

## 콘덴서 마이크로폰을 이용한 압력변동성분의 측정

### A Measurement of the Pressure Fluctuation by Using the Condenser Microphone

윤 재 건\*  
Jae-Kun Yoon

#### 1. 서 언

연소공학을 포함하는 열유체공학분야에서 다루는 유동은 대부분 난류(turbulence flow)이다. 이러한 난류유동을 기술하기 위해서는 속도, 온도, 농도 및 압력 등의 평균값뿐만 아니라 그들의 변동성분에 관한 자료가 필수적이다.

속도변동성분은 열선유속계(Hot Wire Anemometer)와 비접촉법인 레이저도플러 유속계(Laser Doppler Anemometer) 등을 사용한 실험을 통하여 많이 구하고 있다. 온도 변동성분의 측정은 전기적인 보상회로에 의하여 보상된 열전대를 사용하여 행하고 있다. 특히 농도변동성분 및 온도변동성분의 측정은 최근에 CARS (Coherent Anti Stokes Raman Scattering Method) 등을 통하여 괄목할만한 발전을 하고 있다. 그러나 이에 비하여 압력변동성분의 측정은 별로 행하여지고 있지 않다. 그것은 압력이 스칼라(Scalar) 양이면서도 농도 및 온도와는 달리 그 측정을 위해 삽입식 채취프로브(Sampling Probe)의 적용이 불가능하고, 또한 기존의 삽입식 프로브(예를 들면 피토투브)를 사용할 경우 정압(Static Pressure)과 동압(Dynamic Pres-

sure)을 분리하기가 어려운 경우가 많기 때문이다. 따라서 압력측정을 위한 비접촉식 방법이 개발되지 못하는 한, 압력변동성분의 측정분야에서 획기적인 발전을 기대하기는 어렵다고 판단된다.

본 기고에서는 필자의 경험을 바탕으로 콘덴서 마이크로폰(Condenser Microphone)을 압력측정 프로우브에 직접 연결하여 압력 변동성분을 측정하는 방법을 소개하고, 이 방법의 적용예와 문제점을 검토하고자 한다.

#### 2. 압력변동성분의 측정방법

압력이라고 하면 일반적으로 정압(Static Pressure)이 먼저 연상되지만, 유동이 존재

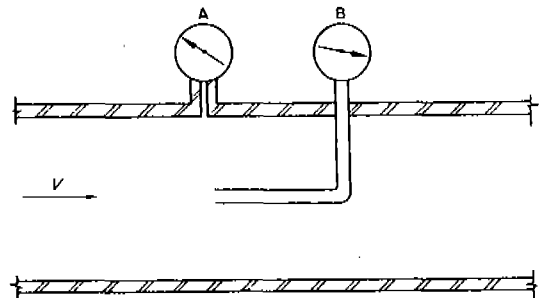


Fig. 1 Simple Pitot Tube in a Pipe

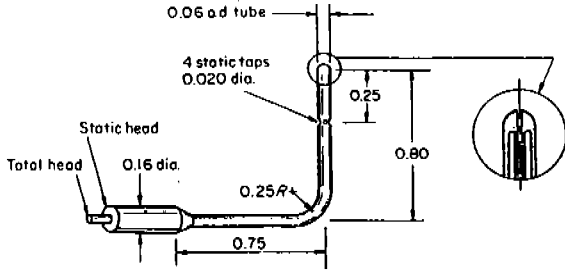


Fig. 2 Typical Prandtl-Tube in a Pipe

하는 경우에는 동압(Dynamic Pressure) 을 고려해야 한다. Fig. 1과 같이 파이프내의 유동에서, 압력계A에는 정압( $P_s$ )이 측정되고, 압력계B에는 전압(Total Pressure)  $P_t$ 가 측정된다.  $P_s$ 와  $P_t$ 는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$P_t = P_s + P_d = P_s + \frac{\rho V^2}{2}$$

