

# 차량능동현가 시스템의 압력제어밸브 최적화에 관한 연구

○ 운영환, 안수경, 이종욱, 김지연  
만도기계중앙연구소 유공압연구실

## A Study on the Optimization of Pressure Control Valve for Vehicle Active Suspension System

○ Y.W. Yoon, S.K. Ahn, J.W. Lee, J.E. Kim  
Hydraulic & Pneumatic Research Department  
R&D Center, Mando Machinery Corporation

### ABSTRACT

The control-ability of vehicle active suspension is strongly affected by the performance of pressure control valve especially in the view of dynamic response and energy consumption.

Important design parameters in the valve are selected and the effect of variation of those is analyzed experimentally to enhance the performance of pressure control valve used in Active Suspension.

### 1. 서론

최근, 차량성능의 고도화를 목적으로한, 각종 전자제어 시스템이 실용화되고 있다. 그중에서 사시성능의 비약적인 향상을 실현하는 시스템에서는 유압 본래의 특징인 고응답, 고밀도Power를 이용한 전자유압제어시스템을 채용하고 있는 경우가 많다. 특히, 유압식능동현가시스템은 종전의 수동식현가시스템의 한계를 극복하고, 조종안정성(운전의 용이성) 및 승차감(쾌적성)을 고차원에서 양립시킬수 있는 현가장치이다. 1980년 이후 능동현가시스템에 대한 본격적인 연구가 시작되었으나, 이론적인 해석이 주로 이루어져 왔다. [1-2] 실차에 적용한 경우에는 1980년대에 Lotus사가 경주용차에 서어보밸브를 사용한 실험용능동현가시스템의 예가 있다. [3-4]

서어보밸브는 동특성이 우수한 반면, 오염에 취약하고 고가인 단점이 있어, 상품화에는 성공하지 못했다. 따라서 능동현가시스템의 실용화를 위해서는 경제적이며, 고정도, 고응답의 제어밸브의 개발이 큰과제의 하나이며, 이를 위해서 소비유량이 작고, 고응답이 가능하며, 신뢰성이 높은 비례압력제어밸브의 개발이 필요하다. [5-7]

본 논문에서는 유압식능동현가시스템의 성능을 좌우하며, 유압시스템의 가장중요한 부품이며 시스템의 최적화에 있어서 핵심 부품인 비례압력제어밸브를 개발하기 위해, 스플 오버랩, 포맷 각도 등, 각 설계변수에 대해 실험을 통해 해석하여 소비유량이 작고, 개도절환 및 역추에이터압 배출 시 스플진동에 의한 이상음발생등, 고응답에 따른 불안정을 개선시키는 비례압력제어밸브의 최적화에 관한 것이다.

### 2. PCV용 비례솔레노이드 특성

능동현가시스템용 압력제어밸브는 누설이작고, 고응답이 가능한 파일럿타입으로 고응답에 따른 불안정성은, 밸브형상과 각종 감쇠오리피스등에 의해 개선시킴으로서, 제어밸브의 개발이 가능하다. [8] 본연구에서 개발한 비례압력제어밸브는, 비례솔레노이드를 사용하여 경제적이고, 고정도, 고응답의 제어밸브이다. 시뮬레이션을 통해 설계변수값을 선정하기 위해, 제어밸브의 설계에 사용한 솔레노이드의 특성을 파악하여야 한다.

그림1은 솔레노이드의 전자기력을 측정하기 위한 실험장치 구성도이다.

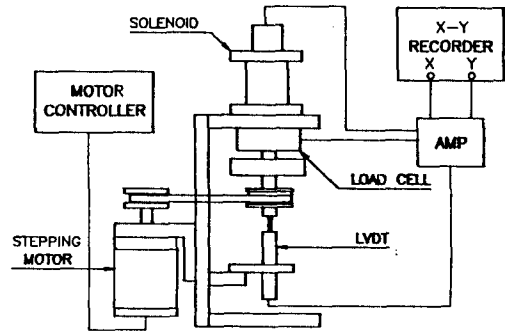


그림.1 실험장치구성도

Fig.1 Schematic configuration of experiment

그림2은 개발에 적용된 솔레노이드에 대하여 플런저변위를 일정하게 유지하고, 전류를 변화시키면서 전류에 따른 전자기력의 변화를 측정한 결과이다. 전류 0.01[A], 100Hz의 디더신호(Dither signal)에 대한 실험결과, 비례구간은 0.05~0.85[A]이며, 히스테리시스(Hysteresis)는 2.3%이고, 구동전류 0.85[A]일때 전자기력은 74[N]이다.

