덕트누기시험기용 풍량측정 오리피스의 최적위치 선정에 관한 연구

이 승 철†
삼척대학교 소방방재학부

A Study on the Optimal Orifice Location for Air flow Measurement in an Air Duct Leakage Tester

Seung-Chul Lee†
School of Fire & Disaster Prevention, Samcheok National University, Gangwon-do 245-711, Korea

(Received October 18, 2005; revision received January 16, 2006)

ABSTRACT: In this study, five experiments were carried out, with an orifice located downstream of a fan in case I where upstream duct length is 6D, and that in the downstream is 4D and different downstream distance to the fan in the rest, so as to determine the optimal location of the orifice and reduce the duct length of airflow measurement device. The resulting flow rate-pressure drop correlations were found to satisfy the limitation of SMACNA standard, which specified an error of ±7.5% based on the real flow rate. Also, the best one of five cases was achieved with the orifice located midway of the orifice duct four times its diameter long.

Key words: Optimal location(최적위치), Flow measurement(풍량측정), Orifice(오리피스), Air duct leakage tester(덕트누기시험기)

기 호 설 명

A : 덕트 단면적 [mm^2]
D_1 : 덕트 지름 [mm]
D_2 : 오리피스 지름 [mm]
L_1 : 오리피스의 상류 직선덕트 길이 [mm]
L_2 : 오리피스의 하류 직선덕트 길이 [mm]
L_3 : 풍량측정을 위한 출구덕트 길이 [mm]
ΔP : 오리피스 양단의 압력차 [mmAq]
Q : 풍량 [m^3/h]
Re : Reynolds 수

그리스 문자

β : 덕트 지름에 대한 오리피스의 지름비, D_1/D_2
ε : 기체의 팽창보정계수
ρ : 밀도 [kg/m^3]

† Corresponding author
Tel.: +82-33-570-6815; fax: +82-33-570-6819
E-mail address: sclee@samcheok.ac.kr

1. 서 론

공조시스템(HVAC system)의 진단 및 T.A.B. (Testing, Adjusting and Balancing) 등에서의 풍량측정은 가장 기본적이면서도 중요한 부분이다. 풍량측정 방법에는 여러 가지가 있으나, 피토관(pitot-static tube), 벤츄리관(venturi tube), 그리고 오리피스(orifice)를 이용하는 방법 등이 널리 이용되고 있다.

피토관을 이용하는 방법은 측정점에서의 전압(total pressure)과 정압(static pressure)의 차이인 동압(dynamic pressure)을 측정하여 속도로 환산하는 것이다. 그러나 대부분 측정단면에서의 속도구배로 인하여 여러 점을 측정해야 하며, 현장에서 측정시 피토관을 고정시키는데 어려움이 따른다.

이에 비하여 벤츄리관과 오리피스를 이용한 풍량측정방법은 양단의 압력차를 측정하여 풍량을 구하므로 비교적 풍량측정이 간단하다. 그러나 벤츄리관을 이용하는 풍량측정장치는 그 단면형상이 일정한 각도를 가지며 축소되므로, 설계 및 제작에 어려움이 있다. 오리피스를 이용하는 풍량측정장치는 벤츄리관을 이용하는 것보다 설계 및 제작이 용이하지만, 오리피스 전·후에 긴 직선덕트가 필요하며, 벤츄리관에 비해 큰 압력강하를 동반한다는 단점을 가지고 있다.

대부분의 공조설비에서 풍량은 송풍기와 같은 유체기계에 의해 발생되며, 발생된 풍량을 알기 위해서는 상기에 기술한 방법들을 이용하여 구하게 된다.

미국의 SMACNA[1](Sheet Metal and Air Conditioning Contractors National Association)에서는 덕트의 누기량을 시험하는 덕트누기시험기(air duct leakage tester)에 풍량측정장치로써 오리피스를 이용하며, 그 규격을 정하였다.

국내에서는 공조용 덕트누기시험방법에 관한 한국설비기술협회의 규격[2]과 주택용 설비유닛의 누설시험방법에 관한 KS 규격[3]이 있지만 풍량측정장치에 대한 세부규정은 없는 실정이다.