여기서  $P_d$ 는 동압,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $V$ 는 유체의 속도를 뜻한다. 따라서 동압을 측정하게 되면, 속도를 바로 알 수 있다. Fig. 2와 같은 피토폴(Pitot Tube)을 사용하면 측정부에서의 정압과 전압을 측정할 수 있고, 유체의 밀도를 안다면 위의 식을 이용하여 동압과 속도를 계산해 낼 수 있다. 그러나 피토폴은 유체의 흐름방향을 알고 있고, 유동의 특성이 비교적 단순한 경우에만 사용이 가능하다. 흐름방향의 공간적인 분포가 존재하는 유동에서

정압분포를 알고자 할 경우에는, 피토폴 대신에 Fig. 3과 같은 정압프로브(Static Pressure Probe)를 사용한다.<sup>[1]</sup> 그림에서 A면과 B면에 작용하는 전압(Total Pressure)이 같도록 디스크를 위치시키면, 디스크 면과 유선(Streamline)이 일치될 것이다. 따라서 디스크 중앙의 구멍에 연결된 관에서 측정되는 압력은 정압뿐이다. 이러한 디스크프로브 역시 유동이 복잡하지 않고, 어느정도 흐름방향을 예측할 수 있어야만 사용이 가능하다. 또한 유동의 Length Scale이 디스크의 직경보다 매우 커야만 측정값을 신뢰할 수 있다. 이러한 피토폴, 정압프로브와 마이크로마노미터(Micro-Manometer)는 플렉시블튜브(Flexible Tube)로 연결하여 평균압력을 측정하고 있다. 그런데 피토폴, 디스크프로브 등의 압력전달관에 콘덴서마이크로폰을 바로 연결하면, 마이크로폰에서 나오는 전기신호를 이용하여 압력변동성분의 측정이 가능하다. 콘덴서 마이크로폰은 압력파(Pressure Wave)를 전기신호를 변화시키는 센서(Sensor)로서 그 원리는 다음과 같다. 전기적으로 충전된 두개의 판 사이의 전압(Capacitance)은 판 사이의 거리에 따라서 달라진다. 이 두개의 판 중 하나를 아주 가벼운 막(Diaphragm)으로 만든다면, 높은 주파수의 압력파에 대해서도 반응하여 압력파의 크기와 주파수를 전기적인 신호로 변환시킨다. Fig. 4는 전형

