

## 맥동흡수용 유압필터에 의한 유압전동장치의 압력맥동 감쇠

김도태\*

(논문심사일 2001. 12. 24, 심사완료일 2002. 3. 11)

### Pressure Ripple Reduction in Hydrostatic Transmissions by Using a Hydraulic Filter

Do-Tae Kim\*

#### Abstract

This paper deals with pressure ripple attenuation for separated-type Hydrostatic Transmission (HST) consisting of a variable axial piston pump connected in an open loop to a fixed displacement axial piston motor. Pressure ripples in HST is major source of vibration, which can lead to fatigue failure of components and cause noise. In order to reduce the pressure ripple, an annular tube type hydraulic filter is proposed to attenuate pressure ripples with the high frequencies components to achieve better noise reduction in HST. The basic principle of a hydraulic filter is applied to propagation of pressure wave, reflection, absorption in cross section of discontinuity and resonance in the hydraulic pipeline. It is experimentally shown that the hydraulic filter attenuates about 30~40dB of pressure ripple with high frequencies. These results will assist in modeling and design of noise reduction in hydraulic control systems, and provide a means of designing a quieter HST.

**Key Words :** Fluid Power Systems(유공압 시스템), Hydrostatic Transmission(유압전동장치), Attenuation of Pressure Ripple(압력맥동 감쇠), Annular Tube Type Hydraulic Filter(2중 관로형 유압필터)

### 1. 서론

유압전동장치(hydrostatic transmission: HST)는 무단변속이 가능하고, 강성이 높고, 제어성이 탁월하기 때문에 건설차량, 하역운반기계, 농기계, 산업용 차량에 많이 사용된다.

HST에는 피스톤이 7~11개인 액셀 피스톤펌프와 모터가 주로 사용되며, 피스톤 펌프와 모터는 그 구조상 실린더

블록의 회전각도에 따라 배제용적(displacement)이 변하기 때문에 유량맥동이 발생하게 된다.

특히 HST의 유압펌프에서 발생된 유량맥동은 펌프의 내부 임피던스, 유로의 동특성 및 부하변동에 따른 유압모터의 임피던스 특성에 따라 고주파 압력맥동(pressure ripple)을 유발시킨다.

Kim 등은 HST용 사판식 액셀 피스톤펌프와 모터에서

\* 주저자, 경일대학교 기계공학부 (dtkim@bear.kyungil.ac.kr)  
주소: 712-701 경북 경산시 하양읍 부호리 33번지, Tel: 053-850-7126

발생되는 유량맥동을 고속응답으로 계측할 수 있는 방법을 제안하였다<sup>(1)</sup>. 또한 HST의 유량맥동과 압력맥동은 기본주파수 성분뿐만 아니라 약 10차 정도의 고조파 성분이 나타남을 실험적으로 확인하였다. 이러한 고주파 압력맥동은 HST의 진동·소음원이 되며, HST의 수명과 신뢰성에도 악영향을 미치므로 압력맥동을 저감시키는 것이 저소음화 설계에 중요한 인자가 된다.

산업용 유압시스템에서는 축압기(accumulator)를 사용하여 압력맥동이나 충격압력을 저감시킨다. 그러나 HST에서는 설치공간, 중량, 응답성, 유지관리 등의 제약 때문에 축압기를 장착하는 것이 어렵다. 또 축압기의 구조상 압력맥동의 감쇠주파수 대역을 크게 할 수 없기 때문에 고주파 압력맥동 제거용으로는 적합하지 않다.

Per Larsson은 분포정수계 관로모델을 이용하여 챔버형(chamber type) 맥동감쇠기(attenuator)를 제안하였고, HST의 유량맥동 진폭감소에 대한 계산 결과를 제시하였지만, 실험결과에 대해서는 구체적으로 언급되어 있지 않다<sup>(2)</sup>. 아울러 팽창공명기형 맥동 감쇠기<sup>(3)</sup>, Quincke 관로형<sup>(4)</sup> 또는 분기관형 유압필터<sup>(5)</sup>와 같은 챔버형 맥동감쇠기는 어떤 특정 주파수의 압력맥동이나 유량맥동 제거에 사용되며, HST와 같이 유압펌프와 모터에서 발생하는 다양한 주파수 성분이 포함된 압력맥동과 유량맥동을 제거할 경우에는 문제점이 많다.

