

PTC 서미스터를 이용한 유속계의 성능향상에 관한 연구

윤준용* · 조남규* · 김진래** · 성낙원** · 김광진***

Research on Improvement of Performance of Anemometer Using PTC Thermistor

Joon-Yong Yoon*, Nahm-Gyoo Cho*, Jin-Rae Kim**, Nak-Won Sung**, Kwang-Jin Kim***

Key Words: PTC(정온도계수), Anemometer(유속계), Cross-section shape of sensor(센서의 단면형상), Random flow separation(불규칙적 유동박리), Installation angle(설치각)

ABSTRACT

An anemometer employing the bulk PTC thermistor as the sensing element is investigated in this study. The numerical and experimental works are carried out to improve the sensitivity problem of the element by focusing fluid dynamics point of view. The typical shape of the sensing element has been used as a rectangular type, but this shape has a sensitivity problem because of flow separations on the sharp edge when the flow direction is different from that of the sensing element. In order to reduce the reading error, the installer has to be very careful about the flow direction. The reading error fluctuation by time as well as the sensitivity problem can be improved considerably through this study. It can be concluded that the small change of the sensor shape can improve the performance of the flow sensor.

1. 서 론

유동의 계측과 제어는 반도체 제작공정이나 화학공정 혹은 도시가스, 공조분야에서 필수적이다. 산업이 크게 발전하고 계측과 제어에 대한 필요성이 높아짐에 따라 다양한 계측기술의 개발이 요구되어지고 있다.

현재 사용되는 유속센서에는 피토폴(pitot-tube), 열선(hot-wire) 또는 열막(hot-film) 등이 사용되고 있으며 레이저에 의한 유속측정이나 마이크로 머신 센서를 이용한 유속측정이 가능하다. 이러한 유속센서들은 센서 자체가 고가이거나 반드시 필요한 부대장치들이 고가인 경우가 대부분이다. 피토폴은 차압을 측정하기

위해서 고가의 정밀 차압계가 필요하고, 열선이나 열막은 센서 자체의 가격이 고가이며 제작공정에도 많은 경비가 요구된다. 또한 레이저를 이용한 유속계는 유지보수에 많은 경비가 요구되는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁾ 특히, 현재 차압식 유속계의 수요는 감소하고 열식 유속계의 수요는 증가하고 있는 추세이므로 저가의 열식 유속계를 구성할 수 있는 센싱부 재료의 선정과 설계의 필요성이 대두되고 있는 실정이다.⁽²⁾ 열식 유속계의 센서에 사용되는 백금이나 니켈 등에 비하여 소자비용과 제작비에 있어서 저가인 PTC 서미스터를 센서의 재료로 사용하면 저렴한 가격의 유속계를 구현할 수 있다. 현재 PTC 서미스터는 마이크로 머신의 유속센서로서의 사용이 도입되는 초기단계이나, 최근 국산화에 성공한 소사이므로 유속계 센서로서의 적용이 용이하며, 다른 금속계질의 센서에 비해 가격 경쟁력을 확보할 수 있다.^(3,4) 따라서 PTC 서미스터를 박막(thin

* 한양대학교 기계산업공학부

** 한양대 대학원 기계공학과

*** 한국생산기술연구원

E-mail : joyoon@email.hanyang.ac.kr

film) 대신에 투박한 형태의 후막(thick film)으로 사용한다면 센서 제작공정에 들어가는 비용을 절감할 수 있다. 또한 PTC 서미스터의 특성상 자기온도 제한성질을 보유하고 있으므로 정온도형 회로나 정전류형 회로에 비해 구현하기 쉽고 저가인 정전압형 회로를 사용하여 기존의 회귀회로를 구현하지 않고도 센서의 burn out 현상을 방지할 수 있는 계측기를 형성할 수 있다. 자기온도 제한적 성질이란 PTC 서미스터에 일정 전압이 가해질 때 특정온도 이하에서는 저항변화가 정지되어 센서 온도의 변화 범위를 제한할 수 있는 것을 말한다.

본 연구에서 사용한 유속계의 센서는 후막형태의 직사각형 단면의 형태로 제작된 PTC 서미스터이다.

