

유전 알고리즘을 이용한 유압 위치계의 PID 제어기 동조

김기범*, 박승민*, 김인수*.#

*금오공과대학교 기계시스템공학과

Tuning of PID Controller for Hydraulic Positioning System Using Genetic Algorithm

Gi-Bum Kim*, Seung-Min Park*, In-Soo Kim*.#

*Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology

(Received 21 October 2015; received in revised form 5 February 2016 ; accepted 29 March 2016)

ABSTRACT

This study presents a simple genetic algorithm to systematically design a PID controller for a hydraulic positioning system operated by a proportional solenoid valve. The inverse dead-zone compensator with nonlinear characteristics is used to cancel out the dead-zone phenomenon in the hydraulic system. The object function considering overshoot, settling time, and control input is adopted to search for optimal PID gains. The designed PID controller is compared with the LQG/LTR controller to check the performance of the hydraulic positioning system in the time and frequency domains. The experimental results show that the hydraulic servo system with the proposed PID controller responds effectively to the various types of reference input.

Key Words : Genetic Algorithm(유전 알고리즘), Hydraulic Positioning System(유압 위치계), PID Controller(PID 제어기), Dead-zone Compensator(사역대 보상기)

1. 서 론

최근 정전, 자기, 압전, 형상기억 합금(SMA) 및 전도성 고분자 액추에이터(actuator)^[1] 등과 같은 효율성, 응답성과 정밀도가 우수한 마이크로 액추에이터들의 정밀 계측분야 및 가공분야로의 적용 범위가 점차적으로 넓어짐에 따라 이들에 대한 다양한 응용 연구가 진행되고 있다.

하지만 여전히 산업 설비에 일반적이며 경제적으로

로 사용되고 있는 액추에이터는 종래의 공압식, 유압식, 전기식 액추에이터이다. 이들 중 유압식 액추에이터는 관성이 낮으면서도 빠른 응답 특성을 가질 뿐만 아니라 단위 무게 당 높은 출력과 높은 강성을 가지고 있기 때문에 건설장비나 공작 기계, 하중이 큰 물체의 이동을 필요로 하는 장비에 많이 사용되고 있다^[2]. 특히 전기 유압 시스템은 고기능성 전기 유압 서보 밸브의 개발로 고속, 고정밀도의 제어가 가능해져 대용량, 고정도화 및 자동화를 필요로 하는 산업에 응용되고 있다. 그러나 고기능성 서보 밸브는 가격이 비싸고, 작동유의 오염에 민감하기 때문에 일반 산업기계에서 사용하기에는 비경제적 요소를 안고 있다. 서보밸브의 이러한 단점을 극복하기 위해 개발된 비례제어 밸브는 입력

Corresponding Author: kiminsoo@kumoh.ac.kr

Tel: +82-54-478-7345, Fax: +82-054-478-7319

전류의 크기에 비례해 개도량을 조절할 수 있으나 개루프의 한계로 히스테리시스와 비선형성을 야기하게 된다^[3]. 최근 발표된 연구에서는 비례 솔레노이드 밸브 유압계의 경우에도 피드백 제어를 통해 적절한 주파수 대역폭 향상이 가능하고 현재 널리 이용되고 있는 LQG/LTR 제어기법을 통해 제어계의 응답속도를 높일 수 있음을 보여주고 있다^[4]. 그러나 다양한 제어이론이 개발된 현재까지도 PID 제어기는 구조가 단순하고 제어기 적용이 용이하여 일반 산업 현장에서 보편적으로 사용되고 있으나 제어기의 이득을 동조하는데 많은 시행오차와 경험 이 요구된다는 단점이 있다^[5]. 최근에 실수코딩 유전알고리즘, Taguchi 실험계획법과 연계된 알고리즘과 같은 다양한 형태의 유전알고리즘을 이용한 서보계의 제어기 이득 동조기법에 대한 연구가 발표되고 있으나^[6-8] 이들은 비교적 고주파 응답대역을 갖는 서보계에 대한 것이며 제어 입력신호의 크기를 고려하지 않고 단지 시간응답 성능지수만을 고려하여 제어기를 탐색함으로써 인하여 실제 제어계 구현에 있어 구동 앰프의 출력한계 문제가 종종 발생될 수 있다. 또한 설계된 제어기의 성능을 검토함에 있어 주파수 영역에서의 성능을 고려함이 없이 단지 시간영역에서의 응답특성만을 논하고 있다.

