

유전자 알고리즘을 이용한 2 단 릴리프 밸브의 최적설계

김승우*(울산대학교 기계자동차공학부), 임두완,
안경관, 양순용, 이병룡

An Optimal Design of a two stage relief valve by Genetic Algorithm

S. W. Kim^(School of mechanical & Automotive Eng, UOU) D. W. Im,
K. K. Ahn, S. Y. Yang, B. R. Lee

ABSTRACT

In this study, a novel systematic design procedure by Genetic Algorithm of a two stage relief valve is proposed. First of all, a mathematical model describing the dynamics of a balanced piston type relief valve has been derived. Governing equations such as dynamic equations for the main spool and the pilot spool and flow equations for each orifice are established. The mathematical model is verified by comparing the results of simulation with that of experiments. Furthermore, influences of the parameters on the dynamic characteristics of a relief valve have been investigated by simulation of the proposed model. Major design parameters on the valve response are determined, which affect the system response significantly. And then, using the determined parameters, the optimization of the two stage relief valve by Genetic Algorithm, which is a random search algorithm can find the global optimum without converging local optimum, is performed. The optimal design process of a two stage relief valve is presented to determine the major design parameters. Fitness function reflects the changing pressure according to parameters. It is shown that the genetic algorithms satisfactorily optimized the major design parameters of the two stage relief valve.

Key Words : relief valve, hydraulic(유압), optimization(최적화), genetic algorithm(유전자 알고리즘)

1. 서론

현재 유압회로는 큰힘을 낼수 있다는 장점 때문에 자동화 기계에 널리 사용되고 있다. 이런 유압 회로에는 적어도 한 개 이상의 압력조절 밸브가 사용되고 있다.

릴리프 밸브는 유압회로에서 안정한 상태의 압력을 얻기 위해서 사용되어진다. 이런 릴리프 밸브(relief valve)에는 두가지 타입이 일반적으로 사용되고 있는데 그것은 직동형과 파일럿형이다. 직동형은 파일럿형에 비해서 비교적 설계하기가 쉬운 장점이 있지만 스프링의 탄성(stiffness)때문에 압력의 오버라이드 특성이 좋지 못하다. 반면에 메인스풀과 파일럿스풀의 움직임이 연결(couple)되어 있는 파일럿형 릴리프 밸브는 해석상의 어려움이 있지만 좋은 동특성으로 가장 널리 사용되어지고 있다.

지금까지 직동형에 대한 연구가 많이 진행되어 왔지만 파일럿형에 대한 해석은 거의 없었고 때문에 2 단 릴리프 밸브는 주로 경험을 바탕으로 해서 개발되고 만들어져왔다. 비록 실험적인 방법으로 꽤 응답이 좋은 밸브를 만들어 오기는 했지만 그것을 위해서는 많은 비용을 부담해야 했고 또 시스템 내에서 다른 요소들과 결합되었을 때의 응답을 미

리 예측하기란 쉬운일이 아니었다. 그래서 많은 제작자들이 이런문제들로 인해 많은 어려움을 겪고 있다.

릴리프 밸브에 대한 이전의 논문 [1,2,3]에서는 주로 밸브의 안정성과 분석에 초점을 두었다. 논문 [1]에서는 수학적인 방법을 통하여 밸브의 분석에 접근했고, 논문[2, 3]에서는 이 앞의 내용을 바탕으로 릴리프 밸브의 안정성을 보이고, 또 밸브의 요소들이 어떻게 밸브에 영향을 미치는지 보여주고 그것을 증명해보이고 있다. 이제 이 논문에서는 앞서의 논문들을 바탕으로해서 릴리프 밸브를 설계하는 방법으로 유전자 알고리즘(genetic algorithm)을 제안한다.

유전자 알고리즘은 랜덤탐색(random search) 알고리즘(algorithm)으로써 자연선택과 자연유전자의 메커니즘(mechanism)에 기초한다. 유전자 알고리즘의 장점은 국소 최적값(local optimum)의 수렴없이 전체적인 최적값(global optimum)을 얻을 수 있다는 것이다.

