

## 힘제어 기반의 틈새 추종 로봇의 제작 및 제어에 관한 연구 : Part II. 힘제어

### Implementation and Control of Crack Tracking Robot Using Force Control : Part II. Force Control

전 풍 우, 정 슬\*

(Poong Woo Jeon and Seul Jung)

**Abstract :** In this paper, experimental studies of force control of the crack tracking robot are presented. The crack tracking robot should maintain constant contact with the road to perform cleaning process of the crack effectively. Regulating desired force on the road requires a sophisticated force control algorithm. Here, two main force control algorithms such as the impedance force control and the explicit force control are used. Performances of two force control algorithms are compared.

**Keywords :** crack sealing robot, impedance force control, explicit force control

#### I. 서론

틈새 추종 로봇의 궁극적인 목적은 도로에 생긴 갈라진 틈을 추종하여 메우는 것이다. 갈라진 틈을 메우는 작업이 전에 선행되어야 할 것이 틈새를 깨끗하게 청소하는 것이다. 틈새에 이물질이나 흙이 있으면 타르로 메운 작업을 할 지라도 단시간 안에 메운 부분이 잘 접촉되지 못하고 떨어져 나가게 되어 작업 효율이 떨어지게 된다. 따라서 도로의 틈새를 추종하며 틈새 안의 이물질을 자동적으로 제거하는 작업은 매우 중요하다.

본 논문에서는 로봇이 자율적으로 틈새를 추종하며 틈새 안의 이물질을 잘 제거할 수 있도록 하기 위해 힘제어를 적용하고자 한다. 위치제어만을 사용하여 브러시로 작업할 경우에 브러시의 마모에 의한 위치정보의 부정확성에 따른 작업의 효율성을 기대하기 어렵다. 따라서 힘제어를 적용할 경우 브러시는 최적의 힘을 항상 노면에 적용하여 항상 일정한 작업 성과를 얻을 수 있게 된다.

로봇의 힘제어 방식은 매우 세련된 로봇 제어기술로서 로봇과 대상체와의 협조 작업시에 반드시 필요한 기술이다 [1,2]. 대표적인 힘제어 기술로는 로봇과 대상사이의 역학관계에 근거한 임피던스 제어방식과 원하는 힘을 직접 제어하는 하이브리드 제어 방식이 있다 [3,4]. 그 외에는 원하는 힘을 직접 제어하지 못하는 임피던스 힘제어 방식의 단점을 보완하고자 많은 변형된 제어방식들이 제안되었다 [5-12]. 두 방식을 결합한 하이브리드 임피던스 방식이 제안되었고 [5,6], 적분기를 사용하여 원하는 힘을 추종할 수 있는 제어 방식이 제안되었다 [7]. 또한 신경회로망을 사용하여 힘제어시 발생하는 모든 불확실성을 보상하는 방식과 적응 제어 방식을 사용하여 원하는 힘추종을 잘 할 수 있도록 하는

제어방식이 제안되었다 [8-11]. 특히 하이브리드 방식의 일종인 explicit 힘제어 방식을 제안하여 힘 오차를 PID 제어를 사용하여 직접 제어하는 방식이 제안되었다 [12].

틈새 추종 로봇은 노면과 일정한 접촉을 유지해야 하므로 노면에 수직인 방향으로 힘제어가 필요하다. 따라서, 본 논문에서는 임피던스 제어 방식과 explicit 힘제어 방식을 적용하여 실험하고자 한다. 임피던스 제어 방식은 노면의 위치를 정확하게 모를 경우 접촉시 발생하는 힘의 오버슈트를 줄일 수 있는 장점이 있는 반면, explicit 힘제어 방식은 접촉시에 오버슈트는 다소 크게 나타날 지라도 노면의 위치를 전혀 모르고 단지 원하는 힘만 제어하는 것이 필요한 경우에 매우 편리하게 사용할 수 있다. 이는 실제적인 실험에 있어서 임피던스 방식은 로봇의 위치를 알아야 하지만 explicit 힘제어 방식은 로봇의 위치를 전혀 모르고 단지 힘 오차에 의해 구동될 수 있다는 특성을 나타낸다. 본 논문에서는 이러한 두 가지 형태의 힘제어 방식을 실험하여 그 결과를 비교하고 분석하였다.

#### II. 힘제어

##### 1. 임피던스 힘제어

임피던스(impedance) 힘 제어 방식은 Salisbury의 강성제어(stiffness control) 방식의 연장으로 Hogan의 전초적 연구 이후에 많은 연구가 되어 왔고, 계속적으로 연구되고 있는 대표적인 힘 제어 방식의 하나이다. 대상을 누르는 로봇 팔 끝의 힘  $F$ 은 로봇과 대상과의 동적 관계, 즉 임피던스 함수를 통해 위치  $X$ 와 속도  $\dot{X}$ 에 의해 조절된다. 따라서 임피던스 힘 제어 방식의 이점은 로봇팔 끝과 대상과의 동적 관계를 고려하는 것이라 접촉 시 생기는 충격힘의 응답을 제어할 수 있다는 것이고, 단점은 팔 끝의 힘을 직접 조절하는 것이 아니라 임피던스 함수에 의해 간접적으로 조절되기 때문에 원하는 힘을 정확하게 추종하는 것이 어렵다는 것이다.

