

적응 필터를 이용한 관내의 공동진동주파수 추정

양 동성, 서 성대, 남 현도  
단국대학교 전기공학과

Estimation of Cavity Vibration Frequency in Air Tubes Using Adaptive Filter

Dong-Sung Yang, Sung-Dae Su, Hyun-Do Nam  
Dept. of Electrical Engineering, Dankook University, Seoul, Korea

**Abstract** - Frequency of cavity vibration in air flowing tube is closely related to a velocity of air.

In this research, an instrumentation system to estimate frequency of cavity vibration for measurement of the velocity and quantity of a moving fluid is implemented by using DSP TMS320C32. Measurement of the generated sound wave frequency in cavity is difficult because of environmental noise. Adaptive filters are used to eliminate this noise effectively. The estimated velocity and quantity of a moving fluid by proposed system is compared with the results measured by a standard flow meter.

1. 서 론

유량은 온도 및 압력과 함께 유체의 상태를 나타내는 주요 요소의 하나로서 전체 설비의 운전 상태를 관찰하고 관리한다는 측면 뿐만 아니라 공정용 증기, 상수도, 천연가스 계량 등과 같이 상거래용으로도 사용되므로 경제적인 측면에서 볼 때도 매우 중요하다[1]. 지금까지는 차압식, 전자식, 용적식, 와류식, 초음파식 등의 유량계가 많이 사용되어 왔으나 가스 유량측정에 쓰이는 유량계의 정확도 개선 및 보수비의 절감을 위하여 지금까지는 유량측정에 응용된 적이 없는 공동진동이라는 현상을 이용해서 측정 정확도를 개선하고 측정현장에서의 보수비를 절감할 수 있는 새로운 유량계 제작에 관한 연구가 진행되었다[2].

연구 결과 공동진동주파수는 유속만의 함수이며, 그 함수는 연속적이고 선형성이 보장되며, 압력과 무관하게 측정 가능하고, 관내의 압력손실이 없는 등의 장점이 있었다. 그러나, 공동진동현상을 이용한 유량계는 그 특성상 외부의 소음이나 관내에 균일하게 나타나는 진동에 의해 영향을 받을 수 있다.

본 논문에서는 관내에 분포하는 잡음을 효과적으로 제거 할 수 있는 방법으로 LMS알고리즘[3,4]을 이용한 적응필터를 제안하고, 이로부터 유속을 측정하는 실시간 DSP 시스템을 설계하여 실험을 통하여 그 결과를 분석하고자 한다.

2. 본 론

2.1 공동진동을 이용한 유체유량측정

공동진동이라는 이름으로 일반적으로 알려져 있는 동유적 진동(fluid dynamic oscillation)은 어떤 유체가 공동위를 스쳐 지나갈 때에 그 공동 내에서 발생하며, 이 진동이 생기면 가까이 있는 물체를 흔들고 소음을 발생하고 어떤 경우에는 구조물을 파손하기까지 한다. 여러 가지 유동적 조건 하에서 유체가 어떤 형상의 공동위를 스쳐갈 때에 생기는 진동주파수는 유체의 속도에 정비례한다. 이런 진동주파수와 유속과의 관계를 이용해서 vortex flowmeter에 흡사한 새로운 용적식 유량계의 가능성에 착안하게 되었다. 말하자면, vortex flowmeter의

막대(strut)를 직방형 공동으로서 대체하는 셈이다. cavity flowmeter에서는 공동울 스쳐 지나가는 유체의 유속에 비례하는 주파수를 발생한다.[2]

2.1.1 공동진동주파수와 유속과의 관계

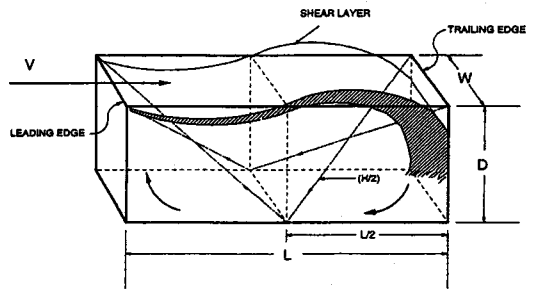


그림 1. Feed and Bleed Cycle 중 feed시에 있어서의 shear layer의 동작모양

한 직방형의 공동위를 맥동하면서 흘러가는 shear layer가 그림 1에 묘사되어 있다. 이 그림은 흔들리는 shear layer의 꼬리가 공동의 후벽에 부딪치면 압축파가 생성됨을 보여 주고 있다. 그와 동시에 shear layer가 공동으로 유입되어 이차류가 역방향으로 흐르기 시작해서 충전이 시작된다. 이중 일부는 공동 바깥으로 흘러나가면서 공동내의 유체를 흡출하기 시작한다. 충전과 흡출이 주기적으로 교체되는 과정 중에서 충전에 소요되는 시간은

$$\frac{T}{2} = \frac{H}{C} + \frac{L}{V} \tag{1}$$

공동내 대각선적 반사음파의 거리는 다음과 같다.

