

벨로스형 어큐물레이터의 압력 맥동 감쇠 특성

Attenuation of Pressure Fluctuations in Oil Hydraulic Pipeline with Bellows Type Accumulator

이일영 · 정용길 · 이수종

I. Y. Lee, Y. G. Jung and S. J. Lee

Key Words : Bellows Type Accumulator(벨로스형 어큐물레이터), Pressure Fluctuations(압력 맥동), Hydraulic Pipeline(유압 관로), Transfer Matrix Method(전달 매트릭스법)

Abstract : Pressure propagation and attenuation characteristics in a hydraulic pipeline with a bellows type accumulator was investigated by theoretical analyses and experiments. In the first stage of the study, equations to evaluate the amount of oil volume charged into the bellows together with nitrogen gas were proposed. In the next stage, the authors suggested a mathematical model based on transfer matrix method to describe the dynamic characteristics of the pipe element with a metal bellows type accumulator. Through comparisons and considerations of the experimental and the numerical data shown in frequency domain, the validity of the mathematical model was confirmed.

1. 서 론

유압시스템에서 어큐물레이터의 역할은 에너지의 저장과 압력맥동의 저감에 있다. 지금까지 가장 널리 사용되어 온 어큐물레이터는 고무 블래더(rubber bladder)형이며, 그 밖에 다이어프램형, 피스톤형 등이 사용되고 있다. 이 가운데서 압력맥동 감쇠의 목적으로 사용이 가능한 것은 고무 블래더형 또는 다이어프램형이며, 피스톤형은 피스톤~실린더 사이의 과도한 마찰저항 때문에 고주파수역 응답성이 나빠서 맥동 저감 목적으로의 사용은 곤란한 것으로 알려져 있다¹⁾. 근래의 자동차, 건설기계, 전투차량 등 차량용 유압시스템에서는 차량내의 진동 기진원인 유압시스템 압력 맥동을 저감하기 위하여 금속 벨로스(metal bellows)형 어큐물레이터의 사용이 권장되고 있다. 차량 탑재용으로 금속 벨로스형 어큐물레이터가 선호되는 것은 종래의 고무 블래더형 및 다이어프램형에 비하여 장기간 사용시의 내구성이 우수한 것으로 평가되기 때문이다.^{1,2)}

그런데, 금속 벨로스형 어큐물레이터의 압력맥동

감쇠 특성에 관한 구체적인 연구보고는 현재까지 찾아보기 어려운 형편이며, 그 이유는 이 장치가 개발된 이래 아직까지 그다지 오랜 세월이 지나지 않은 점, 그 용도가 특수한 분야로 제한되어 있는 점 등에 기인하는 것으로 생각된다. 따라서, 산업 현장에서 이 형식의 어큐물레이터를 효과적으로 활용할 수 있으려면 관련 연구성과의 지속적인 집적이 필요하다 하겠다.

본 연구에서는 벨로스형 어큐물레이터가 설치된 금속제 유압관로에서의 압력맥동 전파특성을 조사하기 위한 수치해석 및 실험을 수행한다. 수치해석 모델은 전달 매트릭스법(transfer matrix method)에 근거하여 구하며, 수치해석 결과와 실험결과를 비교 검토함으로써 본 연구에서 구한 해석 모델의 신뢰성을 검증하기로 한다.

2. 이론 해석

2.1 어큐물레이터의 구조 및 주요 물리수치 결정법

본 연구에서 대상으로 하는 어큐물레이터의 단면 형상 및 벨로스의 형상을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1과 같은 벨로스형 어큐물레이터에서는 가스 봉입 공간인 벨로스 내부에 질소 가스 뿐만아니라 일정량의 유압작동유를 함께 봉입해야 한다. 이렇

접수일 : 2001년 9월 1일
이일영, 이수종 : 부경대학교 기계공학부
정용길 : 경상대학교 수송기계공학부

게 작동유를 함께 봉입하는 이유는 유압회로내의 압력이 상승할 때 벨로스가 과도하게 수축되어 벨로스 영구변형이 발생하는 것을 방지하기 위해서이다. 그러나 현재까지 벨로스 어큐물레이터의 가스 봉입 공간에 충전하는 기름의 양과 관련된 기술자료는 찾아보기 어려웠으므로, 이에 관한 내용을 아래에서 상세히 다루고자 한다.

