

† . * . . * . . *

- Abstract -

Calibration and Performance Test of Hot-wire Anemometers by
Using a Calibration Wind Tunnel

Hyun-Chul Ha[†], Tae-Hyeung Kim*, Eun-A Kim

Jong-Chul Kim*, Jung-Ryng Oh, Ho-Keun Jung

*Industrial Safety & Health Research Institute Korea Industrial Safety Corporation
Department of Environmental Engineering, Changwon National University**

Hot-wire anemometers are most commonly used in measuring hood capture velocities due to their accuracy and convenience. But it was questionable that the anemometers being used in the field are accurate enough for the purpose of measurements. To answer this question, a calibration wind tunnel was newly devised and tested. Subsequently, 53 hot-wire anemometers being currently used in the field were tested to evaluate the accuracy of anemometers. The average error was 16.93% while the average errors in the low (0.5~5m/s) and high (5~20m/s) velocity range were 17.40% and 16.45%,

respectively. Most of anemometers underestimated the true velocities. It might be due to the contamination of hot-wire, resulting in the slow heat transfer between the sensor and air flow. Astonishingly, 16 of 53 anemometers were out of order due to the malfunctioning of zero adjustment control, power supply, display panel and sensor. It is desirable to calibrate periodically and clean the sensor after using in the dirty environment.

Key Words : Hot-wire anemometer, Calibration, Wind tunnel, Industrial ventilation

† : 7-3

Tel) 0551-269-0575, Fax) 0551-269-0596, E-mail) cfdace@hammail.net

I. 서 론

사업장에서 발생하는 각종 유해물질에 작업자가 노출되는 것을 예방하고 쾌적한 작업환경을 만들기 위해 산업환기 시스템을 설치하게 된다. 산업환기시스템이 충분한 효과를 거두기 위해서는 초기 설치뿐만 아니라 사후 관리도 매우 중요하다. 산업안전보건법에 산업환기시스템의 효과를 측정하는 방법 중 하나는 후드 개구면에서 제어풍속(capture velocity)을 측정하는 것이다. 후드 제어풍속은 풍속측정기를 이용하여 측정할 수 있는데 그중 열선풍속계(hot wire anemometer)가 가장 많이 사용되고 있다.

열선풍속계는 가열된 물체가 공기의 이동에 비례해서 냉각되는 원리를 이용한다. 초기 제작된 모델은 열선의 냉각률을 가열성분의 저항 변화로 변환하여 유속으로 환산하는 원리를 이용했으며, 최근에는 일정한 온도를 유지하려는 열선이 풍속에 의해 냉각되는 온도만큼 보충되는 전압을 유속으로 환산하는 원리를 이용하고 있다(Burgess 1989).

열선풍속계는 사용하기가 간편하고 유속을 직독할 수 있을 뿐만 아니라 다른 기계적 풍속계에 비해 낮은 유속에서 정확도가 우수한 장점이 있으나, 측정시 주의하지 않으면 정확한 결과를 얻을 수 없다는 단점이 있다(ACGIH, 1998 ; McDermott, 1981 ; Goodfellow, 1985). 특히, 열선풍속계의 센서부분은 매우 민감하여 측정시 분진, 온·습도 등에 의해 많은 영향을 받기 때문에 주기적으로 보정을 실시해서 정확한 결과를 얻을 수 있도록 해야한다. 하지만, 우리나라 측정기에 관한 법률에서 열선풍속계는 보정주기 24개월로 되어 있으나, 법적인 보정 대상에는 제외되어 있기 때문에 열선풍속계의 관리가 제대로 이루어지지 않고 있는 실정이다(한국측정기 교정협회, 1997). 또한 산업안전보건법상에 제시된 국소배기 후드의 제어풍속 중에서 가장 낮은 값이 0.4m/s 이기 때문에 측정장비의 정확도가 확보되지 못하면 측정결과를 신뢰할 수 없게 된다. 이러한 이유로 사업장에서는 한국산업안전공단 및 작업환경측정기관

등에서 측정된 환기시스템 제어풍속 측정 결과에 대해 믿지 못하는 경우도 있는 것으로 판단된다.

따라서 본 연구는 한국산업안전공단, 작업환경측정기관 및 각 사업체에서 보유하고 있는 열선풍속계에 대해 실험용 풍동장치를 이용하여 보정하고, 그 결과를 분석하여 현재 작업장 내에서 사용되는 열선풍속계 성능을 평가하고 향후 열선풍속계 관리 및 사용 방안의 기초 자료로서 활용하고자 한다.