본 연구에서는 단순 유전 알고리즘(simple genetic algorithm)을 이용하여 비례 솔레노이드 밸브가 포함된 저주파 응답특성의 유압 위치제어계에 적합한 PID제어기 이득 동조기법을 제시한다. 이득 동조과정을 체계적으로 수행하기 위하여 제어계의 시간응답지표인 정착시간과 오버슈트를 이용한 최적 목적함수를 도입하고 이를 최소화하도록 유전 알고리즘을 적용한다. 또한 제어입력 크기에 제한조건이 정해지지 않는 경우에 유전 알고리즘에 의해 동조된 제어기 문제점을 제시하고 이를 해결하기 위한 방안으로 제어입력에 대한 적합도 함수를 제시한다. 아울러 제시된 유전 알고리즘에 의해 설계된 PID 제어기가 비례 솔레노이드 밸브 유압계의 주요 구동범위인 저주파 대역에서 우수한 응답특성이 우수함을 보이기 위하여 다양한 기준 입력 신호에 대한 구동실험을 수행한다. 그리고 현재 널리 이용되고 있는 주파수영역에서

의 최적제어 설계기법인 LQG/LTR 제어기를 설계하고 이것과 유전 알고리즘에 설계된 PID 제어기의 응답성능을 시간영역 및 주파수영역에서 비교, 검토하기로 한다.

2. 시스템 모델링

본 연구를 위해 구성된 시스템은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 유압모터, 감압밸브, 비례 밸브, 파워 앰프, 유압 실린더, 변위 센서(LVDT) 등으로 구성되어 있다. 밸브는 Vickers 사의 KDG4V 계열 비례 밸브를 이용하였으며 밸브를 구동하기 위한 앰프는 EEA-PAM-520-A14 모델을 이용하였다. Fig. 2는 유압 위치제어계의 블록선도를 보인 것이다. 단동 유압 실린더의 피스톤 로드 끝에 변위 센서를 설치하여 측정된 변위 신호는 고속 이산처리 장치(dSPACE 1104)에 입력된다. 제어기는 고속 이산 처리 장치를 통해 제어기 출력을 발생시키고 밸브의 구동 앰프를 거쳐 밸브에 전류를 인가하여 밸브를 구동하게 된다. 제어기의 샘플링 주파수는 밸브의 작동 주파수를 고려하여 500Hz로 정하였다.

유압계의 제어기 설계를 위해 비례 제어 밸브의 동적거동을 비례요소로 이상화시켜 식(1)과 같이 유압계를 모델링하였고, 이득 ($K=0.74(m/s)/volt$), 고유진동수 ($w_n= 59rad/sec$), 그리고 감쇠비 ($\zeta=1.0$)는 개회로 응답 실험을 통해 규명하였다^[9].

$$G(s) = \frac{K\omega_n^2}{s(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (1)$$

