

# 이득 설계가 간단한 선형전동기 2자유도 PID 위치제어기 구현

## Implementation of the two-degree-of freedom PID Position Controller for Linear Motor Drive with Easy Gain Adjustment

하 홍 곤\*, 이 창 호\*\*

Hong-Gon Ha\*, Chang-Ho Lee\*\*

### 요 약

최근, 반도체장비, 공구이송장비 그리고 CNC같은 여러 산업분야에 선형기계의 응용이 크게 증가하고 있다. 그러나 선형전동기는 진동특성을 가지고 있다. 그러므로 이러한 응용분야에서 정상 및 과도응답상태에서 고성능 위치제어가 필요하게 된다. 본 논문에서 간단하면서도 강력한 위치제어법을 2자유도 PID제어기를 이용하여 제안하였다. 이 기법은 과도현상없이 선형기계를 구동할 수 있는 잇점과 간단한 이득 동조를 할 수 있다. 일반적인 PID 제어기에 비해서 2자유도 제어기를 사용한 선형 전동기의 제어계의 성능 향상이 논의 되었다. 그리고 시뮬레이션의 결과로 위치제어계의 응답에서 과도응답과 기동특성의 향상, 그리고 불필요한 진동성분의 제거에 유효함을 확인하였다.

### Abstract

Recently, the application of the linear machine for industrial field is remarkably increased, especially for the gantry machine, machine tool system and CNC. However a linear motor remains the vibrational characteristic itself therefore, In these application fields, high position control performance is essentially required in both the steady and the transient states. In this paper, the design method for a position control is proposed by using the two-degree-of freedom PID controller. This method has great features for the linear machine drives such as no over-shoot phenomena and single gain tuning strategy. By comparison with conventional PID controller, the improvement of performance of a linear motor control system using two degrees of freedom controller are discussed. Through the simulation results, the usefulness of the proposed algorithm is proved. With the simulation results, it was made clear that the introduction of two degrees of freedom controller designed by the proposed method not only improves the over shoot and starting characteristic of response but also removes the undesirable characteristic variation.

**Keywords :** Position Control PID controller two-degree-of freedom PID controller.

### I. 서 론

현대 산업현장에서는 운용자 및 사용자들의 여러 가지 요구조건을 신속·정확하게 충족시킬 수 있는 자동화 설비의 개발에 대한 필요성이 자동화의 가속화 및 고속화, 고정도와 고정밀의 제어를 요구하게 된다.<sup>(1)</sup> 반도체의 공정장비나 CNC 등과 같은 직선왕복운동을 필요로 하는 여러 분야에서 이러한 요구를 만족시키기 위하여 체인이나 기어 같은 기계적 변환장치 없이도 직선왕복운동이 가능한 선형전동기의 사용이 점차 증가하고 있다. 이 선형전동기는 전

기적인 힘으로부터 직선왕복운동을 하는데 필요한 추력을 직접 발생시키기 때문에 가속성분을 쉽게 얻을 수 있으며 고정밀의 위치제어가 가능하다는 이점을 가지고 있다.<sup>(2)</sup> 그러므로 이 선형전동기는 고분해 속도 센서나 속도 케이스 같은 메카니즘을 사용하지 않고 제어계를 최소화 또는 간단화하기 위하여 위치제어계의 구동원으로 사용한다.<sup>(3)</sup>

이러한 위치제어계에서 제어가 용이하고 성능이 양호한 PID제어기가 많이 사용되고 있으나 출력이 목표치를 추종하도록 PID제어기의 계수들을 조정하면 외란 제어 시 난조가 발생하게 되고, 외란에 강연하도록 계수들을 설정하면 목표치 추종 시 과도현상이 발생하게 되어<sup>(1)</sup> 계의 파라미터가 어떤 조건에 의해서 변동하는 경우 계 전달함수의 극점이 변동하게 되므로 안정도가 감소하고 과도현상이 발생하게 된다. 이러한 과도현상을 억제하고, 외란 인가 시 외란에 강연한 제어기가 필요하게 된다.<sup>(4)</sup> 일반적으로 제어계에서 제어에 대한 자유도는 독립적으로 조정할 수 있

\*동의대학교 전자공학과 \*\*경남공업고등학교

논문 번호 : 2007-1-6 접수 일자 : 2007. 2. 1

심사 완료 : 2007. 3. 29

※이 논문은 2006년도 동의대학교 학술연구비 지원을 받아 연구된 것임

는 폐 루프의 전달함수의 수로 결정된다.

