

유동층습도계와 아스만습도계의 비교 연구

강 희 찬[†], 강 민 철^{*}

군산대학교 기계공학부, *군산대학교 대학원

Comparative Study of Fluidized Bed-type and Assmann Psychrometer

Hie-Chan Kang[†], Min-Cheol Kang^{*}

Faculty of Mechanical Engineering, Kunsan National University, Gunsan 573-701, Korea

*Graduate School, Kunsan National University, Gunsan 573-701, Korea

(Received October 29, 2003; revision received August 12, 2003)

ABSTRACT: The present work proposed a newly developed fluidized bed-type psychrometer that could be applicable to the high temperature and contaminant gases. The psychrometer is a device that test gas passes through the water in a glass bottle as a bubbly flow to obtain the adiabatic saturation temperature. A fluidized bed-type psychrometer was made and its characteristics were compared with the Assmann Psychrometer. The characteristic time was in the order of a hundred seconds, and decreased for the decrease of the mass of water and the increase of the air flow rate. The air flow rate and the insulation of the glass bottle were definitely important in the accurate measurement of the wet bulb temperature. The error in wet bulb temperature became less than 5 percent of the difference of dry and wet bulb temperatures if the air velocity in the glass bottle was greater than 1.5 m/s.

Key words: Psychrometer(습구온도계), Wet-bulb temperature(습구온도), Fluidized bed(유동층), Saturation temperature(포화온도), Measurement(측정)

기 호 설 명

그리스 문자

m : 질량 [kg]

P : 대기압 또는 압력 [Pa]

t : 시간 [s]

T : 건구온도 [°C]

T^* : 습구온도 [°C]

V : 속도 [m/s]

W : 습도비 [kg_w/kg_a]

ϕ : 상대습도

μ : 포화도

τ : 특성시간 [s]

상첨자

* : 습구온도 조건

하첨자

A : 아스만습도계

F : 유동층습도계

o : 초기상태

[†] Corresponding author

Tel.: +82-63-469-4722; Fax: +82-63-469-4727

E-mail address: hckang@kunsan.ac.kr

s : 포화상태
 w : 물 또는 수증기
 ∞ : 정상상태

1. 서 론

공기조화 설비에서는 습공기를 필수적으로 다루게 된다. 그러므로 습공기의 습도를 정확하게 측정하는 것은 공기조화 과정에서 열 및 물질전달을 평가하는 데 매우 중요하다.

습도 측정방식은 크게 절대습도와 상대습도를 측정하는 방식으로 분류된다.⁽¹⁾ 한 세기 이상 사용된 건습구온도계(psychrometer)⁽²⁾는 건구온도계와 습구온도계가 동일 기구에 있는 장치를 말한다. 건구온도는 통상적으로 측정하는 요소이므로, 건습구온도계는 습구온도를 측정하기 위하여 고안된 장치라고 할 수 있다. 아스만습도계(Assmann psychrometer)가 대표적인 건습구온도계이다. 아스만습도계는 열역학적 관계식을 이용하여 건구와 습구온도로 상대습도를 계산한다. 습구온도계는 젖은 천(심지)으로 온도계의 감온부를 감싼 형태이다. 습구온도계의 심지에는 일정 풍속 이상으로 통풍이 되어야 한다. 통풍방식에 따라 수동회전식인 실링(sling) 습도계와 팬-전동기구동하는 흡입식(aspiration) 습도계로 분류된다. 습구온도를 측정하기 위하여 수온온도계, 저항온도계, 열전대, 바이메탈 등 여러 종류의 온도계가 사용된다. 이슬점습도계는 습공기를 냉각하여 포화상태를 만들고 이슬점을 측정하여 습도를 구하는 장치이다. 광전노점계는 광학적으로 이슬을 검출하는 방식으로 공업적으로 많이 이용되고 있다. 전기저항식습도계(electrical impedance hygrometer)는 주변기체의 습도에 의해서 검출부의 전기저항이 변화하는 현상을 이용하여 상대습도를 측정한다. 이 장치는 기체의 조건을 변화시키지 않고 측정할 수 있으며 연속기록, 원격측정 및 자동제어가 가능하다는 장점이 있다. 그러나 온도계수가 크므로 보정이 필요하고 호완성과 내구성이 떨어진다는 단점이 있다. 그밖에 습도에 따라서 길이가 변화하는 특성을 갖는 모발을 이용한 모발습도계 등이 있다.

