

技術論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2012.40.3.230>

저속풍동 시험부 속도교정에 관한 실험적 연구

오세윤*, 이종건*, 김성철*, 김상호*, 안승기*

An Experimental Study of Test Section Velocity Calibration
for Low-Speed Wind Tunnel

Se-Yoon Oh*, Jong-Geon Lee*, Sung-Cheol Kim*, Sang-Ho Kim* and Seung-Ki Ahn*

ABSTRACT

The purpose of this research is to determine the calibration constants of the wind speed measurement systems required to calculate the wind tunnel velocity in the test section. In the present work, the aerodynamic calibration tests of the test section were conducted in the Agency for Defense Development's Low-Speed Wind Tunnel. The test speed ranged from 10 to 100 m/s with a reference pitot-static pressure probe. The validity of the calibration results was evaluated by comparing them with the previous calibration constants. The calibration results show that fair to good agreement is obtained with reasonable accuracy.

초 록

본 연구의 목적은 풍동 시험부의 속도산출에 필요한 속도측정시스템용 교정계수를 실험적으로 결정하는데 있었다. 교정실험은 국방과학연구소 저속풍동에서 표준 피토관을 이용하여 수행되었으며 이때의 교정속도 영역은 약 10~100 m/s이었다. 풍동교정실험결과와 유효성 평가를 위해 기존의 교정계수 측정결과와의 비교검토를 수행하였으며, 기존 교정결과들과 잘 부합됨을 확인하였다.

Key Words : Wind Tunnel(풍동), Test Section(시험부), Calibration(교정), Correction(보정), Calibration Constants(교정계수), Contraction(수축부), Pressure tap(압력탭)

1. 서 론

풍동실험장치(wind tunnels)는 항공기나 기타 여러 비행체의 공력성능연구와 비행체 설계개발에 필요한 공력특성 데이터를 제공하는 중요한 연구개발 요소 중의 하나이다. 근래 들어 실험대상이 장착되는 시험부(test section)내의 유동품질 특성에 관한 공기역학분야의 실험요구도가 크게

높아짐에 따라 풍동교정(wind tunnel calibration)[1] 연구분야에 대한 중요성도 함께 높아지고 있다. 이에 따라 보다 정밀한 공력실험조건의 모사와 상향된 공력실험 요구도를 함께 만족시킬 수 있는 정밀한 풍동운용조건과 시험부 유동품질에 관한 교정원리가 요구된다.

풍동교정실험이란 풍동시험부내의 어느 한 지점이나 실험모형이 위치할 수 있는 시험부내의 모든 대상 위치들에 대한 여러 가지 유동특성들의 평균적인 특성들을 평가하는 일련의 풍동실험행위로 정의할 수 있으며 크게는 시험부 교정(test section calibration)과 유동장 품질특성 측정(flow quality measurements)의 두 분야로 나눌 수 있다.

† 2011년 12월 5일 접수 ~ 2012년 2월 6일 심사완료

* 정회원, 국방과학연구소 1-2

교신저자, E-mail : syoh@add.re.kr

대전광역시 유성우체국 사서함 35-12

풍동교정실험에서 평가하는 주요 유동변수[1, 2]들은 시험부의 전압력(total pressure, $P_{t\infty}$), 정압력(static pressure, $P_{s\infty}$), 동압력(dynamic pressure, q_{∞}), 온도(total and static temperature, $T_{t\infty}, T_{s\infty}$) 및 시험부 속도(test section velocity, V_{∞} or Mach number)를 들 수 있으며, 실험 데이터의 보정(correction)을 위해 요구되는 시험부 길이방향 정압기울기(axial static pressure gradient or distribution)나 흐름각(flow angularity)도 유동변수로 간주되기도 한다. 이러한 유동변수들의 측정을 통해 마련된 적절한 교정 데이터가 없이는 정밀한 실험요구에 맞도록 운용하고자 하는 대상 풍동실험장치가 원활하게 동작할 수 없으므로 풍동교정용 데이터를 획득하는 교정실험은 시험부의 유동상태를 규정짓는 매우 중요한 풍동실험 요소 중의 하나라고 할 수 있다.

