한국공작기계학회 '99년도 추계학술대회 논문집 pp.411~416

유압관로의 동특성을 이용한 비정상 유량계측

Unsteady Flow Rate Measurement by Using Hydraulic Pipeline Dynamics

김도태(경일대 기계공학부), 홍성태*(경일대 대학원)

D. T. Kim (Kyungil Univ.), S. T. Hong (Graduate School, Kyungil Univ.)

ABSTRACT

The measurement of unsteady flow rate is of vital importance to clarify and improve the dynamic characteristics in pipeline, hydraulic components and systems. There is also demand for a real time flow sensor of ability to measure unsteady flow rate with high accuracy and fast response to realize feedback control of flow rate in fluid power systems. In this paper, we propose an approach for estimating unsteady flow rate through a pipeline and components under high pressure condition. In the method, unsteady flow rate is estimated by using hydraulic pipeline dynamics and the measured pressure values at two distant points along the pipeline. The distributed parameter model of hydraulic pipeline is applied with consideration of frequency dependent viscosity friction and unsteady velocity distribution at a cross section of a pipeline. By using the self-checking functions of the method, the validity is investigated by comparison with the measured and estimated pressure waveforms at the halfway section on the pipeline. The results show good agreement between the estimated flow rate waveforms and theoretical those under unsteady laminar flow conditions. the method proposed here is useful in estimating unsteady flow rate through an arbitrary cross section in hydraulic pipeline and components without installing an instantaneous flowmeter.

Key words : Unsteady flow rate measurement (비정상 유량계측), Fluid power systems (유공압 시스템), Hydraulic pipeline dynamics (유압관로의 동특성), Pressure measurement (압력계측)

1. 서 론

최근 유압시스템에 사용되는 유압기기(機器)가 고성능화, 고속화됨에 따라 관로나 기기를 통과하는 비정상 흐름의 순간유량을 고속응답으로 계측하는 것은 시스템의 동특성 해석과 유량 피드백 관점에서 중요한 과제이다. 지금까지 정상유량 계측에 대해서는 정밀도가 높은 다양한 형태의 유량계가 개발되어 산업계에 사용되고 있지만[1], 비정상 유량계측에 대해서는 충분한 응답성을 가진 비정상 유량계를 구입하는 것이 어렵고, 아직 보정법(calibration)도 확립되어 있지 않다. 산업용으로 많이 사용되는 기어모터형 유량계나 터빈형 유량계가 비교적 응답성이 양호한 것으로 보고되어 있지만, 그 응답 특성에 대해서는 구체적으로 검토된 바가 없다.

실제 유량계측에서는 시스템의 공간상의 제약 때문에 유량계의 설치가 불가능하거나 유량계를 설치함으로 인하여 흐름이 교란되거나 시스템의 동특성이 변하는 경우도 있다[2),(3),(4)]. 그리고 실용적인 측면에서 유량계는 소형, 경량이고, 피측정 시스템 내에 용이하게 설치할 수 있어야 한다.

본 연구에서는 비정상 유량을 직접 계측하는 것이 어려운 점을 고려하여, 비교적 측정이 용이

한 유압제어 시스템내의 압력 계측값을 이용한 비정상 유량계측법을 제안하고, 실험을 통하여 그 응답성과 계측 정밀도에 대하여 검토한다. 이 계측법은 관로상의 임의의 2지점의 압력 계측값과 분포정수계 비정상 점성저항을 고려한 관로 동특성 모델을 응용하여 비정상 유량을 추정한다. 또한 비정상 유량계측법의 자기진단 기능(自記診斷機能, self-checking function)을 도입하여, 제안한 계측법의 응답성, 계측 정밀도 등을 검증하였으며, 환경변화, 작동조건 및 파라미터 변동에 대한 계측법의 신뢰성과 계측 정밀도의 향상을 도모하였다.

