

실험실습용 국소배기 기초실험장치의 개발

한돈희[†] · 박민규

인제대학교 보건안전공학과

Development of Basic Local Exhaust Ventilation System for Experimental Education

Don-Hee Han[†] · Minkyu Park

Department of Occupational Health and Safety Engineering, Inje University, Gimhae, Gyeongnam-do 621-749, Korea
(Received September 17, 2005; Accepted October 10, 2005)

ABSTRACT

To enhance educational effect for exhaust ventilation system, more instructive educational engineering such as experimental system should be needed. This study was performed to 1) manufacture the basic experimental system for local exhaust ventilation, 2) experiment with this system and 3) develop methodology of exhaust ventilation education. With this system, three pressures (static pressure(SP), velocity pressure(VP) and total pressure(TP)) were measured and illustrated and the graphic shapes agreed to theoretical ones relatively. Entry loss factor (F_h) of each hood was found to be different with hood shape, duct velocity and flow rate. This result implies that precise F_h should be determined case by case and a industrial hygienist should not be dependent on the existing values. Pressure loss using velocity pressure method and characteristics of air movement near hoods using fume were grasped with this system. But larger system should be recommended to produce more precise experimental results.

Keywords: local exhaust ventilation

I. 서 론

산업현장에서 국소배기장치가 제대로 작동하기 위해서는 우선 이를 설계하는 설계자가 정확한 지식을 가지고 설계해야 할 것이다. 이를 위해서는 대학에서 심도 있는 교육이 무엇보다도 중요하며 또 이론에 그치지 않고 실험실습을 겸하여 교육을 받아야 할 것이다.

현재 산업환경기는 산업위생관리기사와 산업위생산업기사 자격시험에 필수과목으로 지정되어 있기 때문에 대학 및 대학교에서 비교적 심도 있게 강의가 이루어지고 있다. 대부분의 대학에서는 자신들의 교육실정에 알맞은 실험실습 시설과 장치를 구비하고 이에 맞추어 교육을 실시하고 있다. 그러나 아직까지 산업환경교육은 대부분의 다른 이공계 계통의 교육과정에서 표준화된 실험실습 교과과정을 요구하는 것과는 달리 실험실습과

정이 표준화되어 있지 않아서 대학에 따라 각기 다른 시설과 장비로 교육하고 있는 실정이다.

산업현장에서 국소배기 및 환기에 대한 연구는 꾸준히 이어져 오고 있으나¹⁻⁶⁾ 실험 실습 교육용 국소배기 장치에 관한 연구는 거의 없어서 이에 대한 연구가 필요하게 되었다. 따라서 장치 표준화될 산업환기 실험장치를 고려하여 하나의 장치를 이용하여 산업환기와 관련된 여러 가지 유체역학 및 물리적인 특성을 종합적으로 이해할 수 있는 실험장치를 개발하였다.

본 연구에서는 국소배기장치와 관련한 여러 가지 유체역학적인 특성을 종합적으로 이해하고 실습할 수 있는 국소배기 기초 실험 장치를 제작하고 그 실험방법을 개발하여 피교육생들이 쉽게 이해할 수 있는 국소배기에 관한 실험실습 교육자료를 제공하고자 한다.

II. 연구내용 및 방법

1. 실험장치의 설계와 제작

실험장치의 설계도는 Fig. 1과 같다. 이 실험장치는

[†]Corresponding author : Department of Occupational Health and Safety Engineering, Inje University
Tel: 82-55-320-3285, Fax: 82-55-325-2471
E-mail : dhan@inje.ac.kr

