

유전자 알고리즘을 이용한 서어보 밸브의 설계 파라미터 최적화

엄태준*

Optimization of Design Parameters of a Servo Valve Using the Genetic Algorithm

Tai-Joon Um

Key Words: genetic algorithm, optimization, design parameters, servo valve

Abstract

This paper presents the optimization technique to select the design parameters of a hydraulic servo valve using the genetic algorithm. The dynamic performance is governed by the design parameters of the servo valve and they may be select by repeated number of simulations such that the desired performance is obtained. Using the genetic algorithm to optimize the design parameters, effective method is suggested. This method can be used for the design of the hydraulic systems as well as the servo valve.

기호설명

B_f	아마추어·플래퍼의 점성감쇠계수	I	에러 인덱스(집단의 적합도)
B_s	스풀의 점성감쇠계수	J	아마추어·플래퍼의 관성모멘트
b	노즐과 피이드백 스프링 끝간의 거리	K_f	피이드백 스프링의 스프링 상수
C_{dn}	노즐 부의 오리피스 계수	k_a	flexure tube의 비틀림 스프링 상수
C_{dm}	메인 오리피스의 오리피스 계수	k_m	토오크 모터 상수
C_{ddr}	드레인 오리피스의 오리피스 계수	m	스풀의 질량
D_n	노즐 직경	N	유전자 집단의 개수
d_m	메인 오리피스 직경	P_a, P_b	스풀 좌우에 작용하는 제어압력
d_{dr}	드레인 오리피스 직경	P_s	공급 압력
d_s	스풀의 직경	P_e	노즐을 빠져나간 후의 압력 (nozzle chamber내의 압력)
		Q_a	스풀 좌측으로 가는 유량
		Q_b	스풀 우측으로 가는 유량
		Q_x	노즐로 빠져나가는 유량
		Q_y	노즐로 빠져나가는 유량

* 순천향대학교 기계공학과

E-mail : tjoomum@asan.sch.ac.kr

TEL: (0418)530-1368 FAX: (0418)530-1494

- Q_e 드레인으로 빠져나가는 유량
- r 플래퍼 회전중심과 노즐간의 거리
- T_d 토오크 모터의 출력 토오크
- v_1 밸브 내의 체적(노즐 내부 측)
- v_2 밸브 내의 체적(노즐 출구 측)
- w 면적 구배
- x_{n0} 노즐 플래퍼 간극
- x_s 스펴의 변위
- $x_{s(max)}$ 스펴 최대 변위
- β 작동유의 체적탄성계수
- Δt 수치적분 시간구간
- ρ 작동유의 밀도
- θ_f 플래퍼의 움직임 각도

1. 서론

서어보 밸브는 단독으로는 하나의 유압요소이지만 복잡한 내부구조에 의하여 높은 차수의 동특성을 나타낸다. 일반적인 2단 노즐 플래퍼형 서어보 밸브의 동특성 해석은 관련 식을 유도한 후 여러가지 설계 파라미터를 변화시켜 가면서 시뮬레이션을 통해 이루어진다. 이 때 사용자가 원하는 동특성을 내도록 하는 설계 파라미터를 찾기 위해서는 많은 시뮬레이션을 행해야 한다. 여기에 설계 파라미터 최적화 기법을 사용하면 효율적으로 설계 파라미터를 결정할 수 있게 된다.

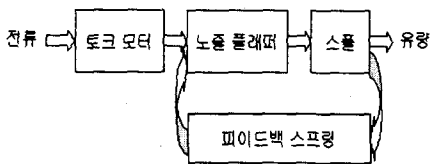


Fig. 1 Block Diagram of the Servo Valve

본 논문에서는 최적화 기법의 하나인 유전자

알고리즘을 이용하여 서어보 밸브의 특정 동특성을 갖도록 하는 설계 파라미터를 구하려고 한다. 여러 가지 설계 파라미터 중에서 파라미터 민감도가 큰 것과 작은 것을 하나씩 둘을 선정하여 이들의 최적화를 시도하고자 한다.