Fig. 1에는 SMACNA에서 규정한 풍량측정장치

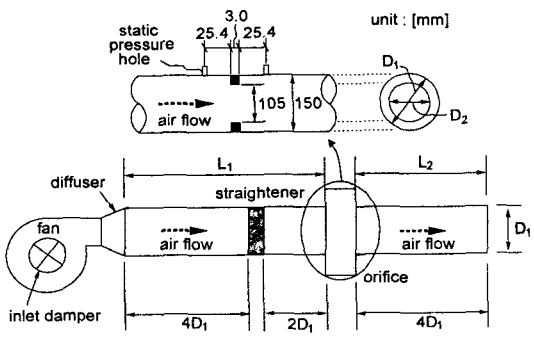

Fig. 1 Flow measuring system of duct leakage tester.

의 개략도를 나타내었다. 그림에서 보이는 바와 같이 SMACNA 규격[1]에서는 오리피스의 위치가 송풍기 출구측에 위치하며, 오리피스 전·후의 직선덕트 길이가 각각 덕트지름의 6배와 4배 이상 필요하다. 이러한 직선덕트의 길이는 덕트누기시험기를 설치, 이동 및 보관하는데 어려움을 주고 있다.

덕트의 길이를 이처럼 길게 해야 되는 이유는 오리피스 상류인 송풍기 출구에서는 불균일한 속도구배와 이차유동으로 인하여 불안정한 유동이 발생하기 때문이다.[4] 따라서 오리피스를 송풍기 출구측 대신 비교적 안정된 유동이 존재하는 입구측에 위치시킨다면, 오리피스 전·후의 직선덕트의 길이는 줄어들 것으로 판단된다.

본 연구에서는 SMACNA[1]에서 추천한 덕트누기시험기의 풍량측정장치에 사용되는 오리피스의 위치와 오리피스 전·후의 직선덕트 길이를 조정하여 최적의 오리피스 위치를 선정하고, 이러한 결과로부터 덕트누기시험기용 풍량측정장치의 측정 정밀도는 유지하면서 장치의 소형화를 이루고자 한다.

2. 오리피스 풍량측정장치의 규격

2.1 KS 규격

오리피스를 이용한 풍량측정방법에 대한 KS 규격[5](KS A 0612 ; 조임기구에 의한 유량측정방법)은 일반적인 모든 경우에 적용되며, 송풍기 출구측에 위치된 오리피스의 경우, 상류 직선덕트 길이가 덕트 지름의 30배 이상이어야 한다고 규정한다. 이 경우 상당히 정밀한 측정이 예상되며, 부가예상오차는 0%이다. 이 규격에서 사용되는 오리피스 양단의 압력차와 풍량과의 관계식은 다음과 같다.

$$Q = K\varepsilon\frac{\pi}{4}D_2^2\sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \qquad (1)$$

위 식에서 ε는 가스팽창보정계수이며, K는 유량계수로써 유출계수, C와 덕트 지름에 대한 오리피스의 지름비, $\beta(D_2/D_1)$의 함수관계식으로 나타내어진다. KS 규격에 대한 보다 상세한 내용은 참고문헌[5]을 참조하기 바란다.

2.2 SMACNA 규격

SMACNA[1]에서 규정하는 오리피스를 이용한 풍량측정장치는 덕트누기시험기에만 국한된다. 이 규격에서는 앞서 기술한 KS 규격에 비해 오리피스 전·후의 직선덕트 길이가 짧다. 이러한 이유에서 SMACNA 규격에서는 풍량측정장치의 오차를 최대 ±7.5%로 규정하고 있다. 이 규격에서 사용되는 오리피스 양단의 압력차와 풍량과의 관계식은 식(2)와 같다.

$$Q = 0.01139 K D_2^2 \sqrt{\Delta P} \qquad (2)$$

상기식에서 유량계수 K는 앞서 언급한 KS 규격에서는 C와 β의 함수이지만, SMACNA 규격에서는 Reynolds 수가 10^5 이상일 때, Table 1에 나타낸 바와 같은 β의 값에 따라 결정된다. 이것은 이미 ACGIH(American Conference of Governmental Industrial Hygienists)[6]에서도 토론된 바 있으며, Re 수가 10^5 이상이고 유동의 압축성 정도가 심하지 않은 경우, 실무현장에서는 특별한 보정 없이 식(2)를 적용할 수 있다고 보고된 바 있다.