아스만습도계는 상온에서 정밀도, 신뢰도 및 내구성이 매우 높아 널리 사용되고 있다. 그러나 습도계로 유입되는 풍속이 규정 이상이어야 하

며, 허용되는 습공기의 온도는 0~80℃로 제한적이다.⁽¹⁾ 이전의 연구자들은 습구온도계의 직경 및 풍속이 측정정밀도에 미치는 영향에 대하여 연구한 바 있다(Chi et al.,⁽³⁾ Thomas et al.⁽²⁾). 이들 연구자료에 따르면 습구온도를 정밀하게 측정하기 위하여 온도계의 크기와 습도계에서 풍속이 적당하여야 한다. 따라서 정확한 습도를 측정하기 위하여 상당한 양의 습공기가 필요하다. 또한 습구온도계의 심지에는 얇은 수막이 지속적으로 형성되도록 해야 한다. 심지는 외피가 덮여 있어서 안되며 항상 청결해야 하고 꼭 맞아야 한다. 심지는 자주 갈아 주어야 하며 증류수나 탈이온수만 사용해야 한다. 온도계의 봉이나 유리관에서 열전도를 감소시키기 위하여 심지를 감온부보다 2~5 cm 이상 덮는 것이 바람직하다. 부분적으로 심지가 마른 경우 잘못된 값을 지시하므로 심지는 항상 흠뻑 젖은 상태로 유지되어야 한다. 심지를 적시기 위한 물은 열역학적 습구온도에 가까워야 한다. 그러나 습공기가 고온이거나 연소가스와 같이 오염된 경우에 대하여 앞에서 열거한 모든 요소를 고려하여 사용하는 것은 매우 어렵다.

본 연구에서는 기존의 건습구온도계에 적용되는 여러 제한사항으로부터 비교적 자유로운 유동층습도계(Fluidized bed-type psychrometer)를 개발하였다. 유동층습도계의 원형을 제작하고 아스만습도계와 비교실험을 수행하여 유동층습도계의 특성과 적용성에 대하여 기술하였다.

2. 이론적 배경

2.1 단열포화온도

단열포화과정은 습공기(공기-수증기 혼합물)가 단열이 잘 되어 있고 길이가 긴 덕트로 들어와서 이 안의 물과 접촉하는 과정이다. 이 과정에서 입구와 출구 사이에 압력변화는 없다고 가정한다. 입구에서 습공기가 포화상태가 아니라면, 덕트 안에서 물은 증발하며 습공기의 온도는 떨어질 것이다. 덕트를 나오는 혼합물은 포화상태가 되며 단열과정으로 덕트를 나오는 혼합물의 온도는 단열포화온도(adiabatic saturation temperature)이다. 이 과정이 정상상태 유동이 되기 위해서는 물이 증발되는 만큼 단열포화온도 상태의

물을 보충해 주어야 한다.⁽³⁾ 이러한 가정으로 인하여 일반적으로 단열포화온도와 건습구온도계의 습구온도는 같지 않다. 그러나 표준대기압 하에서 공기-수증기 혼합물인 경우 습구온도는 단열포화온도와 근사적으로 일치한다.^(4,5)

건습구습도계는 습구온도계의 심지에서 물의 일부가 증발하여 냉각효과가 나타난다. 습도에 따라 습구온도는 건구온도 이하를 지시한다. 이 과정에서 온도계의 길이 방향으로 전도열전달이 일어난다. 그리고 주위 표면의 평균 복사온도가 습구온도와 다르므로 복사가 일어난다. 이러한 열전도와 복사의 영향은 습공기가 일정풍속 이상이면 무시할 만하다.⁽²⁾