풍동 시험부내의 일련의 유동조건을 얻기 위해서는 시험부내에서의 유동장 측정이 우선되어야 하며 유동장 측정실험 중에 획득되는 시험부 전압과 차압 및 정압 등의 데이터는 풍동설비의 기본적인 작동상태를 규정하고 시험부의 속도나 레이놀즈수 산출에 사용된다. 이러한 풍동교정실험은 실험대상 모형이 시험부내에서 유동장의 교란(disturbance)을 일으키지 않는 빈 시험부(empty test section) 조건에서 수행되어야 하므로 별도의 독립된 교정실험 준비과정이 필요하다. 풍동교정실험 중에서 빈 시험부에 설치한 측정장비에서 측정되는 자유류 유동조건과 풍동설비의 측정장비(facility instruments)에서 측정되는 유동조건과의 상호 연관관계를 갖도록 하는 교정실험을 시험부 교정(test section calibration) 실험이라 한다.

본 논문에서는 국방과학연구소 저속풍동의 시험부 속도 산출용 교정계수(calibration constants)를 얻기 위해 수행하였던 시험부 교정실험과 관련 교정절차에 대해 기술하고 있다. 아울러 시험부 교정결과와의 타당성 검증을 위해 기존 교정실험결과[2]와의 비교평가도 함께 수행하였다.

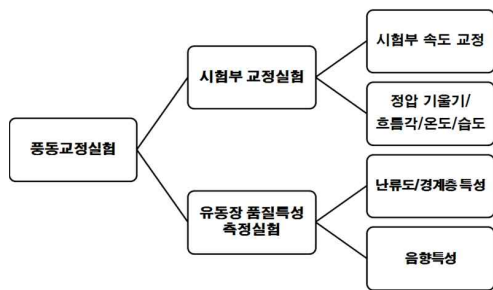


Fig. 1. Wind tunnel calibration

II. 실험장치 및 방법

2.1 풍동 교정실험

풍동교정실험은 시험부 교정실험과 유동장 품질특성 측정실험으로 분류할 수 있는데 Fig. 1에서와 같이 시험부 교정실험에서 측정되는 유동변수 항목들은 유동장 품질특성 측정실험과는 달리 공력실험 자료처리와 데이터 보정과정에 필요한 직접적인 입력변수로 사용된다.

총체적인 풍동교정실험은 풍동설비를 최초로 가동했을 때의 수락시험(commissioning test)때나 풍동 유로구조에 큰 변동이 가해졌을 경우에 수행할 필요가 있으며, 풍동실험설비가 정상적으로 운영되고 있는지 또는 풍동 교정정밀도(calibration accuracy)가 잘 유지되고 있는지를 주기적으로 확인해야할 때도 필요하다. 또한 시간이 경과함에 따라 흐름정류 스크린(flow-conditioning screen)의 노후 등의 이유로 풍동 교정정밀도는 점차로 감소하게 되므로 최소 한 1년 주기의 풍동교정 프로그램이 필요하다.

풍동교정에 대한 표준지침서로 널리 적용되고 있는 AIAA R-093-2003[1]에 따르면 풍동교정실험은 풍동실험설비가 기대대로 잘 동작하고 있는지 확인하거나 풍동유로 내부에 생긴 변동의 영향을 평가하여 관련 문제점들을 확인할 수 있도록 한다. 또한 풍동실험장치의 전반적인 데이터 품질을 평가하는데 필수적인 자료를 제공함으로써 풍동실험 데이터에 대한 통계적 프로세스 제어(statistical process control)가 가능하도록 하는 역할도 한다. 이러한 통계적 프로세스 제어를 위해서는 교정실험에 사용되는 측정기기용 교정기들에 대한 지속적인 교정이력 관리와 주요 풍동 교정데이터에 대한 변동과 평균값들에 대한 추적 관리 및 통제 불가능 변동요인에 대한 식별과 제거가 반드시 필요하다.

2.2 시험부 교정실험

시험부 교정[1]은 매우 세부적인 사항까지 측정하는 전체교정(full calibration)과 짧은 기간 안에 풍동시설의 건전성만을 측정하는 점검교정(check calibration)의 두 가지 종류로 나눌 수 있다.

