

# GA 를 이용한 전기유압식 가변펌프의 압력제어

안경관<sup>#</sup>, 현장환<sup>\*</sup>, 조용래<sup>\*\*</sup>, 오범승<sup>\*\*</sup>

## Pressure Control of Electro-Hydraulic Variable Displacement Pump Using Genetic Algorithms

KyoungKwan Ahn<sup>#</sup>, JangHwan Hyun<sup>\*</sup>, YongRae Cho<sup>\*\*</sup>, BoemSueng Oh<sup>\*\*</sup>

### ABSTRACT

This study presents a genetic algorithm-based method for optimizing control parameters in the pressure control of electro-hydraulic pump with variable displacement. Genetic algorithms are general-purpose optimization methods based on natural evolution and genetics and search the optimal control parameters maximizing a measure that evaluates the performance of a system. Four control gains of the PI-PD cascade controller for an electro-hydraulic pressure control system are optimized using a genetic algorithm in the experiment. Optimized gains are confirmed by inspecting the fitness distribution which represents system performance in gain spaces. It is shown that genetic algorithm is an efficient scheme in optimizing control parameters of the pressure control of electro-hydraulic pump with variable displacement.

**Key Words:** Genetic Algorithm(유전알고리즘), Pressure Control(압력제어), Optimization(최적화), Variable Displacement Hydraulic Pump(가변유압펌프), Double Loop(이중루프)

### 기호설명

$A$  : Section-area of swash plate angle control cylinder  
 $K_v$  : Flow gain of control valve  
 $K_{ip}$  : Integral gain of pressure feedback controller  
 $K_{pp}$  : Proportional gain of pressure feedback controller  
 $K_{dw}$  : Derivative gain of swash plate angle feedback controller  
 $K_{pw}$  : Proportional gain of swash plate angle feedback controller  
 $P_c$  : Pressure of swash plate control cylinder chamber  
 $P_l$  : load pressure  
 $P_p$  : Pump outlet pressure

$P_{p\_ref}$  : Reference of pump outlet pressure  
 $Q_{pump}$  : Pump outlet flow  
 $Q_{ctrl}$  : flow passing through swash plate control valve  
 $Q_{leak\_p}$  : pump leakage flow  
 $U$  : Input voltage of swash plate control proportional solenoid valve  
 $V_p$  : Pump outlet volume  
 $V_c$  : Volume of swash plate control cylinder chamber  
 $X_v$  : Displacement of proportional control valve  
 $\phi$  : swash plate angle  
 $\phi_{ref}$  : Reference of swash plate angle  
 $\omega$  : Rotation speed of pump

접수일: 2003 년 12 월 10 일; 게재승인일: 2004 년 5 월 7 일  
<sup>#</sup> 교신저자, 울산대학교 기계·자동차공학부  
 E-mail kkahn@mail.ulsan.ac.kr Tel.(052)259-2282  
<sup>\*</sup> 시뮬레이션 테크  
<sup>\*\*</sup> 울산대학교 대학원 기계자동차공학과

## 1. 서론

펌프는 유압시스템에서 가장 중요하고 기본적인 요소로 기계적 에너지를 유압에너지로 변환시켜 주는 기능을 수행하고 있다. 유압펌프는 유압유를 토출하는 방식에 따라 기어펌프, 베인펌프 그리고 피스톤 펌프로 대별되며 이 중 피스톤 펌프는 효율이 높고, 넓은 영역의 압력, 온도 및 점도에서 사용할 수 있으며 펌프제어가 용이하므로 항공기, 중장비 및 산업기계에 널리 사용되고 있다. 피스톤 펌프는 토출유량의 가변여부에 따라서 고정용량형 펌프와 가변용량형 펌프로 분류된다. 고정용량형 펌프는 부하유량의 변동에 관계없이 일정압력으로 유량을 시스템에 공급할 수 있으나 릴리프 밸브로 인한 에너지손실이 매우 크다. 이러한 에너지 손실을 줄이기 위하여 가변용량형 펌프를 사용하고 있으며, 가변용량형 피스톤 펌프는 사판각을 조절하는 펌프 레귤레이터의 작동방식에 따라 압력보상, 마력보상 및 로드센싱 제어용 등으로 분류할 수 있다.