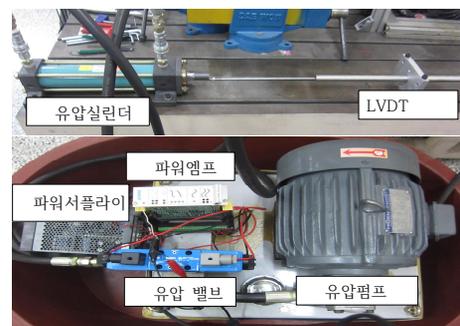


Fig. 1 Experimental equipment

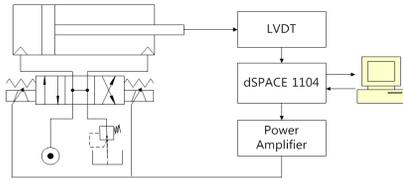


Fig. 2 Schematic diagram of experimental device

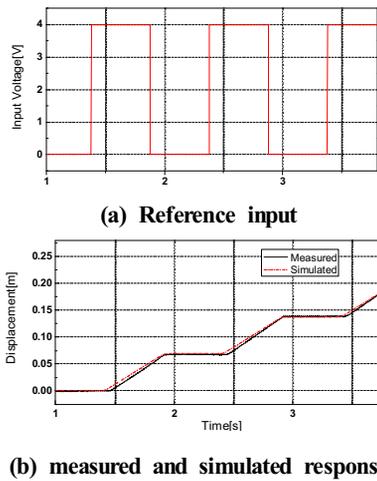


Fig. 3 Comparison of measured and simulated system response

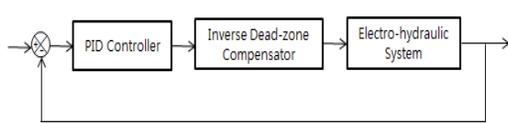


Fig. 4 PID controller including compensation of dead zone effect

Fig. 3은 4V의 구형파를 비례 밸브에 가할 때 실린더 전진 방향의 변위를 측정된 결과와 선형 플랜트 모델을 이용하여 시뮬레이션 한 결과를 비교한 것으로 측정값과 시뮬레이션 값이 유사함을 알 수 있다.

3. 비선형 보상기

밸브의 스톱이 오리피스를 막아 유압유가 흐르지 않는 구간을 사역대라고 한다. 사역대는 중립점에서의 오버랩을 통해 밸브 마모로 인한 누유를 막을 수 있으므로 밸브 설계 시 고려되는 부분이다. 사역대의 비선형성은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$i_v = \begin{cases} i - I_1 & \text{if } i > I_1, \\ 0 & \text{if } |i| \leq I_1, \\ i + I_1 & \text{if } i < -I_1. \end{cases} \quad (2)$$

여기서 i 는 밸브의 솔레노이드에 입력되는 전류이고, I_1 은 사역대의 폭이며, i_v 는 사역대를 통과한 밸브의 입력 전류이다.

사역대가 존재하는 유압 위치 시스템에서 선형 제어기만을 사용한다면 고정밀의 추종 성능을 갖기는 매우 어렵다. 본 연구에서는 이러한 사역대를 극복하기 위해 식 (3)과 같이 역 사역대(inverse dead-zone)^[10,11]를 이용한 비선형 보상기를 적용하였다.

$$i = \begin{cases} i_d + I_1 & \text{if } i_d > 0, \\ 0 & \text{if } i_d = 0, \\ i_d - I_1 & \text{if } i_d < 0. \end{cases} \quad (3)$$

여기서 i_d 는 제어기에서 역사역대로 입력되는 전류이다. 전류비선형 역사역대 보상기를 포함한 PID 유압 제어계의 블록선도는 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다.

4. 제어기 설계

4.1 유전 알고리즘

본 연구에서 사용된 단순 유전 알고리즘은 초기에 개발된 알고리즘임에도 불구하고 해를 찾는 능력이 강인하여 아직도 많은 최적화 문제에 널리 용

용되고 있다.^[12-14]

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 같고 Fig. 5는 관련 흐름도이다.^[15]

1) 탐색공간에서 초기 세대(generation)의 집단(population)을 난수로 적절한 비트수를 갖는 이진 스트링으로 생성한다. k 세대에서의 집단 $P(k)$ 는 식 (4)와 같은데, 초기 집단은 $P(0)$ 로 나타낼 수 있다.

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

(4)

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 (5)와 같이 변환한다.

$$x_j = x_j^{(L)} + \frac{x_j^{(U)} - x_j^{(L)}}{2^{l_j} - 1} u_j \quad (1 \leq j \leq n) \quad (5)$$

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 형성해 준다. 개체 선택 방법으로는 선택확률의 백분율에 따라 룰렛휠(roulette wheel)의 면적을 할당하는 방법을 이용했다. 개체의 선택확률은 식 (6)과 같다.

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

(6)

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 을 발생시켜 만일 $r \leq P_c$ 이면 교배를 일으킨다. 임의로 교배점 $c \in [1, l-1]$ 을 발생시키고, $[c+1, l]$ 사이의 유전자를 서로 교환함으로써 두 자손을 생성한다. 여기서 l 은 염색체의 길이를 나타낸다. 반대로 $r > P_c$ 이면 선택된 부모 염색체 쌍이 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 을 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.

