

유압시스템의 비정상유량계측과 응용 사례

Unsteady Flow Rate Measurement and Applications for Oil Hydraulic Systems

김 도 태
D. T. Kim

1. 서 언

유압시스템에서 유량과 압력의 계측정보는 동력 전달, 흐름특성 해석, 유공압기기와 시스템의 설계 개발에서 중요하다. 압력은 유량보다는 비교적 쉽게 고속응답으로 계측할 수 있고, 또 제조회사마다 다양한 압력범위에 걸쳐 정밀도와 응답성이 높은 압력센서를 개발하여 시판하고 있다.

정상류의 유량은 측정목적과 조건에 따라 차압식 유량계, 터빈유량계, 전자유량계, 질량유량계 등 다양한 유량계를 개발하여 비교적 정밀하게 계측하고 있다^{1)~3)}. 그러나 유압시스템은 전자제어기술과 융합하여 메카트로닉스화·지능화되는 추세이고, 이것에 대응하여 제어밸브를 비롯한 각종 요소부품뿐만 아니라 시스템 전체의 응답성·제어성 등의 동특성 향상이 필요하다. 고성능인 유압기구나 시스템을 설계·제작할 때는 동특성을 명확하게 파악하여야 하며, 이를 위해서는 관로나 요소부품 등을 통과하는 비정상유량을 고속응답으로 계측하는 것이 중요한 과제이다. 또한 유량 피드백, 시스템의 상태관측·진단·평가시스템 개발 등에서 고품위 제어를 실현하기 위해서도 실시간·고속 응답성을 가진 비정상유량 계측시스템의 개발이 필수불가결하다. 그러나 고압에서 작동유와 같이 전도성(電導性)이 없는 유체의 비정상 순간유량을 비교적 간편하게, 높은 응답성과 정밀도로 측정할 수 있는 계측법과 보정법(calibration)이 아직 명확하게 확립되어 있지 않다. 또한 공기압시스템은 공기의 압축성 때문에 압력에 따라 밀도변화를 무시할 수 없으므로 체적유량과 질량유량을 구분하여 적절하게 사용하는 것이 바람직하다.

여기서는 유압시스템에 적용할 수 있는 몇 가지 비정상유량계측법을 간략하게 소개하고, 실제 밸브 판 형상변화에 따른 피스톤펌프의 유량맥동, 유압전동장치에서 유량맥동, 승용차 능동현가장치용 레이디얼 피스톤펌프에서 유량맥동 계측과 능동제어 등

의 응용 사례를 중심으로 해설한다.

2. 비정상 유량계측의 현황

유압시스템에 활용할 수 있는 비정상유량계측법을 정리하여 열거하면 다음과 같다.

2.1 레이저 도플러 유속계(LDV)를 이용하는 방법

LDV가 관로내의 비정상 유속분포를 고정밀도로 측정할 수 있기 때문에 비정상유량계측에 활용한다. 관로에서 맥동유속분포 측정⁴⁾, 고속 LDV 빔 주사에 의한 유속분포 실시간 계측 및 단면 적분에 의한 유량계측법이 있다⁵⁾. 또 관로내의 한 지점에서 유속값과 유량간의 동특성을 이용하여 맥동류의 관 중심유속 측정과 운동방향식의 차분화로 유속분포의 단면 적분에 의한 유량계측⁶⁾, 원관에서 중심유속과 맥동유량간의 주파수 특성을 이용한 맥동유량계측⁷⁾, 원관내 층류의 동특성을 유한차원 상태공간모델로 실현하여 관 중심유속에서 비정상유속분포 추정⁸⁾, 관 중심유속과 통과유량 사이의 라플라스영역에서 동특성 모델에 대해 시간영역에서 하중함수(weighting function)를 구하고 관 중심유속 측정값과 상승적분(convolution)에 의한 실시간 비정상유량계측^{9),10)}, 관 중심유속과 유량간의 동특성 모델을 아날로그 회로로 실현한 것¹¹⁾ 등이 있다. 그러나 LDV는 고가이고, 레이저 빔이 통과하는 투과 창을 만들어야 하기 때문에 고압에서 측정하는 것은 한계가 있다.

2.2 관로, 초크 등의 차압을 이용하는 방법

관로나 초크(choke)의 관성효과를 포함한 차압(differential pressure)과 유량간의 동특성이 확립되어 있다면, 그 역(逆)모델을 어떠한 형태로든 컴퓨터에서 구성하여 순간유량계를 구현할 수 있다.

직선관로의 2점 사이의 차압과 유량간 동특성을 이용한 것^{12),13)}, 원통형 초크의 차압과 유량간의 비

선형 동특성 모델을 이용한 실시간 비정상유량계측용 순간유량계^{14)~17)}, 이 유량계와 기어모터형 유량계¹⁸⁾와 동특성 비교¹⁹⁾, 또 상류에서 흐름조건과 교란(disturbance)이 유량계측에 미치는 영향 검토²⁰⁾, 초크 2개를 직렬로 연결하였을 때 원통형 초크의 동특성 해석^{21),22)} 등이 있다.

2.3 관로의 동특성 등을 이용한 비정상유량계측법

관로상의 2지점에서 압력과 유량간 동특성을 이용한 비정상유량 원격계측법^{23)~28)}, 관로내에 작동유가 흐를 때 관 벽면과 작동유 사이에 전하의 분리·발생이 생겨 정전기가 대전하는 현상을 이용한 비정상유량계측²⁹⁾, 열선유속계를 이용한 방법³⁰⁾, 곡관에서 운동량변화를 이용한 것³¹⁾, 전자유량계의 고속 응답화로 펌프 맥동류 계측³²⁾ 등이 있다.

2.4 유량맥동(진동류)의 계측

스텝(step) 입력과 같은 과도적인 유량변화에는 적용할 수 없지만, 정현파와 같이 주기성을 갖는 유량맥동 측정에는 벤투리관(Venture tube) 이용³³⁾, 피스톤-실린더에서 초크 차압에 의한 유량계측³⁴⁾, 흐름의 가속도를 검출하고 초크형 유량계와 조합하여 관성효과를 고려한 방법 등이 제안되어 있다³⁵⁾.

3. 고속 응답형 비정상 유량계측 및 응용 사례

3.1 LDV를 이용한 비정상유량계측법(LDFM)^{9),10)}

LDV를 이용한 비정상 유량계측법(LDFM)은 LDV로 관 중심유속을 측정하고, 관 중심유속과 하중함수(관 중심유속 입력에 대한 단면 평균유속간의 전달함수에 대한 시간영역에서 임펄스 응답)와의 상승적분을 수행하여 비정상유량을 실시간으로 계측한다. 실시간 유량계측을 위해, 상승적분은 고속전용연산회로를 설계·제작하여 수행하였고, 상승적분의 곱셈과 덧셈 200개 연산을 약 430 μ s에서 완료하여, CPU6800으로 데이터 처리시간을 포함하여 샘플링 주파수 1.28kHz를 실현하였다.

Fig. 1은 실험장치, Fig. 2는 스텝입력에 대한 관 중심유속과 통과유량의 계측과형이다.

비정상유량계측에 대한 검증용 보정법이 아직 확립되어 있지 않기 때문에, 이 계측법의 타당성은 유압관로의 압력-유량간 주파수응답 동특성 실험을 수행하여 검토하였다. Fig. 1에서, 길이 ℓ 인 관 상류에 축압기(accumulator)를 설치하면 상류에서 압력

변동이 없기 때문에, 하류 통과유량 $q_d(t)$ 와 압력 $p_d(t)$ 사이의 전달함수는 전달행렬 식 (2)에서 다음과 같다.