이 실험의 진행과정은 우선 수학적인 모델을 세우고 실제모델의 응답을 구한다음 시뮬레이션 모델의 타당성을 검토하기 위하여 이 두 모델의 응답을 비교한다. 타당성이 입증되면 시뮬레이션 모델에서 구하고자 하는 파라미터(parameter)들의 최적값을

구한다. 파라미터들은 파일럿형 릴리프 밸브에 큰 영향을 준다고 이미 알려진 각 부분의 오리피스의 직경을 선택한다. 유전자 알고리즘을 이용한 2 단 릴리프 밸브의 설계는 기존의 많은 돈과 시간을 요구하는 실험적인 방법과 비교해서 더 해석적이고 효율적이다. 그리고 유전자 알고리즘은 더 많은 파라미터로의 확장이 가능하므로 설계에의 이용은 훨씬 더 효과적이라 할수 있겠다.

Nomenclature

- A_Y, A_X = effective cross sectional areas of main and pilot spools
 Q_A, Q_C, Q_R = flow rates through orifices A, C and R
 Y, X = displacements of main and pilot spools
 Y_0, X_0 = initial displacements of main and pilot spools
 P_A = pressure in the chamber below the main spool
 P_B = pressure in the chamber above the main spool
 P_C = pressure in the chamber in front of the pilot spool
 P_D = pressure in the chamber behind the pilot spool
 V_A, V_B = volumes of the chambers below and above the main spool
 V_C = volumes of the chambers below and above the pilot spool
 d_A, d_B, d_C, d_D = diameters of orifices A, B, C and D
 d_R = diameters of main ports
 α, θ = conical half angles of conic parts of pilot and main spools
 A_V = effective area pressed in the A space
 A_W = effective area pressed in the D space
 A_U = effective area pressed in the B space
 ρ = density of hydraulic fluid
 F_S, F_P = flow forces of main and pilot spool orifices
 C_A, C_B, C_C, C_D, C_R = flow coefficients of orifices A, B, C, D and R
 β = bulk modulus of hydraulic fluid
 M_S, M_P = masses of main and pilot spools
 B_S, B_P = damping coefficients of main and pilot spools
 K_S, K_P = spring constants of main and pilot spools
 n = normal vector to the cross section of a channel
 U_{Y1}, U_{Y2} = inlet and outlet velocities through the main spool orifice
 U_{X1}, U_{X2} = inlet and outlet velocities through the pilot spool orifice

2. 기본방정식

논문 [1,2,3] 에 따르면 2 단 릴리프 밸브의 지배방정식(government equation)을 다음과 같이 유도하였다.

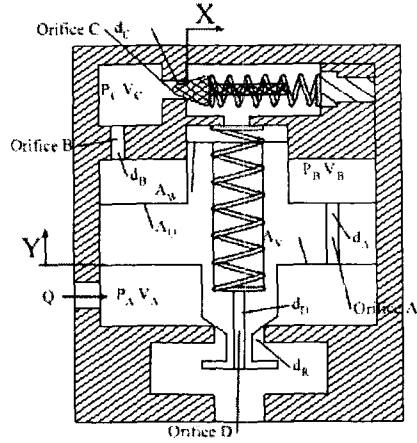


Fig. 1. Simplified model of the two stage relief valve.

2.1 힘 평형 방정식

메인 스푼에 대해 힘평형 방정식을 적용하면 다음과 같다.

$$M_S \frac{d^2Y}{dt^2} + B_S \frac{dY}{dt} + K_S(Y + Y_0) = F_S \quad (1)$$

F_S 는 외력을 나타내는 것으로 컨트롤 볼륨으로부터 다음의 방정식을 유도해서 구해 낼 수 있다. [4]

$$\begin{aligned} F_{SS} &= -\left(\frac{\partial}{\partial t} \int U_Y \rho dV + \int U_Y \rho \dot{U}_Y \cdot \hat{n} ds\right) \\ &= -\rho Y \frac{dQ_A}{dt} - (\rho A_{Y2} U_{Y2} U_{Y2} \cos \theta - \rho A_{Y1} U_{Y1} U_{Y1}) \\ &= -2\pi C_A^2 d_R Y P_A \sin^2 \theta \\ &\quad - \rho Y C_A \pi d_A \sin \theta \frac{dY}{dt} \sqrt{2(P_A)/\rho} \\ &\quad - \rho Y^3 C_A \frac{1}{\sqrt{2(P_A)/\rho}} \frac{dP_A}{dt} \end{aligned} \quad (2)$$

