

입력 성형과 유전 알고리즘에 의한 자벌레 운동제어

김인수^{a*}, 김기범^a, 박승민^a

Motion Control of Inchworm using Input Shaping and Genetic Algorithm

In-Soo Kim^{a*}, Ki-Bum Kim^a, Seung-Min Park^a^a Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology,
61, Daehak-ro, Gumi, Gyeongbuk-do, 39177, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	9	March	2017
Revised	26	April	2017
Accepted	2	May	2017

Keywords:

Inchworm
Piezoelectric actuator
Genetic algorithm
Input shaping
PID Control

ABSTRACT

This study presents a genetic algorithm (GA) to design a PID controller systematically for an inchworm operated by piezoelectric actuators. The performance index considering overshoot and settling time is adopted to search an optimal PID gain using GA. The piezoelectric actuator shows nonlinear characteristics including hysteresis and residual displacement. The PID feedback system combined with an integrator is used to improve the ability of tracking the complex input signals and suppressing the steady state error. The PID controller tuned by GA can track the various motion contours effectively. However, the PID controller shows an improper residual vibration under the application of high-frequency square input. The input shaper combined with the feedback system can overcome this limitation of the PID controller.

1. 서론

최근 정전, 자기, 압전, 기억 형상 합금 등의 원리를 이용한 마이크로 구동기, 전도성 고분자 구동기^[1] 등 효율, 응답성 및 정밀도에 있어 뛰어난 구동기에 대한 활발한 연구가 진행되고 있다. 그 중 압전 소자는 기계적 입력에서 전기적 출력으로, 혹은 전기적 입력에서 기계적 출력으로 변환을 일으킬 수 있어 구동기 뿐만 아니라 센서 및 에너지 수확^[2]에 활발하게 적용되고 있다. 한편 적층형 압전구동기는 고응답성, 고출력, 높은 분해능 등의 장점이 있는 반면 히스테리시스와 잔류 변위 등의 비선형성으로 인해 구동 정밀도가 떨어져 이를 보완하고자 하는 많은 연구가 진행되어 왔다. 이러한 연구의 일환으로 히스테리시스와 크립 및 잔류변위에 대한 근사식을 이용하는 역 보상기를 구동기 전단에 부착하여 전체적으로 선형 구동기

가 되게끔 설계하는 방식들이 제안되었다^[3]. 자벌레와 정밀스테이지와 같이 압전소자와 기구적 조합을 통해 고 출력과 대 변위, 고 정밀도를 구현하기 위한 다양한 방식의 연구^[4,5]가 진행되어 왔다.

또한 저자는 자벌레의 비선형성을 극복하고 제어계에 강인성을 부가하기 위하여 칼만 필터와 슬라이딩 모드법을 결합한 제어기법을 제시하였고 입력성형기법을 통하여 피드백 제어계 응답에 발생하는 오버슈트가 제거될 수 있음을 보였다^[6].

본 논문에서는 마이크로 단위의 분해능을 가지고 한 싸이클을 이동하고 이 같은 싸이클을 누적시켜 대 변위 이송이 가능하도록 한 자벌레 추진부의 정밀 운동제어를 고전적 제어기법인 PID제어를 통해 수행하기로 한다. 압전소자로 작동되는 전, 후방 잠금(clamping)장치에는 단지 주기적인 ON/OFF 기능만을 하므로 정밀 서보계는 불필요하다. 압전소자에 의해 구동되는 자벌레 추진부

* Corresponding author. Tel.: +82-54-478-7345

Fax: +82-54-478-7319

E-mail address: kiminsoo@kumoh.ac.kr (In-Soo Kim).

의 동특성은 실험을 통해 얻어진 주파수 응답을 이용하여 모델링한다. PID제어기 구조의 단순함에도 불구하고 규명된 모델에 적분기를 결합하고 PID제어계를 구성함으로써 다양한 기준 입력신호에도 우수한 명령 추종성을 유지하도록 한다. 제어기 동조(tuning)를 위한 PID 이득의 체계적인 탐색은 정착시간과 오버슈트를 포함하는 성능 지수에 기초한 유전 알고리즘 적용을 통하여 이루어진다. 자벌레 PID 제어시스템의 경우 명령추종 성능은 우수하나 자벌레 기구부의 경량화로 인하여 고주파 사각파 기준입력과 같은 가혹한 구동의 경우에는 잔류진동 문제가 발생된다.

본 연구에서는 이의 문제를 해결하기 위해 입력 성형 기법을 피드백계에 병행하여 적용하는 방식도 제안한다. 다양한 시뮬레이션 및 실험을 수행하여 제어기 구현이 용이한 PID 제어기를 통해서도 자벌레 작동기의 비선형성 및 잔류진동 문제를 효과적으로 제거하고 고속 정밀 제어가 가능함을 보이기로 한다.