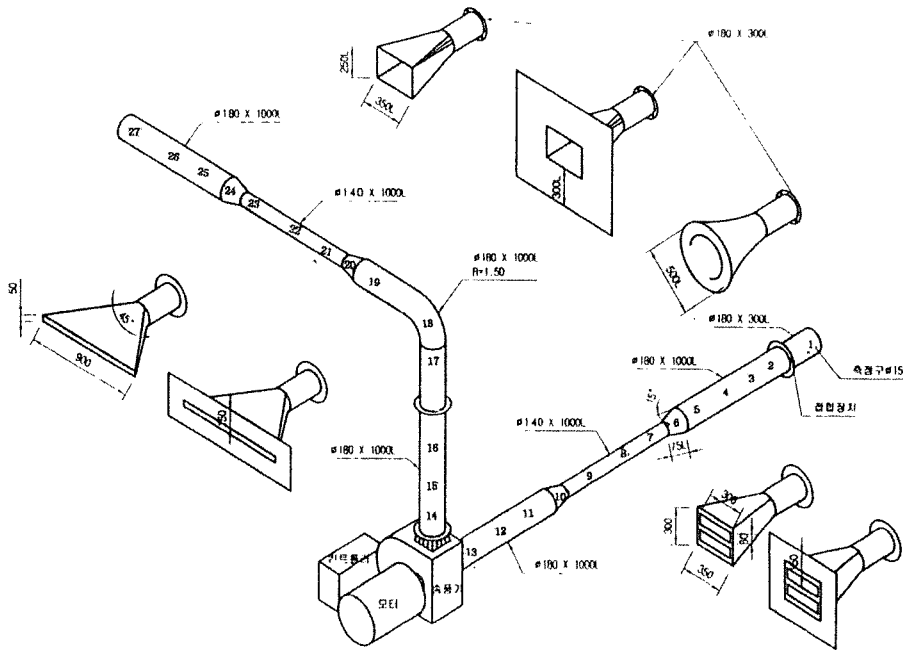


Fig. 1. Schematics of the basic experimental system for local exhaust ventilation.

ACGIH에서 제공하는 확대 및 축소관의 이론을 바탕으로 설계한 것이다.⁷⁾

덕트의 재질은 투명한 아크릴이며 송풍기는 1마력짜리 원심 송풍기를 사용한다. 유량은 최초 작동 시 25.5 m³/min을 유지하도록 하며 송풍기 정압은 81.1 mmH₂O, 동력은 0.77BHP로 설계한다. 후드는 모양에 따라 슬롯후드, 플랜지가 부착된 슬롯후드, 원형후드, 사각형후드, 플랜지가 부착된 사각형후드, 칸막이 사각형후드, 플랜지 부착 칸막이 사각형 후드의 7개 후드를 설계하고 제작한다.

한편, 본 실험 장치는 실용신안등록 제 0237744호에 등록되어 있다.

2. 실험장치의 특성

이 실험장치는 디자인 자체는 간단하지만 국소배기장치를 이해하는데 필요한 여러 가지 공기 흐름의 기본 원리를 쉽게 이해할 수 있다. 오른쪽 아래의 덕트는 공기를 흡인하는 덕트이고 왼쪽 위로 솟아 오른 덕트는 공기를 토출시키는 덕트이다. 송풍기를 통하여 공기를 흡인하도록 되어 있으며 인버터에 의해 공기의 유량을 조절하도록 되어 있다. 덕트의 재질은 투명 아크릴로 색깔이 있는 흡이나 입자 사용 시 내부 풍동(風動)을 볼 수 있으며 덕트에는 그림과 같이 측정구가 있어 열선풍속계나 마노메타를 연결한 피토포에 의해 속도압,

정압, 전압을 측정할 수 있다. 흡인 덕트 끝 부분의 접합 장치부에는 여러 가지 후드를 떼었다 붙였다 할 수 있도록 만들었으며 후드는 원형 덕트형 후드를 포함하여 7개를 제작하였다. 이 실험장치는 덕트의 단면적과 길이에 따라서 정압, 속도압, 전압이 어떻게 변하는지 그래프화하여 그 특성을 파악할 수 있다. 또 여러 개의 후드를 떼었다 붙였다가하여 후드의 모양과 형태에 따라 유입손실계수를 실험적으로 측정할 수 있으며 공기의 흡인과 토출시의 특성을 파악할 수 있다.

3. 실험방법의 개발

1) 실험기기

열선풍속계1(ANEMOMASTER 24-6111, KONOMAX사), 열선풍속계2(8386-M-G3, TSI사), 경사마노메타(Makr 2 no. 25, Dwyer사)에 연결한 피토포, 발연관

2) 실험방법의 개발

- ① 흡인 공기와 배출 공기의 유속이 미치는 거리를 비교한다.
- ② 속도압, 정압, 전압의 크기를 열선풍속계와 마노메타를 연결한 피토포를 이용하여 측정 구 마다 측정한 후 그래프로 작성한다.
- ③ 유량의 계산방법을 토의한다.
- ④ 마찰계수, 레이놀즈수 Re를 추정한다.
- ⑤ 후드 정압을 측정하여 각 후드에 대한 압력손실계

수를 산출한다.

