

유전자 알고리즘과 콤플렉스법에 의한 고성능 유압휴즈의 최적 설계 Optimal Design of a Quick-Acting Hydraulic Fuse using Genetic Algorithm and Complex Method

이성래

S. R. Lee

Received: 17 Sep. 2014, Revised: 02 Nov. 2014, Accepted: 06 Nov. 2014

Key Words : Quick-Acting Hydraulic Fuse(고성능 유압휴즈), Line Rupture(관 파손), Poppet(포핏), Genetic Algorithm(유전자 알고리즘), Complex Method(콤플렉스법), Constrained Direct Search(제약 직접 탐색)

Abstract: The hydraulic fuse, which responds to the suddenly increased flow on rupture of a line and shuts off the fluid flow, would prevent large spillage of liquid. The quick-acting hydraulic fuse, which is mainly composed of a poppet, a seat, and a spring, must be designed to minimize the leaked flow and to prevent high collision speed between the poppet and seat during fuse operation on a line rupture. The optimal design parameters of a quick-acting hydraulic fuse were searched using the genetic algorithm and the complex method that are kinds of constrained direct search methods. The dynamic behavior of a quick-acting hydraulic fuse was researched using computer simulations that applied the obtained optimal design parameters.

기호 설명

a_1 : orifice area 1
 a_3 : orifice area 3
 A_1 : left side cross-sectional area of poppet
 A_3 : right side cross-sectional area of poppet
 A_1^* : sum of A_1 and projected area of a_1
 A_3^* : sum of A_3 and projected area of a_3
 b_f : viscous damping coefficient resulting from fluid viscosity
 C_d : discharge coefficient of orifice
 C_{r_mid} : clearance between middle bore of fuse case and poppet left end edge
 C_{r_out} : clearance between outlet bore of fuse case

and poppet right end edge
 $f(\underline{z})$: object function
 F_p : force on poppet due to pressure differentials
 F_f : flow force on the poppet
 F_{bs} : bias force on spring
 g : gravitational acceleration
 k_s : spring constant
 l_{p1} : length of poppet cone
 l_{p2} : length of poppet cylinder
 m_p : mass of poppet
 P_1 : pressure in control volume 1
 P_2 : pressure in control volume 2
 P_3 : pressure in control volume 3
 Q_1 : flow rate through orifice 1
 Q_3 : flow rate through orifice 3
 Q_{in} : flow rate into fuse entrance
 r_{b1} : internal radius of fuse case at initial position of poppet left end
 r_{b_mid} : radius of bore at middle of fuse case
 r_{b_out} : radius of bore at outlet of fuse case

* Corresponding author: srlee@konyang.ac.kr
 Department of Mechanical Engineering, Konyang University,
 Nonsan 320-711, Korea
 Copyright © 2014, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

- r_{p1} : radius of poppet left end
- r_{p3} : radius of poppet right end
- t_{simu} : simulation time of fuse operation
- v_p : poppet velocity
- $v_{p_collision}$: collision speed of poppet and seat
- V_1 : volume of control volume 1
- V_2 : volume of control volume 2
- x_p : poppet displacement
- x_{p_max} : maximum poppet displacement
- w_f : weighting factor of objective function
- $\underline{z} = [\alpha_1 \ \alpha_3 \ C_{r_mid} \ C_{r_out}]^T$: design variable vector
- α_1 : half-cone angle of inlet conical bore in fuse
- α_3 : half-cone angle of outlet conical bore in fuse
- β : fluid bulk modulus
- ρ : fluid density
- μ : fluid absolute viscosity
- $\int_0^{t_{simu}} Q_3(t) dt$: leaked volume from fuse for t_{simu}