2. 자벌레 개루프 구동 실험 및 모델링

압전소자의 변형 한계는 최대 수백 마이크로미터 이하이므로 압전소자의 변형만으로는 대 변위 이송범위를 갖는 이송장치를 구현할 수 없다. 이와 같은 한계를 극복하기 위해 자벌레는 이송 가이드 및 지지 프레임을 만들어 대 변위 이송을 가능하게 한다. 자벌레는 추진장치, 전단 잠금 장치와 후단 잠금 장치의 압전소자에 순차적으로 전압을 인가하는 방식으로 이송된다. 자벌레의 운동 제어장치는 Fig. 1과 같다. 자벌레의 아래 끝단은 고정되었고 위 끝단에는 갭 센서(gap sensor: ADE tech. 5130)를 설치하였고 갭 센서로부터 측정된 변위 신호는 신호 증폭 및 저역 필터를 거친 후 고속 이산신호 처리장치(dSPACE 1104)에 입력된다. 유전 알고리즘에 의해 최적화된 PID제어기는 고속 이산신호처리 장치를 통해 제어기 출력을 발생시키고 파워 증폭기를 통해 자벌레의 압전소자 구동에 가해진다. 자벌레는 압전소자로 인한 히스테리시스 특성과 경

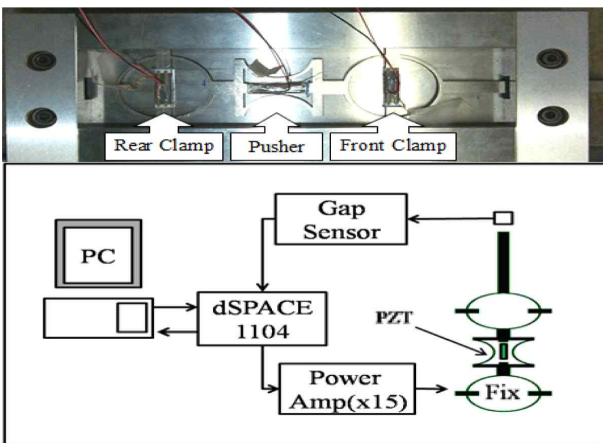


Fig. 1 Schematic diagram of experimental device

량화된 기계적 기구로 인하여 진동이 쉽게 유발되는 동특성을 가지고 있다. Fig. 2(a)는 자벌레 동특성을 확인하기 위해서 자벌레에 가한 30 V, 2 Hz의 사각파 기준입력이고 Fig. 2(b)는 그에 따른 개루프 응답을 측정된 것이다. 이로부터 최대 진동 진폭은 6 μm 이고 잔류진동은 0.3초 이상 지속되어 빠르고 정밀한 자벌레 구동을 위해서는 제어계를 구성하여 잔류진동을 최소화하여야 함을 알 수 있다. Fig. 3은 30 V, 2 Hz의 삼각파 입력에 대한 자벌레 응답을 보인 것으로서 히스테리시스, 잔류변위 등과 같은 압전소자의 비선형성으로 인하여 왜곡된 삼각파형 응답을 확인할 수 있다. 자벌레의 실시간 제어를 위해서는 가능한 낮은 차수의 높은 정도를 갖는 수학적 모델이 요구된다.

본 연구에서는 실험을 통해 계의 주파수 응답을 측정하고 이를 행렬분수 표현(matrix-fraction description)을 이용하는 커브 피팅(curve fitting)기법^[7]을 사용하여 계의 모델을 규명한다. Fig. 4는 실험을 통해 측정된 자벌레의 주파수 응답과 모델링된 주파수 응답을 보인 것이다. 시스템 모델 차수는 3차로 하였고 관심주파수 영역은 공진 주파수 6,50.9 Hz를 포함한 1 kHz 범위를 갖도록 하

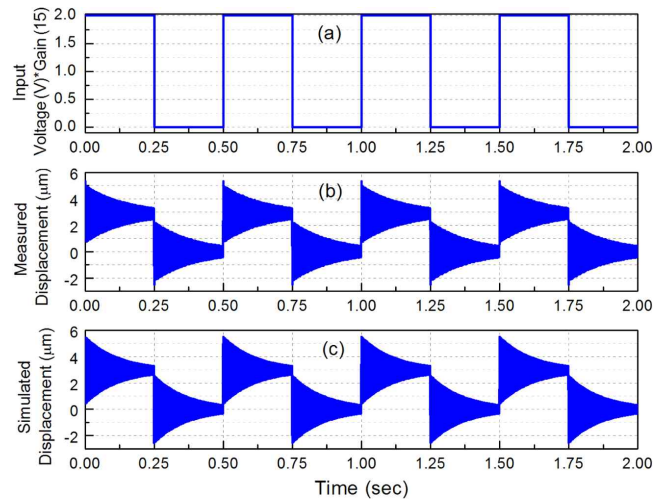


Fig. 2 Measured open loop response and simulated response of inchworm to square input