그림3은 전류를 일정하게 유지한 상태에서 스펀핑 모터로 솔레노이드 플런저변위를 변화시켜올때, 솔레노이드플런저변위에 따른 전자기력의 변화를 측정한 결과이다. 0.68[A]까지 일정전류에 대하여 솔레노이드플런저변위는 0~1.8mm구간에서 변위변화에 관계없이 일정한 전자기력을 발생함을 알 수 있고, 0.85[A]의 일정전류에 대해서는, 비

래구간인 0~1.8mm에서 변위변화에 대해 전자기력의 비례성이 상실함을 알 수 있다.

따라서 개발에 사용된 비례솔레노이드는, 비례구간이 0~1.8mm이며, 정격전류는 0.68[A]이고, 정격전자기력은 60[N]인 것을 알 수 있다.

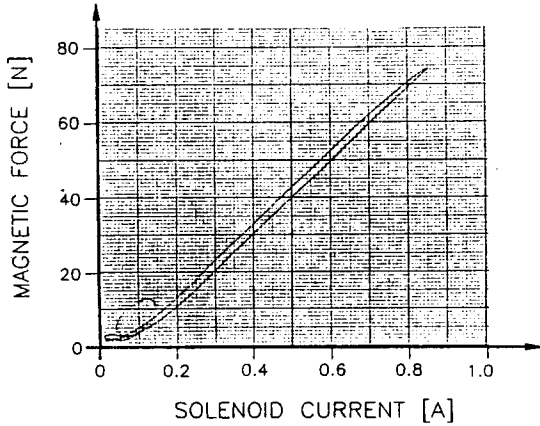


그림.2 자력 대 전류 선도

Fig.2 Magnetic force-current diagram

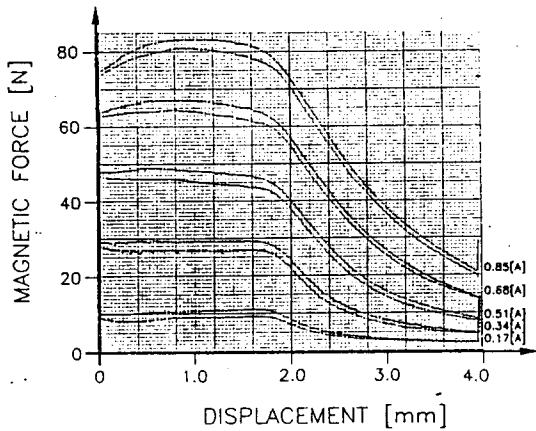


그림.3 자력 대 변위 선도

Fig.3 Magnetic force-displacement diagram

### 3. 비례압력제어밸브의 설계

비례압력제어밸브의 개발에 있어서, 기본적인 요구조건은, 각륜의 현가용 유압액추에이터의 내압을 선형적으로 제어 가능하고, 귀환 오리피스에 의한 기계적인 피이드백에 의한 응답성이 좋아야한다. 또한 개도절환 및 액추에이터압 배출시의 스폴진동에 의한 이상음발생을 적게해야 한다. 앞에서 분석한 비례솔레노이드를 이용하여 개발한, 파이럿 타입 비례압력제어밸브의 개략적인 단면도는 그림4와 같다.

비례압력제어밸브의 각 오리피스, 스폴직경, 및 포켓 개도크기 등, 기본적인 설계변수는 특성시뮬레이션을 통해 구하였으며, 이때 비례압력제어밸브의 스폴 및 포켓의 운동방정식, 유압압축성을 고려한 연속방정식 및 개도변화에 대한 유동력을 고려하여 실시하였다.

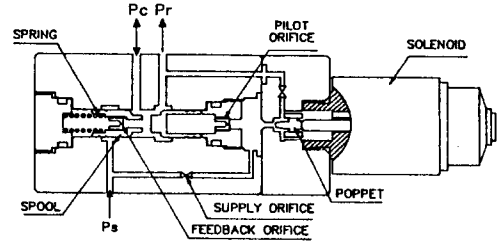


그림4 비례압력제어밸브의 개략단면도

Fig.4 Cross section of linear pressure control valve

### 4. 능동현가시스템용 시뮬레이터의 구성

개발된 비례압력제어밸브의 기본적인 성능평가는, 일반적인 시험장치에 의해 가능하나, 제어밸브의 최적화를 위한 설계변수변화시험과 유압액추에이터와 노면입력에 대한 성능평가를 위해, 능동현가시스템용 시뮬레이터를 구성하였다.