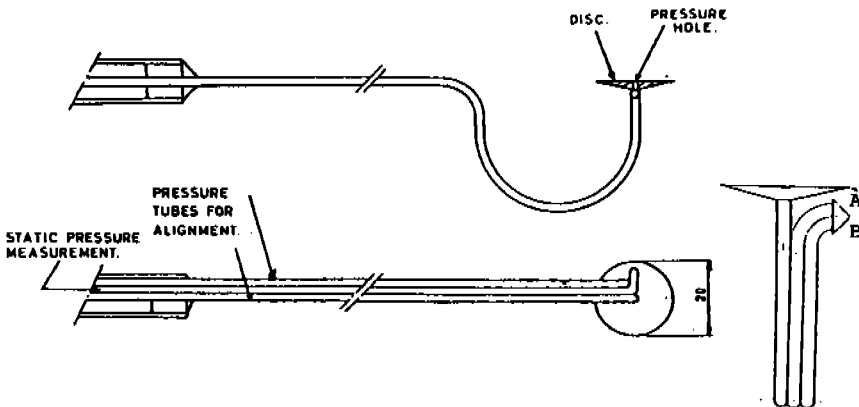


Fig. 3 Static Pressure Probe

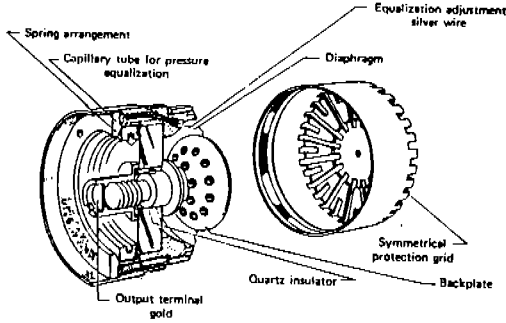


Fig. 4 Sectional View of a Condenser Microphone Cartridge

적인 계측용 콘덴서 마이크로폰인데, [2] 모세관(Capillary Tube)에 의해서 다이어프램 양면의 압력을 동일하게 유지시킨다. 따라서 이러한 마이크로폰은 압력의 변동성분만을 측정할 수 있다. 마이크로폰 다이어프램의 직경이 커지면 민감도(Sensitivity)가 커지고, 직경이 작아지면 반응주파수영역이 커지면서 방향성이 좋아진다. 따라서 측정하고자 하는 주파수영역과 측정조건에 의해서 마이크로폰의 직경이 결정된다. 일반적으로 많이 사용되는 제품은 가청영역인 20 kHz 까지 측정이 가능한 1/2 인치 마이크로폰이다.

측정하고자 하는 위치에 마이크로폰의 다이어프램을 직접 위치시키지 못하는 경우(예를 들면, 온도가 높거나, 공간이 협소하다든지, 작은 공간분해능이 요구될 경우), 마이크로폰에 프로우브, 튜브 및 어댑터 등을 연결하여 측정할 수 있다. 이와 같은 것을 프로우브 마이크로폰이라고 부른다. 프로우브 마이크로폰을 사용하여 압력변동성분을 측정하면, 압력과 크기의 감쇄(Damping)와 응답지연(Phase Lag) 등의 현상이 일어난다. 이러한 응답지연 및 크기감쇄현상은 마이크로폰 자체에 기인한 것과 압력전달체인 프로우브에 기인한 것으로 대별할 수 있다. 계측용마이크로폰의 경우 제작자에 의해서 보정그래프(Calibration Chart)가 첨부되는 것이 일반적이다. 프로우브는 측정하고자 하는 대상물과 마이크로폰의 크기와 특성에 맞도록 다양하게 제작

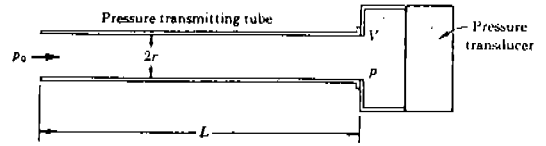


Fig. 5 Schematic of Pressure-Transmitting System

되므로, 직접 보정하여야 한다. 이러한 보정 작업은 보정장치를 구성하여 절대치를 보정해야 하지만, 다음과 같은 분석에 의해서 개략적인 추정이 가능하다. [3]

Fig. 5 와 같은 압력전달계가 있다고 가정하자. 압력전달계는 반경  $r$ , 길이  $L$  인 튜브의 부피가  $V$  인 어댑터로 구성되어 있다. 측정점(튜브 좌측끝단)에서 주파수는  $f$ , 크기는  $P_0$  인 압력변동이 있다고 할 때, 압력전달계내의 유체는 튜브벽면의 마찰하에서 감쇄진동(Damped Vibration)을 하게 된다. 튜브내의 유체의 마찰저항이 층류상태라고 가정할 때, 압력센서에서 감지되는 압력변동성분  $P$  는 아래와 같이 표현된다.

$$\left| \frac{P}{P_0} \right| = \frac{1}{\left\{ [1 - (f/f_n)^2]^2 + 4h^2 (f/f_n)^2 \right\}^{1/2}}$$

여기서  $f_n$  은 압력전달계의 고유주파수인데, 유체가 기체일 경우에는 헬름홀츠공명기(Helmholtz Resonator)의 공명주파수이며 다음식에 의해서 구한다. [4]

$$f_n = C \sqrt{\frac{\pi r^2}{L'V}}$$

여기서  $C$  는 유체에서의 음속(Sound Velocity)이고,  $L'$  는 유효길이(Effective Length)로서 Fig. 5와 같이 튜브끝단에 플랜지(Flange)가 없는 경우에는  $L + 1.5r$  이고, 플랜지로 끝난 경우에는  $L + 1.7r$  이다. 감쇄비(Damping Ratio)  $h$  는 다음과 같이 구한다.

$$h = \frac{2\mu}{\rho C r^3} \sqrt{\frac{3LV}{\pi}}$$

여기서  $\mu$  는 유체의 점성,  $\rho$  는 밀도이다.