벨로스 내부 봉입 가스의 상태 변화는, 가스가 등은 변화하는 것으로 가정하고, 벨로스 내에 봉입하는 작동유의 압축율이 봉입 가스의 압축율에 비하여 매우 작은 점을 고려함으로써 아래 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 또, 어큐물레이터 내의 가스 체적 V_g 및 가스의 압력 p_g 는 식 (2) 및 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$p_{g0}(V_{b0} - V_{ch-oil}) = p_g V_g \quad (1)$$

$$V_g = V_b - V_{ch-oil} \quad (2)$$

$$p_g = p_o - \frac{k_b x_{b0}}{A_b} + \frac{k_b (V_{b0} - V_b)}{A_b^2} \quad (3)$$

여기서, p_o 는 어큐물레이터의 벨로스 외측에 작용하는 유압시스템 압력, p_{g0} 는 초기상태($p_o = 0$ 인 상태)에서의 가스 충전 압력, V_{b0} 는 초기상태($p_g = p_{g0}$, $p_o = 0$ 에서의 벨로스 내 전체 체적, V_{ch-oil} 는 벨로스 내에 충전하는 작동유의 체적, V_b 는 p_g 가 유압시스템 정격압력일 때의 벨로스 내부 전체 체적을 나타낸다. 그리고, k_b 및 A_b 는 벨로스의 스프링 상수 및 벨로스의 유효 단면적, x_{b0} 는 초기상태($p_g = p_{g0}$, $p_o = 0$ 일 때의 벨로즈 길이와 $p_o =$ 유압시스템의 정격압력일 때의 벨로즈 길이의 차이를 나타낸다.

그런데, 본 연구의 실험에서는 금속 벨로스의 물리수치가 $k_b = 37.65$ N/cm, $x_{b0} = 0.35$ cm, $A_b = 3.715$ cm²이고, $(V_{b0} - V_b)/A_b$ 도 1 cm 미만으로 된다. 이 때는 근사적으로 $p_g \approx p_o$ 의 관계가 성립하며, 식(1) 및 (2)로부터 V_{ch-oil} 에 대한 다음 식이 구해진다.

$$V_{ch-oil} = \frac{P_g V_b - P_{g0} V_{b0}}{P_g - P_{g0}} \quad (4)$$

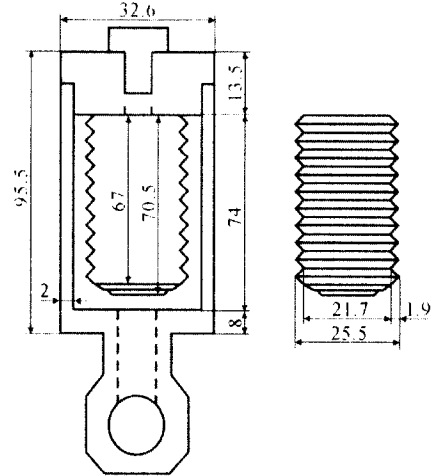


Fig. 1 Sectional diagram of the accumulator and external view of the bellows

여기서, 벨로스 내부에 가스와 함께 충전하는 작동유의 양 결정법에 대하여 알아본다. 먼저 어큐물레이터 설계 사양으로부터 V_{b0} 를 결정하고, 대상 유압 시스템의 운전조건으로부터 p_g 및 p_{g0} 를 결정한다. V_b 는 벨로스의 안정된 작동구간(영구변형이 발생하지 않는 작동구간)을 고려하여 결정해지게 된다. 이들 수치들을 식 (4)에 대입함으로써 V_{ch-oil} 설계치를 구할 수 있다. 예로서, 본 실험에 사용한 어큐물레이터의 물리수치들인 $V_{b0} = 25$ cm³, $V_b = 21.6$ cm³, $p_g = 101$ bar(abs), $p_{g0} = 61$ bar(abs)을 식 (4)에 대입함으로써 $V_{ch-oil} \approx 16.4$ cm³를 구하였다. 이 경우 V_{g0} 는 8.6 cm³ 이 됨을 알 수 있다.