2. 서어보 밸브의 해석

서어보 밸브의 여러 개의 오리피스에 베르누이 정리에서 출발한 오리피스 유량 방정식을 적용하여 오리피스 방정식을 쓰면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Q_a = C_{dn} \frac{\pi}{4} d_m^2 \sqrt{\frac{2(P_s - P_a)}{\rho}} \quad (1)$$

$$Q_b = C_{dn} \frac{\pi}{4} d_m^2 \sqrt{\frac{2(P_s - P_b)}{\rho}} \quad (2)$$

$$Q_e = C_{ddr} \frac{\pi}{4} d_{dr}^2 \sqrt{\frac{2P_e}{\rho}} \quad (3)$$

위의 (1)번 식은 공급 측에서 스펴의 좌측으로 흐르는 유량을 나타내고 있고, (2)번 식은 공급 측에서 스펴의 우측으로 흐르는 유량을 나타내고 있으며, (3)번 식은 노즐 챔버에서 드레인 오리피스를 통해서 탱크로 빠져나가는 유량을 나타내고 있다.

또, 노즐을 통해 나가는 유량은 다음과 같다.

$$Q_x = C_{dn} \pi d_n (x_{n0} - x_n) \sqrt{\frac{2|P_a - P_e|}{\rho}} \text{SGN}(P_a - P_e) \quad (4)$$

$$Q_y = C_{dn} \pi d_n (x_{n0} + x_n) \sqrt{\frac{2|P_b - P_e|}{\rho}} \text{SGN}(P_b - P_e) \quad (5)$$

즉, (4)번 식은 스펴 좌측에서 노즐을 통해 노즐 챔버로 나가는 유량을 표시하고, (5)번 식은 스펴 우측에서 노즐을 통해 역시 노즐 챔버로 나가는 유량을 표시하고 있다.

그리고, 운동의 제 2법칙에 의하여 플래퍼 및 피이드백 스프링 결합체의 회전운동은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 T_d = & J\ddot{\theta}_f + (k_a + k_m + 8\pi C_{dn}r^2 P_s x_m)\theta_f \\
 & + \frac{\pi}{4} D_n^2 r (P_a - P_b) + (r+b)K_f \{ (r+b)\theta_f + x_s \} \\
 & + B_f \dot{\theta}_f
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

밸브 내에서 각 압축되는 부분에 대한 연속의 식들은 다음과 같다.

$$Q_a - Q_x - \frac{\pi}{4} d_s^2 \dot{x}_s = \frac{v_1}{\beta} \dot{P}_a \tag{7}$$

$$Q_b - Q_y + \frac{\pi}{4} d_s^2 \dot{x}_s = \frac{v_1}{\beta} \dot{P}_b \tag{8}$$

$$Q_a + Q_b - Q_e = \frac{v_2}{\beta} \dot{P}_e \tag{9}$$

(7)번 식은 스톨 좌측공간에 대한 압력변화를 나타내는 식이고, (8)번 식은 스톨 우측공간에 대한 압력변화를 나타내는 식이며, (9)번 식은 노즐 챔버에 대한 압력변화를 나타내는 식이다.

스폴의 운동방정식은 운동의 제 2법칙에 의하여 다음과 같이 쓸 수 있다. 즉, 스톨의 관성에 의한 힘은 스톨 좌우측의 압력에 의한 힘, 점성 마찰에 의한 감쇠력, 유량에 의한 flow force, 그리고 피이드백 스프링에 의한 힘들과 평형을 이루고 있다.

$$\begin{aligned}
 m \ddot{x}_s - \frac{\pi}{4} d_s^2 (P_a - P_b) + K_f \{ (r+b)\theta_f + x_s \} \\
 + B_s \dot{x}_s + w(P_s - P_a) = 0
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

