

파일럿형 압력 릴리프 밸브의 최적설계

김승우*(울산대학교 기계자동차공학부), 안경관, 양순용, 이병룡,
윤소남(한국기계연구원)

An Optimal Design of pilot type relief valve by Genetic Algorithm

S. W. Kim[†] School of mechanical & Automotive Eng, UOU), K. K. Ahn ,
S. Y. Yang, B. R. Lee, S. N. Yun(KIMM)

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)

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_o, X_o = 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 [15.0e-6 m³, 2.0e-6 m³]
 V_C = volumes of the chambers below and above the pilot spool [5.53e-6 m³]
 d_A, d_B, d_C, d_D = diameters of orifices A, B, C and D [1.1e-3 m, 3e-3 m, 4.7e-3 m, 2.3e-3 m]
 d_R = diameters of main ports [12.0e-3 m]
 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 [0.60]
 β = bulk modulus of hydraulic fluid [1.6677e9 N/m²]
 M_S, M_P = masses of main and pilot spools [90.0e-3 kg, 3.0e-3 kg]
 B_S, B_P = damping coefficients of main and pilot spools [66.9 Ns/m, 34.3 Ns/m]
 K_S, K_P = spring constants of main and pilot spools [1.306e4 N/m, 9.860e4 N/m]
 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

1. 서론

유압시스템은 그 기능에 따라, 압력제어, 유량제어 및 방향제어 시스템으로 나눌수 있다. 밸런스 피스톤형 릴리프 밸브는, 유압 시스템에 있어서 압력제어밸브로서 거의 대부분의 유압시스템에서 사

용되어 지고 있지만, 주밸브(main valve), 파일럿 밸브(pilot valve), 각종의 밸브 챔버 및 오리피스(orifice) 등으로 구성되는 고차의 비선형 시스템으로, 그 동적 거동에는 급유관로, 부하계로부터의 영향을 무시할 수 없으므로, 나아가 고차의 복잡한 계가 된다. 따라서, 밸런스 피스톤형 릴리프 밸브의 동특성에 영향을 미치는 변수들의 수가 많아서, 종래에는 각 변수들의 영향을 체계적이고 이론적으로 검토하는 것은 곤란하였다. 그러나, 최근, 전산기의 고속화, 대용량화에 따라서 이 문제를 수치적으로 해결할 수 있게 되었으나, 주로 스텝 응답에 기초한 시스템의 파라미터와 동특성의 관계[1]-[3]와 시스템의 안정성을 구하는 것[4]이 대부분이고, 릴리프 밸브의 최적 설계에 관한 연구는 거의 없었다.

본 논문에서는 밸런스 피스톤형 릴리프 밸브의 수학적 모델을 유도한 뒤, 그 타당성을 실험적으로 검증한다. 나아가 최적화 기법중 전역 최적값을 확실히 구할 수 있는 유전자 알고리즘을 본 릴리프 밸브 모델에 적용하여 밸런스 피스톤형 릴리프 밸브의 최적설계에 관한 체계적인 방법을 제공하는 것을 목적으로 한다.

2. 기본방정식

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

2.1 힘 평형 방정식

메인 스톨에 대해 힘평형 방정식을 적용하면 다음과 같다.

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

F_S 는 외력을 나타내는 것으로 컨트롤 볼륨으로부터 다음 방정식을 유도해서 구해 낼 수 있다. [7]

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

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

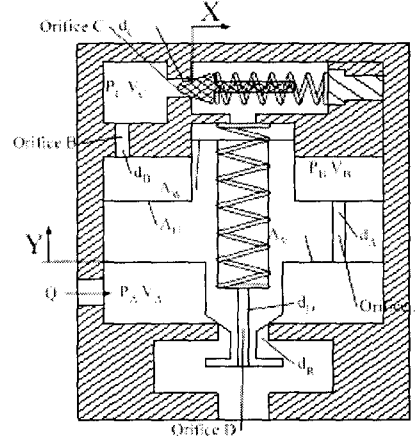


Fig. 1. Simplified model of the two stage relief valve.