그림5는 차량의 능동현가시스템용 비례압력제어밸브의 성능을 평가하기 위해 2-DOF를 갖는 1/4차량 시뮬레이터를 설계제작하였다.

가진입력을 구현하기 위한 서보액추에이터는, 실린더내경이 50mm, 실린더 로드경이 28mm이며, 일반적인 수동형소바의 최대가진성능시험사양에 맞추어 최대가진속도를 1.0m/s 이상이며, 정하중을 보상하기 위해 보상침버를 실린더 하단에 설치하였다.

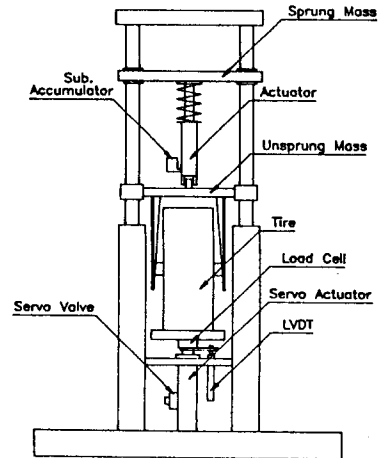


그림5 1/4차량 시뮬레이터 구성도

Fig.5 Schematic configuration of 1/4 Car simulator

설계제작된 시뮬레이터가 가진특성 등, 본 연구목적에 맞는지를 평가하기 위해, 시험기성능시험을 수행하였다. 일반적인 수동형소바의 가진성능시험사양에 맞추어 가진속도일정에 대한 성능시험결과는, 그림6과 같다. 가진속도일정에 대한 시험결과, 10Hz까지는 진폭비가 1에 가깝고, 위상지연은 -45도이하이고, 시스템 응답속도와 밀접한 관계를 갖고 있는 대역폭은, 30Hz이상으로 본 연구에서 요구되는 반응성을 충분히 만족시킨다.

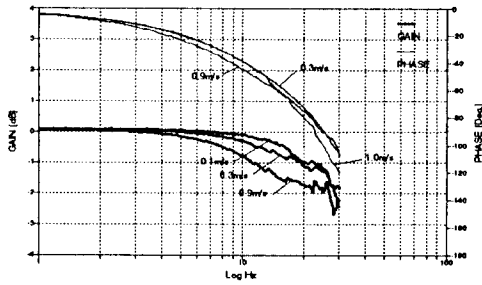
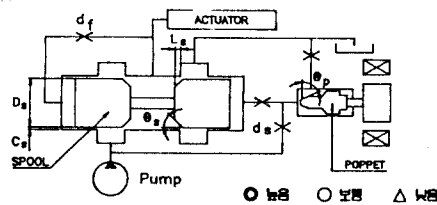


그림6 기준입력에 대한 액추에이터 변위의 주파수 응답  
Fig.6 Frequency response of actuator displacement with referense input

## 5. 비례압력제어밸브의 최적화

### 5.1 최적화 파라메타 도출

제어밸브의 대표적인 설계변수는 그림7과 같다. 특성 시뮬레이션에 의해 설계된, 제어밸브를 이용해 기본적인 성능평가를 한 결과, 그림7에서와 같이 최적화설계에 중요한 설계변수를 도출하였으며, 제어밸브만의 시뮬레이션 모델을 구성하여 시뮬레이션을 하여, 각 설계변수에 대해 타당한 범위를 선정하고, 각 설계변수별로 견품을 가공하였다.



Parameters	Symbol	Range	중요도
Diameter of Spool	$D_s$	8 ~ 12mm	△
Clearance of Spool	$C_s$	-0.03mm ~ 0. mm	△
Overlap of Spool	$L_s$	0.2 ~ 0.6mm	◎
Diameter of Supply Orifice	$d_s$	0.2 ~ 0.5mm	◎
Diameter of Feedback Orifice	$d_f$	0.2 ~ 0.5mm	◎
Chamfer of Spool	$\theta_s$	40 ~ 90deg	◎
Feedback Spring	$f_{sp}$		△
Chamfer of Poppet	$\theta_p$	10 ~ 30deg	◎