2. 계측원리

Fig. 1은 유압 관로계와 제안한 비정상 유량 계측법의 자기진단 기능의 기본개념을 나타낸 것이다. 유압관로내의 흐름은 완전히 발달된 축대칭 층류이고, 작동유의 점성과 압축성을 고려한 유압관로 상·하류 사이의 압력·유량간 동특성은 식 (1)로 주어진다[5].

$$\begin{pmatrix} P_1(s) \\ Q_1(s) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh\lambda(s)L & Z_0(s)\sinh\lambda(s)L \\ \frac{1}{Z_0(s)}\sinh\lambda(s)L & \cosh\lambda(s)L \end{bmatrix} \begin{pmatrix} P_3(s) \\ Q_3(s) \end{pmatrix} \quad (1)$$

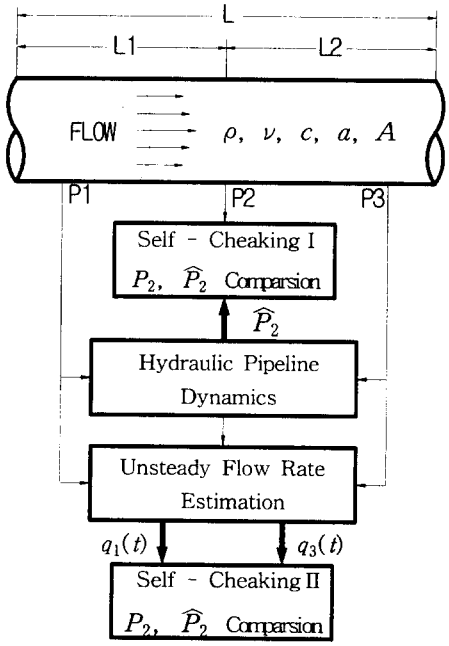

Fig.1 Schematic of pipeline and self-checking

식에서, L은 압력 계측점 사이의 관로 길이, $P(s)$, $Q(s)$는 압력 $p(t)$, 유량 $q(t)$변동분의 라플라스 변환형, 하첨자 1, 2, 3은 관로의 상류부, 중간 단면부 및 하류부를 나타낸다. $\lambda(s)$, $Z_0(s)$는 주파수에 의존하는 비정상 점성저항을 고려한 관로의 전파상수(propagation constant)와 특성 임피던스(characteristic impedance)이며, 다음 식으로 주어진다[6].

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

$$Z_0(s) = \frac{\rho c}{\pi a^2}\left\{1 - \frac{2J_1(ja\sqrt{s/\nu})}{ja\sqrt{s/\nu}\,J_0(ja\sqrt{s/\nu})}\right\}^{-1/2} \quad (3)$$

식에서, a는 관로의 반지름, c는 음속, $J_n(x)$는 제1종 n차 Bessel 함수, j는 허수단위, s는 라플라스 연산자, ν는 작동유의 동점성 계수, ρ는 밀도이다.

식 (1)의 분포정수계 관로모델을 기초로 하여, Fig. 1에서 상류압력 $p_1(t)$와 하류압력 $p_3(t)$를 계측하여, 압력 계측점의 단면을 통과하는 유량 $q_1(t)$, $q_3(t)$를 추정하는 것이 가능하다. 여기서는 관로 상류 단면을 통과하는 비정상 유량 $q_1(t)$의 추정에 대하여 검토한다. 이 경우, 식 (1)의 전달행렬식으로부터, 상류을 통과하는 비정상 유량 $q_1(t)$는 라플라스 영역에서 다음 식으로 주어진다.

$$Q_1(s) = G_a(s)\cdot P_1(s) - G_b(s)\cdot P_3(s) \quad (4)$$

식 (4)에서, $G_a(s)$는 관로의 상류압력 $P_1(s)$ 입력에 대한 상류유량 $Q_1(s)$간의 전달함수, $G_b(s)$는 하류압력 $P_3(s)$ 입력에 대한 상류유량 $Q_1(s)$간의 전달함수이며, 다음 식으로 주어진다.

$$G_a(s) = \frac{1}{Z_0(s)\cdot\tanh\lambda(s)} \quad (5)$$

$$G_b(s) = \frac{1}{Z_0(s)\cdot\sinh\lambda(s)} \quad (6)$$

식 (4)를 이용하여, 비정상 유량을 계측하는

방법은 몇가지 제안되어 있지만[1], 여기서는 고속 푸리에 변환법 (Fast Fourier Transformation, 이하 FFT라 함)을 응용하여, 비정상 유량을 추정한다.