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

이 식에서 메인스폴의 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 스톨의 경우 메인스폴의 경우와 유사한 방법으로 다음의 식들을 유도해 낼 수 있다.

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

$$F_P = (P_C - P_D)(A_p + 2\pi C_C^2 \sin \alpha (4X^2 \sin \alpha - X d_C \cos \alpha)) \quad (6)$$

앞에서와 마찬가지로 단순화하면 유체력은 다음과 같이 쓸 수 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

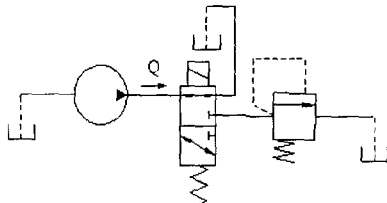


Fig. 2. Tested relief circuit

앞장에서 서술된 기본방정식을 기본으로 하여 시뮬레이션 모델이 만들어졌다. 모든 변수값들은 실제의 것이 그대로 적용되었다. 모델을 이산화시키고 각각의 시간의 변화량에 대한 응답값을 적분하므로써 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 꾸몄다. 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.

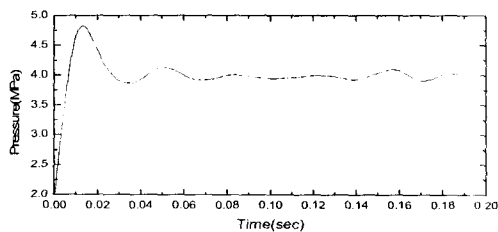


Fig. 3. Response of the experimental model(4MPa)

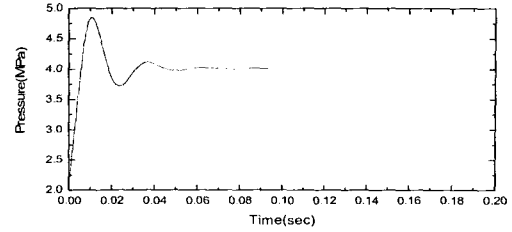


Fig. 4. Response of the simulation model(4MPa)

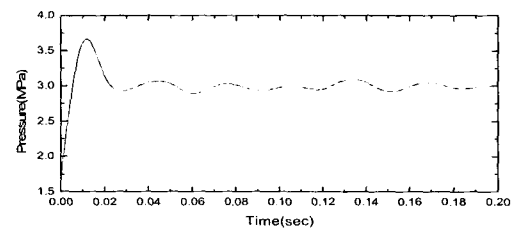


Fig. 5. Response of the experimental model(3MPa)

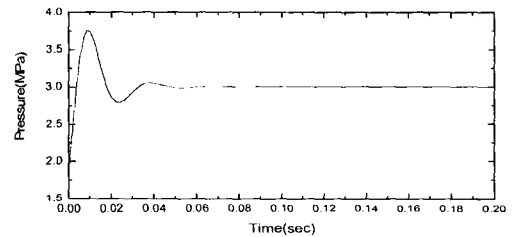


Fig. 6. Response of the simulation model(3MPa)

Fig.3에서 Fig.6까지의 그림들은 설정압력을 3 and 4 MPa로 두었을 때 실제의 모델과 시뮬레이션 모델의 입구에서의 압력응답을 비교해 놓은 것이다. 이때 피스톤 펌프에서의 공급압력은 50kgf/cm² (= 4.9MPa)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 오리피스의 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 비분가능성 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 2진 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 조직을 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 2진 문자열이다. 다음의 염색체는 하나의 2진문자열을 가지고 있다.

