

자동차 능동 현가장치 유압계 회귀 관로에서의 서지 압력 저감법

Effective Smoothness of Surge Pressure Generated in the Return Line of Active Suspension Hydraulic System for Vehicle

정 용 길*, 이 일 영**, 윤 영 환***
Y. G. Jung, I. Y. Lee, Y. H. Yoon

ABSTRACT

Surge pressure problem at the oil return line of the hydraulic circuit of an active suspension system for passenger cars was investigated by experiments and numerical analyses. In the numerical analyses, the method of characteristics was used for simulating unsteady flow in the hydraulic system and gas discrete model was adopted for estimating gas volume variation in separated liquid column. In the experiment, a piston type accumulator was used for the purpose of smoothing surge pressure. By the experiments and analyses, effects of the physical parameters of the accumulator on smoothing surge pressure was elucidated.

주요기술용어 : Surge Pressure(서지 압력), Active Suspension System(능동 현가장치), Hydraulic Pipeline(유압 관로), Accumulator(어큐레이터), Characteristics Method(특성곡선법)

기 호 설 명

A : 관로 단면적
 a : 관로 내에서의 음속
 A_c : 압력제어밸브의 컨트롤 오리피스 단면적
 A_n : 어큐레이터 접속부 관로의 면적
 A_p : 어큐레이터의 피스톤 면적
 C^+, C^- : 특성곡선

c_c : 압력제어밸브의 컨트롤 오리피스 유량 계수
 c_s : 압력제어밸브의 유량계수
 d_n : 어큐레이터 접속부 관로의 직경
 d_s : 압력제어밸브의 스톱 직경
 f_n : $32\nu \cdot l_n \cdot A_n \cdot \rho / d_n^2$
 f_p : 어큐레이터 내의 피스톤 마찰계수
 f_s : 압력제어밸브의 스톱 마찰계수
 H_A, H_B, H_p : 특성곡선상의 격자점 A, B, P에서의 압력수두
 h_f : 관로 단위 길이당 압력 손실수두
 l_n : 어큐레이터 접속부 관로의 길이

* 정회원, 경상대학교 선박기계공학과, 해양산업연구소

** 정회원, 부경대학교 자동차공학과

*** 정회원, 만도기계중앙연구소

- m_n : $\rho \cdot l_n \cdot A_n$
- m_o : 어큐뮬레이터 내의 유압 작동유 질량
- m_p : 어큐뮬레이터 내의 피스톤 질량
- P : 관로내 임의의 점에서의 압력
- P_c : 액츄에이터 하부 압력실 내의 압력
- P_g : 어큐뮬레이터 내의 가스 압력
- P_f : 피드백 압력
- P_o : 어큐뮬레이터 내의 유압 작동유 압력
- P_b : 솔레노이드의 조작력에 의해 발생하는 파일릿압력
- Q : 유량
- Q_a : 어큐뮬레이터로 유입하는 유량
- V_g : 어큐뮬레이터 내의 가스 체적
- V_o : 어큐뮬레이터 내의 유압 작동유 체적
- x_s : 압력제어밸브의 스톱 변위
- x_0 : 압력제어밸브의 스프링 초기 압축 변위
- β_o : 유압 작동유의 압축율
- ρ : 유압 작동유의 밀도
- ν : 유압 작동유의 동점성계수

참자

A,B,C,P : 격자점

L,R : 격자점의 좌측 및 우측

1. 서론

최근 자동차의 조종 안정성과 승차감 향상을 위하여 유압을 이용한 능동형 현가장치가 사용되고 있다.^{1,2)} 능동 현가장치용 유압시스템은 유압펌프, 압력제어밸브(PCV), 어큐뮬레이터 및 액츄에이터로 구성되어 있으며, 유압펌프로부터 압력유가 PCV로 공급되면, PCV는 자동차의 차체를 지지하는 액츄에이터 내의 압력을 제어한다. 이 유압시스템에서는 유압펌프로부터 PCV까지의 고압관로에서 압력맥동이 발생하고, PCV로부터 기름탱크로 회귀하는 저압관로에서는 서지압력이 발생하며, 이로 인한 진동과 소음은 자동차의 승차감을 크게 손상시킬 수 있다.³⁾ 따라서, 유압식 능동 현가장치를 자동차에 적용하기 위해서는 압력맥동과 서지압력을 저감시키기 위한 적절한 대책이 반드시

필요하다.

