

다각 보행 로봇트를 위한 힘 제어

°이도남**, 이병일*, 신유식*, 임준홍***, 서일홍***, 변증남*

* 한국과학기술원, ** 삼성종합기술원, *** 한양대학교

Force Control for a Multi-legged Walking Robot

°D.N. Lee**, B. Rhee*, Y.S. Shin*, J. Lim***, I.H. Suh***, Z. Bien*

* KAIST, ** SAIT, *** Hanyang Univ.

ABSTRACT

In this paper, force control for a multi-legged walking robot is investigated. For stable but relatively rapid walking, a simple force control algorithm is proposed in conjunction with the position control system. The proposed control method is tested on an experimental one leg system of two degree of freedom with a force controller using a position controller and a monoboard microcomputer to implement the proposed control algorithm. The experimental results shows that the control algorithm can be applied for walking in a terrain with wide range variation.

I. 서론

위험 지역이나 심해, 우주 공간등 인간이 접근하기 곤란한 특수한 환경 아래에서 보다 효율적으로 다양한 작업을 수행하기 위해서는 주위 환경에 관계없이 자유로이 움직일 수 있는 로봇으로서 다리를 이용해 이동하는 다각보행 로봇트에 대해 여러 연구가 이루어져 왔다[1]-[4][8]. 이러한 여러 문제점 중에서 안정 걸음새 유지에 대해서는 정적 안정 걸음새가 주로 연구 되어왔다. 정적 안정은 로봇트의 가감속으로 인한 관성력은 고려하지 않고 로봇트 자체의 질량에 의한 중력과 지면의 반발력 사이에 힘의 평형 및 이 힘들에 의한 모멘트의 평형이 이루어진 상태인데, 실제로는 보행 로봇트가 단단한 지형에서 발을 들거나 내릴 때의 지면의 반발력으로 인한 충격, 무른 지형에서 지형의 변형으로 인한 몸체의 기울어짐, 미끄러운 지형에서의 미끄러짐 등으로 인하여 외란이 발생하고 이 외란은 몸체의 흔들림으로 나타나 로봇트의 자세가 불안해지고 심한 경우 로봇트가 넘어지게된다. 그러므로 각 발끝에 가해지는 힘을 측정하여 이힘이 적절한 값이 되도록 힘을 제어함으로써 외란의 발생을 줄이거나 제거 시켜야만, 로봇트가 상하 좌우 흔들림이

적으면서 안정된 자세로 걸을 수 있으며, 힘 정보도 매우 유용하게 사용될 수 있다[2][3]. 다각 보행 로봇트에 힘 제어를 하는 경우는 자유도가 많아 시스템이 복잡하므로 주로 정적 안정성을 얻기 위하여 될 수 있는대로 주어진 위치 제어나 속도 제어를 이용한 간접적인 방법의 간단한 알고리즘으로 힘 제어를 하는 연구가 주로 진행되고 있는데, 오하이오 주립 대학에서 제작한 육각 보행 로봇트에 active compliance 알고리즘[4]을 적용시켜서 지면의 반발력으로 인한 몸체의 좌우 상하 흔들림을 줄인 것이 최초이고, 근래에 와서는 일본 기계연구소에서 MELWALK-III라는 육각 보행 로봇트에 적용한 무른 지형 보행을 위한 힘 제어 알고리즘[8]이 있다. 그런데, active compliance 알고리즘은 지형의 변화를 고려하지 않았고, 정상 상태 힘 오차가 있으며, 무른 지형인 경우는 알고리즘을 적용할 수 없으며, 아날로그 제어기로 위치 제어를 하는 경우에는 이 알고리즘을 적용시키는 것이 어려운 점 등이 있다. MELWALKJII 에 적용된 무른 지형 보행 알고리즘 먼저 지형의 모델을 구한 다음, 힘의 목표치를 구하여 이 값을 위치 제어기의 입력값으로 환산하여 위치 제어를 하는 알고리즘으로써, 이 알고리즘은 feedback이 없으므로 외란 제어가 불가능하고, 지형의 모델링을 필요로 하므로 알고리즘이 복잡하고, 정상 상태 오차가 있으며, 단단한 지형인 경우에 적용하면 오차가 큰 등의 단점이 있다. 본 논문에서는 이들의 문제점을 해결하는 힘 제어를 설계하여 위치제어기 loop의 밖에 달아 feedback을 이용함으로써 다양한 지형에의 적응과 정상상태의 오차를 없앴으며 이를 한개의 다리에 적용, 실험 하여 그 유용함을 보였다.