II. 연구 대상 및 방법

1. 연구 대상

본 연구에 사용될 열선풍속계를 선정하기 위해 영·호남지역 산업안전공단, 작업환경 측정기관 및 각 사업체에서 보유하고 있는 열선풍속계에 대한 현황 파악을 하였다. 파악된 현황 자료를 바탕으로 1998년 이후에 구매된 제품과, 1998년도 이후에 한국표준과학연구소에서 보정을 받은 제품을 제외한 총 53대의 열선풍속계를 연구 대상으로 하였으며 연구 기간은 1999년 7월에서 8월 사이에 수행되었다.

2. 연구 방법

1) 실험 장치 설명

Fig. 1은 열선풍속계 보정용 풍동 실험장치의 모식도이다. 미국산업환기 매뉴얼에서는 저속과 고속 영역으로 나누어 풍동장치를 따로 설치하여 보정 작업을 실시하도록 하고 있다(ACGIH, 1998). 이 방법을 이용할 경우 풍동을 저속과 고속용을 나누어 2대를 설치하던지, 1대의 풍동으로 보정을 실시하려면, 저속을 보정할 때는 저속용 보정장치를 설치하고, 고속을 보정할 때는 고속용 보정장치를 설치해야 하는 번거로움이 있다. 하지만, 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 한 대의 풍동에 저속 및 고속을 동시에 보정할 수 있도록 풍동장치를 만들어 사용하여 위와 같은 문제점들을 해결하였다.

(1)
 Fig. 1 P1
 , P2가
 150mm, P2 400mm

(P1, P2)
 . P1

(2) (Flow straightener)
 (Profile)가
 Fig. 2

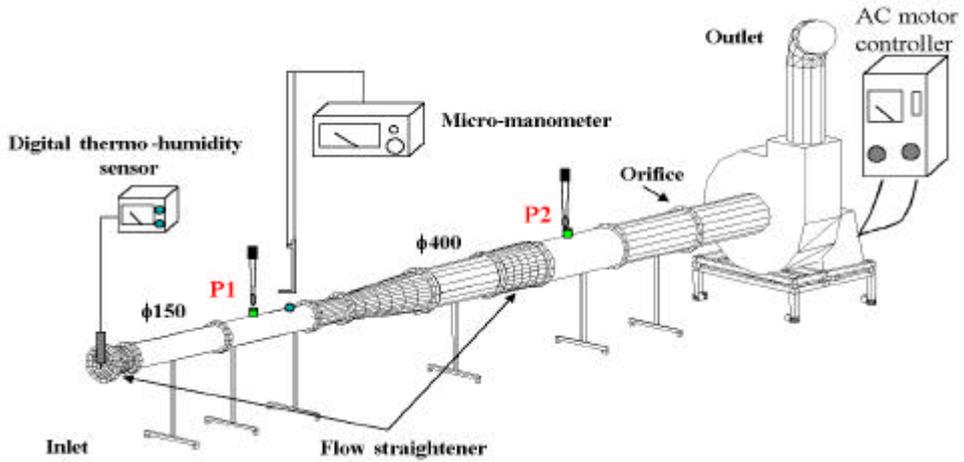


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental facility for the calibration of hot-wire anemometer

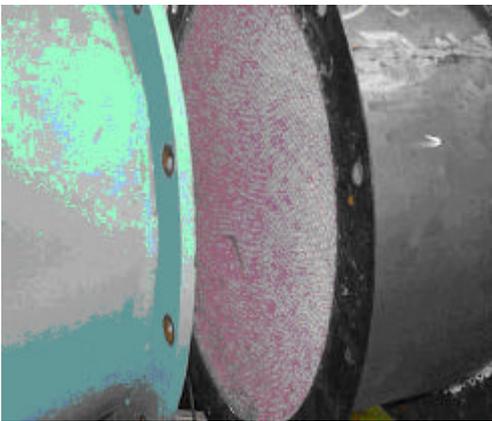


Fig. 2. Flow straightener

(3) (A/C motor controller), P1 (75mm)
 (Micro- manometer) (Digital thermo- humidity sensor)