F_{SS} 는 유체력을 나타낸다. 위의 방정식에서 마지막의 두개의 항은 과도유체력을 나타내는 항이다 만약 이 유체력이 정상상태라고 가정한다면 외력은 다음의 식으로 표현된다.

$$F_S = A_V P_A - A_U P_B - A_W P_D - 2\pi C_A^2 d_R Y P_A \sin^2 \theta \quad (3)$$

이 식에서 메인스풀의 변위는 매우 작다. 따라서 마지막 항은 거의 영이되고, 결국 이것을 무시한다면 외력은 다음식 (4) 와 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$F_S = A_V P_A - A_U P_B - A_W P_D \quad (4)$$

파일럿 스푼의 경우 메인스풀의 경우와 유사한 방법으로 다음의 식들을 유도해 낼 수 있다.

$$M_P \frac{d^2X}{dt^2} + B_P \frac{dX}{dt} + K_P(X + X_0) = F_P \quad (5)$$

$$F_p = (P_C - P_D)(A_p + 2\pi C_c^2 \sin \alpha (4X^2 \sin \alpha - Xd_c \cos \alpha)) \quad (6)$$

앞에서와 마찬가지로 단순화하면 유체력은 다음과 같이 쓸수 있다.

$$F_p = A_p(P_C - P_D)(1 - 4C_c \frac{X}{d_c} \sin 2\alpha) \quad (7)$$

2.2 연속방정식

유량 Q 는 펌프로부터 토출되는 전체 유량으로 누유는 없다고 가정한다. 연속방정식을 적용하면 밸브에서의 유량은 다음의 방정식이 성립된다.

$$Q = Q_A + Q_R + A_V \frac{dY}{dt} + \frac{V_A}{\beta} \frac{dP_A}{dt} \quad (8)$$

$$Q_A = Q_B - A_U \frac{dY}{dt} + \frac{V_B}{\beta} \frac{dP_B}{dt} \quad (9)$$

$$Q_B = Q_C + \frac{V_C}{\beta} \frac{dP_C}{dt} \quad (10)$$

$$Q_C = Q_D - A_W \frac{dY}{dt} + \frac{V_D}{\beta} \frac{dP_D}{dt} \quad (11)$$

일반적으로 오리피스에서의 유량은 다음과 같이 표현한다.

$$Q = C A \sqrt{2(P_I - P_O) / \rho} \quad (12)$$

C는 유량계수이고 A는 밸브의 개구 면적, P는 입구와 출구의 압력이다.

$$Q_A = \text{sign}(P_A - P_B) C_A A_A \sqrt{2|P_A - P_B| / \rho} \quad (13)$$

$$Q_B = \text{sign}(P_B - P_C) C_B A_B \sqrt{2|P_B - P_C| / \rho} \quad (14)$$

$$Q_C = \text{sign}(P_C - P_D) C_C \pi d_c X \sin \alpha \sqrt{2|P_C - P_D| / \rho} \quad (15)$$

$$Q_D = \text{sign}(P_D) C_D A_D \sqrt{2|P_D| / \rho} \quad (16)$$

$$Q_R = \text{sign}(P_A) C_R \pi d_R Y \sin \theta \sqrt{2|P_A| / \rho} \quad (17)$$

위의 식에서 근호안의 식이 음수가 되는 것을 방지하기 위하여 sign이라는 함수를 사용하여 음수가 되는 경우는 유체의 방향이 바뀌는 것으로 표기하였다.