지금까지 가변펌프의 제어에는 기계유압식이 주로 이용되어 왔으며 현재 상용화되고 있는 대부분의 가변펌프는 기계유압식으로 제어되고 있다. 기계유압식 펌프제어기의 경우, 용도에 따라서 제어대상이 되는 압력, 사판각, 토출유량 및 마력 등을 제어해주는 제어밸브가 장착되어야 하고, 펌프사이즈나 제어목적에 맞추어 펌프 제조사의 고유기술로 설계되어야 하는 단점이 있다. 이에 반해 전자유압식 펌프제어기를 사용하는 경우, 부품의 복잡성을 기계유압식에 비해서 크게 줄일 수 있으며 유량이나 압력 그리고 파워 등 여러가지 제어파라미터를 동시에 제어하는 복합 제어시스템을 구성하는데 있어서 기계유압식에 비해 시스템의 구성이 간단하며 비용을 절감할 수 있다. 또한 시스템을 변경할 경우, 부품의 교체 없이 용이하게 제어시스템을 조정하여 제어성능을 최적화할 수 있다. 특히 펌프제어를 위한 제어밸브를 설계하는데 있어서 제어목적이나 펌프 사이즈에 따라 특수밸브를 설계할 필요가 없으므로 많은 노력과 비용을 절감할 수 있어, 최근에 들어 전기유압식 펌프제어시스템은 다양한 분야에서 적용되는 사례가 늘어나고 있는 추세이다.

이와 아울러 유압시스템의 성능을 향상시키기

위해서 제어파라미터를 최적화하기 위한 연구가 계속되고 있다. 유압시스템은 비선형성이 강하며, 정확한 모델링 및 이를 바탕으로 한 제어 파라미터의 최적값을 이론적으로 도출하는 것은 매우 어렵다. 따라서 유압시스템의 제어기 설계시, 유압시스템의 숙련자가 많은 시행착오를 통하여 제어기의 계인을 실험적으로 결정하고 있다.

종래의 펌프와 관련된 대다수의 연구는 주로 기계유압식 펌프시스템에 대하여 이루어졌으며,<sup>1,6</sup> 전기유압식 펌프시스템에 대해서는 현대제어 이론을 적용하고 제어결과를 제시한 산발적인 연구가 이루어졌고,<sup>7,11</sup> 체계적인 연구는 미흡한 실정이다. 특히 최근에 중요시되고 있는 전기유압식 펌프시스템의 압력제어에 대한 연구는 매우 부족한 상황이다.

따라서, 본 논문에서는 전기유압식 가변펌프의 압력제어기를 설계함에 있어서, 유전알고리즘을 적용, 제어파라미터를 효율적으로 최적화시킬수 있음을 보이고자 한다. 본 연구의 대상이 되는 가변유압펌프를 이용한 전자유압식 압력제어 시스템은 내부의 사판제어 PD제어루프와 외부의 압력제어 PI제어루프의 이중루프를 구성되며, 4개의 제어파라미터를 가지는 시스템으로 조작자가 수동으로 제어파라미터를 설정하기가 매우 어려운 시스템이다. 본 논문에서 제안하는 이중루프 제어기는 AC모터의 속도제어, 솔레노이드 밸브의 스톱 위치제어 그리고 가변 유압모터의 속도제어에 적용된 바가 있는 일반적으로 잘 알려져 있는 제어기이다. 본 논문에서는 유전 알고리즘을 이용하여 이러한 시스템에 대해서 최적의 제어 파라미터를 찾아냄으로서 유전 알고리즘이 유압시스템의 제어파라미터의 최적화에 효과적임을 보이고자 한다.