기존의 후막을 사용한 센서는 직육면체 형상의 발열부와 비전도부를 가지고 있어서 각진 모서리 부근에서 흐름의 박리로 인한 불규칙적인 열전달로 측정 정확도가 떨어져 공조장치 이외의 분야에 적용하기가 어려웠다. 본 연구의 목적은 PTC 서미스터를 이용한 유속계의 유속 계측 정확도를 높여 공조장치용 유속계뿐만 아니라 도시가스 및 소각로 유속 계측, 더 나아가 반도체 제작공정이나 화학공정과 같은 고정밀 계측을 요하는 곳에 사용될 수 있는 유속계로 성능을 개선시키는 것이다. 현재 많이 사용되고있는 직육면체의 각진 모서리를 갖는 후막 형태의 센싱부 형상은 유체역학적인 측면에서 고려할 때 센서의 설치각도에 따라 정확도에 큰 영향을 줄 수 있음을 예상할 수 있으며, 이러한 센서 설치 민감도를 줄일 수 있는 방법으로 센서 형상 변화에 대한 연구를 수행하였다.

센서의 형상을 제안하기 위해서 사각관제형과 각진 모서리를 둥글게 한 라운드 처리를 한 모형에 대한 유동 및 열해석을 CFD-ACEA(CFD Research Corporation) 상용 프로그램을 사용하여 해석하였고, 기존 센서의 형상과 해석된 결과를 토대로 제작된 형상을 갖는 센서에 대한 성능실험을 수행하였다.

2. 이론 개요

2.1 정전압형 유속센서의 구동 원리

본 연구에서 사용한 정전압형 유속센서의 회로를 Fig. 1에 나타내었다. 정전압형 유속센서의 구동 원리는 PTC 프로브에 일정한 전압을 걸어준 상태에서 유속이 발생하여 센서의 열량이 대류 열전달에 의하여

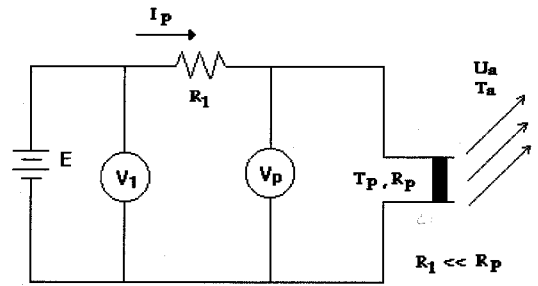


Fig. 1 Schematic diagram of constant-voltage circuit.

외부로 유출될 경우 손실된 에너지와 유속과의 관계를 통해 유속을 산출하게 된다.

2.2 CFD 이론 및 해석방법

2.2.1 지배방정식

유동해석을 위한 지배방정식은 다음과 같다.

연속방정식 :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

여기에서 u_j 는 속도벡터이고, ρ 는 유체의 밀도를 나타낸다.

운동량 방정식(Navier-Stokes 방정식) :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) \\ &= -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right. \\ & \quad \left. - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \right) + \rho f_i \end{aligned} \quad (2)$$

에너지 방정식 :

$$\begin{aligned} & (\rho H) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j H) \\ &= -\frac{\partial q_j}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial t} + u_j \frac{\partial p}{\partial x_j} \\ & + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j}(J_{ij} H_i) + S_a \end{aligned} \quad (3)$$

유동은 2차원, 정상상태, 비압축성 유동으로 가정하였으며, 열전달을 해석을 위하여 에너지 방정식을 해석하였다.

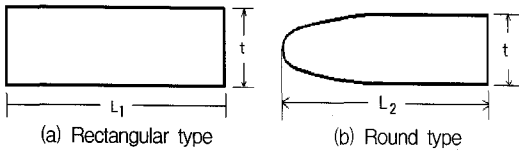


Fig. 2 Plan view of sensing element

2.2.2 격자 생성(grid generation) 및 경계 조건

센서의 형상과 설치 각도에 따른 유동장과 온도장의 차이를 해석하기 위해서 2차원 형상의 사각판재형(rectangular shape)과 사각판재형의 모서리를 둥글게 가공한 라운드형(round shape)의 형상에 정렬 격자를 사용하여 외부 격자를 형성하였으며, 센서의 실제 단면 형상은 Fig. 2에 도시하였다. 발열부의 상류에는 물체길이(L)의 5배, 하류 쪽으로는 50배로 하였고, 격자의 의존성을 파악하기 위해서 90×80개, 120×110개, 180×170개를 비교 시험하여 최종적으로 120×110개의 격자를 사용한 결과를 이용하였다.