본 연구에서는 HST의 유압펌프와 모터에서 발생하는 압력맥동을 저감시키기 위해, 2중 관로형 유압필터(annular tube type hydraulic filter)를 제안하였다. 이것은 유압용 고무호스 속에 금속재 튜브를 삽입하여 제작한 2중 관로형 유압호스로서, 맥동감쇠기와 유압관로의 기능을 일체화한 것이다. 따라서 2중 관로형 유압필터를 HST의 유압펌프와 모터를 연결하는 고·저압관로에 사용하면 작동유를 전달하는 유압관로의 기능과 압력맥동을 저감시키는 맥동감쇠기의 역할을 동시에 수행하게 된다. 여기서는 제안한 2중 관로형 유압필터의 시작품을 설계·제작하여 분리형 HST에 장착한 후, 실험을 통하여 HST의 압력맥동 감쇠특성을 검토하였다.

## 2. 2중 관로형 유압필터

### 2.1 구조 및 특징

Fig. 1은 HST의 압력맥동 감쇠용으로 설계·제작한 2중 관로형 유압필터 개략도를 나타낸다. Fig. 1에서, 2중 관로의 내부는 내경 12mm인 금속재 스파이럴 튜브(flexible spiral

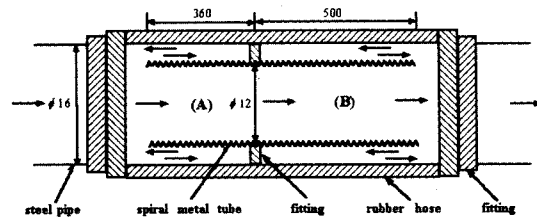


Fig. 1 Schematic diagram of an annular tube type hydraulic filter

metal tube)가 삽입되어 있고, 그 외부는 내경 16mm인 유압용 고압 고무호스로 둘러싸여 있다. 내부의 금속재 스파이럴 튜브는 HST의 작동유를 유압펌프에서 유압모터까지 공급하는 고압측 관로의 역할을 하기 때문에 적절한 강성을 가져야 한다. 아울러 관마찰계수의 증가와 댐핑작용 등에 의한 압력파의 흡수 및 산란의 효과를 증가시킬 목적으로 스파이럴 튜브로 제작하였다<sup>(6)</sup>. 또한 이것의 외경과 고무호스의 내경 사이에 형성된 환상형(環狀形) 2중 관로부는 주관로(main tube)인 금속재 튜브에서 분기되어 관로의 한쪽 끝단이 폐쇄된 분기관로(side-branch tube)를 형성하고 있다.

Fig. 1에서, 2중 관로형 유압필터는 HST의 유압펌프와 유압모터에서 발생하는 압력맥동을 동시에 제거할 수 있도록 (A), (B)부분으로 나누어 제작하였다. 그림의 (A)부분은 유압펌프, (B)부분은 유압모터에서 발생하는 압력맥동이 제거되도록 설계하였다.

### 2.2 설계 및 제작

2중 관로형 유압필터는 Quincke 관로형 또는 분기관형 유압필터와 같이 주관로와 분기관로 사이에 압력파의 상호 간섭 원리를 응용하여 압력맥동을 감쇠시키는 것이다. 현재 Quincke 관로형이나 분기관형 유압필터는 1/4 파장 길이를 갖는 분기관로 또는 1/2 파장 길이를 갖는 병렬관로를 주관로에 부착하여 압력맥동이 감쇠되도록 설계하고 있다. 이러한 유압필터를 HST에 적용할 경우, 유압필터의 기하학적 형상과 중량이 매우 커지므로 설치 공간상의 어려움이 많다. 특히 HST가 산업용 차량에 장착될 경우에는 중량 증가로 인한 연비의 문제점도 대두된다. 그러나 제안한 2중 관로형 유압필터는 외부 관로가 고무호스이므로 금속관에 비하여 관 벽면의 강성이 작고, 압력파의 전파속도도 느다. 따라서 압력파의 파장이 짧아지고, 1/4 파장을 갖는 분기관로나 1/2 파장을 갖는 병렬관로를 형성하도록 유압필터를 설계하면 고주파 압력·유량맥동을 효과적으로 제거할 수 있다<sup>(6)</sup>.

