

위상측정방식을 이용한 3차원 초음파 풍향풍속계의 특성분석

박도현 · 예윤해†

Characterization of three-dimensional ultrasonic anemometer using phase measurement

Do Hyun Park and Yunhae Yeh†

Abstract

Ultrasonic anemometers using pulse envelope detection-based method are standard instruments in most meteorological studies. In this paper, a new phase measurement method is tried to achieve the enhanced resolution without changing dimensions. The measurement sensitivity, dynamic range, and measurement speed of the new instrument are 0.2 mm/s, 13.3 m/s, and 13 measurements/sec, respectively. A graphic user interface is added to show the velocity and direction of the wind with the speed of sound and temperature of the wind in the 3 dimensional space. The new anemometer could be useful for the measurement of the air speed, the flow of fluids, and even air flow inside the downtown buildings.

Key Words : anemometer, ultrasonic, 3D

1. 서 론

초음파식 풍향풍속계가 컵형 풍속계와 프로펠러형 풍속계를 대체하고 있다^[1]. 초음파식 풍향풍속계는 움직이는 부품을 사용하지 않아 재교정(recalibration)이 필요 없는 전자식 계기로서 고속/정밀 측정이 가능하고, 경로별로 풍속을 독립적으로 측정할 수 있으므로 여러 경로의 풍속을 동시에 측정하여 3차원 풍속벡터를 구할 수 있는 장점도 있다.

초음파식 풍속계는 풍향과 풍속, 그리고 온도까지 측정할 수 있으므로 온도까지 고려할 필요가 있는 유량의 측정에 적용이 가능하며, 고층 빌딩 또는 공동주택의 밀집화가 급속도로 진행되면서 주거환경 평가요소로 자리매김한 공기흐름 평가의 도구로도 이용되고 있다.

초음파식 풍속계는 고정된 초음파 센서사이의 펄스 전송시간을 측정하여 풍속을 계산한다. 초음파의 전달 속도는 대기환경의 변화에 민감하며, 따라서 풍속을 정확하게 측정하기 위해서는 대기조건의 변화를 보상해

주어야 한다. 대기환경에 따른 음속 변화를 보상하는 방법으로는 서로 반대방향으로의 전송 시간을 측정하고 그 차이를 이용하는 방법이 사용된다.

대기조건에 따른 음속변화를 보상하기 위해서 처음에는 측정경로당 두 쌍의 초음파 센서를 사용하여 펄스열 형태의 초음파를 서로 반대방향으로 보내고 수신 센서에 도달하기까지의 전송 시간을 독립적으로 측정하는 방식이 사용되었다^[1]. 이 방식은 이후 서로 마주 보고 있는 한 쌍의 송수신센서를 이용하여 동시에 송신 펄스열을 발생시키고, 이들 펄스가 상대측 송수신센서에 도달한 시간을 측정하는 방식으로 대체되었다^[2,3]. 이들 방식에서는 펄스열의 포락선(envelope)을 검출하고 이의 피크위치로부터 도달시간을 측정한다. 따라서 특정 초음파 센서에서의 송신펄스열 당 1회의 풍속측정이 가능하다.

유체의 속도 측정에 대한 국내 연구로는 써미스터형과 열전형 유량/유속센서가 학계에 보고된 적이 있으나^[4,5] 초음파식 유량/유속계 또는 풍속풍향계에 대한 연구는 아직까지 알려진 바 없다.

본 연구에서는 서로 마주보게 배치한 한 쌍의 송수신센서를 시분할하여 송신센서와 수신센서로 동작시켰다가 수신센서와 송신센서로 동작시키는 것을 반복하면서 수신된 펄스열의 포락선을 검출하는 대신 송신과

경희대학교 전자정보대학 레이저 공학 연구소 (School of Electronics and Information, Institute for Laser Engineering, Kyung Hee University)

†Corresponding author: yhyh@khu.ac.kr

(Received : June 19, 2006, Accepted : September 26, 2006)

