

적용 필터를 이용한 공동진동주파수 추정에 의한 기체 유량측정

(Estimation of Cavity Vibration Frequency Using Adaptive Filters for Gas Flow Measurement)

남현도*

(Hyun-Do Nam)

요 약

본 논문에서는 공동진동현상을 이용해서 보수비 및 생산 원가를 절감 할 수 있는 기체 유량 측정 기법을 개발하고, 잡음이 있는 환경에서 공동진동주파수를 추정하여 유속 및 유량을 측정하는 기법을 제안하였다.

공동진동주파수를 이용한 기체 유량계인 cavity flowmeter는 기체가 흐르는 관에 설치된 공동으로부터 고유의 진동음을 발생시킨 후 마이크로폰을 이용하여 그 음을 측정한다. 측정된 신호는 적응필터를 이용하여 잡음을 제거한 후 공동진동주파수를 추정하며 이를 이용하여 유속 및 유량으로 계산된다. 여러 가지 측정 변수를 고려하여 계산된 유량의 정확성을 분석하기 위하여 표준 유량계와 제작된 기체 유량 측정 장치를 주파수에 따라 비교 분석하였다. 주위의 잡음이 있을 경우 공동진동주파수 추정에 영향을 받을 수 있음을 고려하여 잡음을 효과적으로 제거할 수 있는 방법으로 NLMS 알고리즘을 적용한 적응 필터를 TMS320C32를 이용하여 구현하였다.

실제 제작된 기체유량 계측 시스템을 이용하여 실험한 결과 표준 유량계와 다소 오차를 보였으나 공동진동 주파수와 유량값 사이의 선형성을 확인할 수 있었다. 공동의 크기나 모양 등을 개선하면 더욱 정확한 결과를 얻을 수 있으리라 기대된다.

Abstract

In this paper, a hardware implementation of gas flow meter for accuracy improvement and saving repair costs at a field is investigated. An adaptive filter using LMS algorithms for estimating cavity vibration frequencies in noisy environments is also studied.

The proposed cavity gas flow meter measures cavity sound signals in gas flow tube using microphone and signal processing systems estimate the cavity vibration frequency from the measured signal. The flow velocity and flow quantity can be calculated using the estimated cavity vibration frequency. Since cavity vibration frequency is corrupted by the environmental noise, an adaptive filter using NLMS algorithms is used for cancelling the environmental noise.

Experiments using TMS320C32 digital signal processor are performed to show the effectiveness of the proposed system.

Key Words : flow meter, cavity vibration, adaptive filter, frequency estimation, digital signal processor

* 주저자 : 단국대학교 전기전자컴퓨터공학부 교수
Tel : 709-2574, Fax : 795-8771
E-mail : hdnam@dku.edu

접수일자 : 2003년 7월 22일
1차심사 : 2003년 8월 5일
심사완료 : 2003년 8월 22일

1. 서 론

프로세스 제어 및 정밀 계측에 많이 사용되는 기체 유량계의 정확도를 개선하고 보수비를 절감하기 위하여 새로운 유량계에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[1,2].

유량계는 유량을 직접 측정하는 방법과 초음파 유량계, 열선 유량계 등과 같이 유속이나 유량에 영향을 받는 다른 변수들을 측정하여 유량을 추정하는 간접 측정 방법으로 나눌 수 있는데, 직접 측정 방법은 정확한 측정결과를 얻을 수 있으나 크기가 크고 고가이므로 간접식 유량계가 산업 및 연구용으로 많이 쓰이고 있다[1,3]. 최근에 많이 쓰이고 있는 초음파 유량계는 비교적 고가이며, 가장 널리 사용되고 있는 열선 유량계는 반응 속도가 늦어 반응 속도가 빠르고 간편하게 사용할 수 있는 저가의 유량계가 요구되고 있다.

공동진동 현상을 이용해서 기체 유량측정의 정확도를 개선하고 측정현장에서의 보수비를 절감할 수 있는 새로운 유량계에 관한 연구가 진행되어, 공동진동의 주파수는 유속만의 함수이며, 연속적이고, 선형성이 보장되며, 압력에 무관하게 측정 가능하고, 관내의 압력손실이 없다는 것이 밝혀졌다[2].

