

유압용 액셀 피스톤 펌프의 압력맥동 특성 (유압필터에 의한 고주파 압력맥동의 흡수)

김도태(경일대) · 이상기(한국기계연구원)

Abstract

In this paper, a Helmholtz resonator type hydraulic filter is proposed to absorb flow and pressure ripple produced from a axial piston pump. The basic principle of hydraulic filter is applied to propagation of pressure waves, reflection, absorption in cross section of discontinuity and resonance in the pipeline. This filter has advantage of the compact size and high degree of freedom of installation. The design scheme of hydraulic filter based on viscous wave theory are developed and manufactured two kinds of filter to investigate damping capability. It is experimently confirmed that these filter is absorbed to be about 20dB of flow and pressure ripple with high frequencies.

1. 서론

유압펌프는 유압시스템에 필요한 압력 에너지를 공급하는 중요한 요소인 동시에 유량·압력 맥동을 발생시켜 시스템의 진동·소음원이 된다. 현재, 이러한 고주파 유량맥동과 압력맥동을 제거하기 위하여 축압기(accumulator)가 많이 사용되고 있으나, 고압 대용량 시스템에서는 기하학적 형상과 중량이 커지기 때문에 설치상 난점이 있고, 응답성, 가격, 보수관리면에서 문제점이 많다. 특히 축압기의 구조상 고유진동수를 높이는 것이 한계가 있기 때문에 감쇠주파수 대역을 크게 할 수 없으며, 주로 저주파 압력맥동의 제거용으로만 사용되고 있다.

본 연구에서는 유압관로내의 기하학적 불연속면에서 압력파의 전파, 반사, 흡수현상을 응용한 새로운 유압필터(hydraulic filter)를 제안하였다. 또한 유압필터의 설계, 시작(試作) 및 감쇠능력에 대하여 검토한 결과, 제안한 유압필터는 유압펌프에서 발생하는 고주파 유량·압력을 효과적으로 흡수·제거할 수 있는 능력을 가지는 것을 실험을 통하여 확인하였다.

2. 유압필터의 임피던스 특성

Fig. 1은 제안한 고주파 압력맥동 제거용 유압필터의 개략도이다. 그림에서 유압필터는 축소관과 확대관으로 구성되며, 압력과 유량변동분의 라플라스 변환형을 각각 $P(s)$, $Q(s)$ 라 하면, 축소관 입·출구에서 압력·유량간 동특성은 다음 식으로 표시된다.

$$P_1(s) - P_2(s) = \frac{sZ_i L_e}{c} \{F_i(s_1)\}^2 Q_1(s) \dots (1)$$

$$Q_1(s) = Q_2(s)$$

여기서, $s_1 = a_1 \sqrt{s/\nu}$

$$Z_i = \rho c / \pi a_1^2 \dots \dots \dots (2)$$

$$F_i(s_1) = \left(1 - \frac{2J_1(s_1)}{js_1 J_0(s_1)}\right)^{-\frac{1}{2}} = \sqrt{\frac{I_0(s_1)}{I_2(s_1)}}$$

식에서, a_1 는 축소관의 반경, c 는 축소관내의 음속, I_0, I_2 는 제1종 변형Bessel함수, j 는 허수단위($=\sqrt{-1}$), L_1 은 축소관의길이, s 는 라플라스 연산자($=j\omega$), Z_i 는 축소관에서의 특성 임피던스, ω 는 각주파수, ρ, ν 는 유압작동유의 밀도와 동점도이다. 또한 식(1)에서 축소관의

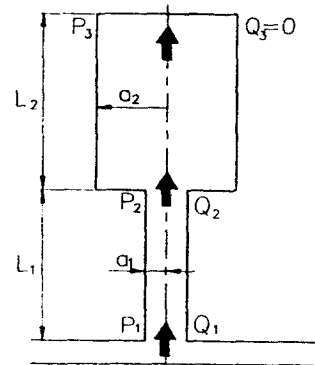


Fig.1 Schematic diagram of hydraulic filter.

상당길이 L_e 는 축소관의 길이 L_1 과 축소관에서 확대관으로 유압작동유가 유동하는 경우 관성을 고려한 상당길이이다.