Fig. 2는 FFT를 응용한 비정상 유량 추정 알고리듬을 나타낸 것이다. 먼저, 입력신호인 상류압력 $p_1(k\Delta t)$과 하류압력 $p_3(k\Delta t)$를 직접 측정하여, FFT를 하면 주파수 영역에서 각각의 압력 스펙트럼 $P_1(jn\omega)$, $P_3(jn\omega)$가 구해진다. 식 (4)를 이용하여, $P_1(jn\omega)$와 전달함수 $G_a(jn\omega)$ 및 $P_3(jn\omega)$와 전달함수 $G_b(jn\omega)$의 각각에 대하여 주파수 영역에서 상승적분(convolution integral)을 수행하고, 그 결과로 주어진 유량 스펙트럼 $Q_{p1}(jn\omega)$, $Q_{p2}(jn\omega)$를 고속 푸리에 역변환(IFFT라 함)하면, 시간영역에서 비정상 유량 $q_1(k\Delta t)$를 추정할 수 있다. 같은 방법으로, $p_1(t)$, $p_3(t)$를 입력하여, 하류단면을 통과하는 유량 $q_3(t)$도 추정할 수 있다.

3. 유량 계측법의 자기진단 기능

현재 비정상 유량을 고속 응답으로 계측할 수 있는 보정용 시스템이 개발되어 있지 않기 때문에, 제안한 계측법의 응답성, 계측 정밀도 등을 검증하는 것은 매우 어렵다. 여기서는 비정상 유량보다는 비교적 계측이 용이한 압력 계측값을 이용하여, 유량계측법의 타당성에 대하여 검토하였다. 또한 환경변화, 작동조건 및 파라미터 변동에 대한 계측법의 신뢰성과 계측 정밀도의 향상을 위해서 다음과 같은 自己診斷機能(self checking functions)을 제안하였다.

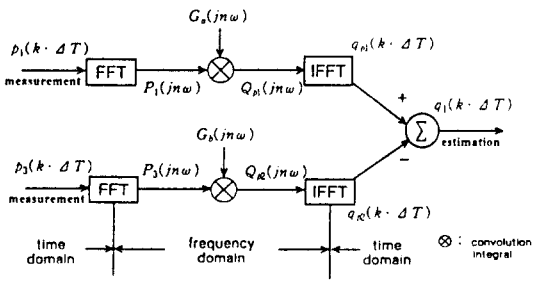

Fig. 2 Unsteady flow rate estimation

Fig. 1은 유량맥동 계측법의 자기진단 기능의 기본개념을 도식적으로 나타낸 것이다. Fig. 1의 유압관로계에서, 관로 단면1, 3에서의 압력 계측값 $p_1(t)$, $p_3(t)$는 비정상 유량을 계측하기 위해 입력신호로 사용한다. 그리고 단면1, 3의 중앙 단면에서 압력 계측값 $p_2(t)$는 비교·검증용 신호로 사용한다. Fig. 1에서, $L_1=L_2=L/2$ 인 경우, 식 (1)의 관로 동특성 모델로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\widehat{P}_2(s)}{P_1(s)+P_3(s)}=\frac{1}{2\cosh\lambda(s)L_1} \quad (7)$$

$$\frac{\widehat{P}_2(s)}{Q_1(s)-Q_3(s)}=\frac{Z_0(s)}{2\sinh\lambda(s)L_1} \quad (8)$$

자기진단 기능1은 식(7)을 기초로 하여, 압력 계측값 $p_1(t)$, $p_3(t)$를 입력하여, 관로 중앙단면의 압력 $\widehat{p}_2(t)$를 추정하고, 직접 계측한 압력맥동 $p_2(t)$와 비교·검토하여 추정 알고리듬의 타당성을 검토한다.

자기진단 기능2에서는 식(8)에서, 본 유량 계측법으로 추정한 유량 $q_1(t)$, $q_3(t)$를 사용하여, 관로 중앙단면의 압력 $\widehat{p}_2(t)$를 구할 수 있으며, 직접 계측한 압력맥동 $p_2(t)$와 비교·검토함으로써, 유량계측 시스템의 응답성과 계측 정밀도 및 유효성을 간접적으로 검증할 수 있는 하나의 근거가 된다.