## 2. 유압시스템

### 2.1 가변 유압펌프를 이용한 전자유압식 압력 제어시스템

본 연구의 대상으로 하는 가변모터를 이용한 전기유압식 속도제어시스템의 개략도가 Fig. 1에 나타나 있다. 본 시스템의 작동원리는 다음과 같다. 압력요구입력 신호에 따라 비례제어밸브가 작동하여 사판각제어실린더를 움직이고 펌프의

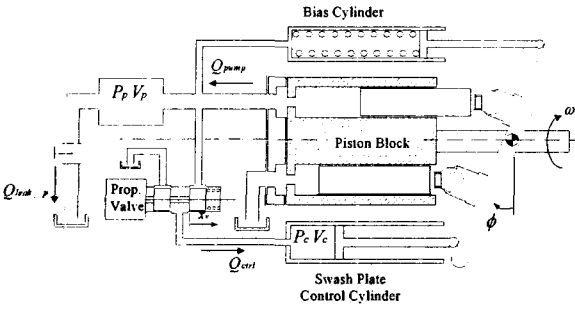


Fig. 1 Schematic Diagram of Variable Displacement Hydraulic Piston Pump

사판이 변화하게 되어 펌프로부터 사판각에 비례하는 펌프토출유량이 발생하게 된다. 이 토출 유량은 펌프토출압력이 목표압력값과 일치할 때까지 사판각을 계속 조정하게 된다.

Fig. 2에는 이중루프를 갖는 본 논문에서 대상으로하는 가변 펌프 시스템의 블럭선도가 나타나 있다. 이와같이 4개의 계인에 의해 구현되는 제어기는 다음과 같이 나타낼수 있다.

$$\phi_{ref} = K_{pp}(P_{p\_ref} - P_p) + K_{ip} \int (P_{p\_ref} - P_p) dt$$

$$U = K_{pw}(\phi_{ref} - \phi) + K_{dw}(\dot{\phi}_{ref} - \dot{\phi})$$

2.2 실험장치소개

Fig. 3은 실험장치의 개략도를 나타내고 있다. 사용한 펌프는 사판식 가변피스톤펌프(Vickers사, PVH57-RM-2DS)이다. 최대사판각은 18도로서 1800rpm으로 회전하는 유도전동기에 의해 구동되며 최대 98LPM의 유량을 토출한다. 사판각 제어를 위해 비례밸브(Vickers, KTG4V-3S, 대역폭=20[Hz])를 사용하여 사판각 제어 실린더내로의 유량을 조정하였다.

펌프토출측의 부하유량을 조절하기 위해서 두개의 수동가변오리피스를 사용하였으며 한쪽 오리피스에는 shunt 밸브를 사용하여 부하유량의 급격한 변동을 줄 수 있도록 하였다. 비례 릴리프밸브(Rexroth, DBE10-37/315)는 부하부에 해당하는 오리피스 뒤쪽의 부하압력을 임의로 변화시키는 작용을 한다. 사판각제어를 위한 각센서로 회전형 Potentiometer(Midori사, CP-2UK-R)를 이용하여 펌프의 사판각을 측정한다.