Chromosome 1	1101100100110110
Chromosome 2	1101111000011110

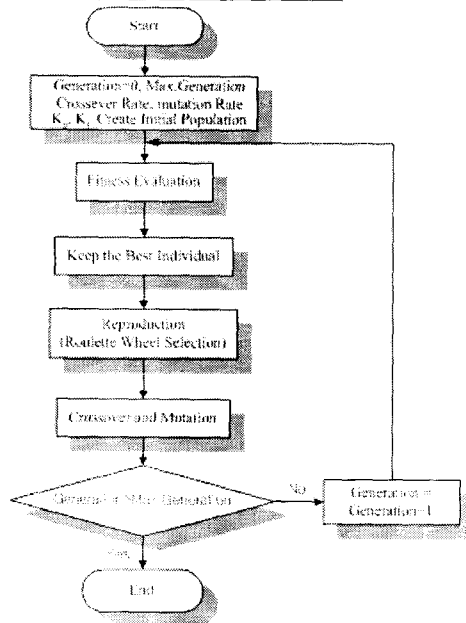


Fig.7. Flowchart of genetic algorithm

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 2진문자열보다 실체 수, 즉 10진 문자열을 사용하는 것이 해를 구하는데 더 좋은 방법이 되기도 한다.

4.1.2 복제(reproduction)

복제하는 동안 재결합이 처음으로 일어난다. 부모의 유전자들로부터 새로운 염색체를 만들어낸다. 일부에서 돌연변이를 발생시킨다. 돌연변이는 인코딩된 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 인코딩한 후에 이것들은 교배를 하게 된다. 교배는 좋게 평가된 부모염색체를 선택하고 나머지는 버린다. 선택된 염색체들로부터 새로운 세대를 만들게 된다. 이것은 간단히 아래에 보는 것처럼 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 예를 들면 위에서는 한 점을 경계로 두 부분으로 나누었지만 때에 따라서는 세부분이상으로도 나눌수 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 오리피스의 직경이 릴리프밸브의 동특성에 큰 영향을 준다는 것이 이전의 논문으로부터 잘 알려져 있다.[1] 이 논문에서는 최적화할 파라메터로 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. 제어파라메터의 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 알수있다.

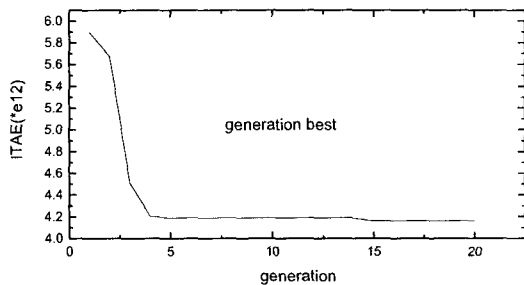


Fig.8. Optimization of the parameters using genetic algorithm

다음의 테이블에 주어진 값이 최적화된 오리피스의 직경이다.

Table.1. Optimized diameters

da	db	dd
1.6mm	4.3mm	3.2mm

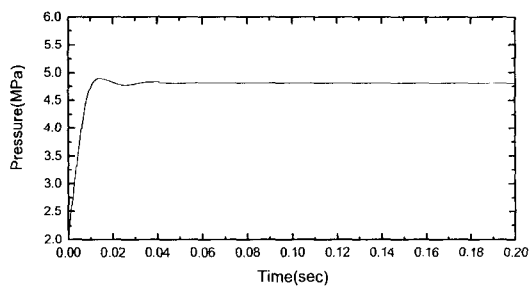


Fig.9. Response of the valve by optimized orifice diameters

Fig. 9는 최적화된 오리피스의 직경을 사용하여 얻어낸 릴리프 밸브의 입구의 압력응답이다. Fig.5 6과 비교했을 때 오버슈트가 눈에 띄게 줄었다는걸 알수있다. 또 다른 것은 설정압력이 4MPa 에서 좀 올라갔다는걸 알수있다. 이것은 기본적으로 파일럿 (pilot) 타입의 릴리프 밸브는 A부분과 B부분의 압력차를 이용해서 메인스풀이 작동하는 것에 기인한다. 즉, 오리피스A 의 직경이 커지면 두 부분의 압력차가 작아지고 따라서 그 만큼 압력차를 크게 하기 위하여 설정압력이 높아진다. 이런 사실로부터 설정압력에 따라서 동특성을

최적화하는 오리피스의 직경은 다를수 있다고 짐작해 볼 수 있다.