4 실 험

4.1 실험장치

Fig. 3은 제안한 비정상 유량계측법과 자기진단 기능을 검증하기 실험장치의 개략도 이다. 실험장치는 유압발생부, 유압관로계 및 계측·신호처리부로 구성되어 있다. 유압발생부는 정용량형 사판식 액셜 피스톤 펌프(배제용적 8cc/rev)를 3.7kW 3상 유도 전동기로 구동하였다. 유압관로부의 상류단 매니폴드에는 축압기(용량 25 l)를 설치하여, 피스톤 펌프에서 발생되는 압력맥동과 유량맥동을 제거하였다. 또한

실험조건에 따라 축압기를 용이하게 제거할 수 있도록 매니폴드를 설계·제작하였다. 유압관로는 내경 16mm, 길이 5800mm인 고압 배관용 강관으로 배관하였다. 관로내의 임의의 단면을 통과하는 비정상 유량을 계측하기 위하여, 관로 상류압력 $p_1(t)$, 관로 중앙 단면에서의 압력 $p_2(t)$ 및 하류압력 $p_3(t)$를 고속응답형 압력변환기(고유진동수 109kHz)로 측정하였다. 압력 $p_1(t)$와 $p_3(t)$는 관로의 상·하류 단면을 통과하는 비정상 유량동을 추정하기 위하여 계측하며, $p_2(t)$는 비정상 유량계측법의 자기진단 기능에 의해 추정된 압력맥동 $\hat{p}_2(t)$와 비교·검토할 목적으로 계측하였다. 계측된 압력신호는 고정도 증폭기와 저역통과필터를 거쳐 12bit A/D변환기(샘플링 주파수 5kHz)에서 이산화되어 마이크로 컴퓨터(CPU 80486)에 입력된다.

유량변동은 하류단 매니폴드에 부착된 전기·유압 서보밸브의 개도(開度)를 어느 동작점에서 미소진폭으로 변동시켜 정현파 또는 사각파로 변화시켰다. 또한 터빈형 유량계로는 정상유량을 계측하였고, 써미스트형 온도계로 작동유의 온도를 측정하였다.

실험은 40℃에서 동점도가 46cSt인 유압작동유를 사용하였고, 실험시 작동유의 온도는 40±1℃, 관로 상류단의 평균압력을 70bar로 일정하게 유지하면서 수행하였다.

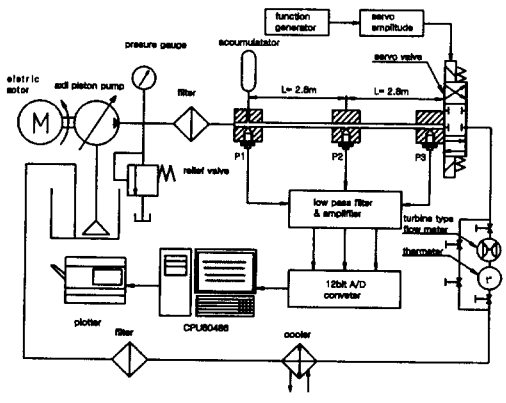

Fig. 3 Experimental apparatus

4.2 실험결과 및 고찰

본 연구에서 제안한 유량 계측법의 타당성을 검토하기 위하여, 먼저 직접 측정이 가능한 압력 계측값을 비교·검증용으로 사용하는 자기진단 기능1에 대하여 검토한다.

Fig. 4는 서보밸브에 40Hz의 정현파를 입력한 경우, 압력파형의 일례를 나타낸 것이다. 관로 평균 설정압력은 70bar, 평균유량 2.2 ℓ/min이다. Fig.4에서, $p_1(t)$, $p_3(t)$는 자기진단 기능1에서 입력신호인 관로 상·하류 압력 계측 파형, $p_2(t)$는 상·하류 압력 계측점의 중앙단면에서의 압력 계측값, $\hat{p}_2(t)$는 자기진단 기능1에 의