센서표면에는 등온경계조건, 입구에는 고정 속도조건, 출구에는 고정 압력조건을 각각 사용하였다. 유체가 유입되는 좌측면을 입구(inlet)로 정했으며, 윗면과 아래면, 우측면을 출구(outlet)로 정하였다. 유동방향의 폭과 최고유속(15 m/s)을 기준으로 한 레이놀즈수는 $Re=4.47 \times 10^5$ 로 외부유동의 층류와 난류 기준 레이놀즈수가 10^5 로 볼 때 유동장을 충분히 층류라고 가정할 수 있다.

수치해석을 위해서 경계밀착좌표계(body fitted coordinates)를 사용하였고, 압력항과 속도항의 결합은 SIMPLEC 알고리즘을 이용하였다. 또한 대류항의 이산화에는 second-order upwind scheme을 이용하였다.

3. 실험

3.1 실험장치 및 방법

유속계의 데이터를 보정하고 형상과 회전 각도에 따른 센서의 특성을 파악하기 위해서 다음과 같은 방법을 사용하였다. 유속 측정의 기준으로 피토폴을 사용하였고, 피토폴과 유속센서를 500 mm이상 떨어지게 설치하여 서로 간섭을 주지 않도록 하였다. 신호조정기와 센서 세트는 유동 상류에 설치하였고, 센서 가이드는 사각판재형과 라운드 처리를 한 모형을 번갈아가둘 수 있도록 제작하였다.

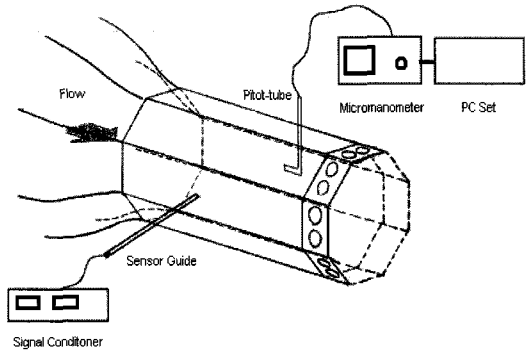


Fig. 3 Schematic diagram of experimental arrangements

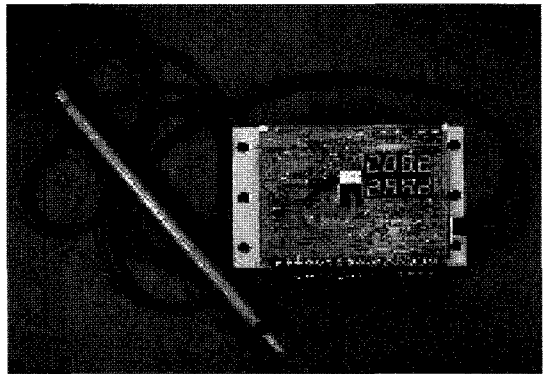


Fig. 4 Picture of an anemometer using PTC

각각의 형상에 대한 보정은 개별적으로 수행하였으며 데이터를 롬에 이식시킨 후 센서와 롬을 동시에 교체하는 방식을 사용하였다.

실험에 사용된 차압계(micromanometer)는 영국 Furness사의 제품으로 0~19.99 mmAq의 미압 측정용이다. 차압계의 교정에는 한국표준과학연구원의 압력표준기인 액주형 압력계(U-tube manometer)가 사용되었으며, 압력표준기의 불확실도는 지시값의 0.02%이다.

차압계에서 얻어진 압력은 전압신호로 바뀌어 컴퓨터에 장착된 데이터 획득 보드를 통하여 PC에 저장되고 Sampling 및 통계처리 되었다.

Fig. 3은 실험에 사용된 피토폴, 정밀 차압계와 데이터 처리를 위한 PC Set의 개략도이며, Fig. 4는 신호조정기(signal conditioner), 센서, 센서가이드, 케이블의 실물 사진이다.