Table 1 Airflow coefficient in accordance with orifice diameter ratio

β	0.70	0.60	0.50	0.40	0.30
K	0.699	0.650	0.623	0.608	0.600

3. 오리피스 최적위치 선정

3.1 실험장치 및 방법

오리피스의 최적위치를 선정하기 위해 오리피스의 위치와 전·후의 직선덕트의 길이에 따라 모두 5가지 경우에 대한 실험을 수행하였다. Table 2에는 본 실험에서 수행된 실험종류를 나타내었다. 표에서 case I은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 SMACNA 규정에 의거하여 제작된 경우이다. case II~case V는 오리피스의 위치가 SMACNA 규정과 달리 송풍기 입구측에 위치된 경우이며, 각 경우에 대한 오리피스 전·후의 직선덕트 길이 L_1과 L_2는 Table 2에 나타내었다.

Fig. 2에는 case II~case V에 대한 실험장치를 나타내었다. Case I에 대한 실험장치는 Fig. 1의 출구에 피토관으로 풍량을 측정하기 위한 직선덕트가 추가되며, 이를 제외한 실험장치는 Fig. 2와 동일하다.

실험장치는 송풍기, 오리피스 양단의 차압측정

Table 2 Experimental cases in this study

	Orifice location	L_1	L_2
Case I	Fan outlet	$6D_1$	$4D_1$
Case II	Fan inlet	$5D_1$	$3D_1$
Case III	Fan inlet	$5D_1$	$2D_1$
Case IV	Fan inlet	$3D_1$	$2D_1$
Case V	Fan inlet	$2D_1$	$2D_1$

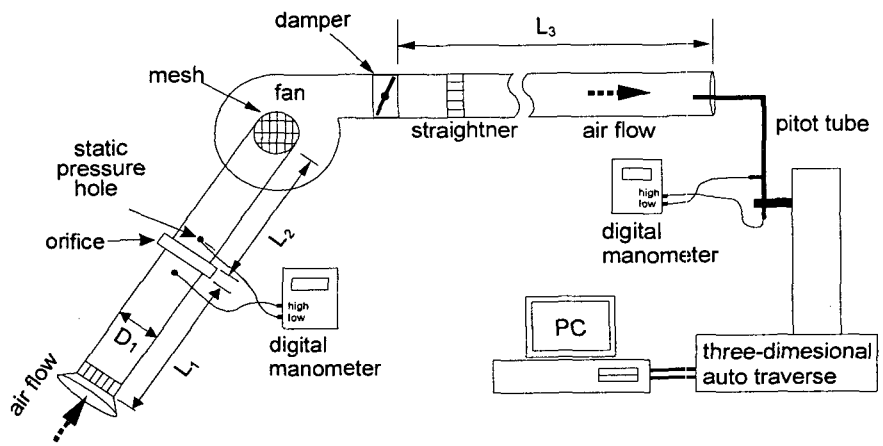

Fig. 2 Schematic diagram of experiment set-up.

부, 그리고 덕트 출구에서의 풍량측정부로 구성된다. 본 실험에 사용된 송풍기는 정격정압 190 mmAq일 때 풍량이 2,300 CMH인 원심형 터보 송풍기이며, 송풍기 출구의 단면은 원형으로 지름은 120 mm이다. 덕트와 오리피스판의 재료는 투명 아크릴과 알루미늄 합금이다. 실험에 사용된 덕트는 원형이며, 덕트 지름 D_1과 오리피스의 지름 D_2는 150 mm와 105 mm로 β는 0.7이 된다. 피토관을 이용하여 풍량측정을 하기 위해 추가된 출구덕트는 사각덕트로써 그 길이는 원형덕트 지름의 20배이며 높이와 너비는 140 mm로 동일하다. 오리피스판의 두께와 양단의 압력공은 Fig. 1의 상부에 나타낸 바와 같이 각각 3 mm와 오리피스판으로부터 25.4 mm에 각각 위치한다.

