

< 기술논문 >

## 다점식 피토관의 효율적인 교정에 대한 연구

전세종<sup>†</sup> · 최용문<sup>\*</sup> · 최해만<sup>\*</sup> · 최지철<sup>\*\*</sup> · 홍경기<sup>\*\*</sup> · 한상우<sup>\*\*</sup> · 김웅선<sup>\*\*</sup>  
(2005년 7월 7일 접수, 2006년 3월 2일 심사완료)

### Investigation on the Effective Calibration of Annubar

Sejong Chun, Yong Moon Choi, Hae Man Choi, Ji Chul Choi,  
Kyung Ki Hong, Sang Woo Han and Woong Sun Kim

**Key Words:** Annubar(다점식 피토관), Averaging Pitot Tube(다점식 피토관), Calibration(교정), Partial Blocking Technique(부분 막음 방법)

#### Abstract

Annubar is one of popular tools to measure the exhausted gas flow rate from the stacks. For the accurate monitoring of the amount of discharged pollutants, calibration of annubar is very important. Calibration of annubar has been carried out in a wind tunnel. When the length of annubar is longer than the test section size of wind tunnel, it is very difficult to find out typical value of annubar coefficients. So, a measurement technique to calibrate annubar longer than the size of the test section of wind tunnel must be developed. In the present study, an experiment is performed to measure the annubar coefficients in such a limited size of the wind tunnel. The experimental annubar coefficient by using a partial blocking technique is very close to the annubar coefficient of normal condition.

#### 기호설명

$\alpha$  : 피토관 계수  
 $\epsilon$  : 확장 계수  
 $\rho$  : 밀도[kg/m<sup>3</sup>]  
 $k$  : 포함 인자  
 $u$  : 표준 불확도  
 $\Delta p_1$  : 피토관 차압[Pa]

$\Delta p_2$  : 다점식 피토관(annubar) 차압[Pa]  
 $\Delta K$  : 다점식 피토관 계수의 상대 편차[%]  
 $K$  : 다점식 피토관 계수

$\bar{K}$  : 다점식 피토관 계수의 평균  
 $P$  : 대기압[kPa]  
 $RH$  : 상대 습도[%]  
 $T$  : 온도[K]  
 $U$  : 유속[m/s]

#### 1. 서론

굴뚝에서 배출되는 오염 물질의 유량을 감시하기 위한 굴뚝용 유량계는 S자형 피토관과 같은 일점식 피토관, 아누바(annubar)라고도 불리는 다점식 피토관, 열선식 유량계, 와류식 유량계, 초음파식 유량계 등이 있다. 우리나라에 설치되어 있는 굴뚝용 유량계의 대부분은 일점식 또는 다점식 피토관으로서 주로 일점식 피토관이 많이 쓰인다. 일점식 피토관은 굴뚝 내부의 한 지점에서 유속을 측정하여 유량을 예측한다. 다점식 피토관은 여러 지점에서 유속을 측정하고 평균 유

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한국표준과학연구원 기반표준부 역학그룹

E-mail : sjchun@kriss.re.kr

TEL : (042)868-5311 FAX : (042)868-5028

<sup>\*</sup> 회원, 한국표준과학연구원 기반표준부 역학그룹

<sup>\*\*</sup> 환경관리공단 측정관리처 측정기검사업

속을 구하여 유량을 계산하므로 일점식 피토관에 비하여 정확도가 더 좋다.

다점식 피토관은 여러 지점에서 전압(total pressure)과 정압(static pressure)의 차압을 측정하는 장치로서 가스나 정유 시설에 쓰이는 차압식 유량계이다.<sup>(1)</sup> 다점식 피토관의 핵심적인 부분은 마름모꼴의 단면으로서 유동 박리점이 고정된다. 다점식 피토관을 설계할 때 중요한 변수는 전압과 정압 측정공의 위치로서 다점식 피토관의 길이에 따라 압력공의 위치와 개수가 달라진다.<sup>(1)</sup> 이 때 설치되는 굴뚝의 단면은 거의 대부분 원형으로서 로그-체비셰프 방법을 사용하여 압력공의 위치를 결정한다.<sup>(1,2)</sup> 다점식 피토관을 사용하기 위해서는 다점식 피토관을 교정(calibration)하여야 한다.<sup>(3)</sup> 다점식 피토관의 계수는 베르누이 원리를 이용하여 다점식 피토관의 차압을 유속으로 환산할 때 기준(standard) 유속과 비교하여 교정하기 위한 실험 계수이다. 다점식 피토관의 계수를 구하기 위해서는 풍동에 다점식 피토관을 설치하고 기준 유속과 다점식 피토관 차압을 측정하여야 한다. 그러므로 다점식 피토관을 교정할 때에는 다점식 피토관의 길이가 풍동의 특성 길이보다 같거나 작아야 한다.