본 논문에서는 공동진동을 이용한 유량계를 실제 구현하기 위하여 공동진동주파수를 측정하고 이를 이용하여 유속 및 유량을 추정할 수 있는 기체 유량 측정 시스템을 구현하였다. 외부의 소음이나 진동에 의하여 공동진동주파수 측정에 영향을 받을 수 있음을 고려하여, 잡음을 효과적으로 제거 할 수 있는 방법으로 최소자승 평균법(Least Mean Square: LMS)을 이용한 적응필터를 제안하였으며 실험을 통하여 성능을 확인하고, 디지털 신호처리기(Digital Signal Processor: DSP)를 이용하여 공동 유량 측정 시스템을 구성하였다.

고압하에서의 공동진동 현상을 조사하기 위하여 강철로 된 파이프를 이용하여 공동을 제작하고 충전 당진에 있는 (주)서진인스텍 연구소의 기체 유량 시험 설비를 이용하여 실험을 수행한 후 표준 유량계와 비교 분석하였다.

2. 공동진동을 이용한 유체유량측정

공동진동이라는 이름으로 일반적으로 알려져 있는 동 유적 진동(fluid dynamic oscillation)은 어떤 유체가 공동위를 스쳐 지나갈 때 공동 내에서 발생하며, 이 진동이 생기면 가까이 있는 물체를 흔들고 소음을 발생하며 어떤 경우에는 구조물을 파손하기 까지 한다. 이 진동현상은 강한 바람을 맞는 두 채의 건물간의 공간, 강물에 설치된 두 기동식 교각, 운행 중의 승용차의 뒤 창문을 열었을 때 등에 생기는 공동에서 관찰된 바 있다. 여러 가지 유동적 조건 하에서 유체가 어떤 형상의 공동 위를 스쳐갈 때에 생기는 진동주파수는 유체의 속도에 정비례한다. 이런 진동주파수와 유속과의 관계를 이용해서 Vortex Flowmeter[1,3]에 흡사한 새로운 용적식 유량계의 가능성에 착안하게 되었다. Cavity Flowmeter는 Vortex Flowmeter의 막대를 직방형 공동으로 대체하는 셈이다. 이 유량계는 공동을 스쳐 지나가는 유체의 유속에 비례하는 주파수를 발생한다[4].

Cavity Flowmeter의 동작 원리는 그림 1과 같다. 흔들리는 shear layer의 꼬리가 공동의 후벽에 부딪치면 압축파가 생성되고, 그와 동시에 shear layer가 공동으로 유입되어 이차류가 역방향으로 흐르기 시작해서 충전이 시작된다. 이중 일부는 공동 바깥으로 흘러나가면서 공동내의 유체를 흡출하기 시작한다.

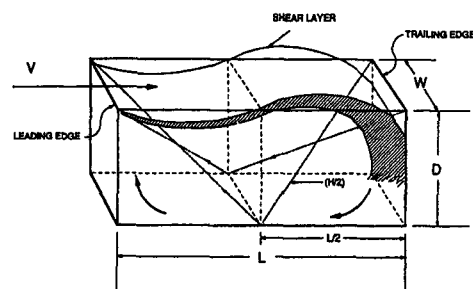


그림 1. 공동내에서의 유체의 흐름도
Fig. 1. Fluid flow in cavity

충전과 흡출이 주기적으로 교체되는 과정 중에서 충전에 소요되는 시간은

적용 필터를 이용한 공동진동주파수 추정에 의한 기계 유량측정

$$\frac{T}{2} = \frac{H}{C} + \frac{L}{V} \quad (1)$$

이 된다. 식(1)에서, T: 충전/흡출의 주기, H: 공동 내 대각선적 반사음과 거리, L: 공동의 길이, C: 음속, V: 유속이다.

공동내 대각선적 반사음과의 거리는 다음과 같다.

$$H = 2 \left\{ \left(\frac{L}{2} \right)^2 + D^2 + W^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

이 식으로부터 공동 소음의 주파수 f 를 유도할 수 있다.

$$f = \frac{V(1+M)}{(HM+L)} \quad (3)$$

여기서 M은 Mach Number($M=V/C$)로 식 (3)으로부터 유속과 공동 소음의 주파수가 상관관계를 가져 주파수를 측정하면 유속을 구할 수 있다는 것을 알 수 있다.[5,6]. 또한 유량 Q는

$$Q = \pi R^2 V \quad (4)$$

이 된다. R은 관내의 반경이다.