1. 서 론

유압 퓨즈^{1,2,3}는 일종의 유압회로 보호장치이며 관의 급작스런 파손에 의한 유량누설을 감지하여 매우 빠른 시간(수 밀리초) 내에 유량누설을 차단시켜야 한다. 고성능 유압퓨즈^{2,3}는 크게 스프링(spring), 포핏(poppet), 시트(seat)로 구성되는데 유량누설에 의한 과도유량(transient flow)에 의해 포핏이 급가속을 하여 시트에 접근하며 포핏이 시트에 닿기 전에는 감속이 이루어져 포핏과 시트 사이에 충돌 속도가 작아야 한다. 이러한 급가속과 급감속을 위해서는 스프링, 포핏, 시트의 기하학적 치수 및 질량 등의 여러 설계변수 값을 선정해야 하는데 시행착오적인 방법으로는 설계시간이 오래 걸리기 때문에 최적 설계가 필요하다. 여기서는 여러 개의 설계변수 중에서 퓨즈 입구측 케이스 보어 경사각 α_1 , 퓨즈 출구측 케이스 보어 경사각 α_3 , 퓨즈케이스 중간측 보어반경과 포핏 좌측 끝 반경의 차이 C_{r_mid} , 퓨즈케이스 출구측 보어반경과 포핏 우측 끝 반경의 차이 C_{r_out} 를 설계변수로 선정하고 유압퓨즈 입구에 과도유량이 발생한 후 유압퓨즈가 작동하여 유량을 차단시킬 때까지 발생하는 누설량을 최소화시키도록 최적 설계변수값을 탐색하기 위해 유전자 알고리즘(genetic algorithm)과 콤플렉스법(complex method)을 적용하였다.

2. 유압퓨즈의 수학적 모델

고성능 유압퓨즈의 구조가 Fig. 1에 잘 나타나 있다. 미리 압축된 스프링은 유압퓨즈 내의 포핏이 열려진 상태에 있도록 한다. 유압퓨즈를 통과하는 유량이 충분히 증가하면 퓨즈 내의 오리피스1과 오리피스3에서 압력강하, $P_1 - P_2$, $P_2 - P_3$ 가 발생하며 이러한 압력차에 의해 퓨즈 포핏에 가해지는 힘은 스프링 반력, 점성마찰력 등을 이기면서 포핏을 오른쪽으로 이동시킨다. 포핏이 오른쪽으로 이동할수록 유로(오리피스 면적)가 작아지므로 그에 따른 압력차는 더욱 증가하여 포핏은 큰 가속을 받는다. 포핏이 시트에 근접하면 포핏이 감속을 받도록 포핏의 구조를 설계하여 포핏이 케이스와 충돌하는 속도를 감소시켜야 한다.

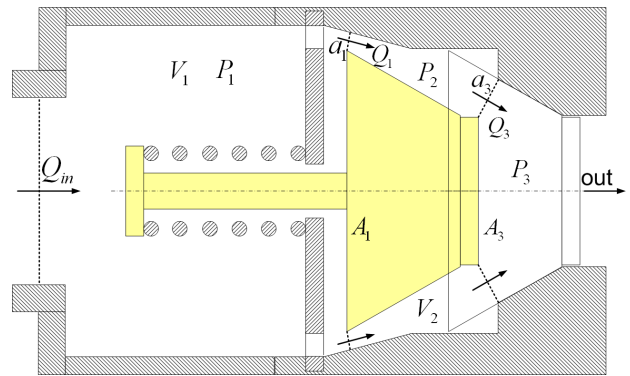


Fig. 1 Simplified hydraulic fuse schematic: fuse case, poppet, spring

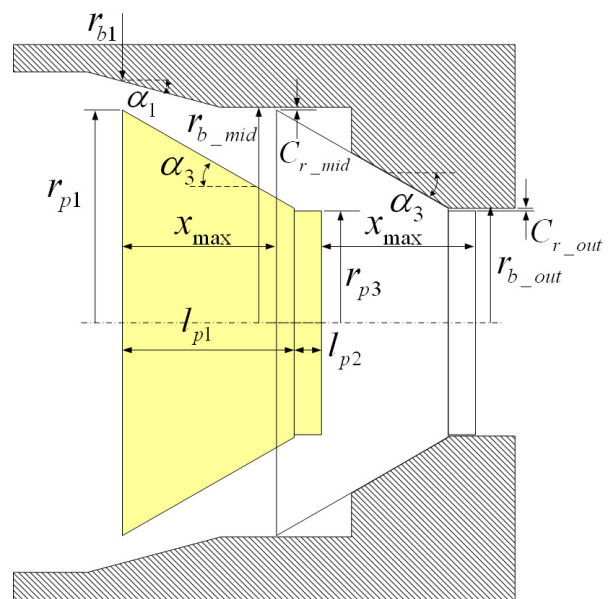


Fig. 2 Dimensions of a hydraulic fuse

최적설계에서의 목적함수값이 휴즈를 통과하는 누설량이므로 과도유량이 발생한 직후 유압휴즈가 작동하는 과정에서 발생하는 누설량을 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 계산해야 하므로 먼저 유압휴즈에 대한 수학적 모델식³⁾을 유도해야 한다.