우리나라에서 사용되는 다점식 피토관은 대부분 길이 2m 이내로서 너비 2m, 높이 1m인 풍동에서 교정이 가능하다.<sup>(4)</sup> 그러나 길이가 2m 넘는 다점식 피토관을 설치하여 사용하는 굴뚝도 있으며 경우에 따라서는 길이가 4m를 넘기도 한다. 이러한 경우에는 다점식 피토관이 설치되어 있는 현장에서 교정하여야 하는데 그 방법이 매우 어렵다. 한 가지 제안할 수 있는 방법은 다점식 피토관의 길이보다 짧은 특성 길이를 가진 풍동에서도 다점식 피토관을 교정하는 ‘부분 막음 방법(partial blocking technique)’을 개발하는 것이다. 이 방법은 풍동의 특성 길이보다 긴 다점식 피토관의 일부를 풍동에 설치하여 다점식 피토관 계수를 구한 다음 다점식 피토관을 움직여서 나머지 부분에 대하여도 다점식 피토관 계수를 구하고 다점식 피토관의 계수들을 합성한다. 이 때 주의할 점은 다점식 피토관의 전압 측정공과 정압 측정공들을 열거나 닫으면서 발생하는 다점식 피토관 계수의 변화이다. 이를 측정하기 위해서는 풍동에 설치된 다점식 피토관을 풍동 시험부 바깥 방향으로 움직이면서 다점식 피토관 계수가 얼마나 변화하는지를 알아야 한다.

본 연구에서는 이러한 제안을 바탕으로 하여

Table 1 Measurement uncertainty of flow quantities

	Atmospheric Pressure [Pa]	Temperature [K]	Humidity [%]	Density [kg/m <sup>3</sup> ]
Mean	1.013×10 <sup>5</sup>	294.99	72.65	1.188
Uncertainty	3.393	0.194	0.734	0.001

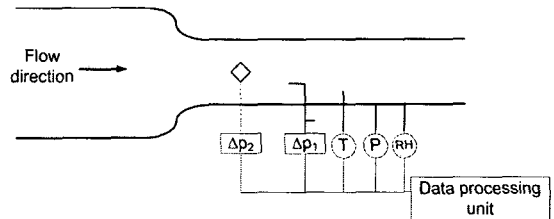


Fig. 1 Experimental setup for annubar calibration

풍동 너비와 같은 2m의 길이를 가진 다점식 피토관을 설치하고 전압 측정공과 정압 측정공들을 체계적으로 열거나 닫으면서 다점식 피토관 계수의 변화를 관찰하였다. 다점식 피토관의 끝 부분에 위치한 압력공들이 풍동 좌우측 벽면 근처와 중심에 위치했을 때 일어나는 다점식 피토관 계수의 변화를 관찰하였다. 다점식 피토관의 설치 각도를 변화시켜 가면서 나타나는 다점식 피토관 계수의 변화도 측정하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 풍동

본 연구에 사용된 풍동은 환경관리공단에서 보유하고 있는 풍동이다.<sup>(4)</sup> 시험부의 크기는 너비 2m, 높이 1m, 길이 5m이고 유속 범위는 2 ~ 30 m/s이다. 개방형 흡입식 풍동으로서 시험부 단면의 유속 균일도는 ±1% 이내이다.<sup>(4)</sup> 난류도는 유속이 증가할수록 감소하고 5 ~ 30 m/s에서 0.5%보다 작다.<sup>(4)</sup> Fig. 1에 나타낸 바와 같이 대형 풍동에는 다점식 피토관과 L자형 피토관, 온도계와 습도계를 설치하였다. 다점식 피토관(대한 인스트루먼트)은 풍동 입구로부터 후류 방향으로 2m 지점에 설치하였고 L자형 피토관은 다점식 피토관의 후류 방향으로 0.5m 떨어진 지점에 설치하였다. 차압계(MKS Instruments 698A, 690B)는 L자형 피토관과 다점식 피토관의 차압을 측정하였다. 온도계(Daero DrTs-100Pt)와 습도계(Testo 600)는 다점식 피토관 설치 지점으로부터 후류 방향으로 3m 떨어진 지점에 설치하였다. 풍동 외부에는 대기압계(RPM3 DHI)를 설치하였다. 모든 실험장치