본 연구에서는 능동 현가장치용 유압시스템의 저압측 관로 즉, PCV로부터 기름탱크로 회귀하는 회귀관로에서 발생하는 서지압력의 저감법에 대하여 실험과 수치해석을 통하여 고찰한다. 실험은 실제 능동 현가장치용 유압시스템을 모의한 실험장치를 제작하여 수행한다. 수치해석에는 유압관로 내의 비정상흐름 유동의 해석에 특성곡선법⁴⁾을 사용하며, 액주분리(liquid column separation)시의 공동(cavity) 체적계산에는 가스 이산화 모델⁵⁾을 사용한다. 수치해석과 실험을 통하여 서지압력의 발생기구, 서지압력 저감용 어큐뮬레이터의 물리적 파라미터와 기름 회귀관로 직경이 서지압력에 미치는 영향 등을 명확히 하였으며, 기름 회귀관로에서 발생하는 서지압력을 가장 효과적으로 저감시키는 방안을 제시한다.

2. 수치해석

2.1 특성곡선법

Fig.1과 같은 단면적이 일정한 수평 관로 모델에서 관로내의 유체흐름을 1차원 흐름으로 가정한 경우의 운동방정식과 연속방정식을 특성곡선

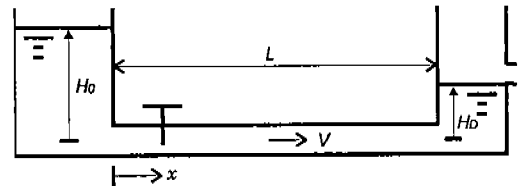


Fig.1 Pipe line model

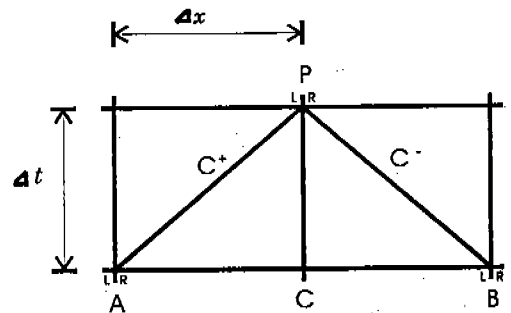


Fig.2 x-t grid

법의 수법에 의하여 상미분방정식으로 변환하고, Fig.2에 표시한 특성곡선 C^+ , C^- 선상에서 차분화하면 다음 식이 얻어진다.⁴⁾

$$C^+ : H_p = C_p - B \cdot Q_{LP} \quad (1)$$

$$C^- : H_p = C_m + B \cdot Q_{RP} \quad (2)$$

여기서, $C_p = H_A + B \cdot Q_{RA} - h_f$, $C_m = H_B - B \cdot Q_{LB} + h_f$, $B = a/(g \cdot A)$ 이며, H_A , H_B 및 H_p 는 Fig.2에 표시한 격자점 A, B 및 P에서의 압력수두, a 는 관로내에서의 음속, C^+ , C^- 는 특성곡선, h_f 는 관로 단위길이당 압력 손실수두, A 는 관로 단면적, Q 는 유량을 나타내며, 격자점 좌, 우의 유량은 별개의 값을 가지므로 보고 좌, 우의 유량에 첨자 L, R을 부가하여 표시한다.

본 연구에서는 관로내 흐름이 층류영역이므로 관로 단위 길이당 압력 손실수두 h_f 의 계산에는 관로단면상의 속도분포를 고려한 비정상층류 압력수두 손실식의 고속 고정도 계산법⁶⁾을, 공동체적 계산에는 가스 이산화모델⁵⁾을 사용한다.

2.2 PCV에서의 유량

Fig.3은 액추에이터 내의 압력유가 컨트롤 오리피스와 PCV를 거쳐 기름 회귀관로로 흐르는 과정을 나타낸 것이다. 이 때 PCV를 통하여 흐르는 유량 Q 는 다음 식으로부터 구해진다.