그러므로 목표치 추종 시 과도현상 및 외란억제에 대하여 2자유도의 제어기법이 이용되고 있다.<sup>(3,5,6)</sup>

본 논문에서는 고속 고 정밀 제어동작이 필요로 하는 선형전동기를 구동 원으로 하는 위치제어계에 적용하기 위해서 간단하면서도 실용적이고 강력한 새로운 위치 제어기를 제안한다. 제안한 제어기는 실제 산업용 시스템에 적용 가능성을 높이기 위한 궤환 형 2자유도 PID 제어기이다.

이 제안한 제어기를 이용한 제어계의 전달함수를 영점-극점의 소거로 1차 지연요소가 되도록 하였다.

1차 지연요소가 시정수에 의해서 PID제어기의 계수 및 2자유도 비례 및 미분계수가 조절되도록 하였다. 그리고 시뮬레이션의 결과로 제어기의 유효성을 확인하였다.

## II. 2자유도 PID제어계의 설계

### 2.1 2자유도 PID 위치제어기의 원리

제어기  $C_1(S)$ 에 의해서 제어대상  $G(S)$ 를 제어하는 제어계에서 속응성 및 외란에 의한 계의 응답특성을 제어기  $C_2(S)$ 를 이용하여 개선시키기 위한 궤환형 2자유도 제어계의 구성이 그림 1이다.

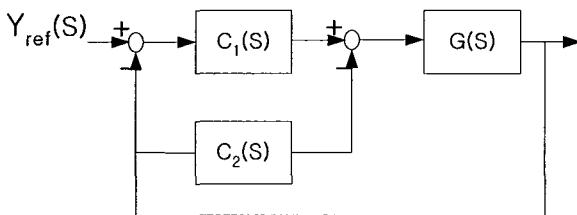


그림 1. 2자유도 PID 제어계

Fig. 1. 2DOF PID Control system

그림1에서  $Y_{ref}(S)$ 는 기준입력(위치),  $Y(S)$ 는 제어기의 출력위치 그리고  $G(S)$ 는 제어대상의 전달함수이다. 이 그림1에서 계의 전달함수  $G_C(S)$  및 감도  $S_G$ 는 다음과 같다.

$$G_C(S) = \frac{Y(S)}{Y_{ref}(S)} = \frac{C_1 G}{1 + (C_1 + C_2) G} \quad (1)$$

$$S_G = \frac{1}{1 + (C_1 + C_2) G} \quad (2)$$

식(2)에서  $C_1(S)$  및  $C_2(S)$ 를 다음과 같이 설정한다.

$$C_1(S) = \frac{1}{1+\alpha} K_p + \frac{K_i}{S} + \frac{1}{1+\beta} K_d S \quad (3)$$

$$C_2(S) = \frac{\alpha}{1+\alpha} K_p + \frac{\beta}{1+\beta} K_d S \quad (4)$$

위의 식(3)과 식(4)에서  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 2자유도 계수로 외란억제 비례 및 미분 계수이다. 그리고  $C_1(S) + C_2(S)$ 는 일반적인 PID제어기가 되며 이  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 감도에 무관하다. 일반적으로 궤환 형 2자유도 PID 제어계에서 이  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 0에서 1 까지의 값이 되도록  $C_1(S)$  및  $C_2(S)$ 를 정의하고 있으나<sup>(6)</sup> 식(3)과 (4)와 같이 하여  $\alpha$ 와  $\beta$ 의 범위가

$$0 \leq \alpha, \beta \leq \infty \quad (5)$$

가 되도록 하였다.