Fig. 1에서 오리피스 면적 a_1 을 통과하는 유량은 식(1), 식(2)로 표현되며 오리피스 면적 a_3 를 통과하는 유량은 식(3), 식(4)로 표현된다.

$$P_1 \geq P_2 \text{인 경우 } Q_1 = C_d a_1 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} \quad (1)$$

$$P_1 < P_2 \text{인 경우 } Q_1 = -C_d a_1 \sqrt{\frac{2(P_2 - P_1)}{\rho}} \quad (2)$$

$$P_2 \geq P_3 \text{인 경우 } Q_3 = C_d a_3 \sqrt{\frac{2(P_2 - P_3)}{\rho}} \quad (3)$$

$$P_2 < P_3 \text{인 경우 } Q_3 = -C_d a_3 \sqrt{\frac{2(P_3 - P_2)}{\rho}} \quad (4)$$

식(1)~(4)에 적용된 오리피스 면적 a_1, a_3 는 포핏의 변위에 따라 변하며 Fig. 2에 나타난 포핏과 시트의 기하학적 형상을 참고하여 오리피스 면적을 구할 수 있으며 포핏 변위, x_p 에 따라 변한다. P_1, P_2, P_3 는 각각 제어체적1, 2, 3 내의 압력을 가리키며 P_3 는 대기압으로 가정한다. C_d 는 오리피스 유량계수이며 ρ 는 유체밀도를 나타낸다.

Fig. 1에서 3개의 제어체적이 존재하는데 제어체적 3에서의 압력은 대기압으로 가정하면 2개의 제어체적에 대한 연속 방정식을 구하면 된다. 제어체적 1에서의 연속방정식은 식(5)와 같으며 제어체적 2에서의 연속방정식은 식(6)과 같다.

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{\beta}{V_1} \left[Q_{in} - Q_1 - A_1^* \frac{dx_p}{dt} \right] \quad (5)$$

$$\frac{dP_2}{dt} = \frac{\beta}{V_2} \left[Q_1 - Q_3 + A_1^* \frac{dx_p}{dt} - A_3^* \frac{dx_p}{dt} \right] \quad (6)$$

여기서 A_1^* 는 포핏 좌측끝 단면적 A_1 과 오리피스1 면적 a_1 의 투영면적의 합이며 A_3^* 는 포핏 우측끝 단면적 A_3 와 오리피스3 면적 a_3 의 투영면적의 합이다. V_1, V_2 는 각각 제어체적1, 2의 부피를 나타내며 특히 V_2 는 Fig. 2에 나타난 포핏과 시트의 기하학적 형상을 참고하여 구할 수 있으며 포핏 변위, x_p 에 따라 변한다.

유압휴즈 내의 포핏에 대한 운동 방정식은 다음과

같다.

$$F_p + F_f - b_f \frac{dx_p}{dt} - F_{bs} - k_s x_p = m_p \frac{d^2 x_p}{dt^2} \quad (7)$$

$$F_p = A_1(P_1 - P_2) + A_3(P_2 - P_3) \quad (8)$$

F_f 는 오리피스 a_1 과 a_3 를 통과하는 유량에 의한 유체힘(flow force)이며 b_f 는 유체점성에 의한 점성감쇠계수이며 F_{bs} 는 미리 압축된 스프링 반력을, k_s 는 스프링 상수를, m_p 는 포핏의 질량을 나타낸다.

식(5), 식(6)를 수치적으로 적분하면 P_1, P_2 를 구할 수 있으며 식(7)을 적분하면 포핏의 속도, v_p 와 포핏의 변위, x_p 를 구할 수 있다. 또한 식(3) 또는 식(4)를 적분하면 유압휴즈를 통과하는 누설량, $\int Q_3(t) dt$ 을 구할 수 있다. 즉 컴퓨터 시뮬레이션에서 5개의 상태변수, $P_1, P_2, v_p, x_p, \int Q_3(t) dt$ 가 필요한 것을 알 수 있으며 휴즈에 대한 상수값은 Table 1에 나타나 있다.