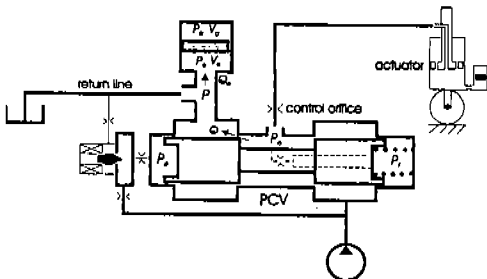


Fig.3 Schematic diagram of the PCV

$$Q = \sqrt{\frac{1}{c_{tot}}} \cdot \sqrt{\frac{2(P_c - P)}{\rho}} \quad (3)$$

여기서, $c_{tot} = \frac{1}{c_s^2 \cdot (\pi d x_s)^2} + \frac{1}{c_c^2 \cdot A_c^2}$ 이며,

P_c 는 액추에이터 하부 압력실 내의 압력, P 는 기름 회귀관로 상류단 압력, c_s 는 PCV의 유량계수, c_c 는 컨트롤 오리피스의 유량계수, d_s 는 스톱의 직경, x_s 는 스톱의 변위, A_c 는 컨트롤 오리피스의 단면적을 나타낸다.

2.3 PCV 스톱의 운동방정식

PCV 스톱의 운동방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$m_s \frac{d^2 x_s}{dt^2} + f_s \frac{dx_s}{dt} + k_s(x_s - x_0) - (P_f - P_p) A_s = 0 \quad (4)$$

여기서 m_s 는 스톱의 질량, f_s 는 스톱의 마찰계수, k_s 는 스프링 상수, x_0 는 스프링의 초기 압축 변위, P_f 는 피드백 압력, P_p 는 PCV 슬레노이드의 조작력에 의해 발생하는 파일럿 압력, A_s 는 스톱의 단면적을 나타낸다.

2.4 어큐뮬레이터가 설치된 유압 관로의 해석

Fig.3과 같이 관로상에 피스톤식 어큐뮬레이터가 설치된 경우, 관로상의 어큐뮬레이터 접속부 압력 P 의 변동에 따른 어큐뮬레이터 내 가스압력 P_g 와 유압자동유 압력 P_o 는 다음 식으로 표시된다.⁷⁾

$$\frac{d^2 P_g}{dt^2} - C_1 P_g^{-1} \left(\frac{dP_g}{dt} \right)^2 + C_2 \frac{dP_g}{dt} + C_3 P_g^{C_1} (P_g - P_o) = 0 \quad (5)$$

$$Q_a - \beta_o V_o \frac{dP_o}{dt} - \frac{V_g}{k P_g} \frac{dP_g}{dt} = 0 \quad (6)$$

여기서, $C_1 = 1 + 1/k$, $C_2 = (f_p / A_p^2 + f_n /$

$A_n^2)/((m_o + m_p)/A_p^2 + m_n/A_n^2)$, $C_3 = k/(((m_o + m_p)/A_p^2 + m_n/A_n^2)V_{g0}P_{g0}^{1/k})$ 이며, m_o 는 어큐뮬레이터 내의 유압 작동유 질량, m_p 는 피스톤의 질량, $m_n = \rho \cdot l_n \cdot A_n$, A_p 는 피스톤의 면적, A_n 은 어큐뮬레이터 접속부 관로 단면적, l_n 은 어큐뮬레이터 접속부 관로의 길이, f_p 는 피스톤의 마찰계수, $f_n = 32\nu \cdot l_n \cdot A_n \cdot \rho/d_n^2$, ν 는 유압 작동유의 동점성계수, d_n 은 어큐뮬레이터 접속부 관로의 직경, k 는 가스의 폴리트로프 지수, V_{g0} 는 가스의 초기 체적, P_{g0} 는 가스 충전압력, Q_a 는 어큐뮬레이터로 유입하는 유량, β_o 는 기름의 압축율, V_g, V_o 는 어큐뮬레이터 내의 가스와 기름의 체적이다.