이러한 동적 방정식들을 비선형이므로 수치적분을 이용하여 시뮬레이션하여 해석할 수 있다. 위 식들에 사용된 여러 가지 설계 파라미터 가운데 두 파라미터에 주목할 필요가 있다. 즉, 드레인 오리피스(drain orifice)의 직경과 피이드백 스프링(feedback spring)의 스프링 상수이다. 드레인 오리피스는 서어보 밸브의 동특성의 감쇠효과를 주는 중요한 파라미터인데, 민감도가 큰 편이다. 그리고, 피이드백 스프링은 민감도는 크지 않으나 설계시에 스프링 상수를 적당한 값으로 선정해야 할 필요가 있는 파라미터이다. 우선 최적화를 수행하기 전에 이 두 파라미터를 임의의 적당한 값으로 하고 시뮬레이션 하였다. Fig. 2는 그 결과를 보여주고 있다. 이 때 사용된 두 파라미

터 값은 다음과 같다.

$d_{dr} : 0.5 \text{ mm}$
 $K_f : 2000 \text{ N/m}$

Fig. 2의 곡선으로 하여금 최적화를 위한 목표 함수로서 근사적인 2차 동특성 곡선으로 가정하면 다음과 같이 표시할 수 있다. 즉,

고유진동수 : 270 Hz
 감쇠비 : 0.7

위 수치들에 의한 전형적인 2차 동특성은 근사적이긴 하나 최적화 계산을 효율적으로 하기 위한 것이다.

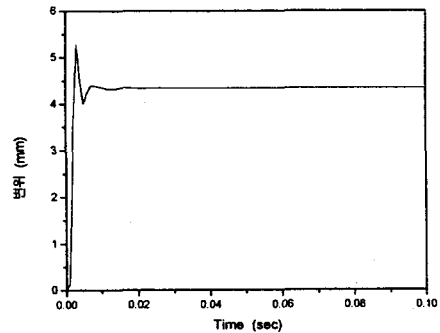


Fig. 2 Typical Dynamic Characteristic of the Spool Displacement

3. 유전자 알고리즘의 적용

우선 최적화시킬 파라미터의 범위를 설정하여 초기화한다. 이 때, 민감도가 큰 파라미터인 드레인 오리피스 직경의 범위는 너무 크지 않게 설정해야 한다. 만약 크게 잡는 경우, 유전자 집단의 개수 N (Pop size)를 크게 해야 하므로 최적화 시간이 많이 소요된다.

주어진 설계 파라미터 범위 내에서 유전자 집단을 선정하고, 각 유전자에 대한 error index를 계산한다. 이 때 집단의 개수가 N 개이므로 각 세대에서 행할 시뮬레이션의 횟수는 N 번임을 뜻한다. 그리고, 이 error index중에서 가장 좋은 값을 추출한다. 이 값에 대한 선택확률을 기억시킨다.

주어진 범위 내에서 임의의 2개 유전자를 선택

한다. 이 때의 선택하는 기준은 균일한 random number의 생성에 따라 결정된다. 이 유전자를 교배하고, 다시 임의의 2개 유전자를 선택하여 돌연변이시킨다. 이 결과에 따라 다시 error index를 계산하여 비교한다. 이러한 과정을 여러 번 반복하여 점점 좋은 형질의 유전자를 생존시키는 과정에서 최적화가 이루어지게 된다. 유전자 알고리즘의 흐름도를 나타낸 것이 Fig. 3이다.

유전자 알고리즘을 서어보 밸브 동특성 방정식에 적용하기 위해서는 최적화할 목표를 우선 설정해야 한다. 앞 절에서 기술한 2차의 동특성과 시뮬레이션으로 얻은 실제의 동특성을 비교하여 그 차이의 절대값을 최적화할 목표인 적합도 혹은 error index로 하였다. 즉 목표함수를 계산하는 단계에서 시뮬레이션을 실행하여 error index를 계산하도록 한 것이다.