- ⑥ 직관 덕트에 대한 마찰손실계수 F_f 를 계산한다.
- ⑦ 속도압법과 등거리법에 의한 단위길이 당 압력손실치를 비교한다.
- ⑧ 슬롯후드를 부착하고 유속과 유량을 조절하면서 슬롯속도와 포착거리, 유량과 관계를 규명한다.
- ⑨ 발연관을 이용하여 각 후드의 공기흐름 특성을 파악한다.

3) 각 압력 측정방법

속도압, 정압, 전압의 크기를 열선풍속계와 마노메타를 연결한 피토투관을 이용하여 각 5회씩 반복하여 시행하였으며 5회 실험 결과를 산술평균하였다. 피토투관을 이용하여 압력을 측정할 때는 속도압이 잘 나타나지 않는 경우가 있어 먼저 정압을 측정하고 다음에 전압을 측정한 다음 전압에서 정압을 뺀으로서 속도압을 계산하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 흡인 공기와 토출 공기의 유속이 미치는 거리 비교

1) 이론적인 배경

조그만 개구면에서 공기를 불어내는 경우에는 개구면으로부터 상당한 거리에까지 그 영향을 줄 수 있으나 반대로 공기를 흡인하는 경우에는 개구면으로부터 영향을 주는 범위가 매우 짧다. 이론적으로는 흡인공기의 경우 후드 직경을 d 라고 했을 때 개구면 속도의 10%에 해당하는 속도는 개구면에서 $1d$ 거리에 있으나 토출공기의 경우 토출면 속도의 10%에 해당하는 속도는 토출면에서 $30d$ 만큼이나 떨어져 있다.

2) 흡인공기의 유속이 미치는 거리

개구면 직경(d)은 10.2 cm, 개구면 속도는 9.0 m/s 이

Table 1. Mean values of static pressure(SP), velocity pressure(VP) and total pressure(TP) measured by thermal anemometer

(unit : mmH₂O)

Measurement point	SP	VP	TP
1	-6.22	6.00	-0.24
2	-4.24	5.18	0.94
3	-4.72	4.35	-0.36
4	-4.78	4.02	-0.76
5	-6.96	6.24	-0.71
6	-12.22	12.72	0.57
7	-12.32	13.91	1.59
8	-16.18	13.76	-2.41
9	-17.40	10.27	-7.12
10	-12.05	8.49	-3.56
11	-10.84	5.02	-5.61
12	-11.62	3.97	-7.64
13	-14.12	4.94	-9.17
14	6.14	10.53	16.71
15	13.44	5.12	18.44
16	13.18	5.78	18.96
17	14.08	4.86	18.94
18	14.00	7.56	21.56
19	5.14	3.43	8.57
20	4.04	8.12	12.16
21	2.20	16.27	18.47
22	2.37	16.13	18.50
23	2.66	16.94	19.60
24	2.06	10.43	13.69
25	0.00	7.88	8.28
26	0.00	4.88	4.88
27	0.00	4.29	4.29

*Each value was calculated for 5 samples.

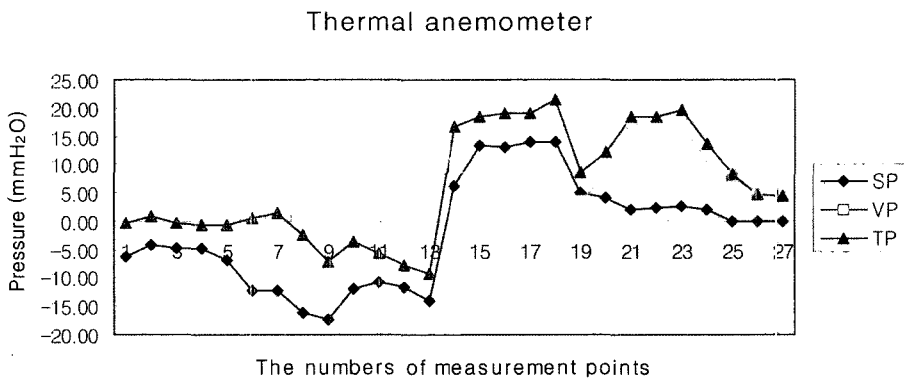


Fig. 2. Static pressure(SP), velocity pressure(VP) and total pressure(TP) measured by thermal anemometer.