3. 실험장치 및 방법

실험장치의 개략도는 Fig.4와 같다. 실험장치에서 현가장치 액추에이터 대응으로 용량 3 l의 어큐뮬레이터(A)를 PCV의 액추에이터측 포트에 연결하여 구성하였다. 연구대상 차량⁸⁾에서는 용량 160cc, 충전압력 1.5MPa의 서브 어큐뮬레이터가 부착된 능동 현가장치용 액추에이터가 차체를 지지하고 있으며, 차량이 범프를 통과할 때 액추에이터 내의 압력은 5MPa를 기준으로 일정 범위 내에서 정현 곡선 형태로 변동된다. 정현 곡선 형태로 변동되는 액추에이터 내의 압력이 5MPa보

다 커지는 순간 PCV의 피드백 작용에 의하여 액추에이터 내의 압력유가 PCV에 연결된 기름 회귀관으로 급격히 유입되면서 기름 회귀관로에는 서지압력이 발생된다. 따라서 PCV의 기름 회귀관로에서 발생하는 서지압력은 주로 액추에이터 내의 압력이 5MPa 근방에서 발생되기 때문에, 본 연구에서는 실험의 편의를 위하여 액추에이터를 대신하여 압력을 5MPa로 설정한 어큐뮬레이터(A)를 PCV의 액추에이터 포트에 설치하여 실험을 수행한다. 또한, 수회 반복되는 PCV의 개폐 작용 도중에도 PCV의 액추에이터측 압력을 5MPa 부근으로 유지할 수 있도록 비교적 큰 용량의 어큐뮬레이터(용량 : 3 l)를 사용하여 가능한 한 가혹한 조건, 즉 PCV 작동시 비교적 큰 유량이 얻어지는 조건하에서 실험이 이루어지도록 하였다. 회귀관로는 강관으로 직경이 각각 8mm와 10mm인 두 종류를 사용하였으며, 관로의 길이는 실차에서의 기름 회귀관로 길이를 고려하여 4m로 하였다. PCV의 동작신호는 노면 등에서의 외란입력에 대한 자동차의 자세제어를 위하여 PCV를 전자제어할 때 제어가능 범위가 1~2Hz 이하로 알려져 있으므로¹⁾ 주파수 2 Hz로 반복 조작되도록 하였으며, 또한 매우 급격한 제어신호 인가시의 유체과도현상을 관찰하기 위하여 Fig.5와 같은 스텝상의 전류신호를 PCV에 인가하였다. Fig.5에서 PCV의 솔레노이드 전류값이 0.4A일 때 PCV 제어압력 즉 액추에이터 대응으로 사용한 어큐뮬레이터 내의 압력은 5MPa이었다. 실험방

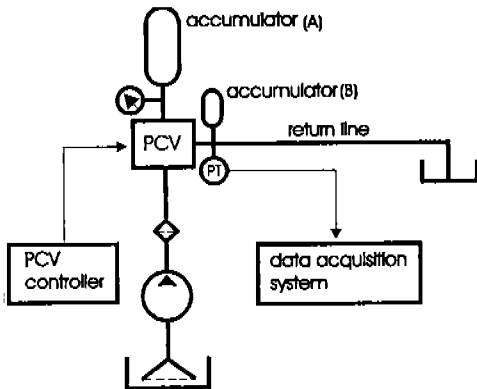


Fig.4 Schematic diagram of the experimental circuit

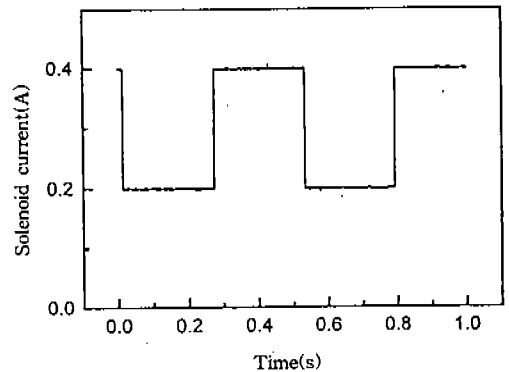


Fig.5 Current signal to the PCV

법으로는 서지압력 저감용 어큐레이터(B)를 사용하지 않고 회귀관로만 설치한 상태와 서지압력을 저감시킬 목적으로 여러종류의 충전압력과 용량을 갖는 어큐레이터(B)를 회귀관로 상류단에 설치한 상태에서 Fig.5에 나타낸 반복 조작 신호를 PCV에 인가하여 회귀관로에 발생하는 압력변동을 측정하였다. 본 연구에서 서지압력을 저감시킬 목적으로 사용한 어큐레이터(B)의 종류는 내구성을 고려하여 피스톤식 어큐레이터를 선정하였다. 피스톤식 어큐레이터는 일반 산업용 유압 시스템에서는 거의 사용되지 않기 때문에, 시판되는 어큐레이터를 구하기가 곤란하여, 능동 현가장치의 구성품으로 사용하기에 적합하도록 실린더 내경은 30mm로 하고 피스톤 행정을 변화시켜 용량이 각각 45, 70, 80cm³이 되도록 피스톤식 어큐레이터를 설계, 제작하여 실험에 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