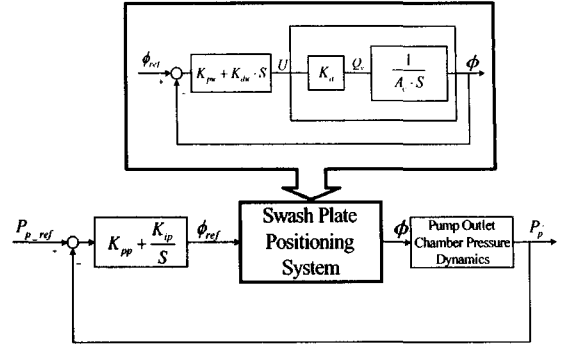


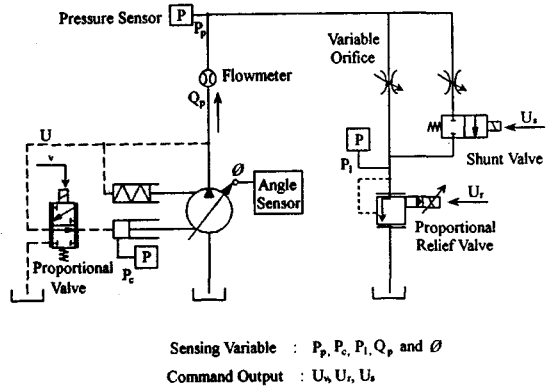
Fig. 2 System Block Diagram

펌프토출측과 부하부에는 압력센서가 설치되어 있어서 압력제어에 필요한 압력신호를 측정한다. 그 밖에 제어시스템의 동적거동을 살피기 위해 사판각제어실린더내의 압력과 펌프 토출 유량을 측정한다.

2.3 제어파라미터의 최적화에 따른 문제

본 논문에서 다루는 시스템과 같은 이중루프를 가진 경우에 계인파라미터를 조정하는 기존의 방법은 다음과 같다. 먼저 내부루프에 의해 제어되는 사판각 제어시스템의 성능이 좋아지도록 내부루프의 제어파라미터를 최적화시킨다. 그 다음 최적화된 내부루프의 제어파라미터를 고정시킨 후 원하는 압력제어성능을 얻을 수 있도록 외부루프의 제어파라미터를 최적화시킨다.

이와같이 수동으로 제어파라미터를 조정하는



Sensing Variable : P<sub>p</sub>, P<sub>c</sub>, P<sub>i</sub>, Q<sub>p</sub> and φ  
Command Output : U, U<sub>r</sub>, U<sub>s</sub>

Fig. 3 Experimental Apparatus

경우에 있어서는 두단계로 나누어서 최적화를 진행해야 하므로 외부루프의 제어파라미터가 내부루프의 제어파라미터에 미치는 영향은 고려되지 않는다. 그리고 과정을 두단계로 나누지 않고 동시에 내부와 외부루프를 최적화시키는 작업은 일반적으로 많이 사용되는 PID제어기와는 달리 제어성능에 미치는 각 제어파라미터의 영향이 명확하게 알려져 있지 않기 때문에 매우 어려운 작업이 된다.

또한 위와 같은 과정을 통해서 어느정도 만족할 만한 성능을 가져오도록 제어 파라미터를 구하더라도 최적값이라는 확신을 할 수가 없다.

따라서 위와 같은 문제점을 가진 경우에 대해서 유전알고리즘을 적용하여 내부와 외부루프의 제어파라미터를 동시에 조정할 수 있으며 아울러 조작자가 정한 탐색영역내에서 최적의 제어 파라미터를 찾아낼수 있음을 보이고자 한다.

### 3. 유전알고리즘

유전알고리즘은 자연계의 적자생존과 유전학에 근거를 둔 탐색알고리즘으로, 수학적으로 볼 때 병렬, 전역탐색방법이다. 즉 매개변수 공간상에서 동시에 여러점들을 평가하기 때문에 전역해(global solution)에 수렴할 가능성이 크다.<sup>12</sup> 그리고 탐색 공간이 미분가능하거나 연속이라는 가정이 필요 없으며 한 자료에 대해 여러번 반복 수행될 수 있다. 이러한 유전알고리즘을 이용하여 제어 파라미터를 최적화하는 과정이 아래의 Fig. 4에 나타나 있다.

유전알고리즘의 탐색성능을 좋게 하기 위해서는 다음과 같은 유전알고리즘의 파라미터를 적절하게 선택해야 한다.