Table 1 System constants of the quick-acting hydraulic fuse

viscous damping coefficient b_f	17.511 N/(m/s)
discharge coefficient of orifice C_d	0.61
bias force on spring F_{bs}	82.78 N
spring constant k_s	82.78 N/m
length of poppet cone l_{p1}	5.5 mm
length of poppet cylinder l_{p2}	0.5 mm
mass of poppet m_p	9.58 g
flow rate into fuse entrance Q_{in}	20 l/min
radius of poppet left end r_{p1}	7.45 mm
maximum poppet displacement x_{p-max}	5 mm
fluid density ρ	8.336×10^{-6} N s ² /cm ⁴
fluid bulk modulus β	1034.27 MPa
fluid absolute viscosity μ	3.9963×10^{-6} N s/cm ²

3. 유압휴즈의 최적 설계

유압휴즈의 최적설계에 사용된 설계변수는 Fig. 2에 나타난 여러 변수 중에서 휴즈 입구측 케이싱 보어 경사각 α_1 , 휴즈 출구측 케이싱 보어 경사각 α_3 , 휴즈케이싱 중간측 보어반경과 포핏 좌측끝 반경의 차이 C_{r-mid} , 휴즈케이싱 출구측 보어반경과 포핏 우

측끝 반경의 차이 C_{r_out} 를 선정하였다. 4개의 설계변수는 식(9), 설계변수의 탐색범위는 식(10)~식(13), 목적함수는 식(14)과 같다. 여기서 설계변수의 탐색범위는 기존 유압휴즈의 실제 형상, 일반적인 인라인형 체크밸브의 형상 등을 참고하여 설정하였다.

$$z = [\alpha_1 \ \alpha_3 \ C_{r_mid} \ C_{r_out}]^T \tag{9}$$

$$10^\circ \leq \alpha_1 \leq 20^\circ \tag{10}$$

$$25^\circ \leq \alpha_3 \leq 45^\circ \tag{11}$$

$$0.1\text{mm} \leq C_{r_mid} \leq 0.3\text{mm} \tag{12}$$

$$0.1\text{mm} \leq C_{r_out} \leq 0.3\text{mm} \tag{13}$$

$$f(z) = \int_0^{t_{simu}} Q_3(t) dt + w_f \cdot v_{p_collision} \tag{14}$$

Table 2에 콤플렉스법^{4,5)}에 의해 4회 탐색된 최적 설계변수값, 최종 목적함수값, 탐색시간을 나타냈으며 또한 유전자 알고리즘^{6,7)}에 의해 3회 탐색된 최적 설계변수값, 최종 목적함수값, 탐색시간을 나타냈다. 콤플렉스법에 의해 4회 탐색된 결과(ca: no.1~no.4)로서 설계변수는 $[\alpha_1 \ \alpha_3 \ C_{r_mid} \ C_{r_out}] = [20^\circ \ 25^\circ \ 0.1\text{mm} \ 0.1\text{mm}]$ 에 근접하며 최종 목적함수값도 0.914~0.916 로서 유사하고 탐색시간도 1시간12분~1시간34분으로서 거의 비슷하다.

그러나 유전자 알고리즘에 의해 3회 탐색된 결과(ga: no.1~no.3)에 의하면 최종 목적함수값은 0.922~0.930로서 콤플렉스법에 의한 최종 목적함수값 0.914~0.916보다 크고 탐색시간도 6시간22분~11시간50분으로서 매우 오래 걸린다. 즉 유전자 알고리즘은 본 논문에 적용된 유압휴즈의 누설량을 목적함수로 설정하고 또한 유압휴즈와 같은 매우 비선형적인 시스템에서 수치적으로 적분을 통해 목적함수값(휴즈 누설량)을 구하는 경우 전역적인 목적함수의 최소값을 구하는데 탐색시간이 너무 오래 걸리며 최소값에 도달하지 못하였다.

