D_0=35$  mm라는 수치는 발의 동작이 Fig. 3에서 도시한대로 이루어지도록 하는 다리와 발의 기구학적인 한계조건으로부터 얻어진 것이다. 각 다리관절의 변위는 PID 제어에 의해 이루어졌고, 보행주기가 상대적으로 길기 때문에 실제로 각 관절의 구동제어는 Fig. 8에서 보는 바와 같이 Fig. 7의 발 궤적으로부터 역으로 구해 관절구동 명령으로 사용된 궤적과 큰 오차가 없게 나타났다.

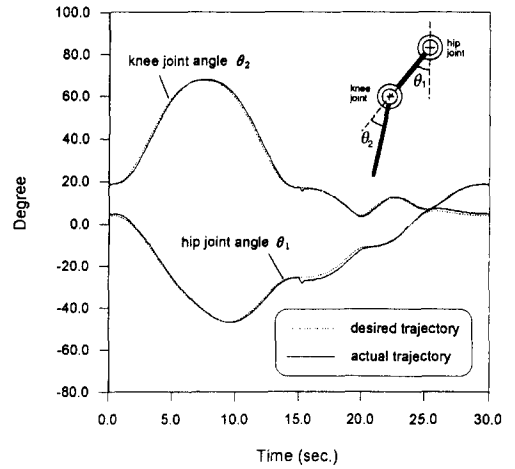


Fig. 8 Tracking control errors of hip and knee joints

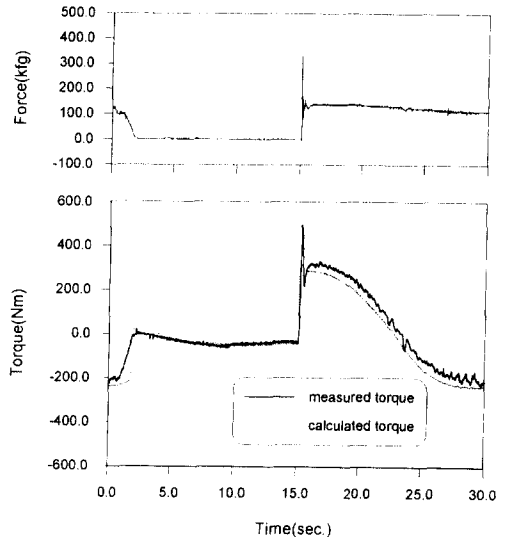


Fig. 9 Variation of vertical landing force and hip joint torque with a conventional robot foot at landing phase

Fig. 9는 원판형태의 기존 평발을 사용하였을 때의 수직착지력과 힙관절의 토크를 측정된 결과이다. 착지와 동시에 정하중 125 kg의 3배 이상인 약 400 kg의 충격하중이 발에 작용하고, 이 충격하중은 힙관절의 토크변화에도 나타난다. 여기에서 착지후 수직반력이 정하중보다 높게 나타나는 것은 수직 가이드부에서 발생하는 마찰력과 몸체의 수직 가속에 의한 관성력에 기인한다. 힙관절 토크의 착지시 동적인 peak는 약 500 Nm에 달하고 정적인 최대 토크는 약 +300 Nm에 달하는데, 이것은 이론적으로 예측한 수치(125 kg×225 mm)와 거의 일치한다.

Fig. 10은 본 논문의 새로운 발을 사용하였을 때 수직 착지력과 힙관절의 토크, 발가락 변위를 각각 측정된 결과이다. 본 연구의 로봇 발을 사용하였을 경우, 기존의 발을 사용하였을 때보다 수직착지력의 피크치가 약 25% 감소한 것을 볼 수 있다. 이 피크치 감소효과는 damping orifice의 내경을 변화시켜 보다 더 증대시킬 수 있을 것이다. 중요한 것은 힙관절의 토크변화에 있어서 착지시의 동적인 피크치가 현저히 줄어든 점이다. 그리고 두 발가락의 변위를 보면, 뒷발가락이 먼저 착지하여 상승하면서 착지충격을 흡수해 주고, 발목의 피칭회전에 의해 앞발가락이 착지되어 상승하기 시작하면 동시에 뒷발가락이 하강하면서 각 발가락의 중립위치에서 발목의 피칭회전이 이루어진 것을 볼 수 있다.