#### 3.1 Population Size and String Length

유전알고리즘의 탐색성능과 탐색효율에 영향을 미치는 인자들이다. 확률적으로 30이상의 population size를 사용하는것이 일반적이지만 탐색 대상이 제어계인일 경우에는 이 값이 실험 회수와 관계가 있기 때문에 되도록 작은 값을 선택해야 한다. 그러나 너무 작은 값을 취하게 되면 충분치 못한 탐색으로 탐색성능이 매우 나빠진다. 따라서 실험회수와 탐색성능 두 조건을 모두 적절히 만족

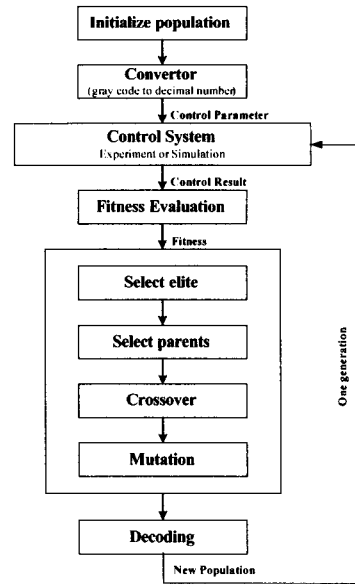


Fig. 4 Procedure of optimizing control parameters by GA

시킬 수 있는 값을 취해야 한다.

본 논문에서는 유전 알고리즘의 파라미터인 population size와 최대 string length 수는 실험시 작동유의 온도상승 및 실험시간을 고려하여 최대 세대수는 30회, 최대 string 수는 24 비트로 설정하였다.

#### 3.2 Crossover Rate

이 값은 클수록 탐색속도를 크게 하지만 너무 큰값의 경우에는 좋은 성능을 낼 수 있는 구조의 개체가 다른 개체들을 발전시키기 이전에 사라질 수도 있다. 일반적으로 0.7 - 0.9의 값을 사용하며 이 논문에서는 0.7을 선택하였다.

#### 3.3 Mutation Rate

이 값은 population의 다양성을 높여 주는 제2의 탐색연산자이다. 그러나 너무 큰값의 경우에는 방향성 없는 무작위탐색이 된다. 일반적으로 안정성을 확보하기 위하여 최대 개체수의 역수보다 작은수를 취하는 방법을 사용해서 0.02로 설정하였다.<sup>13</sup>

#### 3.4 생존적합성(Fitness)

유전알고리즘을 제어파라미터의 최적화에

사용하는 경우에 있어서는, 각 세대에서 개체에 해당하는 제어파라미터 조합들의 다음세대에 살아남을 생존적합성을 평가하기 위한 기준이 필요하다. 본 논문에서는 다음과 같은 적합성 함수를 이용하였다.

$$\text{Fitness Function} = 1/\text{ITAE} = \frac{1}{\int_0^{\infty} t|e(t)|dt}$$

여기서,  $e(t)$ 는 압력 목표치와 펌프 토출압력과의 차를 나타낸다.

#### 4. 실험 결과

##### 4.1 유전알고리즘에 의한 제어파라미터 최적화

상기 설명한 유전알고리즘을 이용하여 이중루프 구조의 압력제어기의 제어파라미터를 최적화하는 과정을 Fig. 5에 나타내고 있다.

여기서 generation best는 각 세대에서 가장 높은 적합성을 가진 개체의 ITAE값이며 generation average는 각 세대에서 모든 개체의 평균 ITAE 값을 나타낸다. 그림으로부터 약 6세대가 지나기 전에 이미 최적에 근접한 값으로 수렴함을 알 수가 있다. 이는 한 세대에서 대부분의 개체가 최적영역 근처에 있음을 의미하고 이에 따라 탐색속도가 정체됨을 알 수가 있다. Table. 1은 이중 루프제어기에 있어서 탐색영역과 탐색된 최적제어 계인을 나타낸다.