수축피팅과 정류계(strightener)를 통과한 공기는 오리피스를 경유하여 송풍기로 유입된다. 이때 송풍기 입구에는 무풍량 또는 미소풍량 통과시, 송풍기 날개의 회전으로 기인되는 역류(reverse flow)를 방지하기 위해 망사(mesh)를 설치하였다. 송풍기를 통과한 공기는 풍량조절용 댐퍼와 정류계를 지나 덕트 출구로 유출된다.

실험은 실내온도를 20℃로 유지한 상태에서 정상상태의 유동을 얻기 위해 송풍기를 30분 가동시킨 후 수행하였다. 덕트 출구에서의 풍량측정방법은 ISO Standard 3966-1977[7]에 의거하였다. 풍량은 피토관을 3차원 자동이송장치에 장착하여 출구단면에서 상세측정법에 의거한 25개 위치의 동압을 각각 측정한 후 다음 식을 이용하여 구하였다.

$$Q = \frac{A}{25}\sum_{i=1}^{25}\sqrt{\frac{2\cdot p_{d,i}}{\rho}} \qquad (3)$$

위 식에서 Q, p_d, ρ 및 A는 각각 공기의 풍량, 동압, 밀도 및 덕트 단면적이다.

오리피스 양단의 압력차이는 디지털 마이크로 마노메타를 이용하여 약 20초 동안 측정한 값들을 평균하여 사용하였다. 이러한 풍량측정방법과 오리피스 양단의 압력측정방법을 사용하여 풍량조절 댐퍼로 송풍기 풍량을 조절하면서 실험을 수행하였다.

3.2 실험결과 및 토의

오리피스의 최적위치를 선정하기 위한 실험에 앞서 본 실험에 사용된 송풍기 출구 단면에서의

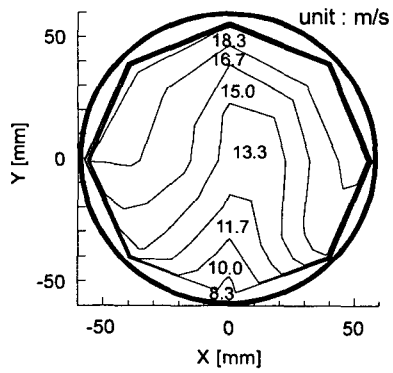

Fig. 3 Normal velocity distribution of a fan outlet section.

속도의 불균일 정도를 알아보기 위해 주 유동방향 속도분포를 측정하였고, 그 결과를 Fig. 3에 도시하였다. 속도측정점은 모두 32개의 위치에서 측정되었으며, 그림에 나타낸 결과는 측정값들을 접합곡선화(interpolation)한 것이다. 그림에서 보이는 바와 같이 출구 단면의 상부와 좌·우 끝부분에서 약 18.3 m/s의 큰 속도가 존재하며, 하단부로 갈수록 속도는 줄어들어 하단부 중앙부분에서 8.3 m/s의 최저 측정속도가 나타났다. 측정된 최대, 최소 유속은 송풍기 출구 단면의 평균 유속 15.4 m/s의 53.9%와 119%에 해당하는 큰 편차를 보였다. 이러한 상하 비대칭 속도분포로부터 안정된 속도분포를 얻기 위해서는 평균 유속이 12.7 m/s일 때, 송풍기 출구로부터 최소 덕트 지름의 2.5배에 해당하는 직선덕트가 요구되며, 5 m/s 증가시마다 덕트 지름의 1배의 추가적인 덕트 길이가 필요하다.[4] 그러므로 오리피스의 위치가 송풍기 출구측에 위치되면, 오리피스 상류에는 이러한 비평행유동이 회복될 수 있는 최소 덕트 지름의 2.5배 이상의 긴 직선덕트가 요구된다. 따라서 오리피스의 위치를 비교적 안정된 유동이 존재하는 송풍기 입구측에 위치시킨다면, 오리피스 상류의 덕트 길이는 줄어들 것으로 사료된다.

