

<응용논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.3.325

현장용 교정 장치를 이용한 3-컵 풍속계의 교정 방법

전세종^{*†} · 이생희^{*} · 최용문^{*}

* 한국표준과학연구원 기반표준본부 유동음향센터

Calibration System for Three-Cup Anemometers

Sejong Chun^{*†}, Saeng Hee Lee^{*} and Yong Moon Choi^{*}

* Center for Fluid Flow and Acoustics Division of Physical Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science

(Received November 23, 2009 ; Revised January 25, 2010 ; Accepted January 25, 2010)

Key Words: Automatic Weather Measuring System(AWS, 자동기상관측장치), Calibration (교정), Cup Anemometer(컵형 풍속계), In-Situ Calibrator(InCA, 현장용 교정 장치)

초록: 3-컵 풍속계는 자동기상측정, 환경 모니터링, 풍력 발전에 필요한 풍속을 측정하기 위해 널리 사용되고 있다. 일반적으로 3-컵 풍속계의 회전부를 지지하는 베어링은 오염물질, 진동 또는 돌풍 등의 여러 요인에 의해 마모되기 쉽고, 이로 인해 풍속에 대한 출력 특성이 장기적으로 변한다. 따라서 3-컵 풍속계를 주기적으로 교정하여 풍속에 대한 출력 특성을 유지 및 관리해야 한다. 본 연구에서는 3-컵 풍속계가 설치된 현장에서 풍속계를 교정할 목적으로 제트 유동을 이용한 현장용 교정 장치를 제작하였다. 현장용 교정 장치가 3-컵 풍속계를 교정할 수 있는지 확인하기 위해, 현장용 교정 장치의 제트 유동 특성을 측정하였다. 현장용 교정 장치를 가지고 5 종류의 3-컵 풍속계들을 교정하였고, 풍동에서 3-컵 풍속계를 교정한 결과와 비교하였다.

Abstract: Three-cup anemometers are popular devices for measuring wind speeds in automated weather stations, environmental monitoring systems, and wind turbines. Cup anemometers usually suffer from lack of long-term stability owing to the wear of the bearing systems that support the rotational parts. The bearing systems are susceptible to external pollutants, vibrations, and gusts. Therefore, these anemometers have to be calibrated regularly to maintain the desired characteristics for measuring wind speed. In the present study, a new in-situ calibration system to help reduce cost and save time by calibrating the cup anemometers at the installation site is proposed. A portable in-situ calibrator was fabricated. After the characteristics of this calibrator were verified, it was used to calibrate cup anemometers. Some of the calibration results were compared with the data obtained by wind tunnel testing.

- 기호설명 -

- D : 노즐 직경 [mm]
- E : 전압 [V]
- U : 제트 유동의 흐름 방향 평균 유속 [m/s]
- $U_{r/D=0}$: 노즐 중심축 상의 풍속계 설치 위치에
서 측정된 흐름 방향 평균 유속 [m/s]
- $U_{x/D=0}$: 노즐 출구에서 측정된 평균 유속 [m/s]
- a_I : InCA에서 측정된 교정 곡선의 기울기
- a_W : 풍동에서 측정된 교정 곡선의 기울기
- c_0 : 2차 회귀 곡선의 상수항
- c_1 : 2차 회귀 곡선의 1차항 계수
- c_2 : 2차 회귀 곡선의 2차항 계수
- d : 회전컵 직경 [mm]

- f : 주파수 [Hz]
- r : 제트 유동의 반지름 방향 좌표 [mm]
- x : 제트 유동의 흐름 방향 좌표 [mm]
- u' : 제트 유동의 흐름 방향 유속 변동량 [m/s]

1. 서론

3-컵 풍속계는 기상 측정, 환경 모니터링, 풍력 발전기 운영에 필요한 풍속을 측정하기 위하여 사용된다. 3-컵 풍속계의 내부 구조는 단순하지만 베어링을 포함한 회전부를 가지고 있어서, 대기 오염 및 진동, 돌풍(gust) 등의 환경 변화에 의해 베어링이 마모되면 풍속계의 교정 계수에 대한 장기 안정도가 영향을 받는다. 따라서 유속계를