II. 지형 모델링 및 힘 제어기의 설계

기존의 모터 제어기로는 위치 제어기, 속도 제어기, 토크 제어기등으로 대별 되는데, 여기서는 기존에 사용되고있는 위치 제어기를 사용하여 힘 제어 루프를 형성함으로써 별도의

힘 제어를 구성할 필요가 없는 힘 제어 방법을 제안한다.

힘 제어기 설계에 앞서 먼저 일반적인 지형의 특성을 알아보자. 지형에는 여러 종류가 있지만 무한히 빠지는 높이나 갑자기 빠지는 함정같은 경우가 아닌 모래 지형이나 밟으면 압축되어지는 대부분의 지형은 지형의 변형이 δ 라고 하면 발끝에 작용하는 지면의 반발력 F 는 지형의 특성에 따른 상수 k, n 에 의해서

$$F = k\delta^n$$

의 형태로 표현되어 진다[5]. 일반적으로 $n > 1$ 인 경우 단단한 지면위에 무른 지형이 있는 경우이고 $n < 1$ 인 경우는 무른 지형위에 단단한 지형이 있는 경우이다. 몇가지 경우에 대해 실험적으로 구한 지형의 특성은 그림1, 그림2와 같다. 여기에서 지형의 특성을 나타내는 계수들은 motor의 output과의 관계이다. 즉 다리의 kinematics를 고려한 값들이다. 그림 1 에서 soft-ground인 경우 $n = 1$ 이며

$$k_s = 8.8Kgf/1000pulse = 0.7Kgf/rad$$

그림 2에서 stiff ground인 경우 역시 $n=1$ 이며

$$k_s = 6.76Kgf/100pulse = 5.38Kgf/rad$$

soft ground model $f = 0.7z_a$

stiff ground model $f = 5.38z_a$

의 관계를 갖는다. 여기서 k_s 와 n 을 결정하는 요인은 위치제어기의 feedback loop gain에 의해 결정되는 motor stiffness k_m , 다리의 재질에 의해 결정되는 다리의 stiffness, 지면의 특성에 의해 결정되는 stiffness가 합쳐진 값이다. Motor 위치 제어기의 stiffness를 k_m , 다리의 stiffness를 k_l , 지면의 stiffness를 k_e 라고 하면 전체 stiffness K_s 는

$$K_s = (k_m^{-1} + k_l^{-1} + k_e^{-1})^{-1}$$

로 부터 구할 수 있다. 그런데 일반적으로 $k_m \gg k_l$, $k_m \gg k_e$ 이므로 k_m 은 무시할 수 있고 stiff ground인 경우 $k_e \gg k_l$ 이므로 $K_s = k_l$ 즉 stiff ground에서 전체의 stiffness는 다리의 stiffness와 같다. 이 값은 다리끝에 적당한 재료를 부착시킴으로써 값을 조정할 수 있고 현재 시스템은 $k_l = 5.38Kgf/rad$ 의 값이 나왔다. soft ground 에서는 전체 시스템의 stiffness는 다리와 지면의 stiffness에 의해 결정되고 실험에서는 $K_s = 0.70Kgf/rad$ 의 값이 나왔다.

힘 제어기를 설계하기 위해 본 논문에서 사용하는 위치 제어기는 그림 3의 점선 부분이며 여기서 전기가 인덕턴스 L_a 를 무시하면 위치제어기는 2차 시스템으로 표현되고, 이때의 전달함수는 다음과 같다.

$$G_p(S) = \frac{K_T(K_p + SK_v)/R_a J_m}{S^2 + S(R_a B_m + K_T K_b + K_T K_v)/R_a J_m + K_T K_p/R_a J_m}$$

$$= \frac{756.1(K_p + SK_v)}{S^2 + (165.6 + 756.1K_v)S + 756.1K_p}$$

여기서 damping ratio를 1.1 natural frequency가 100Hz가 되도록 하면 $K_p = 13.2$, $K_v = 0.0919$ 가 된다.