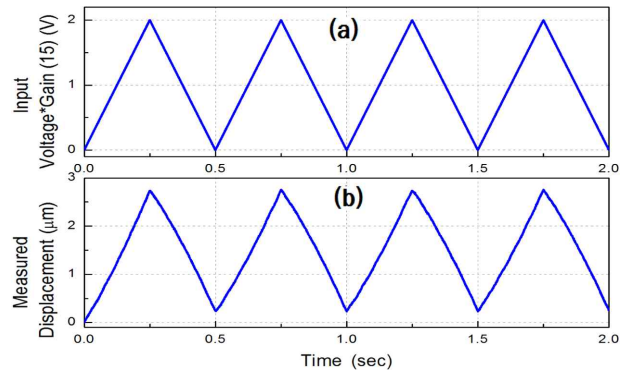


Fig. 3 Open loop response of inchworm to triangle input

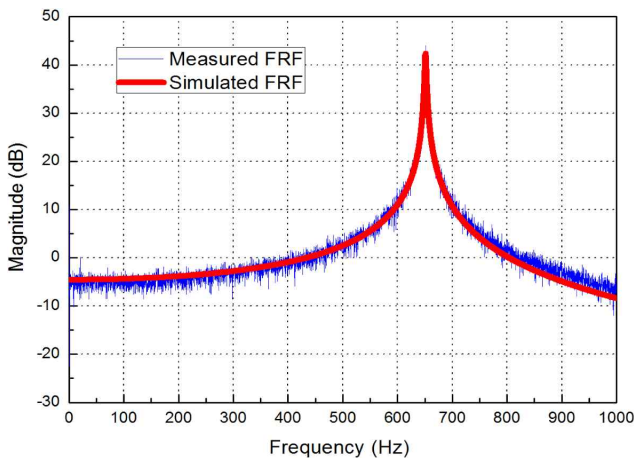


Fig. 4 Measured and simulated FRF of inchworm

였다. 식 (1)은 규명된 이산모델이며 샘플링 주파수는 5 kHz이다.

$$\frac{0.01849z^3 + 0.01933z^2 + 0.2817z - 0.1105}{z^3 - 1.806z^2 + 1.599z - 0.4402} \quad (1)$$

측정된 주파수 응답과 규명된 모델 응답은 잡음효과를 제외하면 일치함을 확인할 수 있다. 또한 사각입력에 대한 Fig. 2(b)의 측정된 응답과 Fig. 2(c) 규명된 모델로부터 계산된 응답에 대해서 두 신호의 잔류진동 오버슈트의 편차가 5% 이내로 유지되고 공진주파수는 650.9 Hz로 일치함을 확인할 수 있다.

3. 제어기 설계 이론

3.1 입력 성형 기법

입력성형 기법^[6,8]란 계의 동적 응답 특성에 근거하여 기준 입력을 시간 지연시켜 여러 단계로 나누어 입력시킴으로써 진동을 상쇄하는 효과를 얻는 것이다. 따라서 입력 성형은 일종의 필터링 기법으로서 어떤 형태의 입력이라도 입력 성형기 필터를 거치면 잔류진동을 제어할 수 있다. 입력성형 기법에서 주요 설계 인자는 입력신호의 크기와 지연 시간이다. 입력 신호의 크기와 시간은 시스템이 가지는 고유 진동수와 감쇠비에 따라 변화된다. 입력성형기는 서로 다른 시간간격을 가지는 다음과 같은 임펄스들의 조합으로 나타낼 수 있다^[8].

$$I_n(t) = A_0\delta(T - T_0) + A_1\delta(T - T_1) + \dots + A_n\delta(T - T_n) \quad (2)$$

식 (2)에서 A_i, T_i 는 i 번째 가해지는 충격(impulse)의 크기와 지연 시간이고 T_i 는 다음과 같다.

$$T_i = \frac{i\pi}{w_d}, i = 0, 1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

여기서 w_d 는 감쇠 고유진동수이다. 기준 입력에 대한 크기를 같게

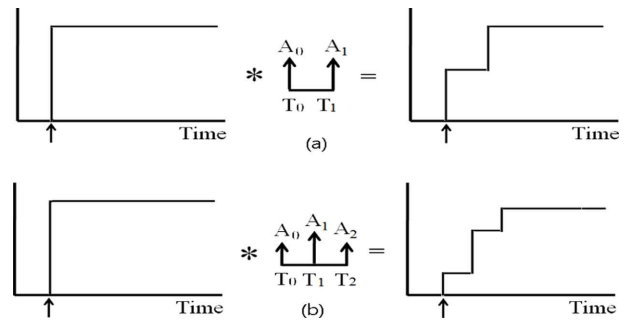


Fig. 5 (a) ZV and (b) ZVD input shaper

하기 위해서 다음과 같은 신호크기에 대한 조건이 성립된다.

$$\sum_{i=0}^n A_i = 1 \quad (4)$$

일반적으로 널리 적용되는 입력성형기의 형태는 ZV (zero vibration)와 ZVD (zero vibration and derivative)^[8]이다. ZV 입력성형기는 Fig. 5(a)와 같이 T_1 만큼의 간격을 가지며 각각 A_0, A_1 의 크기로 임펄스를 입력하는 것이다. 여기서 임펄스의 크기와 시간은 다음 식을 통해서 결정된다.

$$\left[\frac{A_i}{T_i} \right] = \left[\frac{1}{1+K} \frac{K}{1+K} \right] \quad (5)$$

식 (6)으로 표현된 K 는 감쇠비 ζ 와 관련된 항으로서 일정한 시간 간격에 따른 임펄스 크기의 감소정도를 나타낸다.

$$K = e^{-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (6)$$

Fig. 5(b)는 ZVD 입력성형기이고 A_0, A_1, A_2 크기의 임펄스를 각각 T_0, T_1, T_2 만큼의 간격으로 갖는다. 여기서 임펄스의 크기와 시간은 다음 식을 통해서 결정된다.