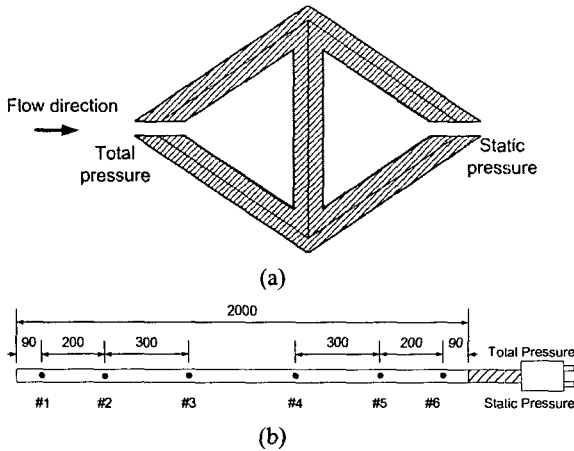


Fig. 2 Schematic diagram of annubar (a) cross section (b) location of pressure holes

들은 실험 전에 보정하였고 해당 기기의 불확도 (uncertainty)는 Table 1에 나타내었다. 단 Table 1에 나타낸 불확도는 포함인자  $k = 2$ 인 확장 불확도(expanded uncertainty)이다.<sup>(3)</sup>

다점식 피토관을 풍동에 설치한 그림은 Fig. 1에 나타내었다. 다점식 피토관 압력공의 위치는 유속 분포를 고려하도록 설계되지만, 풍동의 유속 분포는 매우 일정하므로 다점식 피토관에서 측정되는 차압은 압력공의 위치와 개수에 영향 받지 않는다.

풍동 시험부의 유속을 측정하기 위해서는 L자형 피토관의 차압과 대기압, 온도, 상대 습도를 측정하고 공기밀도의 계산식(CIPM81/91)으로부터 풍동 시험부의 밀도를 구한 다음, 베르누이 식으로부터 피토관 공식을 유도하였다.<sup>(3-5)</sup>

$$U = \alpha(1 - \epsilon) \sqrt{\frac{2\Delta p_1}{\rho}} \quad (1)$$

단  $\alpha$ 는 피토관 계수,  $\epsilon$ 은 팽창 계수,  $\Delta p_1$ 은 피토관 차압,  $\rho$ 는 밀도이다.

### 2.2 다점식 피토관

Fig. 2에는 다점식 피토관의 단면 형상과 전압과 정압 측정공들의 위치를 나타내었다. 본 실험에 사용한 다점식 피토관의 압력공들은 유속 분포를 고려하여 등간격으로 배열되어 있지 않다. 압력공들은 풍동 좌우측 벽면과 중심부로부터 거리가 떨어져 위치해 있고 이웃한 압력공들끼리는

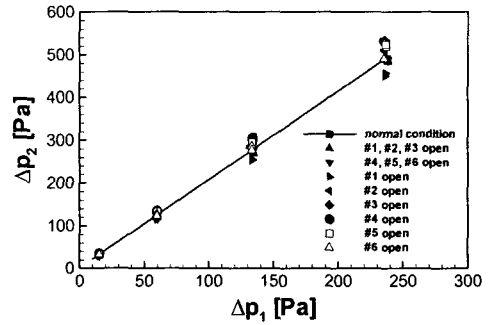


Fig. 3 Differential pressure of annubar against that of pitot tube

보다 밀집되어 있다.

다점식 피토관을 풍동에 설치할 때는 각각의 압력공에 번호를 붙이고 체계적으로 압력공들을 열거나 닫았다. Fig. 2(b)에 나타낸 압력공들은 풍동 상류 방향으로 설치되어 있는 다점식 피토관의 전압 측정공들이다. 본 연구에서는 다점식 피토관의 측정 조건들을 다음과 같이 정의하였다. ‘정상 조건(normal condition)’은 #1에서 #6까지의 압력공이 모두 열린 상태이다. ‘#1 열림(#1 open)’은 #1의 압력공만 열고 나머지 압력공들은 닫힌 상태이다. ‘#2 열림(#2 open)’에서부터 ‘#6 열림(#6 open)’은 ‘#1 열림’과 비슷한 실험 조건들이다. ‘#1, #2, #3 열림(#1, #2, #3 open)’은 #1, #2, #3번 압력공이 동시에 열린 경우이고, ‘#4, #5, #6 열림(#4, #5, #6 open)’은 #4, #5, #6번 압력공이 동시에 열린 경우이다. ‘#2, #3, #4, #5 열림(#2, #3, #4, #5 open)’도 #2, #3, #4, #5번 압력공이 동시에 열린 경우를 의미한다.