† Corresponding Author, sjchun@kriss.re.kr

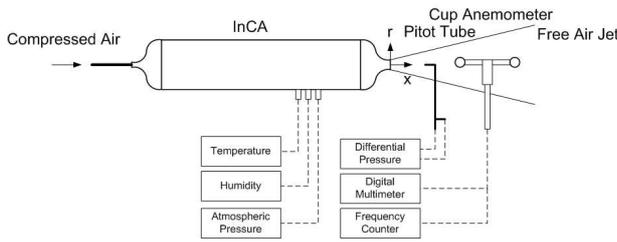


Fig. 1 In-situ calibrator (InCA)

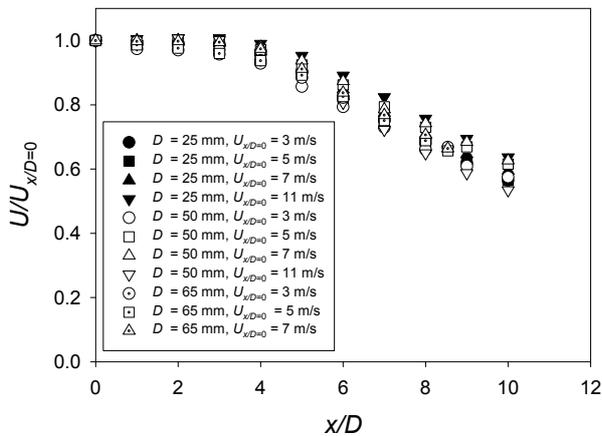


Fig. 2 Mean velocity in axial direction

설치하기 전에는 교정을 실시하고, 설치 이후에는 주기적으로 교정함으로써 3-컵 풍속계가 장기 안정도를 유지하는지를 검증해야 한다. 그러나 기상, 환경, 풍력 발전용 풍속계는 대부분 지면에서부터 높은 위치에 설치되어 있고 풍속계를 설치하거나 분리하는 일이 쉽지 않기 때문에 주기적으로 교정하는 데에 많은 어려움이 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 현장용 교정 장치(in-situ calibrator, 이하 InCA)를 이용하여 교정하는 방법을 제안하고자 한다. 기존의 교정 방법은 풍속계를 자동 기상 측정 장치(automatic weather measuring system, 이하 AWS)에서 분리한 다음, 풍속계를 교정 기관에 보내어 교정하므로 많은 시간과 비용이 든다. 그러나 InCA를 이용하면 풍속계 설치 지점에서 풍속계를 분리하여 교정한 다음 다시 AWS에 풍속계를 설치할 수 있으므로 풍속계의 운반에 소요되는 시간과 비용을 절감할 수 있다.

이러한 목적을 위하여 본 연구에서는 3-컵 풍속계의 현장용 교정 장치인 InCA를 제작하였고 그 특성을 연구하였다. InCA를 사용하여 풍속계의 교정 정확도를 유지하는 방법을 제안하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 현장용 교정 장치

Fig. 1에는 본 연구에서 제작한 InCA의 개략도를 나타냈다. InCA는 스테인리스 재질로 만들어진 실린더 모양의 장치로서 0 ~ 600 kPa 사이의 압축 공기를 사용하여 입구 유속이 0 ~ 15 m/s 인 자유 흐름 제트 유동을 발생하였다. 교정용 풍동을 이용한 풍속계 교정과는 달리, InCA에서 발생하는 제트 유동은 풍속계 회전컵의 일부분에만 분사되었다. 따라서 제트 유동의 속도 분포가 풍속계의 교정 곡선 기울기에 미치는 영향을 확인하기 위하여, 노즐 직경이 각각 25 mm, 50 mm, 65 mm인 ISA 노즐들을 설치하여 실험하였다.⁽¹⁾ 제트 유동장을 측정하기 위해 온도(Tempmaster 100), 습도(E+E31), 대기압(Digiquartz 745)을 측정하였고 밀도를 계산하였다. 유속을 측정하기 위해 L자형 피토관을 설치하였고 피토관 차압(MKS 670A)을 측정하였다.⁽²⁾ 3-컵 풍속계의 지시값은 주파수 또는 전압으로 출력되므로 주파수 카운터(Agilent 53131A)와 디지털 멀티미터(Prema 5017)를 사용하여 풍속계 출력을 측정하였다. LabVIEW 프로그램을 작성하여 유속과 풍속계 지시값을 측정하였고, 선형 회귀 곡선을 계산하여 3-컵 풍속계의 교정 계수를 구했다.

