

유전자 알고리즘과 콤플렉스법에 의한 직접구동형 서보밸브의 제어기 상수값 설계

이 성 래^{*†}

* 건양대학교 기계공학과

Controller Parameters Design of Direct Drive Servo Valve Using Genetic Algorithm and Complex Method

Seong Rae Lee^{*†}

* Dept. of Mechanical Engineering, Konyang Univ.

(Received July 24, 2012 ; Revised January 18, 2013 ; Accepted January 23, 2013)

Key Words: Control System(제어시스템), Direct Drive Servo Valve(직접구동형 서보밸브), Controller Parameters(제어기 상수값), Genetic Algorithm(유전자 알고리즘), Complex Method(콤플렉스법), Constrained Direct Search(제약직접탐색)

초록: 직접구동형 서보밸브의 제어시스템은 비선형적이며 밸브스풀에 미치는 유체력의 영향은 매우 크고 부하압력의 크기에 좌우된다. 제어시스템의 설계요구조건을 만족시키기 위해, 제약직접탐색방법인 유전자 알고리즘과 콤플렉스법을 적절히 활용하여 진상-지상제어기 및 미분피드백제어기의 최적 상수값을 탐색하였다. 최적 제어기 상수값을 대입하여 제어시스템을 시뮬레이션한 결과 설계요구조건을 만족하였다.

Abstract: The control system of a direct drive servo valve is a nonlinear system, and the flow force effect on the spool motion is significant and dependent on the load pressure. To satisfy the control system design requirements, the optimal parameters of the lead-lag controller and the derivative feedback controller are searched for using a genetic algorithm and a complex constrained direct search type method. The obtained controller parameters successfully perform their role to satisfy the control system design requirements.

- 기호설명 -

B_{eq} : 제한각 DC모터 회전체 등가점성감쇠계수 C_d : 스푼밸브 오리피스 유량계수 C_v : 스푼밸브 오리피스 속도계수 $f(\underline{x})$: 목적함수 f_{lag}, f_{lead} : 진상-지상 제어기 상수 $G_c(s)$: 진상-지상 제어기 전달함수 $G_L(s)$: 밸브스풀 변위측정기 전달함수 $H_c(s)$: 미분피드백 제어기 전달함수 H_{po} : 밸브스풀 변위측정기 정상상태이득 I_c : 진상-지상 제어기 출력전류	I_{der} : 미분피드백 제어기 출력전류 I_m : 제한각 DC모터의 코일전류 J_{eq} : 제한각 DC모터 회전체 등가관성 K_b : 제한각 DC모터 역기전력상수 K_{der} : 미분피드백 제어기 상수 K_{eq} : 제한각 DC모터 회전체 등가유체 회전스프링상수 K_{ga} : 제한각 DC모터 전류-전압 컨버터 이득 K_{pm} : 진상-지상 제어기 상수 K_t : 제한각 DC모터 토크상수 K_{vf} : 스푼밸브의 유체력에 의한 직선 스푼프링상수 L : 제한각 DC모터 코일 인덕턴스 N : 제한각 DC 모터 극수 P_L : 스푼밸브의 부하압력(= $P_1 - P_2$)
---	---

† Corresponding Author, srlee@konyang.ac.kr

- P_s : 스폴밸브의 공급압력
- r : 제한각 DC모터 회전축과 스폴 중심축 사이의 거리
- R : 제한각 DC모터 코일 저항
- T_m : 제한각 DC모터 출력토크
- $V_e(t)$: 제어시스템의 스폴위치오차 전압신호
- $V_m(t)$: 제한각 DC모터 전류-전압 컨버터 출력전압
- $V_r(t)$: 제어시스템의 기준명령 전압신호
- w : 밸브 오리피스 개구면적 대 스폴변위비
- \underline{x} : 목적함수의 설계변수 벡터
 $\underline{x} = [K_{der} \ K_{pm} \ f_{lag} \ \alpha \ f_{lead} \ \beta]^T$
- x_v : 스폴밸브의 스폴변위
- α, β : 진상-지상 제어기 상수
- ζ_L, ω_L : 스폴변위측정기 감쇠비 및 비감쇠 고유진동수
- $\theta, \frac{d\theta}{dt}, \frac{d^2\theta}{dt^2}$: DC모터회전각, 각속도, 각가속도
- τ_{der} : 미분피드백 제어기 상수