카테시안 공간에서의 로봇 동역학 식은 다음과 같다.

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2004. 1. 2., 채택확정 : 2004. 9. 4.

전풍우, 정슬 : 충남대학교 메카트로닉스공학과

(windrainer@hanmail.net/jungs@cnu.ac.kr)

※ 본 논문은 2002년도 학술진흥재단 지방대 육성지원 KRF-2002-02-D00076에서 지원하여 연구하였음.

$$\hat{D}^* X + \hat{h}^* + F_f^* = F - F_e \tag{1}$$

여기서  $\hat{D}^*$ 는 카테시안 관성 행렬이고  $\hat{h}^*$ 는 카테시안 코리올리스, 원심력, 중력 힘벡터이고  $F_f^*$ 는 마찰력벡터,  $F$ 는 적용된 힘이고,  $F_e$ 는 외부로부터의 힘벡터이다. (1)의 제어 입력  $V = \dot{X}$ 는 다음과 같다.

$$V = \dot{X}_r + M^{-1}(B E + K E - F_e) \tag{2}$$

여기서  $E = X_r - X$ ,  $X_r$ 은 주어진 경로이고,  $X$ 는 실제 경로이다.  $M$ 는 관성 이득 행렬,  $B$ 는 댐핑 이득 행렬,  $K$ 는 강성 이득 행렬이다.

카테시안 공간에서의 제어 법칙은 다음과 같다.

$$F = \hat{D}^* V + \hat{h}^* + F_e + F_f^* \tag{3}$$

(3)과 (1),(2)를 연립하면 다음과 같은 임피던스 함수를 얻게 된다.

$$F_e = M E + B E + K E \tag{4}$$

정상상태에서 힘은  $F_e = K E = K(X_r - X)$  이므로 주어진 경로  $X_r$ 과 강성이득  $K$ 를 정함에 따라서 힘의 크기가 결정됨을 알 수 있다.

간단하게 하기 위해 (4)로부터 한축만 고려하여  $k=0$ 라 놓고 원하는 힘  $f_d$ 을 빼면, 다음과 같다.

$$f_e - f_d = m \dot{\epsilon} + b \epsilon \tag{5}$$

여기서  $\epsilon = x_e - x$ 이고  $x_e$ 는 대상체의 위치를 나타낸다. 힘  $f_e = -k_e \epsilon$ 로 표현이 되며,  $k_e$ 는 강성도를 나타낸다. 따라서, (5)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$-f_d = m \dot{\epsilon} + b \epsilon + k_e \epsilon \tag{6}$$

(6)은 오차  $\epsilon$ 에 대한 이차 방정식으로 점근적으로 안정함을 알 수 있다. 실제로 물체의 강성  $k_e$ 를 정확하게 모를지라도 정상상태에서  $f_e = f_d$ 로 안정하게 된다. 그렇지만 만약 대상 위치  $x_e$ 가 정확하지 않다면, 즉 대상의 위치에 불확실성이 있다면 유일해  $f_e = f_d$ 를 안정된 상태에서 보장할 수 없다.

실제적인 경우를 고려하면 대상의 위치를 정확하게 측정하기는 어렵다. 따라서  $\epsilon' = \epsilon + \delta x_e$ 로 정의하고, (5)에서 대상위치의 불확실성을 가진 식으로 바꾸기 위해  $\epsilon$ 를  $\epsilon'$ 으로 대체하면 다음과 같이 된다.

$$m \dot{\epsilon}' + b \epsilon' = f_e - f_d \tag{7}$$

$\delta x_e$ 는 제어 설계자에 의해 어느 정도 설정될 수 있는 대

상 위치의 부정확성이다.

$x_e$ 가 상수이고  $\dot{x}'_e$ 도  $\dot{x}'_e - x_e > 0$  을 만족하는 상수일 때, 즉 대상의 모양이 평평한 표면이라면 정확한 힘의 추종을 쉽게 이룰 수 있다. 이런 경우, 즉  $\dot{x}'_e = \ddot{x}'_e = 0$  이므로 (7)은 다음과 같이 된다.

$$m \ddot{x} + b \dot{x} = f_d - f_e \tag{8}$$

그러므로 정상상태(steady state)에서는 유일한 해인  $f_e = f_d$ 를 얻게 된다. 그렇지만  $f_d$ 와  $x_e$ 가 시간에 따라 변할 때, 식(8)에 나타난 것처럼 힘추종 오차가 발생된다. 즉 대상의 모양이 평면이 아닐 경우에 가장 간단하게 대상의 위치를 가정하는 방법은 대상의 형태를 평면으로 가정해  $x_e = \text{상수}, \dot{x}_e = 0$ 로 설정하는 것이다. (8)에 나타난 힘의 오차  $m \ddot{x} + b \dot{x}$ 를 제거하기 위해 힘의 오차에 따라 on-line 으로 조절되어지는 다음과 같은 적응제어방식을 사용한다.