$$\left[\frac{A_i}{T_i} \right] = \left[\frac{1}{(1+K)^2} \frac{2K}{(1+K)^2} \frac{K^2}{(1+K)^2} \right] \quad (7)$$

3.2 유전 알고리즘

PID제어기와 같은 고전제어기는 제어기 구조가 간단하고 구현이 편리한 장점이 있으나 제어기 설계과정에서 통상 많은 시행착오를 겪어야 하고 설계된 제어기에 대해 최적성에 관한 정량적 확신을 갖기 어렵다. 이 같은 문제를 해결하기 위해 최근 PID제어기 동조법으로 실수코딩 알고리즘^[9]과 같은 다양한 유전 알고리즘이 제안되어 있으나 본 연구에서는 단순 유전 알고리즘을 사용하기로 한다. 이 방법은 초기에 개발된 유전 알고리즘임에도 불구하고 해

를 찾는 능력이 강인하여 아직도 많은 최적화 문제에 널리 응용되고 있다^[10,11].

제어 시스템의 최적화에 단순 유전 알고리즘을 적용하기 위해서 설계변수를 2진수의 유전인자로 구성된 개체를 생성하고 목적함수와 제한식을 적합도로 나타내어 재생산, 교배 및 돌연변이의 과정을 거쳐 우수한 형질을 가진 새로운 세대를 만들어 내는 과정을 반복한다. 이 과정을 단계별로 나타내면 다음과 같다^[12].

1) 탐색공간에서 초기 세대(generation)의 집단(population)을 난수로 적절한 비트수를 갖는 이진 스트링으로 생성한다. k 세대에서의 집단 $P(k)$ 는 식 (8)과 같은데, 초기 집단은 $P(0)$ 로 나타낼 수 있다.

$$P(k) = \{s_1(k), s_2(k), \dots, s_i(k), \dots, s_N(k)\} \quad (8)$$

여기서 $s_i(k)$ 는 i 번째의 개체로서 탐색 공간상의 한 점을 나타내며, N 은 해 집단 크기(population size)이다.

2) 실제 제어 시스템에 대입하기 위해 각 변수에 대응되는 스트링 s_j 를 십진수 u_j 로 변환하여 구간 $[x_j^{(L)}, x_j^{(U)}]$ 사이의 실수 x_j 로 식 (9)와 같이 변환한다.

$$x_j = x_j^{(L)} + \frac{x_j^{(U)} - x_j^{(L)}}{2^{l_j} - 1} u_j \quad (1 \leq j \leq n) \quad (9)$$

여기서 l_j 는 각 변수에 할당된 비트 수이다. 생성된 실수를 제어 시스템에 대입하여 적합도 값을 계산한다.

3) 재생산은 적합도 값을 기반으로 집단 $P(k)$ 내의 개체들을 선택하고 교배급원 $\bar{P}(k+1)$ 을 형성해준다. 개체 선택 방법으로는 선택확률의 백분율에 따라 룰렛휠(roulette wheel)의 면적을 할당하는 방법을 이용했다. 개체의 선택확률은 식 (10)과 같다.

$$P_s(s_i(k)) = \frac{F(s_i(k))}{\sum_{i=1}^N F_i(s_i(k))} \quad (10)$$

여기서 $F(s_i(k))$ 는 i 번째 개체의 적합도이다.

4) 교배로는 단순교배(one point crossover)를 선택했다. 단순교배는 먼저 교배급원으로부터 부모 염색체 쌍을 임의로 선정한다. 교배율(crossover rate) P_c 를 토대로 교배유무를 결정한다. 0에서 1사이의 난수 r 를 발생시켜 만일 $r \leq P_c$ 이면 교배를 일으킨다. 임의로 교배점 $c \in [1, l-1]$ 을 발생시키고, $[c+1, l]$ 사이의 유전자들을 서로 교환함으로써 두 자손을 생성한다. 여기서 l 은 염색체의 길이를 나타낸다. 반대로 $r > P_c$ 이면 선택된 부모 염색체 쌍

이 그대로 자손이 된다. 생성된 자손을 임시집단 $\hat{P}(k+1)$ 에 복제한다.

5) 국소해(local optimum)를 벗어나기 위해 표준 돌연변이를 수행하였다. 표준 돌연변이는 순차적으로 집단 $\hat{P}(k+1)$ 내의 염색체에서 비트 하나를 취하고 변이율(mutation rate) P_m 에 근거하여 선택된 비트의 돌연변이 유무를 결정한다. 역시 0에서 1사이의 난수 r 를 발생시켜 만일 $r \leq P_m$ 이면 돌연변이를 일으킨다. 이때 선택된 비트가 1이면 0으로, 0이면 1로 반전시킨다. 반대로 $r > P_m$ 이면 비트 반전은 일어나지 않는다.

4. 자벌레의 시뮬레이션 및 구동 실험

4.1 유전 알고리즘에 의한 PID제어기 동조

외란에 의해 유발되는 정상상태 오차를 제거하고 임의의 다양한 기준입력 파형에 대한 명령 추종 성능이 우수한 제어계를 구성하기 위해 실험을 통해 규명된 모델에 Fig. 6과 같이 적분기를 첨가한 설계 플랜트 모델 G_p 를 정의하고 이에 기초하여 PID 이득의 최적해를 탐색한다.