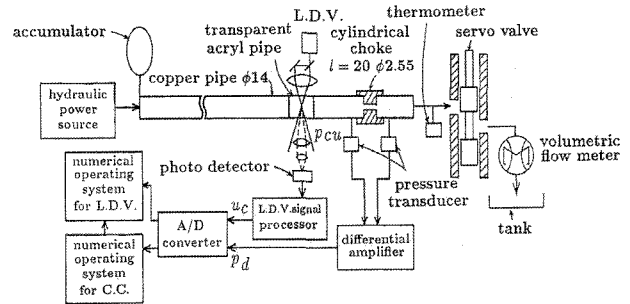


Fig. 1 Experimental apparatus(LDFM/CCFM)

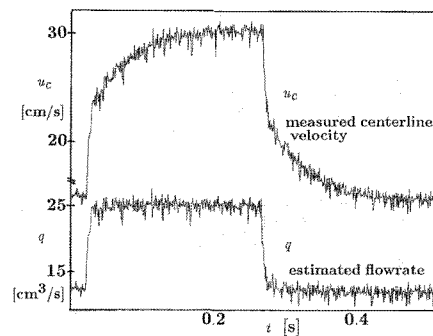


Fig. 2 Recorded wave forms

$$G(s) = \frac{P_d(s)}{Q_d(s)} = -Z_0(s) \tanh \lambda(s) \ell \quad (1)$$

Fig. 3은 관 길이 $\ell=6.67$ m인 경우, 압력-유량의 주파수응답 실험결과이다. 그림에서 실선은 식 (1)에서 계산한 이론값, \circ 표시는 정현파 주파수 입력에 따른 이득(gain)과 위상(phase)이며, 이득, 위상 모두 200Hz를 넘는 고주파영역까지 잘 일치한다.

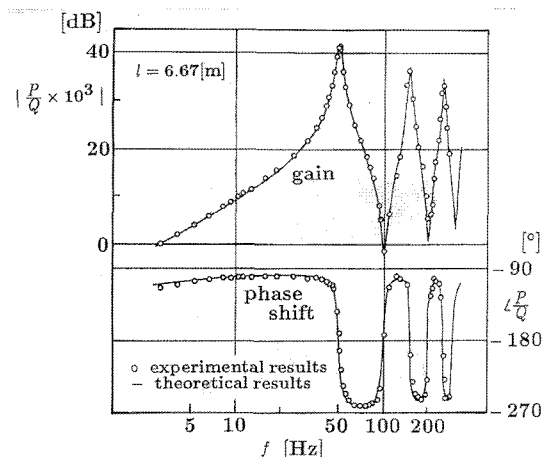


Fig. 3 Frequency characteristics for LDFM

이 측정법은 LDV가 가동부가 없는 점, 파장과 기하학적 배치로 정밀도가 결정되는 등의 장점이 있다. 따라서 작은 유량에서도 드리프트(drift)에 의한 오차가 발생하기 어렵고, 비정상유량계측의 보정용으로 유용하다. 그러나 고가이고, 관로에 레이저 빔이 통과하도록 투과 창을 만들어야 하기 때문에 고압에서는 난점이 있다.

3.2 원통형 초크를 이용한 순간유량계 (CCFM) 14)~17)

실용적 측면에서 유량계는 설치하기 쉽고, 구조가 간단하며, 정밀도와 응답성이 높을수록 좋다.

원통형 초크(cylindrical choke)는 오리피스 보다 교축부가 길고, 형상이 단순하며, 점성효과가 크고, 고주파에서 초크 속의 유주(油柱)의 관성효과가 지배적이며, 또 이 관성효과가 명확하게 규명되어 있기 때문에 차압-유량간 동특성 모델이 확립되어 있다¹⁴⁾.

원통형 초크의 비선형 동특성을 이용한 순간유량계(CCFM)의 측정원리는 Fig. 4와 같은 원통형 초크에서 차압 p_d 과 유량 $q(t)$ 간의 동특성을 이용하여, 초크(지름 2.55mm, 길이 20mm) 양단에서 차압을 측정하여 유량을 측정하는 것이다.

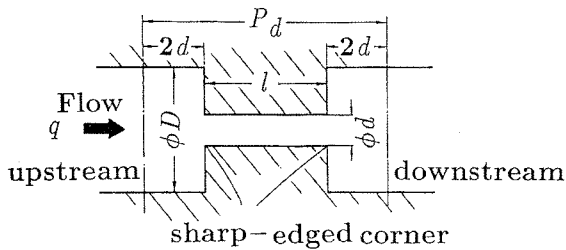


Fig. 4 Cylindrical choke

여기서는 차압 입력에 대한 비정상유량 연산을 실시간에서 수행하기 위해 전용회로를 설계하여, 16×8비트의 곱셈을 전용고속승산기에서 병렬처리하여, CPU6800 시스템에서 데이터 전송을 포함하여 1회 유량 연산을 약 56μs 이내에 종료할 수 있고, 샘플링 주파수를 12.8kHz까지 설정할 수 있다.

Fig. 1에서, LDV를 이용한 순간 유량계측시스템(LDFM)은 비정상유량 보정용으로 사용하며, 원통형 초크 순간유량계(CCFM)에서 측정된 유량을 비교·검증한다. 정현파 유량변동에 대해, LDFM의 Fig. 3과 마찬가지로 비교적 긴 관로에서 주파수 응답 실험결과를 Fig. 5에 나타낸다. 그림에서 실선은

관로의 동특성 모델에서 계산한 이론값이다. 이론과 실험결과가 잘 일치하며, CCFM은 충분한 정밀도와 400Hz 이상의 고속 응답성을 가진다.

Fig. 6은 Fig. 1의 전기·유압서보밸브(이하 서보밸브)에 비정상적인 임의의 파형을 입력하였을 때, CCFM에서 측정한 유량파형 q_c , 비교·보정용 유량계인 LDFM에서 동시에 측정한 유량파형 q_l 을 나타낸다. 중간에는 각각의 유량파형을 중첩하여 표시하였다. 두 파형이 잘 일치하며, CCFM이 비정상류의 순간유량계측에 충분한 정밀도와 응답성이 있는 것을 실험적으로 확인할 수 있다.

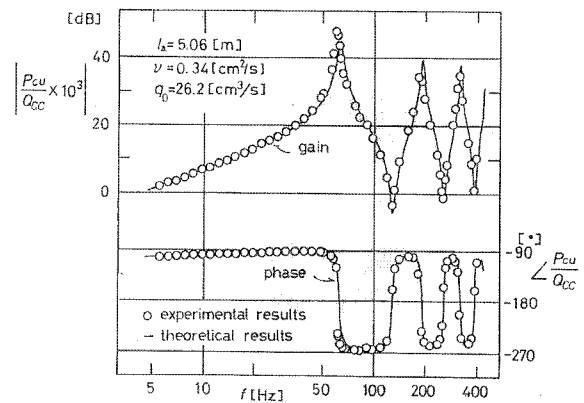


Fig. 5 Frequency characteristics of CCFM

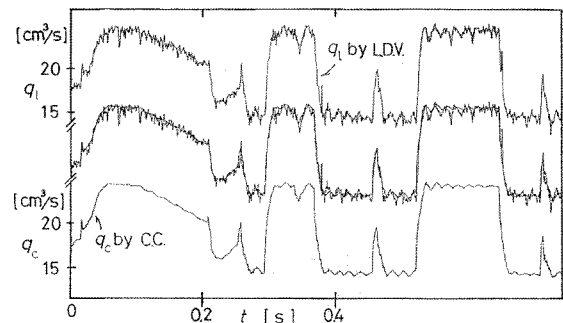


Fig. 6 Comparison of flow rate wave forms

3.3 기어모터형 유량계(GMFM)^{18),19),36),37)}

기어모터형 유량계(GMFM)는 작동유가 기어모터를 통과하면, 통과 유량에 비례하여 기어가 회전하고, 기어 이끝이 마그네틱 센서를 통과할 때마다 발생하는 펄스에서 유량을 측정한다.