여기서 목적함수값을 1회 구한다는 것은 식(1)~식(8)을 수치적으로 풀어서 식(14)의 값을 구하는 것인데 모사시간 $t=0 \sim 0.005$ 초 동안 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하여 구할 수 있으며 목적함수값을 1회 계산하는데 일반 PC를 사용하여 10~20초가 소요된다. 따라서 탐색횟수가 많아질수록 총 탐색시간이 오래 걸린다. 콤플렉스법에 의한 탐색 프로그램과 유전자 알고리즘에 의한 탐색 프로그램은 모두 MATLAB⁸⁾으로 작성하였다.

Table 3은 식(14)의 목적함수에 포함된 가중치, w_f 값을 0.0에서 1.0까지 점진적으로 변화시키면서 콤플렉스법으로 탐색한 설계변수값을 유압휴즈 시뮬레이션에 적용하여 얻은 유압휴즈의 작동특성을 나타낸다. 가중치, w_f 값이 증가할수록 유압휴즈의 작동시간과 누설량은 증가하지만 포핏과 시트의 충돌속도는 감소한다는 사실을 알 수 있다. 또한 설계변수값을 관찰하면 포핏과 시트의 충돌속도를 감소시키기 위해서는 설계변수 중에서 α_3 값을 25도에서 45도로 점진적으로 증가시켜야 하며 또한 C_{r_out} 값도 0.1mm에서 0.3mm로 증가시켜야 하는 것을 알 수 있다.

Table 2 Search results of the optimal design values by the complex method(ca) and genetic algorithm(ga): $w_f=0.0$

algorithm	design variables $\alpha_1, \alpha_3,$ C_{r_mid}, C_{r_out} [deg,deg,mm,mm]	final object function values (cc)	calculation time
ca: no.1	[20.00 25.01 0.101 0.100]	0.915	1hr 13min
ca: no.2	[19.96 25.00 0.102 0.102]	0.916	1hr 34min
ca: no.3	[20.00 25.00 0.100 0.100]	0.914	1hr 33min
ca: no.4	[20.00 25.00 0.100 0.100]	0.914	1hr 12min
ga: no.1	[19.67 25.15 0.104 0.113]	0.929	8hr 3min
ga: no.2	[19.97 25.93 0.104 0.106]	0.930	11hr 50min
ga: no.3	[19.95 25.32 0.107 0.102]	0.922	6hr 22min

Table 3 Computer simulation results of the hydraulic fuse operation applying the optimal design values obtained by the complex method

weighting factor w_f	design variables $\alpha_1, \alpha_3,$ C_{r_mid}, C_{r_out} [deg,deg,mm,mm]	trigger time (ms)	collision speed of poppet and seat (m/s)	leaked oil volume (cc)
0.0	[20.00 25.00 0.100 0.100]	1.49	2.040	0.914
0.2	[20.00 27.63 0.100 0.100]	1.55	1.782	0.959
0.5	[19.99 42.01 0.100 0.299]	2.12	0.607	1.348
1.0	[19.98 44.94 0.100 0.299]	2.62	0.414	1.462

Fig. 3은 목적함수의 가중치, $w_f=0.0$ 인 경우, 콤플렉스법을 적용하여 탐색 중인 유압휴즈의 설계변수값의 변화과정을 나타낸다. 상단 창에서 점선 그래프는 α_3 를 나타내고 실선 그래프는 α_1 를 나타낸다. 하단 창에서 점선 그래프는 C_{r_out} 를 나타내고 실선 그래프는 C_{r_mid} 를 나타낸다.

Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6은 각각 설계변수가 $[\alpha_1 \alpha_3 C_{r_mid} C_{r_out}] = [20^\circ 25^\circ 0.1\text{mm} 0.1\text{mm}]$ 인 경우, 포핏의 변위 x_p , 포핏의 속도 v_p , 압력 P_1, P_2 를 나타낸다. Fig. 4에서 $t = 0.00149$ 초에서 포핏의 변위가

