

(論 文)

# 컴퓨터원용 열선 및 열필름 프로브의 교정방법 개선에 대한 연구

김경천\* · 윤순현\*\* · 김대성\*\*\* · 신영호\*\*\*\*

(1993년 9월 22일 접수)

## Investigation on the Improvement of Computer Aided Calibration Methods for Hot-Wire and Hot Film Probes

K.C. Kim, S.H. Yoon, D.S.Kim and Y.H. Shin

**Key Words :** Calibration Method(교정방법), Look-Up Table Method, King's Law(King의 법칙), Dynamic Calibration(동적교정), Pitch Angle(피치각), Small Perturbation(소섭동), Local Sensitivity(국소민감도)

### Abstract

New computer-aided calibration methods for the hot-wire and split film probes are presented. The proposed modified king's law takes into account instantaneous flow angle as well as the variation of calibration coefficients due to the total velocity magnitude change. It is found that the look-up table method has many advantages with respect to the accuracy on data and reducing run time for calibration over other conventional methods. In order to investigate the local sensitivity of the static calibration, a dynamic calibration procedure is also carried out.

### 기 호 설 명

- |                                 |  |
|---------------------------------|--|
| $A, B$ : 판의 단면적                 | $X$ : 원주로부터 후류방향으로 길이                    |
| $C_1, C_2, C_3$ : 유효 피치각 교정의 상수 | $Y$ : 원주중심에서 수직방향으로의 길이                  |
| $D$ : 원주의 직경                    | $Z(\gamma)$ : 피치각 응답함수                   |
| $E_o$ : C.T.A.의 출력전압            | $Z(\gamma, U_N)$ : 수정제외된 피치각 응답함수        |
| $E1, E2$ : C.T.A.의 브릿지 출력전압     | $\gamma$ : 유효 피치각(센서로의 유입각)              |
| $n$ : King 식의 교정상수              | $\gamma_c$ : 교정결과로 얻어진 피치각               |
| $u, v$ : 순간 속도성분                | $\gamma_m$ : 교정실험시 측정된 피치각               |
| $U$ : 평균 유입속도                   | C.T.A. : Constant Temperature Anemometry |
| $U_c$ : 동적 교정실험에서 센서의 구동속도      | SFP : 스플릿필름                              |
| $U_N$ : 유입 전속도                  |  |
| $U_w$ : bias flow velocity      |  |

### 1. 서 론

최근 유체역학 분야에서 이루어지는 실험 연구들을 살펴보게 되면 점차 더 어렵고 복잡한 난류유동장을 연구대상으로 하는 경향이 있음을 알 수 있다.<sup>(1)</sup> 이처럼 갈수록 난해한 유동장이 등장하는 이유는 실제 공학적인 문제에서 나타나는 유체 유동

\*정회원, 부산대학교 생산기계공학과

\*\*정회원, 부산대학교 기계설계학과

\*\*\*부산대학교 대학원 기계설계학과

\*\*\*\*한국중공업(주) 기술연구소

의 대부분이 난류유동인데다 경우에 따라서는 열전달과 같은 부가적인 물리현상도 고려하여야 할 필요가 생기기 때문이다. 또한 이러한 추세는 새로운 난류모델의 개발단계에서 비교 검증을 위한 실험자료가 필요한 전산유체 분야에서도 공통적으로 나타나고 있다.