다점식 피토관의 상류 방향에는 전압 측정공이 설치되어 있고 후류 방향에는 정압 측정공이 설치되어 있어서 #1에서부터 #6의 압력공을 닫을 때에는 다점식 피토관에 절연 테이프를 감아서 전압 측정공과 정압 측정공을 동시에 열거나 닫았다.

### 3. 실험 결과 및 토의

다점식 피토관이 차압 측정 장치로서 선형성을 유지하는지를 확인하기 위하여 L자형 피토관의 차압과 다점식 피토관의 차압을 측정하였다. Fig. 3에는 본 실험에 사용된 다점식 피토관의 차압을 나타내었다. 2 ~ 25 mmH<sub>2</sub>O의 L자형 피토관 차

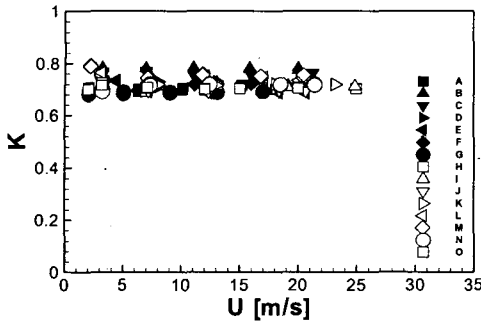


Fig. 4 Annubar coefficient against flow velocity

압에 대하여 본 실험에서 사용한 다점식 피토관 차압은 다음과 같은 선형식을 나타내었다.

$$\Delta p_2 = 1.9288\Delta p_1 - 0.4596 \quad (2)$$

단  $\Delta p_1$ 은 L자형 피토관의 차압이고,  $\Delta p_2$ 는 다점식 피토관의 차압이다.

다점식 피토관을 이용하여 평균 유속을 측정하기 위해서는 교정(또는 보정) 계수가 필요하다. 다점식 피토관의 교정 계수는 다점식 피토관에서 측정되는 차압과 L자형 피토관에서 측정되는 유속을 비교하여 구한다.

$$K = \frac{U_{pitot}}{(1-\epsilon)\sqrt{2\Delta p_2/\rho}} = \frac{\alpha(1-\epsilon)\sqrt{2\Delta p_1/\rho}}{(1-\epsilon)\sqrt{2\Delta p_2/\rho}} \cong \sqrt{\frac{\Delta p_1}{\Delta p_2}} \quad (3)$$

단  $K$ 는 다점식 피토관 계수,  $U_{pitot}$ 은 L자형 피토관에서 측정된 유속이고  $\alpha \cong 1$ 로 가정한다. 다점식 피토관 계수는 식 (2)에서 유도할 수도 있다. 이 때는  $\Delta p_1$ 과  $\Delta p_2$ 의 선형식의 기울기로부터 유도하고 여러 지점의 차압을 측정하여야 한다.

$$K = \sqrt{d(\Delta p_1)/d(\Delta p_2)} \quad (4)$$

그러므로  $K = 1/\sqrt{1.9288} = 0.72$ 이다. 식 (3)은 한 점 유속에 대한 것이고 식 (4)는 여러 지점의 유속 측정으로부터 얻은 것이다. 일반적으로  $K$ 는 식 (4)와 같은 형태로 나타내어진다. 본 연구에서는 한 점 유속에서 압력공을 열고 닫으면서 나타나는 차압 변화를 고찰하기 위하여 식 (3)을 채택하였다.

Table 2 Measurement uncertainty of annubar coefficient (normal condition)

$U_{pitot}$	Quantity	$\Delta p_1$ [Pa]	$\Delta p_2$ [Pa]	$K$
5 m/s	Mean	15.138	32.054	0.687
	Uncertainty	0.034	0.533	0.006
10 m/s	Mean	59.575	125.174	0.690
	Uncertainty	0.088	1.119	0.003
15 m/s	Mean	133.568	278.056	0.693
	Uncertainty	0.235	1.629	0.002
20 m/s	Mean	236.425	489.448	0.695
	Uncertainty	0.285	1.253	0.001

