

# HST용 유압펌프·모터의 압력맥동 저감 특성

김도태\*

## Pressure Ripple Reduction of Hydraulic Pump-Motor in HST

Do-Tae Kim\*

### Abstract

This paper deals with pressure ripple and noise reduction characteristics for a 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 proposes to absorb pressure ripples with the high frequencies components to achieve better noise attenuation in HST. The basic principle tube is applied to propagation of pressure wave, reflection, absorption in cross section of discontinuity and resonance in the hydraulic pipeline. It is experimently confirmed that a hydraulic filter is absorbed to be 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 here, should provide a means of designing a quieter HST

**Key Words** : Hydrostatic transmission (HST, 유압전동장치), Pressure ripple reduction (압력맥동 저감), Hydraulic filter (유압필터), Fluid power systems (유공압 시스템)

### 1. 서론

유압전동장치(hydrostatic transmission, 이하 HST 라 함)는 유압펌프와 유압모터를 개회로 또는 폐회로로 구성하여 기계적 회전동력을 전달하는 전동장치(傳動裝置)이고, 유압펌프나 유압모터의 배제용적(displacement)을 변화시켜 입력축과 출력축의 속도비와 토크비를 무단변속할 수 있다. HST는 소형·경량이고, 고강성이며, 제어성이 탁

월하기 때문에 건설차량, 하역운반기계, 농기계, 산업용 차량의 주행용으로 많이 사용된다.

HST에서는 유압펌프와 유압모터의 유량맥동에 의해 발생하는 각각의 압력맥동 성분이 상호 간섭하여, 펌프 또는 모터 자체의 압력맥동보다도 복잡한 형태의 압력맥동이 발생된다. 이러한 압력맥동은 시스템의 진동·소음원이 될 뿐만 아니라 기기의 수명과 신뢰성에도 악영향을 미치므로 압력맥동 특성을 규명하는 것은 저소음화 설계시 중요한 인자가 된다.

본 연구에서는 가변용량형 사판식 액셀 피스톤 펌프와 정용량형 사판식 액셀 피스톤 모터 및 고·저압관로로 구성된 개회로·분리형 HST의 압력맥동 특성을 조사하기

\* 김도태, 경일대학교 기계공학부 (dtkim@kiu.ac.kr)  
주소: 712-701 경북 경산시 하양읍 부호리 33번지

위하여, 작동압력, 평균유량, 관로의 길이, 유압모터의 회전수 및 배압을 변화시켜 실험을 수행하였다. 또한, HST에서 발생하는 고주파 압력맥동을 제거하기 위하여, 압력맥동 감쇠용 2중관로형 유압필터를 설계·제작하여, 압력맥동 감쇠특성 실험도 수행하였다.

## 2. HST에서 발생하는 압력맥동 특성

Fig. 1은 개회로·분리형 HST (open loop·separated type HST)의 개략도이다. 이것은 유압펌프와 모터가 관로로 연결되어 있기 때문에 기계적 구성이 자유롭고, 설치 공간상의 문제점이 해결되므로 건설기계 차량용으로 많이 활용된다. HST용 유압펌프는 주로 가변용량형 사판식 액셀 피스톤 펌프이고, 유압모터는 정용량형 또는 가변용량형 액셀 피스톤 모터가 사용된다. HST용 액셀 피스톤 펌프·모터는 피스톤이 7~11개로 유한하고, 피스톤 펌프·모터의 구조상 실린더 블록의 회전각도에 따라 배제용적이 변하기 때문에 유량맥동이 발생되며, 밸브판(valve plate)의 릴리프 홈(relief groove), 예압창·예압축 구간, 작동압력 및 펌프 회전수 등의 운전조건에 크게 영향을 받는다. 이러한 유량맥동은 펌프·모터의 내부 임피던스, 관로 및 부하 임피던스 특성과 상호작용 하여 고주파 압력맥동을 유발시킨다.