오리피스의 위치와 오리피스의 전·후 직선덕트의 길이에 따른 오리피스 양단의 압력차에 대한 실제 측정풍량을 KS 규격과 SMACNA 규격에 의한 결과와 함께 Fig. 4에 나타내었다. 보다 상세한 비교 분석을 위해 Table 3에는 5가지 실험의 대표적인 결과를 기준으로 하여 SMACNA 규격에 의한 결과와의 오차를 나타내었다. 표에

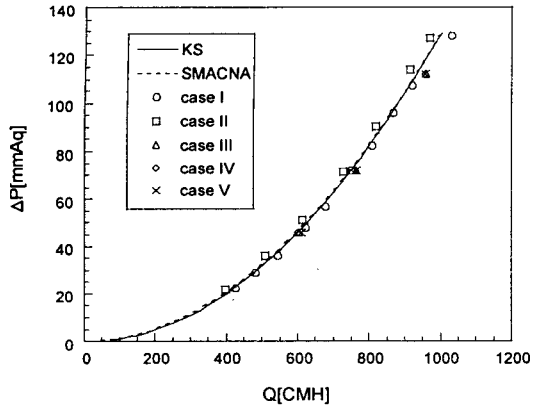

Fig. 4 Comparison of $\Delta P - Q$ from KS standard, SMACNA standard and experiments.

Table 3 Results and errors based on experiments

ΔP	Q_{KS}	Q_{S1}	Q_1	ε_{S1}
12.1	313.4	305.3	315.4	−3.2
28.7	476.8	470.2	483.6	−2.1
56.9	666.9	662.1	677.5	−2.3
72.0	749.0	744.8	750.6	−0.8
ΔP	Q_{KS}	Q_{S2}	Q_2	ε_{S2}
12.5	318.2	310.3	309.4	0.3
35.8	532.5	525.2	509.7	3.0
51.3	633.7	628.7	614.2	2.4
72.0	749.0	744.8	735.9	1.2
ΔP	Q_{KS}	$Q_{S3\sim S5}$	Q_3	ε_{S3}
12.5	318.2	310.3	313.6	−1.1
46.0	599.8	595.3	603.4	−1.3
72.0	749.0	744.8	762.5	−2.3
112.5	931.3	931.0	958.8	−2.9
ΔP	Q_4	ε_{S4}	Q_5	ε_{S5}
12.5	305.2	1.7	311.4	−0.4
46.0	601.1	−1.0	610.8	−2.5
72.0	760.8	−2.1	763.1	−2.4
112.5	956.7	−2.7	954.4	−2.5

서 오차는 다음 식과 같이 정의하였다.

$$\varepsilon = \frac{Q_S - Q}{Q} \times 100\,[\%] \qquad (4)$$

위 식에서 Q는 각 실험(case I~case V)에서 측정된 유량을 뜻한다. 표에서 첨자 KS, $S1\sim S5$ 및 1~5는 각각 KS 규격, SMACNA 규격 및 case I ~case V를 의미한다. KS 규격과 SMACNA 규격의 결과는 식(1)과 (2)를 이용하여 구하였다.

표에서 보이는 바와 같이 case I의 경우, 실제 실험에서 측정된 풍량을 기준으로 SMACNA 규격의 결과는 약 −3.2~−0.8%의 오차를 보이며 정량적으로 잘 일치한다. 오리피스 전·후의 덕트 길이를 SMACNA 규격보다 짧게 한 case II~ case V의 결과 또한 약 −2.9~3.0%의 오차로 잘 일치함을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 본 실험에서 오리피스 전·후의 덕트 길이가 가장 짧은 case V를 포함한 모든 경우가 SMACNA의 풍량측정장치 제한조건인 ±7.5% 이내의 조건을 만족시킨다.