이들 두가지 교정실험 형태는 모두 정규 종합교정 프로그램(overall calibration program)의 일환으로서 각기 중요한 부분을 담당한다. 점검교정은 실험모형이 설치되어야하는 유동영역을 전부를 교정실험대상 영역으로 하는 시험부 전체교정과 달리 비용과 풍동 가동시간을 최소로 하면서 통계학적인 분석과 기존 교정결과들과의 비교

를 통해 1-2일 만에 빠르게 관련 교정계수들을 확인한다.

국방과학연구소 풍동실험실에서 수행된 시험부 교정실험은 빈 시험부에서 직접 측정된 유동조건과 풍동설비의 측정장비에서 측정된 유동조건 간의 상호 연관관계로부터 풍동설비의 속도제어기에 필요한 새로운 교정계수를 설정하는 데에 있었다. 저속풍동의 시험부 속도제어기(wind speed controller)는 Fig. 2에서와 같이 풍동유로에 장착된 정압센서(수축부 입/출구 2열 정압센서) 및 온도센서로부터 측정된 신호와 미리 설정된 교정계수를 사용하여 필요한 시험부 속도를 계산하여 제어한다.

소형 풍동실험장치의 경우에는 시험부 상류에 속도 측정용 피토티관을 직접 장착하여 사용하기도 하는데 이러한 속도측정시스템은 측정부 단면을 대표하는 평균적인 정압을 측정하는 대신에 피토티관이 장착되는 특정부위 유선(streamline)의 전압력을 측정함으로써 속도측정의 대표성이 떨어지는 단점이 있으며 이러한 방식 또한 모형장착 부위인 시험부 중앙지점에 대해 본 연구에서와 같은 일련의 교정작업을 수행해야만 보다 정밀한 속도측정이 가능해 진다.

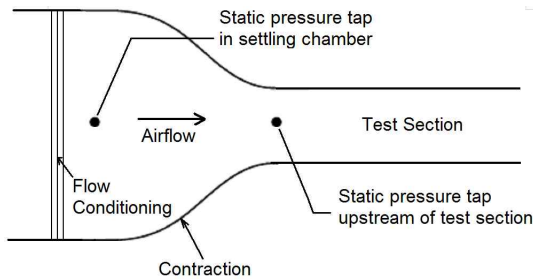


Fig. 2. Facility instruments for subsonic wind tunnel

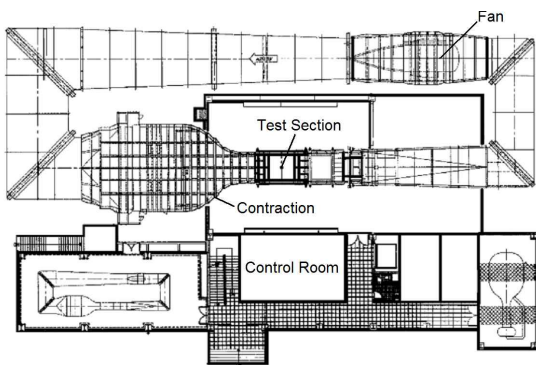


Fig. 3. Low-speed wind tunnel in ADD

2.3 풍동실험장치

본 연구에 사용된 국방과학연구소의 저속풍동(ADD-LSWT)(Fig. 3)은 측정부의 제원이 폭 3.0 m, 높이 2.25 m, 길이 8.75 m이며 수축비 9.0인 폐회로 단일순환식 풍동으로서, 최저속도 10 m/s에서 최고속도 120 m/s까지 변화시킬 수 있다[3-5]. 풍동 내부흐름의 난류도(turbulent level)는 시험부 중심에서 0.08% 이하이며, 흐름각의 변화는 0.1° 이내이다. 저속풍동은 풍동유로, 모형지지부 시스템, 팬(fan) 구동시스템, 정밀이송장치, 냉각시스템 및 관련 보조시스템 등의 주요 부분으로 구성되어 있으며, 축류형 팬의 회전수를 조절하여 유속을 변화시킨다. 풍동제어와 자료획득을 위한 장치로는 ML350 G6 서버, Xw4600, Quantum 140 PLC 및 NEFF471 시스템이 사용되었다.