그림7 비례압력제어밸브의 설계변수  
Fig.7 The design parameters of pressure control valve

### 5.2 설계변수 변화에 대한 성능시험

차량 능동현가시스템용 비례압력제어밸브의 평가는, 시스템 주파수 응답특성과 액추에이터 가진특성으로 크게 구분 할수 있다. 시스템 주파수응답특성은, 비례솔레노이드에 주어진 지령값에 대한 제어압력의 시스템주파수 특성으로 Roll 제어, Pitch 제어, Bounce제어에 대한 응답성을 확보해야 하고, 액추에이터를 일정속도로 가진한 경우의 액추에이터 가진특성은, 차량요구특성에 따라 제어밸브내의 각종설계변수인 오리피스크기, 스펴 및 포뎛제원값, 귀환스프

링등의 튜닝에 의해 최적화가 가능하다. 따라서 본 연구에서는, 예비실험을 통해 도출한 최적화 설계변수에 대해 시스템 주파수 응답특성과 액추에이터 가진특성시험을 통해, 충분한 응답성을 확보하고, 소비유량이 적은, 최적의 제어밸브를 개발하고자한다.

설계변수 변화에 대한 제어밸브의 성능시험을 위한 유압회로도에는 그림8과 같다.

실험장치는, 크게 1/4차량 시뮬레이터와 제어밸브시험용 유압회로로 구성되어 있다. 제어밸브시험용 유압회로는, 사판식 가변펌프, 시스템압력을 조절하기 위한 릴리프 밸브(Relief valve), 유량을 측정하기 위한 유량계(Flow meter), 공급압력 및 제어압력을 측정하기 위한 압력계(Pressure transducer), 시험밸브와 정특성 시험 및 수동형 시스템을 시험하기 위한 가변스로틀밸브로 구성되어 있다. 실험조건은, 공급유량 12l/min, 시스템압력 105[Bar], 유온은 45~55°C이다.

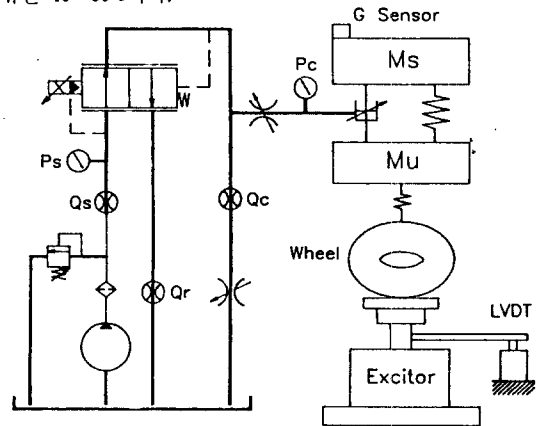


그림.8 유압회로도  
Fig.8 Hydraulic circuit for experiment

### 5.2.1 시스템 주파수응답특성 시험

시뮬레이션 및 예비실험을 통해 도출한 최적화 설계변수에 대해, 시스템 주파수 응답특성과 액추에이터 가진특성시험을 통해, 충분한 응답성 확보와 과도절환 및 액추에이터 압 배출시의 스펴진동에 의한 불안정을 해소하기 위해, 스펴형상3종과 Lap량을 변화시킨 3종 및 포뎛각변화에 대해 2종을 가공하여 주파수 응답시험을 하였다.

여러가지 주파수의 정현파 입력(Sinusoidal Input)을 0.2~50Hz범위에 Sweep신호에 대한 시스템의 정상상태 응답으로부터, 각 설계변수를 변화시켜 주파수에 따른 비례압력 제어밸브의 성능을 파악하였고, 주파수 전달함수의 크기 및 위상의 주파수값에 따른 특성을 파악하였다. 이때 시험입력신호의 크기는, 최대제어압력의 50%을 기준으로  $\pm 25\%$ 이다.

스플형상과 Lap량변화에 대한 5종의 시험결과는 그림9와 같다. Lap량이 증가할수록 응답성이 감소하고, 스펴형상이 Sharp edge형인, SP-A, SP-B는 특정주파수에서 공진이 발생하며, Chamfer형인 SP-D가 가장좋은 응답성을 보이나, 능동현가시스템의 제어영역을 고려할 때, 과도한 설계(Over design)인 것을 알 수 있으며, SP-E가 가장 적합한 것으로 판단된다.