와 수신과 간 위상측정을 행하는 초음파식 풍속계에 대한 연구결과를 기술하였다. 기존 방식에서 펄스열의 포락선을 검출하는 신호처리 방식 대신 송신파와 수신과 간 위상측정을 통해 펄스도달시간을 측정함으로써 송신펄스열 당 수백 회의 풍속측정이 가능케 하였다. 따라서 측정 결과를 평균함으로써 기존 방식에 비해 분해능을 개선할 수도 있으며, 기존 방식의 풍속계와 분해능을 같게 유지하면서 대신 풍향풍속계의 크기를 줄이는 것도 가능하였다. 그리고 X, Y, Z축 방향으로 배열된 6개의 초음파 센서를 활용하여 대기조건의 영향이 보상된 3차원 풍속벡터 및 대기온도를 측정하는 초음파식 풍향풍속계를 구성하였으며, 그 특성을 평가하였다.

2. 측정 이론

2.1. 풍속측정이론

초음파식 풍향풍속계에서 풍속 측정은 초음파 송수신기 사이의 공기흐름에 의한 초음파의 도달시간 측정에 기본을 두고 있다.

그림 1은 풍속측정을 위한 두 쌍의 송수신 센서(R: 수신센서, T: 송신센서)와 송수신 경로를 나타낸 것이다.

송수신 센서 사이간격을 L , 초음파 펄스경로와 평행한 방향의 풍속성분을 u_p 라고 할 때 펄스도달시간 t_1 , t_2 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$t_1 = \frac{L}{(v_s + u_p)} \tag{1}$$

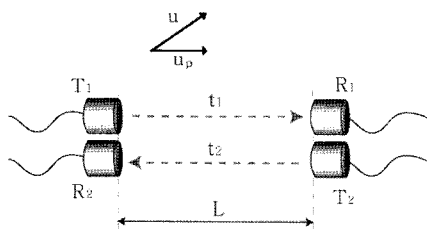


그림 1. 풍속 측정의 원리도. 송신센서(T_1, T_2)와 수신센서(R_1, R_2)가 간격 L 을 두고 마주보도록 배치되어 있다. 그리고 $t_1(t_2)$ 는 오른쪽(왼쪽) 방향으로의 도달 시간이며, u 와 u_p 는 각각 풍속벡터, 센서와 평행한 풍속성분을 나타낸다

Fig. 1. Principle of wind-speed measurement. Transmitters (T_1, T_2) and receivers (R_1, R_2) stand opposite to each other at interval L . $t_1(t_2)$ is the travel time in righthand (lefthand) direction. u and u_p are the wind velocity vector and its parallel component to the sensor.

$$t_2 = \frac{L}{(v_s - u_p)} \tag{2}$$

음속 v_s 는 온도, 습도 등의 대기환경에 크게 영향을 받는 값으로 대기압 1000 hPa, 대기온도 T °C 조건에서 음속 v_s 는

$$v_s \approx 331.42 + 0.6T \tag{3}$$

이다[6].

대기환경에 의한 오차요인을 없애기 위해 음속 v_s 를 소거하고 u_p 에 대해서 정리하면 다음과 같은 식으로 정리할 수 있다.

$$u_p = \frac{L}{2} \left(\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right) \tag{4}$$

식(4)에서 알 수 있는 바와 같이 초음파 펄스경로와 평행한 풍속성분 u_p 는 펄스도달시간 t_1, t_2 의 측정을 통해서 계산할 수 있다.

그림 2는 풍속측정 때 송수신 신호의 파형과 위상 관계를 보인 것으로, 아래 파형은 수신센서의 출력신호, 위 파형은 송신센서 구동 신호이다. 풍속을 측정하기 위해서는 펄스도달시간을 정확하게 측정하여야 하는데 한 개의 초음파 센서를 시분할하여 번갈아가며 송신센서와 수신센서로 기능을 바꿀 때 초음파 수신센서의 반응속도가 느리기 때문에 그림 2에서 보는 바와 같이 펄스도달시간 t_1 을 정확하게 직접 측정하는 것이 쉽지 않다. 본 연구에서는 정확한 펄스도달시간을 산출하기