$$m \ddot{\epsilon}' + b(\dot{\epsilon}' + w) = f_e - f_d \tag{9}$$

여기서  $w(t)$ 는 힘의 오차함수로 구성된 업그레이드 함수는 다음과 같다.

$$w(t) = w(t-\lambda) + \eta \frac{f_d(t-\lambda) - f_e(t-\lambda)}{b} \quad \eta > 0 \tag{10}$$

여기서  $\eta$ 는 적응변수이고  $\lambda$ 는 제어기의 샘플링 시간이다. 적응 이득  $\eta$ 는 응답의 수렴속도와 정확성에 영향을 미치므로 이득 값에 따라 성능이 달라지게 된다. 안정된 적응 이득의 영역을 조사하여 안정도 조건을 만족시키는  $\eta$ 의 영역을 다음과 같이 구할 수 있다[8]. 샘플링  $\lambda$ 이 매우 빠르다고 가정하면

$$0 < \eta < \frac{b\lambda}{b\lambda + m} \approx \frac{b\lambda}{m} \tag{11}$$

(11)에서 보듯이 적응변수  $\eta$ 는 샘플링 시간과 임피던스의 관성 이득과 댐핑 이득과의 관계가 있음을 알 수 있다.

본 논문에서는 노면에 수직하게 z 축에 힘제어가 필요하므로 간단하게 제어기를 설계할 수 있다. 그림 1은 실제 적용된 임피던스 제어구조를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 오직 z축 방향의 힘만 제어하기 때문에 시스템의 동력학은 간단한 선형 시스템으로 고려할 수 있다. 이때 제어 법칙은 (9)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u = \dot{x}'_e + \frac{1}{m} [b(\dot{\epsilon}' + w) + f_d - f_e] \tag{12}$$

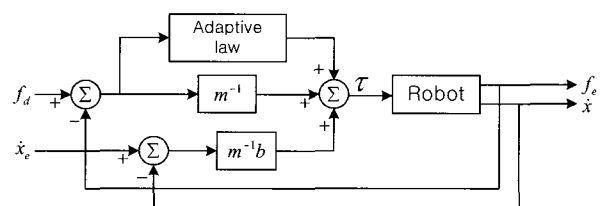


그림 1. 임피던스 제어 구조.  
Fig. 1. Structure of impedance control.

III. Explicit PID 힘제어

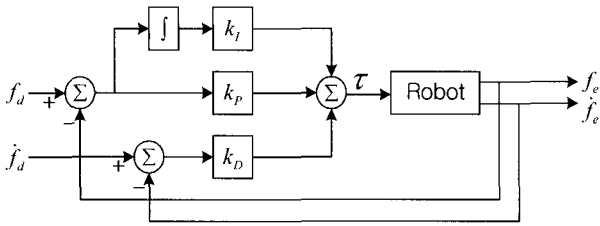


그림 2. PID 제어 구조.

Fig. 2. Structure of PID control.

Explicit PID 제어 방식은 PID 제어 법칙에 따라 힘 오차를 직접적으로 최소화 시킨다. 이처럼 목표 값을 직접 제어할 수 있다는 점에서 하이브리드 방식과 유사하다고 할 수 있다. 본 방식의 제어 법칙은 단지 힘 오차에 의해 형성되므로 외부 환경의 정확한 위치에 관한 정보가 필요치 않다는 점에서 매우 편리한 방법이라 할 수 있다. 그러나, 외부 환경과의 접촉이 일어나는 순간에서는 매우 큰 오버슈트가 발생할 수도 있는 단점이 있다. 제어 법칙은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau = k_p e(t) + k_d \dot{e}(t) + k_i \int e(t) dt \quad (13)$$

단,  $e = f_d - f_e$  이고  $f_d$  는 목표 값,  $f_e$  는 힘 센서로부터의 실제 값이다.  $k_p, k_d, k_i$  는 제어 이득이다. 그림 2는 일반적인 explicit PID 힘제어 구조를 나타낸 블록 다이어그램이다.

IV. 실험

1. 실험 환경 설정

그림 3은 실제 실험 환경을 나타낸 것이다. 외부 경로는 탄성도를 모르는 나무와 쇠로 각각 임의의 형태로 만들어져 있다. 로봇은 이러한 경로를 일정한 힘의 크기를 유지하면서 이동하도록 실험하였다. 즉, 외부 환경에 대하여 중력 방향의 힘만을 제어하도록 하였다. 힘의 크기를 검출하기 위해 JR<sup>3</sup> 힘 센서가 사용되었고, 외부 환경과의 마찰을 줄이기 위해 로봇의 끝단에는 롤러를 장착하였다. 로봇의 구동은 DC 모터에 의한 ball screw 방식을 사용하여 정지할 수 있도록 하였으며, 구조의 특성상 매우 선형적으로 작동한다. 따라서, 로봇의 동역학을 고려하지 않고 직접 제어 법칙 (12)와 (13)을 사용하였다.