저속풍동 시험시설의 경우 시험부의 유동조건 ($P_{t\infty}$, $P_{s\infty}$, q_{∞} 등)들은 풍동 정체실(settling chamber)의 수축부(contraction) 양쪽(inlet/outlet)에 설치되어있는 정압측정부의 측정데이터와 연관되어지며 Fig. 2에서와 같이 수축부의 입구(inlet)와 출구(outlet) 압력탭(pressure tap)에서 각기 두 쌍의 정압력이 감지된다. 본 연구에서 다루고자 하는 시험부 교정실험의 경우 먼저 시험부에서 직접 측정된 동압과 이에 상응하는 풍동유로 정체실의 수축부 입/출구에서 발생하는 압력강하(pressure drop)간의 상호관계와 시험부에서 측정된 정압과 수축부 출구 노즐부에서 측정된 정압과의 연관관계를 함께 파악해야만 한다. 풍동설비 정체실 수축부의 정압탭 데이터는 시험부에서 직접 측정된 동압과 정압에 대한 연관관계 교정실험을 통해 향후 풍동실험 중에 필요한 시험부의 상태(전압, 동압, 정압 및 속도 등)를 산출하는데 직접 활용되게 된다.

시험부 속도교정실험에는 Fig. 4에서와 같은 길이 610 mm(24") 직경 8 mm(0.315")의 90도 꺾인 형태의 피토티관(NPL Type with a modified ellipsoidal

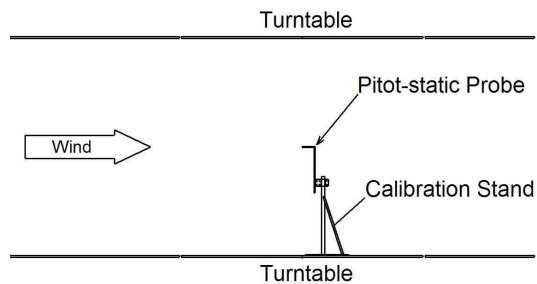


Fig. 4. Reference pitot-static probe installed in LSWT

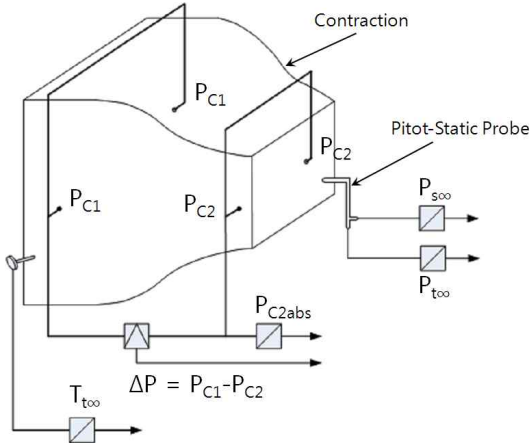


Fig. 5. Facility instruments and calibration set-up

nose, Airflow Development Ltd. of High Wycombe, England)[2]이 사용되었다. 교정실험은 5~100 m/s까지의 속도 영역에서 수행되었으며 기존 수락시험의 최대 교정속도와와의 일관성 유지와 비교를 위해 90 m/s까지의 실험결과만이 교정계수산출에 사용되었다.

III. 시험부 교정원리

3.1 시험부 속도측정 시스템

본 시험부 교정실험에서는 Fig. 5에서와 같이 본 시험부에 설치한 표준 피토관 측정장비에서 측정되는 자유류의 유동조건과 풍동설비의 압력 측정시스템에서 측정되는 유동조건 상호 연관 관계를 갖도록 한다. 국방과학연구소의 저속풍동의 경우 시험부의 속도는 시험부 속도제어기가 독립된 두 개의 압력측정 시스템(Line A, Line B)에서 획득된 센서신호로부터 산출하게 되며 압력측정시스템의 내부에 압력누설이 없는 정상적인 경우에는 한 개의 측정시스템만이 속도측정에 사용되며 나머지 다른 한 개는 예비시스템의 역할을 담당한다. 현재 국과연 저속풍동에서는 속도제어 및 자료획득을 위해 Line B는 기준 시스템으로 Line A는 Line B 시스템의 압력누설에 대비한 예비 시스템으로 운영하고 있다.