0.01Hz 가
 (AC motor controller)
 100m³/min, 150mmAq 가

. Fig. 3

0.01mmAq 가 Micro- manometer(
 , FURNESS CONTROL LIMITED, Model FCO12- Micro- manometer)
 (Digital thermo- humidity sensor)

, AC motor controller (Hz) 15, 25, 35, 45, 50 Hz
 5m/s ~ 20m/s

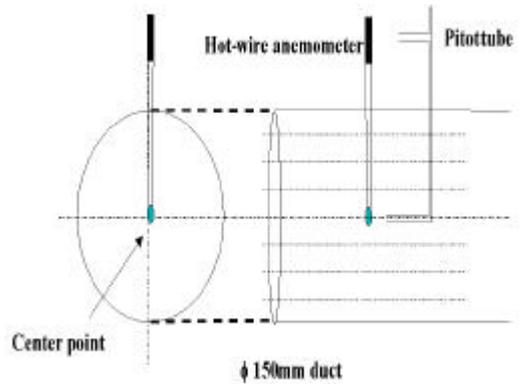


Fig. 3. Calibration of hot- wire anemometer for high velocity range

2)
 5m/s
 (0.5 ~ 5m/s) (5 ~ 20m/s)
 4%
 20m/s 0.25%

(2)
 (0.4 ~ 5m/s) 400mm
 (P2) (Fig.. 1)
 5m/s 가

(ACGIH, 1998 ; Guffey, 1999). 3

(ACGIH, 1998). Fig. 1
 P1 (Q1)
 P1 P2
 (Q1)

(1)
 (5 ~ 20m/s)
 150mm (P1) (Fig. 1)
 (V⁻ standard)
 (V⁻ actual) 가

P2 A2 P2
 (Velocity profile)
 P2

(V_{cent.}) , (V_{cent.}) (V̄_{actual}) AC Motor Controller
 K 가 K가 15, 25, 35, 45, 50Hz
 3

P2

AC Motor Controller

. 3

K (V̄_{standard}) Table 1, Fig. 4, Fig. 5

AC motor controller

가
 가

- P1 (Q1)

(Q1) P2
 (V̄_{standard})

$$\frac{Q1}{P2} = \bar{V}_{standard}$$

P2
 (V̄_{actual}) 가

(V_{cent}) 가

(V_{cent.}) (V̄_{actual})

K

$$\frac{V_{cent}}{V_{actual}} = K$$

(V̄_{standard}) K

$$(\bar{V}_{standard}) \times K =$$

① P1

P1

'10 Point Traverse
 (ACGIH, 1998).

Table 1. Air flow rate and pressure drop vs. motor rotation speed

Motor rotation speed (Hz)	15	25	35	45	50
Q1 (m ³ /min)	3.25	9.73	14.04	18.39	20.66
ΔP (mmAq)	1.27	4.32	9.07	15.60	19.54

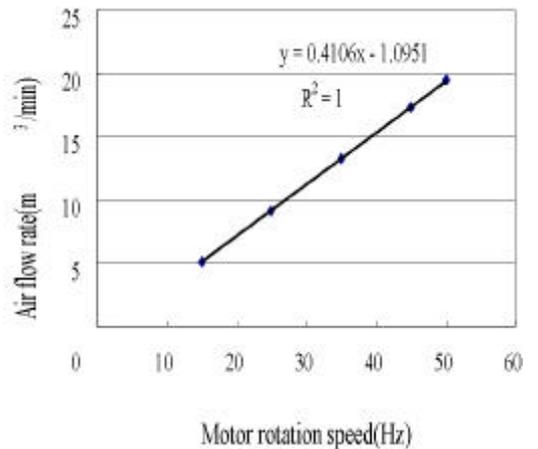


Fig. 4. Relationship between motor rotation speed and air flow rate

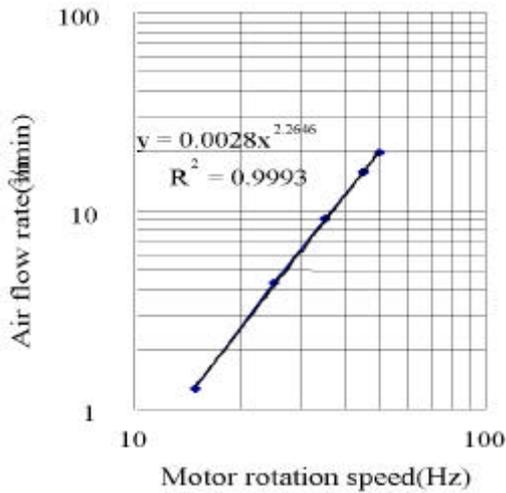


Fig. 5. Relationship between motor rotation speed and pressure drop across orifice