그런데 이와 같은 복잡한 유동장의 연구에 있어서 대두되는 중요한 문제점은 실험자료의 신뢰성 확보가 어려워진다는 것이고, 따라서 신뢰도가 높은 자료를 제공하기 위한 장비들과 실험기법들이 절실히 요구된다. 특히 재순환 유동이나 재부착 및 재발전 경계층 등과 같이 난류강도가 높고 곡률이 큰 유선을 가진 유동장<sup>(2,3)</sup>인 경우 역류를 감지할 수 있어야 할뿐 아니라 격렬한 섭동현상의 관찰도 가능하여야 하므로 이에 맞는 측정방법이나 유속 측정 센서의 교정기법이 필요하다. 물론 신뢰도 확보의 측면에서는 3차원 레이저유속계를 사용하는 것이 가장 좋겠으나 레이저유속계 자체가 고가인데다 유지관리비용도 많이 들고, 광학계의 구성이 힘든 구조에는 적용이 어렵다는 단점이 있어 국내의 일반적인 풍동실험에서는 X형 열선과 역류를 감지할 수 있는 스플릿필름 프로브가 널리 사용되고 있다.<sup>(4,5)</sup> 이 센서들을 사용할 때 정확한 속도 자료들을 얻기 위해서는 속도와 센서 출력전압간의 상관관계가 매우 명확히 규정되어야 하지만 센서 제작회사에서 제공하는 사용자 설명서에 의거하여 이러한 속도-전압간의 교정작업을 시행하려면 대개 King의 법칙이나 여현법칙과 같이 상당한 가정을 요구하는 교정식을 사용하여야 하기 때문에 측정치에 대한 신뢰도에 의문이 제기되는 경우가 많다. 이러한 이유로 인하여 여러가지 형태의 새로운 교정방법에 대한 연구가 비교적 오래전부터 계속되었으나, 교정작업과 실험에 긴 시간이 소요됨에 따라 열선 출력이 드리프트되고 열선에 먼지나 오물 등이 부착되어 열선감도가 저하되는 등의 여러가지 난제들이 아직도 남아 있다. 그러나 근간에 비약적으로 발전하는 개인용 컴퓨터를 이용하여 실험을 자동화하고 방대한 실험자료를 통계처리할 수 있게 됨으로써 많은 문제점들이 극복되었으며 새로운 교정기법에 관한 연구도 아울러 이루어지고 있다.

Westphal & Mehta<sup>(6)</sup>은 컴퓨터를 이용한 X형 열선의 교정 및 자료분석 시스템을 구성하여 실험 시간을 단축하고 결과에 대한 신뢰도를 높이는 성과를 거두었으며, Lueptow 등<sup>(7)</sup>은 수치해석적인

기교를 사용하여 각도변화에 따른 브릿지 출력값을 표의 형식으로 저장하여 두었다가 속도의 크기와 방향을 알아내는 교정방법을 시도하였다. 또 Perry 등<sup>(8)</sup>은 동적 교정기를 개발하여 소섭동시험을 행함으로써 정적인 상태에서의 국소민감도를 검증 보완할 수 있음을 보였다. 그러나 그들은 높은 주파수로 움직이게 되는 열선의 동적 교정에 있어서 prong과 열선의 관성으로 인한 진동때문에 생긴 저주파 신호가 실험의 신뢰도를 매우 떨어뜨린다고 밝혔다. 또, 선행연구에서 Bellhouse & Rasmussen<sup>(9)</sup>의 경우도 같은 어려움에 직면하였음을 인용하였고, 열필름의 경우에는 좀 더 나은 결과를 얻을 수 있다고 하였다. 이와 같이 국소민감도의 측정에는 상당한 어려움이 따르므로 또다른 실험연구자들은 소형 실린더 뒤에서 생기는 칼만 와열을 주기적으로 진동한 유동조건외 하나로 이용하기도 한다.

본 연구에서는 기존의 교정방법과 컴퓨터를 이용한 새로운 교정방법을 열선과 스플릿필름 프로브에 각각 적용시켜 이를 비교하고, 동적 교정기를 이용한 국소민감도를 측정하여 정적 교정에서의 국소민감도와와의 차이를 알아본다.

## 2. 본 론

### 2.1 실험장치

교정실험에서는 Fig. 1에 나타난 것과 같은 자료 획득 및 분석 시스템을 사용하였다. 측정신호의 정도를 높이고 순간 고주파신호에 의한 aliasing을 방지하기 위하여 열선풍속계(T.S.I사 Model 1054A)로부터의 브릿지 출력을 직류성분과 교류성분으로 나누어 처리하였다. 즉, 직류성분은 곧 바로 D6000 범용 파형분석기의 50 V range 버퍼에 저장

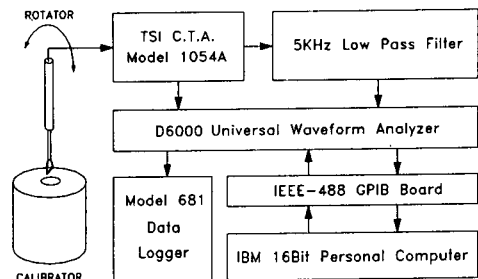
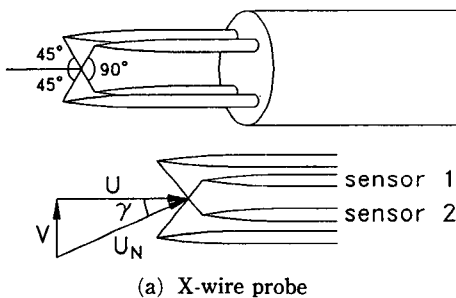