HST 시스템에서 발생하는 진동과 소음은 약 90% 이상이 유량맥동에 기인(起因)하는 압력맥동에 의해 발생되며, HST의 저소음화 설계를 위해서는 HST의 유량맥동과 압력맥동 특성을 규명하는 것이 필수 불가결하다. HST의 압력맥동은 대부분 유압펌프·모터의 유량맥동에 의하여 발생하는 것으로 파악되고 있지만, 유압펌프·모터의 유량맥동→압력맥동→구조전파진동→소음까지의 진동에너지 변환 과정이 매우 복잡하기 때문에 압력맥동과 소음과의 정량적인 관계를 해석적으로 파악하는 것은 거의 불가능하다. 또

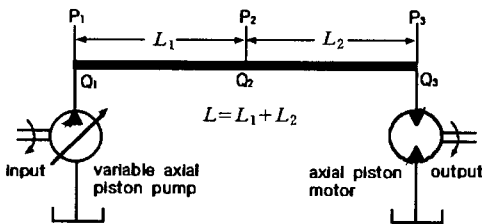


Fig. 1 Hydrostatic Transmission (HST)

한, 유압펌프·모터의 유량맥동과 펌프·모터 케이싱내에 작동유의 유동 통로에 대한 맥동전달특성(펌프·모터의 내부 임피던스라 함)으로 표시되는 유압펌프·모터의 맥동원 특성도 정확하게 규명하는 것도 어려운 실정이다.

## 3. 실험

### 3.1 실험장치

Fig. 2는 분리형 HST의 압력맥동과 Fig. 6의 2중관로형 유압필터의 압력맥동 감쇠특성 특성을 조사하기 위한 실험 장치의 개략도이다. 실험장치는 HST, 부하용 사축식 액셀 피스톤 펌프(이하 부하용 펌프라 함) 및 계측·신호처리부로 되어 있다.

HST는 가변용량형 사판식 액셀 피스톤 펌프(이하 주펌프라 함)와 정용량형 사판식 액셀 피스톤 모터(이하 모터라 함) 및 주펌프와 모터를 연결하는 고·저압 관로로 구성되어 있다. 차량용 HST에서는 주펌프가 원동기(대부분 디젤 엔진)에 의해 구동되지만, 여기서는 3.7kW 3상 유도전동기를 사용하였다. HST의 모터는 주펌프에서 송출된 고압의 작동유에 의해 구동되며, 모터 출력축은 부하용 펌프와 직결되어 있다. 따라서 HST에 작용하는 부하는 부하용 펌프의 송출압력과 유량을 조절하여 임의로 설정하는 것이 가능하도록 설계·제작하였다. 부하변동에 따른 HST의 최고압력은 주펌프에 내장된 릴리프 밸브로 제어되며, 주펌프는 가변용량형이기 때문에 사판의 경사각을 변화시켜 송출유량을 조절하여 모터의 회전수를 제어하였다. 주펌프와 모터의 회전수는 디지털 타코미터로 측정하였다. 또한 모터 출구에는 교축밸브를 설치하여, 출구압력을 임의로 설정할 수 있도록 제작하였고, 저압측 관로는 오일탱크로 배관하여 작동유의 냉각을 도모하였다.

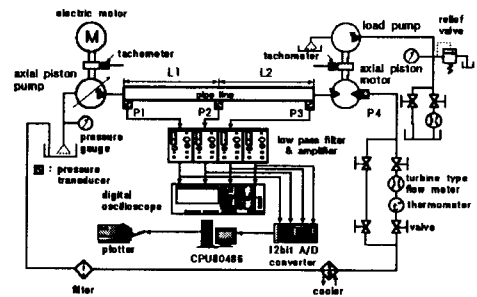


Fig. 2 Experimental apparatus

HST의 주펌프와 모터를 연결하는 고압측 관로는 내경 16mm인 고압 배관용 강관으로 배관하였고, 관로 길이를 1,800mm, 720mm로 변화시켜 관로 길이의 영향을 검토하였다. HST의 주펌프와 모터에서 발생하는 압력맥동 특성을 조사하기 위하여, 주펌프의 송출 압력  $p_1(t)$ , 고압측 관로 중앙 단면에서의 압력  $p_2(t)$  및 모터 입구와 출구압력  $p_3(t)$ ,  $p_4(t)$ 를 고속응답형 압력변환기(고유진동수 109kHz)로 측정하였다. 모터 출구의 저압측 관로 압력  $p_4(t)$ 는 모터 출구의 압력변화가 HST에 미치는 영향을 검토하기 위하여 측정하였다. 측정된 4개의 압력맥동 신호는 고정도 증폭기와 저역통과필터를 거쳐 12bit A/D변환기(샘플링 주파수 5kHz)에서 이산화되어 마이크로 컴퓨터에 입력된다.