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

이로부터 주파수를 유도할 수 있다.

$$f = \frac{V(1+M)}{(HM+L)} \tag{B\&W Model} \tag{3}$$

여기서 M은 Mach Number(M=V/C)로 상관계수 2(1+M)에 해당한다. 이를 이용하여 주파수에 따른 유속을 유도할 수 있다.

$$V = \frac{1}{2} \left[ (fH - C) + \left\{ (C - fH)^2 + 4LCf \right\}^{\frac{1}{2}} \right] \tag{4}$$

### 2.1.2 유량 측정 시 잡음을 고려

공동진동에서 생기는 압력을 가장 효과적으로 감지할 수 있는 마이크로폰 설치점을 찾은 결과, 공동의 말단부에서 가장 강한 신호를 포착할 수 있다. 이는 높은 유속에서 형성된 압력정점이 저속에서 형성된 것 보다 더 높고 날카롭다는 것과, 신호의 강도는 동압(dynamic head)과 더욱 밀접한 관계를 가진다는 사실을 알 수 있다. 이로부터 식(4)에 의해 측정되는 유속을 구할 수 있게 된다. 측정을 위하여 준비한 관은 직경 4inch의 강철로 된 관이며, Cavity의 크기는 길이 0.465ft, 깊이 0.113ft, 넓이 0.072ft이다. 실제 Cavity내의 공동진동주파수를 측정하기 위해 설치된 마이크로폰은 공동 내에서 발생하는 공동진동 외에 관내에 포함되거나 외부로부터 유입되는 진동음에 의하여 영향을 받게 된다. 이로 인하여 원래의 고유진동주파수에 영향을 주어 잘못된 주파수를 측정하는 일이 발생되어진다. 이는 실제 유량계가 산업현장에 쓰일 경우 더욱 심각하게 나타나게 되어진다. 이를 위한 해결방법은 잡음 발생을 억제하여 고유 진동음만을 측정할 수 있도록 하는 것이나, 이는 비용이 많이 들게 되는 문제가 발생되어진다. 따라서, 측정된 잡음성분을 제거하여 고유의 주파수를 찾아 처리를 한다면 이 문제를 제거할 수 있게된다.

### 2.2 잡음 제거를 위해 LMS알고리즘을 이용한 적응 필터 설계

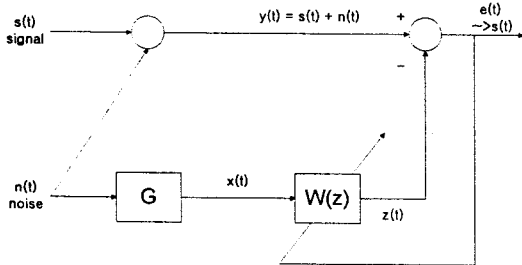


그림 2. 적응 Filter 블록도

그림 2는 공동에서 측정된 신호  $y(t)$ 와 공동에서 약간 떨어진 관에서 측정된 신호  $x(t)$ 를 입력으로 하여 에러  $e(t)$ 를 예측함으로써 원래의  $s(t)$ 와 유사한 신호를 얻는 시스템에 관한 블록도이다.

- $s(t)$  : 공동 진동파
  - $n(t)$  : 관내에서 측정된 잡음
  - $y(t)$  : 공동 진동 내에서 측정된 신호 ( $s(t) + n(t)$ )
  - $e(t)$  : Filter를 통해  $s(t)$ 와 유사한 신호를 얻음
  - $z(t)$  : 예측된 잡음
  - $e(t) = y(t) - z(t)$  이다.
  - $y(t) = s(t) + n(t)$  이고,
  - $z(t) \approx n(t)$  이므로
  - $e(t) \approx s(t)$  가 된다.
- 여기서
- $z(k) = W(k)X(k)$  이고,
  - $W_{k+1} = W_k + \mu X(k) e(k)$  ( $\mu$ 는 상수) (5)
- 이므로,
- $e(k) = y(k) - W(k)X(k)$  (6)
- 에 의해 출력 신호를 얻게 된다. [3][4]

### 2.3. 시뮬레이션

식(6)에 의하여 실제 시스템으로부터 측정된 신호를

이용하여 잡음(250Hz)을 추가함으로써 시뮬레이션을 한 결과이다. 여기서 필터의 차수는 8차로 하였고,  $\mu$ 값은 0.001로 하였다. 입력 신호와 입력 잡음을 LMS알고리즘을 이용한 Adaptive Filter를 사용하여 시뮬레이션한 결과를 주파수 분석한 결과는 아래와 같다.