3. 시뮬레이션 모델

앞장에서 서술된 기본방정식을 기본으로 하여 시뮬레이션 모델이 만들어졌다. 모든 변수값들은 실제의 것이 그대로 적용되었다. 모델을 이산화시키고 각각의 시간의 변화량에 대한 응답값을 적분함으로써 해를 구할수 있었다. 샘플링타임 (sampling time)은 0.1msec보다 작게 설정되었는데 그것은 이것보다 샘플링타임을 크게 할경우 각 시간에 대한 정확한 해를 얻지 못하고 발산해 버리기 때문이다. 실험장치는 Fig. 2와 같이 꾸렸다. 그림과 같이 탱크로 귀환하는 유량 Q의 전량이 솔레노이드에 신호가 주어지면 솔레노이드 밸브(3/2

way)가 작동을 하고 그래서 유체의 방향이 바뀌면 유체는 릴리프 밸브로 전량이 흐르게된다.

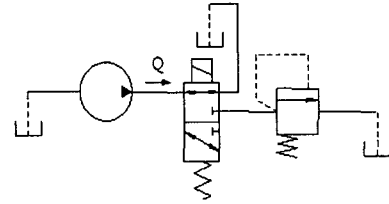


Fig. 2. Tested relief circuit

다음의 그림들은 실제의 모델과 시뮬레이션 모델의 응답을 비교해 놓은 것이다.

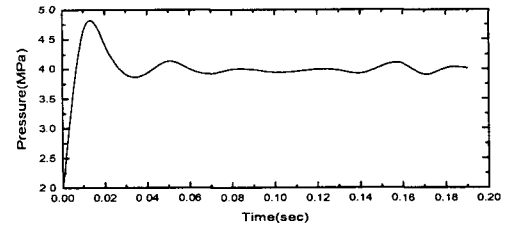


Fig. 3. Response of the experimental model(4MPa)

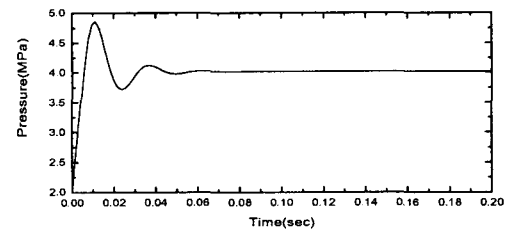


Fig. 4. Response of the simulation model(4MPa)

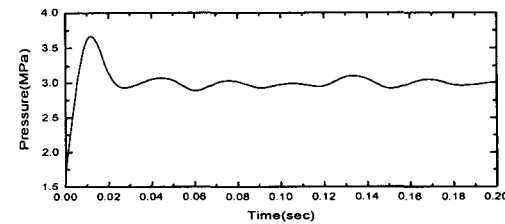


Fig. 5. Response of the experimental model(3MPa)

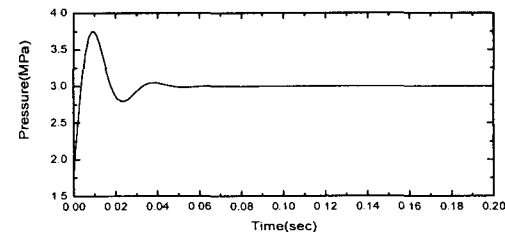


Fig. 6. Response of the simulation model(3MPa)

Fig.3에서 Fig.6까지의 그림들은 설정압력을 3 and 4 MPa로 두었을 때의 입구에서의 응답을 나타낸 것이다. 이때 피스톤 펌프에서의 공급압력은 $50\text{kgf/cm}^2 (= 4.9\text{MPa})$ 이다.

Fig.3 and Fig.5 에서 약간의 노이즈(noise)를 볼수있다. 이것은 피스톤펌프의 맥동이 공급라인에 그대로 전달된 것처럼 보인다. 그런것들을 제외하고 시뮬레이션의 결과는 실제 모델의 그것과 거의 같은 응답을 보여주고 있다. 따라서 이 시뮬레이션 모델은 타당한 것으로 간주될 수 있다. 이 결과를 바탕으로 유전자 알고리즘을 이용한 최적화에 이 시뮬레이션 모델이 적용될 것이다.

4. 최적설계(optimal design)

2단 릴리프 밸브에서 오리피스 의 직경이 릴리프 밸브의 동특성에 가장 큰 영향을 주는 요인중의 하나라는 것은 잘 알려진 사실이다.[1] 물론 다른 중요한 요소들이 있지만 이 논문에서는 오리피스의 직경을 최적화하였다. 그리고 최적화를 위한 툴(tool)로는 유전자 알고리즘을 이용하였다.