2.2 벨로스형 어큐물레이터의 동특성

Fig. 2에는 일정 길이($l_1 + l_2$)의 관로상에 부착된 벨로스형 어큐물레이터에 관련된 각종 변수들을 나타내었다. 그림에서 l_1 , A_1 , d_1 및 l_2 , A_2 , d_2 는 어큐물레이터 설치 위치를 기준으로 하여 각각 좌측 및 우측 관로의 길이, 단면적, 내경을 나타내며, l_n , A_n , d_n 은 관로와 어큐물레이터 사이 연결부 관로의 길이, 단면적, 내경을 나타낸다. p_1 , Q_1 및 p_2 , Q_2 는 각각 단면 I 및 II에서의 압력과 유량을 나타내고, p , Q 및 p' , Q' 는 각각 관로 1의 우측 끝 및 관로 2의 좌측 끝에서의 압력과 유량을 나타낸다. 그리고 Q'' 는 관로로부터 어큐물레이터로 흐르는 유량, p_g , V_g 및 p_o , V_o 는 각각 어큐물레

이터 내 가스측 및 작동유측의 압력 및 체적을 나타낸다.

Fig. 2에서 주관로와 어큐뮬레이터 사이 연결부에서의 연속방정식은 가스의 압축율 β_g 가 작동유의 압축율 β_o 보다 매우 큰 점을 고려하면 다음과 같이 표시된다.

$$Q = Q' + Q'' \quad (5)$$

$$\cong Q' + \beta_g V_g \frac{dp_g}{dt}$$

식 (5)에 표시된 Q'' 를 Laplace 변환하여 다음 식을 얻는다.

$$\widehat{Q}(s) \cong \widehat{Q}'(s) + \overline{\beta_g V_g} \widehat{P}_g(s) s \quad (6)$$

$$\widehat{Q}''(s) \cong \overline{\beta_g V_g} \widehat{P}_g(s) s \quad (7)$$

식 (5)에 포함된 β_g 및 V_g 는 p_g 의 변화에 따라 변하는 값이지만 여기서는 그것의 시간 평균값인 $\overline{\beta_g}$, $\overline{V_g}$ 를 사용하여 근사식 (6) 및 (7)을 얻었다. $\overline{\beta_g}$ 는 다음 식으로 표시할 수 있다.³⁾

$$\overline{\beta_g} = \frac{1}{n \overline{p_g}} \quad (8)$$

여기서, n 은 가스의 폴리트로픽 지수, $\overline{p_g}$ 는 가스 압력의 시간 평균치이다.

또, 벨로스의 운동 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{m_{tb}}{A_b^2} \frac{dQ_o}{dt} + F_b Q_o + \frac{k_b}{A_b^2} \int_0^t Q_o d\tau = p_o - p_g \quad (9)$$

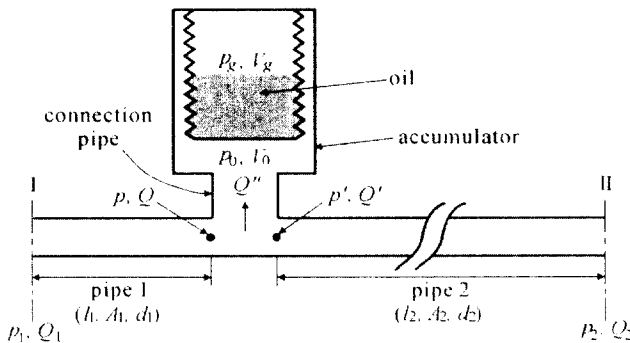


Fig. 2 Pipeline model with a bellows type accumulator

여기서, $m_{tb} = m_o + m_b$, m_o : 벨로스 내 봉입 기름의 질량, m_b : 벨로스 가동부의 질량, $F_b = f_b/A_b^2$, f_b : 벨로스의 마찰계수이다.