1. 서론

직접구동형 서보밸브는 Fig. 1에 나타난 것처럼 밸브제어기, 제한각 DC모터, 회전운동을 직선운동으로 변환시키는 기구, 스폴밸브 및 위치센서(LVDT)로 구성되는 1단 밸브이며 유압실린더에 공급되는 유량을 제어하는 역할을 한다. 직접구동형 서보밸브는 1단밸브이기 때문에 밸브에 걸리는 부하압력에 따라 밸브를 통과하는 유량의 크기가 변하며 이에 따라 밸브스폴에 작용하는 유체력의 영향이 커진다.

또한 제어기의 출력 전류와 DC모터에 인가되는 전압은 각각 리미터에 의해 제한된다. 따라서 직접구동형 서보밸브 제어시스템은 부하압력의 크기에 따라 등가 스프링 상수, K_{eq} 가 변하고 전류 리미터 및 전압 리미터에 의한 비선형성을 포함하는 시스템이다.

본 논문은 직접구동형 서보밸브의 설계요구조건인 주파수응답대역 120Hz 이상, 최대주파수응답크기비 3 dB이하를 만족하며 계단응답에서 기준입력(1V~5V) 및 부하압력(0MPa~20.7MPa)의 크기에 관계없이 오버슈트 20% 이하와 $t=0.02$ 초에서 오차 2% 이하를 만족시킬 수 있도록 진상-지상제어기 및 미분피드백 제어기를 설계하는 과정

을 기술한다.

해석적 Bode방법에 의한 제어기 설계는 수많은 시행착오를 요구하였으며 설계요구조건을 만족시키기 위해 기준명령신호가 전단필터(prefilter)를 통과한 후 제어시스템에 입력되었다.⁽¹⁾ 콤플렉스법에 의한 제어기 설계는 탐색된 제어기 상수값이 최적값인지에 대한 확신이 부족하였고 설계요구조건을 만족시키는 목적함수를 설정하는데 많은 노력이 필요하였으며 또한 설계요구조건을 만족시키기 위해 제어시스템의 응답속도를 줄이고 안정성을 향상시키기 위해 전단필터를 필요로 하였다.⁽²⁾

본 논문에서는 설계요구조건을 만족하는 최적의 제어기 상수값을 탐색하기 위해 전역 탐색에 유리한 유전자 알고리즘(genetic algorithm)⁽³⁾과 지역 탐색에 유리한 콤플렉스법(complex method)⁽⁴⁾을 적절히 활용하여 체계적으로 제어기를 설계하였다.

2. 직접구동형 서보밸브 제어시스템의 수학적 모델

2.1 제어기

진상-지상제어기는 스폴위치의 오차전압신호, V_e 를 참고하여 전류, I_c 를 출력시키며 미분피드백 제어기는 스폴위치전압, V_x 를 참고하여 전류, I_{der} 를 출력시킨다.

$$I_c = G_c(s) V_e \tag{1}$$

$$V_e = V_r - V_x \tag{2}$$

$$G_c(s) = \frac{K_{pm} \alpha (\tau_{lag} s + 1) (\tau_{lead} s + 1)}{(\alpha \cdot \tau_{lag} s + 1) (\frac{\tau_{lead}}{\beta} s + 1)} \tag{3}$$