기름 회귀관로에서 발생하는 서지압력을 계산하는 수치계산 프로그램에서 관로부분의 해석에는 특성곡선법을 사용하였고, 관로 경계조건을 기술하는 식(4)~식(6)은 Runge-Kutta법으로 계산하였다. 수치계산에 사용된 각종 물리인자들 중 직접 측정하기가 곤란한 PCV 스프링의 마찰계수 f_s 와 어큐레이터 피스톤의 마찰계수 f_p 는 기초실험 및 예비 수치해석 과정을 통하여 구한 값을 사용하였다.

Fig.6은 PCV로부터 기름탱크로 회귀하는 회귀관로에 서지압력 저감용 어큐레이터(B)를 설치하지 않은 상태에서 PCV의 반복조작시 PCV 직후 회귀관로에서 측정된 서지압력의 파형을 나타낸 것이다. 그림에서 (a)는 실험결과이며, (b)는 계산결과이다. 실험에 사용한 회귀관로는 직경 8mm, 길이 4m인 강관이며, PCV의 컨트롤 오리피스 직경은 2.5mm이다. 실험에서 PCV는 Fig.5에 나타낸 전류신호를 인가하여 주파수 2Hz로 반복조작하였다. 실험 및 수치해석 결과에서 PCV 급 폐쇄에 따라서 관로내 압력이 절대치 0부근까지 저하하며, PCV급 개방 초기에는 절대치가

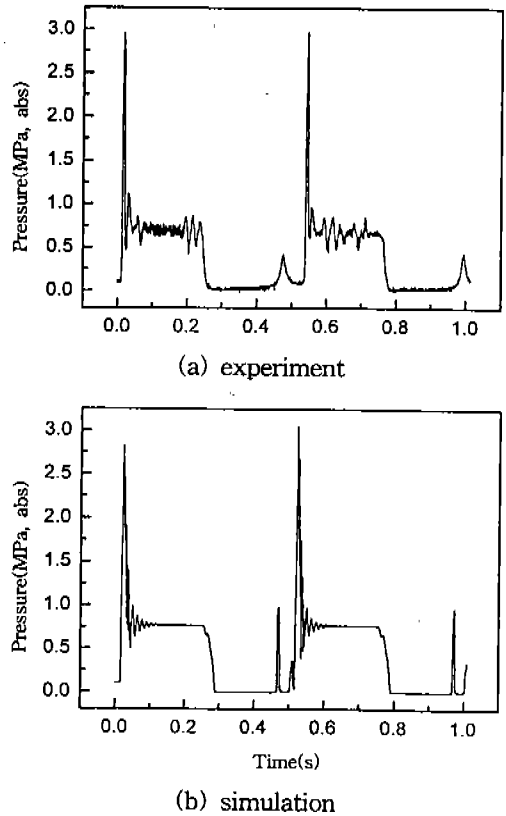
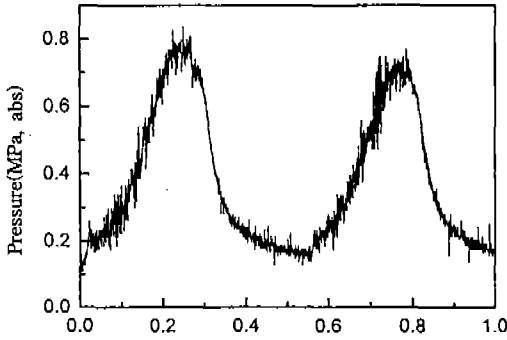


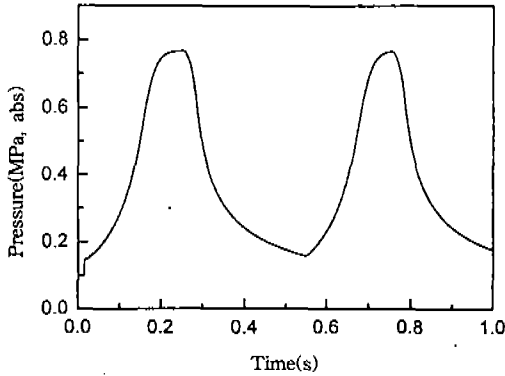
Fig.6 Comparison of experimental result and computed result for surge pressure wave(without accumulator(B))