본 연구에서 교정한 3-컵 풍속계는 5 종류로 회전컵 직경, 회전팔 길이 등의 파라미터가 서로 달랐다. 3-컵 풍속계를 InCA에 설치할 때에는 회전컵이 InCA의 노즐 출구와 마주 바라보도록 설치하였다. 이를 위해, 회전팔 길이가 가장 긴 3-컵 풍속계가 회전할 때 노즐에 부딪치지 않을 정도로 노즐 풍속계를 InCA에 최대한 가까이 위치시켰다. 노즐 출구로부터 3-컵 풍속계가 설치된 위치 사이의 거리는 노즐 직경이 25 mm일 때 137.5 mm ($x/D = 5.5$), 50 mm일 때 115 mm ($x/D = 2.3$), 65 mm일 때 110.5 mm ($x/D = 1.7$)이었다.

InCA에서 발생하는 자유 흐름 제트 유동이 일반적인 제트 유동 특성과 잘 일치하는지 확인하기 위해 노즐 출구 중심축에 L자형 피토관을 설치한 다음, 흐름 방향 평균 유속의 흐름 방향 분포와 반지름 방향 분포를 측정하였다. 흐름 방향 유속 변동량(root-mean-square velocity)의 반지름 방향 분포를 측정하기 위해서는 열선 풍속계(Mini CTA 54T30)와 I형 열선(Dantec 55P16)을 사용하였다. 이 때 3-컵 풍속계가 설치되는 위치와