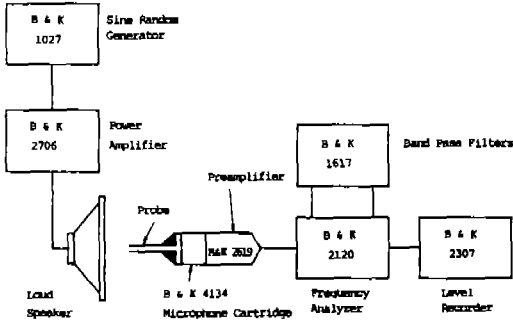


Fig. 6 A Schematic Set-Up for the Calibration of Frequency Response of the Probe

압력신호의 응답지연은 다음과 같은 Phase Angle 로써 표현된다.

$$\phi = \tan^{-1} \frac{-2h(f/f_n)}{1 - (f/f_n)^2}$$

마이크로폰에 프로우브를 부착하였을 경우, 위 식들에 의해서 개략적인 보정이 가능하지만, 실험적으로는 Fig. 6 과 같은 보정장치를 구성하여 보다 정확한 주파수 응답특성을 구할 수 있다.<sup>[6]</sup>

Horn-Coupled Probe Microphone<sup>[6]</sup>(B & K 4170)이라고 하여, 마이크로폰에 프로우브가 부착되어 나오는 제품도 있다. 이것은 보정표가 첨부되어 있으므로 보정할 필요없이 바로 사용이 가능하다. 이의 측정주파수영역은 30Hz ~ 8 kHz 이고, 민감도는 주파수가 250 Hz일 경우 1.25 mV/Pa.이다.

### 3. 선회류(Swirl Flow)에 대한 적용예

강한 선회가 걸려 있는 유동에는 나선형의 Vortex Core가 존재하고, 이 Vortex Core의 주기적인 운동은 유동장에 큰 영향을 준다.<sup>[7]</sup> 이 Vortex Core의 주기적인 운동을 규명하기 위하여, 전술한 압력변동 성분측정방법을 적용한 예를 보자.

Fig. 7은 실험장치를 보여 준다. 송풍기에 의해 공급된 공기는 선회발생기를 통과하여 선회도<sup>[8]</sup>가 약 1.8 정도의 선회류가 되어 내경이 30 mm인 파이렉스(Pyrex)튜브를 거쳐