$$\tau_{lag} = \frac{1}{2\pi f_{lag}} \text{ [s]} \tag{4}$$

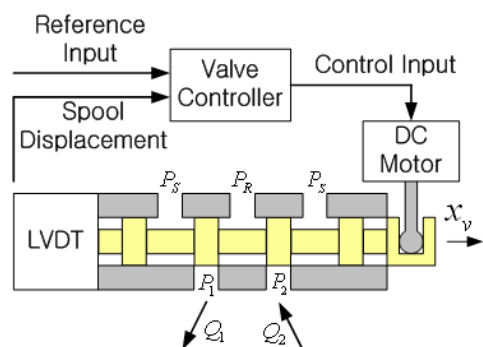


Fig. 1 Schematics of direct drive servo valve

Table 1 System constants of the direct drive servo valve control system

$J_{eq} = 5.6054 \times 10^{-4}$ [N cm s ² /rad],	$B_{eq} = 0$
$K_{eq} = 56.628$ [N cm/rad] at $P_L = 0$ [MPa]	
$K_{eq} = 0$ [N cm/rad] at $P_L = 20.7$ [MPa]	
$L = 4.5 \times 10^{-3}$ [H]	
$K_b = 0.177$ V/(rad/s), $K_{ga} = 50$ [V/A]	
$H_{po} = 101.04$ [V/cm], $\omega_L = 3000$ [Hz], $\zeta_L = 1$	
$f_{der} = 300$ [Hz]	

여 선형화된 제어시스템의 전달함수를 구할 수 있다. 또한 과학기술용 소프트웨어인 MATLAB⁽⁷⁾ 언어로 프로그램을 작성하여 기준계단입력, $V_r(t)$ 에 대한 시간응답인 선형화된 직접구동형 서보밸브 제어시스템의 출력인 스플변위전압, $V_x(t)$ 를 구할 수 있다. 물론 시간응답의 그래프 형상은 제어기 상수값이나 부하압력에 따라 변화한다.

여기서는 선형화된 직접구동형 서보밸브 제어시스템이 서론에서 언급한 설계요구조건을 만족할 수 있도록 유전자 알고리즘과 콤플렉스법을 적용하여 진상-지상제어기 및 미분피드백 제어기의 상수값을 탐색하고 최적의 제어기 상수값을 구한다.

먼저 설계변수는 식 (20), 설계변수의 탐색범위는 식 (21)~식 (26), 목적함수는 식 (27)과 같이 설정한다.

$$\underline{x} = [K_{der} \ K_{pm} \ f_{lag} \ \alpha \ f_{lead} \ \beta]^T \quad (20)$$

$$0 \leq K_{der} \leq 5 \text{ [A/V]} \quad (21)$$

$$1 \leq K_{pm} \leq 20 \text{ [A/V]} \quad (22)$$

$$1 \leq f_{lag} \leq 500 \text{ [Hz]} \quad (23)$$

$$2 \leq \alpha \leq 30 \quad (24)$$

$$20 \leq f_{lead} \leq 500 \text{ [Hz]} \quad (25)$$

$$2 \leq \beta \leq 40 \quad (26)$$

$$f(\underline{x}) = \int_0^{0.02} (1 - e^{-t/0.005}) \cdot |V_e| \cdot dt \quad (27)$$

Table 2에 나타난 6개의 제어기 상수값은 유전자 알고리즘을 적용하여 부하압력이 0.00MPa, 6.90MPa, 13.8MPa, 20.7MPa 인 경우에 대해 식 (27)에 나타난 목적함수를 최소화시키는 설계변수 6개의 값을 탐색한 결과이다. 여기서 목적함수값을 구한다는 것은 식 (27)의 값을 구하는 것인데

이는 Fig. 2에서 선형 시스템 전달함수를 구하고 MATLAB의 내장함수인 'step'함수를 이용하여 t=0~0.02초 동안의 단위계단응답을 구하고 행렬연산에 의하여 식 (27)의 목적함수값을 구하므로 많은 계산을 필요로 한다.