실제 Cavity내의 공동진동주파수를 마이크로폰을 이용하여 측정하면 공동 내에서 발생하는 공동진동 외에 관내에 포함되거나 외부로부터 유입되는 진동 음에 의하여 영향을 받게 된다. 이로 인하여 원래의 고유진동주파수에 영향을 주어 잘못된 주파수를 측정하는 일이 발생되어진다. 이는 실제 유량계가 산업현장에 쓰일 경우 더욱 심하게 나타나게 되어진다. 이를 위한 해결 방법은 외부의 잡음과 측정코자 하는 공동을 차단하는 방법이나 이는 비용이 많이 들게 되고 공간적인 문제를 야기하게 되므로[5,6] 본 논문에서는 잡음과 공동진동음이 섞여 있는 신호로부터 적응 필터를 이용하여 잡음을 제거하였다.

3. 잡음 제거를 위한 적응필터

잡음을 제거하기 위한 적응필터 알고리즘으로 보통 LMS알고리즘을 사용한다. LMS 알고리즘의 수렴 특성은 수렴 계수와 밀접한 관계가 있는데 이의 적절한 선정이 매우 어렵다. 본 논문에서는 실시간으로 잡음을 제거하기 위해 계산량이 적고 성능이 비교적 우수한 정규화 LMS(Normalized LMS;

NLMS) 알고리즘을 사용하였으며 적응필터로는 FIR 구조를 사용하였다[7,8].

그림 2는 FIR구조의 LMS알고리즘을 이용한 적응 필터의 블록도이다. 여기서, 공동에서 측정된 신호는 $z(n)$ 이며, 공동에서 약간 떨어진 관에서 측정된 신호 $x(n)$ 은 기준 입력 신호이다. 적응 필터 $W(z)$ 는 필터 출력 $y(n)$ 이 외부 잡음 $n(n)$ 과 유사하게 되어 $e(n)$ 이 공동진동 신호 $s(n)$ 과 같게 해주는 역할을 한다.

LMS알고리즘은 최경사법의 일종으로 매 스텝마다 기울기 벡터를 순시자승오차를 이용하여 추정하며 이를 정리하면 다음 식과 같이 된다.

$$W(k+1) = W(k) - \bar{\mu} \hat{v}(k) \quad (5)$$

여기에서 $W(k)$ 으로부터 $W(k+1)$ 로의 이동이 기울기 벡터의 추정치의 마이너스 방향으로 이루어지므로 적응필터의 계수 벡터는 performance surface의 최경사 경로를 따라 갱신된다.

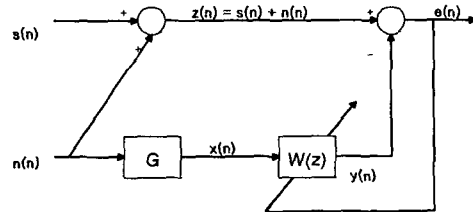


그림 2. LMS 알고리즘을 이용한 적응필터의 블록도
Fig. 2. Adaptive filters using LMS algorithms

입력의 power를 σ^2 라 두면 식 (5)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$W(k+1) = W(k) - \frac{u}{(L+1)\sigma^2} \hat{v}(k) \quad (6)$$

여기서 $0 < u < 1$ 이다.

$E[e^2(k)]$ 대신에 순시자승오차 $e^2(k)$ 을 이용하면 $\hat{v}(k)$ 를 훨씬 간편하게 추정할 수 있다.

MSE의 $\hat{v}(k)$ 추정시 $e^2(k)$ 을 이용하면

$$\hat{v}(k) = \frac{\partial e^2(k)}{\partial W(k)} = 2e(k) \frac{\partial e(k)}{\partial W(k)} = -2e(k)X(k) \quad (7)$$

식 (7)에 평균을 취하면 $E[\hat{v}(k)] = v$ 이 되어 unbiased gradient임을 보일 수 있다. 식(7)을 식 (6)에 대입하면

$$W(k+1) = W(k) + \frac{2\mu}{(L+1)\sigma^2} e(k)X(k),$$

$$0 < \mu < 1 \quad (8)$$

이 된다. 이때 σ^2 의 추정이 쉽지 않을 경우 식 (8) 대신에 다음 식을 사용한 것이 LMS 알고리즘이다.