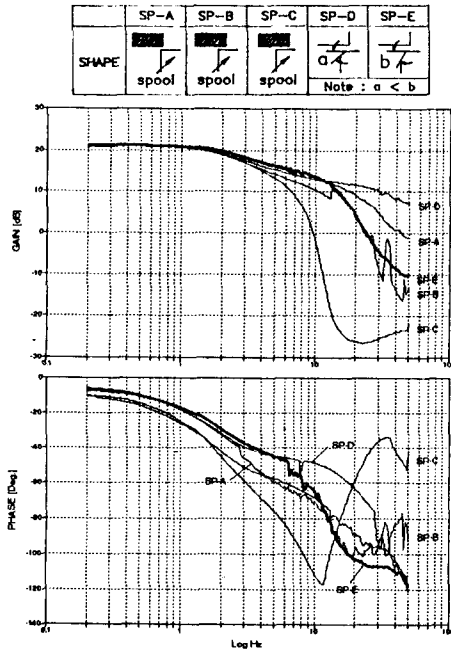


그림.9 스펴형상과 Lap량변화에 대한 주파수 응답  
Fig.9 Effect of spool shape and overlap on the frequency responses

포뎬각도변화에 대한 시험결과는 그림10과 같다.

각도를 크게하면 자려진동을 일으킴이 작아지고, 작게하면 필요한 개구면이 확보가능하지만, 최저제어압력이 높게되는 문제가 발생한다. 정특성이 양호하며 목표한 응답성을 유지하고, 소비유량이 적은 포뎬각을 결정하는 것이 최적화에 중요한 요소가 된다. 따라서 포뎬각도와 포뎬각도의 선정은 솔레노이드 특성을 고려한 결정이 필요하고, 실험적으로 타당성을 검토해야 한다.

실험결과, 포뎬각이 큰경우가 응답성은 좋지만, 7 Hz 이상에서 약간의 불안정한 주파수영역이 존재하며, 정특성과 소비유량을 고려할 때, POP A가 좋은 것으로 판단된다.

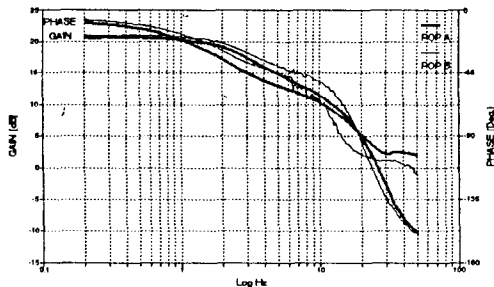


그림.10 포뎬각도변화에 대한 시스템 주파수 응답  
Fig.10 Effect of poppet angle on the frequency responses

공급오리피스는 시스템 주파수응답성과 소비유량에 큰 영향을 미치는 요소이다. 그림11은 공급오리피스가 가장 작

은 0-A부터 0-D까지 4종류에 대한 복귀유량의 정특성 선도이며, 그림12는 공급오리피스변화에 대한 시스템 주파수 응답 시험결과이다. 오리피스의 직경이 증가할 수록 복귀유량은 증가하고, 응답성은 향상되지만 1Hz이상에서 공진현상이 발생하여 불안정한 성능을 보인다. 따라서 충분한 응답성을 확보하고, 솔레노이드지령신호에 대해 안정한 성능을 보이는 0-B가 가장 타당한 것으로 판단된다.

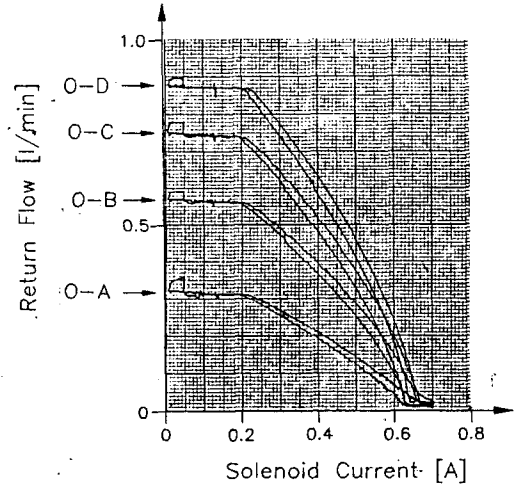


그림11 공급오리피스변화에 대한 복귀유량변화 선도  
Fig.11 Supply orifice diameter-returnflow rate diagram