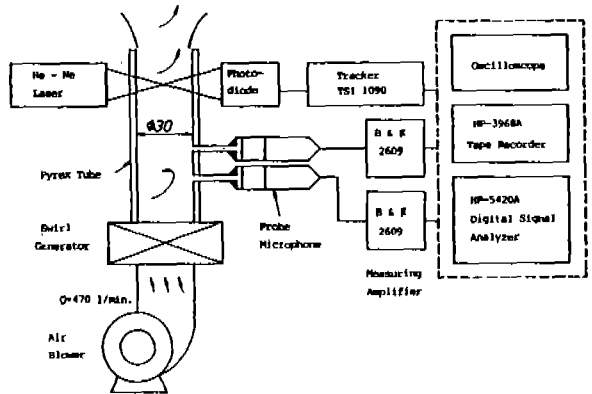


Fig. 7 A Schematic Diagram of the Experimental Apparatus

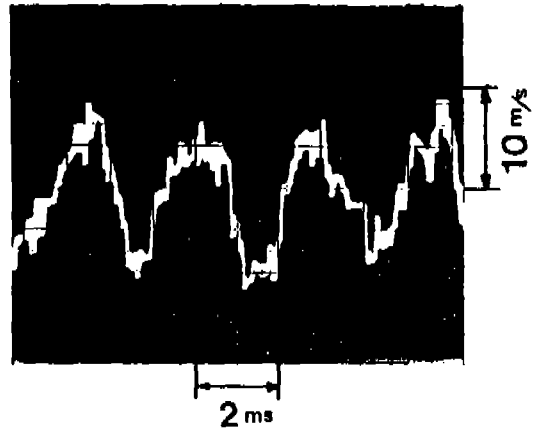


Fig. 8 Example of the Axial Velocity Signal

대기로 방출된다. 축방향, 접선방향, 반경방향의 속도성분은 레이저 도플러 유속계에 의해서 측정된다. Fig. 8은 대표적인 축방향속도신호인데, Vortex Core의 운동이 330Hz 정도의 주파수를 갖고 주기적으로 나타난다. 파이렉스튜브 벽면에서의 정압은 프로우브를 통하여 마이크로폰에 의해 측정된다. 정압 프로우브의 튜브 직경은 외경이 2 mm인 것과 1 mm인 것 두가지가 사용되었다. 튜브직경이 작을수록 감쇄비  $h$ 는 커져서 프로우브에 의한 압력신호의 감쇄현상이 커진다. Fig. 9은 직경이 2 mm와 1 mm인 프로우브를 사용하여 측정된 정압신호와 정압신호의 확률밀도함수(Probability Density Function)로서 이