Fig. 7은 기어모터형 유량계의 동특성을 조사하기 위한 유량계측 장치이다. CCFM은 KRACHT사의 고압용 기어모터형 유량계(VC0.04시리즈)에서 측정된 비정상유량을 비교·검증하기 위해 설치하였다. 입력 주파수에 따라 서보밸브가 작동하여, 관로내의

유량과 압력은 변동한다. GMFM의 출력 펄스신호는 F/V변환기→신호처리→A/D변환을 거쳐 마이크로컴퓨터에 입력된다.

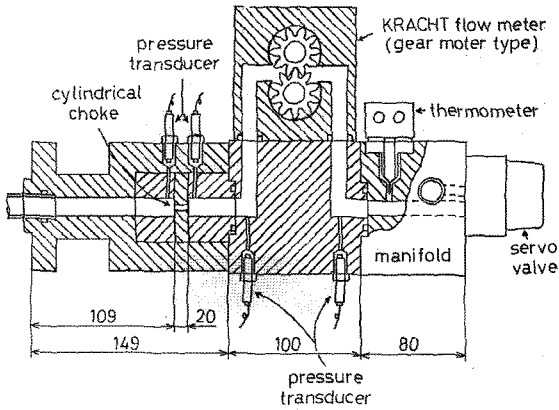


Fig. 7 Experimental apparatus(CCFM/GMFM)

Fig. 8은 서보밸브에 100Hz 정현파를 입력하였을 때, CCFM에서 계측유량 q_{cc} , GMFM에서 계측유량 q_{gm} 및 두 파형을 비교한 것이다. GMFM의 유량파형이 약 2ms 정도 지연됨을 볼 수 있다.

Fig. 9는 서보밸브에 정현파를 입력하여 평균유량 $q_0=19.0\text{cm}^3/\text{s}$, 진폭비 $B=0.2$ 에서 CCFM 통과유량 q_{cc} 와 GMFM의 계측유량 q_{gm} 사이의 주파수 응답 실험 결과이다. 이득은 거의 100Hz까지 평활하고, 위상은 100Hz에서 90° GMFM에서 계측한 유량 q_{gm} 이 CCFM의 계측유량 q_{cc} 보다 지연되는 특성을 나타낸다.

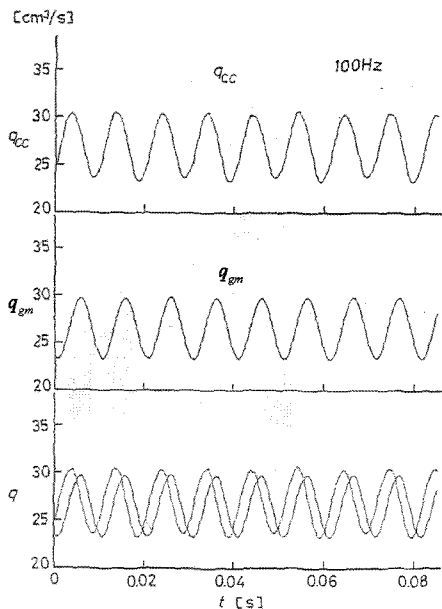


Fig. 8 Measured flow rate wave forms

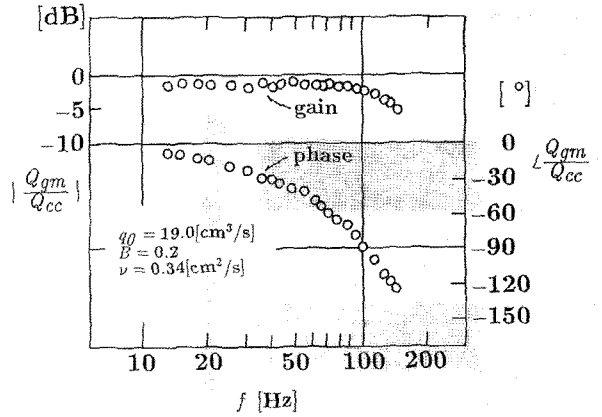


Fig. 9 Bode plots between CCFM and GMFM

3.4 터빈유량계^{37),38)}

터빈유량계(turbine-meter)는 유공압시스템뿐만 아니라 점도가 낮은 유체에서 유량계측 범위가 넓고, 구조가 간단하기 때문에 석유류 등 과세대상 유체의 정상유량 계측용으로 실용화되어 있다.

비정상유량을 계측할 경우, 터빈유량계의 계측 정밀도와 응답성이 아직 충분히 확인되지 않은 상태에서 사용하고 있다.

Fig. 10은 DODWEL사의 터빈유량계(유량범위: $7.8\sim79.6\text{cm}^3/\text{s}$)이며, 4개의 깃(blade)를 가진 로터(rotor)는 유량에 비례하는 각속도로 회전하고, 케이싱 상부의 전자픽업코일에서 깃 1개가 통과할 때마다 발생하는 자속변화를 정현파 형태의 전압으로 검출하며, F/V 변환기를 거쳐 회전속도에 비례하는 아날로그 전압신호로 변환하여 유량을 계측한다.

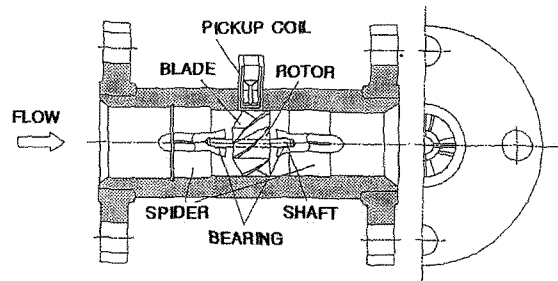


Fig. 10 Turbine-meter

Fig. 11은 터빈유량계의 과도응답 실험결과이다. 터빈유량계의 계측파형 q_t 는 비정상유량 원격유량 계측법(RIFM, 3.5 참조)에서 계측한 유량파형 q_u 에서 나타나는 큰 오버슈트(overshoot)나 언더슈트(undershoot)가 나타나지 않는다. 이것은 평균유량과 진폭비를 변화시켜 다양하게 실험한 결과에서도 같은 경향을 나타낸다.