Figure 5를 기준으로 할 때 정체실 수축부 입구에서 측정하는 정압탭(P_{C1})에서는 정체실의 전압에 가까운 압력을 감지하고 수축부 출구 노즐에서 측정된 정압탭(P_{C2})은 시험부의 정압에 근사한 압력을 감지한다. 이들 두 곳 정압탭 사이에서의 발생하는 압력차이(ΔP)는 Table 1에서

Table 1. Reference pressure transducers

	Line A, B	Sensor Range / Uncertainty
Contraction inlet	$P_{C1} (\approx P_{t\infty})$	-
Contraction outlet	$P_{C2} (\approx P_{s\infty})$	1,000 torr (+19.0 psia) Absolute
Between contraction inlet/outlet	$\Delta P (\approx q_\infty) = P_{C1} - P_{C2}$	± 10 torr (± 0.19 psid) Low range differential
		± 100 mbar (± 1.45 psid) High range differential

Table 2. Experiment pressure transducers

	Pitot-static Probe	Sensor Range / Uncertainty
Barocel [®]	$P_{t\infty}$	± 1.0 psid
Barocel [®]	$P_{s\infty}$	$\pm 10''$ H ₂ O (± 0.36 psid)
Pressure Calibrator	Mensor PCS 400 (Differential)	-5.0~0.5 psid ± 5.0 psid with 0.01%FS
	Ruska 7250 xi (Barometric reference)	0.002 psia or 0.01% reading

와 같이 풍동 수축부 하단 외부에 위치한 압력센서용 캐비닛(pressure cabinet)에 장착된 측정범위가 다른 정밀한 압력센서를 사용하여 측정되며 시험부 풍속제어기에 설정된 속도범위에 따라 저속에서는 ± 10 torr의 차압센서로 측정된 압력을, 고속에서는 ± 100 mbar 차압센서로 측정된 압력을 시험부 풍속계산에 사용한다. 이때 측정된 ΔP 는 시험부의 동압의 근사치에 해당한다. 한편 정압탭(P_{C2})의 압력은 절대압력센서를 사용하여 측정하며 이는 시험부 속도측정에 사용되는 모든 압력센서들과 풍동실험시 실험모형의 기준압력(reference pressure for pressure measurements)으로 사용된다. Table 1에는 압력센서용 캐비닛에 장착되어있는 압력측정기들의 위치와 사양이 나타나있으며 Table 2에는 시험부의 유동특성을

직접 측정하기위해 사용되는 표준 피토티관용 (reference pitot-static pressure probe) 압력센서들과 관련 압력교정기기의 사양이 나타나 있다. 식 (1)의 교정계수 k_p 와 k_q 는 풍동실험장치가 운용되는 전체 속도영역에 대해 교정실험을 수행하여 얻어진 풍동의 압력탭 데이터와 Fig. 5에서와 같이 시험부 중앙 위치에 장착된 표준 피토티관에서 측정된 압력데이터를 함께 사용하여 산출된다[2].

$$\begin{aligned} k_p &= \frac{P_{s\infty} - P_{C2}}{P_{C1} - P_{C2}} \\ k_q &= \frac{P_{t\infty} - P_{s\infty}}{P_{C1} - P_{C2}} \end{aligned} \quad (1)$$

3.2 시험부 속도산출

풍동실험중의 동압과 속도 및 압력계수들은 식 (1)의 k_p 와 k_q 로 불리는 교정계수들을 사용한 형태로 표현되며 이러한 교정계수들은 시험부 교정실험을 통해 Line A와 Line B의 두 개의 독립 시스템과 속도영역의 ΔP 의 크기에 따른 두 개의 압력센서들에 대해 각각 총 4쌍의 교정계수들을 얻는다. 이들 교정계수들은 아주 작은 속도의 동압구간 이외에는 동압의 증가에 따라 상대적으로 매우 적은 양 만이 변동되는 특징을 갖고 있으므로 단순 곡선적합과정(curve fitting)을 이용하여 두 개의 직선방정식을 얻는 과정으로 교정계수 k_p 와 k_q 를 구할 수 있다.