Table 2. Calculation of calibration factor(K)

Motor rotation speed(Hz)	15	25	35	45	50
$\bar{V}_{standard}(m/s)$	0.71	1.29	1.86	2.44	2.74
$\bar{V}_{actual}(m/s)$	0.62	1.24	1.85	2.42	2.76
$V_{cent}(m/s)$	0.68	1.26	1.85	2.42	2.78
$K(V_{cent}/\bar{V}_{actual})$	1.09	1.02	1.00	1.00	1.03

III.

1.

1)

Table 3

, 3 (%)

Table 3

(Total average error)

12.77% , (Average

error) 10.85~17.15%

(-)

가

② P2

ϕ 400mm

가 (Velocity profile)

Fig. 1 ϕ 400mm

5cm

가

20cm 가

가 Fig. 6 Fig. 7 50Hz

15Hz

③ P2

K

Table 2

($\bar{V}_{standard}$) P1

15, 25, 35, 45, 50Hz 3

(Q1) P2 (A2)

(\bar{V}_{actual})

P2

(V_{cent}) P2

(V_{cent})

(\bar{V}_{actual})

K

Fig.. 8 Table 3

(error)

5%

가 36 5 10~15%

가 11 가

10% 22

62% 20%

6 17%

, 30%

가 2 6%

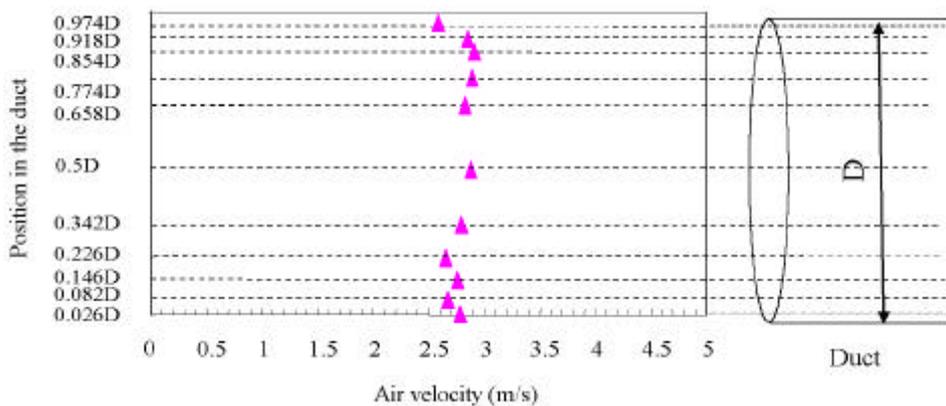


Fig. 6. Air velocity profile at 4D downstream of flow straightener (50Hz)

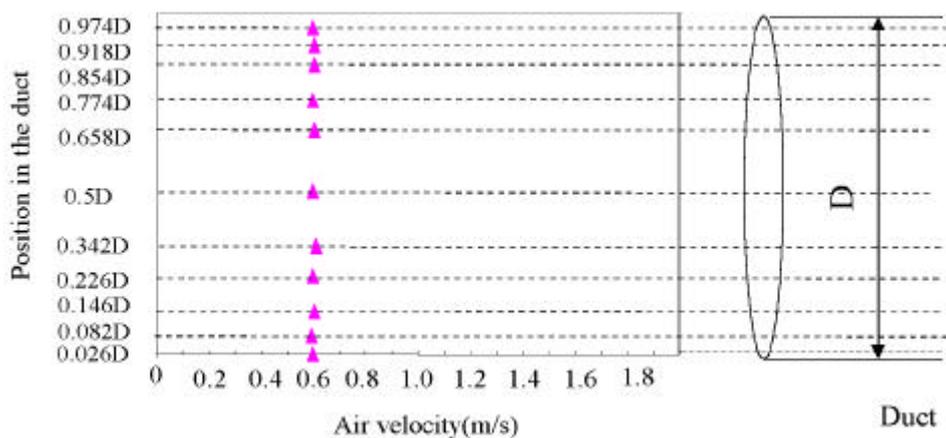


Fig. 7. Air velocity profile 4D downstream of flow straightener (15Hz)