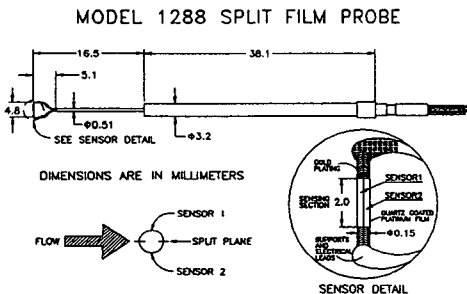
Fig. 1 Block diagram of measuring and data processing system

되어 평균값이 취해지고, 교류성분은 5KHz의 저역통과 필터를 거쳐서 D6000의 버퍼에 저장되어져 두 성분을 합한 신호가 최종적인 결과 신호가 된다. 그와 같이 구해진 신호는 IEEE-488 GPIB 카드를 통하여 퍼스털 컴퓨터로 원격조정되어 컴퓨터의 하드디스크나 D6000 전용 자료저장기인 model 681 자료기록기에 저장된 후 결과분석에 사용된다. 이들 신호를 각 채널당 100 $\mu$ sec의 추출 주파수로 4096개씩 5회 측정하여 평균을 취하였다. Fig. 2의 (a)와 (b)는 각각 실험에 사용된 열선과 스플릿필름의 구조도로 X형 열선은 직경이 5 $\mu$ m인 텅스텐 재질이며 스플릿필름(SFP)는 TSI사의 Model 1288로서 수정봉의 직경은 0.15 mm, 감지부의 길이는 2 mm이다.

정적 교정실험에서는 압력조절기 및 여과기가 달려있어 매우 균일한 흐름을 제공하여 줄 뿐만 아니라 프로브 지지대와 회전기가 부착되어 유입각에 따른 열선의 고정 및 이동이 용이하도록 되어 있는 TSI Model 1125 교정기를 사용하였다. 정확한 교정작업을 수행하기 위해서는 실험시 측정되는 브릿지 전압에 대응되는 실속도의 신뢰성이 높아야 하기 때문에 교정기의 압력공에서 압력을 측정하여 온도보정을 한 후 속도로 환산하여 사용하였다.



(a) X-wire probe



(b) Split film probe

Fig. 2 Schematic of the sensor and direction of flow

동적 교정실험에서 사용된 동적 교정기는 Scotch yoke 원리를 이용하여<sup>(10)</sup> 제작하였으며 수평으로 이동하는 봉의 길이는 730mm이고, 회전기어의 직경은 140mm이며 수평이동 행정은 94mm이다. 따라서 동적 교정기의 구동주파수가 1~7Hz로 구동될 때 속도섭동은 0.19~1.33m/s의 범위를 가지게 된다. 이동축에는 한쌍의 기어를 장착하여 동적균형을 잡아주고 방진고무위에 동적 교정기를 설치하여 불필요한 진동을 최대한 억제하였다. 동적 교정실험에서의 실험장비는 Fig. 3과 같이 구성하였으며 측정에 사용된 센서는 I형 열선이다. 저속형 풍동의 작업구간에서의 bias flow velocity는 피토포브로 측정되어 마이크로 마노미터에서 전기신호로 바뀌고, 교정기의 구동속도는 교정기의 frame과 이동봉에 장착된 광감지센서에서 측정되어 전기신호로 바뀐다. 이들 두 신호는 정온 열선 풍속계에서의 신호와 함께 D6000에서 처리되어 자료분석시 센서의 순간위치를 알아내는데 사용되어진다.

### 2.2 수정된 King의 법칙을 이용한 SFP의 정적 교정방법

교정실험을 위하여 적절한 실험유속과 피치각을 정하여야 하는데, 본 실험에서는 실제 실험에서의 속도조건을 근거로 하여 속도구간을 1.5 m/s에서 35 m/s까지 14구간으로 정하고, 피치각은 X형 열선의 경우 +45°~-45°까지, SFP의 경우 +90°~-90°까지 10°씩 나누었다. 실험시의 유동 방향 등에 주의하여 정하여진 속도 및 피치각의 각 구간 마다의 출력전압을 측정하면 Fig. 4에 나타난 것과 같이 각 피치각과 속도에 따른 C.T.A.의 브릿지 출력전압을 얻게 된다.