Fig. 1에 도시한 2중 관로형 유압필터의 크기는 1/4 파장 길이를 갖는 분기관로를 형성하도록 설계·제작하였다. Fig. 1에서, 유압필터 (A)부분의 길이는 360mm로써, HST의 유압펌프가 1780rpm으로 회전할 때 압력맥동의 기본주파수 성분(약 267Hz)이 제거될 수 있도록 하였다. 유압모터에서 발생하는 압력맥동은 Fig. 1의 (B)부분에서 제거하게 되며, 이 경우는 유압모터의 회전수가 부하특성에 따라 변할 수 있기 때문에 특정한 주파수를 선택하여 설계할 필요가 있다. 여기서는 유압모터의 피스톤이 9개이고, 회전수가 1200rpm인 조건을 설정하여, 그 기본주파수에 상당하는 주파수 성분을 제거하도록 (B)부분의 길이를 500mm로 제작하였다. 또한 압력맥동의 주파수 성분 중에서 어떤 특정 주파수 성분을 제거할 때는 유압필터 (A), (B)부분의 길이를 변화시켜 용이하게 설계·제작할 수 있는 장점이 있다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험장치

Fig. 2는 제안한 2중 관로형 유압필터의 압력맥동 감쇠특성을 조사하기 위해 사용한 실험장치의 개략도이다. 실험은 개회로·분리형(open-loop·separated-type) HST에서 수행하였다<sup>(1)</sup>. Fig. 1에 도시한 2중 관로형 유압필터는 실험에 사용한 HST용 가변용량형(variable type) 사판식 액셀 피스톤 펌프(주펌프라 함)의 송출구와 정용량형(fixed type) 사판식 액셀 피스톤 모터(모터라 함)의 흡입구를 연결하는 고압측 관로에 배관하였고, 유압필터의 상류단 압력  $p_1(t)$ 와 하류단 압력  $p_3(t)$ 를 계측하여 맥동 감쇠능력을 조사하였다.

HST의 주펌프는 3.7kW 3상 유도전동기로 구동되며, 유

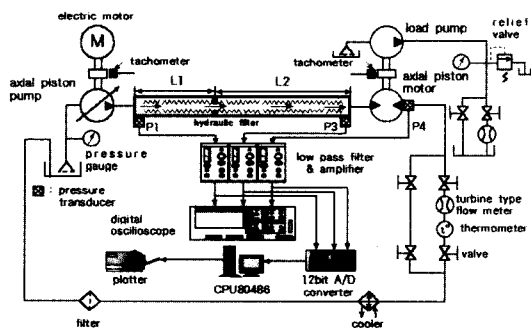


Fig. 2 Experimental apparatus

Table 1 Components used in experiment

	HST pump	HST motor	load pump
number of piston	9	9	9
displacement(cc/rev)	34.2	24.7	26.1
Max. pressure (bar)	continous.	241	210
	intermittent	310	250
type	variable	fixed	fixed

압모터 출력측은 부하용 유압펌프와 직결되어 있다. HST에 작용하는 부하는 부하용 유압펌프의 송출압력과 유량을 조절하여 임의로 설정할 수 있도록 제작하였다. 모터의 회전수는 주펌프가 가변용량형이므로 송출유량을 제어하여 변화시켰다. 주펌프와 모터의 회전수는 디지털 타코미터로 측정하였다. 또한 모터 출구에는 교축밸브로 출구압력을 조절할 수 있도록 제작하였고, 저압측 관로는 오일탱크에 개방되도록 배관하여 작동유의 냉각을 도모하였다.