4.2 유전 알고리즘에 의한 PID제어기 동조

유전자 알고리즘을 통해 최적해 탐색을 수행하기 위한 목적함수는 오버슈트(f_1)과 $\pm 1\%$ 의 정착시간(f_2)을 최소화하는 것으로 하였다. 2개의 목적함수를 갖는 최적화 문제에 가중치를 도입하여 식(7)과 같이 단일목적함수로 변환한다.

$$g(X) = w_1 f_1 + w_2 f_2 \quad (7)$$

여기서 X 는 PID 제어 이득을 나타내며 w_1 은 오버슈트(f_1)의 가중치이고 w_2 는 정착시간(f_2)의 가중치를 나타낸다.

식 (7)의 최소화 문제를 최대화 문제로 변환하고 제어입력을 반영하는 적합도(fitness) 함수는 식 (8)과 같다.

$$F(X) = \frac{c}{g(X)}$$

$$c = \begin{cases} 1, & \text{control input} \leq u_{\max} \\ 0, & \text{control input} > u_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

솔레노이드 밸브 구동 앰프의 입력범위를 고려하여 제어입력의 최대치 $u_{\max}=8V$ 로 설정하였고 이에 따라 제어입력이 8V이상이면 적합도는 0이 된다.

Fig. 6은 제어입력을 고려하지 않고 유전 알고리즘을 적용한 경우의 결과를 보인 것이다. 얻어진 제어기 이득은 $K_P=6, K_I=0.01, K_D=0.01$ 이며 이에 대한 유압제어계의 시뮬레이션 응답은 정상적인 것으로 보이나 실제로는 제어 입력이 매우 클 뿐만 아니라 불안정하여 실제 시스템에는 적용 불가하며 이 경우 적합도는 0이 된다.

본 유압 구동부는 마찰을 적게 유지하기 위하여 디더링(dithering) 회로가 포함되어 있는데 이 같은 고주파 신호에 미분제어기의 출력이 매우 크게 나타나게 되어 D이득의 탐색 범위를 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ 로 작게 설정하였다.

유전알고리즘에 의해 탐색된 PID 제어기의 이득은 오버슈트와 정착시간의 가중치와 제어입력의 최대 범위의 설정치에 따라 변동되며 수렴양상도 약간씩 변동된다. 제어기 탐색과정에서 요구되는 해집단 크기, 교배율, 변이율 설정 등에 있어서의 시행착오를 줄이고 제어기 탐색과정이 원활히 이루어지도록 제어기 이득에 대한 제어입력 신호크기와 정착시간에 대한 사전적인 시뮬레이션 응답을 기초로 P와 I 이득의 탐색범위를 20이하로 설정하였다. 또한 제한된 제어기 동조방법을 이용하는 경우 오버슈트와 정착시간의 가중치 값에 따라 구해진 제어기 이득이 변동됨을 확인할 수 있었다. 오버슈트 가중치 $w_1=0.1$, 정착시간 가중치

$w_2=0.9$ 를 부여했을 때 얻어진 제어기 이득은 $K_P=7.5, K_I=19.7, K_D=4.2 \times 10^{-8}$ 이며, 이때의 응답과 제어입력은 Fig. 7과 같이 나타난다. 이 같은 PID제어기의 경우 기준입력까지 도달하는 상승시간은 짧으나 오버슈트가 20%이상 발생하는 것을 확인할 수 있다.