ASHRAE Handbook⁽¹⁾에 의하면 측정된 건구온도 (T)와 습구온도 (T^*)로 포화습도비 (W_s), 습구온도에서의 포화습도비 (W_s^*), 습도비 (W), 포화도 (μ), 그리고 상대습도 (ϕ)를 다음 식으로 계산한다.

$$W_s = 0.62198 \frac{P_{ws}}{P - P_{ws}} \quad (1)$$

$$W_s^* = 0.62198 \frac{P_{ws}^*}{P - P_{ws}^*} \quad (2)$$

$$W = \frac{(2501 - 2.381 T^*) W_s^* - (T - T^*)}{2501 + 1.805 T - 4.186 T^*} \quad (3)$$

$$\mu = \frac{W}{W_s} \Big|_{T,P} \quad (4)$$

$$\phi = \frac{\mu}{1 - (1 - \mu)(P_{ws}/P)} \quad (5)$$

여기서 P , P_w 및 P_{ws} 는 각각 대기압, 수증기의 분압 및 건구온도에서 수증기의 포화압력이다. 상첨자 '*'는 습구온도에서의 조건이다.

2.2 유동층습도계

아스만습도계는 측정할 습공기가 단열포화조건과 근사한 조건이 되도록 하는 것을 목표로 하고 있다. 본 연구에서 제안한 유동층습도계는 습공기가 통과하는 물이 단열포화조건에 근접하도록 고안한 것이 아스만습도계와 다르다.

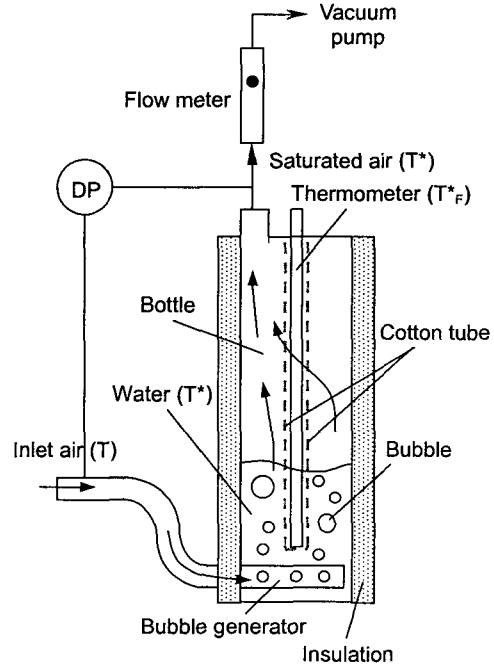


Fig. 1 Schematic diagram of fluidized bed-type psychrometer used in the present work.

본 연구에서 고안한 유동층습도계의 기본구조는 Fig.1과 같다. 습도계는 채취관, 용기, 기포발생부, 습구온도계, 면심지로 구성된다. 유동층습도계의 외부는 단열되어 있다. 습공기는 채취관을 통하여 유동층습도계로 유입된다. 유입된 습공기는 용기의 아래에 있는 기포발생부를 통과한다. 기포는 물과 열교환을 하고 용기 밖으로 배출된다. 이 과정에서 유입된 습공기와 물은 포화온도에 근접한다. 시간이 충분히 경과하면 물의 온도는 단열포화온도에 이른다.

아스만습도계에서는 습표면(심지) 외부로 유동하는 습공기가 접하도록 한 반면, 유동층습도계에서는 습공기가 물을 통과하도록 한 점이 다르다. 본 유동층습도계에서도 습구온도계에 심지는 사용하였다. 전술한 바와 같이 아스만습도계는 복사 및 열전도 효과를 줄이고 심지의 완전 젖음을 위하여 유로 단면적과 유속이 일정규격(2~5 m/s) 이상을 유지하여야 한다. 따라서 통상 2,500 L/min 이상의 습공기가 필요하다. 유동층습도계에서는 아스만습도계에 비하여 1/100 정도의 적은 습공기로 습도의 측정이 가능하다. 건습구습