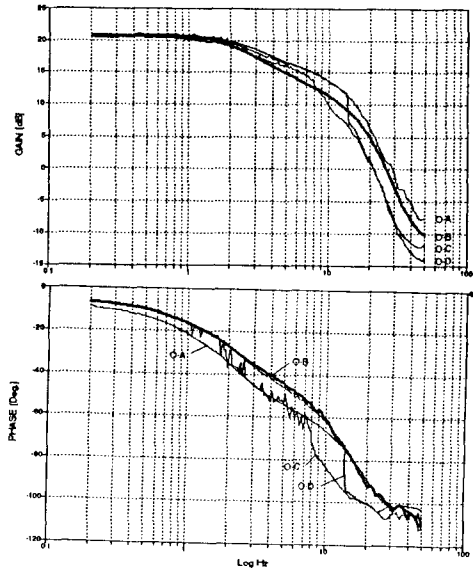


그림.12 공급오리피스변화에 대한 주파수 응답  
Fig.12 Effect of supply orifice diameter on the frequency responses

### 5.2.2 액츄에이터 가진특성시험

제어밸브를 액츄에이터와 조합에 의한 시스템 주파수 응답특성은, 차량의 승차감과 조종성을 향상시키기 위해 능동적으로 제어가 가능한, 충분한 응답성을 확보하면 된다. 이

시스템주파수응답특성, 즉 제어전류에 대한 실린더발생력(제어력)의 응답특성 보다 노면입력에 상당하는 실린더발생력의 특성인, 액추에이터 가진특성이 시스템 최적화면에서는 더 중요하며, 이상의 두 특성의 조합에 의해 차량의 승차감과 조종성을 동시에 향상시킬수 있다. 따라서 액추에이터 가진특성시험을 통해, 차량요구특성에 따라 제어밸브내의 각종설계변수의 튜닝에 의해 최적화가 가능하고, 성능에 영향을 주지않는 범위내에서 소비유량이 적은 제어밸브를 개발해야 한다.

그림13은 0.5~25Hz로 일정변위 ±10mm의 Sine sweep 입력에 대한 액추에이터 가진특성 시험결과이다. 시험결과에서와 같이 수동형시스템은, 두개의 공진영역이 나타나고, 솔레노이드에 일정전류를 가한 능동형시스템에서는, Sprung mass의 공진이 없고, 수동형보다 능동형이 가속도값 및 제어압력변화가 작은것을 알 수 있다. 일반적으로 차량의 승차감은 Sprung mass의 가속도 값으로 평가하므로, 승차감면에서 능동형보다 수동형이 우수함을 알 수 있다. 또한 가속도와 제어압력의 주파수 변화에 대한 이득변화가 거의 일치하므로, 제어압력의 이득이 작으면 승차감 면에서 좋으므로, 제어밸브의 성능이 능동형가시시스템의 성능을 결정함을 알 수 있다.

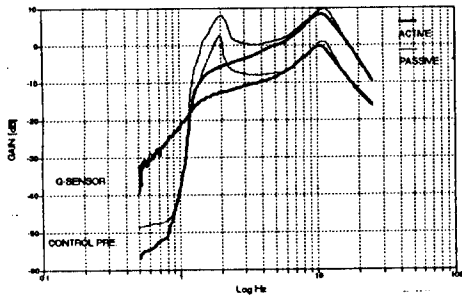


그림13 일정변위 입력에 대한 액추에이터 가진특성  
Fig.13 Characteristics of excitor on the constant displacement sweep

그림14는 스플형상과 Lap량변화에 대한 액추에이터 가진 시험결과이다. 솔레노이드 전류를 일정하게 유지한 상태에서 액추에이터 가진속도가 0.3m/s일 때, 5종에 대한 제어압력의 이득을 측정하였다. Lap량이 증가할 수록 가진 입력에 대한 스플의 추종성이 나빠지므로 Lap량이 가장 큰 SP-C의 성능이 가장 떨어지고, SP-D가 가장 추종성이 좋은 것을 알 수 있다. 시스템 주파수응답특성시험결과와 소비유량 및 가공성을 고려할 때 SP-E가 가장 적합한 것으로 판단된다.

그림15는 스플형상과 Lap량변화에 대해, 액추에이터 가진에 의한 소비유량 시험결과이다. 솔레노이드 전류를 일정하게 유지한 상태에서 액추에이터 가진속도가 0.3m/s일 때 5종에 대한 평균소비유량을 측정하였다. Lap량이 증가할 수록 평균소비유량은 증가하며, Lap량이 가장 큰 SP-C의 경우 5Hz 정도의 추종성을 가지며, SP-D의 경우 평균소비유량이 가장 크며, 시스템주파수응답특성과 개발 시스템의 최대 평균소비유량범위를 고려할 때, SP-E가 가장 적합한 것으로 판단된다.