풍동실험 중에는 시험부를 점유하고 있는 실험모형으로 인해 시험부의 속도 또는 $P_{t\infty}$ 나 $P_{s\infty}$ 와 같은 압력들을 직접적으로 측정하기가 불가능하다. 이를 대신하여 풍동 수축부에 장착되어 있는 속도측정용 압력탭으로부터 P_{C1} 과 P_{C2} 를 측정하고 미리 구해 놓은 식 (1)의 교정계수 k_p 와 k_q 를 사용하여 시험부 속도를 산출하게 된다. 식 (1)에서의 $P_{t\infty}$ 나 $P_{s\infty}$ 는 풍동교정실험시 빈 시험부 중앙에 장착한 표준 피토티관에서 직접 측정된 값이다. 만약 교정실험을 통해 k_p 와 k_q 를 미리 알고 있다면 측정된 P_{C1} 과 P_{C2} 를 이용하여 시험부의 전압 $P_{t\infty}$ 과 정압 $P_{s\infty}$ 을 식 (2)와 같이 구할 수 있게 된다.

한편 시험부 속도 V_∞ 는 동압의 정의를 이용하

$$\begin{aligned} P_{s\infty} &= k_p(P_{C1} - P_{C2}) + P_{C2} \\ P_{t\infty} &= k_q(P_{C1} - P_{C2}) + P_{s\infty} \end{aligned} \quad (2)$$

면 다음의 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$V_\infty = \sqrt{\frac{2 q_\infty}{\rho_{s\infty}}} \quad (3)$$

시험부 동압 q_∞ 를 식 (1)의 k_p 와 k_q 관계 및 공기의 압축성 효과를 고려한 유체역학 관계[2,6]을 이용하면 식 (4)와 같이 표현할 수 있으며 여기서 시험부 공기의 정적 밀도(static air density) $\rho_{s\infty}$ 는 공기 중의 수분함량에 따른 압력(P_{H_2O} , partial pressure of water vapour) 등을 이용하여 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} q_\infty &= \frac{\gamma}{\gamma-1} P_{s\infty} \left(\left(\frac{P_{t\infty} - P_{s\infty}}{P_{s\infty}} + 1 \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \\ &= \frac{\gamma}{\gamma-1} [P_{C2} + k_p(P_{C1} - P_{C2})] \end{aligned} \quad (4)$$

$$\left(\left(\frac{k_q(P_{C1} - P_{C2})}{P_{C2} + k_p(P_{C1} - P_{C2})} + 1 \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right)$$

$$\rho_{s\infty} = \frac{\frac{P_{H_2O}}{R_{H_2O}} + \frac{P_{t\infty} - P_{H_2O}}{R_{air}}}{T_{air}} \left(\frac{P_{s\infty}}{P_{t\infty}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (5)$$

따라서 식 (4)의 시험부 동압 q_∞ 과 식 (5)의 밀도 $\rho_{s\infty}$ 를 이용하게 되면 식 (3)의 시험부 속도 V_∞ 는 풍동유로의 정체실 수축부에 장착된 속도측정용 정압탭에서 측정된 P_{C1} 과 P_{C2} 만의 관계로 표현되어서 시험부 유동장의 직접적인 측정이 없이도 시험부 속도의 산출이 가능하게 된다.

IV. 실험결과 및 분석

4.1 측정의 불확도 평가

풍동교정실험 측정결과에 대한 불확도 평가(uncertainty estimates)를 불확도 표준서인 AIAA Standard S-017A-1999[7]에 따라 수행하였다. Table 3에는 본 연구에서 산출한 시험부 속도 교정계수의 재현성 결과(각 10회 반복실험)를 보여주고 있다. 기존 재현성 측정결과[2]와의 비교를 고려해볼 때 만족할 만한 수준의 정확도로 교정계수 산출실험이 수행되었다고 판단된다.