이제 힘 제어기를 설계하기 위하여 먼저 다음과 같은 설계조건을 만족 하도록 하였다. 첫째, 지형의 변화에 관계없이 stable할것, 둘째, 정상상태에서 오차가 없을것, 셋째, 상승 시간이 작을것, 넷째, overshoot가 없을것, 다섯째, 지형의 변화에 따른 특성변화가 적을것.

그림 3의 지형-로봇 시스템을 K_s 로 대신한 후 다른 값들을 대입한 후 $Z_d(S)$ 와 $F_a(S)$ 사이의 전달 함수를 구해보면

$$\frac{F_a(S)}{Z_d(S)} = \frac{(5.073 \times 10^4 S + 3.82 \times 10^6) K_s / \Delta}{1 + K_s (7.2326S + 5530) / \Delta}$$

$$\text{여기서, } \Delta = S^3 + 847.1S^2 + 1.1457 \times 10^5 S + 3.82 \times 10^6$$

$$\begin{aligned} & \frac{73.647(S+65.30)K_s}{(S+52.36)(S+75.9)} \\ &= \frac{8.02}{1 + K_s \frac{8.02}{(S+52.36)(S+75.9)}} \end{aligned}$$

로 근사화 할 수 있다. 그런데 지형 모델링에서 K_s 값은 0.7과 5.38사이에 주로 있으므로 K_s 의 변화에 대해서 본모의 근의 변화를 살펴보면 근의 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 따라서 첫식은 $K_s = 5$ 을 기준하여 간략화하면

$$\frac{F_a(S)}{Z_d(S)} = \frac{73.647K_s(S+65.30)}{(S+54.1)(S+73.2)}$$

가 된다.

힘 제어기의 전달 함수를 $C_f(S)$ 라 하면 정상 상태 오차가 0가 되기 위해서는 Laplace변환의 최종치 정리에서

$$\lim_{s \rightarrow 0} C_f(s) = \infty$$

가 되어야 한다.

즉 $C_f(s)$ 는 적어도 한개의 pole을 $S = 0$ 에 가져야 한다. 이 조건을 만족하는 가장 간단한 경우로는 적분 제어기로서

$$C_f(s) = \frac{K_f}{S}$$

로 놓고 $73.647K_f K_s$ 에 대해서 근 궤적곡선을 그려보면 모든 $73.647K_f K_s$ 값에 대해서 시스템은 stable 함을 알 수 있다.

전체 시스템의 응답 특성은 $73.647K_f K_s$ 에 의해 결정되고 힘 제어 system의 step 응답이 overshoot가 없도록 하고 상승시간은 가장 짧게하는 gain값을 실험적으로 구한다. 힘 제어기는 digital controller로 구성하고 sampling time은 rise time에 비해 충분히 작게 하여 analog controller와 거의 특성이 같도록 하였다.

III. 힘 제어 알고리즘

각 다리에 걸리는 힘을 적절히 제어하여 안정상태를 유지하기 위해서는 각 다리에 걸리는 힘의 목표치를 먼저 결정해야 할 필요가 있다. 물체가 정지 상태를 유지하기 위한 조건은 각 방향의 외력의 합이 0 이고, 각 방향의 모멘트의 합도 0 이 되어야 한다. 이 조건을 각각 힘의 평형 조건, 모멘트의 평형 조건이라 한다. 다각 보행 로봇이 정지 상태를 유지하거나 등속 운동을 할 때는 운동에 의한 관성력은 작용하지 않으므로 외력은 중력과 지지하고 있는 다리에 작용하는 지면의 반발력 뿐이다. 따라서 로봇의 무게를 W 라고 하고 i 번째 지지 다리에 가해지는 지면의 반발력을 f_i 라고 하고 좌표 (x_n, y_n) 을 무게 중심 기준으로 하여 설정할 때의 평형 조건을 식으로 쓰면

$$\sum_{i=1}^{i=n} f_i = W \quad \sum_{i=1}^{i=n} x_i f_i = 0 \quad \sum_{i=1}^{i=n} y_i f_i = 0$$