또한, 확대관 입·출구에서 압력·유량간의 임피던스(impedance)는 다음 식으로 주어진다.

$$Z_d(s) = \frac{P_2(s)}{Q_2(s)} = \frac{Z_2(s_2) \cosh\{\lambda_2(s_2)L_2\}}{\sinh\{\lambda_2(s_2)L_2\}} \dots(3)$$

식(3)에서, L_2 , a_2 는 각각 확대관의 길이와 반경, $\lambda_2(s_2)$, $Z_2(s_2)$ 는 주파수에 의존하는 비정상 점성저항을 고려한 관로의 전파상수와 특성임피던스이며, 다음 식으로 주어진다⁽¹⁾.

$$\begin{aligned} \lambda_2(s_2) &= \frac{s}{c} \cdot F_i(s_2) \\ Z_2(s_2) &= \frac{\rho c}{\pi a_2^2} \cdot F_i(s_2) \dots\dots\dots(4) \\ s_2 &= a_2 \sqrt{s/\nu} \end{aligned}$$

식(1), (3)으로부터 유압필터의 무차원 임피던스 $\overline{Z}_f(s)$ 는 식(5)로 주어진다.

$$\begin{aligned} \overline{Z}_f(j\overline{\omega}) &= \frac{Z_f(j\overline{\omega})}{Z_i} = \frac{1}{Z_i} \frac{P_1}{Q_1} \\ &= j(k_1 + \zeta)\overline{\omega} \{ F_i(s_1) \}^2 \dots\dots\dots(5) \\ &\quad + \frac{F_i(k_2 s_1) \cosh\{jF_i(k_2 s_1)k_3 \overline{\omega}\}}{k_2^2 \sinh\{jF_i(k_2(s_1)k_3 \overline{\omega})\}} \end{aligned}$$

식(5)에서, 각각의 무차원수는 다음과 같다.

$$k_1 = L_1/a_1, \quad k_2 = a_2/a_1, \quad k_3 = L_2/a_1, \quad \overline{\omega} = a_1 \omega / c \dots\dots\dots(6)$$

유압작동유의 비정상 점성효과와 압축성에 의한 파동을 무시하고 고전적인 음향이론의 입장에서 고찰하면, 식(1), 식(3)은 다음 식으로 주어진다.

$$\overline{Z}_f = \frac{1}{j k_2^2 k_3 \overline{\omega}} \dots\dots\dots(7)$$

$$\overline{Z}_f = \frac{1 - (k_1 + \zeta)k_2^2 k_3 \overline{\omega}^2}{j k_2^2 k_3 \overline{\omega}} \dots\dots\dots(8)$$

식(8)에서 무차원 맥동 주파수는 식(9)로 주어진다.

$$\overline{\omega} = \frac{1}{\sqrt{(k_1 + \zeta)k_2^2 k_3}} \dots\dots\dots(9)$$

식(9)로 주어진 맥동 주파수에서 $\overline{Z}_f = 0$ 이 되며 이때 유압필터는 이론적으로 완전한 흡수능력을 가진다.

3. 유압필터의 설계 및 제작

유압작동유의 비점성 저항과 압축성에 의한 파동현상을 고려하여 유압필터의 감쇠특성에 대하여 고찰한다.

Fig.2는 $\overline{\omega} = 1.26 \times 10^{-3}$, $ac/\nu = 4.088 \times 10^4$, $k_1 = 17$ 인 경우, Fig. 3은 $\overline{\omega} = 4.996 \times 10^{-3}$, $ac/\nu = 1.022 \times 10^5$, $k_1 = 6.8$ 인 경우, 확대관의 무차원 반지름 $k_2 (= a_2/a_1)$ 를 변화시켜, 확대관의 무차원 길이 $k_3 (= L_2/a_1)$ 변화에 대한 유압필터의 임피던스 \overline{Z}_f 의 게인(gain)과 위상(phase)변화의 특성을 나타낸 것이다. 그림에서 ●, ■, ◆, ▲은 동일한 $\overline{\omega}$ 와 k_2 에 대하여 고전 음향이론에 의한 k_3 의 결과를 나타낸 것이다.