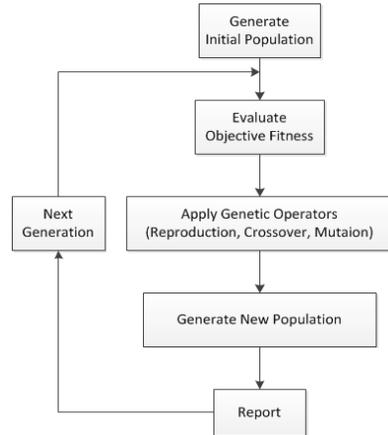
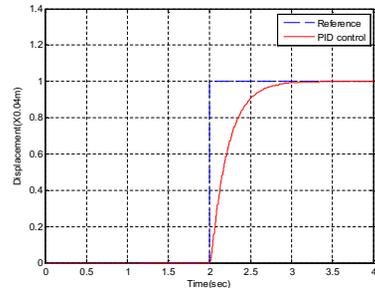
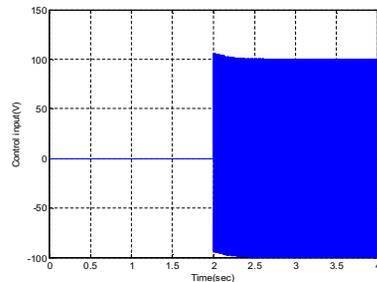


Fig. 5 Computational flow chart for genetic algorithm

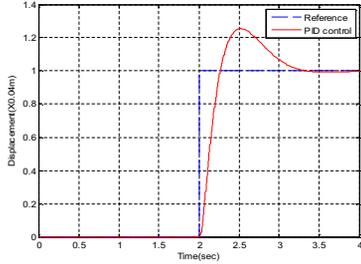


(a) Step respons of PID control system

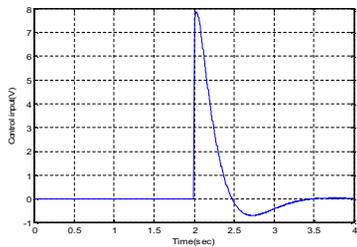


(b) Control input

Fig. 6 Step response and control input of PID control system without considering control input



(a) Step response of PID control system



(b) Control input

Fig. 7 Step response and control input of PID control system tuned by lower weighting overshoot

다수의 시행착오를 통해 오버슈트와 정착시간의 가중치를 $w_1 = 0.3$, $w_2 = 0.7$ 로 설정하였다. 또한 PID제어기 이득 K_p, K_I, K_D 각각에 할당된 비트 수는 10비트로 정하였고 해 집단 크기=10, 교배율=0.985, 변이율=0.015로 정하였다. 유전알고리즘의 학습 시 이용한 목표 데이터는 식(1)에 기초한 선형모델 시뮬레이션 결과이며 솔레노이드 밸브 유압계의 왕복운동 시에 나타나는 미소한 비선형 특성은 구동앰프의 게인 조정을 통하여 최소화하였다.

Fig. 8은 탐색 과정을 나타낸 것으로서 탐색은 60세대까지 수행했으며 Fig. 8(a)를 통해 최적의 적합도는 48세대 이후로는 일정하게 유지됨을 확인할 수 있다. 제안된 알고리즘을 통해 구해진 제어기 이득 $K_p = 7.49$, $K_I = 0.10$, $K_D = 7.3 \times 10^{-6}$ 이다. Fig. 9는 이 같은 PID 이득을 적용한 유압 위치제어계의 스텝응답과 제어 입력을 나타낸 것으로서 오버슈트와 정상상태오차는 발생되지 않고 정착시간은 0.75초이고 최대 제어입력은 8V이하로

유지됨을 알 수 있다.

5. 유압 위치 제어계 시험 및 토의

Fig. 10은 비교대상 제어기인 LQG/LTR 제어기의 구조를 보인 것이다. A, B, C, D는 설계 프래트 모델에 상태 방정식으로 나타내기 위한 시스템 행렬이며, μ 와 L 은 외란과 센서잡음과 관련된 설계 계수 행렬이다. 외란에 의해 유발되는 정상상태 오차를 제거하고 기준입력 신호에 대한 명령 추종성을 향상시키기 위하여 식(1)의 시스템 모델에 적분요소를 첨가한 모델에 기초하여 LQG/LTR 제어기를 설계하였다^[3].