유전 알고리즘을 통해 자벌레의 위치제어에 최적화된 PID제어기의 이득을 탐색하기 위해 목적함수는 오버슈트(f_1)과 1%의 정착시간(f_2)을 최소화하는 것으로 하였다. 2개의 목적을 갖는 최적화 문제에 가중치를 도입하여 식 (11)과 같이 단일목적함수를 정의한다^[12].

$$g(X) = w_1 f_1 + w_2 f_2 \quad (11)$$

여기서 X 는 PID 제어 이득을 나타내며 w_1 은 오버슈트(f_1)의 가중치이고 w_2 는 정착시간(f_2)의 가중치이다. 식 (11)의 최소화 문제를 최대화 문제로 변환하고 제어입력을 반영하는 적합도(fitness) 함수는 식 (12)와 같이 정의될 수 있다.

$$Fitness = \frac{k}{F(K_p, K_i, K_D)} \quad (12)$$

$$k = \begin{cases} 1, & \text{control input} \leq u_{\max} \\ 0, & \text{control input} > u_{\max} \end{cases}$$

여기서 제어보드의 입출력 범위를 고려하여 제어입력의 최대치

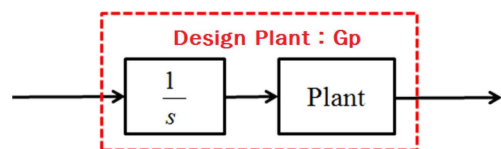


Fig. 6 Design plant including an integrator

$u_{max} = \pm 10$ V로 설정하였고 제어입력이 최대치를 초과하면 적합도는 0이 되도록 하였다.

제어기 탐색과정에서 요구되는 해집단 크기, 교배율, 변이율 설정 등은 제어입력신호 크기, 오버슈트와 정착시간에 대한 사전적인 시뮬레이션 응답을 기초로 시행오차적으로 설정되었다. 탐색된 PID제어기 이득은 오버슈트 및 정착시간의 가중치와 제어입력의 최대 범위의 설정치에 따라 변동되고 수렴양상도 변동된다. 오버슈트와 정착시간의 가중치는 $w_1 = 0.2, w_2 = 0.8$ 로 설정하였고 PID제어기 이득 K_p, K_I, K_D 각각에 할당된 비트 수는 10비트로 정하였고 해 집단 크기는 10, 교배율=0.985, 변이율=0.015로 정하였다. Fig. 7은 제어기 이득 탐색 과정을 나타낸 것으로서 탐색은 55세대까지 수행했으며 Fig. 7(a)를 통해 최적의 적합도는 48세

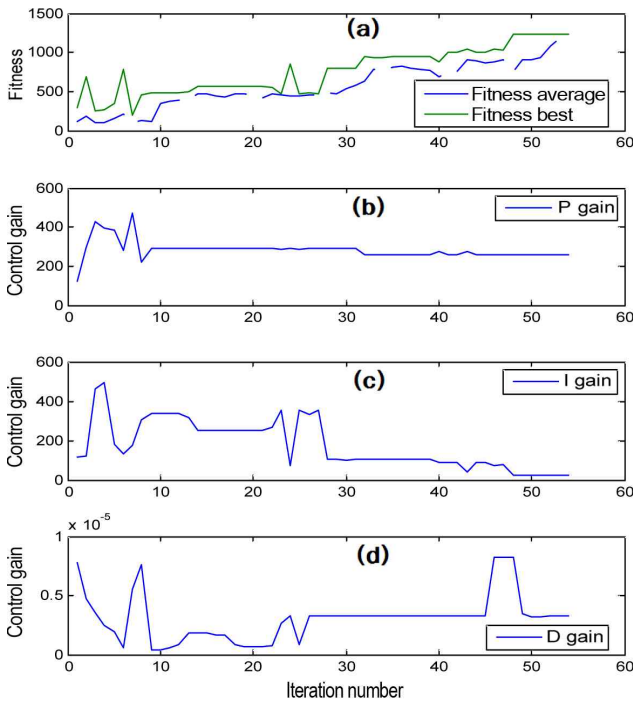


Fig. 7 Fitness and PID gain searched by GA

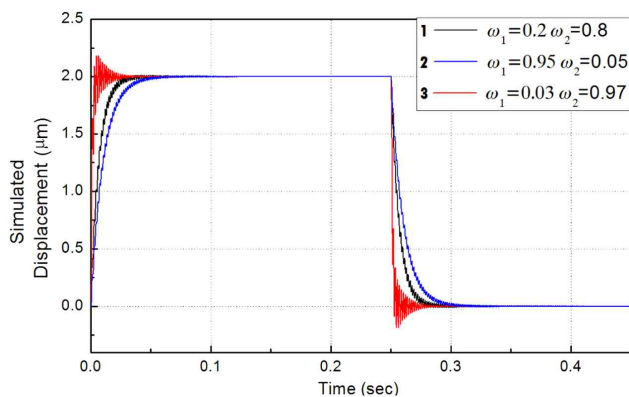


Fig. 8 Response of PID control systems designed by different weight factors to square input