4.1 유전자 알고리즘(genetic algorithm)

유전자 알고리즘은 적자생존과 유전학에 근거를 둔 탐색 알고리즘이다. 개체보다는 생태계 전체를 통하여 유용한 정보를 얻고자 하는 것이다. 유전자 알고리즘은 최적화하기 어려운 목적함수의 최적화, 신경회로망의 학습, 퍼지 멤버쉽 함수의 동조뿐만 아니라 많은 곳에 적용되어 널리 사용되고 있다. 이것은 목적함수의 미분가능성 및 연속성에 관계없이 최적해를 구할 수 있고, 또한 해집단을 동시에 구할 수 있는 전역적 탐색(global search)방법이므로 국부적으로 수렴할 가능성이 적고 복잡한 과정없이 간단한 알고리즘으로 주어진 문제를 해결할 수 있는 장점을 가지고 있기 때문이다. 유전자 알고리즘은 최적화 하고자하는 파라메타(parameter)들을 2 진 문자열로 부호화 하여 복제, 교배, 돌연변이와 같은 연산자를 사용하여 적합도함수(fitness function)에 적합한 문자열을 선택하는 과정을 반복하게 된다.

4.1.1 염색체(chromosome)

모든 살아있는 개체들은 세포로 구성된다. 각각의 세포는 같은 염색체 조식을 가지고 있다. 염색체는 유전자(gene), 즉 DNA 블록으로 구성된다. 각각의 유전자는 특별한 단백질을 부호화한다. 다시 말해서 눈동자의 색깔처럼 특징있는 것을 부호화한다. 각각의 유전자들은 염색체 속에서 고유의 위치를 가지고 있다. 이 위치들을 locus 라 부른다. 염색체는 구하고자 하는 해의 정보를 담고 있어야 한다. 그러기 위해서 적당한 인코딩이 필요하다. 대부분의 인코딩(encoding)하는 방법은 2 진 문자열이다. 다음의 염색체는 하나의 2 진문자열을 가지고 있다.

Chromosome 1	1101100100110110
Chromosome 2	1101111000011110

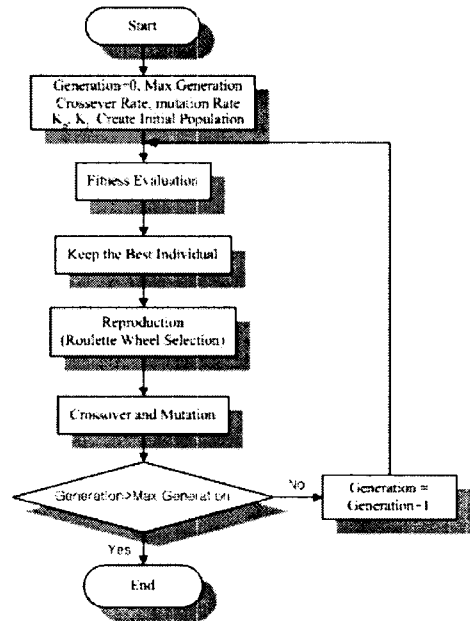


Fig.7. Flowchart of genetic algorithm

각 비트(bit)들은 어떤 것의 특성을 나타낸다고 볼 수 있다. 물론 인코딩하는데는 많은 방법들이 있고 그것은 주로 문제를 푸는데 달려있다. 따라서 어떤 경우에는 이런 2 진문자열보다 실제 수, 즉 10 진 문자열을 사용하는 것이 해를 구하는데 더 좋은 방법이 되기도 한다.

4.1.2 복제(reproduction)

복제하는동안 재결합이 처음으로 일어난다. 부모의 유전자들로부터 새로운 염색체를 만들어낸다. 일부에서 돌연변이를 발생시킨다. 돌연변이는 엔코딩된 염색체의 한 비트를 바꾼다. 그래서 재생산된 세대는 평가함수(fitness function)에 의해 평가되어지고 다시 좋은 염색체가 다시 부모가 되는 과정을 반복한다.