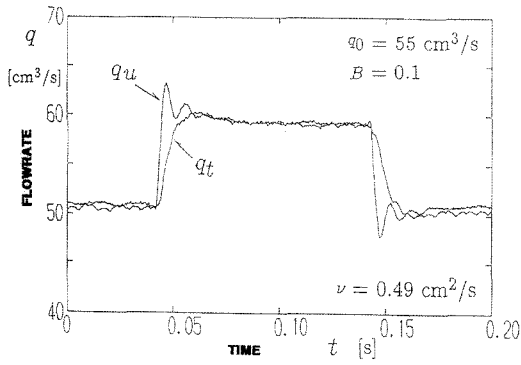


Fig. 11 Measured flow rate wave forms

Fig. 12는 터빈유량계의 주파수응답 특성이다. 주파수응답 실험은 서보밸브에 정현파를 입력하고, 평균유량 $q_0=55\text{cm}^3/\text{s}$, 유량변동분의 진폭 $B=0.1$ 로 하여, 상류유량 q_u 와 터빈유량계를 통과하는 유량 q_t 를 측정하여 이득과 위상을 구하였다. 그림에서, 이득은 70Hz 근방까지 점진적주파수 40Hz의 1차지연요소의 특성으로 감소한다. 또 100Hz 근방에서 피크가 나타나지만, 이 공진특성의 원인은 실험적으로 규명하지는 않았지만 로터의 관성과 지지부(spider) 또는 것이 가진 스프링 특성으로 생각된다. 그러나 유량계의 과도특성에서는 이 현상에 대한 영향이 나타나지 않는 점을 고려하면 유량계측에는 크게 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

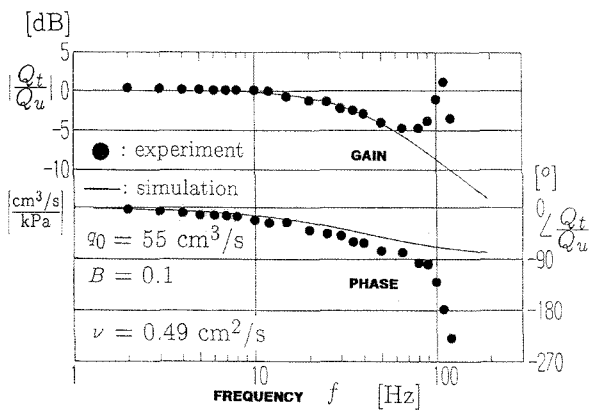


Fig. 12 Bode Plot of turbine-meter

Fig. 13은 CCFM, GMFM, 터빈유량계에서 발생하는 압력강하 특성을 나타낸다. 저주파영역에서 CCFM, GMFM과 비교하여 터빈유량계는 압력강하가 아주 낮고, 주파수에 따라 점차적으로 증가하지만, 고주파영역에서는 급격하게 증가하는 경향을 보인다. 또 주파수가 증가함에 따라 GMFM에서는 차압이 급격하게 증가한다. 이 결과에서, 고주파영역

에서 발생하는 차압의 크기는 비정상유량 측정용 유량계의 측정범위, 사용한계 및 응답성에 대한 하나의 평가척도가 될 수 있는 것을 나타낸다.

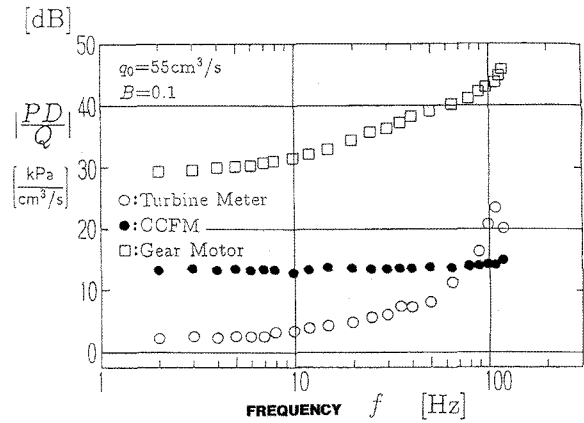


Fig. 13 Pressure drop characteristics

3.5 비정상유량 원격계측법(RIFM)^{23)~28)}

유압시스템에서 유량정보가 필요한 위치에 공간상의 제약 등으로 유량계를 설치할 수 없거나, 또는 유량계 삽입으로 흐름이 교란되어 유압기구나 시스템의 동특성이 변하거나 악영향을 주는 경우가 많이 발생한다. 이 때는 비정상유량을 원격 계측하는 것이 바람직하다. 또한 관로에서 작동유의 압축성에 의한 파동현상을 고려할 때, 관 길이방향의 계측 위치 분해능의 문제도 파생된다.

Fig. 14의 관로계에서 길이 L 만큼 떨어진 2지점에서 압력과 유량 사이의 동특성은 식(2)의 전달행렬로 나타난다³⁹⁾. RIFM은 식(2)를 바탕으로 하여, 상류·하류에서 압력 또는 유량의 두개의 측정값, 예를 들면, 하류압력과 유량(p_d, q_d)에서 상류유량 q_u 를 원격 계측한다. 이것을 $(p_d, q_d) \rightarrow q_u$ 로 표시하면, $(p_w, q_u) \rightarrow q_d, (p_w, q_d) \rightarrow q_w, (p_d, q_u) \rightarrow q_d$ 의 추정도가 가능하며, 이 때는 한 개의 비정상 유량계가 필요하다.

또한 응답성이 양호한 비정상유량계를 구입하는 것이 현실적으로 어려운 점을 고려하면, 관로상의 두 지점에서 압력을 이용하여, 즉 $(p_w, p_d) \rightarrow q_w, (p_w, p_d) \rightarrow q_d$ 의 추정도가 가능하다(3.6 참조). 비정상유량 원격계측(RIFM)에서는 식 (2)의 전달행렬에서 상류·하류의 압력과 유량 사이의 입력·출력 관계로부터 전달함수가 결정되고, 각각의 전달함수에 대한 시간영역에서 하중함수와 입력값(압력 또는 유량)과의 상승적분이 필요하다.

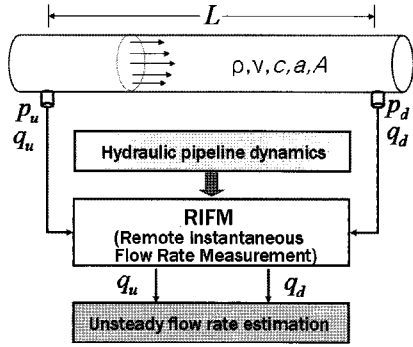


Fig. 14 Principle of RIFM

$$\begin{pmatrix} P_u(s) \\ Q_u(s) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \lambda(s)L & Z_0(s) \sinh \lambda(s)L \\ \frac{1}{Z_0(s)} \sinh \lambda(s)L & \cosh \lambda(s)L \end{bmatrix} \begin{pmatrix} P_d(s) \\ Q_d(s) \end{pmatrix} \quad (2)$$

식 (2)에서 대문자 $P(s)$, $Q(s)$ 는 압력 $p(t)$, 유량 $q(t)$ 의 라플라스 변환형, $\lambda(s)$, $Z_0(s)$ 는 비정상 점성저항을 고려한 분포정수계 관로모델의 전파상수와 특성임피던스이다⁽⁴⁰⁾. 하첨자 u는 관로 상류, d는 하류를 나타낸다.

Fig. 15의 실험장치에서, CCFM1에서 상류유량 q_u , CCFM2에서 하류유량 q_d 를 계측하고, 계측한 상류·하류에서 비정상 유량값은 RIFM에 입력 또는 유량 보정용으로 활용한다.

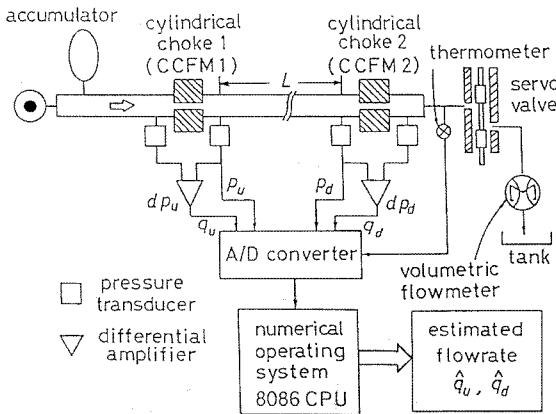


Fig. 15 Experimental apparatus(RIFM/CCFM)

Fig. 16은 하류압력 p_d 과 유량 q_d 계측값을 입력하여 상류유량 q_u 를 추정하고, Fig. 17은 하류압력 p_d 과 상류유량 q_u 를 입력하여, 하류유량 q_d 를 추정하는 결과이다. 그림에서 (^)기호는 RIFM에서 추정된 유량과형이다. CCFM에서 직접 계측한 유량과형과 비교해 보면, 상승시간, 정상상태 등에서 두 파형이 일치하는 것을 볼 수 있다.