HST의 주펌프와 모터에서 발생한 압력맥동과 유압필터 상·하류단의 압력맥동 감쇠특성을 조사하기 위해, 주펌프의 송출압력  $p_1(t)$ (유압필터 상류단 압력), 모터 입구압력  $p_3(t)$ (유압필터 하류단 압력) 및 모터 출구압력  $p_4(t)$ 를 고속응답형 압력변환기(고유진동수 109kHz)로 측정하였다. 모터 출구압력  $p_4(t)$ 는 모터 출구의 압력변화가 HST에 미치는 영향을 검토하기 위하여 계측하였다. 그리고 주펌프와 모터를 연결하는 고압관로의 중앙단면의 압력  $p_2(t)$ 는 필요에 따라 계측할 수 있도록 메니폴드를 설치하였다. 계측된 4개의 압력맥동은 고정밀도 증폭기와 저역통과필터를 거쳐 12bit A/D변환기(샘플링 주파수 5kHz)에서 이산화되어 마이크로 컴퓨터(CPU 80486)에 입력된다. HST의 작동 유량과 부하용 펌프의 송출유량은 터빈형 유량계로 계측하였고, 유온은 온도센서로 검출하였다. 유압 작동유는 온도 40℃에서 동점도 0.46cm<sup>2</sup>/s인 ISOVG46을 사용하였다.

Table 1은 실험에 사용한 주펌프, 모터, 부하용 펌프의 재원을 나타낸 것이다.

#### 3.2 실험결과 및 고찰

##### 3.2.1 유압필터를 설치하지 않은 경우

Fig. 3은 실험에 사용한 개회로·분리형 HST에서 주펌프와 모터 사이의 고압관로에 일반유압용 고압강관으로 배관한 경우의 계측 결과이다. Fig. 3에서,  $p_1(t)$ 는 펌프 송

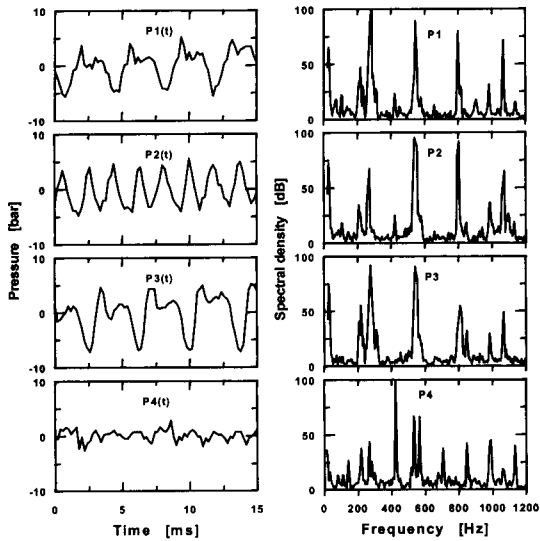


Fig. 3 The measured waveforms and amplitude spectra of pressure ripple for HST

출구,  $p_2(t)$ 는 고압관로의 중앙단면,  $p_3(t)$ 는 주펌프에서 180cm만큼 떨어진 모터 입구,  $p_4(t)$ 는 모터 출구의 압력맥동 변동분과 주파수분석 결과를 나타낸다. 실험에서는 HST 주펌프의 회전수 1780rpm, 평균 작동압력 70bar, 모터의 회전수 1000rpm 및 모터 출구의 배압  $p_4(t)$ 를 7bar로 설정하였다. 실험조건에서 HST용 주펌프는 피스톤이 9개, 회전수가 1780rpm으로 일정하기 때문에 기본주파수는 약 267Hz에 해당된다. 실험에서 모터의 회전수는 1000rpm으로 일정하게 유지하였지만, 일반적으로 모터는 부하특성에 따라 회전수가 변하기 때문에 압력맥동의 기본주파수도 변하게 된다. 분리형 HST의 압력맥동은 주펌프 또는 모터 안에서 발생하는 압력맥동과는 차이점이 많으며, 이것은 주파수분석 결과에서 알 수 있다<sup>(1)</sup>. 특히 고압측 관로는 주펌프의 압력맥동  $p_1(t)$ 와 모터 입구 압력맥동  $p_3(t)$ 가 상호작용하여 정상파(standing wave)를 형성하고, 관로 중앙단면의 압력파형  $p_2(t)$ 는 이것의 영향으로 압력파형의 형상이 크게 변하게 된다. 모터 입구 압력맥동  $p_3(t)$ 는 주펌프의 압력맥동  $p_1(t)$ 와 유사한 파형처럼 보이지만, 정량적으로 아주 다르다. 유압펌프에서 발생하는 압력맥동의 실험결과에서, 유압펌프만의 압력맥동 파형은 펌프의 기본주파수 성분과 그 정수배에 해당하는 고조파 성분이 규칙적으로 나타나는 것을 실험적으로 확인하였다<sup>(1)</sup>. 그러나 분리형 HST