2.95MPa정도인 임펄스상의 서지압력이 기록되었으며, 이 임펄스상의 서지압력이 진동과 소음을 일으킨다. 이와같은 압력변동은 PCV 폐쇄후에 관로 상류끝부위에 발생한 공동(cavity)을 PCV 개방과 더불어 분출된 기름이 충격적으로 소멸시키면서 발생하는 것으로 해석된다. 특성곡선법에 의한 계산결과는 실험결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 이러한 서지압력을 저감시키는 유효한 방법으로는 관로 상류끝 즉 PCV 직후 위치에 어큐레이터를 설치하는 방법이 잘 알려져 있다.

Fig.7은 PCV로부터 기름탱크로 회귀하는 회귀관로에 서지압력을 저감시킬 목적으로 용량 70cm³, 가스 충전압력 0.15MPa인 어큐레이터(B)를 설치한 상태에서 PCV를 반복조작할 때 PCV 직후 회귀관로에서 측정된 압력파형을 나타낸 것이



(a) experiment



(b) simulation

Fig.7 Comparison of experimental result and computed result for pressure wave (with accumulator(B), acc. capacity : 70cm^3 , acc. gas charge press. : 0.15MPa , abs)

다. 실험관로 및 PCV 반복조작 조건은 Fig.6의 경우와 동일하다. 실험 및 시뮬레이션 결과 압력 파형에는 Fig.6에 보여지는 임펄스상의 충격압력을 동반한 서지압력은 나타나지 않았으며, 이는 어큐물레이터에 의해 서지압력이 저감되었기 때문이다. 최대압력의 크기는 0.79MPa 이며, 수치해석에 의한 계산결과는 실험결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

어큐물레이터(B) 내의 가스 충전압력 변화가 서지압력 저감에 미치는 영향을 조사할 목적으로 Fig.7의 실험관로 및 PCV 반복조작 조건에서 어큐물레이터(B) 내의 가스 충전압력을 0.4MPa 로 설정한 상태에서 PCV를 반복조작할 때 PCV 직후 회귀관로에서 측정된 압력파형을 Fig.8에 나타내

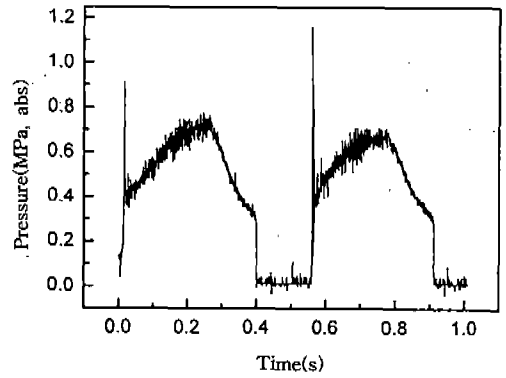


Fig.8 Record of pressure wave(acc. capacity : 70cm^3 , acc. gas charge press. : 0.4MPa , abs)

었다. Fig.8에 나타난 압력파형에서 회귀관로 내의 최저압력으로부터 가스 충전압력 0.4MPa 까지 급격하게 압력이 증가할 때 액주분리에 의한 서지압력이 발생하며, 충전압력으로부터 최고압력까지는 압력 상승곡선의 기울기가 완만하게 되었다. 이에 비하여 가스 충전압력이 0.15MPa 로 설정된 Fig.7의 그림에서는 서지압력은 나타나지 않지만 충전압력으로부터 최고압력까지의 압력 상승곡선의 기울기는 Fig.8의 경우보다 약간 크다. 따라서 서지압력을 저감해야 하는 관점에서는 어큐물레이터 내의 가스 충전압력이 0.4MPa 로 설정된 Fig.8의 경우보다 가스 충전압력이 0.15MPa 로 설정된 Fig.7의 경우가 바람직한 것으로 판단된다.