HST 시스템의 모터 통과유량과 부하용 펌프의 송출유량은 터빈형 유량계로 측정하였고, 써미스트형 온도계로 작동유의 온도를 측정하였다.

분리형 HST는 주펌프와 모터에서 발생된 유량·압력맥동이 상호 간섭하여 복잡한 형태의 파형을 형성하기 때문에 주펌프와 모터가 단독으로 작동할 때의 특성을 파악하는 것은 HST의 유량·압력맥동 특성을 해석하기 위해 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 HST의 주펌프와 모터의 특성을 분리하여 각각의 압력맥동 특성에 대해서도 실험을 수행하였다. 특히, 유압모터의 실험에서는 모터 입구에서 발생하는 유량·압력맥동을 검토할 목적으로, 관로 상류단에 측압기(용량 20 l)를 설치하여 주펌프에서 발생하는 압력맥동의 영향을 제거하였다.

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

Table 1 Components used in HST

		HST pump	HST motor	load pump
number of piston		9	9	9
displacement(cc/rev)		34.2	24.7	26.1
Max. pressure (bar)	continuous.	241	210	300
	intermittent	310	250	350
type		variable	fixed	fixed
maker		Dension	Uchida	Uchida

### 3.2 실험결과 및 고찰

실험은 HST용 가변용량형 피스톤 펌프와 정용량형 피스톤 모터의 압력맥동 특성, 분리형 HST의 압력맥동 특성 및 맥동감쇠용 유압호스에 의한 압력맥동 감쇠특성에 대하여 수행하였고, 작동압력, 유압모터의 회전수, 관로의 길이, 유압모터의 배압을 변화시켜 압력맥동을 측정하고 주파수 분석을 통하여 그 특성을 검토하였다. 유압작동유는 ISO VG46을 사용하였고, 실험 중에 작동유의 온도는  $40 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지하였다.

#### 3.2.1 HST용 액셀 피스톤 펌프의 압력맥동 특성

Fig. 3은 유압펌프의 회전수  $N_p=1780\text{rpm}$ , 관로의 길이가 72cm인 경우, 사판식 액셀 피스톤 펌프의 압력맥동 측정파형과 주파수 분석 결과를 나타낸 것이다. 그림에서,  $p_1(t)$ 는 펌프 송출구의 압력맥동,  $p_2(t)$ 는 관로의 중앙 단면 및  $p_3(t)$ 는 펌프로부터 72cm만큼 떨어진 하류단의 압력맥동 파형이다. 펌프의 회전수는 1780rpm이므로 압력맥동 파형의 한 주기는 약 33.7ms이고, 피스톤의 수가 9개이기 때문에 펌프가 1회전하였을 때 9개의 비교적 진폭이 큰 압력맥동이 규칙적으로 발생된다. 압력맥동 파형에서, 관로의 길이에 따라 측정된 압력맥동 파형은 정성적으로는 거의 같은 경향을 보이지만, 정량적으로는 아주 다르다. 즉, 압력파의 진행파와 반사파가 상호 작용하여 관로내에서 정상파(standing wave)를 형성하기 때문에 압력맥동은 측정하는 위치에 따라 파형이 상이(相異)함을 볼 수 있다. 실험

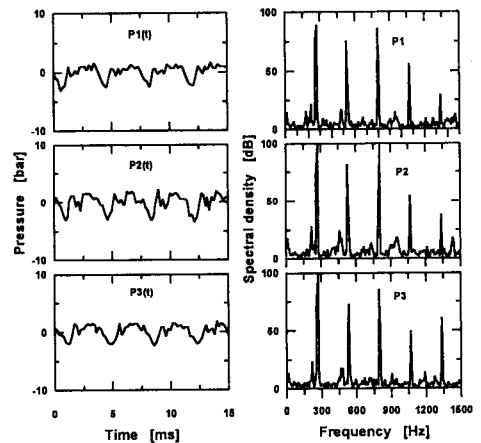


Fig. 3 The measured pressure ripple waveforms for an axial piston pump

에서 펌프의 회전수가 1780rpm, 피스톤 수가 9개이므로 기본 주파수는 약 267Hz에 해당되며, 기본 주파수의 제2차, 3차, 4차, 5차의 고조파 성분이 지배적으로 나타남을 알 수 있다.

