

유압펌프에서 발생하는 고주파 유량맥동의 고응답 계측

이 상기*, 김 도태**

* 경북산업대학교 대학원

** 경북산업대학교 기계공학과

ABSTRACT

The paper describes an approach for measuring flow ripple generated by oil hydraulic axial piston pumps. Flow ripple has periodic waveforms due to the cyclic nature of a pump's operation, and interacts with the connected hydraulic systems such as pipes and components to produce a pressure ripple, also known as fluid-borne noise. It is indispensable to measure a flow ripple because increasing of vibration and noise caused by a flow ripple has become a point to be considered and has need of solving these problems.

The measurement of flow ripple with high frequencies from oil hydraulic axial piston pumps is made by using the remote instantaneous flow rate measurement method. As a result, the reverse flow through the relief groove in valve plate has an important effect upon a flow ripple generated by a pumps.

Key Words : Fluid Power System, Oil Hydraulic Axial Piston Pump, Flow Ripple Measurement, Remote Instantaneous Flow Measurement

1. 서 론

유압시스템의 유압원(Hydraulic Power Unit)에 사용되는 펌프는 용적형 펌프가 사용된다. 그 중에서 사판식 액시얼 피스톤 펌프(Swash Plate Type Axial Piston Pump)는 가변 용량이 가능하고, 기어펌프나 베인펌프 등 다른 용적형 펌프와 비교하여 최고 사용압력이 높기 때문에 유압시스템에서 많이 사용되고 있다. 사판식 액시얼 피스톤 펌프는 피스톤의 수가 유한하기 때문에 유량맥동이 발생되며, 단순히 실린더의 체적변화로부터 계산할 수 있는 기하학적 이론 송출유량을 구하여 보면, 피스톤의 수가 7개 정도인 경우에는 비교적 유량맥동이 적다. 그러나, 실제로는

유압작동유의 압축성과 밸브판의 릴리프 홈(Relief Groove) 등의 영향 때문에 펌프 송출측에서 실린더 내로 역류가 발생하여 진폭이 큰 매우 복잡한 파형의 유량맥동이 발생된다. 이러한 유량맥동은 유압시스템내에 설치된 각종 기기의 맥동전달특성과 상호작용하여 복잡한 압력맥동을 유발시키고, 이것이 관로내의 유압작동유에 전파되어 관로에 접속되어 있는 다른 유압기기를 가진시킬 뿐만 아니라 유압제어장치의 진동·소음을 발생시키는 주된 원인이 된다.

최근 유압제어기기가 고속화됨에 따라 유압원도 보다 고압화가 요구되며, 유압펌프에서 발생하는 진동·소음의 증대가 문제점으로 대두되고

있다.

따라서, 압력맥동을 저감시켜, 저소음화 및 신뢰성이 높은 유압시스템을 개발하기 위해서는 유압펌프에서 발생하는 고주파 유량맥동을 고정도, 고응답으로 계측하는 것은 필수 불가결한 요소이다. 그러나, 유압펌프에서 발생하는 고주파 유량맥동을 계측할 경우, 공간상의 제약 등으로 펌프 송출구 직후에 유량계의 설치가 불가능한 점, 또 유량계를 삽입함으로써 유동상태가 교란되어 기기의 동특성에 악영향을 미치는 계측상의 난점이 있다.

본 연구에서는 유압관로의 동특성을 이용한 비정상 유량 원격계측법^{(1),(2),(3)}을 실제의 유압 회로에 응용하여, 사판식 액시얼 피스톤 펌프에서 발생하는 고주파 유량맥동을 고응답으로 계측하였다. 또한 압력맥동 및 유량맥동의 계측과 형에 대하여 주파수 분석 등을 통하여 고찰하고 유량맥동에 영향을 미치는 인자에 대하여 검토하였다.