Table 2. Mean values of static pressure(SP), velocity pressure(VP) and total pressure(TP) measured by pitot tube

(unit : mmH₂O)

Measurement point	SP	VP	TP
1	-8.00	8.00	0.00
2	-5.60	5.60	0.00
3	-5.60	4.00	-1.20
4	-5.80	4.00	-1.40
5	-6.20	4.80	-2.00
6	-15.60	12.80	-2.00
7	-15.40	13.80	-2.00
8	-16.60	14.00	-2.60
9	-17.80	14.00	-2.60
10	-13.80	10.40	-3.60
11	-12.20	5.00	-7.40
12	-12.40	3.40	-8.80
13	-13.40	4.00	-9.40
14	12.00	5.70	19.00
15	15.80	4.40	20.40
16	15.20	4.80	19.60
17	14.80	5.00	19.40
18	11.80	7.00	18.00
19	6.00	1.60	6.60
20	6.00	4.80	10.60
21	3.40	14.60	10.40
22	4.60	14.80	10.20
23	6.40	15.80	10.00
24	6.80	15.80	9.20
25	0.00	8.40	8.60
26	0.00	5.00	4.00
27	0.00	4.00	4.20

*Each value was calculated for 5 samples.

고 직경 d의 1배 떨어진 곳에서의 공기의 속도는 1.15 m/s였다. 이 값은 개구면 속도의 12.8%에 해당하는 값으로 정확하게 10%는 아니었으나 이론치에 매우 근접한 값이었다.

3) 토출공기의 유속이 미치는 거리

토출구의 직경(d)이 10.2 cm, 토출구 바로 앞에서의 공기의 속도는 9.0 m/s 이고 직경 d의 30배 떨어진 곳에서의 공기의 속도는 1.3 m/s였다. 이 값은 토출구 속도의 14.4%에 해당하는 값으로 정확하게 10%는 아니었으나 이론치에 매우 근접한 값이었다.

2. 각 압력의 측정과 그래프 작성

개구면에 아무런 후드를 부착하지 않은 상태에서 두 개의 열선풍속계와 경사마노메타를 연결한 피토관을 이용하여 속도압, 정압, 전압을 측정하였다. Table 1은 열선풍속계를 이용하여 측정된 압력들이며 Table 2는 마노메타에 연결한 피토관을 이용하여 측정된 압력들이다. 모든 측정값은 5회 측정하여 산술평균으로 계산한 값이다. Fig. 2와 3은 Table 1과 2를 그래프로 그린 것이다.

열선풍속계로 측정한 값과 피토관으로 측정한 값 사이에는 약간의 차이가 있었다. 즉, 열선풍속계로 측정한 값이 피토관으로 측정한 값보다 압력의 절대값이 약간 컸다. 이는 열선풍속계에 대한 보정을 시행하지 않아서 이런 차이가 난 것으로 판단된다. 물론 보정을 매년 실시하는 것이 좋겠으나 본 연구의 목적이 열선풍속계의 보정이 반드시 필요한 것은 아니어서 보정 없이 실시하였다.

한편, Fig. 4는 본 실험장치에서 나타나야 할 이론적인 각 압력치를 scale없이 그래프로 그린 것이다. Fig. 2와 Fig. 3을 Fig. 4에 비교해 보면 비록 정량적인 비

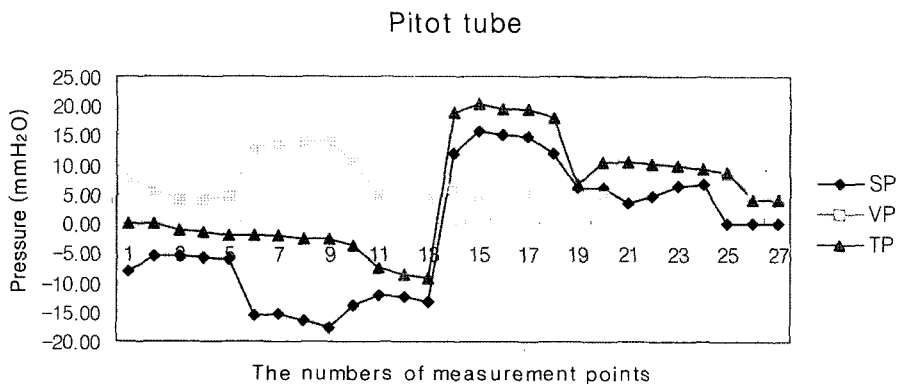


Fig. 3. Static pressure(SP), velocity pressure(VP) and total pressure(TP) measured by pitot tube.