$$W(k+1) = W(k) + 2\mu e(k)X(k) \quad (9)$$

그러나 LMS 알고리즘은 $W(k+1)$ 의 갱신식이 입력 $X(k)$ 에 바로 관계하기 때문에 입력에 잡음이 섞이는 경우 잡음의 영향을 바로 받게 된다. 그러므로 식 (9)의 갱신식에 입력의 노름(norm)을 나눈 식을 사용하게 된다.

$$W(k+1) = W(k) + \frac{\mu_n}{|X(k)|} e(k)X(k) \quad (10)$$

위 식은 입력이 지나치게 작을 때는 발산하는 문제점이 생기게 되므로 다음 식과 같이 수정하여 사용하게 되는 이를 NLMS 알고리즘이라 한다.

$$W(k+1) = W(k) + \frac{\mu_n}{a + |X(k)|} e(k)X(k) \quad (11)$$

4. 공동진동 신호의 스펙트럼 분석

공동진동 주파수를 추정하기 위해서는 측정된 데이터의 FFT 분석이 필요하다. 측정된 데이터의 스펙트럼을 분석하기 위해 먼저 다음과 같은 2가지 분석 방법을 제안하였다. 분석방법 1(그림 3)은 전체의 데이터를 N 개씩의 P 개의 프레임으로 분할하여 각각을 FFT한 후 평균하는 방법이며, 분석방법 2(그림 4)는 전체 데이터를 $N/2$ 개씩 $2P$ 개의 프레임으로 분할하여 $N/2$ 개씩을 중첩시켜 N 개씩 $2P-1$ 번의 FFT를 수행한 후 평균하는 방법이다. 이 방법은 유속 데이터의 주파수가 시간에 따라서 비교적 빨리 변하는 경우에 유용하리라 예상되나 분석방법 1에 비해 거의 2배의 계산량이 필요하다.

두 가지 방법을 이용하여 (주)서진인스텍의 실험실에서 측정한 실제 데이터를 FFT 분석한 결과는 그림 5 및 그림 6과 같다. 유속 데이터의 주파수가

시간에 따라서 변하는 경우에 분석방법 1보다 2가 좋은 결과를 보일 것으로 예측되었으나 실제로는 그림에서 보듯이 유사한 결과를 보였다.

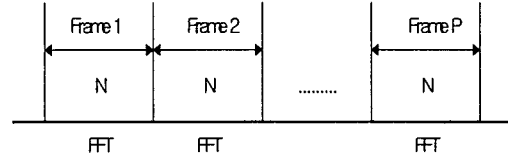


그림 3. 데이터 분석방법 1
Fig. 3. Data analysis method 1

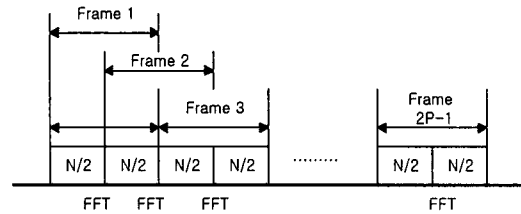


그림 4. 데이터 분석방법 2
Fig. 4. Data analysis method 2

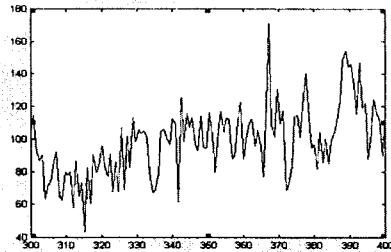


그림 5. 데이터 분석방법 1을 이용한 스펙트럼
Fig. 5. Spectrum using data analysis method 1

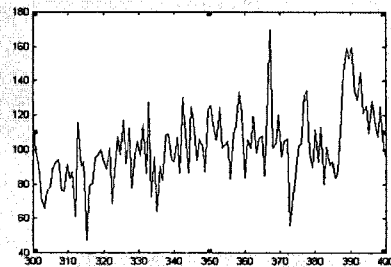


그림 6. 데이터 분석방법 2를 이용한 스펙트럼
Fig. 6. Spectrum using data analysis method 2

적용 필터를 이용한 공동진동주파수 추정에 의한 기계 유량측정

분석방법 2가 1에 비해 거의 2배의 계산량이 필요하므로 본 논문에서는 분석방법 1을 사용하여 데이터의 스펙트럼을 분석하였다.