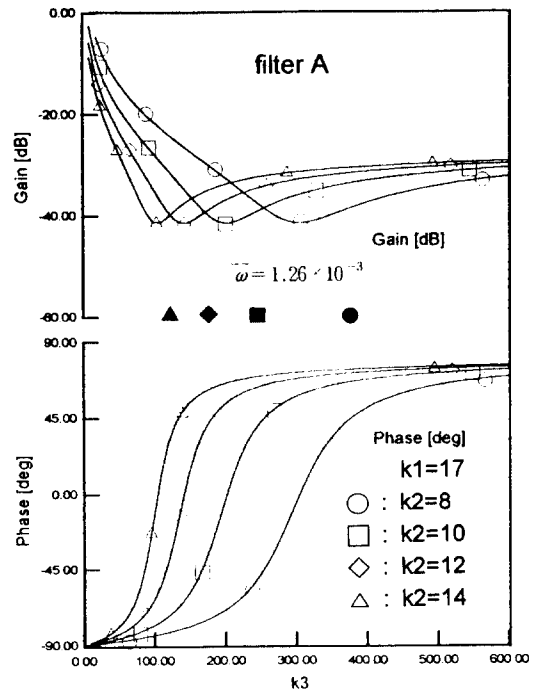


Fig.2 Impedance characteristics of filter A

그림에서, 유압필터의 반공진점 부근에서 무차원 임피던스 \bar{Z}_f 의 계인이 약 $-40 \sim -45$ dB정도까지 감소한다. 이것은 분기형 유압필터에서 -20 dB의 계인이 감소한 결과와 비교하면^{(1),(2)} 우수한 감쇠능력을 나타내며, 제안한 유압필터가 고주파 압력맥동 제거용 필터로서 응용될 수 있음을 알 수 있다. 또 동일한 무차원 반지름 k_2 에 대하여, 고전 음향이론에 의한 관로의 집중정수모델에 기초한 반공진점의 k_3 값과 비정상 점성저항을 고려한 결과와는 차이가 있다. 시뮬레이션 결과로부터 제안한 유압필터의 감쇠특성을 정확히 예측하기 위해서는 확대관 내부에서 작동유의 압축성에 의한 파동현상을 고려할 필요성이 있음을 알 수 있다.

Table 1은 설계·제작한 유압필터A, B의 제원을 나타낸 것이다.

Fig.4는 $k_1=17$, $k_2=10$, $k_3=200$, 반공진점의 주파수가 270 Hz인 경우, Fig. 5는 $k_1=6.8$, $k_2=4$,

Table 1 Dimension of Hydraulic filters

	filter A	filter B
a_1	1.0 [mm]	25.0 [mm]
a_2	10.0 [mm]	10.0 [mm]
L_1	17.0 [mm]	17.0 [mm]
L_2	200.0[mm]	325.0[mm]
k_1	17.0	6.8
k_2	10.0	4.0
k_3	200.0	130.0