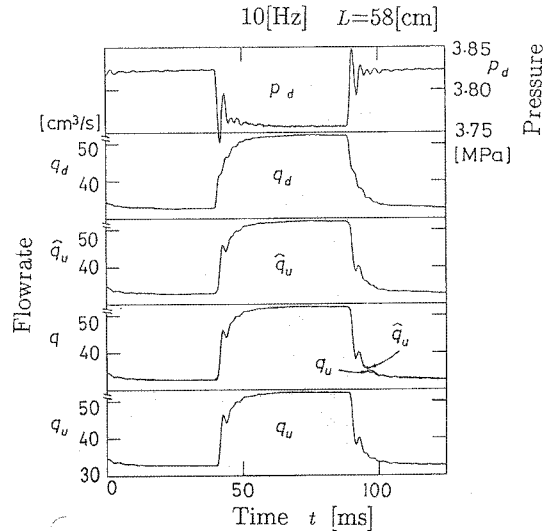


Fig. 16 Measured wave forms

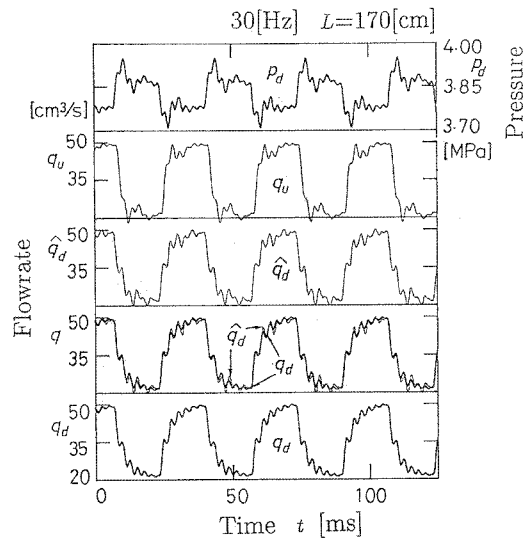


Fig. 17 Measured wave forms

3.6 자기진단기능을 가진 비정상유량계측법^{(41),(42)}

자기진단기능(self-diagnostic function)이란 현재 응답성이 양호한 비정상유량계 구입이 어려운 점과 보정법이 확립되어 있지 않은 것을 고려하여, Fig. 18과 같이 관로의 2지점에서 압력 계측값과 관로모델을 이용하여 비정상 유량계측법의 타당성 검증과 유량계측을 동시에 수행하는 것이다.

자기진단기능 I은 식(2)의 전달행렬과 Fig. 18에서 압력 계측값 $p_1(t)$, $p_3(t)$ 를 입력으로 하여, 관로 중앙단면의 압력 $\hat{p}_2(t)$ 를 추정하고, 직접 계측한 압력 맥동 $p_2(t)$ 와 비교함으로써 압력·유량 추정 알고리즘의 타당성을 검증하는 것이다.

Fig. 19는 자기진단기능 I의 주파수응답 실험결과이며, 200Hz까지 이론값(실선)과 실험결과(○)가 잘

일치한다. 실험은 서보밸브의 응답 특성을 고려하여 200Hz까지 하였다.

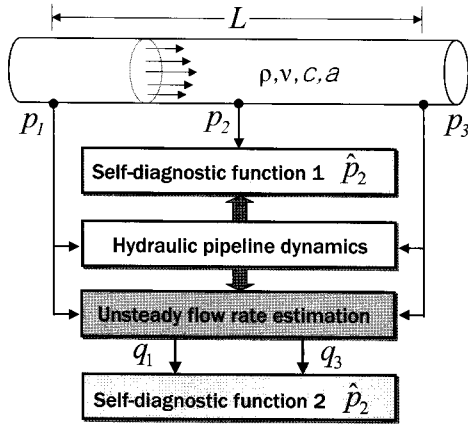


Fig. 18 Self-diagnostic functions

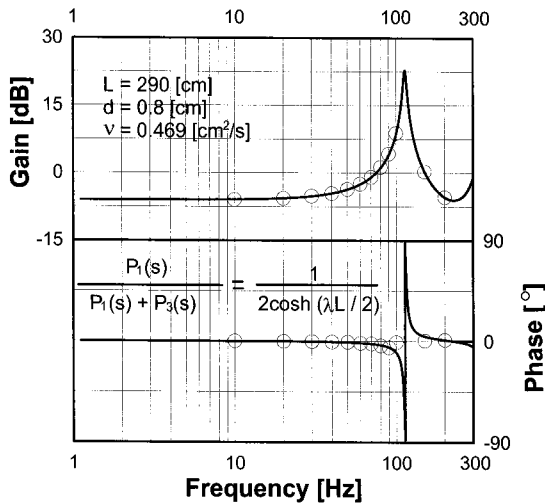


Fig. 19 Bode plot of self-diagnostic function I

자기진단기능II는 식 (2)의 전달행렬과 Fig. 18에서 압력 계측값 $p_1(t)$, $p_3(t)$ 를 유량계측시스템에 입력하여 유량 $\hat{q}_1(t)$, $\hat{q}_3(t)$ 를 추정한다. 그 다음에는 추정한 비정상 유량값 $\hat{q}_1(t)$, $\hat{q}_3(t)$ 을 사용하여, 관로 중앙단면에서 압력 $\hat{p}_2(t)$ 를 추정하고, 직접 계측한 압력맥동 $p_2(t)$ 와 비교함으로써, 비정상유량 계측 시스템의 응답성과 계측 정밀도 및 유효성을 간접적으로 검증하는 것이다.

Fig. 20은 30Hz 정현파 입력에서 대한 계측결과이며, 자기진단기능II를 사용하여, 추정한 유량 $\hat{q}_1(t)$, $\hat{q}_3(t)$ 에서 $\hat{p}_2(t)$ 를 추정하고, 직접 계측한 압력파형 $p_2(t)$ 와 비교하여 보면, 두 파형이 잘 일치한다. 즉 두 지점의 압력 측정값에서 비정상유량을 고속으로 추정할 수 있는 것을 나타낸다.