3.2 데이터 보정

풍동내에 피토폴의 정체점과 일치하는 지점에 프로

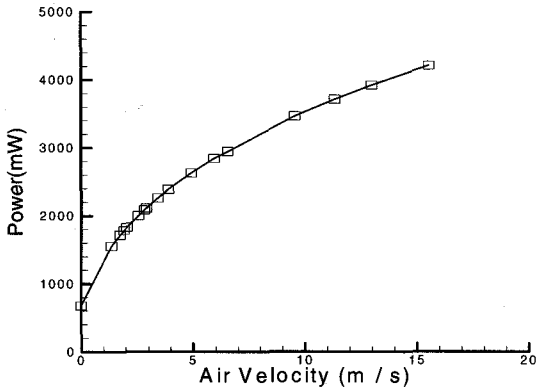


Fig. 5 Characteristic line of an anemometer

브를 설치한 후 피토판의 유속과 유속계에서 소비된 전력을 기록하였다. 소비전력은 Fig. 1의 회로에서 $V_p I_p$ 값이며, 소비전력과 유속과의 관계는 Fig. 5와 같다.

본 연구에서 사용된 유속 산출 방법은 기존의 열식 센서가 사용하는 유속과 전력과의 관계식을 도출하여 유속을 산출하는 방법을 사용하지 않고, 피토판에서 측정된 유속과 유속계에서 소비된 전력을 테이블화하여 프로그램에 입력시켜 놓은 다음, 임의의 풍속 하에 소비된 전력을 산출하고 이론적으로 구해진 0°C와 50°C에서의 데이터를 이용하여 온도보상과 더불어 유속을 산출하는 방법을 사용하였다. 속도 보정시 저속대에 많은 데이터 점이 존재하는 이유는 4m/s 이하의 특성 곡선이 비선형성을 나타내므로 데이터 간격이 넓다면 선형 보간만으로는 올바른 유속을 예측할 수 없기 때문이다. 반대로 고속의 영역에서는 선형성이 강하게 나타나기 때문에 적은 데이터만으로도 보간에 의한 유속 산출이 가능하다.

4. 결 과

4.1 CFD 해석 결과와 실험 값의 비교

PTC 서미스터를 이용한 유속계의 보정시에 센서를 유동장과 평행하게 놓고 보정을 수행하였으나, 센서 가이드를 설치할 때 센서가 유동장과 정확한 평행이 이루어지지 못하면 열전달의 변화에 의해 열손실의 차이를 보이게 되어 유속 지시값이 실제와 다르게 나타나게 된다. 그러나 기존의 사각판재형 센서가 유동의 평행선과 $\pm 3^\circ$ 이내에 위치할 경우 기준 피토판의 유속치에서 크게 벗어나지 않기 때문에 센서의 회전 허용범위를 최대 $\pm 3^\circ$ 이내로 하였다.⁽⁵⁾

유속을 측정하는 곳의 유동의 흐름의 방향을 예측할 수 있다면 오차의 양을 줄일 수 있으나 유동성분들이 불규칙적으로 변하거나, 또는 유동장 형태의 예측이 불가능한 곳에서의 설치하는 허용각의 범위가 넓을수록 유리하며 동시에 유속측정의 정밀도를 높일 수 있을 것이다. 사각판재형 센서의 앞면 모서리에 곡률을 주어 모서리에서 발생할 수 있는 유동박리와 같은 불규칙적인 유동현상을 줄이고, 입사각이 변함에 따라 대류로 인한 열손실량의 차이를 감소시킴으로써 센서 설치시 유동 입사각에 둔감한 형상을 제안하게 되었다.

수치해석 모델에 있어서도 전술한 바와 마찬가지로 사각판재형과 모서리에 라운드 처리를 한 모형의 두 가지를 선정하였다. 속도의 변화에 따른 특성을 파악하기 위해서 센서가 고정되어 있는 상태에서 1.87 m/s, 7.35 m/s, 15.11 m/s의 세가지 기준속도에 대해서 해석을 수행하였다. 각 유속에서 입사각을 $1^\circ \sim 15^\circ$ 까지 1° 씩 변화시켜가면서 입사각의 변화에 따른 열손실량의 변화량을 알아보았다.

실험에서는 각각의 경우에 대한 조건에서 센서의 각도를 3° 씩 회전시켜 가면서 신호조정기에서 나오는 출력을 기록하고 0° 에서의 열량으로 무차원한 값을 산출하여 수치해석 결과와 비교한 것을 Fig. 6의 (a), (b), (c)에 나타내었다.