도계는 고정 습표면(심지)과 습공기 사이의 대류에 의한 열 및 물질전달이 이루어진다. 반면에 유동층습도계는 습공기와 유동하는 물 사이에서 이상대류(two-phase convection)에 의한 열 및 물질전달이 이루어진다. 따라서 유동층습도계가 건습구온도계보다 열 및 물질전달계수가 매우 크다. 유동층습도계는 단열포화과정에 사용되는 물의 양이 많으므로 건습구습도계보다 상대적으로 오염에 둔감하다. 그리고 완전 젖음을 유지하기에 수월하다. 이러한 관점에서 유동층습도계는 기존의 습도계보다 고온과 오염조건에서 사용하기에 유리하다. 그러나 유동층습도계는 외부로 직접 노출된 표면이 있어서 단열조건을 유지하는 것이 쉽지 않다. 유동층습도계의 설계가 적절하지 않은 경우 습공기 유로에 압력강하가 유발되고 일정압력조건을 유지하기 어렵게 된다. 물의 양이 건습구온도계보다 많으므로 응답속도가 떨어지는 단점도 있다. 유동층습도계의 장점을 살리기 위해서는 응답속도를 향상시키고 열전달 등에 의한 오차를 감소하는 조건을 정하는 것이 중요하다.

3. 실험장치 및 방법

유동층습도계의 특성을 평가하기 위한 실험장치는 Fig. 1과 같다. 실험장치는 건습구습도계, 유동층습도계, 공기유량계, 진공펌프, 차압계, 컴퓨터 및 데이터취득장치로 구성된다.

본 연구에서 기준습구온도는 건습구습도계로 측정하였다. 두 습도계의 건구온도와 습구온도는 직경 3.2mm인 측온저항체(Pt100)를 사용하여 측정하였다. 각 온도계는 표준수은온도계를 이용하여 표준편차 0.05℃ 이내가 되도록 보정하였다. 유동층습도계는 유리로 제작하였다. 습공기는 채취관, 기포발생장치, 물, 용기출구 순으로 흐르도록 진공펌프로 흡입하였다. 채취관은 외경 5mm이며, 용기는 두께 0.8mm, 직경 16mm, 길이 100mm로 재질은 유리이다. 용기 내부의 물에 잠긴 채취관에는 직경 1.8mm의 구멍이 8개 있어 습공기의 기포가 발생하도록 하였다. 용기의 내부에는 측온저항체에 면심을 띄워 물에 잠기도록 하였다. 유동층습도계를 통과하는 공기의 유량은 불유량계(70 L/min)를 사용하여 측정하였다. 유동층습도계의 입구와 출구 사이의 압력차는 전자식차

압계(Druck, DPI265)로 측정하였다. 모든 자료는 데이터취득장치(AOIP, SA32)로 처리하였다.

측정은 다음과 같이 실시하였다. 유동층습도계의 용기에 물을 주입한다. 건습구습도계의 습구온도계의 심지(면심)를 교체하고 증류수를 적신다. 모든 계측기를 작동시킨 후 습구온도계의 흡입 쉘을 가동시킨다. 건습구습도계의 건구온도와 습구온도가 정상상태에 이르면 유동층습도계의 진공펌프를 작동시킨다. 각 온도와 압력은 데이터취득장치로 매 15초 간격으로 15분 동안 측정하여 기록한다. 유동층습도계에 주입하는 물의 양은 1~7g, 공기유속은 0.18~1.6 m/s, 그리고 용기를 단열/비단열하는 경우에 대하여 실험하였다. 기포발생상태는 디지털카메라(Nikon Coolpix 950)로 촬영하고 분석하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 유동층 가시화

본 연구에서 개발한 유동층습도계에서 공기가 통과할 때 생기는 기포의 거동을 관찰하였다. Fig. 2는 본 연구의 유동층습도계의 단열제를 제거한 상태에서 촬영한 용기와 물의 상태이다. 정상적으로 작동하는 조건에서 물은 공기의 흐름에 의하여 잘 혼합된다. 공기의 유속이 0.18 m/s 이하에서는 구형기포가 발생하고 유량이 증가함에 따라 기포계면은 불규칙적으로 된다. 공기의 유