2. 사판식 액시얼 피스톤 펌프

Fig. 1은 실험에 사용한 유압용 사판식 액시얼 피스톤 펌프의 개략도를 나타낸 것이다. 사판(Swash Plate)은 유량조절용 나사 및 스프링에 의해 구동축과 수직한 면에 대하여 임의의 각도로 설정하는 것이 가능하며, 사판의 각도를 임의로 변화시켜 송출유량을 조절할 수 있다. 피스톤은 7개로서 각각의 피스톤은 구동축과 평행하게

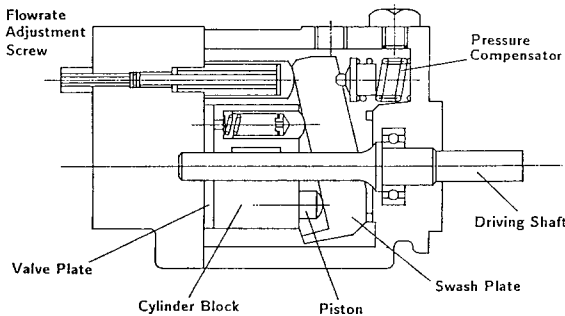


Fig. 1 Schematic diagram of an axial piston

원주방향으로 등간격으로 배치되어 있다. 피스톤과 실린더 블록(Cylinder Block) 사이에는 스프링이 삽입되어 있기 때문에 피스톤은 항상 사판을 누르고 있는 상태로 있으며, 구동축이 회전하면 사판의 경사각에 따른 거리만큼 실린더내를 피스톤이 왕복운동을 하게 된다. 피스톤이 실린더내에 용적이 증가하는 방향으로 이동할 때, 실린더내에 유압작동유는 흡입되고, 피스톤이 실린더내의 용적을 감소시키는 방향으로 작용할 때에는 실린더내에 있는 유압작동유를 고압으로 송출시킨다. 그리고, 밸브판(Valve Plate)은 실린더의 유로를 흡입측과 송출측으로 분리시켜 주는 역할을 하며, 이것은 펌프 본체에 고정되어 있다. 밸브판은 피스톤이 상사점과 하사점에 도달하였을 때 발생하는 실린더내의 유압작동유의 폐입현상(Trapping)을 방지하기 위하여 흡입 및 송출 시작점 부근에 릴리프 홈이 있고, 이 릴리프 홈의 형상이 유량맥동에 크게 영향을 미치게 된다.

Table 1은 실험에 사용한 사판식 액시얼 피스톤 펌프의 주요 제원을 나타낸 것이다.

3. 실험장치

Fig. 2는 본 실험에 사용된 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 실험장치는 전기모터에 의하여 구동되는 유압용 사판식 액시얼 피스톤 펌프, 유압관로계 및 계측 신호처리 시스템으로 구성되어 있다. 실험에 사용한 사판식 액시얼 피스

Table 1 Dimensions of an axial piston pump used in the experiment

피스톤 수	7 개
펌프 회전수	1800rpm
펌프 배제용적	8 cc/rev
정격 사용압력	210 bar
순간 최고압력	250 bar
흡입 압력	-0.2~15 bar

톤 펌프는 사관의 경사각을 변화시킴으로서 송출유량을 조절할 수 있다. 펌프 송출구에는 내경 20mm, 길이 1570mm의 원형 강관으로 배관하였고, 강관에는 압력을 측정하기 위하여 압력변환기(Pressure Transducer) $p_1(t)$, $p_2(t)$, $p_3(t)$ 및 관로 하류부의 비정상 유량을 측정할 목적으로 원통형 초오크 비정상 유량계(Cylindrical Choke Type Instantaneous Flowmeter, 이하 CCFM으로 표시한다)를 설치하였다. 원통형 초오크는 내경 2.5mm, 초오크 부분의 길이 20mm로 설계, 제작하였다. 원통형 초오크 비정상 유량계의 유량계측 원리는 초오크 전후의 압력변환기 $p_2(t)$, $p_3(t)$ 로 부터 압력차 ΔP 를 계측하여, 초오크를 통과하는 비정상 유량 $q_2(t)$ 와 압력차 ΔP 사이의 동특성을 나타내는 수학적 모델을 이용하여, 비정상 유량을 실시간에 계측할 수 있는 시스템이다^{(6),(7)}. 계측된 펌프 송출부의 압력 $p_1(t)$, 하류압력 $p_2(t)$, 압력차 ΔP 의 신호는 A/D변환기(채널 수 : 16, 분해능: 12비트, 샘플링 주파수: 1.25kHz)로 이산화한 후 마이크로 컴퓨터(CPU 80486)에 입력된다.