에서는 유압펌프와 모터가 관로로 연결되어 있기 때문에 고압측 관로의 압력맥동 파형  $p_1(t)$ ,  $p_2(t)$ ,  $p_3(t)$ 에서는 주펌프와 모터의 기본주파수 성분뿐 아니라 그 정수배에 해당하는 고조파 성분이 복합적으로 나타난다. 100Hz 이하의 저주파수 영역에서는 펌프와 모터의 구동 주파수 성분이 주로 나타난다. 저압측 관로의 압력맥동  $p_4(t)$ 는 모터의 송출측 압력이므로 고압측 관로와 같이 주펌프와 모터의 압력맥동이 상호간섭을 일으키지 않는다. 따라서 압력맥동 파형도 모터에 대한 기본주파수 성분과 그 정수배의 고조파 성분이 지배적으로 나타남을 주파수 분석 결과로부터 알 수 있다.

### 3.2.2 유압필터를 설치한 경우

Fig. 4 (a), (b), (c), (d)는 HST 주펌프의 회전수 1780rpm, 평균 작동압력 70bar 및 모터 출구의 배압  $p_4(t)$ 를 7bar로 일정하게 유지한 상태에서 모터의 회전수를 1000~1800rpm까지 단계적으로 변화시켜 실험한 결과를 나타낸 것이다. 제한한 2중 관로형 유압필터는 HST의 주펌프와 모터 사이에 배관하였다. Fig. 4에서,  $p_1(t)$ ,  $p_3(t)$ 는 주펌프와 모터 사이를 일반 유압용 강관으로 배관한 경우의 압력맥동 파형,  $p_1'(t)$ ,  $p_3'(t)$ 는 2중 관로형 유압필터로 배관한 경우의 제척파형이다. 고압측 관로에 유압필터를 사용한 경우, 모터 입구의 압력맥동  $p_3'(t)$  변동분의 진폭은 강관의 경우에 비교하여  $\pm 3 \sim 4$ bar로 크게 감소되며, 회전수 변화에도 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다. Fig. 1의 유압필터 (B)부분은 피스톤이 9개이고, 모터의 회전수가 1200rpm인 조건에서 압력맥동의 차단 주파수를 약 180Hz로 설계·제작하였지만, 주파수분석 결과에서는 모터의 회전수 변화에 따른 기본주파수 성분뿐만 아니라 그 정수배에 해당하는 고조파 성분까지 약 20~30dB정도로 대폭 감소함을 알 수 있다.

특히 Fig. 4(b)는 유압모터의 회전수가 2중 관로형 유압필터의 설계 차단 주파수인 경우에 해당되며, 모터의 회전수가 1200rpm인 경우에 압력맥동은 거의 제거되며, 압력맥동의 스펙트럼도 기본주파수 성분뿐만 아니라 2차, 3차의 고조파 성분까지 약 50dB정도까지 대폭적으로 감소됨을 알 수 있다. 또 Fig. 4 (c), (d)는 모터의 회전수가 1500rpm, 1800rpm에 대한 실험결과이며, 이 경우도 압력맥동의 진폭이 크게 감소됨을 볼 수 있다.