Table 3. Repeatability results (Line B)

	Present (Mean ± 2σ)	Previous (Mean ± 2σ)
Wind speed : 36.6 m/s		
k_p	0.0253 ± 0.0001	0.0247 ± 0.0005
k_q	0.9809 ± 0.0001	0.9860 ± 0.0002
Wind speed : 55.8 m/s		
k_p	0.0254 ± 0.0001	0.0249 ± 0.0001
k_q	0.9805 ± 0.0001	0.9834 ± 0.0002

Table 4. Calibration coefficient results (Line B)

		Slope	Offset
Low Range		$\Delta V_\infty = 0.1068 \pm 0.0382$ m/s	
k_p	Present	+0.0018966	+0.02331
	Previous	+0.0052503	+0.02090
k_q	Present	-0.0021971	+0.98220
	Previous	-0.0073723	+0.99396
High Range		$\Delta V_\infty = 0.1364 \pm 0.0222$ m/s	
k_p	Present	-0.00010321	+0.02545
	Previous	-0.00015070	+0.02500
k_q	Present	-0.00000745	+0.98124
	Previous	-0.00010970	+0.98376

4.2 교정계수 산출결과

Figure 6과 Fig. 7에는 최소자승법을 통한 곡선적합 과정으로부터 산출된 k_p 와 k_q 측정결과가 나타나 있다. 본 연구에서는 교정실험의 정밀도를 높이기 위해 실험순서를 랜덤화하여 각 속도별로 5회씩 반복하는 조건으로 총 110회의 풍동실험을 수행하였다. 산출된 기울기는 선형 곡선적합 후에 발생한 잔차의 표준편차(σ)가 $\pm 2\sigma$ 이상인 데이터를 측정자료의 배제과정[7]을 수행하여 잠재적인 배제점(outlier)으로 간주하여 제거한 후 재산출한 결과로 여기서 적색의 가는 실선은 95% 신뢰구간을 나타낸다. Fig. 6과 Fig. 7

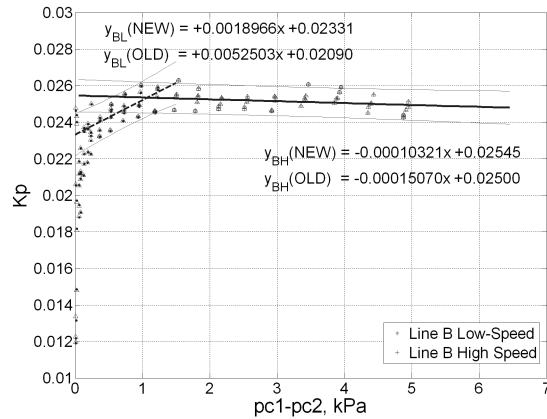


Fig. 6. k_p vs. $P_{C1} - P_{C2}$

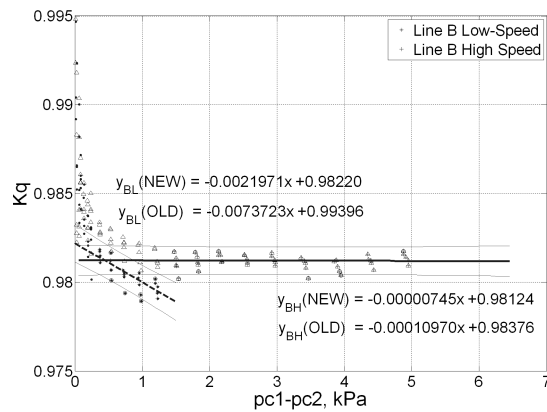


Fig. 7. k_q vs. $P_{C1} - P_{C2}$

에서와 같이 속도(동압)의 크기에 따라 산출된 k_p 와 k_q 는 동압이 증가하거나 감소함에 따라 약간씩 변동하기 때문에 동압 변동에 따라 k_p 와 k_q 의 변화량(기울기와 절편)을 구해 풍동 속도제어시스템의 교정계수로 사용하게 된다.