4.1.3 교배(crossover)

최적화할 변수를 엔코딩한 후에 이것들은 교배를 하게 된다. 교배는 좋게 평가된 부모염색체를 선택하고 나머지는 버린다. 선택된 염색체들로부터 새로운 세대를 만들게 된다. 이것은 간단히 아래에 보는것처럼 부모의 염색체를 두 부분으로 나누고 이것들의 한부분을 맞바꿈으로써 새로운 개체를 만들게 된다. (| is the crossover point):

Chromosome 1	11011		00100110110
Chromosome 2	11011		11000011110
Offspring 1	11011		11000011110
Offspring 2	11011		00100110110

교배를 하는 방법은 여러가지가 있는데 예를들면 위에서는 한 점을 경계로 두 부분으로 나누었지만 때에 따라서는 세부분이상으로도 나눌 수 있다.

4.1.4 돌연변이(mutation)

교배가 끝나면 돌연변이를 발생시킨다. 돌연변이는 비트를 변화시키는데, 0은 1로 1은 0으로 바꾸면 된다. 이것은 랜덤(random)하며 보통 1~5%의 확률로 발생시킨다. 너무 많이 발생하면 방향성을 잃어버리고 무작위탐색이 된다.[6]

4.2 시뮬레이션

일반적으로 오리피스와 직경이 릴리프밸브의 동특성에 큰 영향을 준다는 것이 이전의 논문으로부터 잘 알려져 있다.[1] 이 논문에서는 최적화할 파라미터로 오리피스 A, B, C의 직경을 선택하였다. 최적의 입구압력응답을 얻기 위한 평가함수는 다음과 같다.

$$Z = \frac{1}{ITAE} = \frac{1 * e13}{\int t * e(t)^2 dt} \quad (18)$$

Z는 평가함수이고, t는 시간, e는 수렴하는 값에 대한 에러이다. 제어파라미터의 경우 일반적으로 ISE, ITSE, IAE, ITAE (I : integration, S : square, A : absolute, T : time-multiplied, E : error) 등과 같은 요소들이 사용된다.[6] 이 릴리프 밸브의 입구의 동특성 역시 제어기의 응답과 비슷하므로 같은 방법으로 적용시킨다. 릴리프밸브의 응답에 오버슈트(overshoot)가 작게 발생하기 위하여 에러가 가장 작은 값이 되도록 모든 시간에 대한 에러의 제곱의 합과 그리고 빠른 반응을 위하여 이 항에 시간을 곱해서 평가함수를 만들었다. 평가한 값은 가장 작은 값으로 수렴한다. 여기서 사용한 돌연변이의 확률은 5%이다. 그리고 세대의 크기는 일반적으로 30이상을 사용한다. 이 논문에서는 32를 사용하였다. 그리고 스트링의 길이는 24.

Fig. 8은 유전자 알고리즘을 통해 세대가 지나면서 수렴해 나가는 것을 보여주는데 이미 4세대를 거치면서 거의 수렴했다는 것을 알 수 있다.

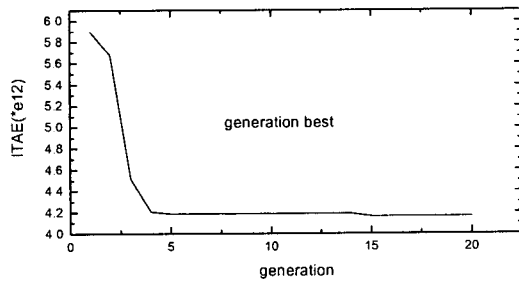


Fig.8. Optimization of the parameters using genetic algorithm

다음의 테이블에 주어진 값이 최적화된 오리피스의 직경이다.