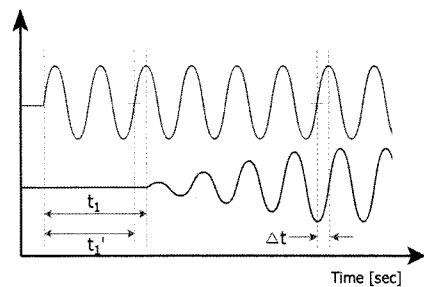


그림 2. 초음파 수신기의 응답특성: (위) 송신센서 구동 펄스열, (아래) 송신센서 출력에 대한 수신기의 출력. 수신센서의 응답지연과 송수신 센서간 거리에 의한 펄스지연시간 t_1 은 수신파형의 크기가 회복된 후 측정된 위상지연 t 로부터 계산된다

Fig. 2. Response of the ultrasonic receiver: (top) driving pulse train for the transmitter, (bottom) output of the receiver to the output of transmitter. Time delay, t_1 is calculated by measuring phase delay t , which is measured when the signal is recovered to its full strength.

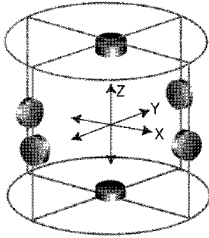


그림 3. 센서배치도. 풍속의 3차원 측정을 위해 6개의 초음파 센서가 사용된다

Fig. 3. Diagram of sensor arrangement. Six ultrasonic sensors are used to measure 3D wind velocity.

위해서 수신신호의 진폭이 일정하게 유지 될 때까지 기다렸다가 송신 신호와의 위상차 Δt 를 측정하였으며, 펄스도달시간 t_1 은 식(5)로 계산하였다.

$$t_1 = t_i + \Delta t \quad (5)$$

식(5)로 계산된 펄스도달시간에는 회로에서의 지연을 포함하고 있으며, 유사한 크기의 지연시간이 t_2 에 포함된다. 회로에서 지연시간은 t_1 과 t_2 에 비해 무시할 수 있을 정도이므로 송신센서와 수신센서의 기능을 전환하면서 측정된 t_1 과 t_2 값을 식(4)에 적용함으로써 제거할 수 있다.

2.2. 풍향풍속의 3차원 측정

그림 3은 3차원 풍속벡터 측정을 위한 초음파 센서의 배치를 나타낸 것으로 X, Y, Z축 방향의 경로에 각각 2개씩, 총 6개의 송수신 센서를 배치한 3차원 풍향 풍속계를 위한 센서배치도를 보인 것이다. 3차원 풍속 벡터는 이들 3축 방향 풍속성분의 벡터 합이므로 총 6 방향의 펄스 도달시간 측정을 통해서 대기조건의 영향을 배제한 3차원 풍속벡터를 계산할 수 있다.

초음파 센서와 이들을 지탱하기 위한 지지대는 바람에 장애요인이 되므로 이들의 부하효과를 최소화하기 위해 가능한 한 크기가 작은 센서와 지지대를 사용할 필요가 있다. 그러나 초음파 센서의 수신감도는 일반적으로 센서 크기에 반비례하므로 센서의 크기를 줄이는 데에도 한계가 있다. 따라서 센서배치에 의한 측정오차를 배제된 정확한 풍속/풍향계를 위해서는 제작된 풍속계에 대해 측정각도에 따른 풍속측정오차를 측정하고 이를 보상하는 것이 필요하다.

3. 풍향측정시스템의 구현

그림 4는 센서간의 간격 L 이 10 cm이고, 초음파의

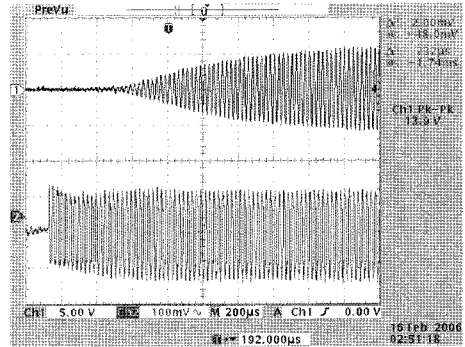


그림 4. 수신 신호 파형(위)과 송신센서 구동신호(아래). 수신신호는 센서의 응답지연 때문에 진폭이 서서히 증가한다

Fig. 4. Waveform of received signal (top) and driving signal (bottom) for transmitter. Receiver output grows slowly due to the response time of the receiver.