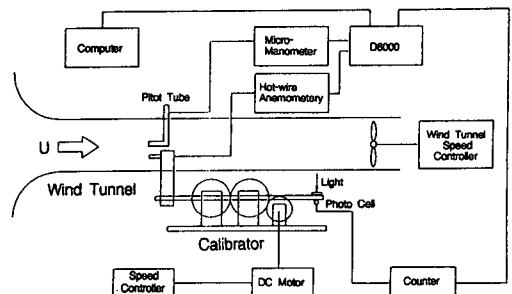


Fig. 3 Dynamic calibration experimental instrumentation

원래 SFP는 가열된 원주 주위의 불균일한 열전달 분포를 근거로 출력값이 결정되므로 SFP에 수직인 전속도  $U_N$ 은 수정된 King의 법칙으로부터 다음과 같이 각 채널에서 얻어진 출력전압들의 산술평균으로 나타난다.

$$\left(\frac{E1+E2}{2}\right)^2 = A+B\sqrt{U_N} + CU_N \quad (1)$$

여기서,  $E1, E2$ 는 각 채널의 브릿지 출력전압을,  $A, B, C$ 는 상수값을 나타낸다. 실제 식(1)은 피치각과 무관하게 잘 맞음을 확인할 수 있었으므로 두 출력전압의 평균값은 단지 전속도만의 함수라는 가정이 잘 맞는 것으로 생각된다.

피치각에 대한 응답 특성을 표시하기 위해서 다음과 같은 무차원 함수  $Z$ 를 정의한다.

$$Z = \frac{E1_r - E1_o}{E1_{60} - E1_o} + \frac{E2_o - E2_r}{E2_o - E2_{60}} \quad (2)$$

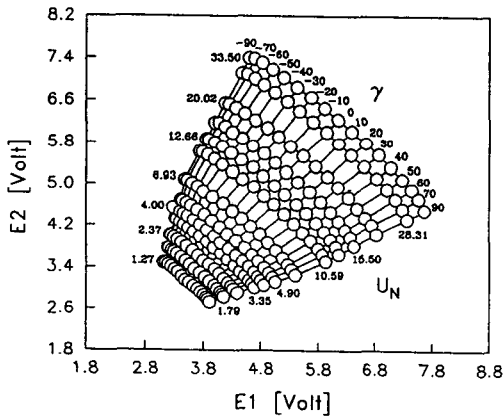


Fig. 4 Acquired bridge output voltage using the split film probe

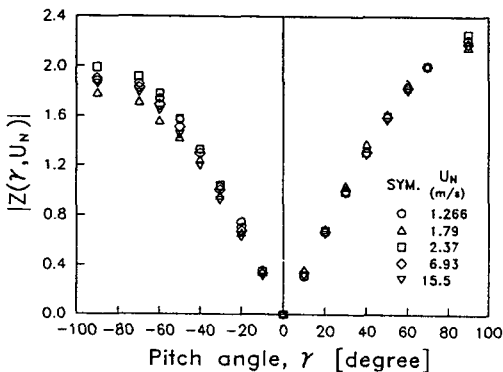


Fig. 5 Pitch angle response function by Stock's method

이때  $E1, E2$ 는 식(1)에서와 마찬가지로 각 채널의 출력전압을, 아래첨자는 피치각을 의미한다. 여기서 표준화를 위해 분모와 분자의 각 항들은 역시 수정된 King의 법칙으로 검정하였다. 식(2)의 함수  $Z$ 를 이용하여 피치각  $\gamma$ 를 구할 수 있다.

$$\gamma = C_1 Z + C_2 Z^2 + C_3 Z^3 \quad (3)$$

그러나 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 식(3)에서 정의된 피치각 응답함수  $Z$ 가 실제로는 피치각만의 함수가 아니고 속도크기에 의해서도 영향을 받고 있다. Ra 등<sup>(11)</sup>은 이 오류의 극복을 위해 응답함수  $Z$ 를 전속도만의 함수  $F(U_N)$ 와 피치각만의 함수  $G(\gamma)$ 의 곱으로 정의하여 스플릿필름의 분리면인  $\gamma = \pm 90^\circ$  근방에서 피치각 검출 정확도가 약간 나아진 교정방법을 보였다. 본 실험에서는 교정실험에서 선정된 각 속도구간에 대하여 무차원 함수  $Z$ 를 따로 따로 계산하여 얻어진 상수를 순서대로 저장한 뒤 실제 분석작업에서 이를 이용하는 방법을 택하였다. 이 방법을 사용한 결과 유입각이 큰 경우에서의 교정결과가 상당히 개선노디었음을 확인하였으며 Fig. 6에 이러한 방법에 의해 계산된 피치각과 실험시 알려진 피치각을 6가지의 속도에 대해 나타내었다.  $\pm 60^\circ$  이내에서는 교정된 피치각이 잘 맞고 있고 그 이외의 구간에서도 하나의 피치각 응답함수로 교정치를 구한 것보다는 정확한 값을 얻을 수 있지만 여전히  $\pm 60^\circ$ 를 벗어나는 범위에서는 어느 정도의 오차가 잔존하고 있다.