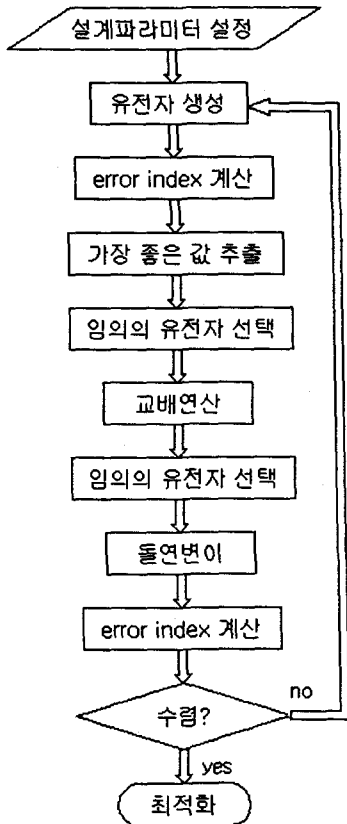


Fig. 3 Flow Chart of the Genetic Algorithm

최적화 대상인 2개의 파라미터는 드레인 오리피스 직경과 피이드백 스프링의 스프링 상수이다. 이 둘 파라미터를 선정한 이유는 우선 민감도가 큰 차이가 나므로 최적화 성공여부를 판단하기에 적합하고, 또 실제 설계에서 최적화 값을 그대로 적용할 수 있는 현실성 있는 파라미터이기 때문이다. 하나만의 파라미터를 최적화하는 것은 여러 번의 시뮬레이션에 의한 파라미터 값의 결정보다 효율성을 실증하기 어렵기 때문에 2개의 파라미터를 최적화 대상으로 하였다.

위에서 기술한 알고리즘에 의하여 C로 작성한 프로그램으로 최적화를 수행하였다.

4. 설계 파라미터 최적화

초기에 주어진 파라미터의 범위는 다음과 같이 설정하였다.

$$d_{dr} : 0.01 \sim 1 \text{ mm}$$

$$K_f : 500 \sim 10000 \text{ N/m}$$

세대(generation)의 수는 10세대 정도로 정한 결과, 충분히 수렴하는 것을 확인하였다. 교배확률은 0.8로 하고, 돌연변이 확률은 상대적으로 작은 값인 0.15로 설정하였다. error index계산을 위한 시뮬레이션시에 사용한 수치해석상의 값들은 다음과 같다.

$$\text{끝시간} : 0.1 \text{ sec}$$

$$\Delta t(\text{시간구간}) : 0.00001 \text{ sec}$$

이러한 조건으로 최적화를 수행한 결과를 동특성으로 비교한 것이 Fig. 4에 보여지고 있다.

그림에서 실제로 표시된 곡선(맨 아래 곡선)은 사용자가 원하는 동특성으로 앞서 기술한 전형적인 2차 시스템의 동특성이다. 이 곡선에 가능한 가깝도록 설계 파라미터를 최적화한 것이다. 서어보 밸브의 차수는 2차보다 훨씬 더 많으므로 설계 파라미터의 최적화로 이 실선의 곡선과 일치하는 동특성을 얻는 것은 곤란하지만 어느 정도 가깝게 얻느냐가 관건이다. 우선 유전자 집단 수를 $N(\text{Pop size})=10$ 개로 했을 때는 집단의 수가 너무 작아 제대로 수렴하지 못하였다. 다음으로 $N(\text{Pop size})=20$ 개로 했을 때의 최적화된 파라미터로 동특성을 구한 그래프가 동그라미 \circ 로 연결한 점선(맨 위의 곡선)이다. 다시 $N(\text{Pop size})=30$ 개로 증가시켰을 때의 최적화된

파라미터로 동특성을 구한 그래프가 검은 동그라미 ● 으로 연결한 점선(위에서 두 번째 곡선)이다.