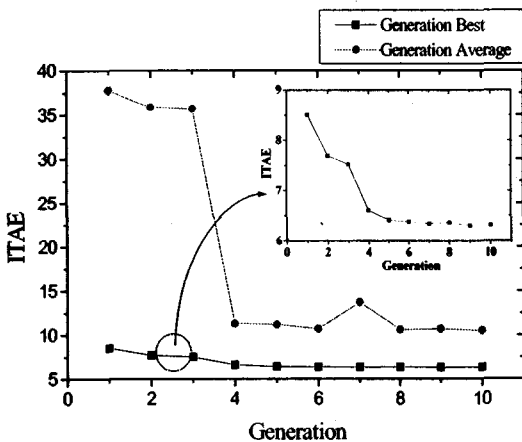


Fig.5 Procedure of optimizing control parameters by GA

Table 1 The initial and final search ranges for feedback gains, number of bits, and optimized values of double loop controller

Gain	Range	Number of bits	Optimized value
$K_{pp}$	0.0 - 1.0	7	0.325
$K_{ip}$	0.0 - 0.01	5	0.00625
$K_{pw}$	0.0 - 5.0	7	2.825
$K_{dw}$	0.0 - 0.1	5	0.06875

##### 4.2 탐색공간의 특성

지금까지 유전알고리즘에 의해 탐색된 제어계인 이 최적값임을 수학적으로 증명하는 일은 매우 어렵다. 따라서 여기서는 설정된 탐색공간에서 개체의 성능지수가 어떤 형태로 분포하는가를 조사하였다. Fig. 6, Fig. 7 및 Fig. 8은 이중루프 제어기에 대해서 주요 제어계인 조합에 따른 성능지수의 분포를 나타낸다.

Fig. 6은 내부루프와 외부루프의 비례계인들의 조합에 따른 성능지수의 분포를 나타낸다.

그림에서 내부루프 비례계인 및 외부루프 비례계인의 몇몇 조합에서 최적의 영역이 나타났으며 큰 내부루프 비례계인의 경우 큰 외부루프 비례계인에서 최적의 영역이 발견되었다. Fig. 7과 Fig. 8은 외부루프 제어기와 내부루프 제어기의 계인들의 조합에 따른 성능지수의 분포를 나타낸 것이다. 역시 탐색된 제어계인이 최적의 영역에 있음을 확인할 수 있다.