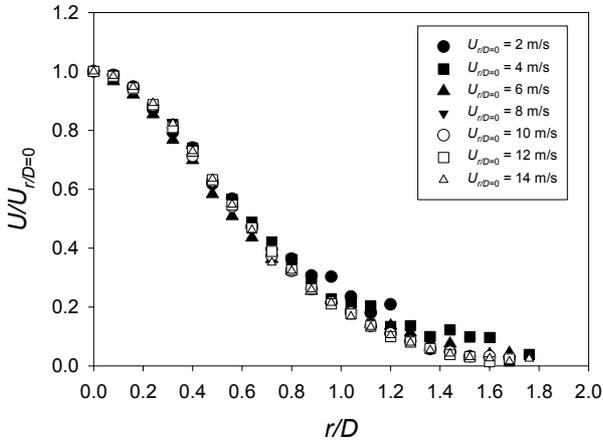


Fig. 3 Mean velocity distribution with $D = 25$ mm

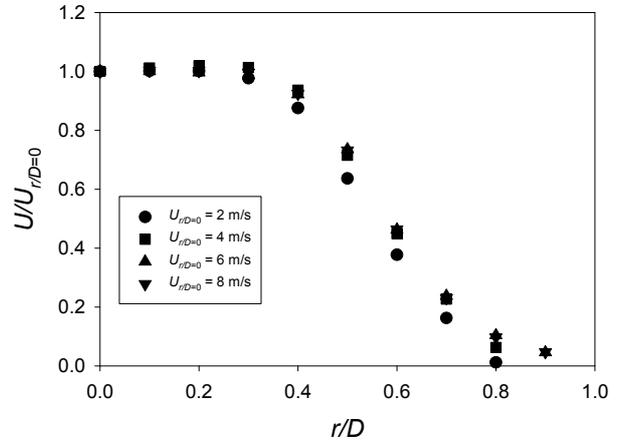


Fig. 5 Mean velocity distribution with $D = 65$ mm

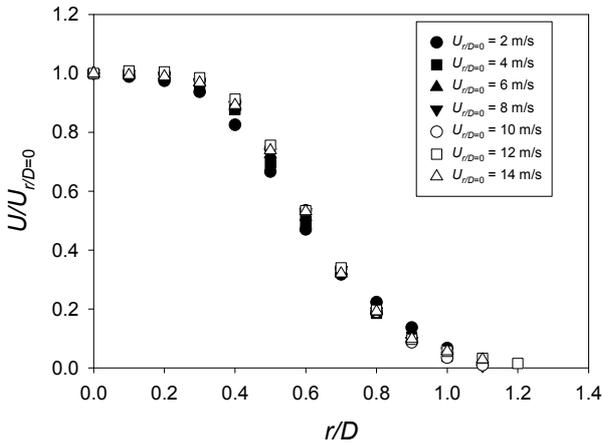


Fig. 4 Mean velocity distribution with $D = 50$ mm

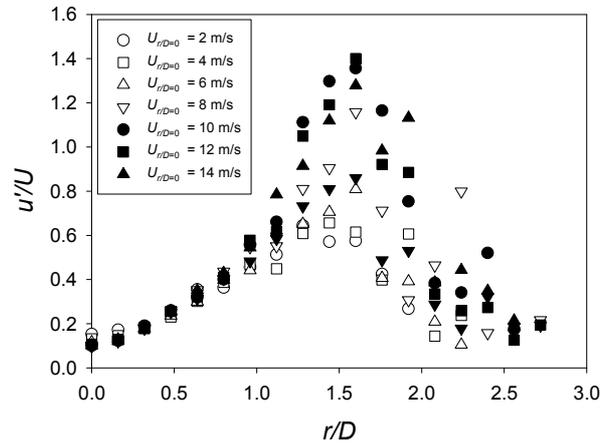


Fig. 6 Rms velocity distribution with $D = 25$ mm

동일한 위치에서 흐름 방향 유속 분포와 유속 변동량 분포를 측정할 수 있도록 L자형 피토크관과 I형 열선을 설치하였다.

2.2 3-컵 풍속계 교정 방법

3-컵 풍속계를 교정하기 위해 유럽의 풍력터빈 컨소시엄인 MEASNET에서 제안한 풍속계 교정 절차를 따랐다.⁽³⁾ MEASNET 교정 절차서에 의하면 풍속계의 교정 이력(hysteresis)을 관찰하기 위해 2 m/s에서부터 15 m/s까지 유속을 증가시키면서 피토크관 유속과 풍속계 출력을 측정하고, 다시 15 m/s에서부터 3 m/s까지 유속을 감소시키면서 피토크관 유속과 풍속계 출력을 측정해야 한다.⁽⁴⁾ 따라서 본 연구에서는 3-컵 풍속계가 설치될 위치에 L자형 피토크관을 놓은 다음 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 15, 13, 11, 9, 7, 5, 3 m/s의 유속을 0.5초 간격으로 60회 측정하였고,

L자형 피토크관을 제거하고 3-컵 풍속계를 설치한 다음, 풍속계 출력을 0.5초 간격으로 60회 측정하였다.^(3,4) 풍속계를 교정하는 동안 밀도 변화에 의한 피토크관 유속을 보정하기 위해 노즐 출구 유속을 변경할 때마다 온도와 습도, 대기압을 각 1회씩 측정하였다.

3. 실험 결과

3.1 노즐 출구 제트 유동

흐름 방향 평균 유속 U 의 흐름 방향 분포를 측정한 다음 $U_{x/D=0}$ 을 기준으로 무차원화하여 Fig. 2에 나타냈다. 단 $U_{x/D=0}$ 은 InCA에 설치된 노즐의 출구에서 측정한 흐름 방향 평균 유속이고 D 는 노즐 직경이다. $x/D = 0 \sim 4$ 는 평균 유속이 일정한 구간으로 제트 유동의 퍼텐셜 코어(potential core)에 해당하였다.⁽⁵⁾ 또한 $x/D \geq 4$ 는 유속이 감