### 2.2 제어계의 계수 유도

#### 1) 선형전동기 및 계의 전달함수

일반적으로 선형전동기의 기계에 대한 수학적인 모델링은 다음과 같다.

$$Y = \frac{1}{S(MS+B)} (kI_m - f_d) \quad (6)$$

식(6)에서  $Y$ 는 이동한 거리,  $k$ 는 추력계수,  $I_m$ 은 여자전류,  $f_d$ 는 외란 그리고  $M$ 과  $B$ 는 선형전동기의 이동자 질량 및 접성 마찰계수이다. 일반적으로 선형전동기에 사용한 베어링에서 마찰이 발생하지 아니하므로  $B$ 는 거의 0이다. 그러므로 선형전동기의 전달함수  $G$ 는

$$G(S) = \frac{Y}{I_m} = \frac{k}{MS^2} \quad (7)$$

이다. 식(3), (4) 그리고 (7)을 이용하여 그림1의 폐 루프 전달함수  $G_C(S)$ 는

$$G_C(S) = k_0 \frac{a_1 S^2 + a_0 k_1 S + k_1 k_2}{S^3 + k_0 S^2 + k_0 k_1 S + k_0 k_1 k_2} \quad (8)$$

이고 개 루프 전달함수  $G_O(S)$ 는 다음과 같다.

$$G_O(S) = k_0 \frac{a_1 S^2 + a_0 k_1 S + k_1 k_2}{S(S^2 + k_0 \alpha_1 \beta S + k_0 \alpha_0 \alpha k_1)} \quad (9)$$

식(8)과 (9)에서  $k_0$ ,  $k_1$  및  $k_2$ 는

$$k_0 = \frac{k}{M k_d}, \quad k_1 = \frac{k_p}{k_d}, \quad k_2 = \frac{k_i}{k_p} \quad (10)$$

이고  $a_0$  및  $a_1$ 은 다음과 같다.

$$\alpha_0 = \frac{1}{1+\alpha}, \quad \alpha_1 = \frac{1}{1+\beta} \quad (11)$$

## 2) 계수 유도

반도체 장비나 공작기계류와 같은 선형전동기 용용 분야에서는 기구에 충격이 가해지는 것을 방지하기 위하여 S커브 형태의 위치제어에 따라 이송동작을 통제하는 경우가 일반적이다. 그러나 전체 제어계의 동특성에 따라 S커브 궤적에 많은 제약이 발생하며 높은 가감속율을 갖는 동작이 가능하려면 위치 제어계의 동특성이 높을수록 유리하다. 또한, 이송동작에서 과도응답 현상이 발생할 경우, 가공 시 정밀도가 저하되고 기계계의 강성에 의한 공진 현상이 발생할 우려가 있으므로 가능하면 과도응답을 억제할 필요가 있다. 2자유도 PID 위치제어기가 공작기기용 이송 장치에 사용되는 경우에 적용할 수 있는 이득 설정은 가장 용이하게 구현 할 수 있는 구조로서 다음과 같은 폐루프 전달함수 식(8)이 다음의 1차 지연이 되도록 한다. 즉

$$G_C(S) = k_0 \frac{(S+\omega)^2}{(S+\omega_c)(S+\omega)^2} \quad (12)$$

위의 식(12)에서  $(S+\omega)^2$ 은 영점 - 극점소거 즉, 약분되어서  $G_C(S)$ 는 다음의 1차 지연 요소가 된다.

$$G_C(S) = \frac{k_0}{S + \omega_c} \quad (13)$$

식(13)에 시정수

$$\tau = \frac{1}{\omega_c} \quad (14)$$

이다. 계의 전달함수가 1차 지연이므로 계의 응답에 과도응답 상태는 발생하지 않고 시정수가 적을수록 즉  $\omega_c$  가 클수록 빠르게 계 응답이 기준입력에 빠르게 수렴하게 된다.

식(8)과 식(12)에서 다음의 관계가 성립한다.

$$a_0^2 k_1 = 4 a_1 k_2, \quad k w = \frac{a_0 k_1}{2 a_1}, \quad \omega_c + 2\omega = k_0 \quad (15-1)$$

$$w(2\omega_c + w) = k_0 k_1 \quad w_c w^2 = k_0 k_1 k_2 \quad (15-2)$$

식(15)에서  $k_1$ 과  $k_2$ 가 비례한다고 가정하여 해를 구하면

$$w = 4w_c, \quad k_1 = \frac{8}{3} w_c, \quad k_2 = \frac{2}{3} w_c \quad (16-1)$$

이고  $\alpha$  와  $\beta$  는 다음과 같다.

$$\alpha = 2 \quad \beta = 8 \quad (16-2)$$

그리고 식(13)의 이득  $k_0$ 는

$$k_0 = 9\omega_c \quad (16-3)$$

이고 PID제어기의 이득은 다음과 같다.

$$k_d = \frac{M}{k} k_0, \quad k_p = k_1 k_d, \quad k_i = k_2 k_p \quad (16-4)$$

위의 식들에서 M과 k는 상수이므로 PID 제어기의 이득은  $\omega_c$ 에 의해서 간단히 결정된다.