2)
 Table 4
 , 3 (%)
 Table 4 ,
 (Total average error) 13.67% ,
 (Average error) 12.72~ 15.27%
 “ ”
 가 (-) 30% 가 1

Fig. 9
 (error) 5% 가 36
 10 가 10%
 가 18 50%
 . 20%
 10 28%
 가 1

Table 3. Calibration results of hot-wire anemometers in low velocity range

Type	No.	Year	Model	Motor rotation speed(Hz)				
				15	25	35	45	50
				Error(%)1)				
Digital	1	1993	SO**	- 16.44	- 6.20	- 6.99	- 5.19	- 8.76
	2	1994	TS**	- 50.47	- 42.49	- 39.25	- 38.11	- 40.12
	3	1996	TS**	- 16.01	- 13.44	- 16.31	- 18.03	- 22.05
	4		TS**	- 9.98	- 7.28	- 7.35	- 8.33	- 10.31
	5	1997	TS**	- 16.01	- 11.33	- 11.11	- 12.43	- 14.13
	6		TS**	- 3.42	- 2.27	- 5.07	- 4.64	- 5.06
	7		TS**	- 6.10	- 2.72	- 3.23	- 5.46	- 7.69
	8		TS**	- 9.55	- 7.28	- 7.58	- 8.74	- 11.89
	9	1998	TS**	- 10.41	- 6.27	- 6.99	- 7.51	- 10.71
	10	-	TE**	- 23.99	- 14.73	- 12.19	- 13.93	- 14.69
	11	-	TS**	- 2.41	- 0.91	- 2.13	- 2.84	- 6.40
Analogue	12	1980	DE**	- 24.44	- 24.02	- 24.59	- 27.77	- 32.26
	13	1988	SI**	- 16.01	+ 1.55	- 5.73	- 13.93	- 18.66
	14	1990	KU**	- 16.65	- 6.65	- 12.01	- 9.21	- 16.13
	15	1991	KA**	- 8.26	- 1.81	- 3.23	- 0.96	- 4.58
	16	1992	KU**	- 26.78	- 16.80	- 11.65	- 7.79	- 9.12
	17		DE**	- 23.33	- 8.53	- 6.63	- 7.79	- 9.00
	18		KU**	- 26.78	+ 29.20	+ 12.90	+ 6.56	+ 1.58
	19		OM**	- 16.44	- 10.83	- 8.60	- 5.74	- 10.24
	20		KU**	- 12.56	- 10.34	- 16.67	- 16.53	- 18.30
	21	1993	KU**	- 39.70	- 34.39	- 30.82	- 23.50	- 27.95
	22		KU**	- 22.04	- 19.90	- 6.81	- 5.74	- 4.58
	23		SI**	- 18.16	- 7.75	- 1.79	- 1.64	- 2.44
	24		DE**	- 22.04	- 12.40	- 3.23	- 3.14	- 6.61
	25		DE**	- 13.70	- 15.57	- 17.56	- 18.84	- 17.70
	26		DE**	- 40.13	- 18.09	- 18.46	- 23.63	- 26.80
27	AL**		- 9.55	- 11.63	- 17.74	- 19.81	- 22.36	
28	DE**		- 4.38	- 1.29	- 6.81	- 9.15	- 11.62	
29	AL**		- 31.86	- 9.43	- 12.60	- 14.80	- 16.60	
30	SI**		- 16.01	- 11.37	- 13.98	- 13.93	- 14.72	
31	1995	DE**	- 4.38	- 1.55	- 8.78	- 10.93	- 13.65	
32	1996	DE**	- 12.99	- 6.98	- 12.54	- 14.62	- 14.96	
33		DE**	+ 1.22	- 1.29	- 9.32	- 11.89	- 14.01	
34	1997	KU**	- 15.58	- 9.81	- 3.23	- 0.27	+ 0.39	
35	-	DE**	+ 6.39	+ 4.91	- 0.90	- 2.32	- 5.78	
36	-	KU**	- 23.33	- 12.60	- 5.91	- 8.47	- 9.64	
Standard velocity(m/s)				0.77	1.30	1.86	2.44	2.80
Average error(%)				17.15	11.21	10.85	11.23	13.38
Total average error(%)				12.77				

$$1) \text{ Error}(\%) = \left[\frac{\text{Hot wire velocity} - \text{Standard velocity}}{\text{Standard velocity}} \right] \times 100$$