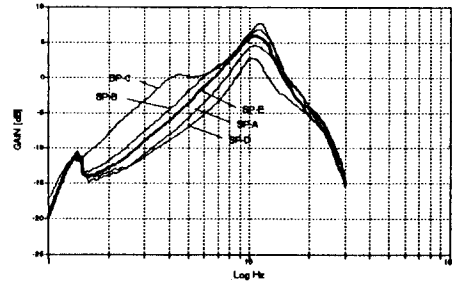


그림14 속도일정 입력에 대한 액추에이터 가진특성  
Fig.14 Characteristics of excitor with constant velocity sweep

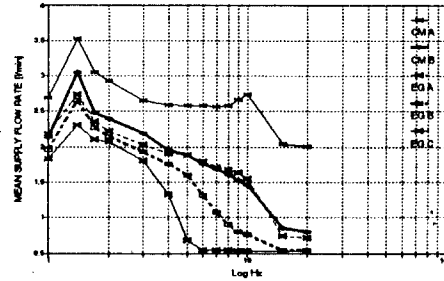


그림15 평균소비유량 시험결과  
Fig.15 Experimental results of mean supply flow rate

### 5.3 최적 제어밸브의 성능시험

제어밸브의 최적화를 위해 설계변수를 변화시켜가며, 시스템주파수 응답시험과 액추에이터 가진특성시험을 통해, 과도절환 및 액추에이터압 배출시의 스플진동에 의한 이상 음발생을 적고, 충분한 응답성이 확보가능하고, 소비유량이 적은 제어밸브를 개발하였다.

개발한 제어밸브의 정특성 시험결과는 그림16과 같으며 실험조건은 JIS규격에 준하였다.[9] 정특성 실험결과, 불감대는 0.05[A]이며, 입력 제어범위는 0~100[Bar], Hysteresis는 4.5[%]로 우수한 성능을 얻었다.

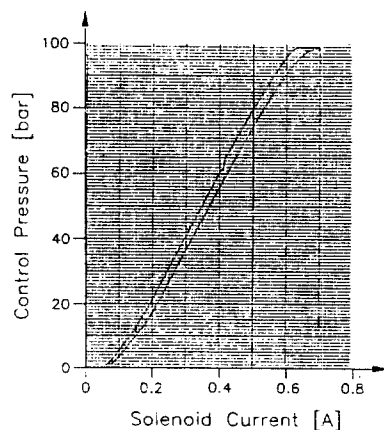


그림16 제어압력 대 전류 선도  
Fig.16 Control pressure-current diagram

그림17은 제어유량변화에 따른 제어압력변화를 보이는 것으로서, 제어압력을 100%, 50% 로 각각 설정한 상태에서, 제어유량을 변화 시킬때, 제어압력변화를 측정하였다. 실험결과로부터 귀환스프링과 귀환오리피스에 의한 스펙트럼보상의 정도를 알 수 있으며, 유량 10[l/min]에서 압력강하는 15[Bar]이하로 우수한 성능을 얻었다.

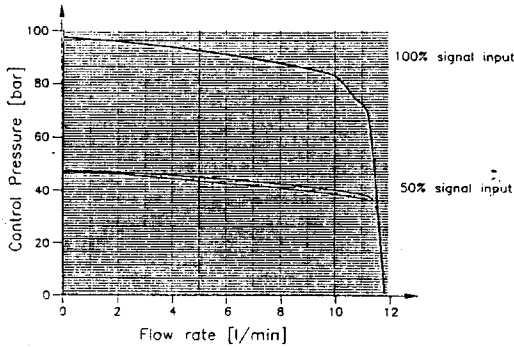


그림.17 제어압력 대 유량 선도  
Fig.17 Control pressure-flow rate diagram

그림18은 최적화된제어밸브의 액추에이터 가진 시험결과이다. 솔레노이드 전류를 일정하게 유지한 상태에서, 액추에이터 가진속도가 0.3m/s일 때 제어압력의 이득을 측정하였다. 시험결과에서와 같이 수동형시스템은 2.1Hz와 12Hz에서 공진이 나타나고, 솔레노이드에 일정전류를 가진 능동형시스템에서는, Sprung mass의 공진영역에서 이득이 작고, 제어영역인 7Hz미만에서 수동형보다 능동형이 제어압력변화가 작아, 승차감을 향상시킬 수 있다.