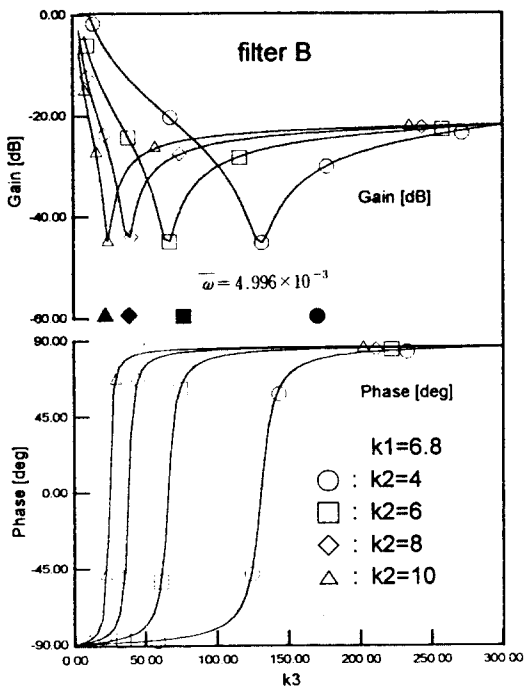


Fig.3 Impedance characteristics of filter B

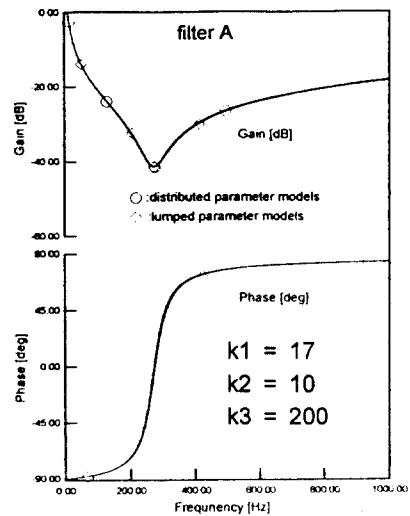


Fig.4 Frequency characteristics of filter A

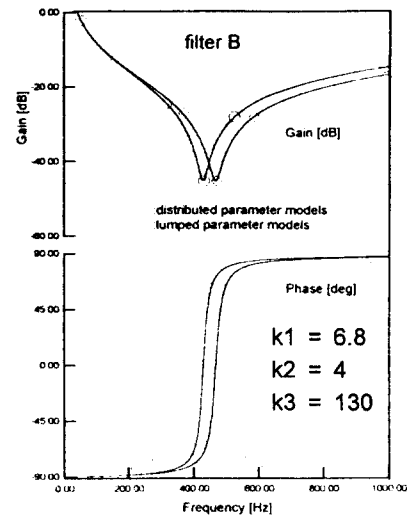


Fig.5 Frequency characteristics of filter B

$k_3=130$, 반공진점의 주파수가 530Hz인 경우에 대한 유압필터의 주파수 특성을 보드선도에 나타낸 것이다. 유압필터A, B에서 반공진점 주파수 270Hz는 실험에 사용한 사판식 액셀 피스톤 펌프의 기본주파수에 상응하며, 반공진점 주파수 530Hz는 기본주파수의 약 2배에 상당한다. 그림에서, ○은 작동유의 비정상 점성저항효과와 압축성에 의한 파동의 영향 및 확대관을 분포정수 관로모델로 고려한 경우의 결과이며, ◇은 축소관에서 점성효과를 고려하고, 확대관을 집중정수 관로모델로 해석한 결과이다. 여기서, 유압필터A는 확대관의 길이가 비교적 짧기 때문에 주어진 유압필터 설계 제원에 대하여 주파수 변화에 따른 계인과 위상이 거의 일치하지만, 유압필터B의 경우는 반공진점의 위치에 차이가 발생한다. 이것은 확대관의 길이가 길수록 집중정수 모델보다는 분포정수 관로모델을 사용하여야 필터의 특성을 정확히 예측할 수 있다는 것을 보여준다. 또 유압필터는 무차원 반지름 k_2 가 작고, 무차원 길이 k_3 가 클수록 임피던스 특성이 양호하며, 무차원 길이 k_3 가 클수록 점성파동이론을 고려한 결과와 확대관을 집중정수 관로모델로 해석한 결과와의 차이가 크다. 이것은 유압필터 설계시, 축소관은 길이에 비해 직경이 맥동흡수에 큰 영향을 미치며, 확대관은 직경에 비해 축방향의 길이가 길수록 맥동흡수 능력이 우수하다는 것을 의미한다. 유압필터의 축방향의 길이에 비해 직경이 크게 되면, 유압필터의 축소관과 확대관의 접속부에서 비평면 확대파동의 영향이 상대적으로 증대하게 된다. 또한 유압필터 설계시 같은 조건하에서 고전음향이론과 같이 유압필터를 집중정수 관로모델로 해석하면 유압필터의 특성을 결정하는데 중요한 인자인 반공진점의 주파수를 정확하게 예측할 수 없으며, 이러한 경향은 축소관이 짧고, 확대관의 길이가 길수록 현저하다.