Table 4. Calibration results of hot-wire anemometers in high velocity range

Type	No.	Year	Model	Motor rotation speed(Hz)				
				15	25	35	45	50
				Error(%) ¹⁾				
Digital	1	1993	SO**	- 12.09	- 12.65	- 13.61	+ 7.89	+65.01
	2	1994	TS**	- 37.64	- 35.00	- 29.21	- 28.70	- 28.92
	3	1996	TS**	- 20.54	- 21.79	- 24.59	- 24.93	- 25.92
	4		TS**	- 6.42	- 10.89	- 11.31	- 9.83	- 8.18
	5	1997	TS**	- 13.61	- 11.74	- 12.18	- 9.33	- 9.91
	6		TS**	- 6.42	- 8.23	- 5.03	- 6.04	- 5.05
	7		TS**	- 5.49	- 7.93	- 9.07	- 2.77	- 7.19
	8		TS**	- 8.75	- 8.67	- 8.91	- 9.96	- 10.80
	9	1998	TS**	- 1.76	- 4.15	- 6.83	- 7.27	- 6.24
	10	-	TE**	- 17.47	- 28.29	- 23.95	- 24.48	- 20.19
	11	-	TS**	- 3.59	- 2.90	- 2.97	- 6.25	- 7.24
12	1980	DE**	- 22.96	- 27.00	- 28.73	- 31.26	- 33.44	
13	1988	SI**	- 4.05	- 8.17	- 5.63	- 1.87	- 3.53	
14	1990	KU**	- 10.00	- 14.05	- 13.32	- 14.38	- 14.87	
15	1991	KA**	- 3.34	- 1.47	- 2.19	- 1.65	- 3.17	
Analogue	16	1992	KU**	- 8.46	- 5.61	- 8.18	- 9.16	- 11.33
	17		DE**	- 8.83	- 7.59	- 5.79	- 7.32	- 8.09
	18		KU**	- 12.10	- 0.55	- 2.03	- 1.46	- 3.24
	19		OM**	+ 0.73	+ 1.97	+ 2.16	+ 4.66	+ 4.70
	20	KU**	- 35.14	- 29.51	- 20.37	- 19.63	- 17.90	
	21	1993	KU**	- 26.72	- 30.10	- 28.86	- 26.70	- 25.95
	22		KU**	- 17.47	- 15.80	- 15.02	- 14.51	- 9.15
	23		SI**	- 6.20	- 2.07	- 3.63	- 5.54	- 6.37
	24		DE**	- 7.09	+ 2.12	- 21.05	- 14.09	- 47.89
	25		DE**	- 21.84	- 28.03	- 29.46	- 30.93	- 31.15
	26		DE**	- 21.29	- 23.43	- 27.52	- 25.75	- 26.49
	27		AL**	- 23.50	- 25.60	- 27.56	- 25.23	- 25.25
	28		DE**	- 17.47	- 28.95	- 23.95	- 24.48	- 20.19
	29	1994	AL**	- 7.51	- 1.68	- 3.08	- 2.84	- 3.55
	30	1995	SI**	- 14.73	- 10.29	- 8.81	- 7.94	- 8.92
	31		DE**	- 12.90	+37.68	+19.51	+ 7.48	+ 4.38
32	1996	DE**	- 13.32	- 15.17	- 11.96	- 13.85	- 16.06	
33		DE**	- 16.48	- 20.11	- 21.17	- 19.92	- 20.18	
34	1997	KU**	+ 0.01	+ 2.93	+ 6.73	+ 7.08	+ 5.89	
35	-	DE**	- 2.50	+ 3.44	+ 4.58	+ 1.93	+ 0.37	
36	-	KU**	- 9.67	- 7.30	- 1.22	+ 2.66	+ 3.00	
Average of standard velocity(m/s)				5.54	10.03	14.36	18.66	20.98
Average error(%)				12.72	13.99	13.62	12.77	15.27
Total average error(%)				13.67				

$$1) Error(\%) = \left[\frac{Hot\ wire\ velocity - Standard\ velocity}{Standard\ velocity} \right] \times 100$$