Fig. 5는 고압측 관로에 압력맥동의 공진현상이 발생하는 경우에 대한 2중 관로형 유압필터의 감쇠특성을 나타낸 것

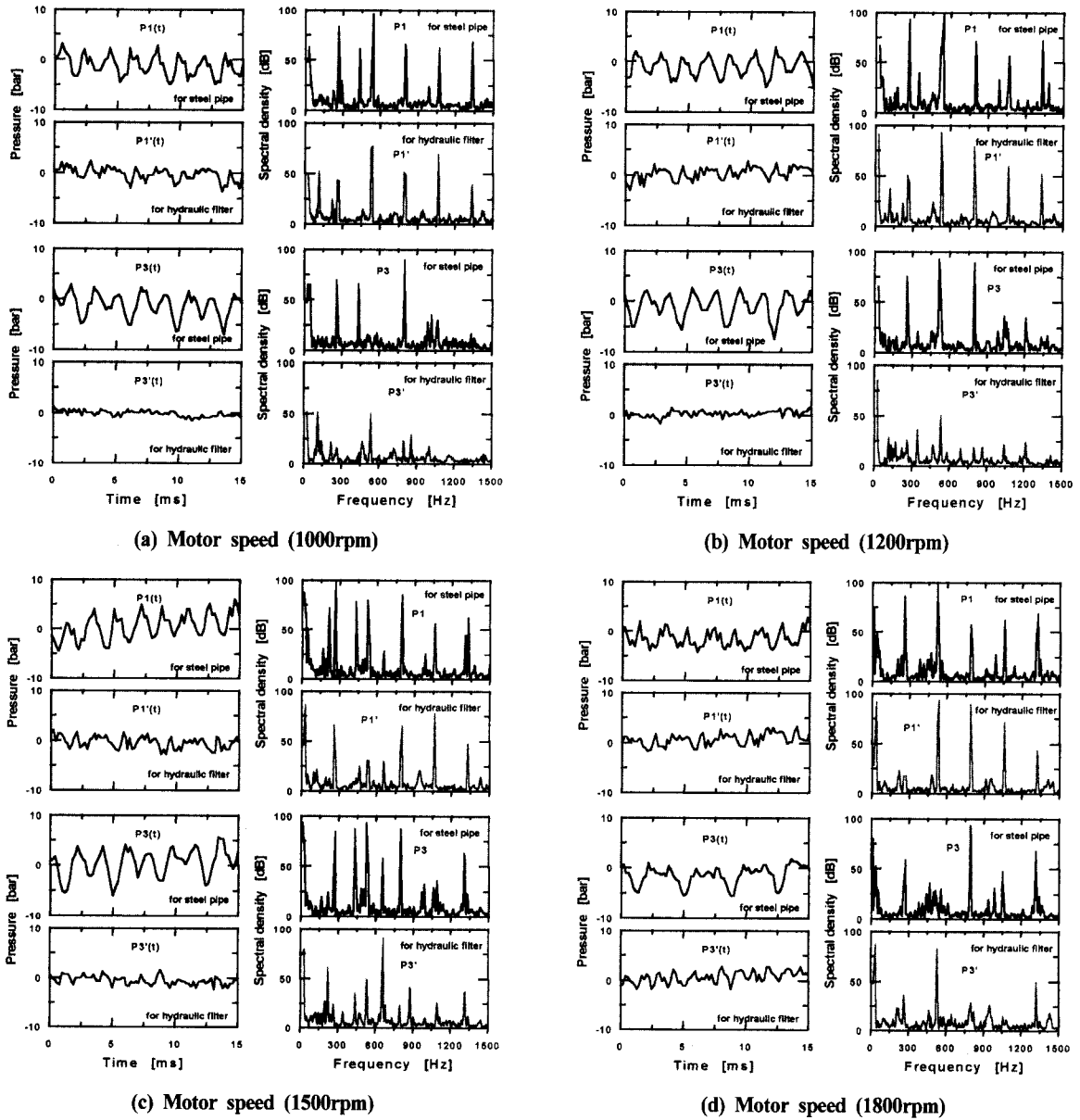


Fig. 4 Comparison of the measured pressure ripple waveforms with a hydraulic filter

이다. 실험에서, 주펌프와 모터의 회전수를 1780rpm으로 일정하게 유지시켜 강제적으로 공진을 일으킨 후, 강관인 경우와 유압필터로 배관한 경우의 압력맥동 감쇠능력을 비교 검토하였다. 압력맥동 계측파형을 비교해 보면, 공진이 발생한 경우에도 압력맥동 변동분의 진폭이 크게 감소함을 알 수 있다. 또한 주펌프와 모터의 기본주파수 성분

도 현저하게 감소함을 알 수 있다. 이것은 본 연구에서 제안한 HST용 유압필터의 설계에 대한 타당성을 입증하는 하나의 근거가 된다.