유압작동유의 온도는 CCFM 직후에 설치된 서미스터형 온도계로 측정하였고, 관로의 하류부

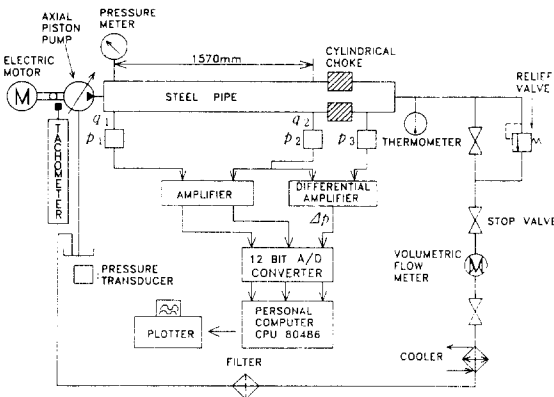


Fig. 2 Experimental set-up

에 유압필터를 설치하였다. 릴리프 밸브는 유압관로내의 평균압력을 임의로 설정하기 위하여 사용하였고, 관로내의 평균유량을 측정하기 위하여 용적형 적산 유량계 (Volumetric Flowmeter)를 설치하였다.

4. 유압펌프에서 발생하는 고주파 유량맥동의 계측 원리

본 연구에서는 유압관로의 압력·유량간의 동특성을 이용한 비정상 유량 원격계측법을 사용하여^{(1),(2),(3)}, 유압용 사관식 액시얼 피스톤 펌프에서 발생하는 유량맥동을 고응답으로 계측하였다. 이 계측법은 식(1)로 표시되는 관로상의 2지점 사이의 압력·유량간의 동특성을 나타내는 전달매트릭스^{(4),(5)}를 기초로 하여, 관로상의 임의의 단면을 통과하는 비정상 유량 (예를 들면, Fig. 2의 $q_1(t)$)을 관 길이 L 만큼 떨어진 위치에서의 압력과 유량(이 경우에는 Fig. 2의 $p_2(t)$, $q_2(t)$)을 측정하여 원격 추정하는 방법으로서, 비정상 유량을 측정하려는 위치에 유량계를 직접 설치하지 않아도 되는 잇점이 있다.

$$\begin{pmatrix} P_1(s) \\ Q_1(s) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} G_a(s) & G_b(s) \\ G_c(s) & G_d(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P_2(s) \\ Q_2(s) \end{pmatrix} \dots\dots(1)$$

식(1)에서, 대문자 $P(s)$, $Q(s)$ 는 압력 $p(t)$ 과 유량 $q(t)$ 의 라플라스 변환형, 하첨자 1은 관로의 상류부, 2는 하류부를 나타내며 (Fig. 2 참조), 각각의 전달함수는 다음 식으로 주어진다.

$$G_a(s) = \cosh \{ \lambda(s) \cdot L \}$$

$$G_b(s) = Z_0(s) \cdot \sinh \{ \lambda(s) \cdot L \}$$

$$G_c(s) = \frac{1}{Z_0(s)} \cdot \sinh \{ \lambda(s) \cdot L \} \dots\dots(2)$$

$$G_d(s) = \cosh \{ \lambda(s) \cdot L \}$$

여기서, $\lambda(s)$, $Z_0(s)$ 는 주파수에 의존하는 비점성 저항을 고려한 관로의 전파상수 및 특성 임피던스이며, 다음 식으로 주어진다 (4),(5).

$$\lambda(s) = \frac{s}{c} \cdot \left\{ 1 - \frac{2J_1(ja\sqrt{s/\nu})}{ja\sqrt{s/\nu}J_0(ja\sqrt{s/\nu})} \right\}^{-\frac{1}{2}} \dots\dots(3)$$

$$Z_0(s) = \frac{\rho c}{\pi a^2} \left\{ 1 - \frac{2J_1(ja\sqrt{s/\nu})}{ja\sqrt{s/\nu}J_0(ja\sqrt{s/\nu})} \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

식 (3), (4)에서, a 는 관로의 반경, c 는 음속, $J_n(x)$ 는 제1종 n 차 Bessel함수, $j = \sqrt{-1}$, s 는 라플라스 연산자, ν 는 유압작동유의 동점도, ρ 는 밀도 이다.