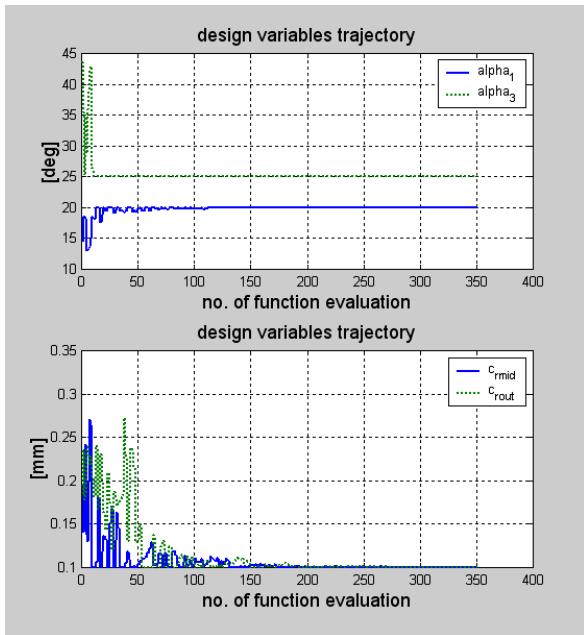


Fig. 3 Trajectories of the design variables by the complex method: (a) top: α_1, α_3 (b) bottom: C_{r_mid}, C_{r_out}

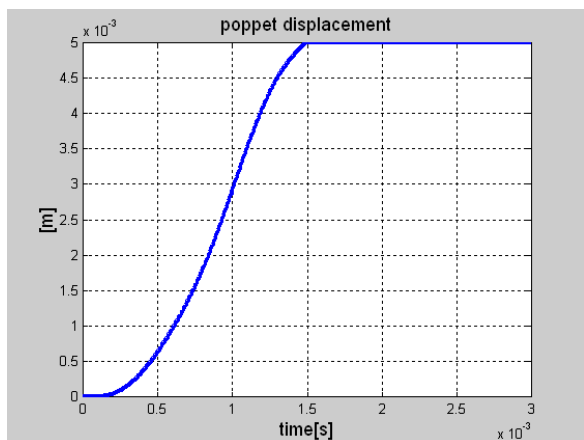


Fig. 4 Poppet displacement for design values $[\alpha_1 \alpha_3 C_{r_mid} C_{r_out}] = [20^\circ 25^\circ 0.1\text{mm} 0.1\text{mm}]$

최대변위인 5 mm에 도달하므로 유압휴즈가 닫히는 것을 알 수 있으며 Fig. 5에서 0.001초까지는 포핏이 가속되는 것을 알 수 있고 0.001초 이후에는 포핏이

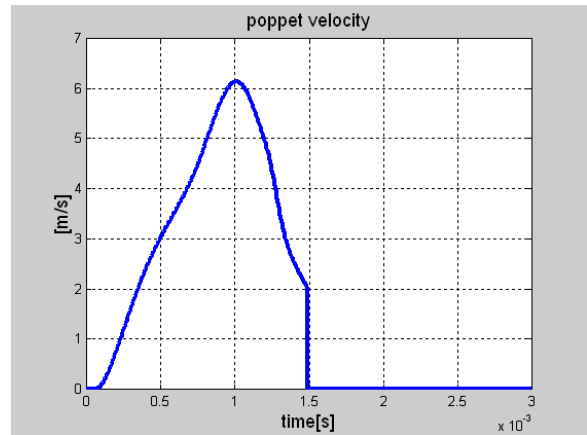


Fig. 5 Poppet velocity for design values $[\alpha_1 \alpha_3 C_{r_mid} C_{r_out}] = [20^\circ 25^\circ 0.1\text{mm} 0.1\text{mm}]$

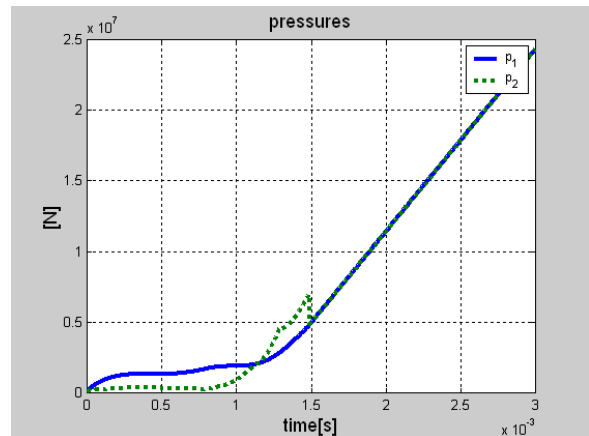


Fig. 6 Fuse pressures for design values $[\alpha_1 \alpha_3 C_{r_mid} C_{r_out}] = [20^\circ 25^\circ 0.1\text{mm} 0.1\text{mm}]$