Table 4에는 본 연구를 통해 산출된 교정계수와 기존의 수락시험을 통해 설정된 교정계수결과가 함께 나타나 있다[8]. 결과로부터 대체로 기존 교정결과에 비해 기울기 값은 작아지고 평균값(절편)은 유사한 경향을 보였다. 이들 교정계수간의 차이를 속도로 환산하면 Table 4에서와 같이 약 0.13~0.15 m/s 가량의 속도차이로 평가할 수 있었으며 이러한 차이는 두 교정실험 수행기간 사이에 발생한 구조변경 등의 풍동유로 여러 변동사항들이 반영된 결과로 판단된다.

본 연구의 초기실험 수행과정에서는 교정실험의 순서를 순차적으로 하였으나 획득된 교정계수결과에 실험의 순서와 시간에 따라 변동하는 경향성[9]이 나타나 결과적으로 실험의 정밀도를

저하시켰다. 이와 같은 변동량을 최소화시키고 실험의 정밀도[10]를 높이기 위해 실험순서를 랜덤화하고 반복화하는 실험설계(design of experiments)기법이 사용된 것이 교정계수 획득 실험과 재현성 평가에 매우 효과적이었던 것으로 판단된다.

V. 결 론

국방과학연구소 저속풍동용 시험부 속도측정 시스템의 신규 속도제어변수 설정을 위한 시험부 교정실험을 수행하였다. 풍동실험장치의 빈 시험부에서 직접 측정된 유동조건과 저속풍동설비에 설치되어있는 풍동 고유 측정장비 간의 상호 연관관계를 파악하여 풍동 속도제어시스템을 위한 새로운 교정계수를 획득하여 기존의 소형 풍동설비에 적용되는 피토관 장착 속도측정방식이 아닌 대형설비에 적용되는 정압 오리피스 속도측정방식 시험부의 속도교정 실험기법을 확립할 수 있었다. 또한 기존 교정계수와와의 교차비교연구와 실험설계기법에 기반한 실험결과의 재현성 평가를 통해 시험부 교정결과의 타당성을 확인하였다. 향후 시험부 유동장 품질특성에 대한 추가적인 교정실험이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1) AIAA, 2003, "Recommended Practice - Calibration of Subsonic and Transonic Wind Tunnels," American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA R-093-2003.

2) AIOLOS Engineering, 1998, "ADD Low Speed Wind Tunnel - Acceptance Test Program", AIOLOS Engineering Corporation, Report No. 4035/R140.

3) 오세윤, 박금룡, 이종건, 안승기, "회전의 항공기 기체공력 특성에 관한 실험적 연구", 한국항공우주학회지, 제33권 9호, pp. 9~15, 2005. 9.

4) 오세윤, 안승기, 조철영, "단일영역 오차보간 모델을 이용한 5-Hole Probe의 교정", 한국항공우주학회지, 제34권 제5호, pp 30~38, 2006.

5) 오세윤, 김상호, 안승기, 조철영, 이종건, "스텔스 형상 공력특성에 관한 실험적 연구", 한국항공우주학회지, 제36권 10호, pp. 962~968, 2008. 10.

6) Barlow, J. B., Rae, W. H. Jr. and Pope, A., "Low-Speed Wind Tunnel Testing", 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc., 1999.

7) AIAA, 1999, "Assessment of Experimental Uncertainty with Application to Wind Tunnel Testing", American Institute of Aeronautics and Astronautics Standard, AIAA S-017A-1999.

8) 오세윤, 이종건, 김성철, 김상호, 안승기, "국방과학연구소 저속풍동 시험부 교정 연구", 2011 한국항공우주학회 추계학술대회, pp. 306~311, 2011. 11.

9) 오세윤, 박승오, 안승기, "실험설계법 기반 풍동실험 시스템오차 감소방안", 한국항공우주학회 2007년도 추계학술발표회 논문집(I), pp. 117-122, 2007. 11.

10) 오세윤, 박승오, 안승기, "실험설계법 기반 풍동실험 정밀도 향상방안", 한국항공우주학회 2007년도 추계학술발표회 논문집(I), pp. 123-127, 2007. 11.