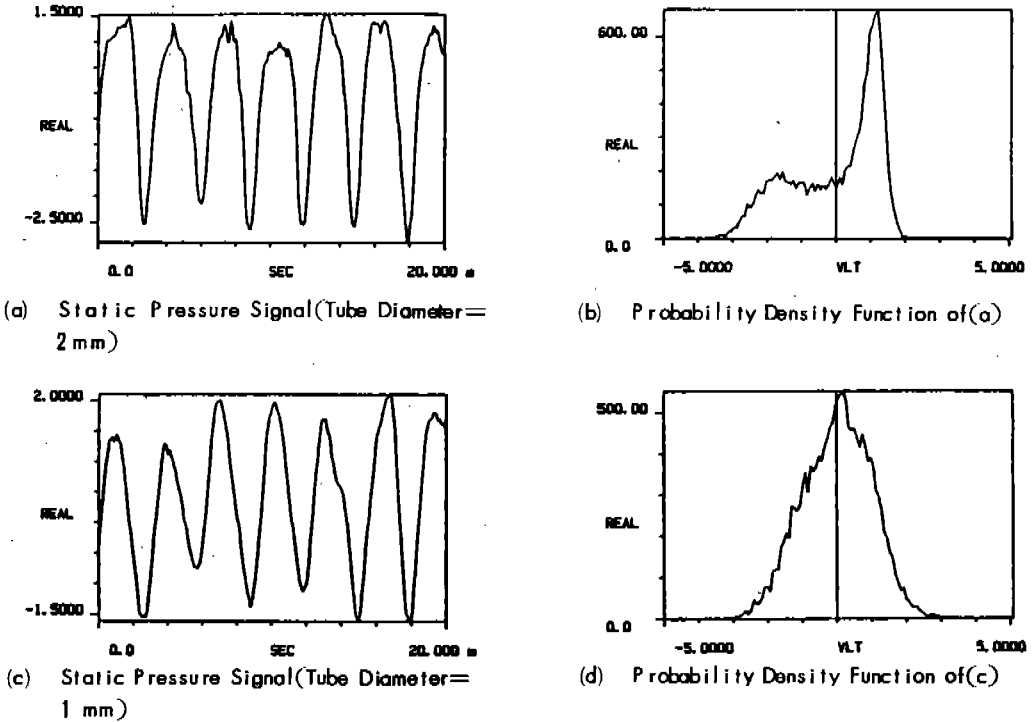


Fig. 9 Difference of Static Pressure Signal with respect to Probe Diameter Size

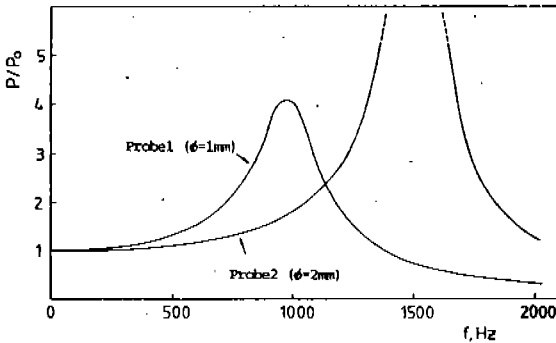


Fig. 10 Frequency Response of the Probes

러한 현상을 잘 보여준다. (a)는 직경이 2mm 인 튜브를 사용한 경우의 정압신호이고 (b)는 (a)의 확률밀도함수이다. (c)는 직경이 1mm 인 튜브를 사용한 경우의 정압신호이고 (d)는 (c)의 확률밀도함수이다. (a)와 (c)와 속도신호를 비교하여 보면 직경이 큰 경우의 정압신호가 속도신호의 파형에 더 가깝다. 튜브 직경이 작아지면 큰 경우에 비해서 Low Pass Filter의 역할을 크게 하는 것을 알 수 있다.

프로우브의 내부공간을 헬름홀츠공명기로 가정하여 공명주파수를 계산하면 직경이 1mm 인 경우에는 990 Hz 이고, 직경이 2mm 인 경우에는 1.500 Hz 이다. 감쇄비  $h$ 를 구하여 보면 직경이 1mm인 경우에는 0.122 이고, 직경이 2mm인 경우에는 0.015 이다. 직경이 서로 다른 2개의 프로우브의 특성곡선을 그려보면 Fig. 10 과 같다. 감쇄비  $h$ 가 작은 프로우브는 공명주파수 부근에서의 사용이 불가능함을 알 수 있다. 어느 직경의 프로우브나 500 Hz 미만의 압력파에 대해서는 전달특성이 양호하다. 상세한 측정결과는 참고문헌<sup>[7]</sup>에 수록되어 있다.

#### 4. 결 언

프로우브 마이크로폰을 사용하여 압력변동성분의 측정을 하고자 할 때 주의할 점은, 프로우브의 주파수특성을 충분히 검토하여 측정하고자 하는 대상물의 주파수가 특성범위 안

에 있음을 확인하고, 압력신호 크기의 감쇄를 보정하여 주어야 한다. 이러한 방법을 사용하여 획득한 압력변동성분의 자료와 속도 및 온도변동성분의 자료를 함께 분석할 경우 유동에 대한 많은 정보를 획득할 수 있으리라 기대된다.

—후 기—

이 자리를 빌어 실험과 자료분석에 많은 조언을 해주신 한국표준연구소의 임병덕 박사께 감사의 뜻을 포함합니다.

참 고 문 헌

1. J.M. Beer and N.A. Chigier, *Combustion Aerodynamics*, Applied Science Publishers, London, 1972, pp.232-233.
2. J.R. Hassall and K. Zaveri, *Acoustic Noise Measurement*, Brüel and Kjær, 1979.
3. J.P. Holman, *Experimental Methods for Engineers*, 3rd ed., McGraw-Hill Inc., 1978, pp.191-194.
4. E.K. Lawrence, R.F. Austin, B.C. Alan and V.S. James, *Fundamentals of Acoustics*, 3rd ed., John Wiley & Sons Inc., 1982, pp.225-228.
5. A.K. Gupta, J. Swithenbank and J.M. Beer, *Modern diagnostics for the measurements of fluctuating quantities in flames*, J. of the Inst. of Fuel, December, 1977, pp.163-169.
6. Brüel & Kjær Master Catalogue, *Electronic Instruments*, 1983, pp.83-84.
7. 윤재건, 선회류를 동반하는 난류화염의 특성에 관한 실험적연구, 박사학위논문, 한국과학기술원, 1987.