Fig. 9와 Fig. 10을 비교하면 힙관절 토크의 정적인 최대치에 차이가 나는 것을 알 수 있는데, 그 이유는 Fig. 11을 통해 설명할 수 있다. 본 논문의 발을 사용할 경우, 착지시 힙관절로부터 뒷발가락 끝까지의 모멘트 암( $S_1$ )은 평발을 사용했을 때의 모멘트 암( $S_1'$ )보다 짧고, 또한 발의 이륙직전 앞발가락 끝까지의 모멘트 암( $S_2$ )도 평발을 사용하였을 때의 모멘트 암( $S_2'$ )보다 짧다. 따라서 힙관절 토크의 최대치가 감소되고, 그 대신에 힙관절의 회전에 따른 토크의 감소는 완만하게 나타난다. 단, 몸체의 하중이 뒷발가락 끝에서 뒷발가락과 앞발가락의 중간, 다시 앞발가락 끝으로 순간적으로 이동할때 힙관절의 토크치가 삼각파형으로 변하게 된다. 이것은 이론적으로 계산하여 Fig. 10에 점선으로 표시한 토크곡선에 의해서도 쉽게 입증할 수 있다.

결론적으로 본 논문의 발을 사용하면 착지충격을 흡수해 주는 효과뿐만 아니라, 다리관절 토크의 최대치까지 감소되어 같은 중량의 보행로봇을 기준으

로 토크용량이 작은 모터로 관절을 구동할 수 있다는 커다란 장점이 있게 된다. 단, (토크×각 변위)에 해당되는 일(work)량까지 감소하는 것은 아니다.

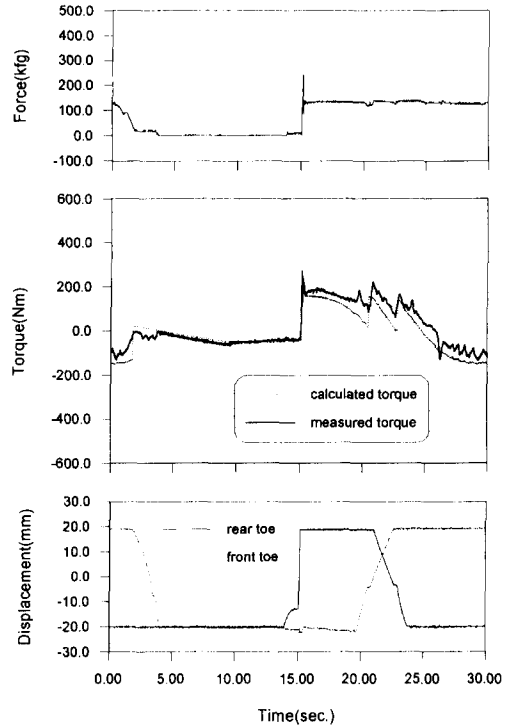


Fig. 10 Variation of vertical landing force, hip joint torque and toe displacement with a new robot foot at landing phase

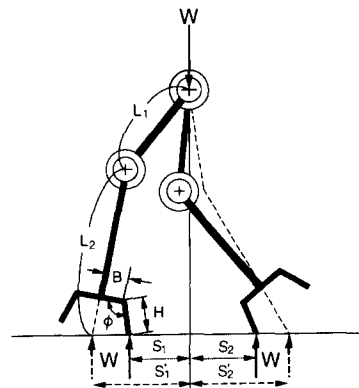


Fig. 11 Comparison of the maximum hip joint torque using a conventional foot with that using a new foot

본 논문의 발표내용에는 포함시키지 않았으나 무릎관절의 토크변화에 있어서도 위와 같은 원리에 의해 새 로봇 발을 사용한 경우 최대 토크치가 기존의 발을 사용하였을 때보다 감소하는 효과가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이 부분에 대해서는 추후 보완하여 발표할 계획이다.

## 6. 최종 검토

본 논문에서는 전후 2개의 발가락에 의해 발의 착지시 충격을 유압식으로 흡수해 주는 기능을 갖고, 불규칙한 지면 위에서 슬립없는 안정된 착지가 가능하며, 발의 피칭회전중심이 지면 상에 위치하기 때문에 발목조인트가 필요없는 새로운 로봇 발을 소개하였다.