Table 5. Calibration results of hot-wire anemometers in velocity range

Range	Statistics	Motor rotation speed(Hz)				
		15	25	35	45	50
Low velocity	Standard velocity(m/s)	0.77	1.30	1.86	2.44	2.80
	Average error(%)	17.15	11.21	10.85	11.23	13.38
	Total average error(%)					12.77
High velocity	Standard velocity(m/s)	5.54	10.03	14.36	18.66	20.98
	Average error(%)	12.72	13.99	13.62	12.77	15.27
	Total average error(%)					13.67
Total	Average error(%)	14.94	12.60	12.24	12.00	14.33
	Total average error(%)				13.22	

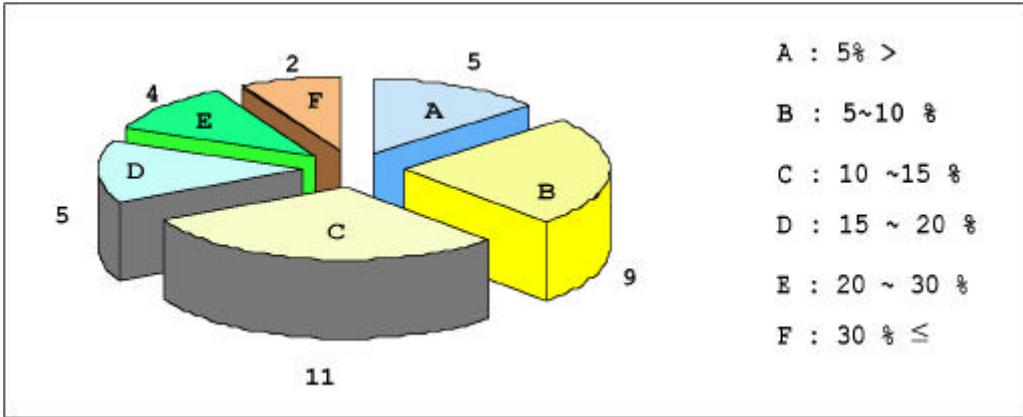


Fig. 8. Frequency distribution of average errors in low velocity range

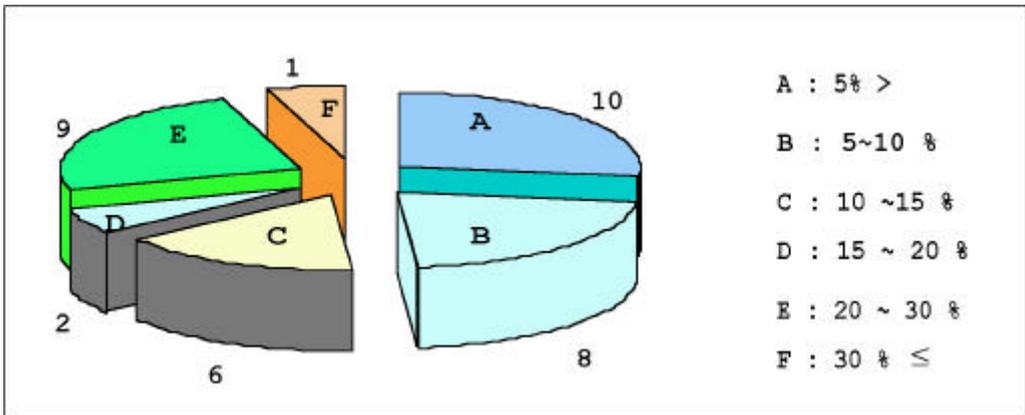


Fig. 9. Frequency distribution of average errors in high velocity range

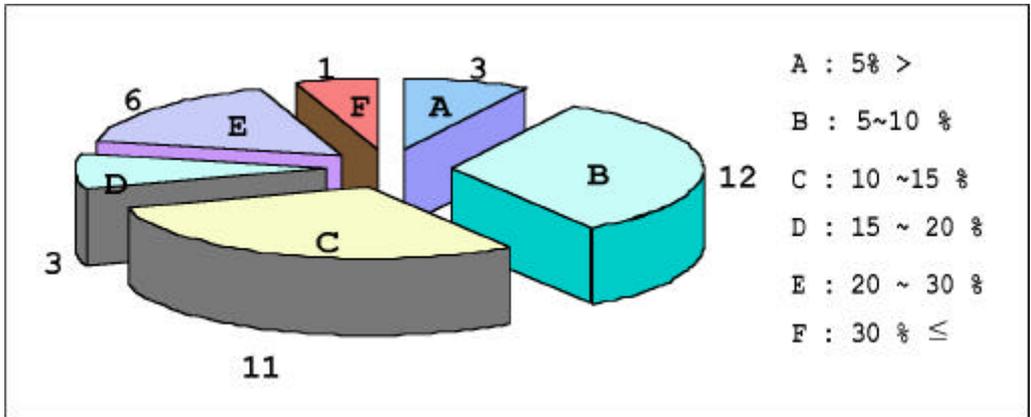


Fig. 10. Frequency distribution of average errors in velocity range

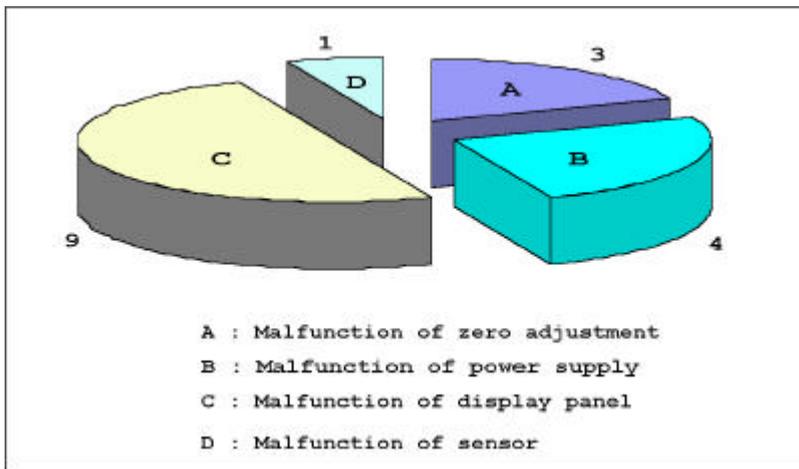


Fig. 11. Sources of hot-wire anemometer malfunction

3% (Average error) 12.00~14.94% (Total average error) 13.67% 12.77%

10% 가 error) 13.67% 12.77%

18 , 14

3) Fig. 10 (%)

Table 5 5% 가 36

(Total 3 10%

average error) 13.22% , 가 21 58%

. 20% , 7 ,
 20% , 30% ,
 가 1 3% , Fig.. 1

2.

53 17 가 17.40% , 16.45%
 가 16.93% 가 가