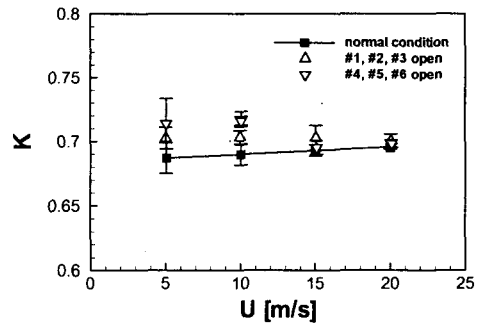


Fig. 5 Annubar coefficients for normal and half-blocked installations

$K$ 의 불확도를 구하기 위해서는 식 (3)에서부터 Kline과 McClintock이 제시한 편차 전파식을 다음과 같이 유도하여야 한다.<sup>(6)</sup>

$$u(K) = \frac{\alpha}{2} \sqrt{\frac{1}{\Delta p_1 \Delta p_2} u(\Delta p_1)^2 + \frac{\Delta p_1}{\Delta p_2^3} u(\Delta p_2)^2} \quad (5)$$

단  $u(\Delta p_1)$ 은  $\Delta p_1$ 의 포함인자  $k = 1$ 인 표준 불확도이다.<sup>(3)</sup> 마찬가지로  $u(\Delta p_2)$ 는  $\Delta p_2$ 의 표준 불확도,  $u(K)$ 는  $K$ 의 표준 불확도이다. Table 2에는 ‘정상 조건’에서 측정된  $\Delta p_1$ ,  $\Delta p_2$ ,  $K$ 의 측정 평균값과  $k = 2$ 인 확장 불확도를 나타내었다.<sup>(3)</sup>  $K$ 는  $\Delta p_1$ 과  $\Delta p_2$ 가 증가할수록 증가하고 확장 불확도는 감소한다.

Fig. 4의 A에서부터 O는 여러 가지 다른 형태의 다점식 피토관들을 나타낸다.  $K$ 는 0.65에서 0.8 사이의 값을 가진다. 본 실험에서 사용한 다점식 피토관 계수  $K = 0.72$ 는 Fig. 5의 결과들과 잘 일치한다.

Fig. 5는 유속 측정 시 압력공들을 열거나 닫으면서  $K$ 를 측정한 결과이다.  $K$ 는 ‘정상 조건’과

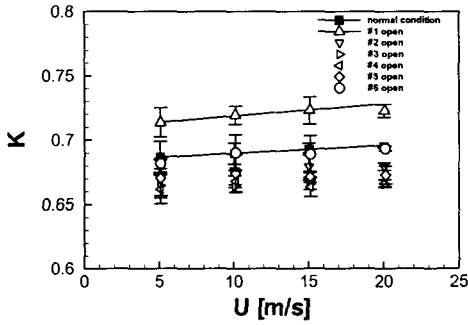


Fig. 6 Annubar coefficients for normal and each-blocked installations

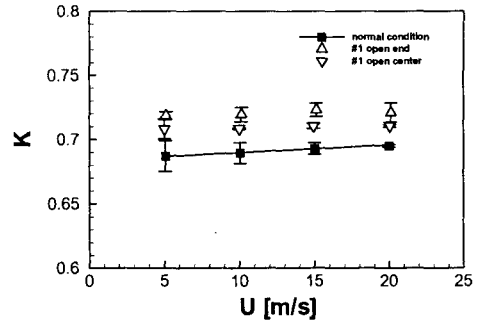


Fig. 8 Annubar coefficients at different locations of #1 pressure hole

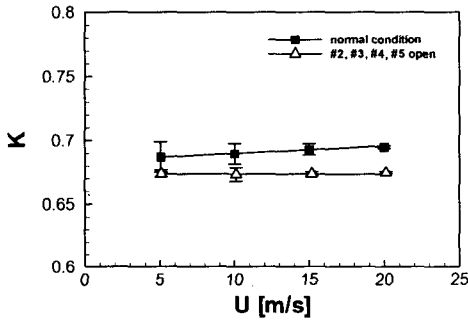


Fig. 7 Annubar coefficients for normal and ends-blocked installations

‘#1, #2, #3 열림’, ‘#4, #5, #6 열림’의 세 경우로 분류하였다.  $K$ 는 5 ~ 20 m/s의 범위에서  $K = 0.68 \sim 0.7$ 을 가리킨다. 낮은 유속(5, 10 m/s)에서는 ‘#1, #2, #3 열림’과 ‘#4, #5, #6 열림’의  $K$ 가 ‘정상 조건’보다 크고 유속이 증가할수록  $K$ 가 ‘정상 조건’에 가깝다. 이는 풍동 내의 평균 유속 분포가 다르기 때문으로서 풍동 좌우측 벽면의 경계층 두께 차이와 연관된다. 유속이 증가할수록  $K$ 의 변화량이 감소하는 이유로는 난류도의 감소를 들 수 있다. 난류도는 유속 측정 불확도에 기여하는 양으로 유속이 증가할수록 감소한다.<sup>(4)</sup> 따라서 유속 측정 불확도가 감소하면  $K$ 의 불확도는 감소한다.