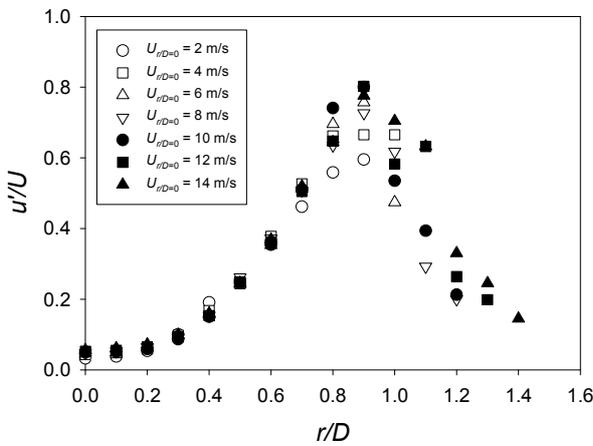


Fig. 7 Rms velocity distribution with $D = 50$ mm

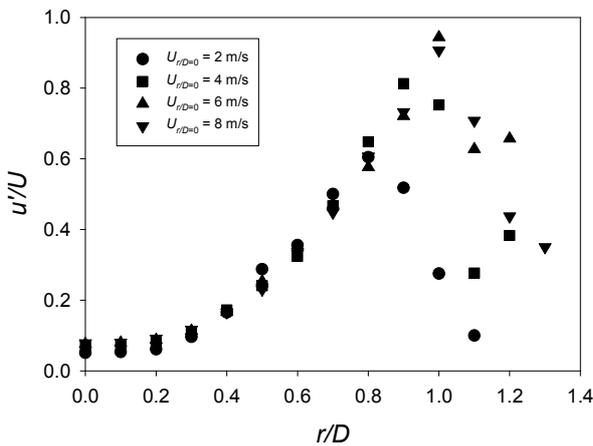


Fig. 8 Rms velocity distribution with $D = 65$ mm

소하는 구간으로 $D = 25, 50, 65$ mm에 대해 무차원화된 유속 분포가 잘 일치하였다.

Figs. 3 ~ 5에는 무차원화된 흐름 방향 평균 유속의 반지름 방향 분포를 나타냈다. 단 $U_{r/D=0}$ 은 노즐의 중심축을 따라 3-컵 풍속계가 설치될 위치에서 측정된 흐름 방향 평균 유속이다. $D = 50, 65$ mm일 때, $r/D \leq 0.3$ 에서 유속이 일정한 구간이 나타났다. 따라서 3-컵 풍속계의 회전컵을 제트 유동의 퍼텐셜 코어 내에 위치시킬 수 있음을 확인하였다. 그러나 $D = 25$ mm일 때는 유속이 일정한 구간이 나타나지 않았고 3-컵 풍속계의 회전컵은 제트 유동의 퍼텐셜 코어 후류에 위치하였다.

흐름 방향 유속의 반지름 방향 난류도 분포를 구하기 위해 흐름 방향 유속 변동량을 흐름 방향 평균 유속으로 무차원화한 결과를 Figs. 6 ~ 8에

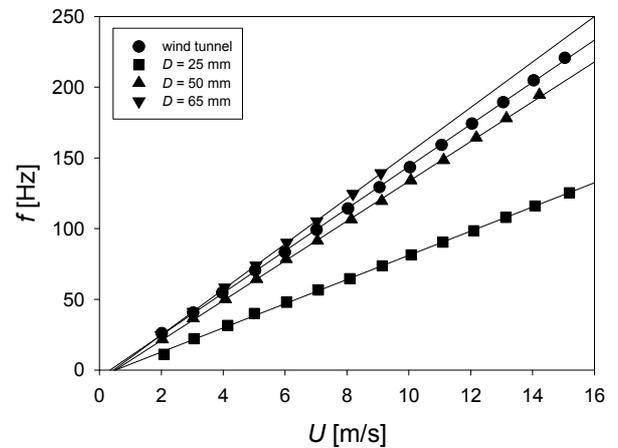


Fig. 9 Calibration of anemometer A

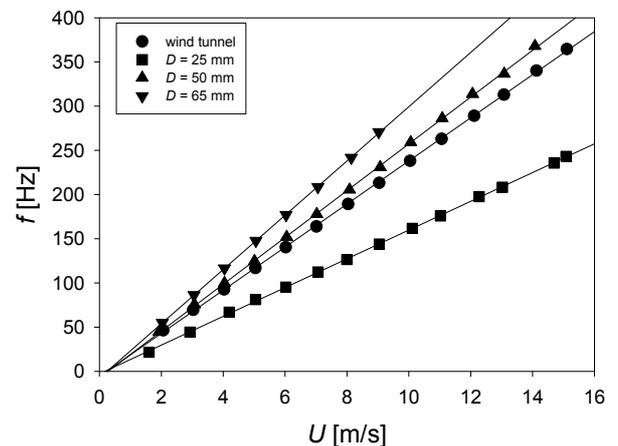


Fig. 10 Calibration of anemometer B

나타냈다. $D = 25$ mm일 때는 $r/D \leq 1$ 에서 여러 유속의 난류도 분포가 서로 잘 일치하였고, $D = 50, 65$ mm일 때는 $r/D \leq 0.8$ 에서 난류도 분포가 잘 일치하였다. 노즐 직경에 따라 난류도 분포가 일치하는 구간이 다른 이유는 $D = 50, 65$ mm일 때는 3-컵 풍속계가 설치되는 흐름 방향 좌표 (x/D)가 제트 유동의 퍼텐셜 코어에 속했지만, $D = 25$ mm일 때는 그렇지 않았기 때문이다.