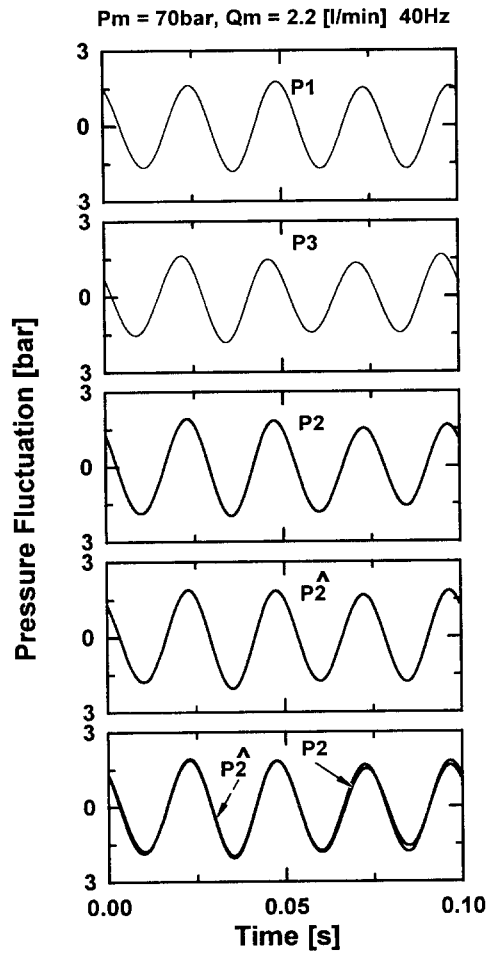

Fig. 4 Typical example of measured and estimated pressure waveforms

해 추정된 중앙단면에서의 압력파형이며, 최하단에는 추정된 압력파형 $\hat{p}_2(t)$과 직접 계측한 압력파형 $p_2(t)$를 비교한 것이다. 두 파형이 잘 일치함을 볼 수 있다.

Fig. 5은 식(7)의 자기진단 기능1에 대한 전달함수의 주파수 특성에 대한 이론값, 그리고 Fig. 4와 같은 실험조건에서 주파수 응답 실험결과(○표시)를 비교한 것이다. 실험결과의 이득과 위상이 이론값과 잘 일치하고 있으며, 제안한 자기진단 기능1의 타당성을 나타낸다.

Fig. 6은 서보밸브에 10Hz의 정현파를 입력하여 유량계측 실험을 수행한 결과를 나타낸 것이다. $p_1(t)$, $p_3(t)$는 상·하류의 압력 계측값, $q_1(t)$, $q_3(t)$는 제안한 비정상 유량 계측법으로 추정한 유량파형이다. 또한 자기진단 기능2를 사용하여, 추정한 유량 $q_1(t)$, $q_3(t)$의 응답성과 계측 정밀도를 비교하였다. 그림에서 관로 중앙단면의 압력파형 $\hat{p}_2(t)$는 유량 $q_1(t)$, $q_3(t)$를 입력하여 자기진단 기능2로 추정한 압력파형이며, 직접 계측한 압력파형 $p_2(t)$와 비교하여 보면, 두 파형이 잘 일치함을 볼 수 있다.

Fig. 7은 서보밸브에 90Hz의 정현파를 입력한 경우의 실험결과이며, 추정된 파형과 직접 계측한 파형이 잘 일치함을 알 수 있다.

또한 유량 계측값의 응답성과 계측정밀도를 검증하기 위한 자기진단 기능2에 대한 주파수 응답 결과를 Fig. 8에 제시하였다. 실선은 식(8)의 자기진단 기능2에 대한 전달함수의 주파수

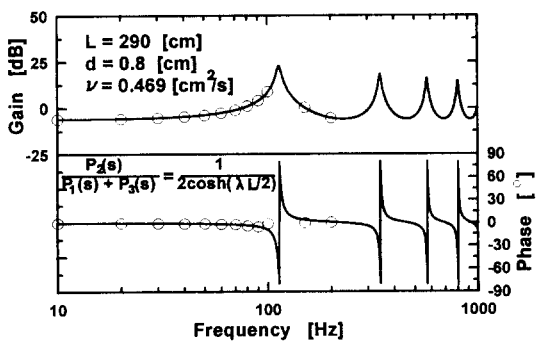

Fig. 5 Frequency response characteristics

특성에 대한 이론값, ○표시는 Fig. 6-7과 동일한 실험조건하에서, 서보밸브에 10Hz~200Hz까지 정현파를 입력하여 주파수 응답실험을 수행한 이득과 위상을 나타낸다. 이득과 위상이 이론과 잘 일치하고 있으며, 제안한 비정상 유량계측법에서 추정된 유량이 타당한 것을 간접적으로 검증할 수 있다.