주파수가 40 kHz일 때 수신센서의 출력을 송신센서의 구동신호와 비교해 보인 것으로, 아래 파형은 송신센서에 인가된 구동신호이며, 위 파형은 수신센서의 출력 신호이다. 그림에서 송신센서의 구동신호는 3차원 풍속계를 이루는 총 6개의 센서를 번갈아 가면서 구동하기 때문에 펄스열 형태이며, 이때 수신센서의 출력은 센서의 응답시간 때문에 서서히 크기가 증가하여 일정 시간이 경과한 후에야 정상 출력에 도달하는 것을 확인할 수 있다.

풍향측정 시스템의 구성에는 공진주파수가 40 ± 5 kHz, 감도 -83 dB, 방사각 90°인 방수형 초음파 센서(센서텍(주), model ST-203L) 6개를 사용하였다.

3.1. 하드웨어 구성

풍속측정 시스템은 그림 5와 같이 센서부(왼쪽 위), 측정회로부(하단 중앙), 그리고 측정데이터를 그래픽으로 보이기 위한 PC(하단 오른쪽)로 구성되었으며, 그림 6은 측정회로부의 블록도를 보인 것이다.

그림 6은 측정회로부의 블록구성을 그림으로 보인 것으로 회로를 단순화함과 동시에 3차원 풍속측정을 위한 모든 초음파 경로에 대한 회로 조건을 동일하게 하기 위해 아날로그 멀티플렉서를 이용하여 한 개의 송신회로와 수신회로를 공유하도록 설계하였다.

따라서 송신회로의 출력은 아날로그 멀티플렉서를 통하여 6개의 센서에 순차적으로 인가되며, 각 송신센서와 쌍을 이루는 수신센서의 출력은 또 다른 아날로그 멀티플렉서를 통하여 순차적으로 수신회로에 인가된다.

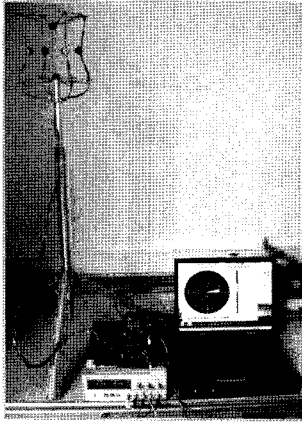


그림 5. 풍속측정 시스템의 사진. 노트북 PC의 왼쪽에 신호처리회로가 있다

Fig. 5. Photograph of the anemometer system. Signal processing electronics is shown in the left to the notebook PC.

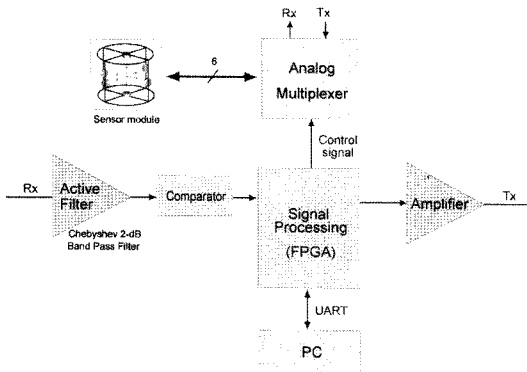


그림 6. 신호처리회로부의 블록구성
Fig. 6. Block diagram for the signal processing electronics.

아날로그 멀티플렉서는 빠른 스위칭 동작을 위해 반도체식 아날로그 스위치를 사용하였으며, 송신센서의 구동신호와 수신센서의 출력은 크기에 있어 50 dB 이상 차이가 나므로 수신신호 처리부의 설계에서는 혼신(crosstalk)을 줄이는데 최대한 노력하였다.