Fig. 6의 (a)에서 볼 수 있듯이 저속에서는 센서의 형상변화에 따라서 입사각의 변화에 따른 열손실량이 크게 변하지 않음을 알 수 있다. 따라서 저속일때는 센서형상의 변화가 큰 의미를 갖지 못한다. 그러나 Fig. 6의 (b)에서 보이는 바와 같이 유속이 증가함에 따라서 점차적으로 사각판재형의 열손실량이 라운드형에 비해서 크게 감소함을 보여준다. Fig. 6의 (c)에서는 유속계의 최고속도에서의 입사각 변화에 따른 열손실량을 비교한 것으로, Fig. 6의 (b)와 비슷한 경향을 보이지만 열감소가 커짐을 알 수 있다. 따라서 저속일 때를 제외하고 유속의 증가에 따라서 센서의 입사각의 변화에 따른 유속 지시값에 차이가 있을 수 있음을 확인할 수 있다.

사각판재형 센서의 앞면 모서리에 곡률을 줌으로써 센서 주위의 유동을 안정시켜 센서에서 유동장으로의 열손실이 감소되었고 입사 각도변화에 따른 열손실량은 라운드 처리를 한 모형의 경우보다 사각판재형의 경우 입사각이 증가함에 따라서 구배가 커짐을 알 수 있다. 여기서 열손실량은 0° 에서의 열량값을 기준 값으로 정해서 무차원화 (Q/Q_0) 시켰다.

라운드형의 경우 사각판재형보다 열손실량이 감소한 것을 고려할 때 설치 허용각이 3°에서 9°정도까지 증가함을 알 수 있다.

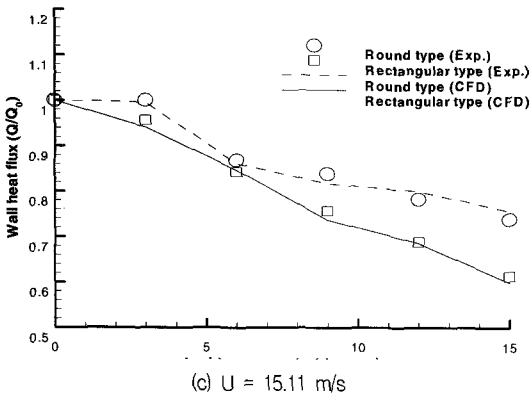
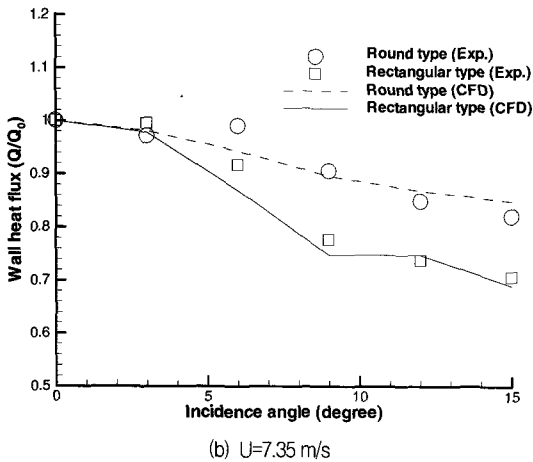
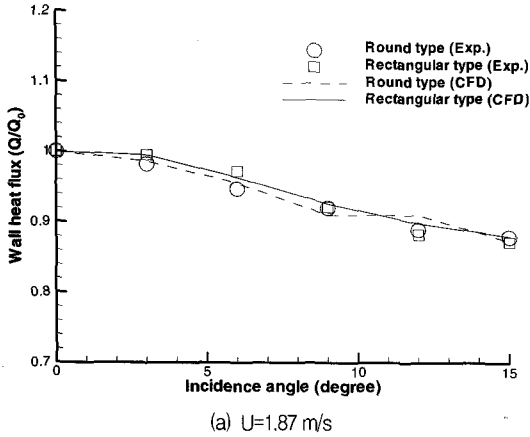


Fig. 6 Wall heat flux along the incidence angle variation

4.2 단면 형상 변화에 따른 유속의 난동

본 연구에 사용된 사각판재형 센서를 갖는 유속계는 일정유속에서 지시값이 심하게 난동하는 현상을 보였다. 이것은 bluff body에 흔히 나타나는 물체 윗면에서의 유동박리나 물체 후면의 순환영역이 불규칙적인 열손실을 가져와서 나타나는 현상으로 볼 수 있다.⁽⁶⁾

사각판재형과 라운드형 센서의 시간별 오차를 Fig. 7에 나타내었다. 데이터는 3번의 반복 실험을 통한 평균값을 이용하였다.