## 3) 기준입력에 대한 계 응답

①기준입력  $y_{ref}(t) = \mu(t)$ 로 스텝함수 일때  $Y_{ref}(S)$ 는

$$Y_{ref}(S) = \frac{R}{S} \quad (17)$$

식 (13)과 식 (17)에 계 응답  $y(t)$ 는

$$y(t) = \frac{Rk_0}{\omega_c} (1 - e^{-\omega_c t}) \quad (18)$$

이다. 시간  $t \rightarrow \infty$  일때  $\omega_c$ 가 증가할수록  $e^{-\omega_c t} \rightarrow 0$ 이 되므로 계의 응답이 빠르게 수렴하는 것을 알 수 있다.

②기준입력  $y_{ref}(t)$  가 그림 2와 같은 펄스입력 일때,

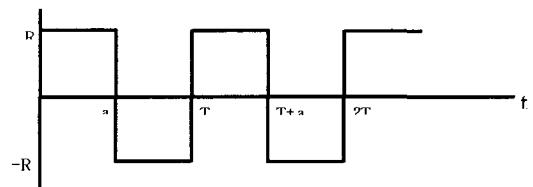


그림 2. 펄스입력

Fig. 2. Pulse input

$y_{ref}(t)$  는

$$y_{ref}(t) = R\mu(t) - 2R[\mu(t-a) + \mu(t-(T+a)) + \mu\{t-(2T+a)\} + \dots] + 2R[\mu(t-T) + \mu(t-2T) + \mu(t-3T) + \dots] \quad (19-1)$$

이다. 식 (19)의 라플라스변환  $Y_{ref}(S)$ 는

$$\begin{aligned} Y_{ref}(S) = \frac{R}{S} - \frac{2R}{S}(e^{-as} + e^{-(T+a)s} + \\ e^{-(2T+a)s} + \dots) + \frac{2R}{S}(e^{-Ts} + \\ e^{-2Ts} + e^{-3Ts} \dots) \end{aligned} \quad (19-2)$$

이고. 식 (13)과 식 (19-2)에서 계 응답  $y(t)$ 는

$$\begin{aligned} y(t) = k_0 \frac{R}{\omega_c} (1 - e^{-\omega_c t}) \mu(t) - \\ \frac{2k_0 R}{\omega_c} (1 - e^{-\omega_c(t-a)}) \mu(t-a) \\ + \frac{2k_0 R}{\omega_c} (1 - e^{-\omega_c(t-T)}) \mu(t-T) \dots \end{aligned} \quad (19-3)$$

이다. 식(19-3)에서  $t \rightarrow \infty$ 일때  $\omega_c$ 가 증가할수록  $e^{-\omega_c t}$  가 빠르게 0이 되므로 계의 응답도 빠르게 입력에 수렴하게 된다.

③ 기준입력  $y_{ref}(t) = R \sin \omega_s t$ 로 정현파 입력일때 라플라스변환  $y_{ref}(S)$ 는

$$y_{ref}(S) = \frac{R \omega_s}{S^2 + \omega_s^2} \quad (20-1)$$

식 (13)과 식(20)에서 계의 응답  $y(t)$ 는

$$\begin{aligned} y = \frac{R k_0 \omega_s}{\omega_c^2 + \omega_s^2} e^{-\omega_c t} + \frac{R k_0 \omega_c}{\sqrt{\omega_c^2 + \omega_s^2}} \sin(\omega_s t - \theta) \\ (\theta = \tan^{-1} \frac{\omega_s}{\omega_c}) \end{aligned} \quad (20-2)$$

이다. 식 (20-2)에서  $t \rightarrow \infty$ 에서  $\omega_c \rightarrow \infty$  일때 첫 번째 항은 0이 된다. 그리고 위상차  $\theta$ 가  $\omega_c \rightarrow \infty$  일때 0 이 되므로  $\omega_c$ 가 증가할수록 입력에 빠르게 수렴하는 것을 알 수 있다.