그림 6에서 FPGA 블록은 시분할을 위한 스위칭 신호를 발생하고, PC인터페이스, 펄스전송시간 측정 등의 중심적인 역할을 담당한다. 수신회로는 미약한 센서 출력신호를 증폭하고 잡음을 최대한 배제한 정확한 센서 신호를 분리하기 위해 여러 단의 앰프와 필터(Active filter 블록)로 구성하였으며, 이를 통해 측정감도를 높이고자 하였다. 그림 7은 수신센서의 출력신호를 증폭 및 필터링을 거친 파형, 즉 비교기(comparator)의 입력

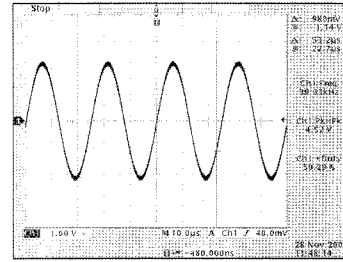
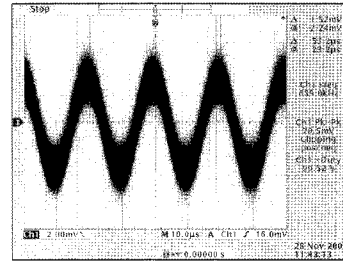


그림 7. 수신센서 출력(위)과 증폭기와 필터를 통과한 출력(아래)

Fig. 7. Output of the receiver vs. amplified-and-filtered output.

신호와 대비해 보인 것이다. 초음파 발생을 위한 송신센서의 구동신호를 피크간 전압이 5 V이하가 되도록 설계하여 전원회로를 간소화 하였으며, 측정시스템의 소비전력은 1 와트 이하로 제작하였다.

3.2. 시분할 위상측정 방식 풍속계

그림 8은 측정 회로 내부 신호의 타이밍도를 나타낸 것으로 3개의 컨트롤 신호(X axis, Y axis, Z axis)는 X, Y, Z축 상에 있는 센서와의 연결을 위한 컨트롤 신호를 나타내며, 이 컨트롤 신호와 또 다른 컨트롤 신호(Direction)에 의해서 센서의 송수신 방향이 결정된다. 즉, X방향/왼쪽, X방향/오른쪽방향, Y방향/왼쪽, Y방향/오른쪽방향, Z방향/왼쪽, Z방향/오른쪽방향의 순서를 따라 초음파가 발생하고 진행한다. 가운데 2개의 펄스열 파형은 X방향/왼쪽으로 진행하는 초음파를 위한 송신센서 구동펄스열과 수신펄스열을 보인 것이며, 하단의 펄스파형은 가운데 펄스열을 확대한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 측정경로마다의 풍속측정을 위한 경로당 12.4 ms를 할당하였다. 컨트롤 신호가 변하는 순간부터 일정시간동안 수신센서의 출력이 일정하지 않으므로(그림 4 참조) 이 기간을 포함하는 처음 약 6.2 ms 동안에는 아무런 동작을 수행하지 않도록 설계하였다. 대신 나머지 6.2 ms 동안 수신신호 (Rx signal)와 송신신호(Tx signal)의 위상차를 측정하였다. 주파

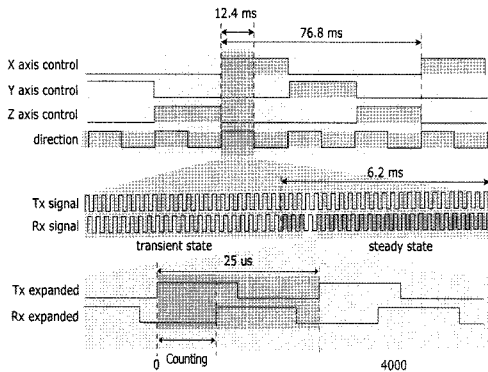


그림 8. 시분할방식을 위한 타이밍도. 12.4 ms 단위로 초음파가 x방향 왼쪽, x방향 오른쪽, y방향 앞쪽, y방향 뒷쪽, z방향 윗쪽, z방향 아래쪽으로 발사되며, 중간부분에는 12.4 ms 동안의 송신 신호와 수신 신호를 보인 것이다. 아랫부분의 파형은 중간부분의 파형을 확대해 보인 것이다

Fig. 8. Timing diagram for time-division multiplexing method. 12.4 ms duration ultrasonic pulse train is fired to left, right, front, back, upward, and downward in turn. Middle two traces show transmitted (Tx) and received (Rx) signal. The bottom two traces are the exploded view of the middle two.