식 (9)를 Laplace 변환하고, $Q' = Q_o$ 의 관계를 고려함으로써 다음 식을 얻는다.

$$\frac{m_{tb}}{A_b^2} \widehat{Q}'(s) \cdot s + F_b \widehat{Q}'(s) + \frac{k_b}{A_b^2} \frac{\widehat{Q}'(s)}{s} = \widehat{P}_o(s) - \widehat{P}_g(s) \quad (10)$$

식 (10)에 식 (7)을 대입하면 다음과 같은 $\widehat{P}_g(s)$ 와 $\widehat{P}_o(s)$ 사이의 관계식이 구해진다.

$$\widehat{P}_g(s) \left(\frac{m_{tb}}{A_b^2} \overline{\beta_g V_g} s^2 + F_b \overline{\beta_g V_g} s + \frac{k_b}{A_b^2} \overline{\beta_g V_g} + 1 \right) = \widehat{P}_o(s) \quad (11)$$

어큐뮬레이터 접속 관로 내부를 통하는 유체의 운동 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{m_n}{A_n^2} \frac{dQ'}{dt} + F_n Q' = p - p_o \quad (12)$$

여기서 $m_n = \rho l_n A_n$ 이고, $f_n = 32 \nu l_n A_n \rho / d_n^2$ 이며, $F_n = f_n / A_n^2$ 이다.

식 (12)를 Laplace 변환하면 다음과 같다.

$$\frac{m_n}{A_n^2} \widehat{Q}'(s) \cdot s + F_n \widehat{Q}'(s) = \widehat{P}(s) - \widehat{P}_o(s) \quad (13)$$

식 (13)에 식 (7)을 대입하면 다음과 얻어진다.

$$\widehat{P}_g(s) \left(\frac{m_n}{A_n^2} \overline{\beta_g V_g} s^2 + F_n \overline{\beta_g V_g} s \right) + \widehat{P}_o(s) = \widehat{P}(s) \quad (14)$$

그리고, 식 (14), (11)에서 $\widehat{P}_o(s)$ 를 소거하여 다음 식을 얻는다.

$$\hat{P}(s) = \hat{P}_g(s) \left\{ \left(\frac{m_{tb}}{A_b^2} + \frac{m_n}{A_n^2} \right) \overline{\beta}_g \overline{V}_g s^2 + (F_b + F_n) \overline{\beta}_g \overline{V}_g s + \frac{k_b}{A_b^2} \overline{\beta}_g \overline{V}_g + 1 \right\} \quad (15)$$

어큐물레이터 접속부에서의 압력은 $\hat{P}(s) = \hat{P}(s)$ 이며, 식 (15)의 우변 대괄호 부분을 K_{accb} 로 놓고, 식 (6), (15)에서 $\hat{P}_g(s)$ 를 소거함으로써 아래 식이 얻어진다.

$$\hat{Q}(s) = \frac{\overline{\beta}_g \overline{V}_g s}{K_{accb}} \hat{P}(s) + \hat{Q}(s) \quad (16)$$

식 (16)을 전달 매트릭스 식으로 표시하면 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} \hat{P}(s) \\ \hat{Q}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \overline{\beta}_g \overline{V}_g s / K_{accb} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{P}(s) \\ \hat{Q}(s) \end{bmatrix} \quad (17)$$

2.3 대상 유압관로 내 유동의 전달 매트릭스 표시

본 연구에서는 유압 관로상에 설치된 벨로스형 어큐물레이터의 압력 맥동 감쇠 특성을 조사할 목적으로 Fig. 2와 같은 유압 관로계에 대하여 이론 해석 및 실험을 수행한다. Fig. 2의 관로계는 3개의 관로 요소 즉, 관로요소 l_1 (길이 0.02 m), 관로요소 l_2 (길이: 1.2 m) 및 관로 분기부(관로요소 l_1 과 l_2 사이 부분)으로 구성된다.