각각의 압력공이  $K$ 에 미치는 영향을 알기 위해서 Fig. 6에 ‘#1 열림’에서부터 ‘#6 열림’까지의 경우에 대해  $K$ 를 측정하고 ‘정상 조건’과 비교하였다. ‘#1 열림’은 다른 경우들에 비하여  $K$ 가 크고 ‘#4 열림’은 다른 나머지 경우들에 비하여 유속의 경계층 두께가 서로 일치하지 않으므로

이는 ‘#1 열림’과 ‘#6 열림’의 차압 측정에 영향을 끼친다. ‘#1 열림’에서부터 ‘#6 열림’까지일 때 측정된  $K$ 는 ‘정상 조건’의  $K$ 를 중심으로 분산된다. ‘#1 열림’에서부터 ‘#6 열림’까지 측정된  $K$ 를 평균하면 ‘정상 조건’의  $K$ 에 대해  $\pm 0.05$  범위 내에서 일치한다.  $K$ 는 0.65에서 0.73 사이의 값을 나타내는데 이 값은 기존 문헌에 보고되는 다점식 피토티관 계수보다는 높다.<sup>(7)</sup> 그 이유로서는 본 실험에 사용된 다점식 피토티관의 단면 모양이 모서리가 둥글게 처리된 마름모꼴로서 압력 손실이 낮아지기 때문이다.<sup>(1,7)</sup>

#1과 #6의 압력공들을 닫고 #2, #3, #4, #5의 압력공들을 동시에 연 다음  $K$ 를 측정하면 유속 변화에 대해 ‘정상 조건’의  $K$ 보다 더 안정적인  $K$ 를 얻을 수 있다. 이는 #2, #3, #4, #5 압력공들을 이용하여 유속을 측정하면 풍동 좌우측 벽면의 경계층 유동이 배제되면서 유속 균일도가 향상되기 때문이다.<sup>(4)</sup>

#1 압력공이 유동 벽면 효과에 대해 어떤 영향을 받는지를 측정하기 위하여 다점식 피토티관을 풍동 시험부 바깥 방향으로 움직이고 #1 압력공의 위치를 풍동 좌우측 벽면 근처와 풍동 중심부의 두 가지 경우로 나누어  $K$ 를 측정하였다. #1 측정공을 풍동 중심부에 위치시키면  $\Delta p_2$ 가 증가하고  $K$ 가 작아진다. #1 압력공이 풍동 좌우측 벽면으로 가까이 가면  $\Delta p_2$ 은 감소하고  $K$ 는 증가한다. #1 압력공은 다점식 피토티관의 끝단에서부터 90mm 떨어진 지점에 위치하는데 풍동 중심부에 놓이면 다점식 피토티관에서 발생하는 끝단 와류(tip vortex)의 영향을 받는 것으로 생각된다.

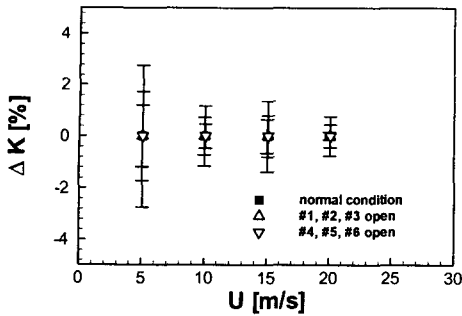


Fig. 9 Deviations of annubar coefficients for normal and half-blocked installations

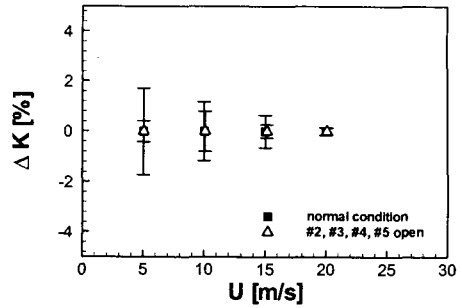


Fig. 11 Deviations of annubar coefficients for normal and each-blocked installations