수가 40 kHz인 초음파의 주기마다 한번씩 위상차를 측정하는 것을 가정할 때 6.2 ms 측정기간 동안 256번의 위상측정이 가능하다. 위상차는 카운터를 이용하여 송신신호의 상승에지와 수신신호의 상승에지 사이의 시간 간격을 측정하여 계산하였다.

그림 9는 시분할방식 위상 측정방식을 적용하기 위해 스위칭 동작을 수행할 때 수신센서의 출력파형을 보인 것으로 스위칭 직후 일정 시간동안 비정상적인 과도상태가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 큰 진폭으로 공진을 일으키던 송신센서가 수신센서로 전환될 때 송신구동신호의 여파로 인해 관측된 것으로 그림 4에서 언급한 현상과 복합적으로 나타나며, 지속 시간은 3 ms 이내이다. 따라서 처음 6.2 ms를 제외한 나머지 시간 동안의 출력을 이용하는 위상측정 방식을 적용하는 데에는 아무런 장애가 될 수 없다.

위상차를 측정하는 카운터 회로의 클럭주파수는 160 MHz를 사용하였으며, 따라서 주파수가 40 kHz인 초음파의 한 주기를 4000등분 할 수 있다. 따라서 공기의 온도가 섭씨 15도 이고, 센서사이의 간격이 10 cm인 풍향풍속계로 측정 가능한 최대 풍속은 13.3 m/s이며, 풍속측정의 분해능은 약 3.3×10^{-3} m/s이다. 측정의 분해능은 측정데이터의 평균값을 취하는 방법으로

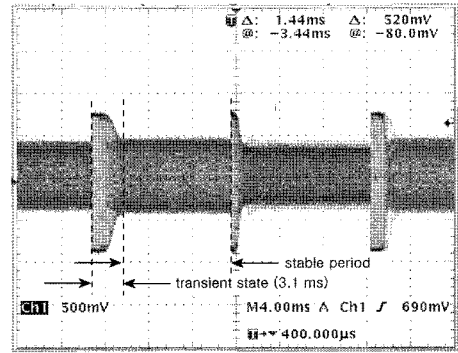


그림 9. 스위칭 동작 전후 동안 수신센서의 출력파형의 변화
Fig. 9. Transient output of the sensor during switching period.

높일 수 있다. 제작된 풍속계의 경우 12.4 ms동안 256번 측정이 가능하므로 특정 축 방향으로 초당 40회까지 풍속을 측정한다고 가정할 때 풍속측정의 분해능은 초속 0.2 mm까지 가능한 것으로 계산된다. 또한 측정 가능한 최대 풍속을 13.3 m/s보다 크게 하려면 센서간격 L 을 줄이거나, 초음파의 주파수를 낮추거나, 또는 한 주기 이상 위상지연이 발생한 경우에도 시간지연의 크기를 측정할 수 있도록 회로를 변경하는 방법을 사용할 수 있다.

제작된 3차원 풍향/풍속계는 측정경로당 12.4 ms의 시간을 소요하며, 따라서 3차원 풍속벡터의 측정속도는 초당 약 13회이고, 풍속의 측정감도는 12.4 ms동안 256회 측정치의 평균값을 이용하기 때문에 기존 풍향/풍속계에서 사용하는 펄스열 시간차 측정방식보다 16배 향상된 초속 0.2 mm이다. 또한 평균화 기능을 추가함으로써 풍속측정의 속도는 느려지는 대신 풍속측정의 분해능을 더 높이는 것도 가능하도록 하였다. 풍속측정의 분해능 향상이 필요하지 않을 경우에는 센서간격 L 을 줄여 소형 개인 휴대형 풍향풍속계로 제작할 수도 있다.