본 연구에서는 Fig. 2의 관로의 상류부를 통과하는 비정상 유량, 즉 유압펌프 송출구 직후에서의 유량맥동 $q_1(t)$ 의 추정에 대하여 검토한다. 이 경우 유량을 측정하려는 위치에서의 상류유량 $Q_1(s)$ 는 식(1)의 전달매트릭스로 부터 다음 식으로 주어진다.

$$Q_1(s) = G_c(s) \cdot P_2(s) + G_d(s) \cdot Q_2(s) \dots\dots(5)$$

식(5)에서, $G_c(s)$ 는 하류압력에 대한 상류유량간의 전달함수, $G_d(s)$ 는 하류유량에 대한 상류유량간의 전달함수으로써, 식(2)에 주어져 있다.

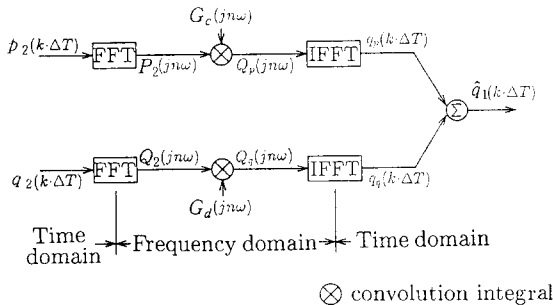


Fig. 3 Flow ripple estimation procedure

Fig. 3은 비정상 유량 원격계측법을 도식적으로 나타낸 것이다. Fig. 2에 도시한 바와 같이, 유압펌프의 송출구에 원형 강관으로 연결하여, 관로의 하류부의 압력 $p_2(\Delta T)$ 와 유량 $q_2(\Delta T)$ 를 직접 측정 후, 측정 데이터를 고속 푸리에 변환(이하 FFT로 표시한다)한 스펙트럼 $P_2(j\omega)$, $Q_2(j\omega)$ 와 각각의 전달함수 $G_c(j\omega)$, $G_d(j\omega)$ 와의 상승적분(Convolution Integral)을 주파수 영역에서 수행하고, 그 결과로 주어진 스펙트럼 $Q_p(j\omega)$, $Q_q(j\omega)$ 를 각각 고속 푸리에 역변환(이하 IFFT로 표시한다)함으로써, 유압펌프에서 발생하는 고주파 송출유량맥동 $q_1(t)$ 를 시간영역에서 추정할 수 있다.

여기에서는 관로 상류 및 하류의 압력 $p_1(\Delta T)$, $p_2(\Delta T)$ 는 소형·고응답형 압력변환기(NMB社, PRC-200K, 고유진동수 109kHz)를 사용하여 계측하였고, 하류유량 $q_2(\Delta T)$ 는 CCFM으로 측정하였다. 실험에 사용한 CCFM은 고압하에서 유압작동유와 같은 비전도성 유체의 비정상 유량계측에 대하여 400Hz 이상의 높은 응답성과 계측 정밀도를 가지고 있는 것이 실험적으로 확인되었다 (6),(7).

5. 실험 결과 및 고찰

실험은 유압작동유의 온도를 $40 \pm 1^\circ\text{C}$ 에서 수행하였고, 작동유로서는 40°C 에서 동점성 계수가 46.9 cSt인 HVI46 (점도지수 : 161, 밀도 : 878 kg/m^3)을 사용하였다.

Fig.4는 동작점에서 평균유량 $q_0=60 \text{ cm}^3/\text{s}$, 설정압력 $p_0=3.9\text{MPa}$, Fig.5는 $q_0=80 \text{ cm}^3/\text{s}$, $p_0=5.9\text{MPa}$ 인 경우의 계측 결과를 나타낸 것이다. 그림에는 상단부터 펌프 송출부의 압력

$p_1(t)$, 관로 하류의 압력 $p_2(t)$, 하류의 원통형 초오크를 통과하는 유량 $q_2(t)$, 펌프에서 발생하는 유량맥동 $q_1(t)$ 를 도시하였고, 종축에는 압력과 유량, 횡축에는 시간을 나타낸다. 유압펌프에서 발생하는 유량맥동 $q_1(t)$ 는 비정상 유량 원격 계측법을 사용하여, 관로 하류부의 압력 $p_2(t)$ 와 유량 $q_2(t)$ 의 측정치를 이용하여 추정하는 것이다. 펌프의 회전수가 1800rpm이므로 1 주기는 약 33.33ms이다. 그림의 계측된 파형으로 부터 압력과 유량은 1 주기에 7개의 피크값이 나타나며, 이것은 사용한 펌프의 피스톤 수가 7개이기 때문이다.