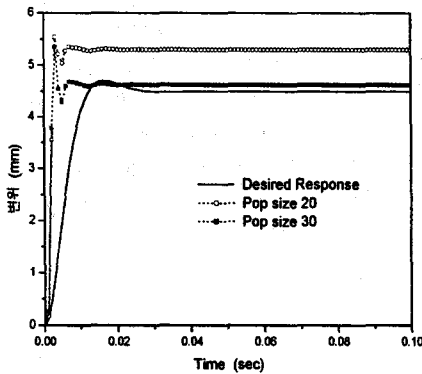


Fig. 4 Optimized Results

그림에서 볼 수 있듯이 유전자 집단의 개수를 늘림에 따라 최적화된 결과가 좋아짐을 알 수 있다. 이 때 유전자 개수가 증가할수록 계산시간이 정비례하여 길어짐으로 이 사실을 고려하여 유전자 집단의 개수를 결정할 필요가 있다. 반면 유전자 집단을 30이상으로 증가시켜도 최적화 결과가 더 좋아지지 않는 것을 확인하였다. 최적화된 파라미터 값은 다음 Table과 같다.

Table 1 Optimized Parameters

파라미터 유전자집단	드레인 오리피스 직경 (mm)	피이드백 스프링 스프링상수 (N/m)
$N = 20$	0.00059	1858
$N = 30$	0.00059	2305

5. 결론

유전자 알고리즘을 이용하여 서어보 밸브의 중요한 설계 파라미터인 드레인 오리피스 직경과 피이드백 스프링의 스프링 상수를 최적화하여 사용자가 원하는 동특성을 낼 수 있도록 하였다. 유전자 집단의 개수가 20개인 경우와 30개인 경

우를 비교하여 유전자 집단의 개수가 증가하면 최적화된 결과가 좋아지나 계산시간이 길어지므로 시스템에 맞는 적당한 값을 선정할 필요가 있다.

향후 과제로는 교배와 돌연변이시에 임의의 유전자 선택을 위한 균일 random number를 생성하는 대신에 보다 합리적인 방법을 사용하여 더 좋은 결과를 낼 수 있는 지를 연구할 필요가 있다. 아울러 파라미터의 projection 기법등을 지속적으로 연구할 대상이라고 생각된다.

참고문헌

- [1] J. Watton, Fluid Power Systems, Prentice-Hall, London, 1988.
- [2] H. Merritt, Hydraulic Control Systems, John Wiley, 1967.
- [3] C. K. Smith, "Digital Simulation of Complex Hydraulic Systems Using Multiport Component Model", Ph.D. Diss., Oklahoma State University, 1976.
- [4] R. Johansson, System Modeling and Identification, Prentice-Hall, 1993.
- [5] T. Viersma, Analysis, Synthesis, and Design of Hydraulic Servosystems and Pipelines, Delft University of Technology, Delft, 1990.
- [6] 임태준, "유압 서어보 밸브의 멀티포트 해석", '95 자동제어학술회의 논문집, 제2권, 1995.
- [7] Z. Michalewicz, Genetic Algorithms + Data Structure, Springer-Verlag, 1996.
- [8] 현장환, 김철수, 이정오, "유전 알고리즘을 이용한 유압시스템의 제어파라미터 최적화", 대한기계학회 논문집(A), 제21권, 제9호, 1997.
- [9] L. Chambers, Practical Handbook of Genetic Algorithms; vol.1, CRC Press, 1995.
- [10] 이병욱, 조규갑, "유전 알고리즘에 기초한 셀 배치의 설계", 한국정밀공학회지, 제16권, 제6호, 1999.
- [11] 한석영, 하광태, 이태희, 임장근, "유전자 알고리즘을 매개변수들의 적정범위 및 영향도 조사", 대한기계학회 논문집(A), 제23권, 제4호, 1999.