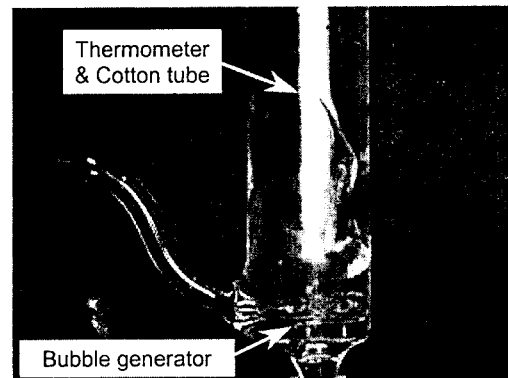


Fig. 2 Photograph of the present fluidized bed-type psychrometer ($m_{\text{water}} = 3\text{g}$, $V_{\text{air}} = 0.18\text{ m/s}$).

속이 0.64 m/s 이상에서는 물과 공기의 유동은 상당히 활발해지고 물이 차오르는 높이가 크게 증가한다. 물이 차오름에 따라 습구온도계의 심지는 완전히 젖은 상태를 유지한다.

4.2 응답시간

Fig. 3은 유동층습도계에서 물의 질량이 3g이고 공기의 유속이 0.46 m/s일 때 습구온도의 시간에 따른 변화를 나타낸 것이다. 공기의 유동이 시작된 후 습구온도는 시간에 따라 지수적으로 변화하는 경향을 보였다. 이는 관성력은 무시되고 열저장 능력이 있는 1차 시스템과 유사한 모델이다.⁽⁶⁾ 계단함수 입력에 대한 출력의 형태로 표시하면 습구온도(T^*)의 변화는 다음과 같다.

$$y = \frac{T_{F0}^* - T_F^*}{T_{F0}^* - T_{F\infty}^*} = 1 - e^{-t/\tau} \quad (6)$$

여기서 τ 와 첨자 'F', 'o', ' ∞ '는 각각 특성시간과 유동층습도계, 초기상태, 정상상태를 나타낸다. 그림의 경우에서 특성시간(τ)은 34.5초이며, 이 시간에 습구온도계가 계단입력에 대하여 63.2%를 반응한다는 것을 의미한다.⁽⁶⁾ 계단입력의 90%까지 응답하는 데 걸리는 상승시간(rise time)은 80 초 수준이다.

Fig. 4는 단열하지 않은 유동층온도계의 물의

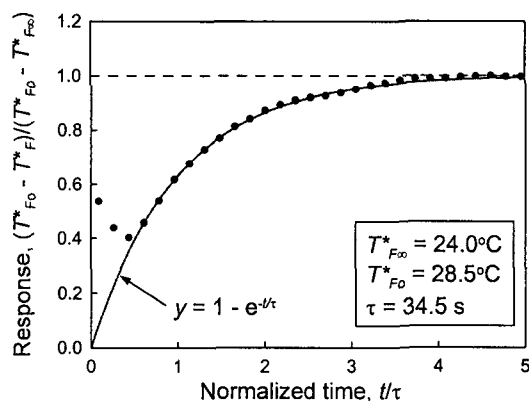


Fig. 3 Response of the present fluidized bed-type psychrometer ($m_{\text{water}}=3 \text{ g}$, $V_{\text{air}}=0.46 \text{ m/s}$).

질량에 따른 특성시간과 건습구습도계와 측정오차를 비교한 것이다. 본 실험에서 공기의 유속은 0.46 m/s로 일정하게 하였다. 용기 내의 물의 질량이 5g 수준에서 특성시간은 약 110초 수준이다. 특성시간은 물의 유량이 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 일정한 공기의 유량에 대하여 물의 열용량이 증감함에 기인한다. 유동층습도계와 아스만습도계의 습구온도 차이($T_F^* - T_A^*$)는 물의 유량이 증가함에 따라 약 1°C 수준에서 소폭 증가하였다.