Fig. 6는 펌프의 기하학적 형상에 의한 이론 송출량의 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 그

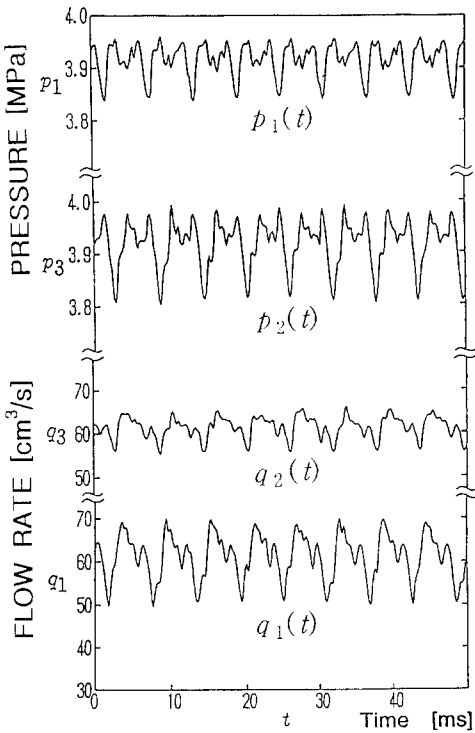


Fig. 4 The measured pressure and flow ripple waveforms 3.9MPa, 60 cm³/s

림에서 피스톤의 수가 7개인 경우, 이론송출량의 진폭은 Fig.4, Fig. 5의 실제 계측 파형에 비교하여 적다. 그러나, 실제의 작동조건에서 펌프에서 발생하는 유량맥동은 실린더내의 유압작동유의 폐입현상과 릴리이프 홈에서 누설유량의 영향 등으로 인하여 진폭은 커지고, 고주파 성분이 포함된 아주 복잡한 형상의 파형으로 된다. 또한 실험조건을 변화시켜 압력과 유량파형을 계측한 결과, 평균유량이 동일한 경우에는 동작점에서의 설정압력이 높을수록 펌프송출부의 압력과 유량파형의 진폭이 크게 됨을 알 수 있다. 이것은 주로 밸브판에 있는 릴리이프 홈의 영향으로 생각된다.