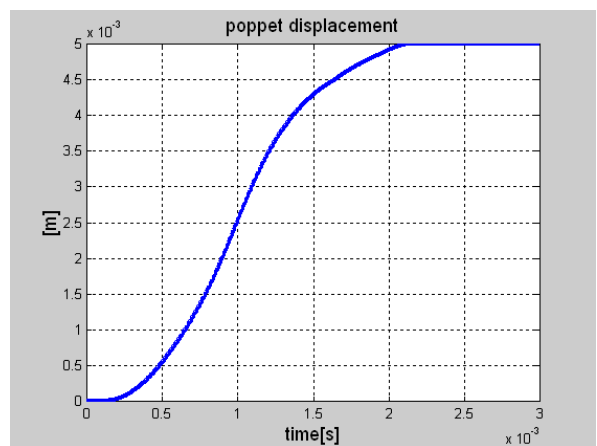


Fig. 7 Poppet displacement for design values $[\alpha_1 \alpha_3 C_{r_mid} C_{r_out}] = [19.99^\circ 42.01^\circ 0.1\text{mm} 0.299\text{mm}]$

감속되어 $t = 0.00149$ 초에서 포핏과 시트 사이의 충돌속도가 2.04 m/s 임을 알 수 있다. 또한 Fig. 6에서 포핏의 가속구간에서는 $P_1 > P_2$ 이며 감속구간의 일부에서는 $P_1 < P_2$ 임을 알 수 있다.

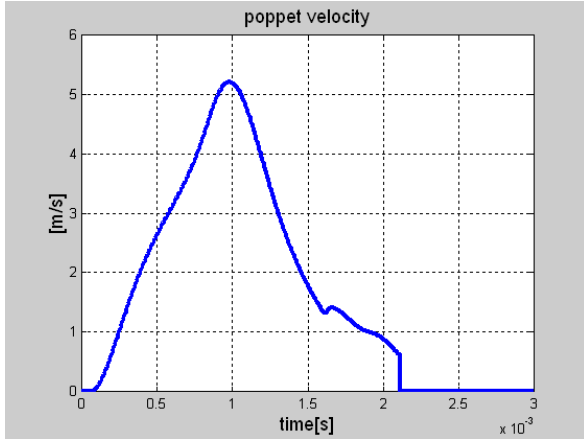


Fig. 8 Poppet velocity for design values $[\alpha_1 \alpha_3 C_{r_mid} C_{r_out}] = [19.99^\circ 42.01^\circ 0.1\text{mm } 0.299\text{mm}]$

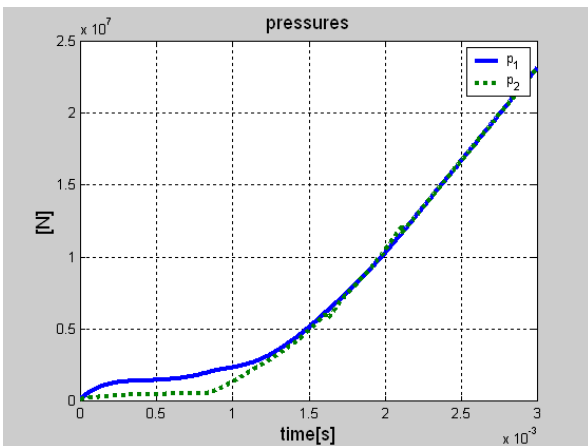


Fig. 9 Fuse pressures for design values $[\alpha_1 \alpha_3 C_{r_mid} C_{r_out}] = [19.99^\circ 42.01^\circ 0.1\text{mm } 0.299\text{mm}]$

Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9는 각각 설계변수가 $[\alpha_1 \alpha_3 C_{r_mid} C_{r_out}] = [19.99^\circ 42.01^\circ 0.1\text{mm } 0.299\text{mm}]$ 인 경우, 포핏의 변위 x_p , 포핏의 속도 v_p , 압력 P_1 , P_2 를 나타낸다.