가 된다. 여기서 n 은 지지 다리의 갯수를 나타낸다. 위의 식은 지지하는 다리 전부가 일직선 상에 있는 경우가 아니면 3개의 독립적인 방정식이 된다. 지지 다리가 3개인 경우는 위의 식은 유일한 해가 존재한다. 그러나, 지지 다리가 4개인 경우 위의 식은 무수히 많은 해를 가진다. 이 중에서 선형성이 있는 minimum norm 해는 closed 형태의 해가 존재한다[6]. 이들 해를 목표치로하여 지면에 착지할 때와 몸체를 밀 때, 힘 제어 알고리즘에서 사용한다.

발을 지면에 착지할 경우, 지면에 수직인 방향으로는 착지 전 까지는 위치 제어를 하고 힘의 실제치 f_a 가 일정한 임계치 f_0 를 넘으면 f_{di} 를 힘의 목표치 f_d 로 힘 제어를 하는 알고리즘을 사용 하였다. 이 알고리즘의 특징으로는 착지후에 위치 제어에서 힘 제어로 스위칭 하는것 이외에도 오차가 작을 때 A/D 변환에 의한 오차가 증폭되어 제어기의 성능을 떨어지게 하는 것을 막기 위하여 힘 오차 f_e 가 일정한 값 안에 들어오면 적분 제어기의 계수 k_f 를 줄이는 제어 방법을 사용 하였다. 또 힘 오차가 너무 큰 경우 오차를 줄이기 위해 감자기 가감속이 생기는 것을 방지하기 위하여 적분기 뒷단에 리미터를 부착하였다. 그림 4는 제안된 힘 제어 알고리즘을 흐름도 형태로 나타내었다. 여기에서 f_{di} 는 착지 때의 힘의 목표치, f_{df} 는 착지 후 몸을 밀고 다시 다리를 들 때의 힘의 목표치, f_0 는 임계치, f_a 는 그 순간의 힘의 목표치, f_e 는 힘 오차, k_{f1} , k_{f2} 는 적분기의 계수, θ_{max} 는 리미터 값, T_s 는 샘플링 시간을 나타낸다.

평지 직선 보행을 하면서 몸체를 미는 경우에는 시작점에서의 힘의 목표치가 f_{di} 이고 몸체를 밀고 난후 다시 다리를 들때의 힘의 목표치가 f_{df} 이면

$$f_d = f_{di} + (f_{df} - f_{di}) * \frac{t}{T}$$

$0 < t < T$ T : 미는 시간

의 관계로 주어진다.

f_d 가 계속 변하는 것을 제외하면 그림 4와 동일한 알고리즘이 적용된다.

IV. 실험 및 고찰

실험은 다각보행 로봇이 아직은 완성되지 않은 관계로 한 다리에 대하여 실험 하였다. 본 논문에서는 미국의 Inter-link Electronic사에서 제작한 FSR(Force Sensing Resister)을 힘 센서로 사용했다. FSR은 저항을 이용한 필름 형태의 반도체 센서로 다른 센서에 비해 감도가 좋고 오프 셋(offset)이 거의 없으며, 센싱(sensing)을 위한 hardware가 아주 간단하나, 상당한 비 선형 특성이 있어서 선형화를 위한 hardware나 software가 필요하다. 본 논문에서는 FSR의 특성 곡선을 10kgf 를 기준으로 한 반비례 곡선에 근사화 시켜 간단한 hardware를 이용하여 선형화 시켰다. 또한 발 끝에 부착된 힘 센서가 항상 지면의 수직 반발력을 측정하도록 하기 위해 기구부의 끝에 자체 중량에 의해 항상 수직 방향을 향하도록 발바닥 부분을 제작하고 그 밑에 힘 센서를 붙이고 다시 센서 보호와 다리 자체의 passive compliance를 위해서 고무를 부착하였다. 다리의 끝 부분의 모습은 그림 5이다.