설계된 Kalman필터 이득 H 와 제어 이득 G 는 식(9) 및 식(10)과 같이 표현된다.

$$H = \begin{bmatrix} 7.24 \times 10^{-14} \\ -8.00 \times 10^{-16} \\ 4.68 \times 10^{-9} \\ 1.90 \times 10^{-3} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$G = [9.88 \times 10^1 \ 1.65 \times 10^4 \ 1.02 \times 10^8 \ 2.58 \times 10^7] \quad (10)$$

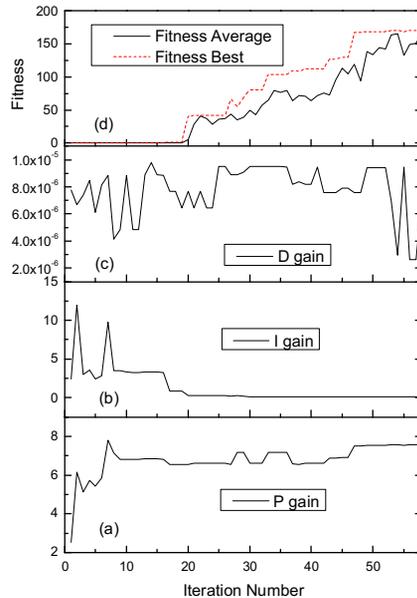
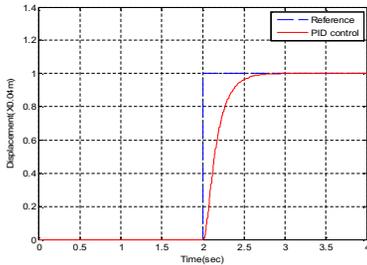
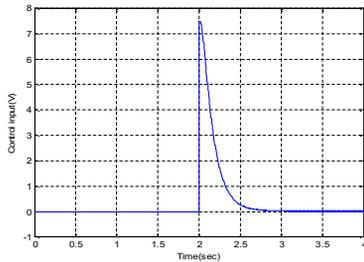


Fig. 8 Average fitness and best fitness(d) and control gains: P gain(a), I gain(b), D gain(c)



(a) Step response of PID control system



(b) Control input

Fig. 9 Step response and control input of PID system tuned by GA

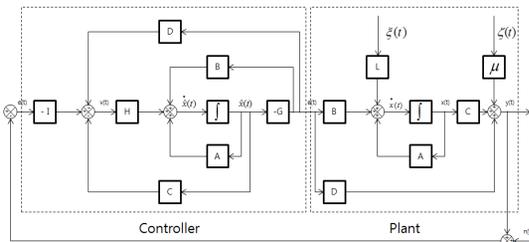


Fig. 10 Structure of the LQG/LTR controller

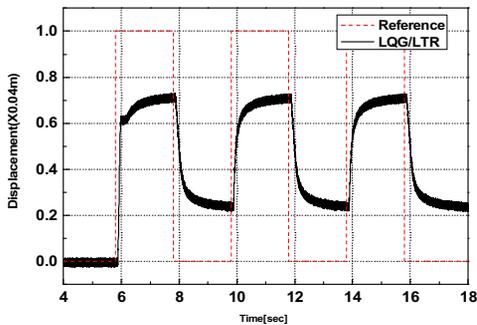


Fig. 11 Square response of LQG/LTR without nonlinear compensator

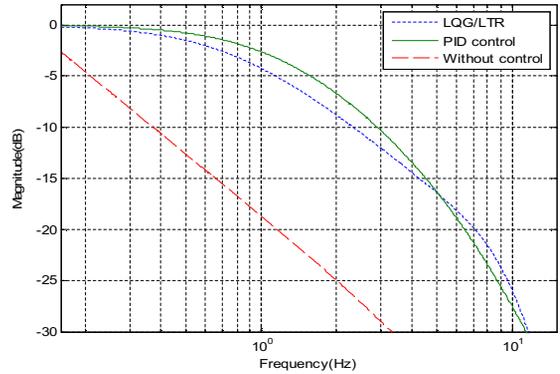


Fig. 12 FRF Comparison of LQG/LTR and PID system tuned by GA

Fig. 11은 식(3)으로 표현된 비선형 보상기인 역사역대 보상기가 피드백 제어계 루프에서 제거된 상태 하에서 0.25Hz 사각파 입력에 대한 유압 위치 제어계의 응답을 나타낸 것이다.