5. 실험 및 검토

5.1 전체 시스템 구성

실험을 위하여 구성된 공동 및 각 센서의 위치는 그림 7과 같다.

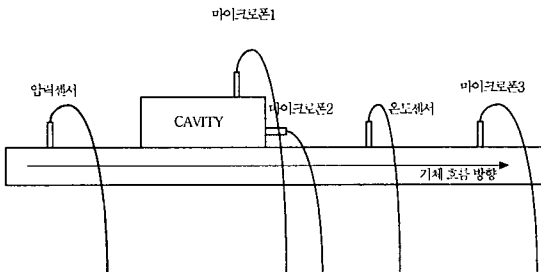


그림 7. 관에 설치된 공동 및 각 센서의 위치

그림 7에서 공동의 크기는 길이 0.465ft, 높이 0.113ft, 넓이 0.072ft이며, 사용한 관의 내경은 4 inch이다. 공동내에서 발생하는 공동진동음을 측정하기 위한 센서(그림2의 z(n))는 마이크로폰 1과 2를 설치하여 비교하여 보았으나 1이 더 좋은 결과를 보여 마이크로폰 1을 사용하였으며, 잡음을 측정하기 위한 센서(그림 2의 x(n))의 위치는 마이크로폰 3을 사용하였다. 그림 8에 공동의 모양을 보였으며, 그림 9는 전체 실험 장치의 사진이다.

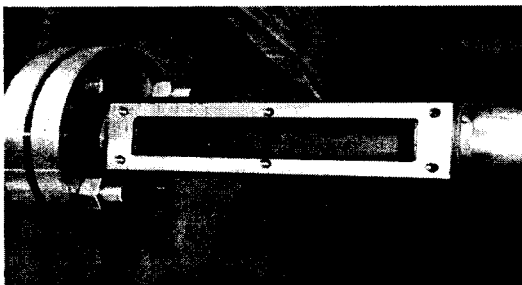


그림 8. 공동 모양
Fig. 8. The shape of cavity

5.2 하드웨어 구성

잡음이 있는 환경에서 공동진동주파수를 추정하

여 유량을 실시간으로 표시하기 위해서는 고속의 신호 처리를 수행하여야 하므로 Texas Instruments사의 TMS320C32[9]를 이용하여 시스템을 구성하였다. 그림 10은 전체 시스템 계통도이다.



그림 9. 전체 실험 모습
Fig. 9. Experimental system

DSP는 FFT 등과 같은 계산, 공동 진동에 의한 피크 주파수 추정, 등과 같은 처리를 수행하는데 무리가 없도록 32비트 부동소수점 방식의 범용 DSP인 TMS320C32를 사용하였다.

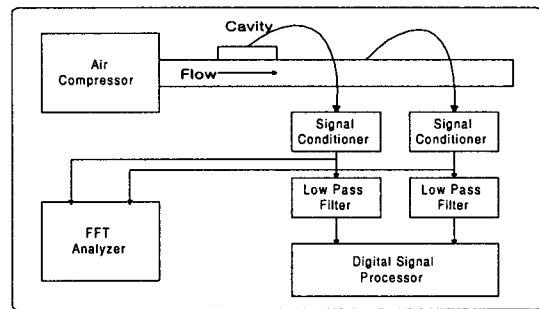


그림 10. 전체 시스템 계통도
Fig. 10. Block diagram of the experimental system

A/D 컨버터는 신호의 특징에 따라 적절한 샘플링 주파수와 양자화 오차를 고려한 분해능을 고려하여 본 실험 시스템에서는 MAXIM사의 12비트 축차비교형 A/D 컨버터인 MAX122를 1개를 사용하고 여러 개의 아날로그 신호를 입력 할 수 있도록 8채널 멀티플렉서를 사용하였다. MAX122는 트랙/홀드 기능이 내장되어 있어 사용이 간편하고 12비트 병렬 출력형으로 마이크로프로세서와 인터페이스가 용이하며, 최고 5MHz의 클럭 입력에서 변환시간이 2.6

[μs]로서 매우 빠른 편이고 양극성으로서 ±5V 범위의 전압을 입력 할 수 있다. 디스플레이는 LCD 판넬과 LCD 콘트롤러를 1개의 PCB에 일체형으로 내장하여 만든 LCD 모듈을 사용하였다. 전체 하드웨어 구성도는 그림 11과 같다.