그림 6은 적분기의 계수를 한 가지 값으로 고정시킨 경우의 결과이고 이 경우 몇가지 K_f 값에 대한 t_r 의 값을 구해보면

- $K_f = 5$ 인 경우 $t_r = 0.8$ sec
- $K_f = 10$ " $t_r = 0.6$ sec
- $K_f = 20$ " $t_r = 0.5$ sec
- $K_f = 50$ " 정상 상태 진동

와 같다. 위의 결과에서 알 수 있는 바와 같이 t_r 을 크게 하려고 적분기의 gain을 증가 시켰을 때 $K_f=50$ 에서 정상 상태의 진동이 있는 데 이것은 sensor의 A/D 변환 resolution에 의한 오차가 증폭 된 것이지 unstable 현상은 아니다.

이 진동 문제는 힘 편차가 일정한 값(0.3kgf) 이내로 들어오면 $K_f = 5$ 로 변화시키는 방법에 의해 해결하였다. 적분기의 gain을 0.3kgf에서 k_f 로 바꾸는 경우의 실험 결과는 그림 7과 같고 여기에서 K_f 변화에 따른 t_r 의 값을 구해보면

- $K_f = 5$ 인 경우 $t_r = 0.85$ sec
- $K_f = 10$ " $t_r = 0.6$ sec
- $K_f = 20$ " $t_r = 0.5$ sec
- $K_f = 50$ " $t_r = 0.4$ sec
- $K_f = 100$ " $t_r = 0.4$ sec
- $K_f = 200$ " $t_r = 0.4$ sec

가 된다. 실험 결과에서 알 수 있는 바와 같이 적분기의 gain을 고정 시킬 때 $K_f = 50$ 일 때 생긴 진동 현상이 없어졌고 gain을 200 까지 증가 시켜도 응답 특성에는 별로

변화가 없었다. 즉 지형 상수의 변화가 20에서 200까지 10배 정도 변하는 경우에도 제작된 힘 제어 시스템을 응용할 수 있다.

V. 결론

다각 보행 로버트를 정적 안정성 만을 고려하여 제어 할때 미끄러짐이나 충격 기타 여러 요인 들로 인해 발생할 수 있는 몸체의 흔들림을 줄이기 위하여 힘 g 이가 필요하게 된다. 본 논문에서는 다각 보행 로버트에 적용된 기존의 힘 제어 방법들을 현재 KAIST에서 제작 중인 사각 보행 로버트에 적용 시킬 때 발생 할 수 있는 문제점을 들고 이를 해결할 수 있는 새로운 힘 제어 방법을 제시하였으며 실제 한 다리 시스템에 적용시켜 실험하였다. 실험에서 한 다리인 경우에 생길 수 있는 문제점은 잘 해결되었으나 실제 사각 보행 로버트가 완성되어 적용시킬 경우, 네 다리 시스템의 모델링이 필요하게 되고 각 다리들 사이에서 간섭 현상이 일어나지 않도록 힘 제어를 해야하는 문제점 등이 계속 연구되어야 할 것이다.

참고 문헌

[1] Marc H. Raibert, *Legged Robots That Balance*, The MIT Press, 1986.

[2] D. J. Todd, *Walking Machine : An Introduction to Legged Robots*, Anchor Press, 1985.
 [3] Dennis Ray Pugh, "An Autopilot for A Terrain Adaptive Hexapod Vehicle", Ohio State University, M.S. Thesis, 1982.
 [4] C. A. Klein and R. L. Briggs, "Use of Active Compliance in The Control of Legged Vehicles", *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, Vol. SMC-10, No. 7, pp.393-400, 1980.
 [5] C. A. Klein, K.W. Olson, and D. Pugh, "Use of Force and Attitude Sensors for Locomotion of A Legged Vehicle Over Irregular Terrain", *Int. J. Robotics Res.*, Vol. 2, No. 2, pp.3-17, Summer 1983.
 [6] Orin, D. E., "Supervisory Control of a Multi Legged Robot", *Int. J. Robotics Res.*, Vol. 1, No. 1, Spring 1982.
 [7] C. A. Klein and T. S. Chung, "Force Interaction and Allocation for The Legs of a Walking Vehicle", *IEEE J. Robotics and Automation*, Vol. RA-3, No. 6, December 1987.
 [8] M. Kaneko, K. Tanie and M. N. M. Than, "A Control Algorithm for Hexapod Walking Machine Over Soft Ground", *IEEE J. Robotics and Automation*, Vol. 4, No. 3, June 1988.