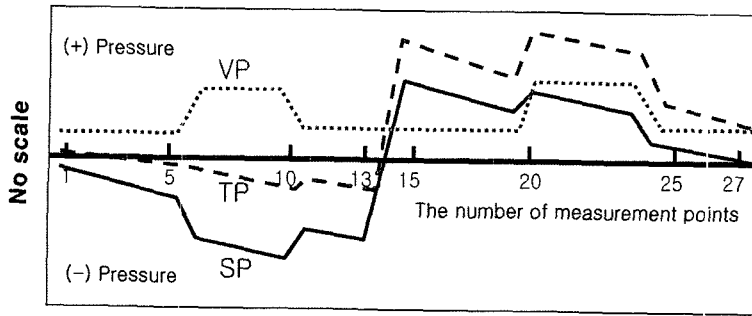


Fig. 4. Theoretical pressures of the basic experimental system.

교는 할 수 없으나 정성적인 비교할 때 마노메타에 피토관을 연결하여 측정된 측정치들이 열선풍속계를 이용하여 측정된 측정치보다 이론적인 그래프에 더 가깝다고 볼 수 있다.

이론치와는 달리 측정점 1에서 정압이 측정점 2보다 모두 높게 나타난 것은 후드를 부착하는 장치로 인해 입구구조가 좁아지는 구조를 가지고 있기 때문이다.

3. 레이놀즈수 Re, 마찰계수 f의 추정

다트의 직경과 다트 속도를 알면 레이놀즈수를 구하는 공식에 넣어 레이놀즈수 쉽게 구할 수 있다. 예를 들어 축소관이 아닌 지점의 레이놀즈수 Re는

$$Re = 0.666VD \times 10^5$$

$$= 0.666 \times 9 \times 0.102 \times 10^5$$

$$= 0.61138 \times 10^5$$

레이놀즈수가 $Re \leq 10^5$ 이므로 Blasius의 식이 성립하므로 마찰계수 f는 아래의 식으로 구할 수 있다.⁸⁾

$$f = 0.3164/Re^{0.25} = 0.3164/(0.61138 \times 10^5)^{0.25} = 0.0201$$

4. 압력손실계수 Fh의 측정

후드정압에 해당하는 측정점 1의 정압을 측정하여 각 후드의 압력손실계수 Fh를 산출할 수 있다. 여기서는 7가지 후드 중 3가지 후드에 대한 압력손실계수 산출 방법을 소개한다.

1) 슬롯후드

슬롯후드는 슬롯의 길이가 50 cm이고 폭은 3 cm이다. 슬롯의 폭을 1 cm, 2 cm, 3 cm로 변형하며 측정하였다.

$$Q = 4.043 \times A \times \sqrt{\frac{SP_h}{1 + F_h}}$$

의 식을⁸⁾ Fh에 관한 식으로

변형하고 다트의 면적 A를 약분하면 아래와 같은 식이

된다.

$$F_h = SP_h \times \left(\frac{4.043}{V_d} \right)^2 - 1$$

따라서 후드의 정압과 다트의 횡단측정법에 의한 평균 속도를 구하면 후드손실계수 Fh를 구할 수 있다.