본 연구에서 최적의 오리피스의 위치는 오리피스 전·후의 직선덕트의 길이가 가장 짧으며, 측정 정밀도 또한 유지되는 경우에 해당된다. 따라서 본 실험의 결과로부터 case V가 최적의 오리피스 위치이며, 이 경우 덕트누기시험기 풍량측정장치의 소형화 및 경량화를 이룰 수 있다고 판단된다.

이것이 현실화된다면 측정 정밀도를 유지하면서 SMACNA에서 규정된 장치보다 경량화되고 컴팩트한 장치를 구현할 수 있다고 사료된다.

상기의 결과로 미루어 판단할 때 SMACNA의 덕트누기시험기 풍량측정장치의 오리피스 위치 및 오리피스 전·후의 덕트 길이에 대한 규격의 개정이 요구된다. 또한 풍량측정장치에 대한 세부규정이 없는 한국설비기술협회의 공조용 덕트누기시험방법에 관한 규격과 주택용 설비유닛의 누설시험방법에 관한 KS 규격에 본 연구결과가 반영된다면 관련 실무자들에게 편의를 제공할 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 SMACNA[(1)]에서 추천한 덕트누기시험기의 풍량측정장치에 사용되는 오리피스의 위치와 오리피스 전·후의 직선덕트 길이를 조정하여 최적의 오리피스 위치를 선정하고, 이러한 결과로부터 덕트누기시험기용 풍량측정장치의 측정 정밀도는 유지하면서 장치의 소형화를 이루고자 모두 5가지 경우에 대한 실험을 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구에 사용된 송풍기 출구 단면에서 주

유동방향 속도분포는 상단부에서 최대속도인 18.3 m/s, 하단부에서 최소 속도인 8.3 m/s로써 불균일하게 측정되었다. 이러한 상하 비평행유동으로 보아 오리피스 전·후의 덕트 길이를 줄이기 위해서는 송풍기 출구측에 위치한 오리피스는 비교적 안정된 유동이 존재하는 송풍기 입구측에 위치시켜야 한다.

(2) 본 연구에서 수행된 오리피스 전·후의 직선덕트 길이가 서로 다른 5가지 경우의 실험결과 모두 SMACNA의 덕트누기시험기용 풍량측정장치 제한조건인 측정오차 ±7.5% 이내의 조건을 만족시킨다. 또한 수행된 5가지 경우 중, 오리피스 전·후의 덕트 길이가 가장 짧은 case V가 최적상태이며, 이 경우 풍량측정장치의 소형화를 이룰 수 있다고 판단된다.

(3) 본 연구의 결과로 미루어 SMACNA의 덕트누기시험기 풍량측정장치 규격의 개정이 요구되며, 한국설비기술협회의 규격과 주택용 설비유닛의 누설시험방법에 관한 KS 규격에 본 연구결과가 포함된 풍량측정장치에 대한 세부규정이 추가되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Sheet Metal and Air Conditioning Contractors National Association, Inc., 1985, HVAC Air Duct Leakage Test Manual, SMACNA.
2. Korean Association of Air Conditioning Refrigeration and Sanitary Engineers, 1999, KARSE B 0016-Test Code for Leakage of HVAC Air Duct, KARSE.
3. Korea Standard Associations, 2001, KS F 2282-Method of Test for Leakage of Equipment Units for Dwellings, KSA, Korea.
4. AMCA Publication, 1990, Fans and Systems, AMCA, Illinois, USA.
5. Korea Standard Associations, 1997, KS A 0612-Measurement of Fluid Flow by Means of Orifice Plates, Nozzles and Venturi Tubes inserted in Circular Cross-section Conduits Running Full, KSA, Korea.
6. American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 1976, Industrial Ventilation-Testing of Ventilation Systems, ACGIH, Lansing, MI.
7. ISO, 1977, ISO Standard 3966-1977, Measurement of Fluid Flow in Closed Conduits-Velocity Area Method Using Pitot Static Tubes, International Organization for Standization, Geneva, Switzerland.