여기서, 상기 3개의 관로 요소에서의 유동 특성을 전달 매트릭스법으로 기술하는 방법에 대하여 설명하기로 한다. 먼저, 관로 분기부에서의 전달 매트릭스 식으로는 앞에서 구한 식 (17)을 사용하면 된다. 다음으로, 관로요소 l_1, l_2 에서의 전달 매트릭스 식은 비정상 층류 압력 손실을 고려한 관로내 압력, 유량에 관한 기초방정식을 Laplace 변환함으로써 다음과 같이 표시된다.^{3,4)}

$$\begin{bmatrix} \hat{P}_i(s) \\ \hat{Q}_i(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\lambda l) & Z_c \sinh(\lambda l) \\ 1/Z_c \sinh(\lambda l) & \cosh(\lambda l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{P}_j(s) \\ \hat{Q}_j(s) \end{bmatrix} \quad (18)$$

여기서, 첨자 i, j 는 관로상의 임의의 두 위치를 나타내며, 관로의 전파계수 λ , 관로의 특성 임피던스 Z_c 는 다음 식으로 표시된다.⁵⁾

$$\lambda \approx \frac{s}{c} \left[1 + \left(\frac{\nu}{R^2 s} \right)^{0.5} + \left(\frac{\nu}{R^2 s} \right) + \frac{7}{8} \left(\frac{\nu}{R^2 s} \right)^{1.5} \right] \quad (19)$$

$$Z_c \approx \frac{\rho c}{A} \left[1 + \left(\frac{\nu}{R^2 s} \right)^{0.5} + \left(\frac{\nu}{R^2 s} \right) + \frac{7}{8} \left(\frac{\nu}{R^2 s} \right)^{1.5} \right] \quad (20)$$

여기서, c : 관로내 파동 전파 속도, A : 관로의 단면적, R : 관로의 반지름, ν : 유체의 동점도이다.

Fig. 2에 나타낸 관로상의 두 위치 I, II에서의 압력 및 유량 $\hat{P}_1(s), \hat{Q}_1(s), \hat{P}_2(s), \hat{Q}_2(s)$ 사이의 관계는 아래 식과 같이 표시된다.

$$\begin{bmatrix} \hat{P}_1(s) \\ \hat{Q}_1(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 & T_2 \\ T_3 & T_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{P}_2(s) \\ \hat{Q}_2(s) \end{bmatrix} \quad (21)$$

이 식의 전달 매트릭스 요소 $T_1 \sim T_4$ 는 상기 3개 관로 요소들의 전달 매트릭스를 차례로 곱해줌으로써 구해진다.³⁾ 여기서, 관로 출구의 유체 임피던스 $\hat{P}_2(s) / \hat{Q}_2(s) \approx P_{20} / Q_{20}$ 가 알려지면, 식 (21)로부터 $\hat{P}_2(s) / \hat{P}_1(s), \hat{P}_2(s) / \hat{Q}_1(s), \hat{P}_1(s) / \hat{Q}_2(s)$ 등의 계산이 가능하다.

3. 실험 장치 및 실험 방법

본 연구에서는 Fig. 3에 나타낸 유압 관로계를 구성하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용한 어큐물레이터는 Nippon-Hatsuzou 사의 공칭용량 8.5 cm³, 충전압력 60 bar의 금속 벨로스형 어큐물레이터이다. 펌프로는 Vickers사의 피스톤 펌프(모델:

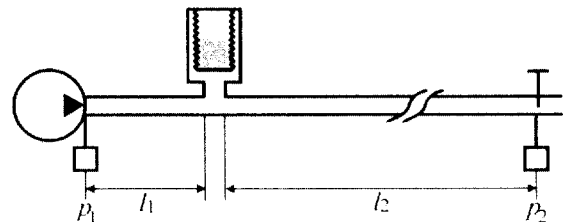
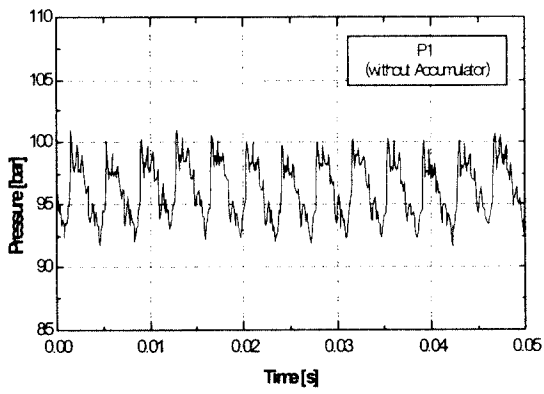
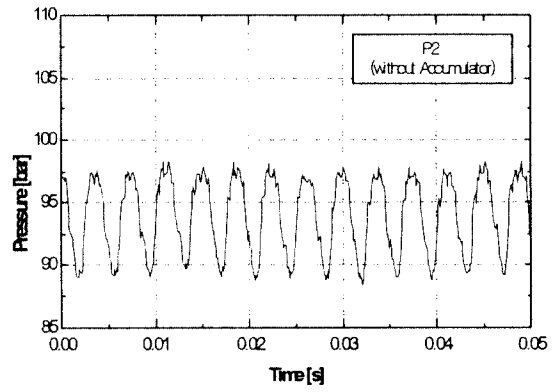