또한 사판식 액시얼 피스톤 펌프에서 발생하는 고주파 유량맥동과 압력맥동의 주파수 분석을 행하였다. Fig. 7은 주파수 분석 결과의 일례

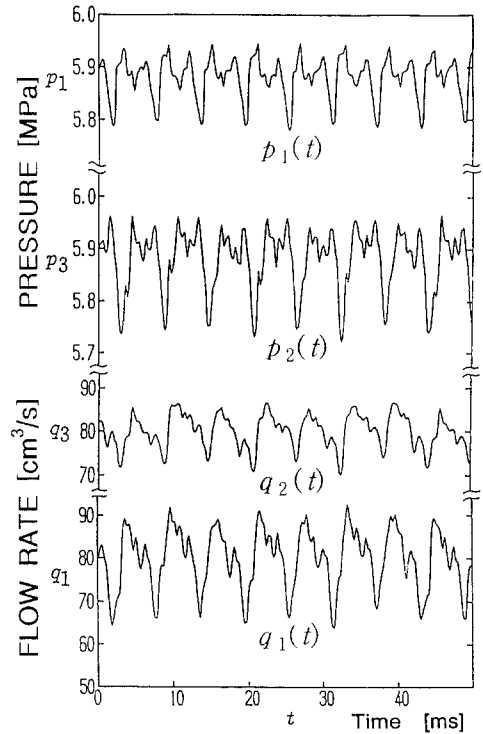


Fig. 5 The measured pressure and flow ripple waveforms 5.9MPa, 80 cm³/s

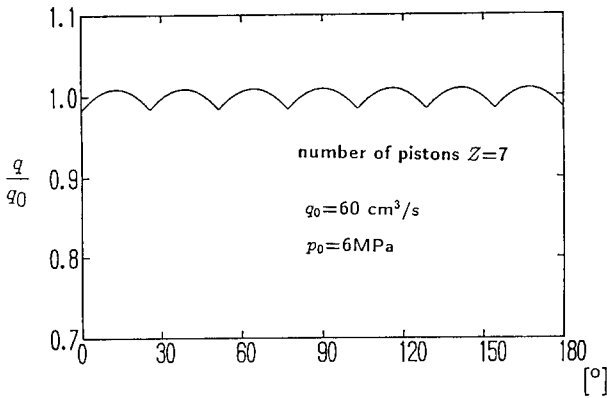


Fig. 6 Simulated flow ripple waveform without leakage flow rate

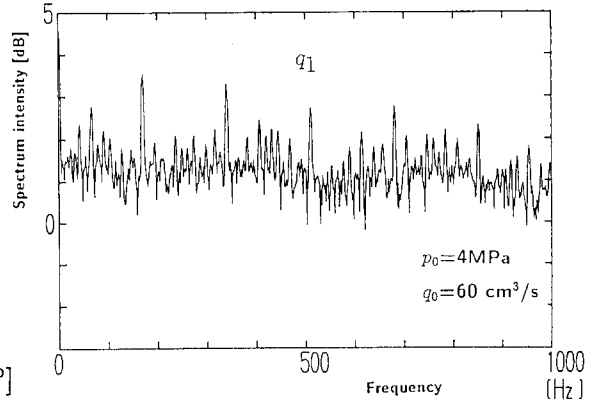


Fig. 7 A typical example of frequency spectra of the flow ripple waveform

를 나타낸 것으로서, 종축에는 스펙트럼 밀도, 횡축에는 주파수(Hz)를 나타낸다. 펌프의 회전수가 1800rpm, 피스톤의 수가 7개이므로 기본 주파수는 210Hz로 되며, 그 정수배의 고주파수 성분이 많이 포함되어 있는 것을 그림에서 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 비정상 유량 계측법을 유압회로에 응용하여, 유압용 사관식 액시얼 피스톤 펌프에서 발생하는 고주파 유량맥동과 압력맥동을 계측하였다. 실험결과, 펌프에서 발생하는 고주파 유량맥동은 유압작동유의 압축성과 밸브관의 릴리이프 홈에서 발생하는 역류현상이 큰 영향 받으며, 계측 파형의 주파수 분석을 통하여 200Hz~3kHz의 주파수 성분이 유량맥동에 포함되어 있음을 알 수 있었다. 앞으로, 밸브관의 형상 변화에 따른 유량맥동 및 압력맥동의 영향에 대하여 검토할 예정이다.

참고문헌

(1)橫田眞一, 金 道泰, 中野和夫, 油壓管路의 動特性을 利用した 遠隔瞬時流量計測手法, 油壓と空氣壓, Vol. 21, No. 2, p.189, 1990

(2)金 道泰, 橫田眞一, 中野和夫, 油壓管路의 動特性을 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, p.169, 1991

(3)橫田眞一, 金 道泰, 中野和夫, 管路의 壓力流量間의 動特性을 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, p.2872, 1991

(4)A. F. D'souza, R. Oldenburger, Dynamic Response of Fluid Line, Trans. ASME, J. of Basic Eng. Vol. 86, No. 3, p.589, 1964

(5)F. T. Brown, The Transient Response of Fluid Line, Trans. ASME, J. of Basic Eng. Vol. 84, No. 3, p.547, 1962

(6)中野和夫, 橫田眞一, 圓筒形絞りの 動特性을 利用した 瞬時流量計, 油壓と空氣壓, Vol. 17, No. 4, p.311, 1986

(7)橫田眞一, 井手 浩, 中野和夫, 圓筒形絞りを 用いた 瞬時流量計의 高機能化, 日本機械學會論文集(B編), Vol. 53, No. 489, p.1548, 1987