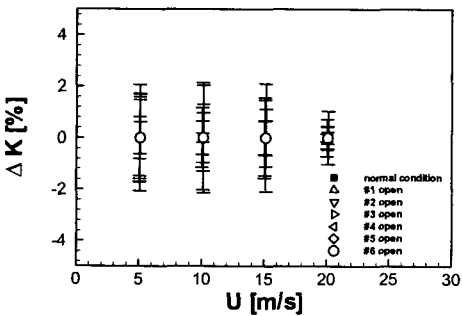


Fig. 10 Deviations of annubar coefficients for normal and each-blocked installations

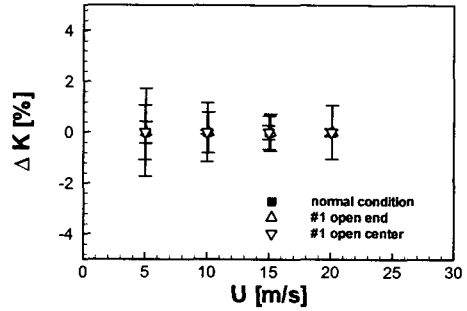


Fig. 12 Deviations of annubar coefficients at different locations of #1 pressure hole

#1 압력공이 풍동 시험부 중심에 위치할 때는 끝단 와류에 의한 후류 유동(wake flow)의 영향을 받고 풍동 시험부 벽면 근처에 위치할 때는 경계층 유동의 영향을 받게 되어 #1 압력공의 측정 차압은 어느 경우에서든 감소한다. 그러므로 #1 압력공의  $K$ 는 '정상 조건'의  $K$ 보다 크게 측정된다.

다점식 피토관 계수  $K$ 의 상대편차  $\Delta K$ 를 구하여 Fig. 9에서부터 Fig. 12에 나타내었다. '정상 조건'이나 '#1 열림'의 어느 한 가지 경우에 대하여 동일한 유속에서  $K$ 를 3회 반복하여 측정하고 평균  $\bar{K}$ 를 구하였다.  $\Delta K$ 는 다음 식과 같다.

$$\Delta K = (K - \bar{K}) / \bar{K} \times 100 \quad (6)$$

또한  $\Delta K$ 의 표준 편차는 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma_{\Delta K} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 (K_i - \bar{K})^2} \quad (7)$$

$K$ 가  $\bar{K}$ 보다 크면  $\Delta K > 0$ 이고  $K$ 가  $\bar{K}$ 보다 작

으면  $\Delta K < 0$ 이다. 일반적으로  $\Delta K$ 는 낮은 유속에서는 크고 높은 유속에서는 작다. Fig. 9에서부터 Fig. 12까지 편차 막대(error bar)는  $2\sigma_{\Delta K}$  만큼 계산하여 나타내었다.<sup>(3)</sup>

Fig. 9의 '#1, #2, #3 열림'과 '#4, #5, #6 열림'의  $\Delta K$ 는 '정상 조건'의  $\Delta K$ 보다 크다. Fig. 10에 나타난 것처럼 #1 압력공에서부터 #6의 압력공들을 한 개씩만 여는 경우에는 높은 유속에서도  $\Delta K$ 가 잘 줄어들지 않는다.

Fig. 11에 나타난 것처럼 '#2, #3, #4, #5 열림'은 풍동 벽면의 경계층 두께의 영향을 배제하기 때문에 '정상 조건'에 비해서  $\Delta K$ 가 더 작다. Fig. 9에서부터 Fig. 12의 모든 경우에서  $\Delta K$ 의 상대 표준 편차는 1.2% 이내로서 '#1 열림'이나 '#6 열림'과 같이 압력공들을 열거나 닫더라도 안정된 불확도 범위 내에서  $K$ 를 측정할 수 있다.