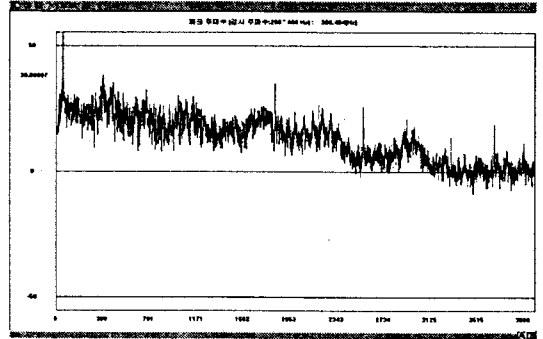


그림 3. 원래의 신호  $s(t)$ 의 FFT

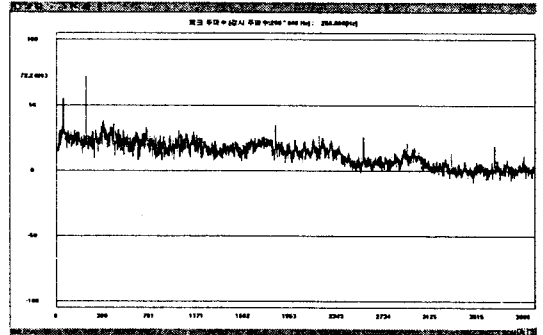


그림 4. 신호와 잡음이 섞여있는 신호  $y(t)$ 의 FFT

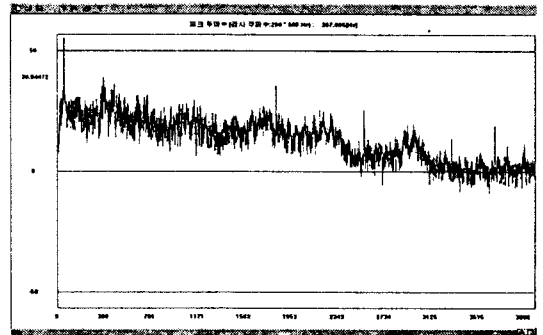


그림 5. Filter를 거친 신호  $e(t)$ 의 FFT

위의 시뮬레이션의 결과는 원래의 신호[그림 3]와 잡음이 섞여있는 신호[그림 4]로부터 잡음 신호(250Hz)를 제거하여 주파수 분석한 결과[그림 5]를 보여준다. [그림 5]에서 보듯이 검사 주파수 대역 200~600Hz에서 250Hz 성분이 제거되고 원래의 신호인 396.48Hz와 약 8.88Hz의 차이를 보이는 387.695Hz에서 피크주파수를 검출하였다. 이는 8000Hz의 샘플주기에서 8192개씩 8번의 FFT결과를 평균한 결과로서 순간적인 주파수 변화에 대처하도록 시뮬레이션된 값이다.

## 2.4. 실험 및 결과

본 실험은 TMS320C32를 이용하여 각각의 공동진동 신호와 잡음을 입력으로 하고, Anti-aliasing 필터는 1,000Hz를 차단 주파수로 하는 LPF를 구성하여 각각을 2,000Hz의 샘플링 주파수로 하여 입력을 받도록 구성하였다. 이 입력받은 신호로부터 실시간으로 TMS320C32를 이용하여 LMS 알고리즘으로 계산한 에러신호를 다시 FFT를 한 이후에 8개의 프레임(2048개 \* 8) 주파수를 각각 평균하도록 하였다. 평균한 주파수로부터 특정 피크 주파수 검출을 위하여 200~600Hz사이에서 검출한 이후 이를 각각 현재 주파수와 유량으로 표시하도록 구성하였다. 다음은 전체 실험 계통도이다.

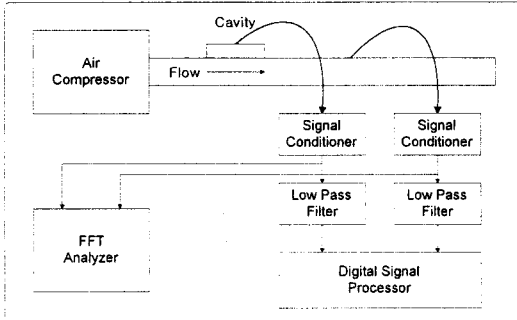


그림 6. 실험 계통도

본 실험에서는 이를 사용하여 실제 표준 유량계와 본 시스템에서 계산한 유량 값을 비교하였으며, 주파수 특성이 선형임을 고려하여 그 계수를 이용한 유량 값 또한 같이 비교하였다. 다음은 실제 실험으로부터 얻어진 표이다.