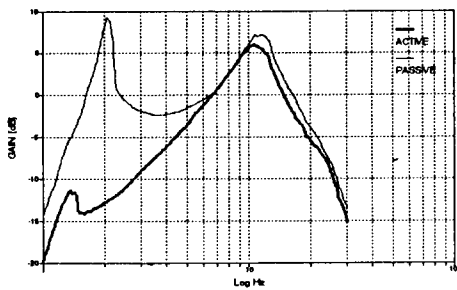


그림18 제어밸브의 액추에이터 가진특성  
Fig.18 Characteristics of excitation of the control valve

## 6. 결론

유압식능동현가시스템의 성능을 좌우하며, 유압시스템의 가장중요한 부품이며, 시스템의 최적화에 핵심부품인 비례압력제어밸브를 최적화 하기위해, 각 설계변수에 대해 실험적으로 해석하여 소비유량이 작고, 개도절환 및 액추에이터입 배출시 스펙트럼진동에 의한 이상을발생등, 고응답에 따른 불안정을 개선시키는 비례압력제어밸브를 개발하였다.

각 설계변수에 대해 시험한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 특성시뮬레이션과 예비실험을 통해, 각 설계변수에 대해 타당한 범위선정과, 최적화 설계에 중요한 설계변수를 제시하였다.

2) 스펙트럼상과 스펙트럼상 및 Lap랑 변화에 대한 5종의 주파수응답시험 결과, Overlap이고 Champer형상이 가장 타당하였으며, 포맷각도변화에 대한 2종의 실험결과는 각도가 작은것이 유효하다.

3) 시스템의 주파수 응답특성과 소비유량에 큰영향을 미치는 설계변수인, 공급오리피스에 대해 주파수응답시험을 한결과, 충분한 응답성을 확보하고, 솔레노이드지령신호에 대해 안정한 성능을 보이는 최적값을 제시하였다.

4) 1/4차량 시뮬레이터를 설계제작하여, 스펙트럼상과 Lap랑변화에 대한 액추에이터 가진시험과 평균소비유량시험을 실시하여, 승차감을 향상시키고, 소비유량이 적으며, 정특성 및 액추에이터 가진특성이 우수한 비례압력제어밸브를 개발하였다.

5) 향후 능동현가시스템의 유압회로와 연계한 전체 시스템에서, 비례압력제어밸브의 성능검증 확인이 필요하며, 적용차량의 실차시험에 의한, 각 설계변수의 튜닝으로 비례압력제어밸브의 최적화가 이루어져야 한다.

## 참고문헌

- [1] Karnopp D., Margolis D., "Adaptive suspension concepts for road vehicles", Vehicle System Dynamics, 1984, pp.145-160
- [2] H. Matsushita, T. Noritsugu, T. Wada, "Optimal Control of Active Air Suspension", 일본기계학회논문집 제56권 526호, June,1990.
- [3] Wright G.P., Williams A.D., "The Application of Active Suspension to High Performance Road Vehicles", IMechE, 1990, pp. 23-28
- [4] Dominy J., Bulman N.D., "An Active Suspension for a Formula One Grand Prix Racing Car", Journal of Dynamic System, Measurement and Control, Vol.107, pp. 73-78, March, 1985.
- [5] T. Furukwa, et al., "アクティブサスペンション制御ハルフの開発", 일본기계학회 진동과 운동의 제어 심포지움 강연회 논문, pp. 186-191,1990,7.9-12.
- [6] M. Sugihara, et al., "アクティブサスペンションの解析と開発", 자동차기술학회學術講演會前刷集 902, pp. 361-364, 1990-10.
- [7] S. Buma, et al., "アクティブコントロールサスペンションの解析と開発", 일본기계학회논문집(C편) 57권 534호, pp. 559-605, 1992-2.
- [8] 田中裕久, "油壓比例制御弁の技術動向", パワテサイ, 第29巻 第11號
- [9] JIS ハソドブック, 油壓, 空氣壓, 일본규격협회, pp. 374-384, 1991.

후기: 이 논문은 상공부에서 시행한 G7 사업과제 : 지능현가시스템 제작기술의 연구결과에 일부입니다.