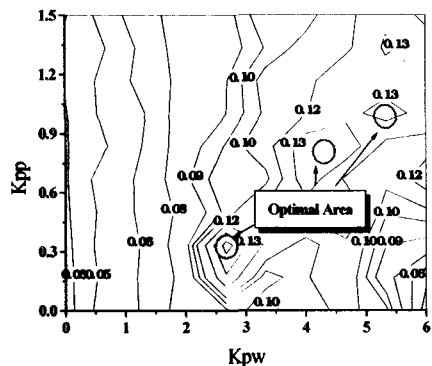


Fig. 6 Fitness distribution in  $K_{pp}$  and  $K_{pw}$  space

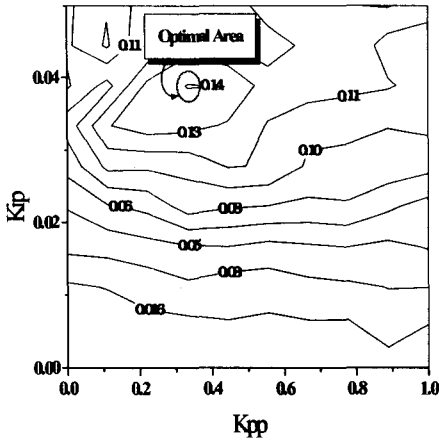


Fig. 7 Fitness distribution in  $K_{pp}$  and  $K_{ip}$  space

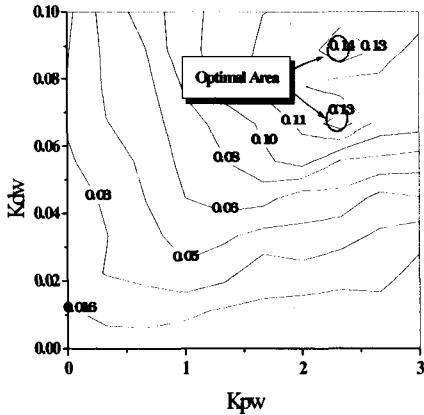


Fig. 8 Fitness distribution in  $K_{pw}$  and  $K_{dw}$  space

### 4.3 압력제어실험

Fig. 9는 펌프도출압을 제한하여 비례게인만을 이용하여 압력을 제어한 결과를 나타내고 있다. 응답속도로부터 제어게인이 충분히 크지 못함에도 불구하고, 큰 오버슈트가 발생하고 있다. 따라서 만족할 만한 제어성능을 얻기 위해서는 제어 시스템의 감쇠를 향상시킬 수 있도록 제어 시스템을 재구성할 필요가 있다. Fig. 10은 PD제어기와 이중루프제어기를 이용한 압력제어의 계단응답을 나타낸다. 두 경우 모두 0.1초 이내에 정상상태에 도달하고 있음을 알 수 있다.

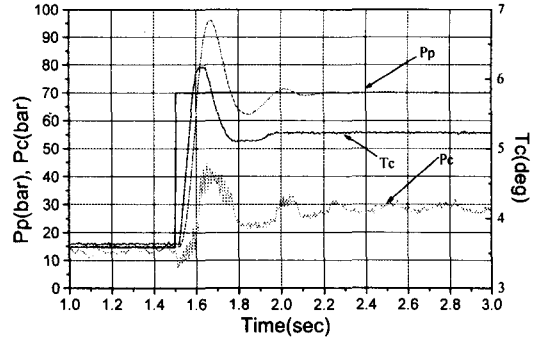


Fig.9 Experimental results of proportional controller

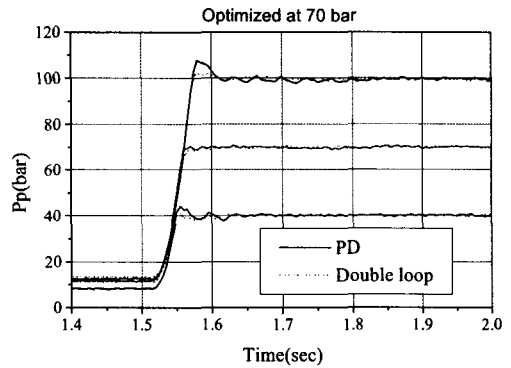


Fig.10 Experimental results when PD and double loop controller are applied

Fig. 11은 부하외란에 대한 압력제어 실험 결과이다. 실험은 2.5초에서 또 하나의 부하 오리피스 밸브를 열어 부하오리피스의 열림량을 갑자기 증가시켰다가 3.5초에서 다시 밸브를 닫아서 부하오리피스의 열림량을 급격히 감소시키는 경우이다. 본 실험결과에서도 알 수 있듯이 제안한 유전알고리즘에 의해 도출된 이중루프제어기의 경우, 부하 외란에 대해서도 원하는 제어성능을 유지함을 알 수 있다.