### III. 시뮬레이션 및 검토

제안한 제어기의 성능을 검출하기 위해서 식 (3), 식(4), 식(7)및 식(16-2)를 이용하여 구성한 제어계가 그림 2 이다.

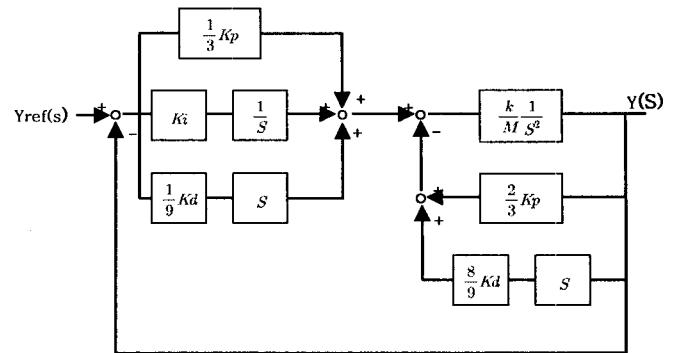


그림 3. 제안한 제어계

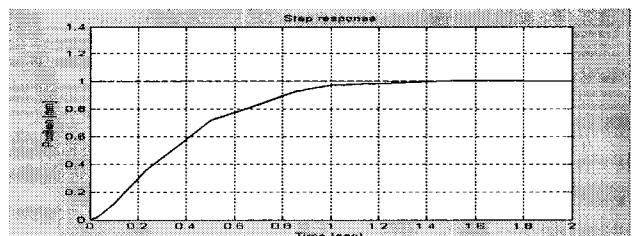
Fig. 3. Proposed control system

그림 3의 제어계를 MATLAB의 Simulink로 시뮬레이션 하여 계의 응답을 검출하였으며,  $\omega_c$  즉 시정수의 역에 의해서 PID제어기의 이득  $K_p$ ,  $K_i$ , 및  $K_d$ 가 식(16-4)에 의해서 조정되도록 하였다.

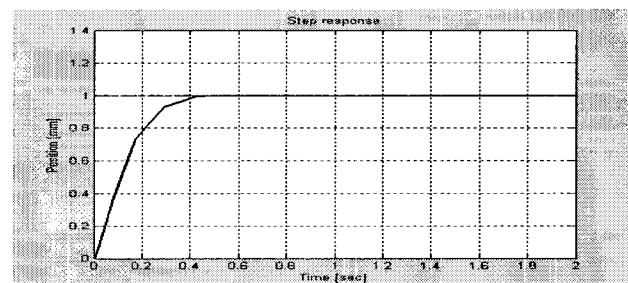
선형 전동기의 파라미터  $M = 16.7$  [Kg]  $k = 33$  [N / A]로 설정하였다.

그림 4는 기준입력을 스텝으로 하였을때 계의 응답으로 그림 4에서 (a)  $\omega_c = 4$  (b)  $\omega_c = 12$ , 그리고 (c)  $\omega_c = 78$ 이다.

이 응답에서  $\omega_c$ 가 클수록 즉 1차지연요소의 시정수가 적을수록 계의응답이 기준입력에 빠르게 수렴하는 것을 알 수 있다.



(a)  $\omega_c = 4$



(b)  $\omega_c = 12$

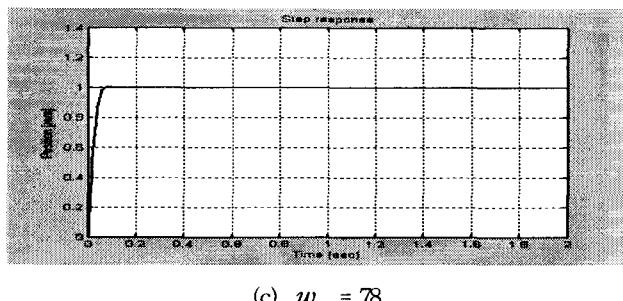
(c)  $w_c = 78$ 그림 4. 스텝 응답 특성 ((a)  $w_c = 4$  (b)  $w_c = 12$  (c)  $w_c = 78$ )Fig. 4. Step response characteristics ((a)  $w_c = 4$  (b)  $w_c = 12$  (c)  $w_c = 78$ )

그림 5는 기준입력을 펄스로 하였을 때 계의 응답으로 그림 5에서 (a)  $w_c = 4$  (b)  $w_c = 12$  그리고 (c)  $w_c = 78$ 이다.