최대 난류도가 $D = 25$ mm 일 때 $u'/U = 1.4$ 이었고 $D = 50, 65$ mm일 때 $u'/U = 0.8 \sim 1$ 이었다. 3-컵 풍속계의 설치 위치를 일정하게 유지할 경우, x/D 는 노즐 직경이 증가할수록 감소하므로 풍속계 설치 위치는 제트 유동의 퍼텐셜 코어에 속하게 되고, 제트 유동과 외부 공기의 혼합이 약해지면서 난류도가 감소했음을 알 수 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이 InCA의 노즐 출구

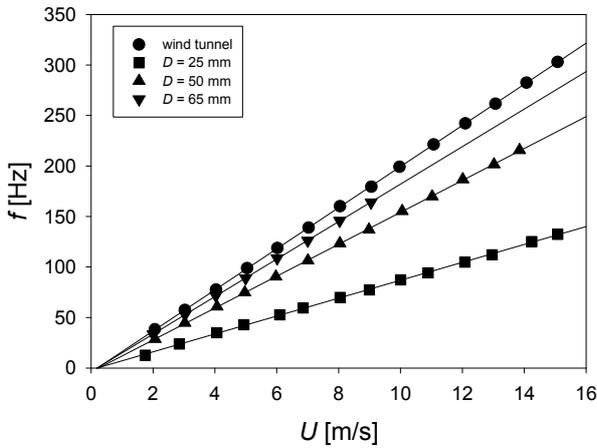


Fig. 11 Calibration of anemometer C

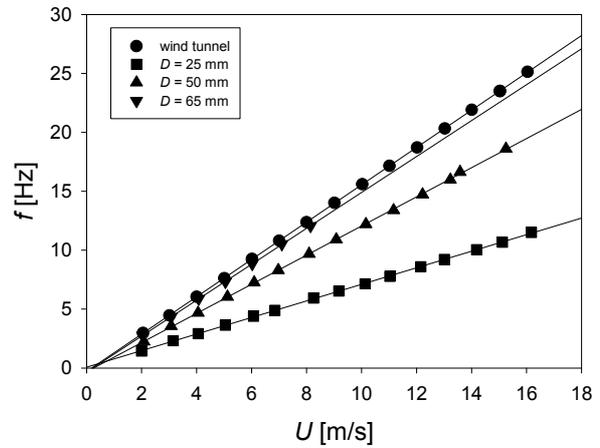


Fig. 13 Calibration of anemometer E

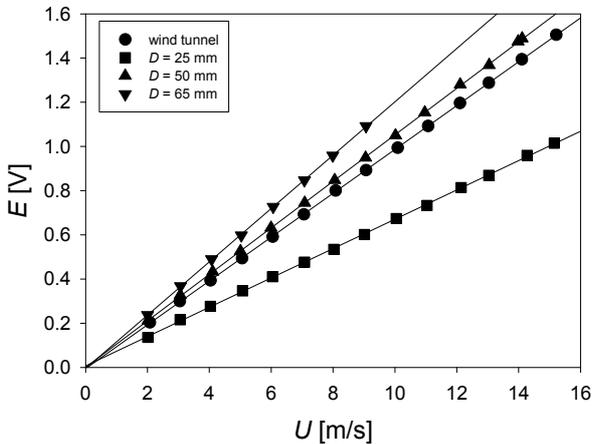


Fig. 12 Calibration of anemometer D

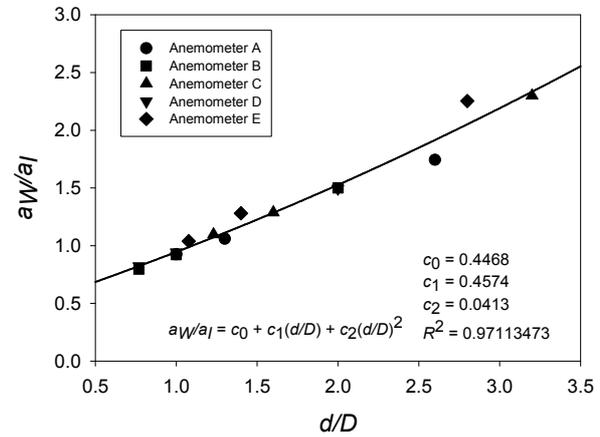


Fig. 14 Corrected calibration slope coefficient

에서 발생하는 제트 유동은 전형적인 제트 유동의 특성을 잘 나타냈다.⁽⁵⁾ 3-컵 풍속계 설치 위치에서 $r/D = 1$ 또는 1.5일 때 최대 난류도가 관찰되었지만 회전컵은 노즐 출구 유동의 대칭축 위에 위치했으므로 난류도가 3-컵 풍속계 교정에 미치는 영향은 비교적 작을 것으로 예상하였다.

3.2 3-컵 풍속계 교정

InCA가 3-컵 풍속계의 현장용 교정 장치로서 사용 가능한지 확인하기 위해, 5 종류의 3-컵 풍속계를 가지고 InCA에서 교정한 결과와 풍동에서 교정한 결과를 비교하여 Figs. 9 ~ 13에 나타냈다. InCA에서 3-컵 풍속계를 교정할 때에는 노즐 직경을 $D = 25, 50, 65$ mm로 변화시키면서 MEASNET에서 제시한 교정 절차에 따라 피토판 유속과 풍속계 지시값을 측정하였다. Figs. 9 ~ 11과 Fig. 13에는 풍속계 지시값이 주파수로 출력