2. 실험 결과

2.1 나무판에 대한 힘 제어

나무판에 대하여 PID 제어, 그리고 임피던스 제어 방식을 각각 적용하여 실험하였다. 또한 원하는 힘의 값도 5N, 20N 등으로 설정하여 실험하였다. 본 실험에서는 로봇의 초기 위치가 환경과 접촉이 이루어진 상태로 설정하였다. 나무판의 위치는 정확하게 알지 못하며 곡선 모양을 나타낸다.

2.1.1 PD 제어

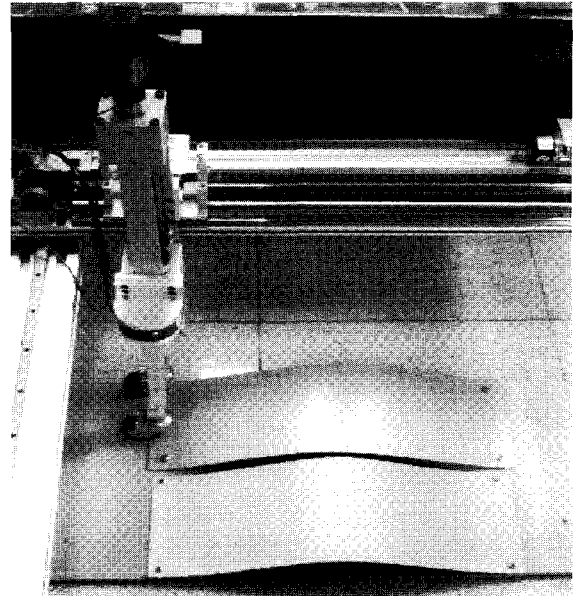


그림 3. 힘 제어 환경.

Fig. 3. Environment of force control.

①  $f_d = 5N$  ( $k_p = 20, k_d = 0.2$ )

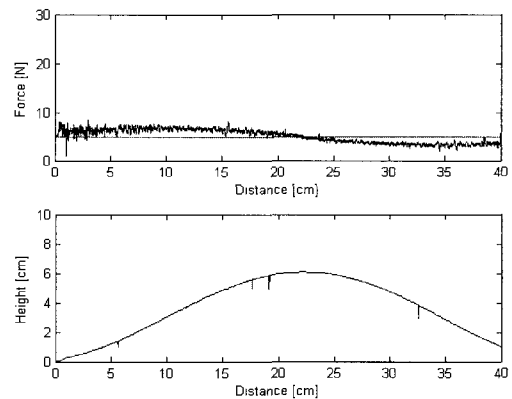


그림 4. 나무판에 대한 PD 제어 결과.

Fig. 4. Results of PD control for wood plate.

②  $f_d = 20N$  ( $k_p = 20, k_d = 0.2$ )

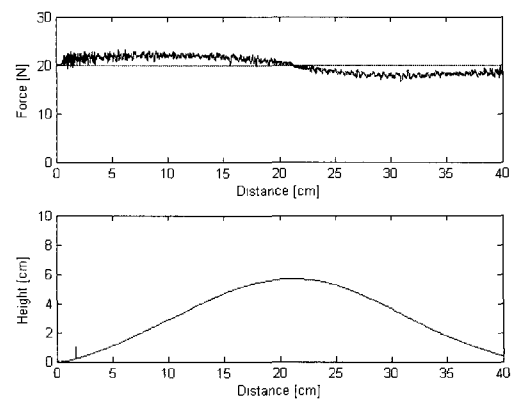


그림 5. 나무판에 대한 PD 제어 결과.

Fig. 5. PD control for wood plate.

2.1.2 PID 제어

$f_d = 20\text{N}$  ( $k_p = 20, k_d = 0.2, k_i = 0.2$ )

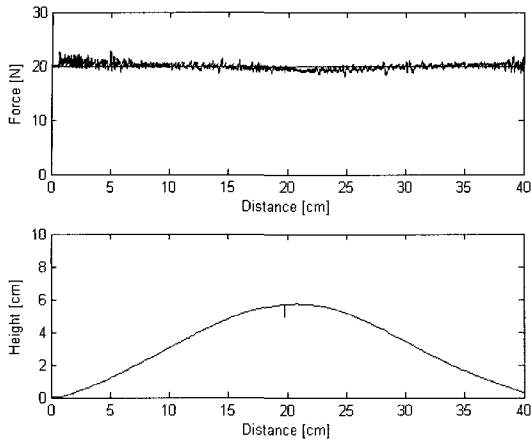


그림 6. 나무판에 대한 PID 제어 결과.  
Fig. 6. PID control for wood plate.

①  $f_d = 5\text{N}$  ( $m = 0.1, b = 1, \eta = 0.05$ )

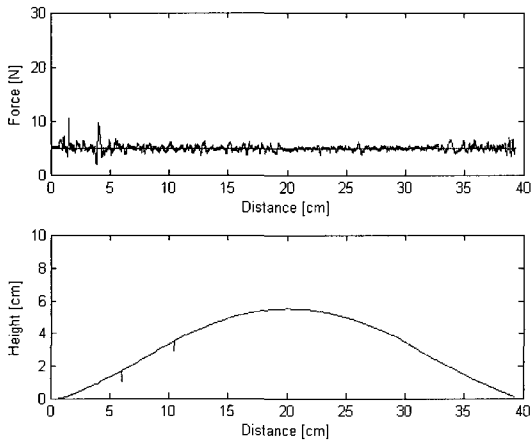


그림 7. 나무판에 대한 임피던스 제어 결과.  
Fig. 7. Impedance control for wood plate.