### 3.2.2 HST용 액셀 피스톤 모터의 압력맥동 특성

유압모터의 압력맥동 측정 실험에 대해서는 모터의 회전수, 부하 및 배압  $p_4(t)$ 를 변화시켜 그 특성을 검토하였다.

Fig. 4는 유압모터의 회전수  $N_m=1500rpm$ , 관로 길이 180cm, 유압모터에 공급되는 평균유량  $Q_0=30\ell/min$ , 작동압력  $P_0=40bar$ 이고, 부하용 펌프의 설정압력  $P_i=12bar$ , 평균유량  $Q_i=41.0\ell/min$ 인 조건하에서 모터 출구의 배압  $p_4(t)$ 이 5bar인 경우의 압력맥동 계측 파형을 나타낸 것이다. Fig. 2의 실험장치에서, 유압관로의 상류단에는 블래더형 축압기(용량 20ℓ)를 설치하여 펌프에 의한 압력맥동의 영향을 가능한 제거하였다. 따라서, 압력맥동  $p_1(t)$ 의 진폭 변동분은  $\pm 1.2bar$  이하로 거의 변화가 없고, 모터의 부하가 변하여도 상류단의 압력은 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 액셀 피스톤형 유압모터의 구동 메커니즘과 기하학적 특성 때문에 모터의 회전각도에 따라 순간배제용적(瞬間排除容積)이 변하고, 밸브판을 통한 비정상적인 누설 등으로 인하여, 모터입구의 압력맥동  $p_3(t)$ 는 비교적 진폭이 큰 압력맥동이 발생된다. 실험에 사용한 유압모터의 피스톤 수가 9개이므로 유압모터 1회전마다 9개의 비교적 진폭이 큰 압력맥동이 발생되며, 이것은 유압펌프에서와 같은 경향을 나타낸다. 관로 중앙단면의 압력맥동  $p_2(t)$ 에서는 유압관로내에 압력파의 상호 간섭작용에 의한 정상파가 존재하고 있음을 알 수 있다. 또한 압력맥동  $p_2(t)$ ,  $p_3(t)$ 의 주파수 분석에서는 유압모터의 기본 주파수에 해당되는 약 225Hz 성분과 2차 고조파 성분이 지배적으로 나타난다. 모터 출구단의 압력맥동  $p_4(t)$ 는 유압관로계의 동특성의 영향은 거의 받지 않으며, 유압모터에서 송출되는 작동유의 맥동유량에 의한 압력맥동이 지배적으로 나타난다. 따라서 설정압력의 변화에 따라 약간의 진폭 변화는 나타나지만  $p_4(t)$ 의 압력맥동 진폭 스펙트럼은 기본 주파수 225Hz 성분과 그 정수배의 고조파 성분이 규칙적으로 나타남을 알 수 있다.  $p_4(t)$ 의 설정압력 변화에 따라 모터 입구의 압력맥동도 영향을 받는 것은 피스톤 모터

의 밸브판에 가공된 릴리프 홈에서 발생하는 비정상적인 누설유량이 모터 입출구에서의 압력차에 크게 영향을 받기 때문으로 생각된다.