- ① 슬롯의 폭이 1 cm일 때, SP_h = 12.25 mmH₂O, V_d = 7.3 m/sec

$$F_h = 12.25 \times (4.043/7.3)^2 - 1 = 2.76$$

- ② 슬롯의 폭이 2 cm일 때, 이상의 방법으로 Fh = 0.55

- ③ 슬롯의 폭이 3 cm일 때, 이상의 방법으로 Fh = 0.16

2) 플랜지 부착 슬롯 후드

- ① 슬롯의 폭이 1 cm일 때, 이상의 방법으로 Fh = 2.95

- ② 슬롯의 폭이 2 cm일 때, 이상의 방법으로 Fh = 0.59

- ③ 슬롯의 폭이 3 cm일 때, 이상의 방법으로 Fh = 0.13

3) 사각형 후드

이상의 방법으로 SP_h = 7.03 mmH₂O, V_d = 10.4 m/sec, Fh = 0.063

일반적으로 모든 교과서에 슬롯 후드의 압력손실계수 Fh = 1.78이다. 그러나 본 실험 결과 Fh는 슬롯의 폭에 따라 2.95-0.13로 다양하였다. 슬롯의 폭을 어떻게 조절하느냐에 따라 유입손실계수의 변동이 매우 심하였다. 또 사각형 후드의 경우 유입손실계수는 모든 교과서에 경사각도가 45°인 경우 0.25이나 본 연구에서는 0.063에 불과하였다.

본 실험결과 압력손실계수는 후드의 크기, 모양, 유량 및 유속에 따라 매우 다양해 질수 있음을 확인할 수 있었다. 그러므로 압력손실계수는 교과서에서 제시하는 값들이 절대적인 값이 아니며 단지 참고수준으로 받아들여야 하며 각 후드의 정확한 압력손실계수는 반드시 실험을 통해 확인하는 것이 바람직함을 알 수 있었다.

5. 속도압법에 의한 압력손실치 계산

공기의 난류 등의 영향이 적을 곳으로 사료되는 측정점 2와 4사이의 압력손실치를 계산하여 보았다. 마찰손실계수 H_f 계산 시 아크릴관에 의한 상수 a, b, c가 없기 때문에 아연도금강관의 값을 이용하면

$$H_f = 0.0155 \frac{V^{0.533}}{Q^{0.612}} = 0.0155 \frac{9.0^{0.533}}{0.073^{0.612}}$$

$$= 0.2481$$

그런데, 측정점 2와 4사이의 길이가 0.50 m이므로

$$\Delta p = H_f \times L \times VP = 0.2481 \times 0.50 \times 4.96 = 0.6 \text{ mmH}_2\text{O}$$

열선풍속계에 의해 측정된 정압변화는 0.5 mmH₂O로 유사하였으나 마노메타를 부착한 피토티관은 0.2 mmH₂O로 나타났다. 이는 측정의 오차로 사료되는데 특히 마노메타의 눈금을 읽을 때 생기는 오차와 실제 압력손실의 폭이 매우 적어서 정확한 측정이 어려웠던 점이 이 같은 차이를 발생시킨 것으로 판단된다.

6. 후드의 공기흐름 특성을 파악

발연관을 이용하여 각 후드의 공기흐름을 알아보았다. 플랜지를 부착하지 않은 후드는 뒤쪽의 방해기류(cross draft)에 의해 발연 흡이 후드로 흡인되지 못하고 상당량이 흩어지는 것을 관찰할 수 있었으며 반대로 플랜지 부착 후드는 이러한 방해기류의 영향을 덜 받는다는 것을 확인할 수 있었다. 또 슬롯후드의 경우 일반 사각형이나 원형 후드와 달리 후드의 가장자리에서도 발연 흡이 비교적 잘 빨려 들어가 슬롯후드의 특성인 공기흐름을 일정하게 유지하고 있음을 관찰할 수 있었다.

7. 기타 실험법

이 외에도 인버터를 조절하면서 유량 및 유속의 변화, 발연관을 이용한 포착거리, 개략적인 포착속도를 추정할 수 있었다.

IV. 연구개발의 제한점

일반적으로 실제 시공하고 있는 닥트의 재질은 아크릴이 아닌 녹 방지를 위해 표면에 아연을 도금한 합석(galvanized sheet)을 사용한다. 본 실험장치는 피교육생들의 교육효과를 높이기 위해서 부득이 합석닥트가 아닌 아크릴을 사용하였다. 분명 아크릴닥트와 합석닥트의 마찰손실계수는 다르나 본 실험에서는 이 차이를 무시하고 일반적으로 대부분이 사용하고 있는 합석닥트

의 계수 값으로 계산하였다. 이는 단지 교육효과를 높이기 위한 방법이며 실제 시공에 있어서는 각 재질의 닥트에 맞는 계수 값으로 계산해야 한다. 이점이 본 연구 개발의 제한점이다.