4. 실험장치 및 실험방법

Fig. 6은 실험장치의 개략도이다. 유압필터의 특성은 사판식 액셀 피스톤 펌프에서 발생하는

고주파 유량·압력맥동의 감쇠·흡수·제거능력으로 조사하였고, 펌프 송출구 직후의 매니폴드에 부착하여 압력맥동이 관로의 하류로 전파되는 것을 억제함으로써 유압시스템의 저소음화룰 도모한다. 유압펌프의 송출유량은 사판의 경사각을 변화시켜 조절한다. 펌프의 송출구에는 내경 20mm, 길이 1570mm의 강관으로 배관하였고, 펌프 송출구 직후의 압력 $p_1(t)$, 관로 하류단의 압력 $p_2(t)$ 는 고응답형 압력변환기를 사용하여 측정하며, 원통형 초오크 비정상 유량계(CCFM으로 표기함)^{(4),(5)}를 사용하여 관로 하류단의 비정상 유량을 고응답으로 측정하였다.

압력 $p_1(t)$, 하류압력 $p_2(t)$, CCFM의 압력차 Δp 는 A/D변환기(샘플링 주파수:15kHz)에서 이산화한 후, 마이크로 컴퓨터(CPU 80486)에 입력된다. 유압작동유의 온도는 CCFM 직후의 매니폴드에 설치된 써미스터형 온도계로 측정하였고, 관로의 하류단에 유압필터를 설치하였다. 실험은 작동유의 온도를 $40 \pm 1^\circ\text{C}$ 의 범위 내에서 수행하였으며, 유압작동유는 HVI ISO VG32(동점성계수 $\nu = 0.32\text{cm}^2/\text{s}$, 40°C)를 사용하였다.

실험에 사용한 유압필터는 반공진점의 주파수가 유압펌프에서 발생하는 유량·압력 맥동의 기본주파수와 일치하도록 시뮬레이션 결과를 기초로 하여 유압필터A를 제작하였다.

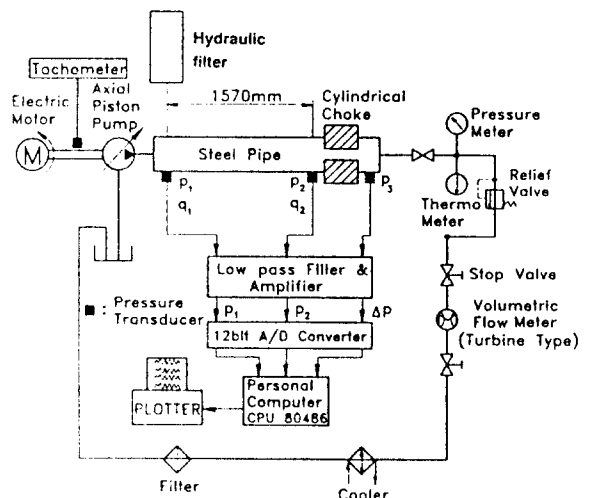


Fig.6 Experimental apparatus

또한 반공진점의 주파수가 기본주파수의 2배가 되도록 유압필터B를 설계·제작하여 실험하였다.

5. 실험결과 및 고찰

Fig.7~Fig.8은 설정압력 100bar, 평균유량 60cm³/s, 80cm³/s인 경우, 유압필터A와 B의 有無에 따른 압력맥동 파형을 측정된 결과이다. 그림에서 유압필터를 설치한 경우 약 1~2bar까지 압력맥동이 감소함을 알 수 있다.

Fig. 9~Fig.10은 관로의 설정압력 100bar, 평균유량 60cm³/s 에서 유압필터A와 B를 개별적으로 설치하였을 때와 동시에 설치한 경우에 대한 유량·압력맥동 파형의 주파수 분석 결과이다. 그림에서, 유압필터를 설치하지 않은 경우, 유량·압력맥동 $q_1(t)$, $p_1(t)$ 에 대하여 기본주파수인 270Hz부근에서 피크값이 나타나며, 기본주파수의 정수배에서 2차, 3차, 제4차 고조파(高調波) 성분이 나타남을 알 수 있다. 유압필터A는