사각판재형 센서의 오차인 Fig. 7(a)은 최대오차가 $\pm 3\%$ 이고 센서에 라운드를 주었을 경우 Fig. 7의 (b)에서 보이는 바와 같이 $\pm 1\%$ 로 오차가 약 2%정도 감소하였다. 계측기의 전체적인 오차 요인이 지시값의 난동에만 존재한다고는 볼 수는 없으나 형상의 변화에 따라서 지시값의 오차가 현저히 감소시킬 수 있음을 볼 수 있다. 그러나 일정한 유속에서 지시값의 계속적인

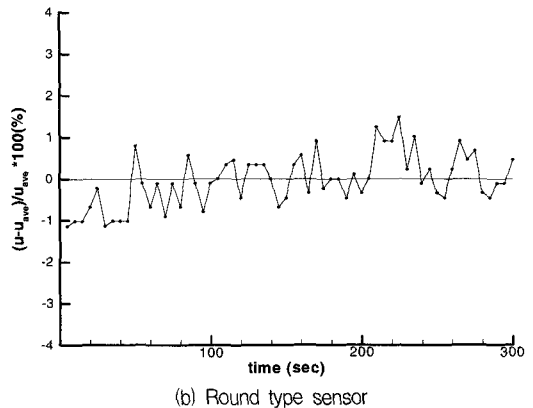
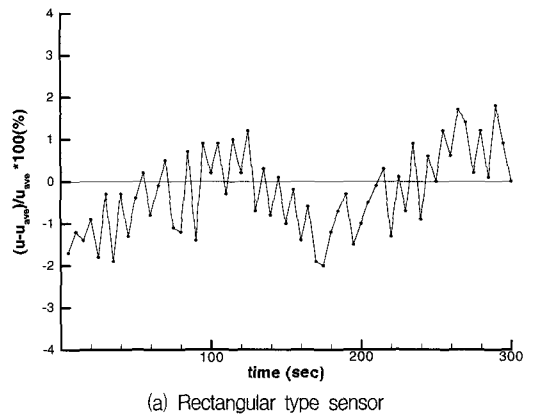


Fig. 7 Reading errors of the velocity ($U=6.23$ m/s)

변화는 계측기의 성능을 저하시키는 요인으로 작용하기 때문에 형상변화에 따른 성능향상과 더불어 시스템 전체를 구성하는 요소에 대한 고찰로 이 현상은 더욱 개선의 여지가 있을 것으로 사료된다.

시계열 데이터를 획득하는 방법으로는 위에서 언급된 온라인 데이터 획득 방법에 의해서 신호조정기에서 나오는 0~10 V의 전압신호가 터미널 보드를 통해서 PC에 장착된 데이터 획득 보드를 통해서 들어와 초당 30개의 데이터가 축적되고 이것이 2초마다 평균되어 300초간 저장된다.

4.3 각도 변화에 따른 각 형상의 성능비교

수치해석 데이터와 실험 데이터의 비교를 통해서 얻어진 결과를 토대로 유동장 내에서 각 단면 형상에 따라 센서의 설치각에 따른 유속계의 성능을 비교하기 위해서 0°~12°까지 3° 간격으로 출력값을 기록하였다. 설치각은 Fig. 8에 나타난 바와 같이 유속 방향과 프로브가 일치하는 방향을 0°로 정하였다.

Fig. 9(a)는 피토프관의 유속과 보정된 두 가지 형상의 유속계의 유속이 거의 일치함을 보여주고 있다. 두 가지 유속계 모두 허용 오차범위 F.S.의 ±2% 안에 들고 있다.