$w_c$ 가 클수록 즉 시정수가 적을수록 계의 응답이 기준입력에 빠르게 수렴하는 것을 알 수 있다.

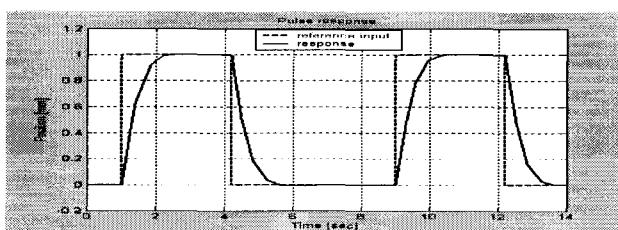
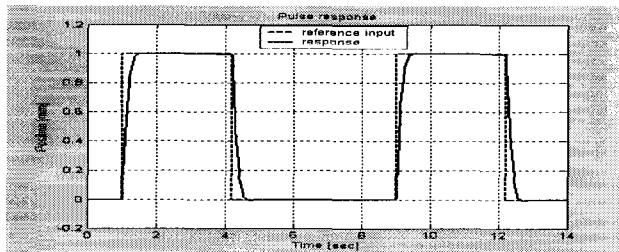
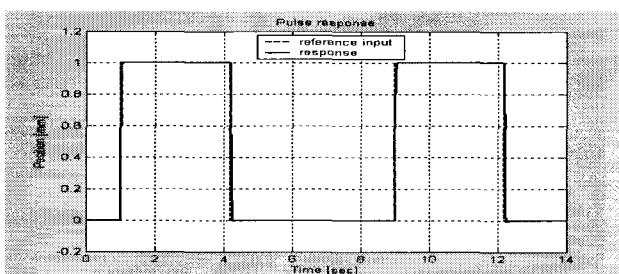
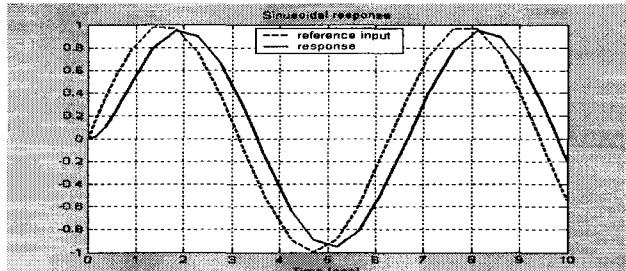
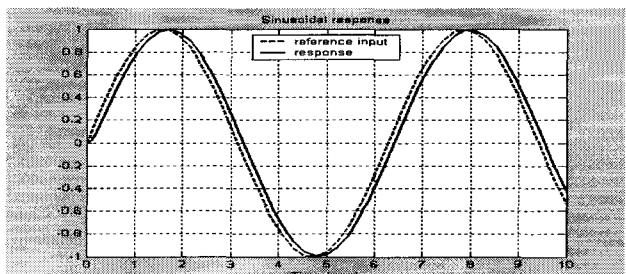
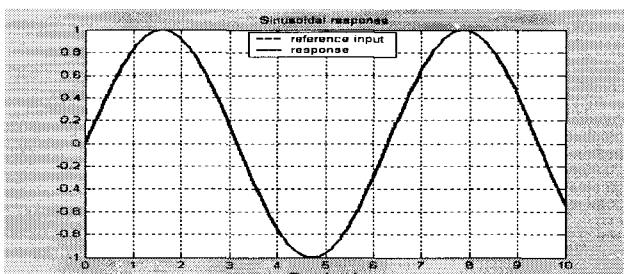
(a)  $w_c = 4$ (b)  $w_c = 12$ (c)  $w_c = 78$ 그림 5. Pulse 응답 특성 ((a)  $w_c = 4$  (b)  $w_c = 12$  (c)  $w_c = 78$ )Fig. 5. Pulse response characteristics. ((a)  $w_c = 4$  (b)  $w_c = 12$  (c)  $w_c = 78$ )(a)  $w_c = 4$ b)  $w_c = 12$ (c)  $w_c = 78$ 그림 6. 정현파 응답특성 ((a)  $w_c = 4$  (b)  $w_c = 12$  (c)  $w_c = 78$ )