다리 하나를 이용한 보행실험을 통하여 로봇 발의 기본 기능을 확인하였고, 특히 본 논문의 로봇 발을 사용함으로써 다리관절 토크의 동적인 피크치는 물론 정적인 최대치를 감소시킬 수 있음도 1차적으로 확인하였다. 따라서 본 논문의 로봇 발을 사용하면 다리관절을 구동하는 모터의 크기를 감소시킬 수 있다는 중요한 결론을 얻을 수 있었다. 단, 본 논문에서의 다리 하나를 이용한 보행실험결과는 몸체의 하중이 일정하다고 가정하여 얻어진 것이므로 몸체 무게중심의 이동에 따라서 발에 작용하는 하중이 계속 변하는 4족 보행로봇의 실제 현상을 정확히 반영하였다고는 할 수 없다.<sup>(1,2,4,5,11)</sup> 그러나 정속의 정적인 물걸 걸음새(wave gait)에 의해 보행하되, 이 물걸 걸음새에 의한 몸체 무게중심의 이동량이 다리 간의 거리에 비해 상대적으로 작다고 가정할 수 있는 보행조건에 대해서는 본 논문의 실험결과를 발의 설계 근거로 활용할 수 있을 것이다.

한편 로봇 발의 발가락 궤적이 다리의 궤적과 밀접한 관계를 갖기 때문에 로봇 발의 기능을 최대로 발휘할 수 있는 다리의 최적 보행궤적을 유도하는 것이 중요한 향후 과제로 대두되었다. 또한 로봇 발에 발생하는 착지충격의 크기는 다리의 보행궤적과 보행주기에 의해 영향을 받고 충격흡수효과는 댐핑 오리피스스의 크기에 영향을 받기 때문에 다양한 보행조건을 고려하여 로봇 발을 최적으로 설계하려면 수학적인 모델을 유도하여 전산 시뮬레이션에 의해 주요 설계변수들의 영향을 규명하는 것이 앞으로 요구된다고 할 수 있다.

## 참고문헌

- (1) Adachi, H., Koyachi, N., Nakamura, T. and Nakano, E., 1993, "Adaptive Gait for Quadruped Walking Robot Using Force Sensor," *Proc. Int. Conference on Intelligent Autonomous Systems*, pp. 54~63.
- (2) Hirose, S., Yoneda, K. and Arai, K., 1991, "Design of Prismatic Quadruped Walking Vehicle TITAN-VI," *Proc. 5th Int. Conf. Advanced Robotics*, pp. 723~728.
- (3) Kajita, S. and Tani, K., 1994, *Study of Dynamic Biped Locomotion*, Brochure of Mechanical Engineering Lab., Tsukuba, Japan.
- (4) 김종년, 홍형주, 윤용산, 1990, "4각 보행로봇의 동적 걸음새 평가," 대한기계학회논문집, 제14권, 제6호, pp. 1455~1463.
- (5) Lee, Y. J. and Bien, Z., 1993, "A Hierarchical Strategy for Planning Crab Gaits of a Quadruped Walking Robot," *Robotica*, NO. 79838.
- (6) PLUSTECH OY (Finland), 1996, *Going for a Walk Naturally*, Company Brochure.
- (7) 박성호, 정광조, 1996, "4족 보행로봇의 정역학적 장애물 횡단 보행에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제13권, 제11호, pp. 152~162.
- (8) Sakakibara, Y., Hosoda, Y., Kan, K., Hattori, M., Fujie, M. and Sugiyama, S., 1991, "Quadrupedal Walking Mechanism and Its Intelligent Control," *Proc. 1991 Int. Symposium on Advanced Robot Technology*, pp. 389~396.
- (9) 서영진, 윤용산, 1995, "사각 보행로봇의 동적 걸음새 설계와 시뮬레이션을 위한 알고리즘의 개발," 대한기계학회논문집, 제19권, 제11호, pp. 2721~2735.
- (10) Song, Shin-Min and Kenneth J. Waldron, 1989, *Machine That Walk: The Adaptive Suspension Vehicle*, The MIT Press.
- (11) 임준홍, 서일홍, 임미섭, 1989, "사각 보행로봇의 걸음새 제어를 위한 정적 안정도 해석," 대한전기학회논문집, 제38권, 제12호, pp. 1014~1021.
- (12) Uesugi, N., Ohishi, Y., Nakayama, R., Nakano, Y. and Nakayama, J., 1991, "Total System



- of Advanced Robot for Nuclear Power Plant Facilities," *Proc. 1991 Int. Symposium on Advanced Robot Technology*, pp. 111~117.
- (13) Yamaguchi, J., Takanishi, A. and Kato, I., 1993, "Development of a Biped Walking Robot Compensating for Three-axis Movement by Trunk Motion," *Proc. IEEE/RSJ*, pp. 561~566.