4 결 론

본 연구에서는 유압관로의 분포정수 관로모델을 응용한 비정상 유량계측법을 제안하고 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 고속 응답형 압력변환기를 사용하여, 관로

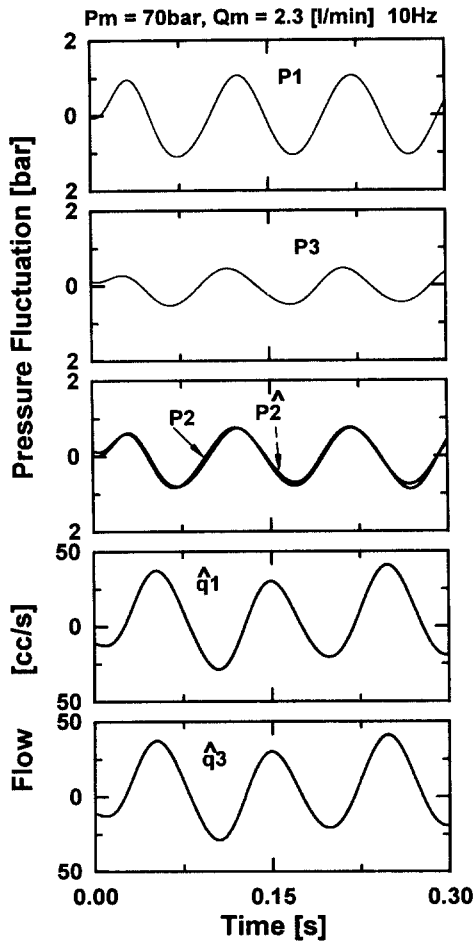

Fig. 6 Typical example of measured and estimated pressure waveforms

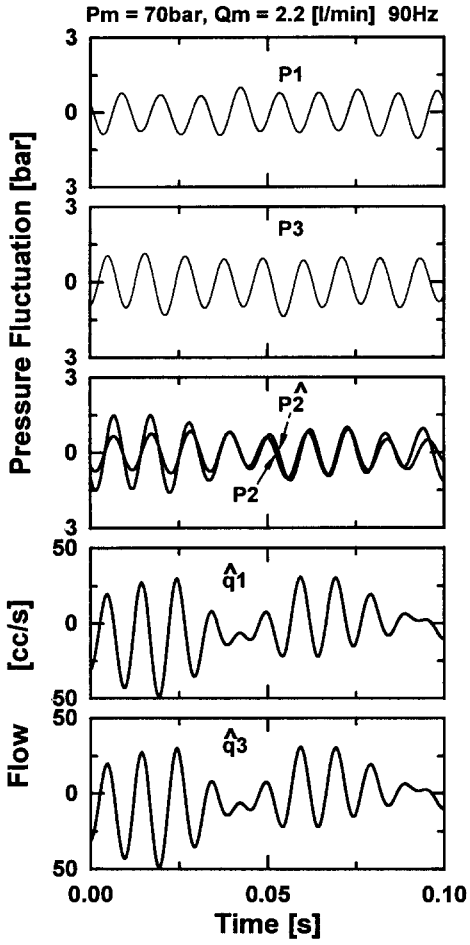

Fig. 7 Typical example of measured and estimated pressure waveforms

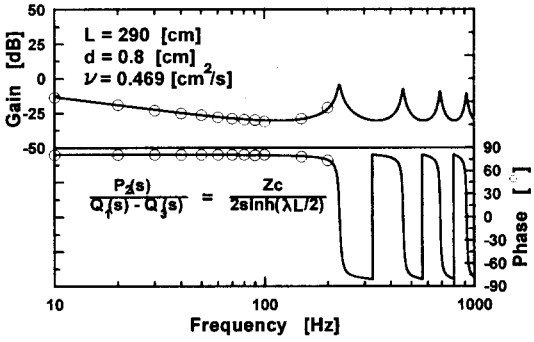

Fig. 8 Frequency response characteristics

상의 2지점의 압력계측값으로부터 유량을 추정한 결과 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있었다.

(2) 제안한 비정상 유량 계측법의 자기진단 기능을 활용하여, 비정상 유량계측 결과의 응답성과 계측 정밀도를 간접적으로 검증할 수 있었다.

(3) 유량계측법과 자기진단 기능을 조합하여, 환경변화, 작동조건 및 파라미터 변동에 대해 강인한 유량계측 시스템을 구축할 수 있다.

참고문헌

1. 川田, 小宮, 山崎: 流量計測ハンドブック, 日刊工業新聞社

2. 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.

3. 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.

4. 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.

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

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

7. 김도태, 이상기, 横田眞一, 유압용 액셜 피스톤 펌프의 유량맥동 계측에 관한 연구, 한국공작기계학회, Vol. 8, No. 2, pp.35-43, 1999.