Fig.5는 물의 질량을 3g으로 일정하게 유지하고 용기 내의 공기의 유속(또는 유량)을 증가시킴에 따라 특성시간의 변화를 비교한 것이다. 단열을 하지 않은 경우와 유동층습도계 전체를 두께 1cm의 솜으로 단열한 경우 두 가지에 대하여 실험하였다. 그림에서 공기의 유속이 증가함에 따라 특성시간은 감소하는 경향을 보이고 있다. 단열(insulation)인 경우가 비단열(without insulation)인 경우에 비하여 특성시간이 길다. 이는 유동층습도계의 열용량에 단열재의 열용량이 추가되기 때문이다. 따라서 유동층습도계에서는 단열의 품질과 열용량에 관련한 물성치가 중요하다. 공기의 유속이 약 1.5 m/s 수준에서 특성시간은 약 75초 정도임을 알 수 있다. 식(6)에 의하면 습구온도를 건구온도와 습구온도의 차이의 1% 이내로 측정하기 위하여 약 6분 정도가 소요된다는 것을 알 수 있다.

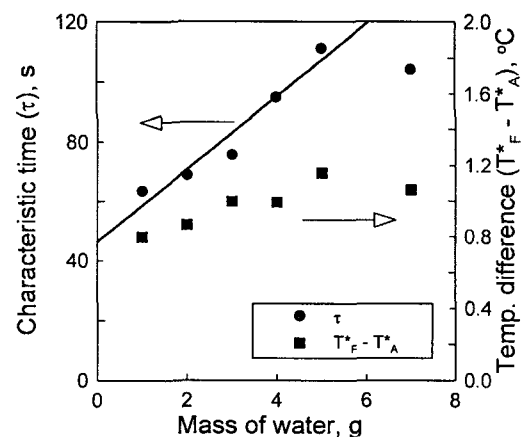


Fig. 4 Effect of mass of water on the characteristic time and the measurement error of the fluidized bed-type psychrometer ($T=24.8^\circ\text{C}$, $V_{\text{air}}=0.46 \text{ m/s}$).

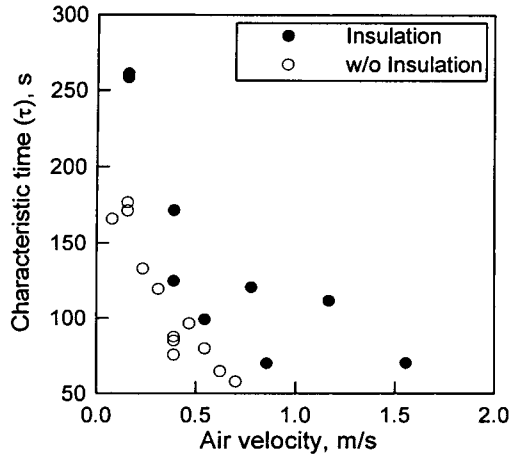


Fig. 5 Effect of air velocity on the characteristic time of the present fluidized bed-type psychrometer ($T=19.0\sim 27.1^{\circ}\text{C}$, $T^*=13.6\sim 22.1^{\circ}\text{C}$).

4.3 측정오차

전술한 바와 같이 아스만습도계에서도 복사효과, 온도계의 직경, 공기의 풍속 등에 따라 오차가 수반된다. 유동층습도계의 습구온도(T_F^*) 측정오차는 단열의 여부, 공기의 유량, 물의 질량 및 공기 유로 내의 압력강하 등에 의하여 발생하는 것으로 예상된다. Fig. 6은 아스만습도계와 유동층습도계에서 측정된 습구온도의 오차를 정리한 것이다. 오차는 건구온도(T)와 아스만습구온도(T_A^*)의 차이에 대한 두 습구온도의 차이의 백분율이다. 그림에서 유동층습도계를 단열하면 단열하지 않은 경우보다 오차가 상당히 감소함을 알 수 있다. 단열한 경우 공기의 유속이 1 m/s 이상이면 오차는 5% 이내로 근접함을 보이고 있다. 이 결과로부터 기존의 건습구습도계를 대체할 만한 새로운 형태의 유동층습도계의 구현이 가능하고 할 수 있다.