. Fig. 11

Fig.. 11

가 3 ,
 4 , 9 ,

1

가

(error)

5%

가 37 5 10~
 가 11 가

15%

10%

가

23

62%

5%

가

37 10

10%

가 19

51%

5%

3

10%

22

60%

53

가

IV.

16

가 3 ,

가

(ACGIH, 1998).

가 4 ,

2 , 1

작동하지 않는 경우가 8건, 기류의 흐름에 대해 전혀 작동하지 않는 경우에 있어서 동일 기종의 다른 열선풍속계의 센서와 교체하였을 경우 지시침이 작동하는 경우가 1건으로 발생되었다.

실험 기간 동안 의뢰된 열선풍속계의 대부분이 에너지가 다 소모된 건전지가 들어 있었다. 이는 사용 후 건전지를 분리시키지 않았음을 의미한다. 일반적으로 열선풍속계를 장기 보관할 경우 건전지를 분리시킨 상태에서 보관해야 한다. 그러지 않으면 건전지의 부식으로 인하여 기기내 전원공급 부위가 심하게 부식하게 된다. 실제 이러한 경우를 본 연구기간 동안에도 확인할 수 있었다. 따라서 열선풍속계를 효과적인 유지·관리가 시급하다 하겠다.

REFERENCES

한국측정기 교정협회: 계량 및 측정에 관한 법령

집, 1997

American Conference of Governmental Industrial Hygienists: Industrial Ventilation a Manual of Recommended Practice 23rd Edition, 1998; 9: 1-10

Burgess WA, JE Michael and RD Treitman: Ventilation for Control of the Work Environment, John Wiley & Sons. INC, 1989L; 58-86

Goodfellow HD : Advanced Design of Ventilation Systems for Contaminant control, Elsevier Science, 1985; 40-49

Guffey SE and DW Sr Booth: Comparison of Pitot Traverses Taken at Varying Distances Downstream of Obstructions, Am Ind Hyg Assoc J 1999; 60: 165-174

McDermott HJ : Handbook of Ventilation for Contaminant Control, ANN ARBOR SCIENCE, 1981; 282-284