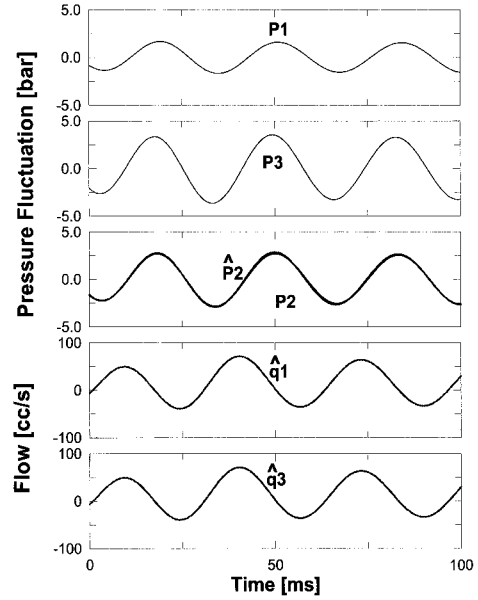


Fig. 20 Measured and estimated wave forms

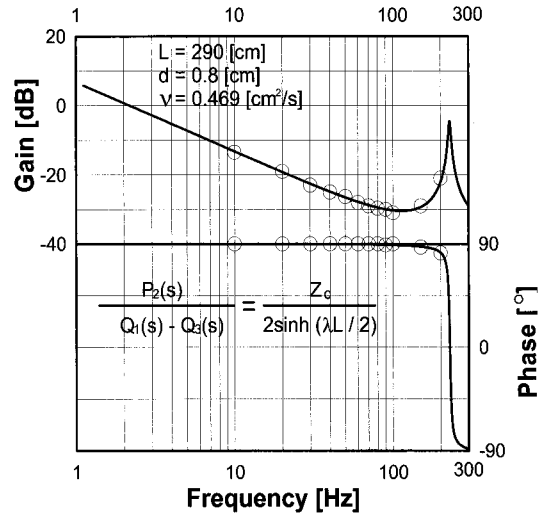


Fig. 21 Bode plot of self-diagnostic function II

Fig. 21은 자기진단기능II의 주파수응답 결과이다. 이득과 위상이 이론과 잘 일치하고 있으며, 비정상유량계측법에서 추정한 유량이 정밀도, 응답성에서 실용상 문제점이 없다는 것을 간접적으로 검증할 수 있다.

3.7 밸브판 형상변화에 따른 액시얼 피스톤펌프의 유량맥동 계측^{43,44)}

유압펌프의 유량맥동 계측은 저소음화와 신뢰성이 높은 유압시스템 개발에 필수 불가결하지만 현재 시판되는 유량계로는 수백~수천Hz의 고주파 성분이 포함되어 있는 유압펌프의 송출유량 맥동을 고속응답으로 계측하는 것은 거의 불가능하다. 여기서는 비정상유량 원격계측법(RIFM)을 응용하여, 사

판식 액시얼 피스톤 펌프(피스톤 수 7개, 배제용적 8cc/rev)에서 발생하는 고주파 유량맥동을 계측한다.

특히 펌프의 송출 유량맥동이 밸브판의 릴리프 홈 형상에 따라 영향을 많이 받기 때문에 3종류의 밸브판을 설계·제작하여 그 영향을 비교·검토해 본다. Fig. 22에서, (a) 밸브판(I), (b) 밸브판(II)는 V자 삼각추형 릴리프 홈을 $8^{\circ}30' \pm 15'$, $16^{\circ}40'$ 경사각으로 가공한 것, (c) 밸브판(III)은 릴리프 홈이 없는 것, (d)는 실린더블록의 송출포트형상이다. 시판용 피스톤 펌프에 장착된 것은 밸브판(I)이다.

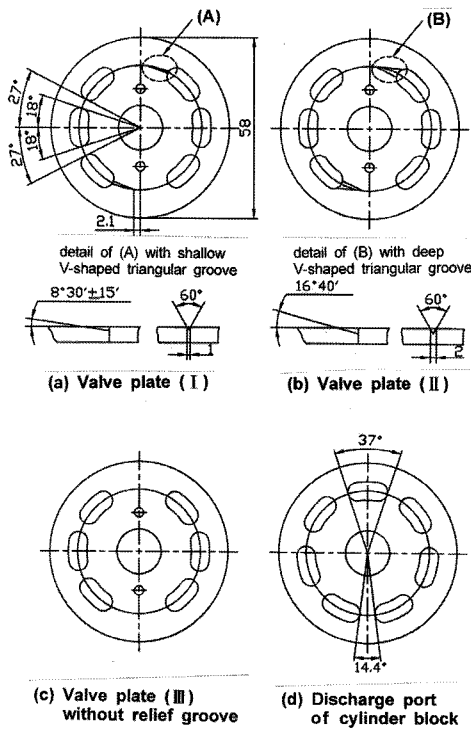


Fig. 22 Valve plates and discharge port

Fig. 23 (a)는 밸브판(I), 평균압력 6MPa, 평균유량 80cm³/s, 펌프 회전수 1420rpm에서 계측한 파형이며, 압력·유량파형의 한 주기는 약 42ms이다. 압력과 유량맥동의 계측 파형에서 한 주기마다 7개의 진폭이 큰 맥동파형이 나타나는 것은 사용한 펌프의 피스톤 수가 7개이기 때문이다. (b)는 Fig. 22에 나타낸 릴리프 홈의 형상변화에 따른 유량맥동 계측파형이다. 릴리프 홈이 피스톤 펌프의 유량맥동에 크게 영향을 주며, 펌프 흡입구에서 부스터 압력도 유량맥동의 진폭에 영향을 준다. 기타 밸브판 형상에 따른 유량맥동, 예압축과 중합(overlap)의 영향, 설정압력, 부스터압력의 영향 등은 지면 관계상 생략한다(참고문헌 43), 44)참조)

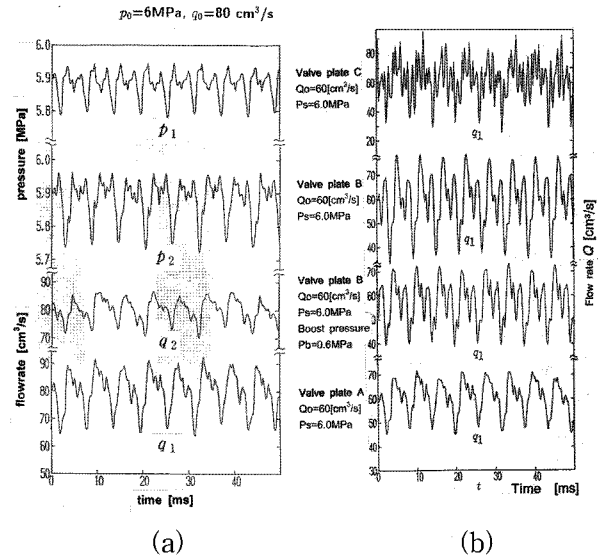


Fig. 23 Recorded wave forms

3.8 HST용 피스톤 펌프·모터의 유량맥동 계측 (41),45)

유압전동장치(HST; hydrostatic transmission)는 Fig. 24와 같이 기계적 에너지를 유압동력으로 변환하여 전달하는 것이다. HST의 저소음화를 위해서는 유압펌프·모터의 유량맥동을 고속응답으로 계측하고, 압력맥동과의 상호작용을 해석하여 진동과 소음이 저감되도록 관련 부품과 시스템을 설계하는 것이다. 또한 HST에서 발생하는 유량·압력맥동은 Fig. 23과 같이 유압펌프·모터가 단독으로 작동할 때와는 아주 다르고, 유압펌프·모터의 맥동이 상호작용하여 복잡한 특성을 나타낸다.

여기서는 Fig. 24와 같이, 가변용량형 사판식 피스톤 펌프(피스톤 9개, 배제용적 34.2cc/rev)·피스톤 모터(피스톤 9개, 배제용적 24.7cc/rev) 및 고압·저압관로로 구성된 개회로형(open circuit type) HST에서, 유압펌프 송출구와 유압모터 입구에서 유량맥동을 계측하여 HST 저소음화 설계의 기초자료를 획득한다. Fig. 24에서, 유압펌프 송출압력 p_1 , 유압모터 입구압력 p_3 를 입력하여 유압펌프 송출유량 q_1 과 모터 입구유량 q_3 을 추정한다.