되는 경우를 나타냈고, Fig. 12에는 지시값이 전압으로 출력되는 경우를 나타냈다. 풍속계 교정 곡선의 x 축 절편이 0이 되는 지점을 관찰하면 3-컵 풍속계는 최소 유속(slip velocity) 이상이 되어야 지시값을 출력할 수 있음을 알 수 있다. 그 이유는 3-컵 풍속계의 회전컵이 베어링에 의한 회전 마찰력을 극복하고 회전하기 위해서는 최소 유속 이상의 풍속이 있어야 하기 때문이다.^(3,4)

Table 1에는 3-컵 풍속계의 교정 곡선으로부터 구한 최소 유속의 평균과 표준편차를 나타냈다. 최소 유속은 3-컵 풍속계 종류에 따라 서로 달랐다. 지시값이 주파수로 출력되는 풍속계와 달리 지시값이 전압으로 출력되는 풍속계는 최소 유속이 존재하지 않는 것처럼 보였다. 그 이유는 풍속계 지시값이 주파수에서 전압으로 변환될 때 최소 유속이 0 m/s가 되도록 보정이 이루어지기 때문이다. Table 1에 나타낸 최소 유속을 관찰하

Table 1 Slip velocity of 3-cup anemometers

	Mean slip velocity [m/s]	Rms of slip velocity [m/s]
Anemometer A	0.452	0.081
Anemometer B	0.201	0.027
Anemometer C	0.233	0.044
Anemometer D	-0.003	0.072
Anemometer E	0.191	0.060

면 Anemometer D의 최소 유속은 -0.003 m/s를 가리킨다. 이 값은 3-컵 풍속계의 일반적인 특성을 나타낸 것이 아니라 Fig. 12에서 측정된 교정 곡선의 x 축 절편들을 가지고 평균을 구하였기 때문이다.

3-컵 풍속계 교정 곡선의 기울기는 InCA의 노즐 직경에 따라서 서로 다른 값을 나타냈을 뿐만 아니라 교정용 풍동에서 교정한 교정 곡선의 기울기와도 달랐다. 그 이유는 InCA의 노즐 출구에서 발생하는 제트가 풍속계의 회전컵에 전달하는 운동량이 노즐 직경과 회전컵 직경에 따라 다르기 때문이었다.^(3,4) 그러나 InCA에서 3-컵 풍속계를 교정한 곡선의 기울기를 풍동에서 측정된 교정 곡선 기울기를 기준으로 무차원화하면 하나의 곡선으로 일치시킬 수 있었다.