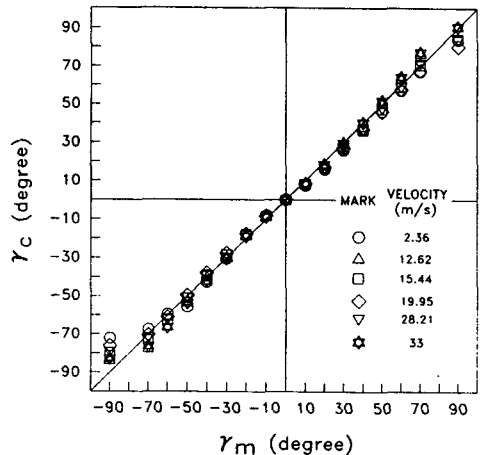


Fig. 6 Comparison of the measured and calibrated velocity magnitude

2.3 Lookup table을 이용한 새로운 교정기법

Lookup table을 이용하는 교정기법은 열선 혹은 스플릿필름을 일정 간격의 피치각에 따라 회전시키면서 여러가지 속도에서의 브릿지 출력을 측정하여 적절한 교정장수들을 구해낸 뒤 이들을 table의 형식으로 저장하고 차후 실험자료의 분석에서 이들을 이용하는 방법이다. 열선이 무한한 형상비를 가지며 열선에 수직한 속도성분만이 열전달을 야기한다는 등의 가정이 필요한 기존의 교정식과는 달리 lookup table 방식은 별도의 가정이 필요없고 실제로 열선 주위에서 일어나는 유동현상에 의한 열전달이 고려되므로 유효 피치각을 넓혀줄 수 있다는 장점이 있다.

교정기의 프로브 지지대와 회전기를 이용하여 센서를 알맞은 피치각과 속도구간의 범위내에서 브릿지 출력을 측정한다. 이 때 브릿지의 출력전압을 각각  $E1$ ,  $E2$ 라 하고 피치각을  $\gamma$ , 해당 구간의 전속도를  $U_N$ 이라고 한다. 이 값들을 가지고 다음의 과정을 거쳐 교정상수를 얻는다.

(1) 각각의 피치각에 대하여  $E2$ 와  $U_N$ 을  $E1$ 의

함수 표시한다.

$$E2 = f1(E1)|_{\gamma}, U_N = f2(E1)|_{\gamma}$$

이 때의 함수  $f1$ ,  $f2$ 는 선형 1차식과 비선형 다항식을 이용하여 근사하였고, 그 근사정도는 Fig. 7과 Fig. 8에 나타나 있다.

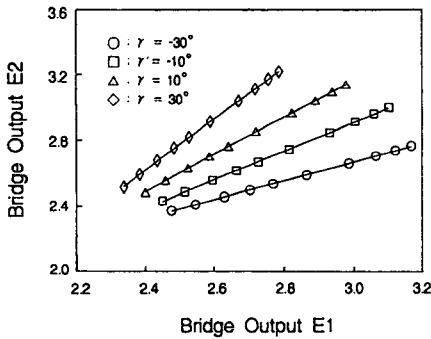
(2)  $E1$ 의 최대치와 최소치 사이 구간을 일정 간격으로 나눈 뒤 각  $E1$ 값들에 대해 앞에서 구한  $\gamma$ 와  $U_N$ 을  $E2$ 의 함수로 나타낸다.

$$\gamma = f3(E2)|_{E1}, U_N = f4(E2)|_{E1}$$

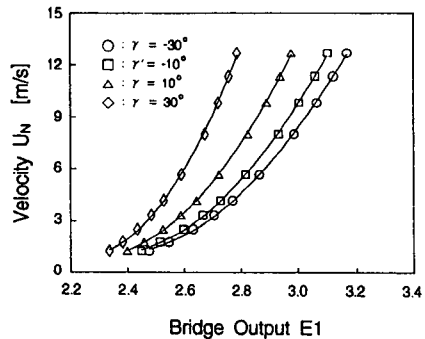
함수  $f3$ ,  $f4$ 는 3차 스플라인 보간법을 사용하여 근사하였으며 Fig. 9와 Fig. 10에 근사정도가 나타나 있다.