Fig. 25에서 왼쪽 파형은 압력맥동 $p_1(t)$, $p_3(t)$ 계측값을 입력하고, 자기진단기능 I을 사용하여 관로 중앙단면에서 압력 추정값 $\hat{p}_2(t)$ 와 직접 계측한 압력파형 $p_2(t)$ 을 비교한 것이다. 오른쪽은 자기진단기능 II를 사용하여, 펌프 유량맥동 $\hat{q}_1(t)$ 와 모터 입구 유량 $\hat{q}_3(t)$ 를 추정한 결과이다. 또 추정한 유량을 입력하여 관 중앙단면에서 압력맥동 $\hat{p}_2(t)$ 를 추정하

고, 직접 계측한 압력파형 $p_2(t)$ 를 비교하여 보면, 두 파형이 잘 일치함을 볼 수 있다.

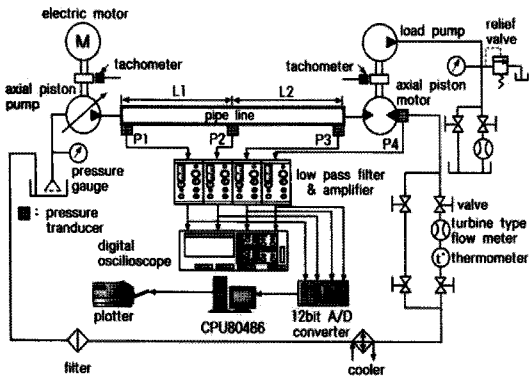


Fig. 24 Open circuit type HST

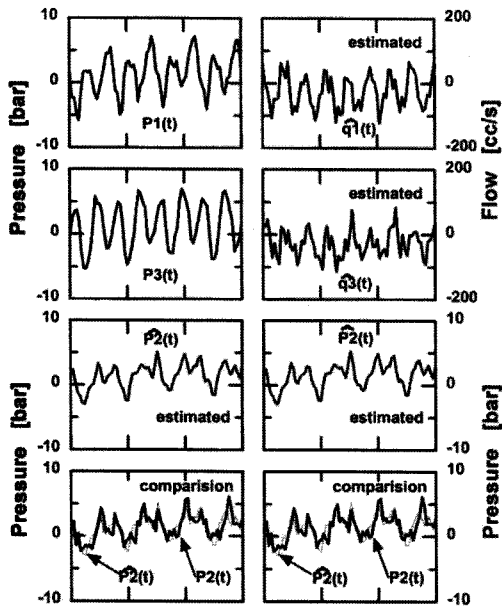


Fig. 25 Comparison of measured and estimated flow and pressure ripples

3.9 승용차 능동현가장치용 레이디얼 피스톤펌프의 유량맥동 계측 및 능동제어⁴⁶⁾

현재 유압시스템에서 발생하는 유량맥동과 압력맥동은 축압기나 유압필터 등의 수동적인 방법으로 제거·감쇠시키고 있고, 구조적으로 축압기 등은 고유진동수를 높이는 것이 한계가 있기 때문에 비교적 저주파수영역에서 작은 진폭밖에 흡수할 수 없다. 유량맥동의 능동제진에 관해서는 연구보고가 거의 없으며, 저주파수영역에서 小嶋 등의 연구가 있다⁴⁷⁾.

여기서는 실제 유압용 피스톤펌프에서 발생하는 1kHz정도의 고주파 유량맥동을 능동적으로 저감하

기 위해, 적층 PZT소자의 고속응답성, 고강성을 액추에이터의 고속운동에 이용하여, 고주파 펄스상의 유량을 관로내에서 발생시키는 능동형 축압기(A.A; active accumulator)를 개발하여 그 성능을 실험적으로 조사하였다. 또한 제어타이밍과 맥동감쇠 효과를 확인하기 위해 CCFM과 RIFM으로 유량맥동을 고속응답으로 계측한다.

Fig. 26은 승용차 능동현가장치용 레이디얼 피스톤펌프의 유량맥동 계측과 A.A를 이용한 능동제진 장치이다. 능동형 축압기(A.A)의 기본원리는 피스톤-실린더 등으로 구성된 고주파 구동이 가능한 유량맥동 발생장치를 관로 입구에 설치하여, 관로 입구의 펌프 등에서 발생하는 유량맥동을 상쇄시키도록 피스톤 속도를 제어하여 유량맥동이 관로내로 유입되는 것을 방지함으로써, 그 결과로 관로내의 압력맥동을 억압하여 하류로 유체전파소음 및 관로 자체의 진동을 억제하는 것이다. 이를 위해 높은 응답성을 가진 피스톤 구동계가 필요하고, 여기서는 적층 PZT소자를 이용하였다. A.A는 적층PZT A, B에 서로 역상(逆相)의 전압을 인가하면 피스톤이 구동하여 유량맥동이 발생한다.

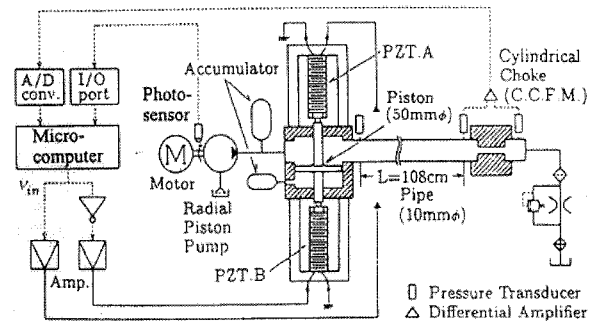


Fig. 26 Experimental apparatus(A.A)

피스톤 지름 50mm, 최대변위 30 μ m이고, 이 변위가 전부 유량맥동 발생에 유효하다면 1kHz 정현파로 구동할 때 유량 350cm³/s가 얻어진다.

A.A는 펌프 송출구에 설치하고, 그 사이에 금속 벨로즈형 축압기를 부착하였다. 저주파맥동은 이 축압기에서 흡수하고, 고주파맥동은 A.A에서 저감하여 효과적으로 유량맥동을 제거하도록 구성하였다. 유량맥동계측은 A.A에서 1.08m 떨어진 하류에 원통형 초크 순간유량계(CCFM)를 설치하고, A.A를 통과한 펌프의 유량맥동은 비정상유량 원격계측법(RIFM)으로 추정하여 관 상류·하류에서 맥동감쇠 효과를 실험적으로 직접 확인한다.

Fig. 27은 레이디얼 피스톤펌프의 회전수가 900rpm일 때, 고주파영역(500Hz~1kHz)에서 하류 유량맥동 q_d 의 스펙트럼 강도가 가장 탁월한 3개의 감쇠목표 주파수성분($F_{t91}=612\text{Hz}$, $F_{t92}=716\text{Hz}$, $F_{t93}=814\text{Hz}$)을 동시에 감쇠시킨 실험결과이다. 즉 목표 주파수 612Hz, 716Hz, 814Hz에 대한 최적제어입력을 각각의 위상을 고려하면서 합산한 파형을 입력하여 A.A를 구동한다. 그림에서 위쪽은 유량, 아래쪽은 각각 주파수 분석한 스펙트럼 강도이다. 그림에서 보듯이, 감쇠 목표 주파수성분에 대해, 충분한 맥동저감효과가 있다. 또 압력맥동에 대해서도 같은 실험결과를 얻었다.