기본주파수 성분을 억제할 목적으로 설계하였기 때문에 실험결과 유압필터A를 설치한 경우 기본주파수 성분은 약 -20dB 정도 억제 되었고, 2, 3차의 고조파 성분에는 거의 영향을 미치지 않는다. 제2차의 고조파 성분을 제거할 목적으로 유압필터B를 설계·제작하여 실험한 결과 유량맥동과 압력맥동의 2차의 고조파 성분이 흡수됨을 알 수 있다. 동일한 실험조건에서 유압필터A와 B를 동시에 설치하여 실험한 결과 기본주파수와 제2의 고조파 성분이 제거됨을 알 수 있고, 약 -20dB의 게인이 감소하였다. 그러나 3차 이상의 고조파 성분은 거의 영향을 받지 않는다. 이것은 유압필터의 임피던스 특성이 반공진점을 중심으로 어느 일정한 폭의 주파수 영역에 대해 낮은 임피던스 요소가 되기 때문이다. 따라서 3차 고조파 성분을 흡수하기 위해서는 반공진점의 주파수를 3차의 고조파 주파수에 일치하도록 유압필터를 설계할 필요가 있다. 사판식 액셀 피스톤 펌프의 송출구 직후 및 관로 하류단의 유량·압력맥동에 대하여 기본주파수 성분 뿐만 아니라 제2, 제3의 고조파 성분의 게인을 약 -20dB정도 감소 시킬 수 있음을 확인하였다.