Table.1. Optimized diameters

da	db	dd
1.6mm	4.3mm	3.2mm

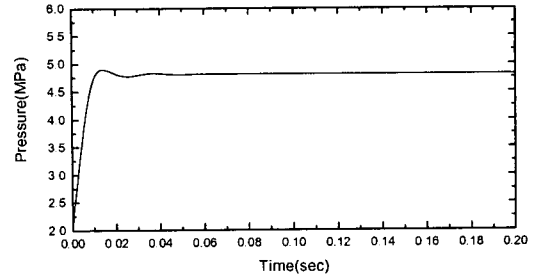


Fig.9. Response of the valve by optimized orifice diameters

Fig. 9는 최적화된 오리피스의 직경을 사용하여 얻어낸 릴리프 밸브의 입구의 압력응답이다. Fig.5 6과 비교했을 때 오버슈트가 눈에 띄게 줄었다는 걸 알 수 있다. 또 다른 것은 설정압력이 4MPa에서 좀 올라갔다는 걸 알 수 있다. 이것은 기본적으로 파일럿(pilot) 타입의 릴리프 밸브는 A부분과 B부분의 압력차를 이용해서 메인스풀이 작동하는 것에 기인한다. 즉, 오리피스A의 직경이 커지면 두 부분의 압력차가 작아지고 따라서 그 만큼 압력차를 크게 하기 위하여 설정압력이 높아진다. 이런 사실로부터 설정압력에 따라서 동특성을 최적화하는 오리피스의 직경은 다를 수 있다고 짐작해 볼 수 있다.

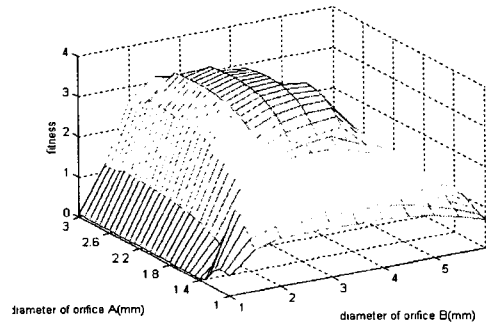


Fig.10. Fitness distribution in diameter's space of orifice A and B

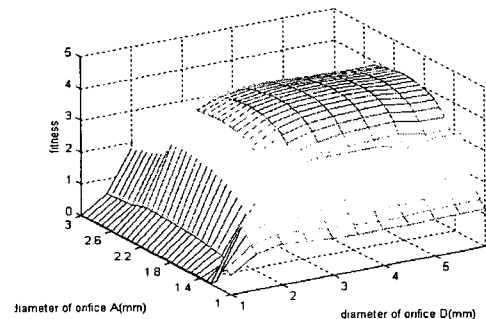


Fig.11. Fitness distribution in diameter's space of orifice A and D

참고문헌

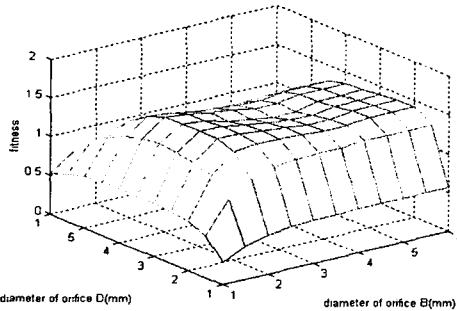


Fig.12. Fitness distribution in diameter's space of orifice B and D

Fig. 10,11,12는 두 오리피스 직경에 대한 적합도의 분포를 나타내고 있다. 모든 그림에서 1mm 정도에서 낮은 적합도를 보이고 있다. 오리피스 A, B, D는 각각 1.5~2.5mm, 2mm~4mm, 2mm~5mm에서 높은 적합도를 보여주고 있다. A와 B의 경우는 적합도에 미치는 영향을 볼 수 있지만 D의 경우는 거의 영향을 주지 못하는 것을 알 수 있다. 위의 세 그림들을 종합해 볼 때 앞서 구한 세 오리피스의 직경이 타당성을 가짐을 알 수 있다.