V. 보다 정확한 실험결과를 위한 제언

본 실험 결과 일부 이론적인 값과 잘 일치하지 않는 경우도 있었다. 보다 정확한 실험결과를 얻기 위해서는 이러한 결점의 보완이 필요한데 다음의 몇 가지를 제안한다.

첫째, 설계상에는 닥트의 직경이 180 mm로 되어 있으나 제작 당시에는 국내에서 180 mm의 아크릴을 구입할 수 없어서 내경 105 mm의 아크릴을 사용하였다. 정확한 실험을 위해서는 가능한 한 내경이 200 mm는 되는 것이 좋을 것이다.

둘째, 닥트가 작아지면서 송풍기의 동력도 설계와는 달리 0.5 BHP를 사용하였다. 이것 역시 정확한 실험을 위해서는 적어도 1.0 BHP 이상을 사용하는 것이 바람직하다.

셋째, 축소관의 크기도 설계와는 달리 내경 70 mm짜리를 사용하여 일반적으로 가장 많이 사용하는 피토티관을 사용하지 못하고 길이 20 cm의 작은 피토티관을 사용하였다. 축소관의 내경은 적어도 100 mm 이상이 바람직할 것으로 사료된다.

다시 말해 근본적으로 실험장치의 크기가 좀 더 크게 제작해야 할 것이다.

VI. 결 론

본 연구에서는 국소배기장치와 관련한 여러 가지 유체역학적인 특성을 종합적으로 이해하고 실험할 수 있는 기초실험장치를 제작하고 그 실험방법을 개발하여 실험을 통하여 실험장치가 국소배기 이론을 만족하는지 알아보았다. 대략 다음의 기초 이론을 이해하는데 적합한 것으로 밝혀졌다.

1. 흡인공기의 유속과 배출공기의 유속이 미치는 거리를 이해할 수 있었다.
2. 속도압, 정압, 전압의 크기를 열선풍속계나 마노메타를 연결한 피토티관을 이용하여 측정구에서 측정된 후 그래프화하여 속도압, 정압, 전압의 관계를 이해할 수 있었다.
3. 후드의 압력손실계수를 산출해 낼 수 있었다. 특히, 후드의 압력손실계수는 기존 교과서에 나와 있는 값들이 절대적인 값이 아니며 정확한 압력손실계

수는 반드시 실험을 통하여 산출해야함을 알 수 있었다.

4. 직관에 대한 압력손실치를 계산할 수 있었다.

5. 발연관을 이용하여 각 후드의 공기흐름 특성을 파악할 수 있었다.

보다 정확한 실험결과를 얻기 위해서는 압력, 유량, 유속의 변화가 보다 명확하게 나타나야 하는데 이를 위해서는 실험장치의 크기가 보다 크게 제작하는 것이 바람직할 것이다.

감사의 글

본 논문은 2004년 인제대학교 학술연구조성비 보조에 의한 것이며 이에 감사드립니다(This work was supported by the 2004 Inje University Research Grant).

참고문헌

1. 김종철, 김태영 : 굴뚝의 우수유입방지 특성. 한국산업위생학회지, **10**(1), 18-30, 2000.
2. 하현철, 정유진, 김태형 : 일반형 자연환기 벤틸레이터 배기유량 산정. 한국산업위생학회지, **12**(1), 27-34, 2002.
3. 하현철, 김태형 : 자연환기 벤틸레이터 형태에 따른 환기특성. 한국산업위생학회지, **12**(1), 35-45, 2002.
4. 하현철, 김태형 : 너비 및 높이 변화에 따른 일반형 자연환기 벤틸레이터 배기유량 산정. 한국산업위생학회지, **13**(1), 35-44, 2003.
5. 한돈희 : 일부 탈지세척 및 도금공정 국소배기장치의 성능점검과 개선방안. 한국산업위생학회지, **8**(2), 178-185, 1998.
6. 노동부 : 산업위생업무편람. 노동부 산업안전국 산업위생과, 서울, 315-323, 1994.
7. ACGIH : Industrial Ventilation A Manual of Recommended Practice, 24th Ed., Cincinnati, 5-15, 2001.
8. 한돈희 : 산업환기공학, 신평문화사, 2001.