Fig. 9(b)에서 유속 4m/s 이하에서는 각각의 유속 지시값이 서로 큰 차이를 보이고 있지 않다. 이는 저속대에서 유동박리 등에 의한 불규칙한 유동현상이 열손실량의 변화에 큰 영향을 주지 못하는 것으로 판단된다. 그러나 유속이 증가함에 따라 사각판제형과 라운드형 센서를 비교해 볼 때 사각판제형의 경우 최고속도에서 오차가 F.S.의 2%안에 들므로 3°까지는 설치각의 허용이 가능하다고 볼 수 있다. 그러나 Fig. 9(c)에서 보면 설치각도가 6°일 경우 오차가 F.S.의 5%로 허용오차범위(F.S.의 2%)를 넘어서는 값을 보이고 있다. 이 현상은 위의 수치해석과 실험결과와의 비교에서도 나타났듯이 유속이 증가함에 따라 형상변화에 따른 열손실량의 차이에 의하여 나타나는 현상임을 알 수 있다. 이러한 현상은 설치각도가 증가할수록 두드러지게 나타남을 Fig. 9(d), (e)에서 볼 수 있다. 또한 Fig. 9(d), (e)에서 라운드 처리를 한 모형이 설치각 9°까지 허용 오차 범위 내에 있지만 12°에서는 최대 5%로 허용오차 범위 밖에 있음을 알 수 있다. 따라서 라운드 처리를 한 모형은 9° 미만의 설치각의 허용이 가능하다고 볼 수 있다.

결과적으로 라운드 처리를 한 모형의 경우 센서 전

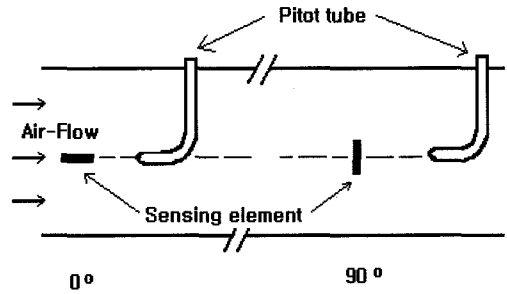


Fig. 8 Setting angle of the sensing element

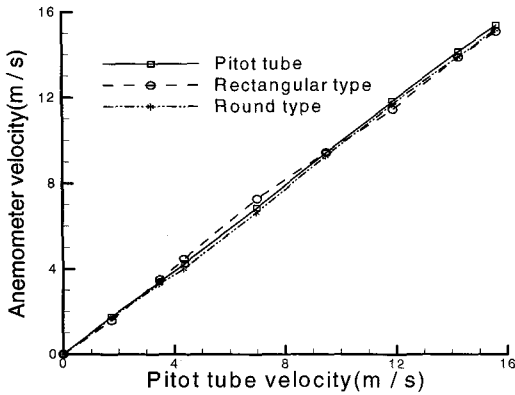
단부에서의 유동이 박리현상, 재순환 영역의 존재 등에 의한 유동의 불안정성이 감소하여 사각판제형과는 달리 각도변화에 민감하지 않아 안정적인 열전달이 이루어진다고 볼 수 있다. 센서의 후단부에서는 다소 불안정성의 가능성이 있으나, 결과로 미루어보아 출력에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 볼 수 있다.

유동장 내부에 포함되는 유속 센서의 가장 이상적인 형상은 전단부와 후단부의 모든 표면에서 고르게 안정적인 유동 상태를 제공하는 익형과 같은 형상으로 볼 수 있겠으나, 이는 보다 정밀한 제작 공정을 요구하며, 동시에 단가 상승의 우려가 있으므로 저가의 정밀 가공이 뒷받침되는 최적의 센서 형상을 위한 연구가 진행되어야 할 것이다.

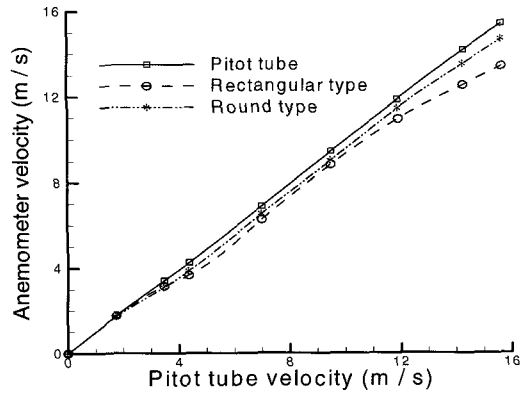
6. 결론

본 연구의 목적은 PTC 서미스터를 센서로 채택한 공조용 유속계의 성능향상에 있다. 사각판제형 센서의 경우 시계열 유속 측정치의 변화폭이 컸으며 설치각도에 따라 허용오차를 초과하는 현상을 보였으나, 본 연구에서 제안한 라운드형 센서의 경우 상기 단점들이 향상된 결과를 얻었으며, 요약하면 다음과 같다.