사역대에 의한 응답속도의 지연으로 인하여 제어계의 응답이 기준입력신호에 적절히 추종하지 못하고 큰 정상상태 오차가 발생함을 알 수 있다.

Fig. 12는 유전 알고리즘에 의하여 설계된 PID 제어기와 LQG/LTR 제어기를 이용하여 구성된 피드백 제어계의 주파수 전달함수를 보인 것이다. 두 제어기 모두 제어하지 않은 개루프 전달함수에 비해서 유효 주파수 대역 향상이 이루어져 있음을 알 수 있다. 또한 5Hz 이하에서는 PID 제어기가 좋은 성능을 보이고 있으나 5Hz 이상에서는 LQG/LTR 제어기가 오히려 좋은 성능을 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 LQG/LTR 제어기는 제어계의 루프전달회복 과정에서 피드백 제어계의 주파수 대역 성능 목표가 적절히 고려되어 제어기가 설계되었기 때문이며 유전알고리즘에 기초한 PID 제어기는 시간 영역에서의 응답특성의 향상에 기초하여 설계되었기 때문이다.

Fig. 13은 시간 영역에서 두 제어기의 계단응답을 보인 것으로서 오버슈트는 두 제어기 모두 발생되지 않음을 알 수 있고 PID 제어기의 정착시간이 LQG/LTR 제어기에 비해 짧은 것을 알 수 있다.

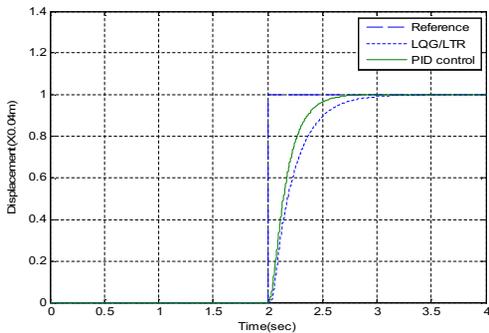


Fig. 13 Step response comparison of LQG/LTR and PID system tuned by GA

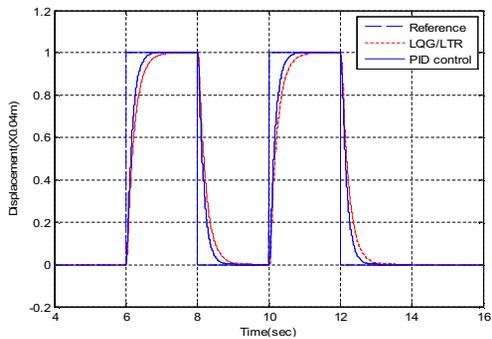


Fig. 14 Response comparison of LQG/LTR and PID system tuned by GA to 0.25Hz square input

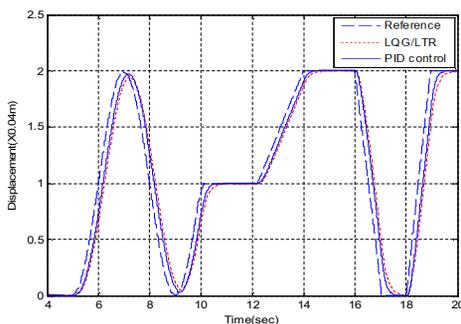


Fig. 15 Response comparison of LQG/LTR and PID system tuned by GA to complex input

Fig. 14는 0.25Hz의 전진 및 후진 이동을 위한 반복적 사각파로 구성된 기준입력신호에 대한 두 제어 시스템의 응답을 보인 것으로 두 방향의 응답

특성은 완전히 동일하고 PID 제어가 응답속도 면에서 LQG/LTR 제어기에 비해 더 좋은 성능을 보여주고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 15는 다양한 신호가 복합된 기준입력신호에 대한 두 제어 시스템에 대한 응답으로 PID 제어가 LQG/LTR제어기 보다 향상된 명령 추종 성능을 가짐을 확인할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 솔레노이드 밸브를 이용한 유압위치 제어계의 설계과정에서 단순 유전 알고리즘을 이용하여 PID 제어기의 이득 동조가 적절하게 이루어질 수 있음을 보였다. 유전 알고리즘의 적용을 위해 시간영역에서의 제어성능 기준인 오버슈트와 정착시간과 밸브 구동부 앰프의 신호범위의 한계로 인한 제어입력 크기의 제한조건을 적합도 함수 개념을 도입하여 설계 목적함수에 반영하였다.