유전자 알고리즘에서 개체수 50개, 세대수 2000개인 경우, 예를 들어 부하압력이 0.00MPa인 경우 최적의 설계변수 6개의 값을 구하는데 필요한 목적함수의 계산회수는 $50 \times 2000 = 100,000$ 회가 되는데 일반 개인용 컴퓨터를 사용하는 경우 약 180분의 시간이 소요된다. 즉 Table 2를 완성하는데 소요된 시간은 720분이다.

유전자 알고리즘은 전역적인 최소값을 구하는데 유리하지만 탐색시간이 너무 오래 걸린다. 이에 따라 지역적인 탐색에 국한되지만 탐색시간이 짧은 콤플렉스법을 적용하여 제어기의 최적 상수값을 탐색하였으며 그 결과를 Table 3에 나타내었다.

콤플렉스법을 적용하는 경우, 예를 들어 부하압력이 0.00MPa인 경우 최적의 설계변수 6개의 값을 구하는데 필요한 목적함수의 계산회수는 1,000회가 되는데 일반 개인용 컴퓨터를 사용하는 경우 약 1분의 시간이 소요된다. 즉 Table 3을 완성하는데 소요된 시간은 16분이다. Table 2와 Table 3에서 유전자 알고리즘에 의한 최종 목적함수값이 콤플렉스법에 의한 최종 목적함수값보다 큰 이유는 유전자 알고리즘에서 세대수 1000일 때까지도 탐색이 최종 수렴에 이르지 못했기 때문이다.

Table 3에 노란색으로 표시한 데이터는 Table 2에 나타난 데이터와 큰 차이가 없다는 것을 알 수 있다. 즉 동일한 탐색조건에서 콤플렉스법을 4~6회 정도를 반복 시행(매회 설계변수의 초기값은 등분포 난수로 생성)하면 그 중에서 하나 이상은 유전자 알고리즘을 적용하여 탐색한 결과와 거의 일치한다는 것을 알 수 있다. 엄밀히 관찰하면 Table 2와 Table 3의 값을 비교하면 각 제어인자의 값은 20% 정도가 차이가 나더라도 목적함수의 값에는 약간의 차이가 발생하는 것을 알 수 있으며 Fig 3에 나타난 것처럼 유전자 알고리즘에 의해 구한 제어인자를 적용하여 구한 선형 시스템응답과 콤플렉스 알고리즘에 의해 구한 제어인자를 적용하여 구한 선형시스템응답은 거의 유사하다는 것을 알 수 있다. 즉 직접구동형 서보밸브 제어시스템인 경우 콤플렉스법을 적용하여도 유전자 알고리즘을 적용한 것 만큼의 정확도(전역적 최소값

을 찾는 것)를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다. 단 4~6회 정도의 반복 시행이 필요하지만 전체적 계산 시간을 크게 줄일 수 있는 장점이 있다.

Table 3에서 부하압력이 0 MPa일 때 구한 최적 제어기 상수값(2.466, 5.507, 34.32, 30.00, 116.7, 40.00)을 선형화된 제어시스템에 대입하여 계단입력에 대한 시간응답을 구하면 오버슈트가 20%를 초과하므로 K_{pm} 값을 5.507에서 2.4로 감소시켜 대입하면 시간응답이 Fig. 4와 같이 나타난다.

Table 2 Search Results of Optimal Controller Parameters of Linearized Control System by Genetic Algorithm: population(50), generations(2000), search time(180min)

P_L [MPa]	K_{der} [A/V]	K_{pm} [A/V]	f_{lag} [Hz]	α [.]	f_{lead} [Hz]	β [.]	$f(x)$ [V]
0.00	2.811	6.332	27.23	29.94	134.4	39.82	0.926
6.90	2.143	5.846	23.85	29.54	130.8	39.99	0.811
13.8	1.601	4.565	14.27	28.56	115.0	39.73	0.676
20.7	1.258	5.200	1.547	2.474	117.7	39.96	0.736

Table 3 Search Results of Optimal Controller Parameters of Linearized Control System by Complex Method: objective function evaluations(1000), search time(1min)