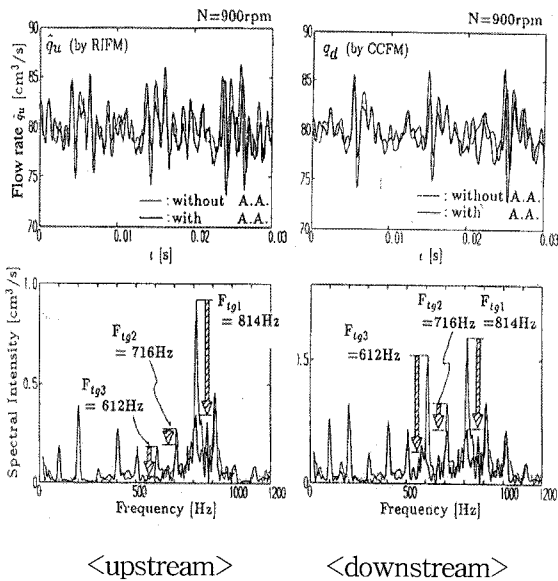


Fig. 27 Experimental results

4. 결 언

유공압시스템에서 사용하는 비정상유량계의 현황과 원관내의 흐름이 층류인 경우에 대한 비정상유량계측법을 개략적으로 소개하였다. 또 비정상유량계측법을 유압시스템에 적용하여 실제 계측 사례를 중심으로 해설하였다.

이러한 비정상유량계측시스템의 공통점은 동특성의 수학적 모델이 확립되어 있는 관로, 초크 등에서 압력, 유량, 유속 등의 동적 관계를 이용하여, 실시간 고속연산을 실현함으로써 순간유량뿐만 아니라 다른 물리량을 계측하려는 것이다. 또 유공압기구나 시스템의 동특성 해석뿐만 아니라 실시간 순간유량계를 서보계와 같은 제어시스템에 피드백 센서로 사용하여 유공압시스템의 고속화 고기능화에 응용

할 수 있기를 기대한다.

끝으로, 소형·경량, 설치 용이, 고속 응답성, 높은 정밀도, 유동상태를 교란시키지 않고, 계측대상 유체의 파라미터 변동에도 강인한 비정상유량 계측시스템의 개발이 시급하다.

참고문헌

※지면 관계상, J1은 油壓と空氣壓, J2는 일본계측 자동제어학회 논문집, J3는 일본기계학회 논문집, J4는 한국공작기계학회 논문집을 나타낸다.

- 1) J. E. Hardy, et. al., "Flow measurement methods and Application", John Wiley & Sons, 1999
- 2) R. W. Miller, "Flow Measurement Engineering Handbook", McGRAW-Hill, New York, 1996
- 3) 川田裕郎 등, "流量計測ハンドブック", 日刊工業新聞社, 東京, 1979
- 4) 中野, 横田, J1, Vol. 10, No. 1, 1979
- 5) 内山, 渡邊, 箱守, 일본정밀기계학회 추계학술대회 논문집, pp. 393, 1979
- 6) Weston, W., et. al., J. of Physics(D), Applied Physics, Vol. 12, pp. 203, 1979
- 7) 横田, 中野, J1, Vol. 12, No. 3, 1981
- 8) 内山, 箱守, J2, Vol. 18, No. 7, pp. 653, 1982
- 9) 中野, 横田 등, J2, Vol. 20, No. 5, pp. 421, 1984
- 10) 中野 등, J3(B편), Vol. 52, No. 473, pp. 413, 1986
- 11) 趙 등, J3(B편), Vol. 52, No. 482, pp. 3484, 1986
- 12) 趙, 北川, 香川, 竹中, J3(B편), Vol. 52, No. 480, pp. 2851-2859, 1986
- 13) 殷, 眞田, 北川, 竹中, J3(B편), Vol. 54, No. 503, 1988
- 14) 中野, 横田, J1, Vol. 17, No. 4, pp. 311, 1986
- 15) K. Nakano, S. Yokota, IMEKO Congress, Huston, USA, 1988
- 16) 横田, 井手, 中野, J3(B편), Vol. 53, No. 489, pp. 1548, 1987
- 17) S. Yokota, K. Nakano, 2nd Intl. Conf. on Flow Measurement, London, UK, 1988
- 18) 기술자료, "新しく開發された高壓用流量計VCシリーズ", 油壓技術, Vol. 22, No.4, 1983
- 19) 中野, 横田 등, J1, Vol. 18, No. 2, pp. 148, 1987

- 20) 横田 등, J1, Vol. 20, No. 4, pp. 328, 1989
 21) S. Yokota, K. Nakano, Proc. 1st JFPS Intl. Conf. on Oil H&P, Tokyo, 1989
 22) 横田 등, J1, Vol. 26, No. 6, pp. 531, 1989
 23) 横田, 金, 中野, J1, Vol. 21, No. 2, p189, 1990
 24) 金, 横田, 中野, J1, Vol. 22, No. 2, p169, 1991
 25) 横田, 金, J3(C), Vol. 57, No. 541, pp. 2872, 1991
 26) 横田, 金, 中野, J1, Vol. 23, No. 2, pp. 209, 1992
 27) 横田, 鈴木, 金, J3(C編), Vol. 58, No. 556, pp. 3634, 1992
 28) S. Yokota, D. T. Kim, K. Nakano, JSME International, SeriesIII, Vol. 35, No.4, pp. 591, 1992
 29) K. Nakano, Y. Tanaka, T. Ohsawa, 5th FLOMEKO, 1989
 30) 内山, 劉, 箱守, J2, Vol. 22, No. 9, pp. 962, 1986
 31) K. Yamamoto, A. Nomoto, ACTA IMEKO, pp. 97, 1982
 32) 山本, 後藤, エバラ時報, No. 113, 1980
 33) 高橋, 山下, 山口, J2, Vol. 18, No. 6, 1982
 34) 大内, 池邊, J2, Vol. 18, No. 10, 1982
 35) 鳥越, J2, Vol. 23, No. 8, pp. 794, 1987
 36) 김도태, 경일대학교 논문집, 제4집, pp. 143, 1997
 37) 김도태, 예용택, J4, 제9권, 제3호, pp. 83, 2000
 38) S. Yokota, D. T. Kim, K. Suzuki, '94KACC pp. 60, 1994
 39) A.F. D'souza, R. Oldenburger, Trans. ASME, J. of Basic Eng., Vol. 86, No. 3, pp. 589, 1964
 40) Brown, F. T., Trans. ASME, J. of Basic Eng., Vol. 84, No. 4, pp. 547, 1962
 41) 김도태, 윤인균, J4, 제10권, 제1호, pp. 120, 2001
 42) 김도태, 홍성태, 한국공작기계학회 추계학술대회 논문집, pp. 411, 1999
 43) D. T. Kim, S. Yokota, FLOMEKO'93, Vol. 1, pp. 177, 1993
 44) 김도태, 이상기, 横田眞一, J4, 제8권, 제2호, pp. 35, 1999
 45) 김도태, J4, 제11권, 제3호, pp. 33-38, 2002
 46) S. Yokota, H. Somada, H. Yamaguchi, JSME Int. J.(B), Vol. 39, No.1, pp. 119, 1996
 47) E. Kojima, M. Shinada, Trans. of JSME(in Japanese), Vol. 59, No. 553, pp. 2651, 1992

[저자 소개]



김도태

E-mail : dtkim@kiu.ac.kr

Tel : 053-850-7126

1958년 7월 10일생

1991년 동경공업대학 정밀기계시스템 박사

과정 졸업, 1992~현재 경일대학교 교수,

유공압제어·계측·맥동해석 관련 연구에 종사, 유공압시스템 학회, 일본플루이드파워시스템학회 정회원, 공학박사