②  $f_d = 20\text{N}$  ( $m = 0.1, b = 1, \eta = 0.05$ )

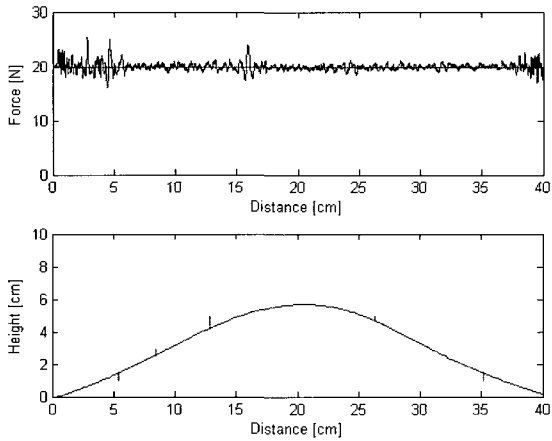


그림 8. 나무판에 대한 임피던스 제어 결과.  
Fig. 8. Impedance control for wood plate.

③  $f_d = 20\text{N}$  ( $m = 0.1, b = 10, \eta = 0.05$ )

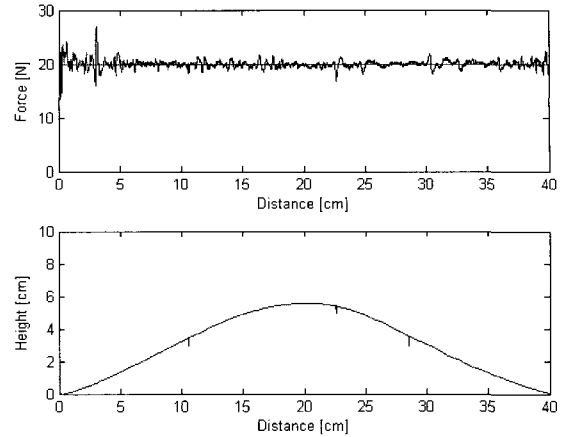


그림 9. 나무판에 대한 임피던스 제어 결과.  
Fig. 9. Impedance control for wood plate.

그림 4, 5는 목표 값을 각각 5N, 20N으로 설정한 후 실험한 결과로서 PD 제어만을 수행한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 모든 경우에 유사하게 힘추종에 있어서 오차가 발생함을 볼 수 있는데, 이는 적분 제어를 수행하지 않고 단지 PD 제어만을 수행하였기에 발생한 것이다. 각 그림의 아래 부분은 실제 로봇이 추종한 경로를 나타낸 것으로 환경의 모습이 그대로 나타남을 볼 수 있다.

그림 6은 이러한 오차를 최소화하기 위해 PID 제어를 수행한 결과로서 그림에서 보는 바와 같이 성능이 많이 향상되었음을 확인할 수 있다. 적분 이득값의 사용으로 오차가 많이 줄어들었다.

2.1.3 임피던스 제어

앞의 실험과 같은 환경에서 실험하였다.

그림 7,8은 임피던스 변수를 각각  $m = 0.1, b = 1, \eta = 0.05$ 로 설정하고 목표 값을 5N, 20N으로 설정한 후 실험한 결과로서 모든 경우에 대해 오차없이 좋은 성능을 보임을 알 수 있다. 그림 9는 임피던스 변수 중  $m$ 과  $\eta$ 는 이전의 것과 동일하게 설정하고  $b$ 의 값을 10으로 설정한 후 실험한 결과로서 이전의 결과와 유사한 성능을 보임을 확인할 수 있다. 이러한 변수의 변화에 대한 시스템의 안정성 문제는 (11)로 부터 구하였다. 적응이득  $\eta$ 는 샘플링 시간과 임피던스의 관성 이득  $m$ 과 댐핑이득  $b$ 와 관련이 있음을 알 수 있는데, 실제 실험에서 적용된 임피던스 변수를 수식에 대입해 보면 두 가지 경우가 모두 수식을 만족함을 확인할 수 있다. 샘플링 시간이  $\lambda = 0.01$ 초 이고 각 이득값  $m = 0.1, b = 1$ 을 대입하면 적응 이득의 안정성 영역을 구할 수 있다.  $0.05 < \frac{1 \cdot 0.01}{1 \cdot 0.01 + 0.1} = 0.09$ . 마찬가지로  $b = 10$ 일때 적응이득의 영역은 다음과 같다.

$$0.05 < \frac{10 \cdot 0.01}{10 \cdot 0.01 + 0.1} = 0.5.$$

이러한 임피던스 제어 결과는 이전의 explicit PID 제어 결과와 매우 유사함을 확인할 수 있다.