P_L [MPa]	K_{der} [A/V]	K_{pm} [A/V]	f_{lag} [Hz]	α [.]	f_{lead} [Hz]	β [.]	$f(x)$ [V]
0.00	2.553	5.644	31.94	29.80	118.6	39.96	0.913
	2.777	6.120	28.60	25.92	129.6	40.00	0.932
	2.466	5.507	34.32	30.00	116.7	40.00	0.908
	2.514	5.157	33.04	29.91	115.5	39.72	0.917
6.90	1.943	4.142	28.29	29.75	100.9	39.94	0.780
	2.011	4.403	26.87	25.59	107.5	39.90	0.794
	1.931	4.104	28.50	29.89	99.78	39.96	0.779
	1.936	4.144	28.23	29.90	100.8	39.99	0.779
13.8	1.405	2.987	16.72	30.00	81.39	39.89	0.643
	1.511	3.690	15.04	30.00	95.45	39.54	0.649
	1.465	3.458	15.85	29.90	88.05	40.00	0.640
	1.466	3.445	15.80	29.93	87.75	40.00	0.640
20.7	0.000	8.211	14.71	2.000	156.9	39.99	0.748
	0.001	8.176	14.78	2.000	156.5	40.00	0.748
	1.215	3.149	1.001	2.000	80.52	39.96	0.643
	0.000	8.391	1.000	29.94	160.6	40.00	0.743

Fig. 4에 나타난 시간응답은 부하압력이 0MPa, 20.7MPa 인 경우 $t=0.02$ 초에서 오차설계요구조건 2% 이하를 모두 만족하며 Fig. 5는 선형제어 시스템의 주파수응답을 나타내는데 주파수응답 설계요구조건인 주파수응답대역 120Hz 이상, 최대주파수응답크기비 3 dB이하를 모두 만족하고 있다.

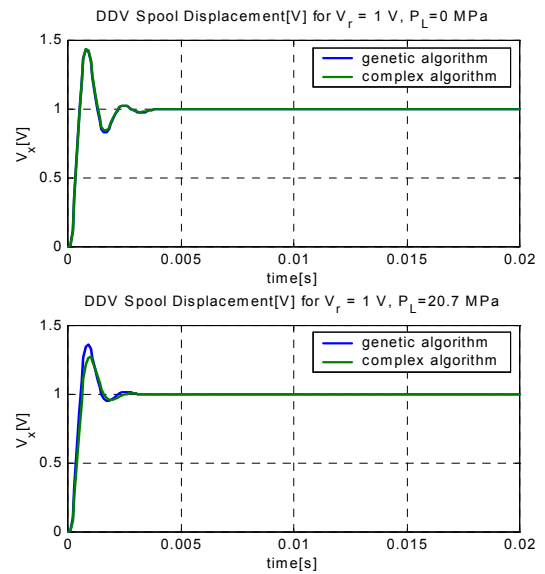


Fig. 3 Step response, $V_x(t)$ of linearized control system: (top) Applying the controller parameters of Table 2 and the colored controller parameters of Table 3 for $P_L=0$ MPa (bottom) Applying the controller parameters of Table 2 and the colored controller parameters of Table 3 for $P_L=20.7$ MPa

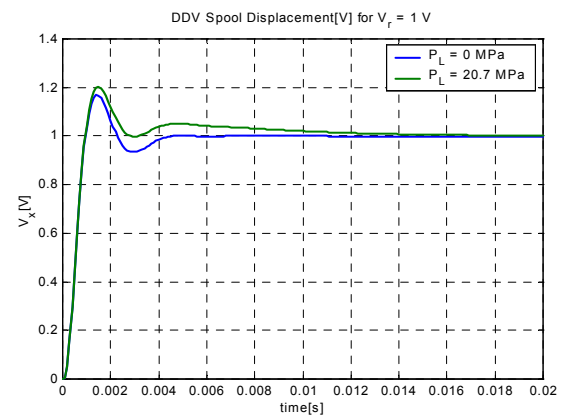


Fig. 4 Step response, $V_x(t)$ of linearized control system(dotted line: $P_L=0$, solid line: $P_L=20.7$ MPa): $K_{der}=2.466$ [A/V], $K_{pm}=2.4$ [A/V], $f_{lag}=34.32$ [Hz], $\alpha=30.00$, $f_{lead}=116.7$ [Hz], $\beta=40.00$