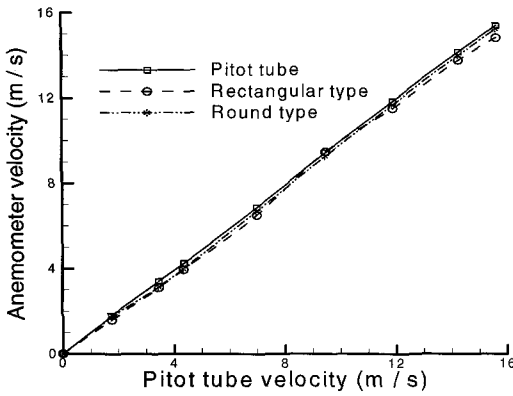
- (1) 센서의 회전에 따른 유속 측정치의 비교를 통해서 센서의 형상이 유속계의 전체 성능에 크게 영향을 주는 것을 확인하였다.
- (2) 사각판제형 센서에 비해 라운드형 센서의 시계열 데이터는 2%의 오차 감소를 보였다.
- (3) 센서의 회전각도에 따른 유속 측정치를 비교해 볼 때 사각판제형의 경우 유동장과 ±3° 이내의 평행을 유지해야 하나, 라운드형 센서의 경우 허용 범위가 ±9° 까지 확장되므로 센서 설치의 용이성이 향상되었다.



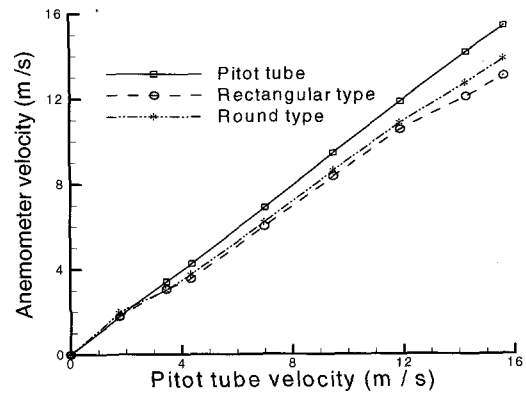
(a) setting angle 0(deg)



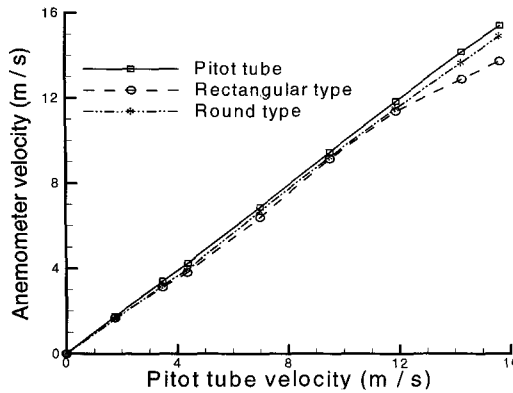
(d) setting angle 9(deg)



(b) setting angle 3(deg)



(e) setting angle 12(deg)



(c) setting angle 6(deg)

Fig. 9 Comparisons of experimental results according to the setting angle

후 기

본 연구는 한국과학재단 '99 국산연구기기 활용과제 지원에 의해서 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Dolenc, John W., 1996, Choose the Right Flow Meter Chemical Engineering Progress.
- (2) World Flow sensor market, 1996, Frost & Sullivan.
- (3) VAV용 공기 유량 센서 개발, 1997, 96-G-J-0009, 한국생산기술연구원.
- (4) Kovacs, Gregory T. A., 1998, Micromachined transducers, McGraw-Hill Co.
- (5) 배성관, 1997, 공조 장치를 위한 저가의 풍속 센서 개발, 고려대학교 석사학위논문.
- (6) Schlichting, H., 1979, Boundary-Layer Theory, 7th ed, McGraw-Hill Co.