4.4 압력손실

단열포화과정에서는 압력이 일정한 것으로 가정한다. 유동층습도계에서는 공기유로에서 압력손실이 유발된다. 본 연구에서 사용된 원형 유동층습도계에서는 공기의 유속이 약 1 m/s일 때 약

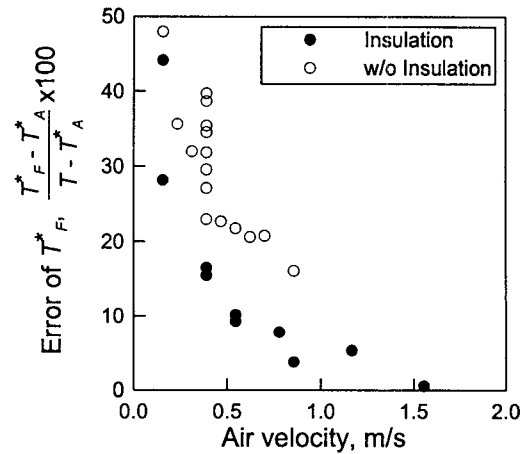


Fig. 6 Measurement error of the fluidized bed-type psychrometer for the air velocity ($T=19.0\sim 27.1^{\circ}\text{C}$, $T^*=13.6\sim 22.1^{\circ}\text{C}$).

1 kPa 수준의 압력강하를 나타내었다. 이는 대기압의 1% 수준이다. 습기의 양을 계산하는 데 압력강하가 미치는 인자는 식(1, 2, 5)에서 P , P_{ws} , P_{ws}^* 이다. 유동층습도계에서 압력강하가 1 kPa이라고 할 때 이 차압에 의한 비습도와 상대습도에서의 오차는 각각 1.1%와 0.1%이다. 따라서 본 유동층습도계에서 압력강하의 영향은 미미하다.

5. 결 론

본 연구에서는 습공기의 온도가 높고, 오염이 많은 경우에도 적은 공기의 양으로도 습구온도를 측정할 수 있는 유동층습도계를 개발하였다. 유동층습도계를 아스만습도계와 비교실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 20 L/min의 소량의 공기로 습도를 측정할 수 있는 새로운 형태의 유동층습도계를 제안하였다.

(2) 실험 유동층습도계의 특성시간은 100초 수준이며 공기유량이 증가하면 특성시간이 감소한다.

(3) 단열하고 공기의 유속이 증가할수록 유동층습도계의 측정오차는 감소한다.

(4) 단열을 하고 공기유속을 1 m/s 이상으로 하면, 유동층습도계의 습구온도의 정확도는 건구온도와 습구온도차의 5% 이내로 근접한다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R02-2000-00306)의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. ASHRAE Handbook, 2001, Fundamentals, Ch. 6 and Ch. 14, ASHRAE, GA, U. S. A.
2. Thomas, H. K., Ramse, J. W. and Threlkeld, J. L., 1998, Thermal Environmental Engineering, 3rd ed., Prentice Hall, NJ., U. S. A., Ch. 9.
3. Chi, D. S., Kim, S. T. and Park, C. B., 1990, The effects of pressure, wind velocity, and diameter of wet element on the measurement of relative humidity by a psychrometer, Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol. 3, pp. 137-141.
4. Wylen, G. J. V. and Sonntag, R. E., 1998, Fundamentals of Classical Thermodynamics, 3rd ed., Wiley, New York, pp. 442-443.
5. Cengel, Y. and Boles, M., 1998, Thermodynamics and Engineering Approach, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, U. S. A., Ch. 13.
6. Richard, S. F. and Donald, E. B., 1998, Theory and design for mechanical measurements, Korean-language Ed., Sigma Press, Seoul, Korea, pp. 94-98.