2.2 철판에 대한 힘 제어

철판에 대하여 PID 제어, 그리고 임피던스 제어 방식을 각각 적용하여 실험하였다. 또한 목표 값도 5N, 20N 등으로 설정하여 실험하였다. 본 실험에서도 이전의 실험과 마찬가지로 로봇의 초기 위치가 환경과 접촉이 이루어진 상태로 설정하였다. 철판의 모양도 곡선으로 되어 있어 정확한 위치를 모른다.

그림 10, 11은 목표 값을 각각 5N, 20N으로 설정한 후 PD 제어만을 수행한 것이다. 단지 PD 제어만을 수행하였기에 나무판에서의 실험 결과와 마찬가지로 모든 경우에 오차가 발생함을 볼 수 있다. 하지만 로봇이 안정하게 접촉을 유지하는 것을 볼 수 있다. 그림 12는 PID 제어를 수행하여 이러한 오차를 최소화한 실험 결과이다. 그러나, 전체적으로는 나무판에서의 실험 결과에 비해 오실레이션이 많이 발생함을 확인할 수 있는데, 이는 나무판에 비해 철판의 강성도가 크기 때문이다.

2.2.1 PD 제어

① 목표 값 : 5N ( $k_p = 20, k_d = 0.2, k_i = 0$ )

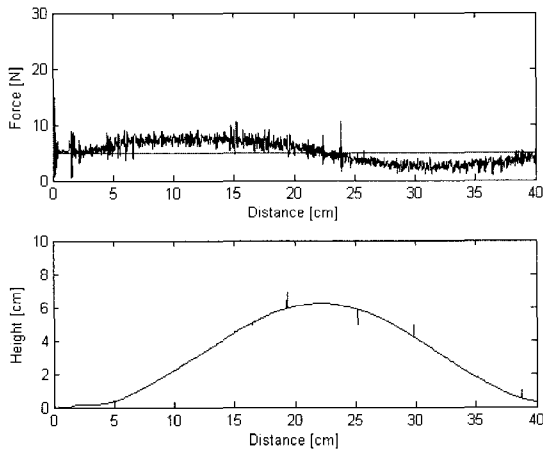


그림 10. 철판에 대한 PD 제어 결과.  
Fig. 10. PD control for iron plate.

②  $f_d = 20N$  ( $k_p = 20, k_d = 0.2, k_i = 0$ )

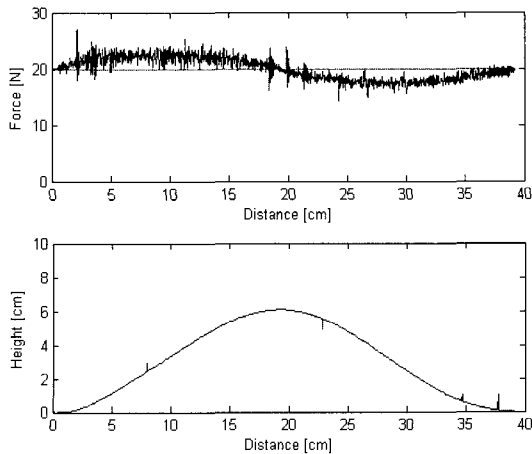


그림 11. 철판에 대한 PD 제어 결과.  
Fig. 11. PD control for iron plate.

2.2.2 PID 제어

$f_d = 20N$  ( $k_p = 20, k_d = 0.2, k_i = 0.2$ )

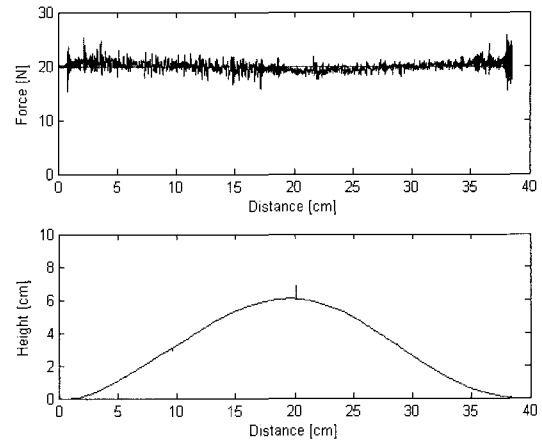


그림 12. 철판에 대한 PID 제어 결과.  
Fig. 12. PID control for iron plate.

2.2.3 임피던스 제어

①  $f_d = 5N$  ( $m = 0.1, b = 1, \eta = 0.05$ )

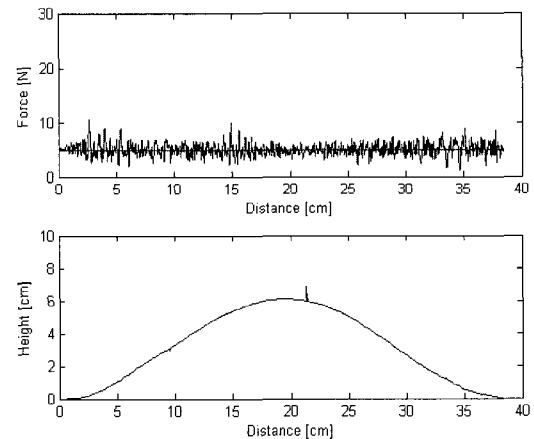


그림 13. 철판에 대한 임피던스 제어 결과 (1).  
Fig. 13. Results of impedance control for iron plate (1).