3.3. Graphic user interface (GUI)

측정회로부에서 측정된 3차원(3D) 풍속데이터는 USB (Universal Serial Bus) 포트를 통하여 개인용 컴퓨터(PC)로 전송되며, PC에서는 수집한 풍속데이터를 이용하여 3D 풍속벡터 및 음속, 초음파가 진행되는 매질의 온도, 방위각을 계산하여 그 결과를 그림 10과 같이 컴퓨터의 모니터에 보일 수 있도록 표시창을 설계하였다. 2차원 평면상의 풍속과 풍향은 그림 10에서 원내부의 막대의 길이와 방향으로 표시하였으며, 오른쪽 막대그래프는 2차원 평면에 수직인 방향으로의 풍

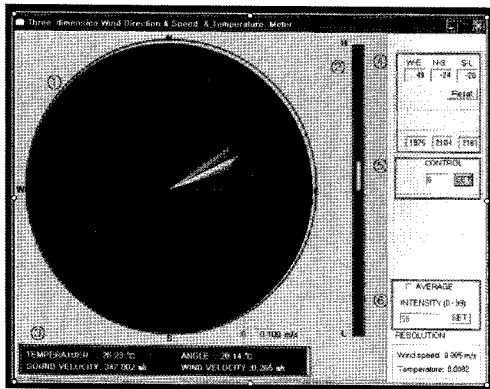


그림 10. 3차원 풍향/풍속계를 위한 표시창. 수평방향의 풍속/풍향은 원내부 막대의 길이와 방향으로 표시되며, 수직방향의 풍속과 풍향은 가운데 부분의 검은 막대내부 흰 막대의 길이와 아래 또는 위 방향으로 표시된다

Fig. 10. Display window for 3D anemometer. Direction and length of the white stick in the circle stands for the velocity and direction of the wind in the plane. Vertical parameters are to be shown by the white pole in the vertical bar in black color.

속과 풍향은 보이기 위한 것으로 각각 막대의 길이는 풍속의 크기를, 상하방향은 풍향을 나타낸 것이다. 마지막으로 하단에는 풍속의 측정값과 대기 온도를 숫자로 나타내 보였다.

3.4. 풍속측정실험

그림 11은 풍동 실험을 통하여 측정된 풍속을 보인 것이다. 이 실험에서 풍속은 5 m/s로 고정하였으며, 기준방향으로 설정한 X축 방향을 0°로 가정하여 5°씩 풍속계를 회전시키면서 측정된 풍속의 크기를 그림으로 보였다. 각 방향별 풍속측정 결과는 그림 11에서와 같이 4.3 m/s에서 5.0 m/s로 범위로 측정되었는데 풍향이 0도, 90도, 180도, 270도에서 측정오차가 가장 크게 나타났다. 이러한 오차는 풍향이 센서 축과 일치 할 때 센서를 지지하는 프레임과 센서에 의해 풍속의 흐름이 방해되기 때문에 발생된 것으로 이들의 부하효과가 상당히 크다는 것을 알 수 있다. 그림 11에서는 초음파 센서와 이를 지지하는 지지대의 배치에 따라 최대 15%의 측정오차가 측정되었으며, 따라서 센서배치에 따른 오차를 줄이기 위해 공기저항을 최소화하는 센서 구조를 개발하거나 구조에 따른 교정특성 곡선을 이용하여 교정을 행하여야 함을 알 수 있다.

그림 12는 그림 11의 결과를 방향에 따른 풍속교정 자료로 사용하여 교정된 풍향/풍속계를 가지고 그림

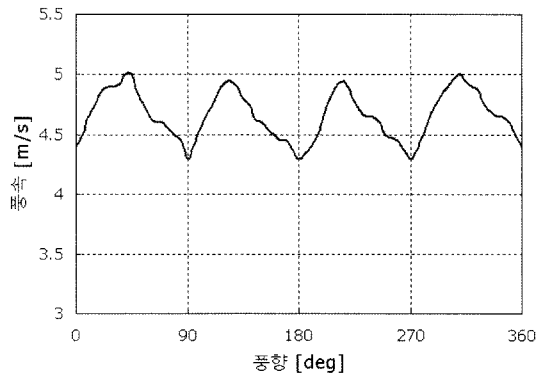


그림 11. 교정하지 않은 풍속계로 5 m/s의 풍속의 측정된 결과. 센서와 지지대가 바람에 큰 영향을 미치고 있다

Fig. 11. Measured value of wind speed by the new anemometer without calibration. Sensors and supporters block the wind.