5. Conclusion

지금까지 유전자 알고리즘을 이용한 2단 릴리프 밸브의 최적설계를 해 보았다. 유전자 알고리즘은 랜덤탐색 알고리즘이므로 항상 같은 결과를 기대할 수 없다. 때로는 나쁜 결과가 나오기도 한다. 따라서 여러 번의 시행이 중에 가장 좋은 값을 선택해야 한다. 하지만 이것으로도 설계하는 면에서 시간과 비용을 크게 줄일 수 있다고 본다. 물론 이 논문에서는 최적화된 오리피스 직경을 실제에 적용해서 결과에 대한 검증은 하지는 못했지만 추후에 그것에 대한 실험을 계획하고 있다. 지금까지의 파일럿형 릴리프 밸브의 설계가 거의 경험과 실험 데이터에 의존해 왔다는 사실을 고려한다면 이 논문에서 제안한 유전자 알고리즘을 이용한 설계는 매우 설득력 있다고 본다. 이것은 좀더 해석적인 설계에 접근하고 시뮬레이션으로 미리 볼 수 있기 때문에 비용과 시간을 절약할 수 있다. 덧붙여 유전자 알고리즘의 최적화 파라미터 역시 오리피스의 직경뿐 아니라 온도, 탄성, 거칠기 등의 많은 요소들로 확장이 가능하기 때문에 그 장점은 더 커진다고 할 수 있겠다. 앞으로 지속적인 연구를 통해 좀더 정확한 해석과 시뮬레이션 모델의 확립이 요구된다.

후기

본 연구는 한국과학재단 지정 울산대학교 기계부품 및 소재 특성평가 연구센터의 지원에 의한 것입니다.

- [1] S. Hayashi, U. Iizuka, T. Hayase and I. Iimura, "Numerical Analysis of the Dynamic Characteristics of a Balanced Piston Type Relief Valve (1st Report, Numerical Simulation and Experimental Results)", *Trans. of Japan hydraulics and pneumatics Society*, vol. 28. no. 2, pp. 102-108, 1998.
- [2] S. Hayashi, Y. Iizuka and T. Hayase, "Numerical Analysis for Stability of Balanced Piston Type Relief Valve", *Fluid Power. Third JHPS International symposium*. Pp. 531-536. 1996
- [3] Y. C. Shin, "Static and Dynamic Characteristics of a Two Stage Pilot Relief Valve", *Transactions of ASME*, vol. 113, pp. 280-288, 1992.
- [4] D. F. Young, B. R. Munson and T. H. Okiishi, *Fluid Mechanics*, Wiley, 1997.
- [5] R. L. Haupt, "An Introduction to Genetic Algorithms for Electromagnetics", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 37, no. 2, pp. 7-15, 1995.
- [6] 현장환, 안철현, 이정오, "유전알고리즘을 이용한 유압모터의 속도제어파라미터 최적화", *한국정밀공학회지* vol. 14, no.9, pp. 139-144. 1997.

Table.2. System parameters used in simulation

Diameters of each orifice [m]	
Diameter of orifice A	da=1.1e-3
Diameter of orifice B	db=3e-3
Diameter of orifice D	dd=2.3e-3
Diameter of orifice C	dc=4.7e-3
Diameter of orifice R	dr=12.0e-3
Discharge coefficients	
Pilot poppet	Cc=0.60
Orifice A, B, D	Ca=0.60
	Cb=0.60
	Cd=0.60
Main valve	Cr=0.60
Chamber volumes [m ³]	
Main chamber	Va=15.0e-6
Secondary chamber	Vb=2.0e-6
Pilot valve chamber	Vc=5.53e-6
Chamber diameters [m]	
Inner diameter of main chamber	dai=12.0e-3
Outer diameter of main chamber	dao=30.0e-3
Inner diameter of secondary chamber	dbi=11.0e-3
Outer diameter of secondary chamber	dbo=30.0e-3
Inner diameter of drain chamber	ddi=2.3e-3
Outer diameter of drain chamber	ddo=8.0e-3
The other parameters	
Bulk modulus	beta=1.6677e9 [N/m ²]
Density of oil	rho=8.732e2 [kg/m ³]
Main / angle	theta= 45 [degree]
Main / spring stiffness	Kv=1.306e4 [N/m]
Main / mass	Mv=90.0e-3 [kg]
Main / damping coefficient	delta_v=66.9 [Ns/m]
Poppet / angle	alpha=12.5 [degree]
Poppet / spring stiffness	Kp=9.860e4 [N/m]
Poppet / mass	Mp=3.0e-3 [kg]
Poppet / damping coefficient	delta_p=34.3 [Ns/m]