②  $f_d = 20N$  ( $m = 0.1, b = 1, \eta = 0.05$ )

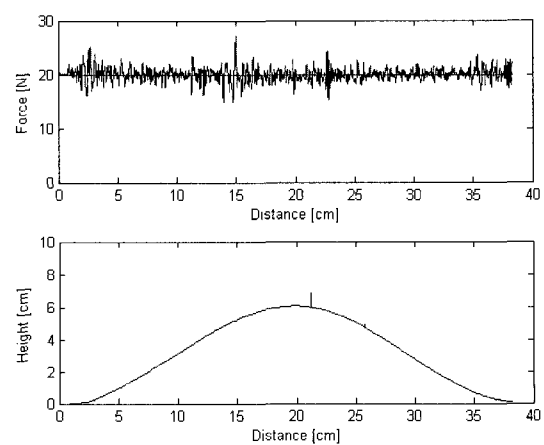


그림 14. 철판에 대한 임피던스 제어 결과 (3).  
Fig. 14. Results of impedance control for iron plate (3).

본 실험은 철판에 대한 임피던스 제어 실험 결과로서 그림 13과 14는 임피던스 변수를 각각  $m = 0.1$ ,  $b = 1$ ,  $\eta = 0.05$  로 설정하고 목표 값을 5N, 20N으로 설정한 후 실험한 결과로서 나무판에서의 실험 결과와 마찬가지로 모든 경우에 대해 오차 없이 좋은 성능을 보임을 알 수 있다. 나무판의 결과와 비교해보면 전체적으로 오실레이션이 많이 발생하는데, 이는 나무판에 비해 철판의 강성도가 크기 때문으로 위의 철판에 대한 PID제어의 결과와 같은 이유이다.

2.3 나무판과 철판에 대한 힘 제어

다음으로는 나무판과 철판에 대해 연속적으로 힘 제어를 수행해 보았다. 최초 접촉시의 성능을 확인하기 위해 로봇의 초기 위치를 외부 환경으로부터 2cm 정도의 거리를 주어 설정하였다. 전체 수행 시간은 약 2분 정도이고 PID 제어와 임피던스 제어를 수행해 그 성능을 비교해 보았다.

그림 15는 전체 경로에 대한 PID 제어 결과로서 나무판과 철판에 대해 동일한 제어 이득을 적용하였다. 제어 구조

2.3.1 PID 제어 ( $f_d=20N$ ,  $k_p=20$ ,  $k_d=0.2$ ,  $k_i=0.2$ )

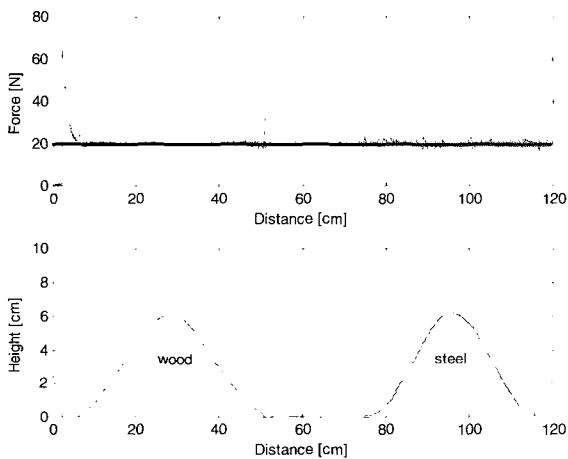


그림 15. 전체 환경에 대한 PID 제어 결과.  
Fig. 15. Results of PID control for total environment.

2.3.2 임피던스 제어 ( $f_d=20N$ ,  $m=0.1$ ,  $b=10$ ,  $\eta = 0.05$ )

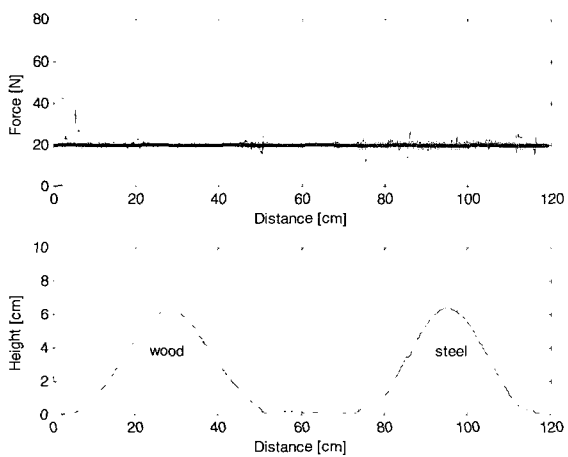


그림 16. 전체 환경에 대한 임피던스 제어 결과.  
Fig. 16. Impedance control for total environment.

의 특성상 접촉 초기에 비교적 큰 오버슈트가 발생함을 알 수 있다. 그리고 각각의 경로의 처음과 끝 부분에서도 오버슈트가 발생함을 알 수 있다. 또한 그림에서 보는 바와 같이 탄성계수의 차이에 따른 나무판과 철판에서의 제어 성능이 다르게 나타남을 확인해 볼 수 있다. 전체적으로는 오차 없이 좋은 성능을 보임을 확인할 수 있었다.