3-컵 풍속계를 풍동에서 교정한 곡선의 기울기(a_w)를 InCA에서 교정한 곡선의 기울기(a_I)에 대해 무차원화(a_w/a_I)하고, 회전컵 직경을 노즐 직경을 기준으로 무차원화(d/D)하여 나타내면 Fig. 14와 같다. 이 때 a_w/a_I 를 d/D 에 대해 2차 회귀 곡선으로 다음과 같이 나타냈다.

$$a_w/a_I = 0.4468 + 0.4574(d/D) + 0.0413(d/D)^2 \quad (1)$$

단 2차 회귀 곡선의 상관 계수는 $r^2 \approx 0.9711$ 이었다. 식 (1)을 2차 회귀 곡선으로 나타낸 이유는 d/D 가 증가할수록 3-컵 풍속계의 설치 위치는 제트 유동의 퍼텐셜 코어 후류에 놓이거나 제트 유동이 전달하는 유체 운동량이 회전컵 단면 전체에 도달하지 않고 일부분에만 도달하기 때문이다. 3-컵 풍속계의 회전컵은 노즐의 중심축에 놓이므로, 만약 $d/D = 3$ 일 때 회전컵은 $r/D \leq 1.5$

인 구간을 포함하게 된다. Figs. 6 ~ 8에 나타난 것처럼, 이 구간은 최대 난류도가 나타나는 $r/D = 0.9 \sim 1.6$ 의 구간과 겹친다. 따라서 회전컵 안에는 제트 유동과 외부 공기의 혼합에 의해 형성된 와류가 머무르게 되고, 와류의 주기적 흐름에 의해 a_w/a_I 은 2차 곡선의 특성을 나타낸다.⁽⁵⁾ 그러므로 InCA를 가지고 3-컵 풍속계를 교정할 때에는 $r/D \leq 0.5$ (또는 $d/D \leq 1.0$) 이내의 구간에서 교정하는 것이 타당함을 알 수 있다.

4. 결 론

기상 측정, 환경 모니터링, 풍력 발전기 운영을 위해 사용되는 3-컵 풍속계를 장기간 사용하면 풍속계 내부에 설치된 베어링의 마모로 인해 풍속계 특성이 영향을 받는다. 장기간에 걸쳐 풍속계의 특성 변화를 모니터링하기 위해서는 풍속계를 주기적으로 교정해야 하지만 대부분의 풍속계들은 지면에서 높은 위치에 설치되므로 교정이 쉽지 않다.

이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 3-컵 풍속계를 위한 현장용 교정 장치인 InCA를 고안하였다. 이를 위해 3-컵 풍속계가 설치되는 지점에서 제트 유동의 흐름 방향 평균 유속과 난류도 분포를 측정하였다. InCA에 부착된 노즐의 직경을 변화시키면서 5 종류의 3-컵 풍속계들을 교정하였고 풍동에서 풍속계 교정한 결과와 비교하였다. InCA에서 교정한 곡선의 기울기를 풍동에서 측정된 교정 곡선의 기울기와 일치시키기 위해, 무차원화된 교정 곡선의 기울기를 무차원화된 회전컵 직경에 대해 그래프로 나타냈고 2차 회귀 곡선을 구하였다.

풍동에서 측정된 교정 곡선의 기울기를 InCA에서 측정된 교정 곡선의 기울기로 무차원화한 결과를 2차 회귀 곡선으로 나타냈다. 그 이유는 회전컵 직경에 비해 노즐 직경이 작을수록 제트 유동에 의해 생성되는 와류와 제트 유동이 전달하는 유체 운동량이 3-컵 풍속계의 회전컵에 영향을 끼치기 때문이었다. 만약 회전컵 직경을 노즐 직경으로 무차원화한 값이 1보다 작으면 난류도와 유체 운동량이 회전컵에 미치는 영향을 줄일 수 있음을 발견하였다. 따라서 본 연구에서 제안한 방법으로 InCA를 가지고 3-컵 풍속계를 교정할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- (1) International Organization for Standardization, 1991, "Measurement of Fluid Flow in Circular Cross-Section Conduits Running Full Using Pressure Differential Devices - Part 3: Nozzles and Venturi Nozzles," ISO-5167-3.
- (2) International Organization for Standardization, 2008, "Measurement of Fluid Flow in Closed Conduits - Velocity Area Method Using Pitot Static Tubes," ISO-3966.
- (3) MEASNET, 1997, "Cup-Anemometer Calibration Procedure," Version 1, September 1997.
- (4) Pedersen, T. F., 2003, "Development of a Classification System for Cup Anemometers - CLASSCUP," Risø-R-1348(EN).
- (5) Pope, S. B., 2000, "Turbulent Flows," Cambridge University Press.