[표 1] 표준 유량계와 Cavity Flowmeter를 사용한 유량계에서 주파수에 따른 유량 비교

주파수 [ Hz ]	측정 유량 [ ft <sup>3</sup> /min ]		
	표준 유량값	계산①	계산②
303.5	198	184	211
310	215	186.98	216.87
315.4	214.7	189.36	217
359	238	216	250
362	241	215	250
364	246.19	221.6	250.76
376	258	223.9	262
377.92	254.6	224.59	256.86
420	290	255	295
430.6	305	266.6	304

표 1 에서 표준 유량값은 표준 유량계를 이용하여 측정 한 값이고, 계산①은 측정된 주파수로부터 식(4)에 의해 계산된 유량 값이며, 계산②는 선형성을 고려하여 계수 (K = 0.694)를 이용한 유량 값(K\*f)을 주파수에 따라 비교한 표이다. 그림 7은 이를 차트로 표현하였다.

그림 7에서 보듯이 표준유량계의 측정대역(최대 : 308 ft<sup>3</sup>/min)등으로 인하여 측정대역이 약 300~450Hz로 낮아졌다. 주파수에 따라 그 유량 값이 선형으로 증가하는 특징을 보이고 있으며, 실제 계산된 유량 값은 약간의 biased된 오차를 보이고 있다. 이는 상관계수의 값을 수정하여 조정할 필요가 있으며, 실험 환경에서 나타난 영향으로 추정되어진다.

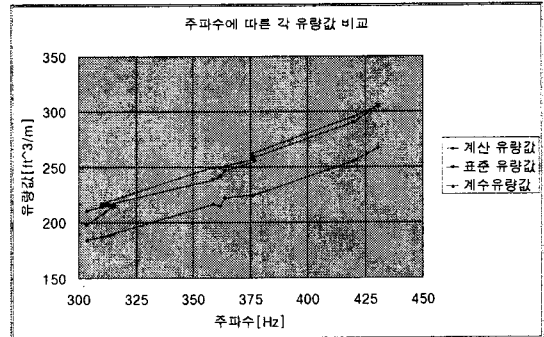


그림 7. 계산된 유량값과 계수를 이용한 유량값과 표준 유량값의 비교

다음은 실제 실험 시스템을 보인다.

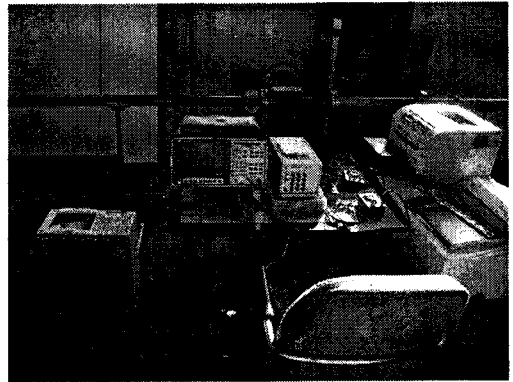


그림 8. 전체 실험 모습

## 3. 결 론

본 연구에서는 공동진동 주파수를 이용한 기체 유량계인 Cavity Flowmeter의 유량 측정 결과와 표준 유량계의 유량 측정결과를 비교 분석하여 그 구현 가능성을 검증하였으며, 더 나아가 외란에 강인한 시스템을 구현하여 잡음이 있는 환경에서도 공동진동 주파수를 정확히 측정할 수 있는 적응 신호처리 시스템을 DSP TMS320C32를 이용하여 구현하였다.

이론식에 의한 계산 결과는 표준 유량계와 다소 오차를 보였으나 공동진동 주파수와 유량값 사이의 선형성을 확인할 수 있었으며, 이를 이용하여 새로운 선형 방정식을 세워 유량을 추정한 결과 표준 유량계를 이용하여 측정 한 결과와 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 조성백, "유량계의 현장 적용," 월간 자동계측제어, 14권 2호, pp.2-5, 2001.
- [2] C.K.W Tam and P.J.W. Block, "On the Tones and Pressure Oscillations Induced by Flow Over Rectangular Cavities" J.Fluid Mech., pp 373-399, 1978
- [3] Bernard Widrow Samuel D.Stearns "Adaptive Signal Processing", Prentice Hall, Chap 6. pp 99-116, 1985
- [4] B. Widrow et al. " Adaptive noise cancelling: principles and applications," proc. IEEE, vol. 63, no. 12, pp.1692-1716, Dec. 1975