선형제어시스템에서 구한 최적의 제어기 상수값을 본래의 비선형 제어시스템에 대입하여 시간 응답을 구하면 Fig. 6과 같이 나타난다.

Fig. 6에서 기준입력이 5V이고 부하압력이 20.7MPa인 경우 오버슈트가 20%를 초과하므로 설계요구조건을 만족시키지 못한다. 오버슈트를 줄이기 위해서 K_{pm} 값을 2.4에서 점차 감소시키면 오버슈트는 감소하나 $t=0.02$ 초에서 오차가 설계요구조건 2%를 초과하여 오차설계요구조건 2%

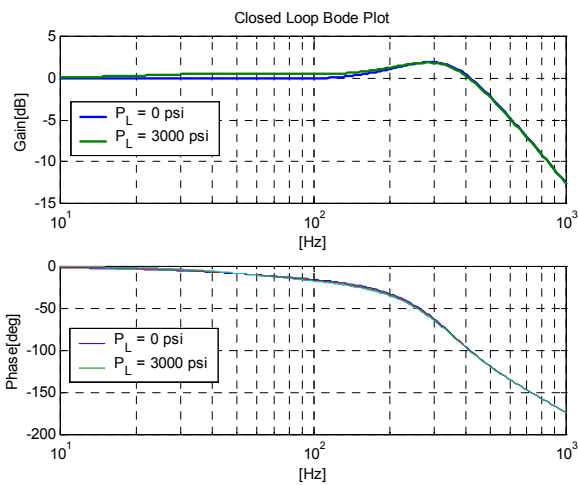


Fig. 5 Frequency response of linearized control system(dotted line: $P_L=0$, solid line: $P_L=20.7$ MPa): $K_{der}=2.466$ [A/V], $K_{pm}=2.4$ [A/V], $f_{lag}=34.32$ [Hz], $\alpha=30.00$, $f_{lead}=116.7$ [Hz], $\beta=40.00$

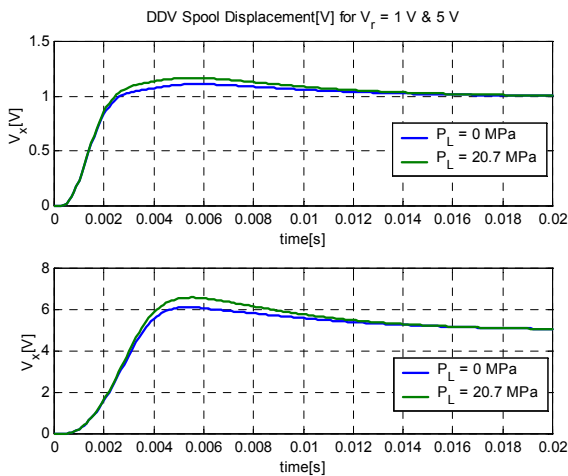


Fig. 6 Step response, $V_x(t)$ of non-linearized control system(dotted line: $P_L=0$, solid line: $P_L=20.7$ MPa): $K_{der}=2.466$ [A/V], $K_{pm}=2.4$ [A/V], $f_{lag}=34.32$ [Hz], $\alpha=30.00$, $f_{lead}=116.7$ [Hz], $\beta=40.00$

이하를 만족시키지 못한다는 것을 알 수 있었다.