대 이후로는 일정하게 유지됨을 확인할 수 있다. 제한된 유전 알고리즘을 통해 구해진 PID제어기 이득은 $K_p = 258.8, K_I = 25.41, K_D = 3.31 \times 10^{-6}$ 이다. Fig. 8은 오버슈트와 정착시간에 관한 각기 다른 가중치로 탐색한 PID제어기를 적용했을 때 30 V, 2 Hz의 사각파와 기준입력에 대한 시뮬레이션 응답을 보인 것이다. 정착시간은 1% 오차기준을 적용하였다. 오버슈트와 정착시간의 가중치가 $w_1 = 0.2, w_2 = 0.8$ 인 ①경우에는 오버슈트 1.2%, 정착시간은 0.025초 이었고 잔류진동은 0.05초 이상 지속되었다. 오버슈트 가중치 w_1 를 크게 적용한 ($w_1=0.95, w_2=0.05$) ②경우에는 오버슈트 0%, 정착시간 0.15초 이상으로 응답속도가 느렸고 잔류진동은 0.05초 이상 지속되었다. 정착시간에 대한 가중치 w_2 를 크게 적용한 ($w_1=0.03, w_2=0.97$) ③경우에는 오버슈트 9.26%, 정착시간 0.025초 이상이고 잔류진동 지속은 ①, ②경우에 비해 길게 나타났다. 세 경우 모두 정상상태 오차는 0이었다.

Fig. 9는 ①경우의 가중치로 탐색된 PID제어기를 적용했을 때 실험을 통하여 얻어진 30 V, 2 Hz의 사각파와 응답을 보인 것이다. 실험결과가 신호잡음에 의한 미소 변화를 제외하면 정상상태오차, 오버슈트, 정착시간 등의 면에서 시뮬레이션 결과와 일치함을 알 수 있었고 제어입력은 ± 10 V 이하로 유지되었다. 또한 Fig. 9(c)에서 알 수 있는 바와 같이 잔류진동은 0.05초 이상 지속되었다. Fig. 10은 30 V, 2 Hz의 삼각파형의 기준입력에 대한 자별레의 PID제어기 응답을 보인 것으로서 제어계의 응답특성이 선형화되어 히스테리시스 현상, 잔류변위 현상이 완전히 제거되었고 오버슈

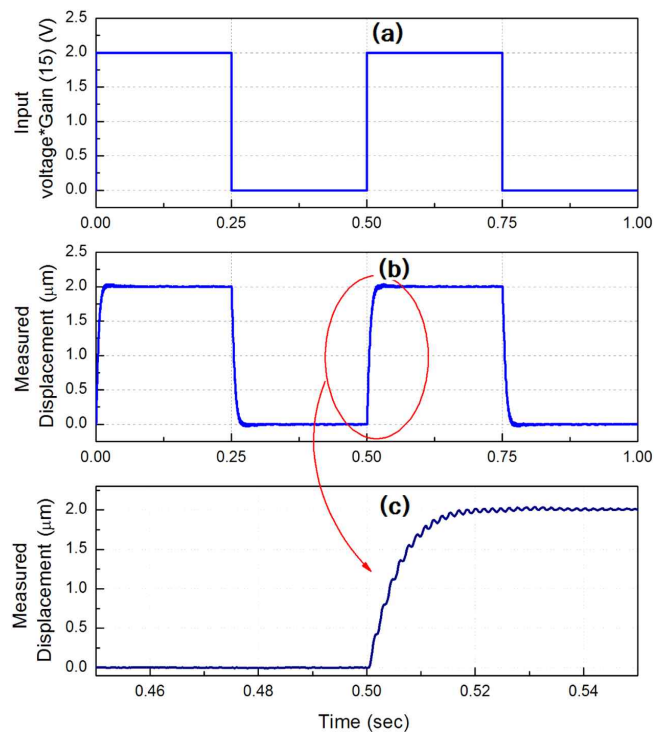


Fig. 9 Response of PID control system to square input

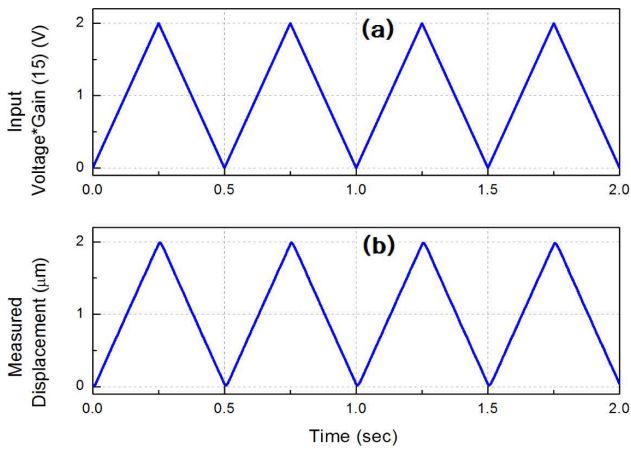


Fig. 10 Response of PID control system to triangle input

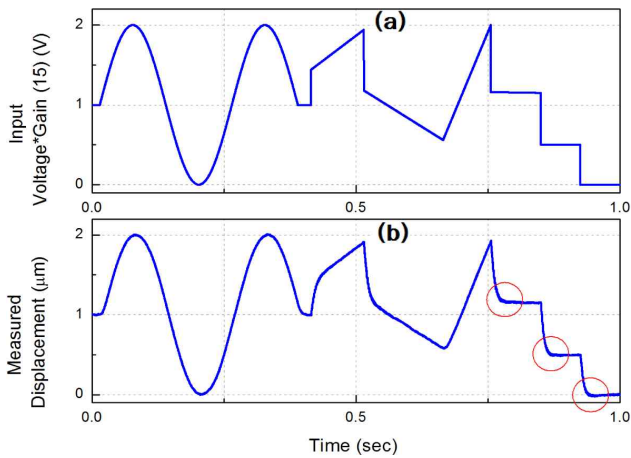


Fig. 11 Response of PID control system to complex input

트, 잔류진동 및 정상상태오차 없이 기준입력신호에 일치하는 응답이 발생함을 알 수 있다(Fig. 3 참조).