Fig. 6. Sinusoidal response characteristics

그림 6에서 (a)는  $w_c$ 로 시정수가 크므로 상당한 위상차를 보이고 있지만  $w_c=78$ 로 큰 즉, 시정수가 적은 (c)에서 위상차 없이 계의 응답이 기준입력과 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

이상의 시뮬레이션 결과에서 계의 전달함수를 1차 지연으로 간단화 하였으므로 계의 응답엔 과도현상없이 시정수가 적을수록 빠르게 계의 응답이 기준입력에 수렴하는 것을 알 수 있었다.

## IV. 결 론

본 논문에서는 직선운동을 요구하는 위치제어계에서 제어 대상을 제어하기 위해서 2자유도 PID 제어기를 쾌환 형으로 구성하고, 2자유도의 비례 및 미분계수를 0에서  $\infty$  까지 변화 시킬 수 있도록 하였다. 선형전동기를 구동 원으로 하는 위치제어계에 적용하여 계의 전달함수가 영점·극점의 소거에 의해서 1차 지연요소가 되도록 하였다.

이 1차 지연요소의 시정수에 의해서 PID제어기의 이득이 조절되도록 하였다. 그리고 스텝, 펄스 및 정현파 입력에 대한 계 응답을 유도하였고, 재안한 제어계를 시뮬레이션하여 제어기의 유효성을 확인하였다. 그리고 시정수가 적을수록 계의응답이 기준입력에 빠르게 수렴하는 것을 알 수 있다. 기준입력이 정현파일 경우 시정수가 적을 경우 기준입력과 계의 응답 간에 위상차가 감소하는 것을 알 수 있었다.

### 참고 문헌

- [1] 이창호, 김종진, 하홍곤 “새로운 파라미터 조정법에 의한 2자유도 PID제어기” 2006 한국신호처리시스템학회 학술대회 논문집. 7권 1호, pp.85-88, 2006.
- [2] 김준석 “이득설계가 간단한 선형전동기 구동용 고성능 통합 PID 위치제어기 구현 제1부” 전기학회논문지 51B권 4호 pp187-194, 2002.
- [3] S. Yamamoto Ara, M. Sugiura, K. Matsuse "A Design Method of Two-Degree-of Freedom PID position controller for Linear Servo Motor Drives." T. IEE. Japan. vol. 116-D, No.8. pp.868-873, 1996.
- [4] 김준석 “이득설계가 간단한 선형전동기 구동용 고성능 통합 PID 위치제어 구현 제2부 ”전기학회논문지 51B 권 4호, pp.195-202, 2002.
- [5] S. Yamamoto, M. Sugiura, K. Matsuse "Improvement of performance of a linear, pulse servo motor control system using two degree of freedom controller" T. IEE. Japan, vol 115-D, No.3. pp42-55, 1995.
- [6] Mituhiko Araki, Hidefumi Tanuchi "Two-Degree-of-Freedom PID Controllers" International Journal of Control, Automation and Systems vol1, No4. pp.401-411, 2003.



하 홍 곤 (Hong-Gon Ha)  
 1972 동아대학교 전자공학과 졸업(공학사)  
 1977 동아대학교 대학원 졸업(공학석사)  
 1984 중앙대학교 대학원 졸업(공학박사)  
 현재 동의대학교 공과대학 전자공학과 교수

관심분야: 제어이론, 지능형 및 비선형 제어 등



이 창 호 (Chang-Ho Lee)  
 1985 충남대학교 전자공학과 졸업(공학사)  
 1995 동의대학교 전자공학과 졸업(공학석사)  
 2001 부경대학교 대학원 전자공학과 수료  
 현재 경남공업고등학교 교사 전자과 교사

관심분야: 자동제어, 병렬분산처리, 상호접속망, 컴퓨터구조