3.2 비선형 제어시스템의 제어기 설계

3.1절에서 선형제어시스템에서 구한 최적의 제어기 상수값을 비선형 제어시스템에 적용한 경우 설계요구조건을 만족시키지 못하였으므로 본래의 비선형제어시스템에서 최적의 제어기 상수값을 구해야 한다. 물론 3.1절과 동일하게 설계변수는 식 (20), 설계변수의 탐색범위는 식 (21)~식 (26), 목적함수는 식 (27)과 같이 설정한다.

비선형 제어시스템인 경우에는 선형 제어시스템인 경우에 비해서 식 (27)에 나타난 목적함수값을 구할 때 훨씬 더 많은 계산시간을 필요로 한다. 또한 3.1절에서 Fig. 2에 나타난 시스템인 경우 콤플렉스법에 의한 탐색결과가 유전자 알고리즘에 의한 탐색결과와 유사하므로 3.2절에서는 탐색 알고리즘으로서 콤플렉스법을 적용하였다.

Table 4는 기준입력과 부하압력이 (1V, 0MPa), (1V, 20.7MPa), (5V, 0MPa), (5V, 20.7MPa)인 경우에 대해서 각각 식 (27)에 나타난 목적함수를 최소화시키는 설계변수 6개의 값을 탐색한 결과이다.

여기서 목적함수값을 구한다는 것은 식 (27)의 값을 구하는 것인데 이는 Fig. 2에 나타난 비선형 시스템을 시뮬레이션하여 $t=0\sim 0.02$ 초 동안의 단위 계단응답을 구하고 행렬 연산에 의하여 식 (27)의 목적함수값을 구한다는 것이며 탐색완료(목적함수 1000회 계산)에 약 12분의 시간이 소요된다. 즉 선형제어시스템의 탐색완료(목적함수 1000회 계산)에 걸리는 시간 1분에 비하면 12배의 시간이 소요되며 만일 유전자 알고리즘으로 비선형 제어시스템의 탐색완료(목적함수 50*2000회 계산)에 걸리는 시간은 12*180=2160분이 소요된다는 것을 추정할 수 있다.

Table 4에서 노란색으로 나타난 최적 제어기 상수값 중에서 기준명령이 1V, 부하압력이 20.7MPa인 경우의 제어기 상수값(0.007, 7.777, 1.000, 2.000, 177.0, 40.00)을 비선형제어시스템에 대입하여 시간응답을 구하면 $t=0.02$ 초에서 오차가 설계요구조건 2%를 초과하였다.

이에따라 K_{pm} 값을 7.777에서 10.00으로 증가시켜 비선형제어시스템에 대입하여 시간응답을 구하면 Fig. 7과 같으며 오버슈트는 20% 이하, $t=0.02$ 초에서 오차설계요구조건 2%를 모두 만족하였다.

Table 4 Search Results of Optimal Controller Parameters of Non-linearized Control System by Complex Method: objective function evaluations(1000), search time(12min)

V_r P_L	K_{der} [A/V]	K_{pm} [A/V]	f_{lag} [Hz]	α [.]	f_{lead} [Hz]	β [.]	$f(x)$ [V]
1[V], 0.0 [MPa]	0.150	8.362	8.548	2.02	168.8	31.71	2.140
	0.001	7.414	4.058	18.06	173.7	26.27	1.743
	0.011	6.862	4.220	29.73	174.5	27.60	1.736
	0.002	6.895	4.273	20.12	171.7	22.34	1.755
1[V], 20.7 [MPa]	0.006	7.790	1.001	2.001	176.6	38.63	2.222
	0.049	7.563	1.001	2.005	178.3	39.99	2.224
	0.007	7.777	1.000	2.000	177.0	40.00	2.220
	0.014	7.716	1.000	2.001	178.1	39.61	2.222
5[V], 0.0 [MPa]	0.110	6.583	2.839	29.86	159.0	38.43	26.55
	0.005	6.272	3.170	12.63	153.2	20.28	26.66
	2.437	3.262	19.59	9.082	205.3	28.92	70.98
	0.426	6.338	3.461	6.790	163.9	39.74	26.74
5[V], 20.7 [MPa]	1.386	6.216	1.001	2.008	166.0	35.47	30.07
	1.364	5.261	1.000	2.005	165.7	23.47	30.09
	1.158	5.110	1.001	2.012	161.7	39.31	30.16
	1.393	6.261	1.000	2.001	165.7	39.02	30.04