## 후 기

이 논문은 한국과학재단의 지역대학우수과학자 지원연구(과제번호: R05-2003-000-10592-0)의 지원을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. Dreytmuller, J., "Pilot Operated and Directly Actuated Pressure Control with Variable Delivery Axial Piston Pumps," Proc. of the 4th Fluid Power symposium, 1975.
2. Kim, S. D., Cho, H. S. and Lee, C. O., "A Parameter Sensitivity Analysis for the Dynamic Model of a Variable Displacement Axial Piston Pump," Proc. Institution of Mechanical engineers, Vol. 201, No. C3, 1987.
3. Kim, S. D., "Dynamic Analysis and Suboptimal Control of a Load-sensing Hydraulic Servo System," KAIST, Ph.D. thesis, 1987.
4. Tsai, S. T., Ackers, A. and Lin, S. J., "Use of Flapper-Nozzle Valve for Axial Piston Pump Control," SAE Paper No. 911817.
5. Ackers, A. and Lin, S. J., "Use of Two-Stage Electrohydraulic Controller with an Axial Piston Pump," SAE Paper No. 891860.
6. Backe, W., "Electro Hydraulic Pump Control," JHPS International Symposium on Fluid Power, Tokyo, March, pp. 67-74, 1989.
7. Wright, J., Burton, R. T. and Schoenau, G., "Design of Microcomputer Control System for a Variable Displacement Hydraulic Pump," The Journal of Fluid Control, Vol. 21, pp. 116-140, 1988.
8. You, Z., Burton, R. T. and Ukrainetz, P. R., "Feasibility Study of Sliding Mode Control in the Operation of a Variable Displacement Axial Piston Pump," JHPS International Symposium on Fluid Power, Tokyo, March, pp. 265-272, 1993.
9. You, Z., Burton, R. T. and Ukrainetz, P. R., "Sliding Mode Control of a Variable Displacement Axial Piston Pump Using Brushless DC Motor as a Actuator," ICFP, pp. 290-296, 1993.
10. Zeiger, G. and Akers, A., "The Application of Linear

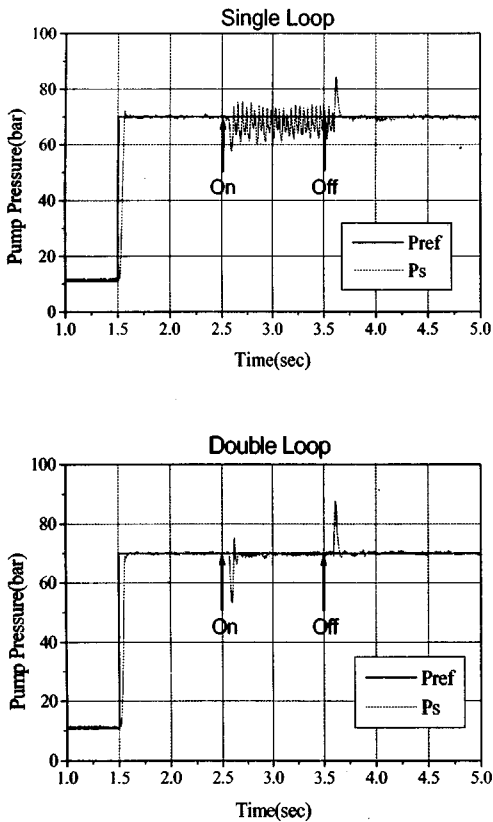


Fig.11 Experimental results of pressure control when load flow is applied

## 5. 결론

본 연구에서는 수동적으로 제어파라미터를 최적화시키기 어려운 내부와 외부의 이중제어 루프의 4개의 제어게인을 가지는 가변유압펌프 시스템에 대하여 유전알고리즘을 적용하여 제어파라미터의 최적화를 시도하였다. 유전알고리즘을 적용한 실제 실험결과로부터 적절한 실험회수 이내에 만족할 만한 제어성능을 얻을수 있었고, 또한 제어파라미터를 최적화시킬 수 있음을 보였다. 그리고 설정된 탐색공간 전역에 대한 성능지수의 형태를 조사함으로써 이 시스템에서 개별적인 제어파라미터를 수동적으로 최적화시키는 것이 매우 어렵고 유전알고리즘을 통해 탐색된 제어파라미터의 값이 최적임을 보였다.

Optimal Control Technique to Axial Piston Pump Controller Design," SAE Paper No. 890953.

11. Lee, Y. J., Lee, S. H. and Song, C. S., "A Study on the characteristic Analysis of the Load-sensitive Hydraulic Pump Control System," J. of the KSPE, Vol. 17, No. 4, pp.148-154, 2000.
12. Sutton, P. and Boyden, S., "Genetic Algorithms : A General Search Procedure," American J. of Physics, Vol. 62, No. 6, pp. 549-552, 1994.
13. Goldberg, David E., "Genetic algorithms in search, optimization & machine learning," Addison-Welsey Publishing Company, 1989.