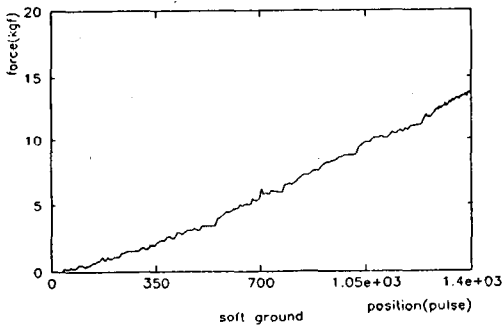


그림 1 soft ground의 특성
 Fig. 1 Characteristics of a soft ground

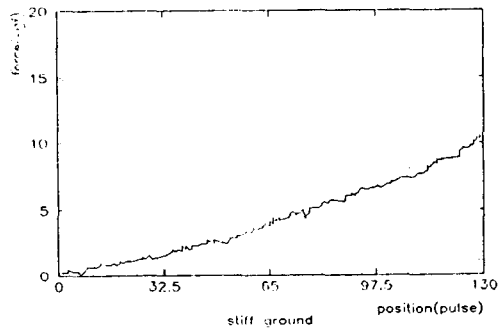
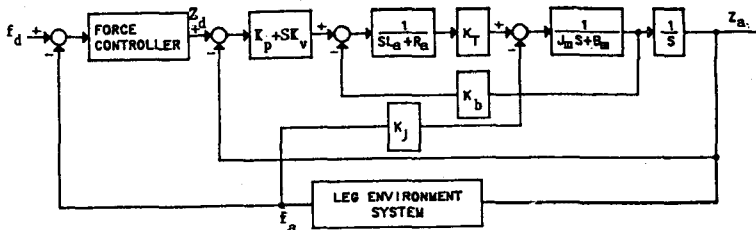


그림 2 stiff ground의 특성
 Fig. 1 Characteristics of a soft ground



여기서 f_d 는 지지 다리에만 입력됨.