LQG/LTR 제어기는 설계과정에서 피드백계의 주파수특성을 체계적으로 조정할 수 있어서 주파수 대역폭 향상을 목표로 하는 경우에는 유전 알고리즘에 의한 PID 제어기보다 넓은 제어가능 주파수 대역을 갖게 된다. 하지만 유전 알고리즘에 의해 설계된 PID 제어기와 LQG/LTR 제어기로 구성된 유압 제어계의 과도응답에서 두 경우 모두 계단 입력신호에 대해 오버슈트가 발생하지 않았고 5Hz 이하의 저주파 기준입력신호에 대해서는 정착시간 단축 및 명령 추종성면에서 유전 알고리즘에 의한 PID 제어가 LQG/LTR 제어기보다 우수한 성능을 보였다.

후기

이 논문은 금오공과대학교 학술연구비 지원에 의해 수행되었음.

REFERENCES

1. Bar-Cohen Y., "Electro-active polymers: current capabilities and challenges," Proceedings of the SPIE Smart Structures and Materials Symposium EAPAD Conference, Paper 4695-02, 2002.
2. Yum, M. O., "A Study on Control Characteristics of Fluid Power Elevator," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 2, No. 3, pp. 41-47, 2003.
3. Gamble, J. B. and Vaughan, N. D., "Comparison of Sliding Mode Control with State feedback and PID Control Applied to a Proportional Solenoid Valve," Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 118, No. 3, pp. 434-438, 1996.
4. Kim, I. S., Kim, Y. S., and Kim, K. B., "LQG/LTR Control of Hydraulic Positioning System with Dead-zone," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 22, No. 8, pp. 729-735, 2012.
5. Jung, G. H., "Auto Tuning of Position Controller for Proportional Flow Control Solenoid Valve," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 36, No. 7, pp. 797-803, 2012.
6. Shin, S. S., Noh, J. H., and Park, J. H., "A study on the optimal tuning of the hydraulic motion driver parameter by using RCGA," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 38, No. 1 pp. 39-47, 2014.
7. Hasanien, H. M., "Design Optimization of PID Controller in Automatic Voltage Regulator System Using Taguchi Combined Genetic Algorithm Method," IEEE Systems Journal, Vol. 7, No. 4, pp. 825-831, 2013.
8. Elbayomy, K. M., Zongxia, J., and Huaqing, Z. "PID Controller Optimization by GA and Its Performances on the Electro-hydraulic Servo Control System," Chinese Journal of Aeronautics Vol. 21, Issue 4, pp. 378-384, 2008.
9. Cho, S. H. and Lee, M. W., "Simple Adaptive Position Control of a Hydraulic Cylinder-load System Driven by a Proportional Directional Control Valve," Journal of the Korean Society for Precision Engineering Vol. 28, No. 8, pp. 936-941, 2011.
10. Tao, G. and Kokotovic, P. V., Adaptive Control of Systems with Actuator and Sensor Nonlinearities, John Wiley & Sons, 1996.
11. Fortgang, J. D., George, L. E., and Book, W. J., "Practical Implementation of a dead zone inverse on a hydraulic wrist," ASME 2002 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, pp. 149-155, 2002.
12. Yassami, M., and Ashtari, P. "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 Vol 19, No 5, pp. 1366-1374, 2015.
13. Choi, K. J., Hong, D. S., "Posture optimization of a humanoid robot using a simple genetic algorithm," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 11, No. 3, pp. 381-390, 2010.
14. Kim, J. S., Jung, H. H., Park, B. K., "A Study on the Optimal Design for a Magnetic Bearing-Rotor with Maximum Stiffness using a Genetic Algorithm," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 12, No. 6, pp. 167-174, 2013.
15. Jin, K. K., Genetic Algorithms and Their Applications, Kyo Woo Sa, 2004.