Fig.9에는 어큐물레이터(B)의 용량 변화가 서지압력 저감에 미치는 영향을 조사할 목적으로 Fig.7의 실험관로 및 PCV 반복조작 조건에서 어큐물레이터의 용량을 각각 80cm^3 와 45cm^3 로 설정한 상태에서 PCV를 반복조작할 때 PCV 직후 회귀관로에서 측정된 압력파형을 나타내었다. 그림에서 (a)는 용량 80cm^3 , 가스 충전압력 0.15MPa 인 어큐물레이터를 사용한 경우이며, (b)는 용량 45cm^3 , 가스 충전압력 0.15MPa 인 어큐물레이터를 사용한 경우이다. (a) 및 (b)의 그림에서 서지압력은 어큐물레이터에 의해 저감되어 나타나지 않았으며, 용량이 큰 어큐물레이터를 사용한 그림 (a)의 압력상승곡선 기울기가 용량이 작은 어큐

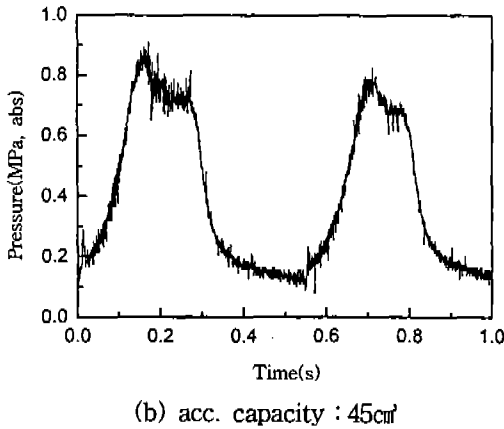
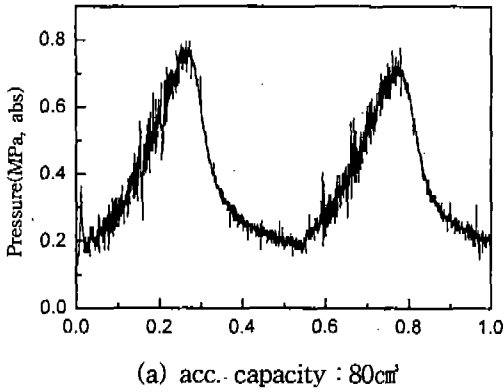


Fig.9 Records of pressure wave (acc. gas charge press. : 0.15MPa, abs)

물레이터를 사용한 그림(b)의 압력상승곡선 기울기보다 완만하였으나, 이 정도의 용량 차이에서는 두드러진 저감효과 차이는 보이지 않는다. 실험 결과로부터 큰 용량의 어큐물레이터가 서지압력을 저감시키는데 유리하다는 것을 알 수 있으나, 이 경우 어큐물레이터의 부피 및 무게가 증가하여 자동차에 적용하기에는 부담이 될 수 있으므로 어큐물레이터에 대한 적절한 용량설계가 필요하다.

Fig.10은 어큐물레이터를 사용한 서지압력 저감효과와 회귀관로 직경사이의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 압력의 크기는 PCV가 2Hz로 반복조작될 때 PCV 직후 회귀관로에서 측정된 압력의 최고치이다. 실험에 사용한 회귀관로는 직경 8mm 및 10mm, 길이 4m인 강관이며, PCV의

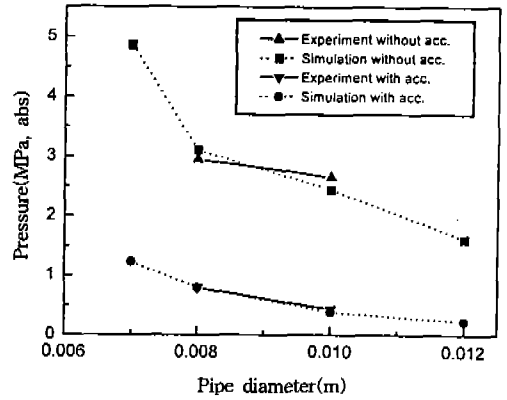


Fig.10 Effect of internal diameter of the return line on pressure peak value (with or without accumulator, acc. capacity : 70cm³, acc. gas charge press. : 0.15MPa, abs)