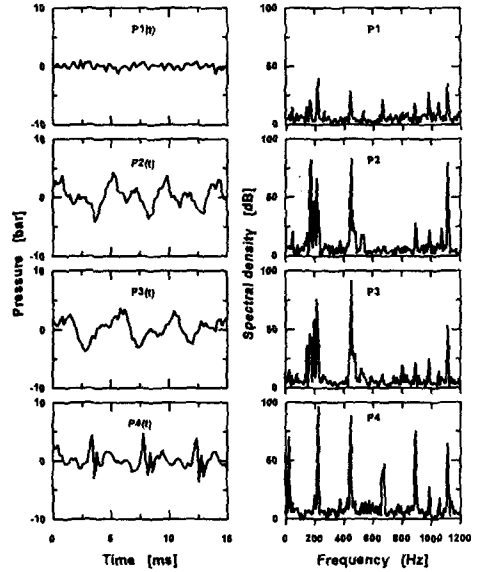


Fig. 4 The measured pressure ripple waveforms for an axial piston motor

### 3.2.3 개회로 -분리형 HST의 압력맥동 특성

Fig. 5는 고압측 관로 길이  $L=180cm$ , 주펌프의 회전수  $N_p=1780rpm$  및 모터 출구의 배압  $p_4(t)=7bar$ 로 설정하고, 모터의 회전수  $N_m=1000rpm$ , 작동압력 70bar 및 부하 변동에 따른 압력맥동 파형과 주파수 분석 결과를 나타낸 것이다. 실험조건에서 HST용 주펌프의 회전수는 1780rpm으로 일정하고, 피스톤이 9개이기 때문에 주펌프의 기본 주파수는 약 267Hz에 해당된다. 모터의 경우는 부하변동에 따라 회전수가 변하기 때문에 압력맥동의 기본 주파수가 변하게 된다. 분리형 HST의 고압측 관로내의 압력맥동은 주펌프 또는 모터만에서 발생하는 압력맥동과 차이가 있는 것은 주파수 분석 결과로부터 알 수 있으며, 펌프와 모터에서 발생된 압력맥동이 상호 작용하여 복잡한 형태의 압력맥동이 발생된다. 특히 주펌프의 압력맥동  $p_1(t)$ 와 모터 입구에서 발생하는 압력맥동  $p_3(t)$ 의 영향으로 고압측 관로내에서는 압력파의 진행파와 반사파가 상호 작용하여 정상파

가 형성되고, 관로 중앙단면에서의 압력파형  $p_2(t)$ 는 이것의 영향으로 압력맥동 파형의 형상이 크게 변함을 알 수 있다. 또한 모터 입구에서의 압력맥동  $p_3(t)$ 는 펌프 송출측의 압력맥동  $p_1(t)$ 와 유사한 파형처럼 보이지만, 정량적으로 아주 다르다. 유압펌프에서 발생하는 압력맥동의 실험결과에서, 유압펌프만의 압력맥동 파형은 펌프의 기본 주파수 성분과 그 정수배에 해당되는 고조파 성분이 규칙적으로 나타나는 것을 실험적으로 확인하였다. 그러나, HST에서는 유압펌프와 유압모터가 조합되어 있기 때문에 고압측 관로의 압력맥동 파형  $p_1(t)$ ,  $p_2(t)$ ,  $p_3(t)$ 에서는 펌프와 모터의 기본 주파수 성분뿐만 아니라 그 정수배에 해당되는 고조파 성분이 복합적으로 나타나며, 100Hz 이하의 저주파수 영역에서는 펌프와 모터의 구동 주파수 성분이 주로 나타난다. 저압측 관로의 압력맥동  $p_4(t)$ 는 고압측 관로의 압력맥동과는 관계없이 단지 모터의 송출측 압력이기 때문에 펌프와 모터의 압력맥동이 상호간섭작용을 일으키지 않는다. 따라서, 압력맥동 파형도 모터에 대한 기본 주파수 성분과 그 정수배의 고조파 성분이 지배적으로 나타남을 주파수 분석 결과로부터 알 수 있다.