Fig. 11은 사각파, 램프(ramp)와, 사인(sine)과 등이 포함된 복잡한 형태의 입력 신호에 대한 자벌레의 측정된 응답 변위를 보인 것이다. 램프와나 사인과 입력에 대한 제어계의 응답에도 오버슈트, 잔류진동 및 정상상태 오차가 발생되지 않으나 사각파 입력에 대해서는 Fig. 9와 동일한 잔류 진동이 발생하는 것을 알 수 있다.

4.2 입력성형기와 결합된 PID제어계의 구동

앞 절에서 언급된 바와 같이 사각파 입력에 대해 PID제어계만으로 20 Hz 이상으로 자벌레를 구동하는 것은 불가하며 이송 정밀도에도 상당한 제한이 가해지게 된다. 이 같은 문제 해결을 위해서는 잔류진동 및 오버슈트를 제거함이 요구된다. 이를 위해 본 연구에서는 ZV와 ZVD 기법을 각기 따로 PID제어기법과 조합하여 적용하고 두 방법 사이의 잔류진동 감소효과를 비교, 검토해본다.

Fig. 12는 자벌레 운동제어를 위해 PID제어계에 입력성형 기법을 병행 적용한 블록선도이다. Fig. 13은 30 V, 2 Hz의 사각파

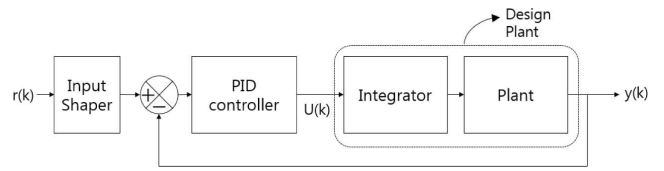


Fig. 12 Block diagram of inchworm with PID controller and input shaper

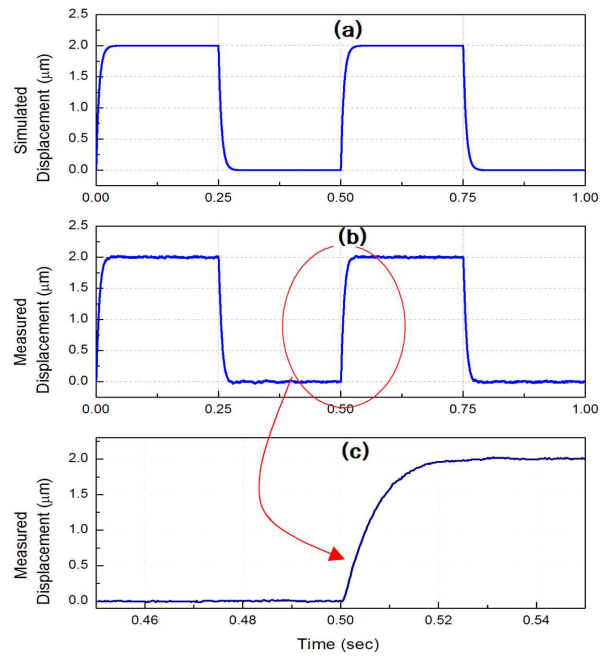


Fig. 13 Response of PID control system with ZV input shaper to square input

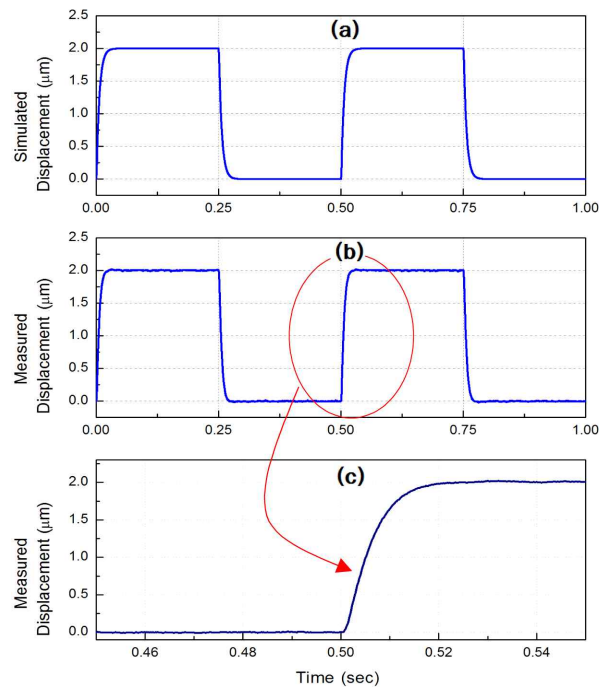


Fig. 14 Response of PID control system with ZVD input shaper to square input

입력에 대한 PID제어계에 ZV입력 성형기가 적용된 경우의 응답을 보인 것으로서 잔류진동 및 오버슈트는 제거되었고 정착시간은 0.025초 이하로 유지됨을 알 수 있다. 또한 Fig. 13(a)와 (b)의 비교로부터 시뮬레이션과 실험결과가 잡음성분을 제외하면 일치하고 있음을 알 수 있다. Fig. 14는 동일한 사각파 입력에 대한 PID 제어계에 ZVD 입력 성형기가 적용된 경우의 응답을 보인 것으로서 잔류진동 및 오버슈트는 제거되었고 정착시간은 0.02초로서 ZV입력 성형기에 비해 미소하나마 우수한 제어 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다.

이상의 실험결과는 피드백 제어 실험결과이지만 자벌레의 성능저하 없이 개루프 구동이 가능함을 유념할 필요가 있다. 왜냐하면 제시된 피드백계를 구성하고 미리 여러 가지 기준입력신호에 대한 PID 제어가 출력신호 $u(k)$ 를 실험을 통해 취득하고 데이터화 한 후에는 이를 이용하여 자벌레를 개루프 구동할 수 있기 때문이다. 필요한 제어가 출력신호 $u(k)$ 를 취득한 후에 개루프 구동방법을 적용하면 별도의 껍 센서 및 서보계가 필요하지 않게 된다.

5. 결론

본 연구에서는 압전소자로 작동되는 자벌레 운동제어를 위한 PID제어기를 유전 알고리즘을 이용하여 체계적으로 설계할 수 있음을 보였다. 자벌레 동특성은 주파수응답을 커브피팅하여 규명하였고 이에 기초하여 적분기가 포함된 PID 피드백 제어계를 구성하여 실험 해 본 결과 다양한 입력신호에 대한 명령추종성이 우수하였고 압전소자의 비선형성도 제거할 수 있음을 확인하였다.

고주파 사각파와 같은 가혹한 구동조건하에서는 자벌레 경량화로 유발되는 추진부의 심각한 잔류진동 응답특성으로 인하여 PID 제어기만으로는 제어성능의 한계를 보일 수 있다. 이 같은 문제의 해결을 위해 PID 피드백계에 ZV 또는 ZVD 입력성형기법을 병행 적용하면 잔류진동을 효율적으로 제거할 수 있었고 그에 따라 자벌레의 고속 정밀구동이 가능해졌다. 잔류진동 제어 면에서 ZVD기법이 ZV기법에 비해 우수하였으나 기준입력이 사각파인 경우에는 완전한 잔류진동 제거를 위해 최대 50 Hz 이하로 동작되어야 함을 확인하였다.

후 기

이 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 지원된 논문임.

References

- [1] Truanga, B. N. M., Ahn, K. K., 2015, Inverse Modeling and Control of a Dielectric Electro-active Polymer Smart Actuator, Sensors and Actuators A: Physical, 229 118-127.