다점식 피토관은 주유동 방향에 대하여 설치되는 각도에 따라  $K$ 가 변화한다. 각도 변화가  $K$

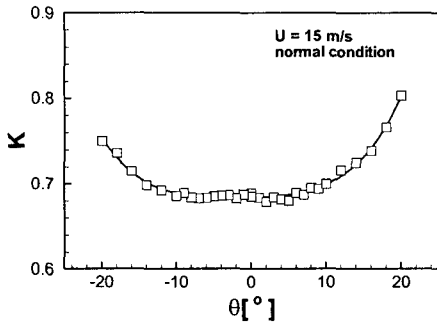


Fig. 13 Effect of installation angle on annubar coefficient

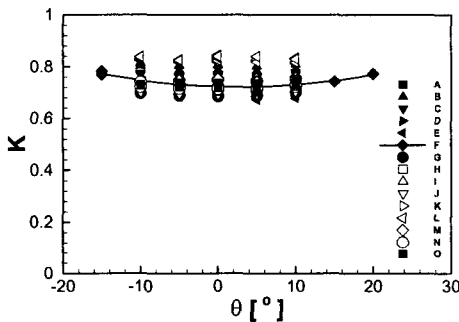


Fig. 14 Annubar coefficient with respect to installation angle

에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 유속 15m/s에서 다점식 피토관의 설치 각도를 변화시키면서  $K$ 를 측정하였다. Fig. 13에 나타난 것처럼  $-10^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 의 범위에서는  $K$ 는 매우 일정하다. 다점식 피토관의 설치 각도가  $\pm 10^{\circ}$ 를 벗어나면 측정 차압이 감소하고  $K$ 는 이차 함수 모양에 근접한다. 이 결과는 Fig. 14에 나타난 다른 종류의 다점식 피토관에 대한 각도 변화 실험 결과와 일치한다. L자형 피토관은  $-10^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 의 범위에서 상대 편차는  $\pm 1\%$ 로 다점식 피토관의 각도 변화에 의한 상대 편차와도 잘 일치한다.

#### 4. 결론

환경 감시용 풍속계를 풍동에서 교정하기 위해서는 설치하고자 하는 풍속계의 길이가 풍동 시험부 단면의 특성 길이보다 작아야 한다. 산업 현장에서 굴뚝 유량계로 많이 쓰이고 있는 다점식 피토관은 길이가 2m 이상인 경우가 많고 풍

동의 특성 길이보다 길어서 교정이 쉽지 않다. 본 연구에서는 이 문제를 해결하기 위하여 ‘부분 막음 방법’을 제안하였고 길이 2m 인 다점식 피토관의 전압 측정공과 정압 측정공들을 열거나 닫으면서 다점식 피토관 계수들을 측정하였다. ‘부분 막음 방법’에 의한 다점식 피토관 계수는 모든 압력공들을 열고 측정한 계수와  $\pm 0.05$  이내에서 일치하였다. 다점식 피토관 계수의 상대 표준 편차는 1.2% 이내이었다. 이 범위는 환경 관련 규정에서 요구하는 2% 이내의 불확도 범위를 만족시킨다. 그러므로 ‘부분 막음 방법’은 길이 2m 인 다점식 피토관의 계수를 구하는 방법으로 채택될 수 있다. 그러나 ‘부분 막음 방법’이 2m 이상의 다점식 피토관에 적용되기 위해서는 다점식 피토관 계수의 상대 표준 편차가 적어도 2% 보다 작아야 한다. 이에 대해서는 연구가 계속 진행되어야 한다. 또한 유속이 균일한 풍동에서 다점식 피토관을 교정하더라도 실제로는 유속이 불균일한 굴뚝에 설치되어 사용되기 때문에 발생하는 다점식 피토관 압력공들의 형상, 개수, 적절한 배치 등에 대해 많은 검토가 이루어져야 한다.

#### 참고문헌

- (1) Dieterich Standard, 1998, "Anubar: Averaging Pitot Tube Installation and Operation Manual," 00809-0100-4760, Rosemount Inc..
- (2) International Standard Organization, 1977, "Measurement of Fluid Flow in Closed Conduits - Velocity Area Method Using Pitot Static Tubes," ISO 3966, Geneva, Swiss.
- (3) Chung, M. S. (Ed.), 1998, "KRISS Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement," KRISS-98-096-SP.
- (4) Hong, K. K., Choi, Y. M., Lee, S. H., Choi, J. C., Kim, W. S. and Ko, J. Y., 2005, "Performance Test of a Calibration Wind Tunnel as a Means to Authenticate Anemometers for the Stacks," *Wind Tunnel Workshop*, May 4, KARI, Daejeon, Korea.
- (5) Jones, F. E. and Schoonover, R. M., 2002, "Handbook of Mass Measurement," pp. 120~131, CRC Press.
- (6) Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainty in Single-Sample Experiments,"

*Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.  
(7) Seshadri, V., Gandhi, B. K., Singh, S. N. and  
Pandey, R. K., 2004, "Analysis of the Effect of

Body Shape on Annubar Factor Using CFD  
*Measurement*, Vol. 35, pp. 25~32.