그림 3 힘 제어기의 블록 다이어그램
 Fig. 2 Block diagram of the force controller

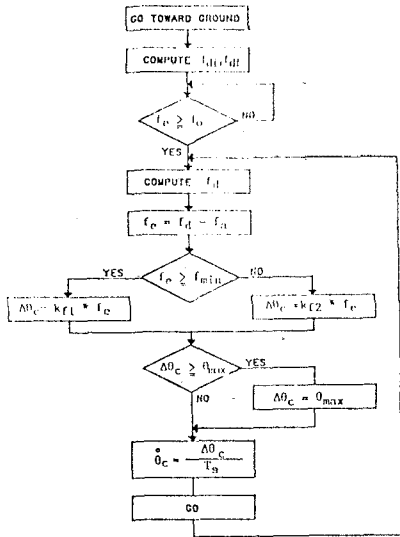


그림 4 힘 제어 알고리즘
Fig. 4 Force control algorithm

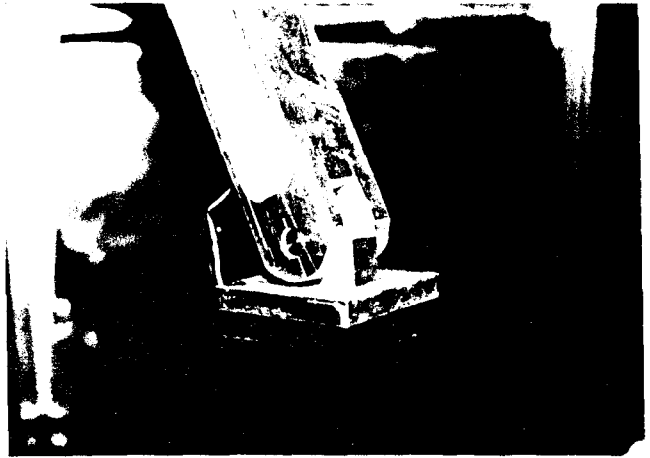


그림 5 발바닥에 부착된 힘 센서의 모습
Fig. 5 Force sensor on foot

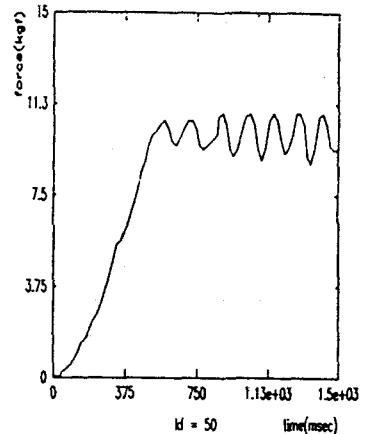
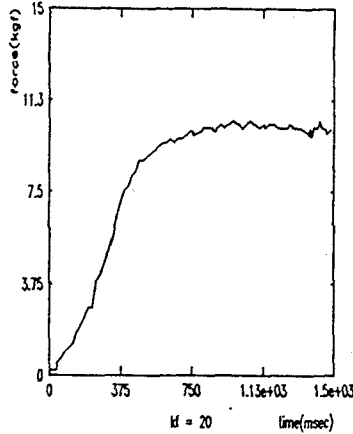
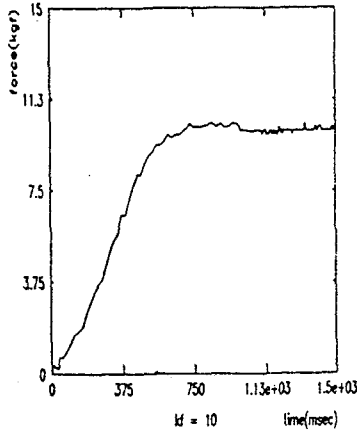


그림 6 힘 제어 실험결과 (k_f 는 고정)
Fig. 6 Experimental results ($k_f = const$)

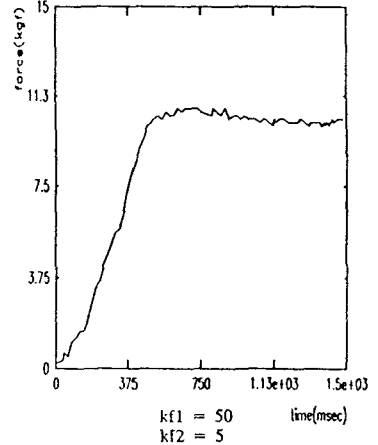
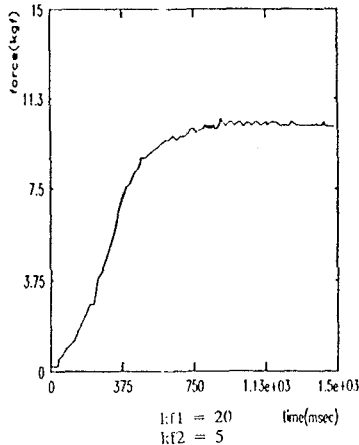
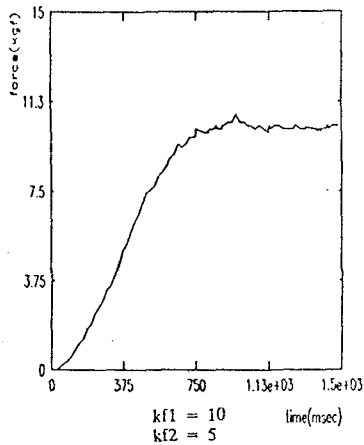


그림 7 힘 제어 실험결과 (k_f 를 가변)
Fig. 7 Experimental results (k_f varing)