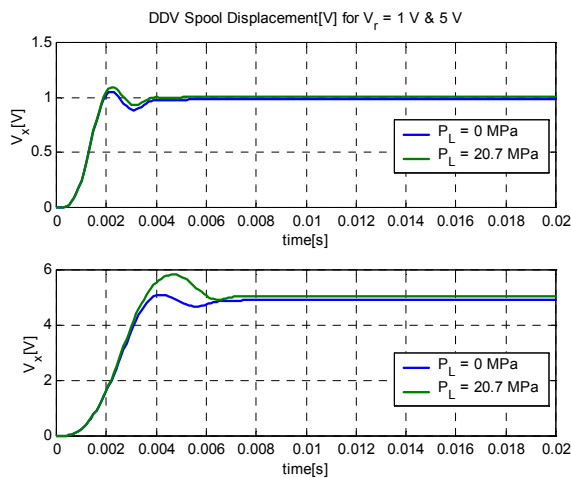


Fig. 7 Step response, $V_x(t)$ of non-linearized control system(dotted line: $P_L=0$, solid line: $P_L=20.7$ MPa): $K_{der}=0.007$ [A/V], $K_{pm}=10.00$ [A/V], $f_{lag}=1.000$ [Hz], $\alpha=2.000$, $f_{lead}=177.0$ [Hz], $\beta=40.00$

4. 결론

직접구동형 서보밸브의 설계요구조건인 주파수 응답대역 120Hz 이상, 최대주파수응답크기비 3 dB이하를 만족하며 계단응답에서 기준입력 (1V~5V) 및 부하압력(0MPa~20.7MPa)의 크기에 관계없이 오버슈트 20% 이하와 t=0.02초에서 오차 2% 이하를 만족시킬 수 있도록 진상-지상제어기 및 미분피드백 제어기를 설계하였으며 최적의 제어기 상수값을 구하기 위해 유전자 알고리즘과 콤플렉스법을 적절히 활용하여 효과적으로 제어기를 설계하였다.

해석적 Bode방법에 의한 제어기 설계나 콤플렉스법만을 적용한 제어기 설계에 비해서 제어기 설계 시간의 단축, 탐색 결과에 대한 신뢰성 증가, 그리고 전단필터의 불필요성이라는 결실을 얻을 수 있었다. 본 논문에서 시도한 비선형제어기의 설계 과정은 목적함수값을 계산하는데 많은 시간이 소요되는 최적 문제에 동일하게 응용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- (1) Lee, S. R., Choi, H. Y. and Moon, E. J., 2002, "Classical Controller Design of Direct Drive Servo Valve Using Analytical Bode Method," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 26, No. 4, pp. 754~763.
- (2) Lee, S. R., 2004, "Lead-Lag Controller Design of Direct Drive Servo Valve Using Complex Method," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 28, No. 11, pp. 1719~1726.
- (3) Kong, S. K, Kim, I. T., Park, T. H., Park, J. Y. and Shin, Y. H., 2002, "Genetic Algorithm," Green, Inc., pp. 402~412..
- (4) Reklaitis, G. V., Ravindran, A. and Ragsdell, K., 1983, *Engineering Optimization Methods and Applications*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 268~277.
- (5) Fleisher, W. A., 1989, "Brushless Motors for Limited Rotation," *Machine Design*, December 7, pp. 101~105.
- (6) Merritt, H. E., 1967, *Hydraulic Control Systems*, John Wiley and Sons, Inc, pp. 754~763.
- (7) Shahian, B. and Hassul, M., 1993, *Control System Design Using MATLAB*, Prentice Hall.