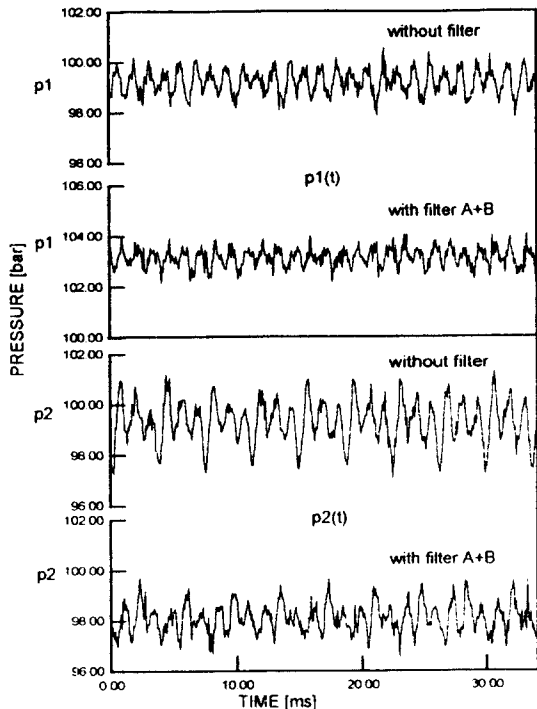


Fig.7 Comparison of pressure ripple waveforms for 100bar, 60cm³/s

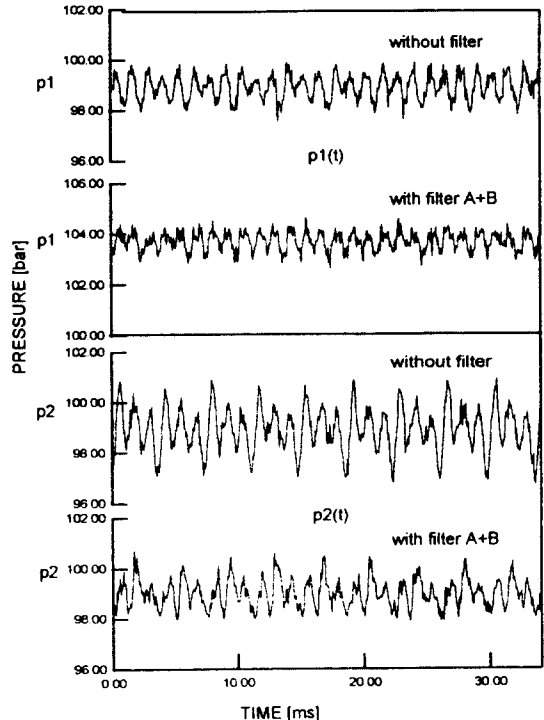


Fig.8 Comparison of pressure ripple waveforms for 100bar, 80cm³/s

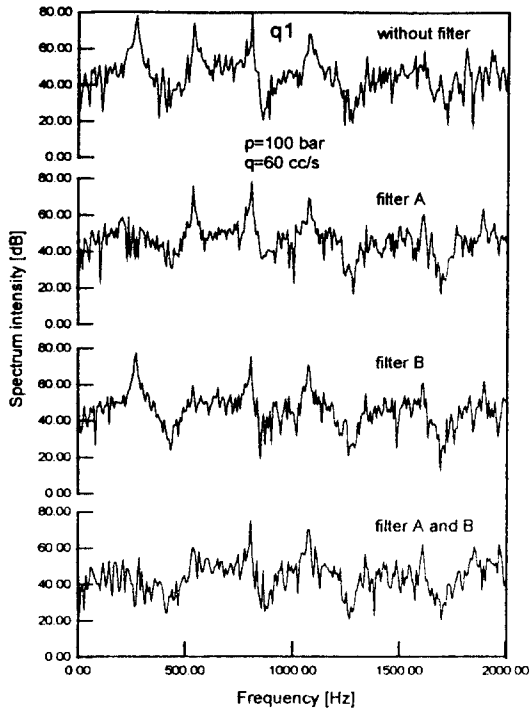


Fig.9 Comparison of frequency spectra for flow ripple q_1

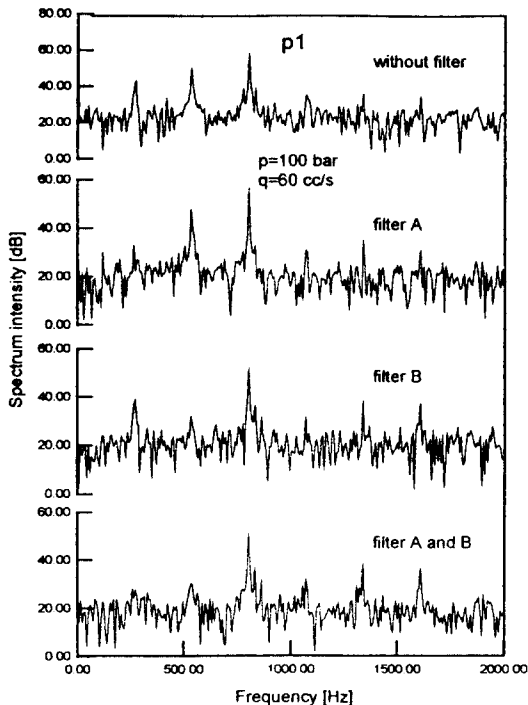


Fig.10 Comparison of frequency spectra for pressure ripple p_1

6. 결론

본 연구에서는 유압펌프에서 발생하는 고주파 유량·압력맥동을 흡수·제거할 수 있는 유압필터의 동특성 모델을 제안하였고, 설계, 제작한 유압필터의 맥동 제거능력에 대하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유압필터의 맥동감쇠능력은 약 -20dB 정도이다.

(2) 유압필터의 임피던스 특성에서, 축소관은 길이보다 직경변화가 큰 영향을 미치며, 확대관은 직경에 비하여 축방향의 길이가 길수록 맥동 흡수 능력이 우수하다.

(3) 확대관의 관로 길이가 직경에 비해서 긴 경우에는 분포정수 관로모델로 고려하여 설계하여야 한다.

이상의 결과로부터, 본 연구에서 제안한 유압필터는 유압펌프에서 발생하는 고주파 압력맥동 및 유량맥동을 흡수하는데 매우 유효하며, 설치의 자유도가 높기 때문에 유압펌프의 송출구 직후에 설치함으로써 관로의 하류로 전파되는 유체전파소음을 저감시켜 유압시스템의 저소음화에 유효하다.

참고문헌

1. 鷲尾, 小西, 植田, 大態, 油壓管路における波動現象の研究(第16報), 日本機械學會論文集(B), 54卷, 504, pp. 1953, 1988.
2. 鷲尾成一, 小西忠孝, 헬름홀츠共鳴器型油壓脈動フィルタの研究, 日本機械學會論文集(B), Vol. 53, No. 504, pp. 729, 1988.
3. Brown, F. T., The Transient Response of Fluid Line, Trans. ASME, J. of Basic Eng. Series D, Vol. 84, No. 4, pp. 547, 1962.
4. 中野, 横田, 圓筒形絞りの動特性を利用した瞬時流量計, 油壓と空氣壓, Vol. 17, No. 4, pp. 311, 1986.
5. 横田眞一, 金道泰, 中野和夫, 油壓管路の動特性を利用した遠隔瞬時流量計測手法, 油壓と空氣壓, Vol. 21, No. 2, pp. 189, 1990.