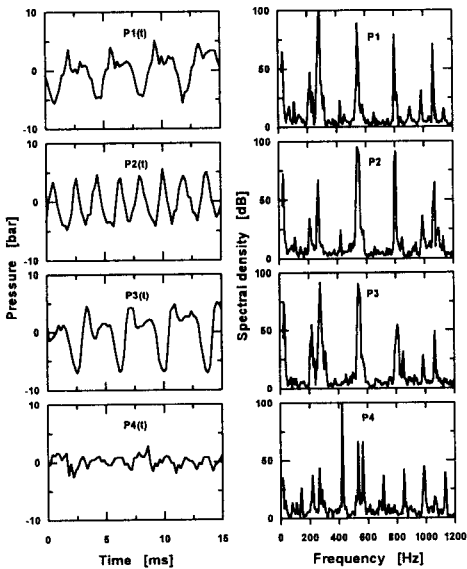


Fig. 5 The measured pressure ripple waveforms for HST

#### 4. 2중관로형 유압필터의 압력맥동 감쇠특성

Fig. 6은 HST에서 유압펌프와 유압모터를 연결하는 고압측 관로내에서 발생하는 고주파 압력맥동을 제거할 목적으로, 본 연구에서 설계·제작한 맥동감쇠용 2중관로형 유압필터 개략도이다. 그림에서, 2중관로의 내부에는 내경 12mm의 플렉시블 금속재 스파이럴 튜브가 삽입되어 있고, 외부에는 내경 16mm인 유압용 고압 고무호스를 사용하였다. 플렉시블 금속재 스파이럴 튜브는 HST 시스템의 주펌프에서 유압모터까지 작동유를 공급하는 고압측 관로의 역할을 한다. 또한 이것의 외경과 고무호스의 내경 사이에 형성된 환상형(環狀形) 2중 관로부는 주관로에서 분기되어 관로의 한쪽 끝단이 폐쇄된 분기관로를 형성하게 된다. 따라서, 여기서 제안한 HST용 유압필터는 Quincke 관로형 또는 분기관형 압력파 간섭형 유압필터와 같이 주관로와 분기관로 사이에서 압력파의 상호 간섭 원리를 응용하여 압력맥동을 감쇠시키는 것이다(5). Quincke 관로형 또는 분기관형 유압필터에서는 관로내의 어떤 특정한 주파수의 압력맥동이나 유량맥동을 제거하기 위하여 사용되며, HST에서와 같이 고주파 압력맥동과 유량맥동을 제거할 경우에는 기하학적 형상이 매우 커지기 때문에 문제점이 많다.

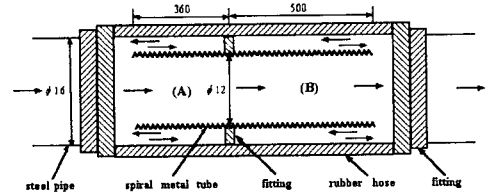


Fig. 6 Schematic of Resonator tube

본 연구에서는 HST의 주펌프와 모터에서 발생하는 압력맥동을 동시에 제거할 목적으로, 유압필터부를 (A), (B)부분으로 나누어 압력파의 1/4파장 이론에 기초하여 설계하였다. Fig. 6에서, (A)부분의 길이는 360mm로써, HST용 유압펌프가 1780rpm으로 일정하게 회전하는 경우에 발생하는 압력맥동의 기본 주파수 성분(약 267Hz)이 제거되도록 설계하였다. 유압모터에서 발생하는 압력맥동은 (B)부분에서 제거되며, 이 경우는 모터의 회전수가 시시각각으로 변하기 때문에 특정한 주파수를 선택하여 설계할 필요가 있다. 여기서는 유압모터의 회전수를 1200rpm으로 설정하고, 피스톤 수가 9개인 유압모터를 기준으로 하여 그 기본 주파수에 상당하는 주파수 성분을 제거하기 위해, (B)부분의 길이를 500mm로 설계·제작하였다. 또한 압력맥동의 고주

파 성분중에서 어느 특정 주파수 성분만을 제거할 경우에는 (A), (B)부분의 길이를 변화시켜 용이하게 설계·제작할 수 있다.

Fig. 7은 HST의 고압측 관로에 고주파 압력 맥동감쇠용 유압호스로 연결하고, 설정압력  $P_0=70\text{bar}$ , 모터 출구의 배압  $p_4(t)=7\text{bar}$ , 유압모터의 회전수가 1200rpm인 경우의 압력 맥동 감쇠특성을 나타낸 것이다. 그림에서,  $p_1(t)$ ,  $p_3(t)$ 는 고압측 관로를 강관으로 배관한 경우에 대한 주펌프의 송출 압력맥동과 모터 입구의 압력맥동 파형이고,  $p_1'(t)$ ,  $p_3'(t)$ 는 유압필터로 배관한 경우의 계측파형이다. 고압측 관로에 유압필터를 사용한 경우, 모터 입구의 압력맥동  $p_3'(t)$  변동분의 진폭은 강관의 경우에 비교하여  $\pm 3\sim 4\text{bar}$ 로 크게 감소되며, 회전수 변화에도 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 유압필터의 설계시에는 유압모터부에서 발생하는 압력맥동의 차단 주파수를 약 180Hz로 설계하였지만, 주파수 분석 결과에서는 모터의 회전수 변화에 따른 기본 주파수 성분뿐만 아니라 그 정수배에 상당하는 고조파 성분이 약 30~40dB정도로 대폭 감소함을 알 수 있다.