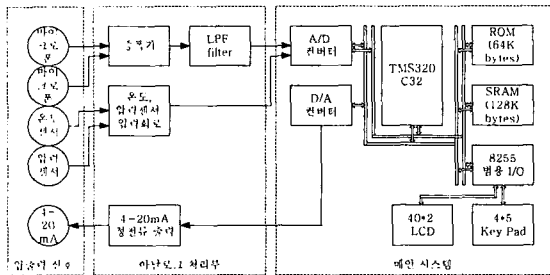


그림 11. 전체 하드웨어 구성도
Fig. 11. Block diagram of hardware

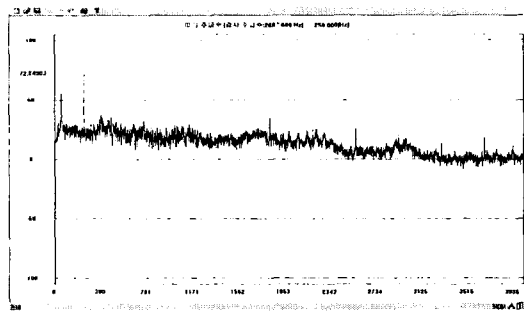


그림 12. 잡음이 있을 때 공동진동 신호의 스펙트럼
Fig. 12. Spectrum of cavity vibration signal with noise

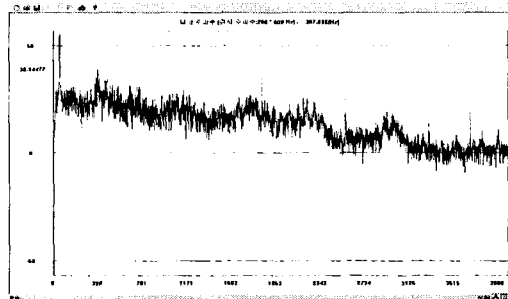


그림 13. 잡음이 제거된 공동진동 신호의 스펙트럼
Fig. 13. Spectrum of cavity vibration signal without noise

5.3 실험 결과

적용 필터의 효과를 실험하기 위하여 잡음(250Hz; pure tone)을 임의로 부가하고 마이크로폰 1에 측정된 신호의 스펙트럼은 그림 12와 같다. NLMS알고리즘의 μ n 값은 0.1로 고정하였으며, 필터의 차수는 8차로 하였다. 측정 데이터의 샘플링 주파수는 8 [kHz]로 하였고, 데이터 분석방법 1에서 프레임의 N 값은 8192개로 하였다. 그림 13은 적용필터를 이용하여 잡음을 제거한 후의 스펙트럼이다. 250 [Hz]의 잡음이 잘 제거된 것을 알 수 있다.

유속과 공동진동주파수의 선형성을 확인하기 위하여 유속을 바꾸어 가며 실험을 수행하였다. 그림 14에서 보듯이 유속과 공동진동주파수는 선형성을 가짐을 확인할 수 있었다.

공동진동주파수와 유속의 관계를 식으로 나타내면 식 (12)와 같다.

$$V = K \times f + b \quad (12)$$

여기서 V는 유속, K는 유량보정계수, f는 공동 주파수, b는 상수이다. 이 때 유량 Q는 식 (13)과 같다. 이 때, A는 관의 단면적이다.

$$Q = A \times V \quad (13)$$

실험 데이터로부터 유량보정계수 K와 상수 b를 구하면 K는 0.417, b는 -2.421이 된다. K와 b는 공동의 모양이나 측정 유체의 종류에 따라 달라진다. 실험 데이터와 식 (12) 및 (13)을 이용하여 유량을 계산하여 표준 유량계와 비교한 결과를 그림 15에 보였다.

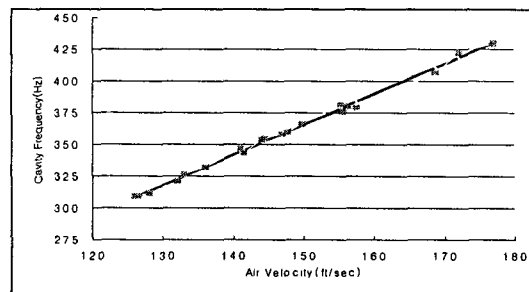


그림 14. 유속과 공동 주파수의 관계
Fig. 14. Relation between flow velocity and cavity frequency