Fig. 7에서 $t = 0.00212$ 초에서 포핏의 변위가 최대 변위인 5 mm에 도달하므로 유압퓨즈가 닫히는 것을 알 수 있으며 Fig. 8에서 0.00095초까지는 포핏이 가속되는 것을 알 수 있고 0.00095초 이후에는 포핏이 감속되어 $t = 0.00212$ 초에서 포핏과 시트 사이의 충돌속도가 0.607 m/s 임을 알 수 있다. 또한 Fig. 9에서 포핏의 가속구간에서는 $P_1 > P_2$ 이며 감속구간의

일부에서는 $P_1 \approx P_2$ 임을 알 수 있다.

4. 결 론

유압회로에서 유압관의 급작스런 파손 직후 유체 누설량을 최소화시키도록 유압퓨즈의 설계변수의 최적값을 탐색하기 위해 유전자 알고리즘과 콤플렉스법을 적용하였다. 유전자 알고리즘에 의한 탐색은 콤플렉스법에 의한 탐색에 비해 탐색시간이 매우 길며 또한 최적값에 도달하지 못하였다. 이는 유압퓨즈와 같은 매우 비선형적인 시스템에서 수치적으로 적분을 통해 목적함수값을 구하는 경우 유전자 알고리즘에는 적합하지 않은 것 같다.

콤플렉스법에 의해 구해진 최적설계 변수값을 적용하여 고성능 유압퓨즈의 동적 시뮬레이션을 수행한 결과 설계변수가 $[\alpha_1 \alpha_3 C_{r_mid} C_{r_out}] = [20^\circ 25^\circ 0.1\text{mm } 0.1\text{mm}]$ 인 경우, 유압퓨즈의 트리거 시간은 0.00149초, 포핏과 시트 사이의 충돌속도는 2.04 m/s, 유체누설량은 0.914cc로 나타났다. 또한 설계변수가 $[\alpha_1 \alpha_3 C_{r_mid} C_{r_out}] = [19.99^\circ 42.01^\circ 0.1\text{mm } 0.299\text{mm}]$ 인 경우, 유압퓨즈의 트리거 시간은 0.0021초, 포핏과 시트 사이의 충돌속도는 0.607 m/s, 유체누설량은 1.348cc로 나타났다.

고성능 유압퓨즈의 최적 설계 프로그램은 새로운 구조의 고성능 유압퓨즈의 설계 또는 유압퓨즈와 유사한 구조를 갖는 체크밸브, 파일럿 체크밸브, 릴리프 밸브, 감압 밸브, 시퀀스 밸브 등의 다양한 유압밸브의 설계에 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2013학년도 건양대학교 학술연구비 지원에 의하여 이루어진 것임을 밝힙니다.

References

- 1) Y. M. El-Ibiary and P. N. Nikiforuk, "Design and Evaluation of A New Hydraulic Fuse". Proceedings of the 34th National Conference on Fluid Power, 1978.
- 2) H. Gold, A New Concept of A Hydraulic and Pneumatic Fuse, Part I~Part III, Technical Report, T. Budzich Engineering Consultant, Moreland Hills, Ohio, Oct. 30, 1982.

- 3) S. R. Lee and K. Srinivasan, "Analytical and Experimental Study of The Dynamic Behavior of A Quick Acting Hydraulic Fuse," ASME Transactions, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol.111, No.3, pp.528-534, September 1989.
- 4) G. V. Reklaitis, A. Ravindran and K. M. Ragsdell, "Engineering Optimization Methods and Applications", John Wiley & Sons, Inc., pp.261~286, 1983.
- 5) S. R. Lee, "Design of Optimal Locating Point of the Hydraulic Cylinder Actuating a Roller-Link Type Rotating Floodgate," Journal of The Korean Society of Fluid Power and Construction Equipments, Vol. 9, No. 3, pp.29-36, 2012.9.
- 6) S. K. Kong, I. T. Kim, T. H. Park, J. Y. Park, Y. H. Shin, Genetic Algorithm, Green, Inc., pp.402~412, 2002.
- 7) S. R. Lee, "Controller Parameters Design of Direct Drive Servo Valve Using Genetic Algorithm and Complex Method," Trans. of the KSME(A), Vol. 37, Vol.37, No.4, pp.475~481, 2013.4.
- 8) D. Hanselman and B. Littlefield. "The Student Edition of MATLAB", Prentice Hall, 1997.