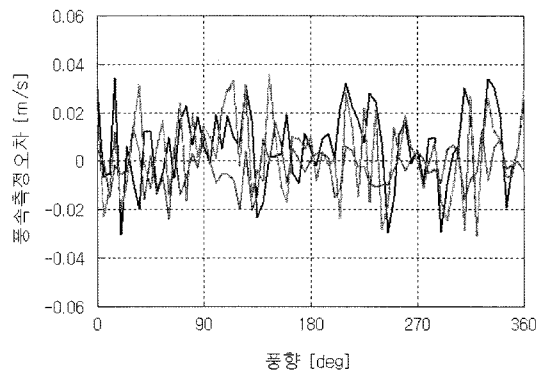


그림 12. 교정된 풍속계의 풍향에 따른 측정오차
Fig. 12. Direction-dependent measurement error of the calibrated anemometer.

11의 결과를 위한 실험을 반복하였을 때 방향에 따른 풍속측정 오차를 보인 것으로 측정오차의 표준편차는 0.02 m/s이하로 계산되었다. 풍속측정의 분해능은 0.2 mm/sec인 것으로 계산되었지만 사용된 풍동의 성능 한계 때문에 시도하지 않았으며, 온도변화에 따른 측정 결과의 변화는 풍동 풍속의 변화 보다 작아 관측할 수 없었다.

4. 결 론

한 쌍의 송신회로와 수신회로, 그리고 아날로그 멀티플렉스를 이용하여 6 방향의 풍속을 동일한 조건에서 측정할 수 있도록 구성함으로써 측정회로에서 발생

할 수 있는 오차를 제거하고, 회로의 효율성도 높은 위상측정방식 초음파 3차원 풍향풍속계를 제작하고, 성능을 평가하였다.

초음파 펄스열의 포락선을 검출하는 기존의 신호처리방식 대신 송신파와 수신파간 위상측정을 이용함으로써 풍속측정의 분해능은 기존의 방식과 동일한 조건에서 십배이상 개선된 0.2 mm/s로 계산되었으며, 최대 측정 풍속은 초속 13.3 m, 그리고 측정속도는 초당 13 회로 동작함을 확인하였다. 분해능과 최대측정가능 풍속의 평가실험은 풍동성능의 한계로 수행할 수 없었으며, 초음파 센서와 이를 지지하는 지지대의 배치 때문에 발생한 최대 15%의 측정오차를 교정특성 곡선을 이용하여 1% 이하로 줄일 수 있음을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] J. C. Kaimal, "Sonic anemometer measurement of

atmospheric turbulence", *Proceedings of the Dynamic Flow Conference*, pp. 551-565, 1978.

- [2] G. C. Aprilesi, G. De Cicco, and Taroni, "A micro-processor-based, three axes, ultrasonic anemometer", *Ultrasonics Symposium*, pp. 295-298, 1983.
- [3] A. Grelle and A. Lindroth, "Flow distortion by a solent sonic anemometer: Wind tunnel calibration and its assessment for flux measurement over forest and field", *AMS J. Atmos. Oceanic Technol.*, vol. 11, pp. 1529-1542, 1994.
- [4] 권혁주, 이용현, "PTC 써어미스터를 이용한 유속센서의 특성", *센서학회지*, 제3권, 제3호, pp. 1-8, 1994.
- [5] 이형주, 김진섭, 김여환, 이정희, 최용문, 박세일, "유전체 멤브레인 위에 제작된 크로멜/알루멜 열전 유량센서", *센서학회지*, 제12권, 제3호, pp. 103-111, 2003.
- [6] A. Cuerva and A. Sanz-Andres, "On sonic anemometer measurement theory", *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 88, pp. 25-55, 2000.



박도현

- 1980년 3월 1일생
- 2005년 2월 경희대학교 전자공학과 학사
- 2006년 9월-현재 동대학원 석사과정
- 주관심분야 : 광검류 센서 시스템, 전자 시스템

예윤해

- 『센서학회지 제6권 제2호』 p. 105 참조
- 현재 경희대학교 전자정보대학 교수