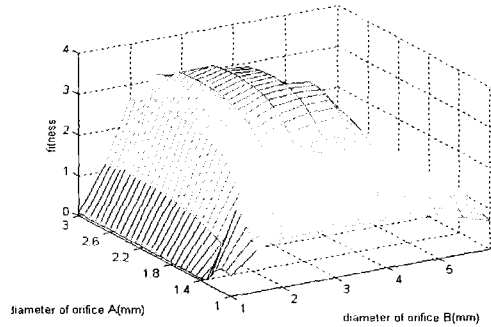


Fig.10. Fitness distribution in diameter's space of orifice A and B

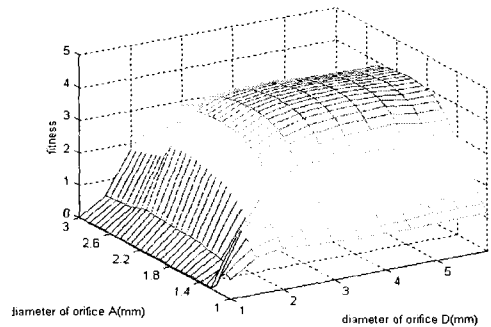


Fig.11. Fitness distribution in diameter's space of orifice A and D

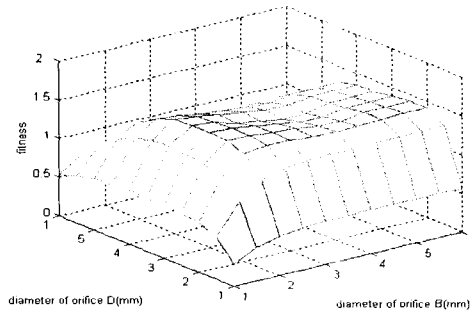


Fig.12. Fitness distribution in diameter's space of orifice B and D

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

5. Conclusion

지금까지 유전자 알고리즘을 이용한 2단 릴리프 밸브의 최적설계를 해 보았다. 유전자

알고리즘은 랜덤탐색 알고리즘이므로 항상 같은 결과를 기대할 수 없다. 때로는 나쁜결과가 나오기도 한다. 따라서 여러 번의 시행이 중에 가장 좋은 값을 선택해야한다. 하지만 이것으로도 설계하는면에서 시간과 비용을 크게 줄일 수 있다고 본다. 물론 이 논문에서는 최적화된 오리피스직경을 실제에 적용해서 결과에 대한 검증은 하지는 못했지만 추후에 그것에 대한 실험을 계획하고있다. 지금까지의 파일럿형 릴리프 밸브의 설계가 거의 경험과 실험데이터에 의존해왔다는 사실을 고려한다면 이 논문에서 제안한 유전자 알고리즘을 이용한 설계는 매우 설득력있다고 본다. 이 것은 좀더 해석적인 설계에 접근하고 시뮬레이션으로 미리 볼수 있기 때문에 비용과 시간을 절약할 수 있다. 덧붙여 유전자 알고리즘의 최적화 파라메타 역시 오리피스의 직경뿐 아니라 온도, 탄성, 거칠기 등의 많은 요소들로 확장이 가능하기 때문에 그 장점은 더 커진다고 할 수 있겠다. 앞으로 계속적인 연구를 통해 좀더 정확한 해석과 시뮬레이션 모델의 확립이 요구된다.

후기

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

참고문헌

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. Z. et al, "Interactions Between a Pressure Compensated Pump and Pressure Limiting Devices", *Proc. 1st JHPS Int Symp. on Fluid Power-Tokyo*, pp.87-94, 1989
4. Y. C. Shin, "Static and Dynamic Characteristics of a Two Stage Pilot Relief Valve", *Transactions of ASME*, vol. 113, pp. 280-288, 1992.
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, "유전자알고리즘을 이용한 유압모터의 속도제어파라메타 최적화", *한국정밀공학회지* vol. 14 ,no.9, pp. 139-144. 1997.
7. D. F. Young, B. R. Munson and T. H. Okiishi, *Fluid Mechanics*, Wiley, 1997.