적응 필터를 이용한 공동진동주파수 추정에 의한 기체 유량측정

표준 유량계는 경인계측시스템의 Vortex Flowmeter로 모델은 241 삽입형이며, 유량 측정 범위는 0 ~ 308 ft³/min 이고 유량의 정확도는 ±1%이다. 그림 15에서 보듯이 표준 유량계와 오차가 1[%] 이내이며 표준 유량계의 오차 범위를 고려하여도 2[%] 이내의 오차를 보임을 알 수 있다. 물론 이 데이터는 실험실에서 측정된 결과이므로 실제로는 이보다 더 커질 수 있으나 공동 주파수를 이용하여 반응 속도가 빠르고 저가인 유량계를 개발할 수 있음을 확인할 수 있었다.

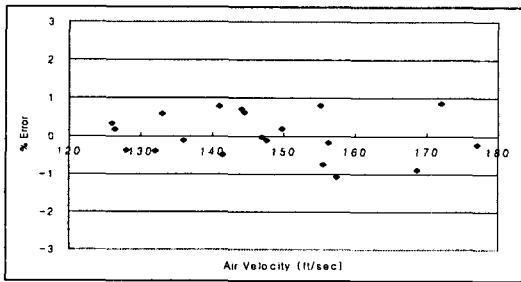


그림 15. Cavity Flowmeter 측정치의 오차
Fig. 15. Errors of cavity flow meters

6. 결 론

프로세스 제어나 정밀계측에 사용되는 유량계의 정확도개량과 보수비의 절감은 매우 중요한 문제이다.

본 논문에서는 fluid dynamic oscillation 현상을 이용해서 측정정확도를 개선하고 측정 현장에서의 보수비를 절감 할 수 있는 공동진동주파수를 이용한 새로운 기체유량계의 제작 실현성을 연구하였다. 공동진동 주파수를 이용한 기체 유량계인 cavity flowmeter의 유량 측정 결과와 표준 유량계의 유량 측정결과를 비교 분석하여 그 구현 가능성을 검증하였으며, 잡음이 있는 환경에서도 공동진동 주파수를 정확히 측정할 수 있도록 NLMS 알고리즘을 적용한 적응 필터를 TMS320C32를 이용하여 구현하였다.

실제 제작된 기체유량 계측 시스템을 이용하여 실험한 결과 표준 유량계와 1[%] 이내의 오차를 보였으며 공동진동 주파수와 유량값 사이의 선형성을 확인할 수 있었다. 공동의 크기나 모양등을 개선하면

더욱 정확한 결과를 얻을 수 있으리라 기대된다.

- 감사의 글 -

이 연구는 2001 학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음.

References

- (1) 片岡照宋 柴田辛男 高橋 清 山崎弘郎 , Sensor Handbook, 도서출판 세화, 1990.
- (2) R.K. Kim, "A new gas flowmeter based on cavity oscillation", Flow Measurement and Instrumentation, Vol.3, pp.103-111, 1992.
- (3) 조성백, "유량계의 현장 적용," 월간 자동계측제어, 14권, pp.2-5, 2001.
- (4) H.H. Heller, D.G. Holms, and E.E. Covert, "Flow-induced pressure oscillations in shallow cavities," J. of Sound and Vibration, Vol.18, pp. 545-553, 1971.
- (5) C.K.W. Tam and P.J.W. Block, "On the tones and pressure oscillations induced by flow over rectangular cavities," J. Fluid Mech., Vol.89, pp. 373-399, 1978.
- (6) J.A. Roberson and C.T. Crowe, Engineering Fluid Mechanics, John Wiley & Sons Inc, 1997.
- (7) B. Widrow and S.D. Stearns, Adaptive Signal Processing, Prentice Hall, 1985.
- (8) 남 현도, "능동소음제어를 위한 적응 IIR 필터" 한국조명·전기설비학회지, Vol.16, No.5, pp.112-118, 2002.
- (9) Texas Instruments, TMS320C32 Programmer's Guide, 2000.

◇ 저자소개 ◇

남현도 (南炫道)

1956년 3월 27일생. 1979년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1986년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업 (공학박사). 1991년-1992년 Visiting fellow. ISVR, Univ. of Southampton. England, 1982년 - 현재 단국대학교 전기전자컴퓨터공학부 교수. 1998년 - 현재 단국대학교 부설산업기술연구소장.