그림 16은 전체 경로에 대한 임피던스 제어 결과를 나타낸 것이다. 역시 접촉 초기에 큰 오버슈트가 발생하였지만 PID 제어 결과에 비해 비교적 작은 값이라 할 수 있다. 전체적인 성능은 PID 제어결과와 유사한 성능임을 알 수 있다. 임피던스 제어 방식의 경우에는 PID 제어 방식보다 접촉 힘에서 나타나는 오버슈트가 상대적으로 작음을 볼 수 있었다.

V. 결론

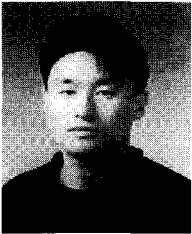
본 연구에서는 틈새를 인식하고 추종해가는 이동 로봇을 제작하였다. Z축에는 힘센서를 장착하여 노면과의 접촉을 원하는 만큼 조절할 수 있었으며, 힘제어를 위한 알고리즘으로 임피던스 제어 방식과 PID 제어방식을 각각 사용하여 실험하였다. 두 제어 방식에 있어서 매우 좋은 결과를 얻었으며, 성능은 비슷하였다. 다만 임피던스 방식이 접촉에서의 힘의 오버슈트가 작게 나타났다. 실제 구현에 있어서 대상의 위치 정보가 필요 없는 explicit PID 제어 방식이 더 간단하였다.

이러한 틈새 추종 이동 로봇이 향후 맞대기 용접을 하는 로봇이나 틈새에 있는 먼지를 청소하는 로봇, 도로의 틈새를 봉합하는 로봇 및 이동 가능한 3차원 데이터를 얻는 장치 같은 다른 분야로 응용도 가능할 것이며, 본 연구를 통해서 그 가능성을 확인해 볼 수 있었다.

참고문헌

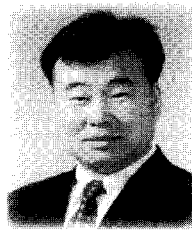
- [1] P. W. Jeon, S. Jung, M. K. Jeong, M. K. Noh, "Tracking control of blind mobile robot using force sensor", *International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 2077-2082, June 2001, Busan, Korea.
- [2] S. Jung and P. W. Jeon, S., "Force guided tracking control of blind mobile robot", *International Symposium on Robotics and Applications*, pp. 148-151, November 2001, Tampa, USA.
- [3] N. Hogan, "Impedance control: an approach to manipulator, part i, ii, iii", *ASME Journal of Dynamics Systems, Measurements, and Control*, vol. 3, pp. 1-24, 1985.
- [4] M. Raibert and J. Craig, "Hybrid position/force control of manipulators", *ASME J of Dynamic Systems, Measurements, and Control*, vol. 102, pp. 126-133, 1981.
- [5] R. Anderson and M. W. Spong, "Hybrid impedance control of robotic manipulators", *IEEE Conference on Robotics and Automations*, pp. 1073-1080, 1987.
- [6] G. J. Liu and A. A. Goldenberg, "Robust hybrid impedance control of robot manipulators", *Proc. IEEE Conference on Robotics and Automations*, pp. 287-292,

- 1991.
- [7] T. Lasky and T. C. Hsia, "On force tracking impedance control of robot manipulators", *Proc. of IEEE Conference on Robotics and Automations*, pp. 274-280, 1991.
- [8] S. Jung and T. C. Hsia, "Neural network impedance force control of robot manipulators", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 45, no. 3, pp. 451-461, June, 1998.
- [9] S. Jung and T. C. Hsia, "Adaptive force tracking impedance force control of robot for cutting process", *IEEE Conference on Robotics and Automations*, pp. 1800-1805, Detroit, USA, May, 1999.
- [10] S. Jung and T. C. Hsia, "Robust neural force control scheme under uncertainties in robot dynamics and unknown environment", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, pp. 403-412, vol. 47, no. 2, April, 2000.
- [11] R. Colbaugh, H. Seraji, and K. Glass, "Direct adaptive impedance control of robot manipulators", *Journal of Robotics Systems*, vol. 10, pp. 217-248, 1993.
- [12] H. Seraji, "Adaptive admittance control: an approach to explicit force control in compliant motion", *Proc. IEEE Conference on Robotics and Automations*, pp. 2705-2712, 1994.



전 봉우

1975년 12월 17일생. 2001년 충남대 메카트로닉스공학과 졸업. 2003년 동 대학 석사졸업. 현재 원자력 연구소 석사 후 연구원. 관심분야는 로봇 설계 및 제작, 하드웨어 제작, 힘제어 알고리즘 응용.



정 슬

1964년 9월 11일생. 1988년 미국 웨인 주립대 전기 및 컴퓨터 공학과 졸업. 1991년 미국 캘리포니아 대학 데이비스 석사. 1996년 동 대학 박사(로봇 전공). 1997년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 부교수. 관심분야는 지능 시스템 및 감성 공학, 필드 로봇 및 제어, 임베디드 지능 제어기 설계.