Fig. 3 Schematic diagram of the test pipeline

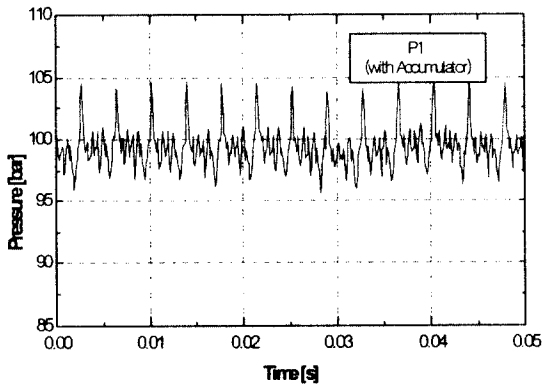


(a) p_1

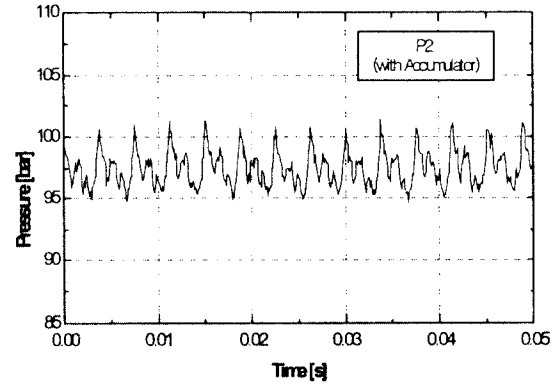


(b) p_2

Fig. 4 Pressure fluctuations without an accumulator

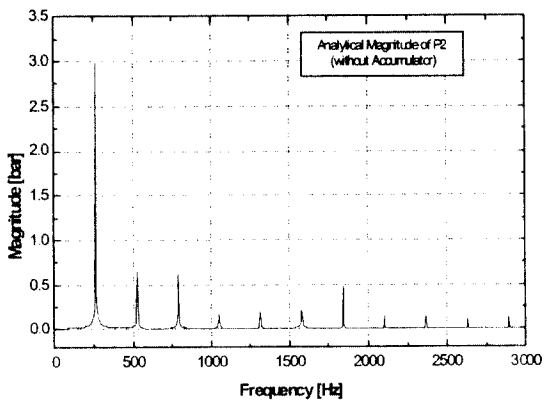


(a) p_1

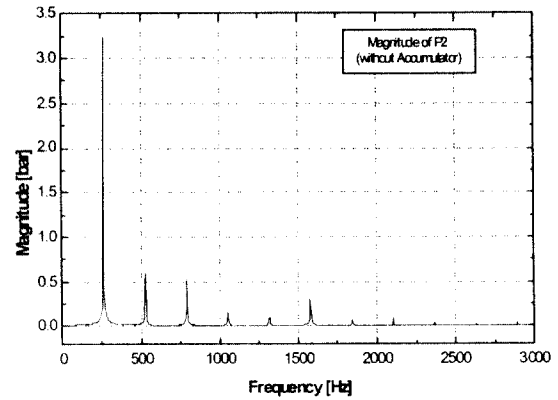


(b) p_2

Fig. 5 Pressure fluctuations with an accumulator



(a) computed $|\widehat{P}_2(s)|$



(b) measured $|\widehat{P}_2(s)|$

Fig. 6 Experimental & analytical results without an accumulator

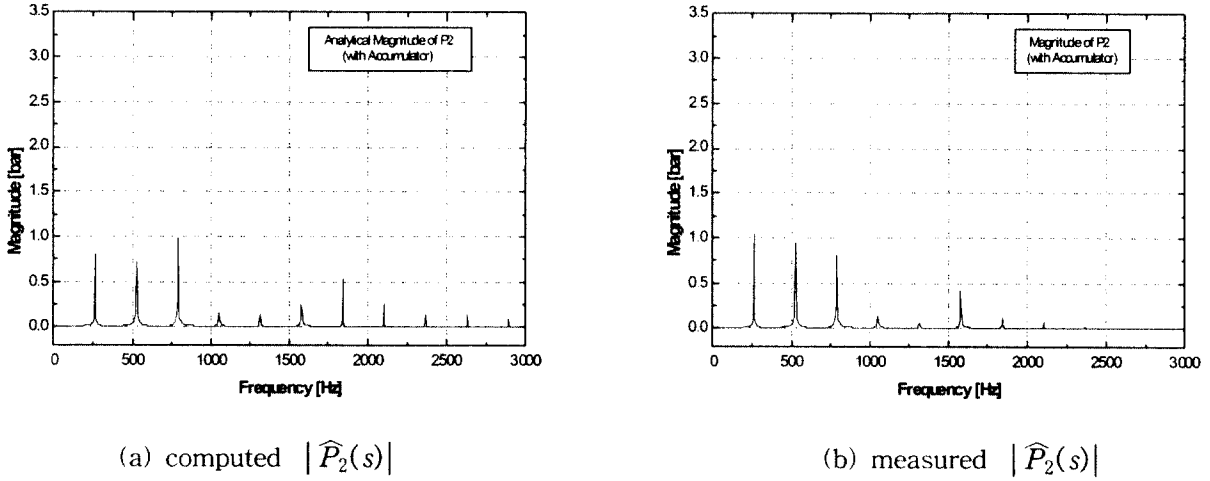


Fig. 7 Experimental & analytical results with an accumulator

MFB5, 용량: 10.5 cm³/s, 피스톤 수: 9개), 관로 출구측 밸브로는 수동식 교축밸브를 사용하였다. 압력 계측을 위한 압력변환기(스트레인 게이지식)는 관로 입구부 및 관로 출구부에 각각 설치하였으며, 펌프를 정상 작동시킨 후 출구 밸브를 조절하여 관로 압력이 100 bar 부근이 되도록 설정한 상태에서 압력을 계측하였다.

압력변환기에서 계측된 압력신호는 동적 스트레인 증폭기, A/D변환기를 거쳐 퍼서널 컴퓨터에서 기록하였다. 계측된 압력 데이터는 본 연구자들이 작성한 FFT 연산 프로그램을 사용하여 주파수 영역 신호로 변환한 후에 이론 해석 데이터와 비교하였다.

4. 결과 및 고찰

실험을 통하여 계측된 압력 맥동 데이터의 일 예를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. 여기서, Fig. 4는 어큐물레이터를 사용하지 않았을 때, Fig. 5는 어큐물레이터를 사용하였을 때의 압력 맥동 시간 응답이다. Fig. 4에서 p_2 의 진폭이 p_1 의 진폭보다 더 커지는 이유는 입력되는 맥동의 주파수가 실험 관로의 공진 주파수 부근이기 때문이고, 어큐물레이터를 설치하면 이 맥동이 크게 감소하는 것을 Fig. 5를 통하여 확인할 수 있다.