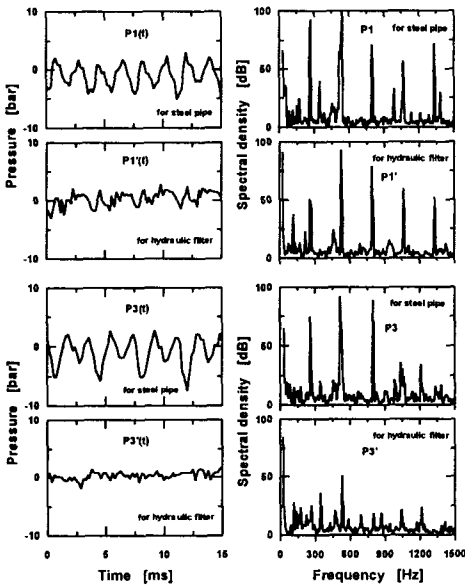


Fig. 7 Comparison of the measured pressure ripples with resonator tube

Fig. 8은 HST의 고압측 관로내에 압력맥동의 공진현

상이 발생한 경우에 대한 맥동감쇠용 2중관로형 유압필터의 감쇠특성을 나타낸 것이다. 실험은 주펌프와 모터의 회전수를 1780rpm으로 일정하게 유지시켜 공진을 야기시킨 후, 강관인 경우와 유압필터로 배관한 경우의 압력맥동 파형을 비교 검토하였다. 계측파형을 비교하여 보면, 공진이 발생한 경우에도 압력맥동의 진폭은 크게 감소함을 알 수 있다. 또한 주펌프와 모터의 기본 주파수 성분에 대한 스펙트럼도 현저하게 감소함을 알 수 있다. 이것은 본 연구에서 제안한 HST용 유압필터의 설계에 대한 타당성을 입증하는 하나의 근거가 된다.

이상, HST용 유압필터를 설계·제작하여, HST 시스템의 고압측 관로에 적용하여 압력맥동 감쇠능력 실험을 수행한 결과, HST 시스템에서 발생하는 고주파 압력맥동을 흡수·제거하는 데 유효한 방법임을 실험을 통하여 확인하였다. 향후 HST시스템의 저소음화에 응용될 것으로 사료된다.

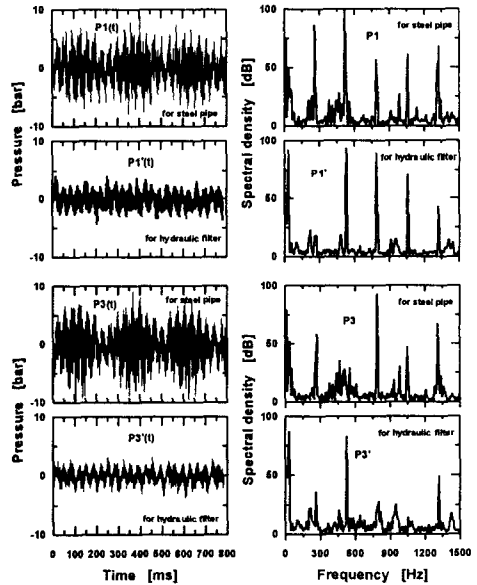


Fig. 8 Comparison of the measured pressure ripples with resonator tube

## 5. 결론

본 연구에서는 개회로·분리형 HST의 유압펌프·모터

에서 발생하는 압력맥동을 고속응답으로 계측하고, 주파수 분석한 결과, 기본 주파수 성분뿐만 아니라 약 10차수(次數) 정도까지의 고조파 성분이 나타남을 실험적으로 확인하였다. 또한 HST의 저소음화 방안으로 2중관로형 고주파 압력맥동 감쇠용 유압호스를 제안하였고, 실험적으로 검토한 결과, 압력맥동 스펙트럼이 약 30~40dB정도로 대폭 감소하였으며, 감쇠 주파수 대역도 기본 주파수 성분뿐만 아니라 고조파 성분까지 제거됨을 실험적으로 확인하였다.

### 참고문헌

1. A. F. D'souza, R. Oldenburger, "Dynamic Response of Fluid Line", Trans. ASME, J. of Basic Eng. Vol. 86, No. 3, pp. 589, 1964

2. Brown, F. T., "The Transient Response of Fluid Line", Trans. ASME, J. of Basic Eng. Series D, Vol. 84, No. 4, pp. 547, 1962

3. 横田眞一, 金道泰, 中野和夫, "管路の壓力流量間の動特性を利用した非定常流量計測手法", 日本機械學會論文集(C編), Vol. 57, No.541, pp. 2872, 1991.

4. 金道泰, 横田眞一, 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(第2報)", 油壓と空氣壓, Vol. 22, No. 2, pp. 169, 1991.

5. 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 (Tokyo)