이상, HST용 2중 관로형 유압필터를 설계·제작하여, HST 시스템의 고압측 관로에 적용하여 압력맥동 감쇠능력 실험을 수행한 결과, HST 시스템에서 발생하는 고주파 압

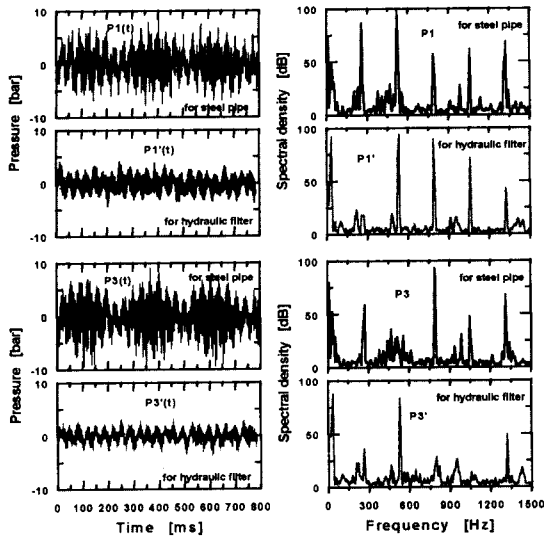


Fig. 5 Comparison of the measured pressure ripples under resonance

력맥동을 흡수·제거하는 데 유효한 방법임을 실험적으로 확인하였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 개회로·분리형 HST의 유압펌프와 유압모터에서 발생하는 고주파 압력맥동을 저감시키기 위해 2중 관로형 유압필터를 제안하고 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) HST의 유압펌프와 유압모터에서 발생하는 압력맥동을 고속응답으로 예측하고, 주파수 분석한 결과, 기본주파수 성분뿐만 아니라 약 10차수(次數) 정도의 고주파 성

분이 나타난다.

- (2) HST용 2중관로형 유압필터는 약 30~40dB 정도의 압력맥동 스펙트럼의 감쇠능력을 가지며, 감쇠 주파수 대역도 설계 차단주파수 성분뿐만 아니라 고조파 성분까지 부분적으로 제거됨을 실험적으로 확인하였다.
- (3) 2중 관로형 유압필터는 맥동 감쇠능력이 우수하고, 소형, 경량이며, 구조가 간단하므로 산업용 유압시스템의 고주파 압력맥동 감쇠기로 활용분야가 매우 넓다.

#### 참고 문헌

- (1) 김도태, 윤인균, “유압전동장치의 유량·압력맥동 특성”, 한국공작기계학회논문집, Vol. 10, No. 1, pp. 120~126, 2001.
- (2) Per Larsson, “Flow Ripple Reduction in Hydrostatic Transmission by mean of Fluid Power Attenuators”, Proc. of 2nd JHPS Int. Sympo. on Fluid Power, pp. 341~348, 1993.
- (3) 김도태, 이상기, “팽창공명기형 맥동 감쇠기의 임피던스 특성(유압용 피스톤 펌프의 유량·압력맥동 감쇠)”, 한국공작기계학회논문집, Vol. 9, No. 1, pp. 88-95, 2000.
- (4) G. W. Stewart, “The Theory of the Herschel-Quincke Tube”, Physical Review, Vol. 31, pp. 696~698, 1928.
- (5) 鷲尾成一, 小西忠孝, “油壓管路における波動現象の研究(第8報)”, 日本機械學會論文集(B), Vol. 47, No. 421, pp. 1757, 1989.
- (6) 김도태, 이종만, “자동차 동력조향용 유압호스의 압력맥동 감쇠특성”, 한국공작기계학회논문집, Vol. 7, No. 3, pp. 22~28, 1998.