또, 지금까지 전개된 이론해석의 타당성을 검증하기 위하여 어큐물레이터가 설치되지 않았을 경우의 $|\hat{P}_2(s)|$ 계산치를 Fig. 6 (a)에, $|\hat{P}_2(s)|$ 의 실험치를 Fig. 6 (b)에 각각 나타내었다. 이 맥동

의 1차 성분 주파수는 펌프의 회전속도×피스톤 수에 해당하는 값이고, 2차 이후의 주파수 성분은 1차 성분 주파수의 정수배에서 발생함을 알 수 있다. 이 실험에서는 펌프 회전속도 약 1750rpm × 피스톤 수 9개로부터 1차 성분의 주파수는 약 263Hz가 되는 것을 예측할 수 있는데, 실제 실험치와 계산치에서도 이와 일치하는 주파수에서 1차 성분이 나타났다. 어큐물레이터가 설치되지 않은 단일 관로인 경우의 계산은 Fig. 6의 결과를 통해서도 알 수 있듯이 계산치와 실험치가 상당히 잘 일치하고 있어, 이론 해석의 타당성이 입증되었다.

Fig. 7은 단일 관로 입구 부분에 벨로스형 어큐물레이터가 설치된 경우의 이론 계산치와 실험치를 나타내고 있다. 여기서 어큐물레이터의 점성 마찰계수는 $4 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}$ 로 고려하여 계산하였고, 그 결과 관로 출구의 1차 성분 크기가 Fig. 6에 비하여 1/3 가량으로 줄어든 값으로 계산되었다. 실험치와 계산치 사이에 다소간의 차이가 발생하는 것은 이론 해석 과정에서의 근사화(예: 식(5)로부터 식(6), (7)로의 근사화) 등에 기인하는 것으로 생각된다. 그러나, 본 연구에서 제안하는 수학 모델이 유압관로계의 맥동 감쇠 특성 평가에 가장 중요한 인자인 압력 맥동의 제1차 성분 진폭을 비교적 정확하게 예측할 수 있음을 상기 연구 결과로부터 확인할 수 있었다.

따라서, 본 연구에서 도출한 식 (17)은 금속 벨로스형 어큐물레이터를 갖는 유압관로계에서의 압력 맥동 진폭 특성 해석에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

5. 결 론

본 연구에서는 유압관로계에 설치된 금속 벨로스형 어큐뮬레이터의 압력 감쇠 특성을 해석과 실험을 통하여 상세히 조사하였다.

먼저, 금속 벨로스의 영구 변형 방지를 위하여 벨로스 내부에 가스와 함께 충전하는 유압 작동유의 양을 평가하기 위한 방정식을 유도하였다. 다음으로, 금속 벨로스형 어큐뮬레이터가 설치된 관로요소의 전달 매트릭스 모델을 제안하였다.

제안한 수학 모델의 신뢰성을 검증할 목적으로 관로계 압력 전파 특성 실험 및 이론 해석을 수행하였다. 실험에서 구해진 압력 맥동 신호의 시간 영역 및 주파수 영역 데이터를 나타내었으며, 주파수 영역 데이터의 실험치와 계산치를 비교 검토함으로써 본 연구에서 제안한 전달 매트릭스 수학 모델의 타당성을 입증하였다.

본 연구의 성과는 금속 벨로스형 어큐뮬레이터를 갖는 유압관로계의 압력 맥동 전파 특성 해석에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

1. Y. Kawarasaki et al., "Development of Hydraulic Active Suspension", 自動車技術, Vol. 44, No. 1, pp. 120~127, 1990
2. S. Buma et al., "Synthesis and Development of the Active Control Suspension", 日本機械學會論文集, Vol. 57, No. 534, pp. 599~605, 1991
3. 이일영, "유압 관로계 압력맥동 해석법(기초 이론, S/W작성법, 실험기법)", 부경대학교 유압제어연구실, pp. 32~36, 2001
4. 정윤규, "피스톤식 유압 펌프의 유량맥동 해석", 부경대학교 석사학위 논문, pp. 14~30, 1998
5. F. T. Brown, "The Transient Response of Fluid Lines", Trans. ASME, Ser. D, 84-4, pp. 547~553, 1962