- [2] Kaur, N., Bhalla, S., 2016, Numerical Investigations on Energy Harvesting Potential of Thin PZT Patches Adhesively Bonded on RC Structures, Sensors and Actuators A: Physical, 241 44-59.
- [3] Krejci, P., Kuhnen, K., 2001, Inverse of Control of Systems with Hysteresis and Creep, IEEE proceedings: Control and theory and applications, 148:3 185-192.
- [4] Pandall, T., Garcia, E., 1996, Design of a Piezoelectric Caterpillar Motor, Proceedings of ASME Aerospace Division, 52 627-648.
- [5] Park, J. S., Jeong, K. W., 2012, Design of a Controller for Enhancing Positioning Performance of a PZT Driven Stage, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 21:3 465-472.
- [6] Yang, K. Y., Hwang, Y. S., Kim, Y. S., Kim, I. S., 2009, Precise Position Control of Inchworm Using Robust Control Technique and Input Shaping, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, 19:2 169-175.
- [7] Juang, J. N., 1994, Applied System Identification, Frequency-Domain State-Space System Identification Chapter7, Prentice Hall, USA.
- [8] Park, S. W., Choi, H. S., Hong, S. W., 2007, Discretization Effects of Real-time Input Shaping In residual Vibration Reduction for Precise XY stage, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 16:4 71-78.
- [9] Chena, G. J., Chen, M. R., Dai, Y. X., Lia, L. M., Lua, K. D., Zheng, C. W., 2015, Design of Multivariable PID Controllers using Real-coded Population-based Extremal Optimization, Neurocomputing, 151:3 1343-1353.
- [10] Mohammad, Y., Payam, A., 2015, Using Fuzzy Genetic, Artificial Bee Colony (ABC) and Simple Genetic Algorithm for the Stiffness Optimization of Steel Frames with Semi-rigid Connections, KSCE Journal of Civil Engineering, 19:5 1366-1374.
- [11] Choi, K. J., Hong, D. S., 2010, Posture Optimization of a Humanoid Robot using a Simple Genetic Algorithm, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 11:3 381-390.
- [12] Kim, G. B., Park, S. M., Kim, I. S., 2016, Tuning of PID Controller for Hydraulic Positioning System using Genetic Algorithm, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 15:3 93-101.