컨트롤 오리피스 직경은 2.5mm이고, 어큐물레이터는 용량 70cm³, 가스 충전압력 0.15MPa인 것을 사용하였다. 실험 및 시뮬레이션 결과로부터 어큐물레이터를 사용함으로써 서지압력의 저감효과가 현격히 나타남을 확인하였다. 또한 회귀관로의 직경이 클수록 압력의 최고치는 감소되며, 이러한 경향은 서지압력 흡수용 어큐물레이터를 사용했을 때와 사용하지 않았을 때의 두 경우 모두 나타남을 알 수 있다. 이와같이 회귀관로의 직경이 증가할수록 압력의 최고치가 감소하는 것은 관로직경이 큰 경우의 관로내 정상 유동 관마찰 손실이 작아서 관로 상류끝 위치에서의 배압이 상대적으로 낮아지기 때문이다. 특성곡선법에 의한 시뮬레이션 결과는 실험결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

능동 현가장치용 유압계의 기름 회귀관로에서 발생하는 서지압력을 저감시키기 위하여 서지압력 흡수용 피스톤식 어큐물레이터를 사용할 때의 주요 설계인자인 어큐물레이터의 용량, 충전압력 및 회귀관로 직경 등의 파라미터는 자동차의 구조 및 설치공간 등을 고려하여 양호한 성능이 보장되는 범위내에서 가능한 한 소형, 경량화되도록 결정되어야 한다. 이러한 파라미터에 대한 설계는 본 연구의 성과로 만들어진 수치해석 프로그램을 이용하여 능동 현가장치용 유압계 기름 회귀관로

에서 발생하는 서지압력을 비교적 정확하게 예측함으로써 가능하다는 것을 확인하였다.

5. 결 론

자동차 능동 현가장치용 유압계의 기름 회귀관로에서 발생하는 서지압력에 대하여 실험과 수치 해석을 통하여 고찰하였다. 본 논문의 연구결과를 요약하여 정리하면 다음과 같다.

- 1) 능동 현가장치용 유압계 기름 회귀관로에서의 서지압력 발생기구를 실험 및 특성곡선법에 의한 수치 시뮬레이션을 통하여 명확히 규명하였다.
- 2) 능동 현가장치 유압계 기름 회귀관로에서의 서지압력을 저감시킬 목적으로 피스톤식 어큐뮬레이터를 사용할 때의 주요 설계인자인 어큐뮬레이터의 용량, 충전압력, 관로의 직경이 서지압력에 미치는 영향을 명확히 규명하였다.
- 3) 특성곡선법 및 가스 이산화모델에 의한 수치 해석을 통하여 능동 현가장치용 유압계 기름 회귀관로에서의 서지압력을 비교적 정확하게 예측할 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. 武馬修一, 佐藤宏毅, 米川 隆, 大沼敏男, 服部勝彦, 杉原正己, “アクティブコントロールサスペンションの解析と開発”, 日本機械學會論文集(C編), 57卷 534號, pp. 599~605, 1991.
2. 福島直人, 入江南海雄, 赤津洋介, 佐藤正, 高橋俊春, “油壓アクティブサスペンションによる車兩の振動制御”, 日本機械學會論文集(C編), 57卷 535號, pp. 722~726, 1991.
3. H. Ogino, I. Maekawa and H. Yamaguchi, “Analysis of Surge Pressure Generated by Fluid Column Separation in Pressure Control System of Vehicle”, Proceedings of the 2nd JHPS International Symposium on Fluid Power, Tokyo, pp. 501~506, 1993.
4. E. B. Wylie, V. L. Streeter, Fluid Transients in Systems, Prentice hall, Englewood Cliffs, pp. 37~74, 1993.
5. E. Wylie, “Simulation of Vaporous and Gaseous Cavitation”, ASME Journal of Fluids Eng., Vol. 106, pp. 307~311, 1984.
6. 香川利治, 李一永, 北川 能, 竹中利夫, “特性曲線法における非定常層流壓力損失の高速高精度計算法”, 日本機械學會論文集(B編), 49卷, 447號, pp. 2638~2643, 1983.
7. 이일영, 정용길, 윤영환, 유압관로계 고압부에서의 압력 맥동 및 저압부에서의 서지 압력 저감기술, 만도기계(주) 중앙연구소, pp. 90~92, 1995.
8. 심정수, 정남훈, 조길준, 윤영환 외 8, “지능형 현가시스템 제작기술”, 제5회 차세대 자동차 기술 Workshop, pp. 508~523, 1997.