(3) 각 구간별로 얻어진 (1), (2) 과정에서의 상수값들을 table의 형태로 저장한다. 브릿지 출력  $E1$ ,  $E2$ 가 얻어지면 이 table에서  $U_N$ 과  $\gamma$ 를 찾아내고 다음 식들로부터 순간 속도성분을 구해낼 수 있게 된다.

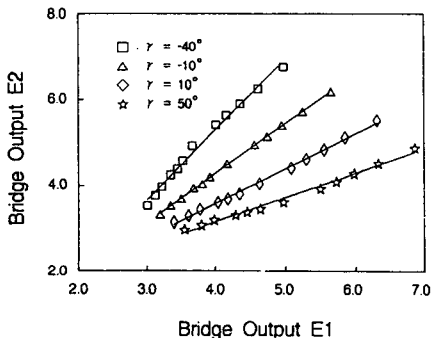
$$u = U_N \cos\gamma, v = U_N \sin\gamma \tag{4}$$



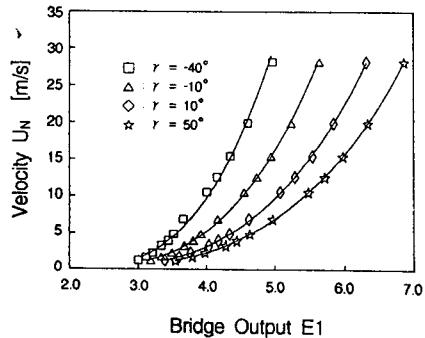
(a) X-wire probe



(a) X-wire probe



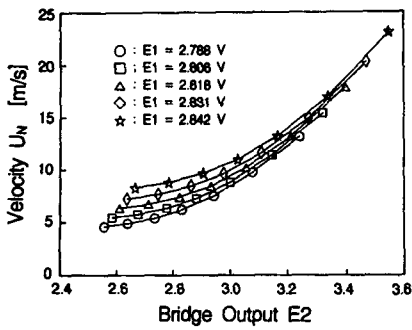
(b) Split film probe



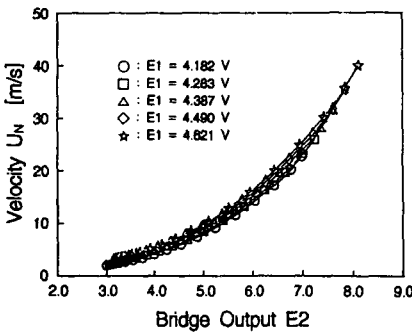
(b) Split film probe

Fig. 7 Fitting degree of E1-E2 relations

Fig. 8 Fitting degree of E1- $U_N$  realations

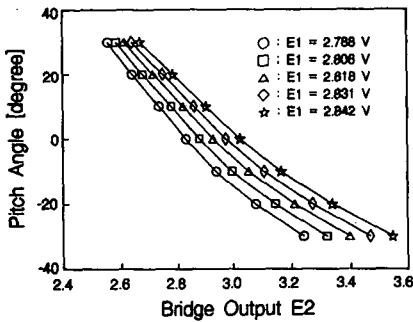


(a) X-wire probe

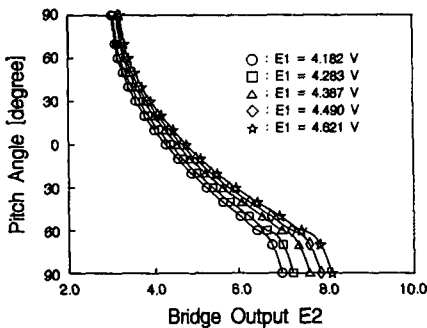


(b) Split film probe

Fig. 9 Fitting degree of E2-U<sub>N</sub> relations



(a) X-wire probe



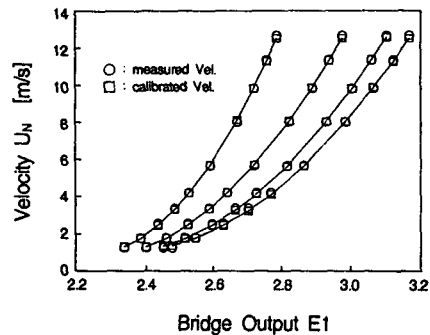
(b) Split film probe

Fig. 10 Fitting degree of E2- $\gamma$  relations

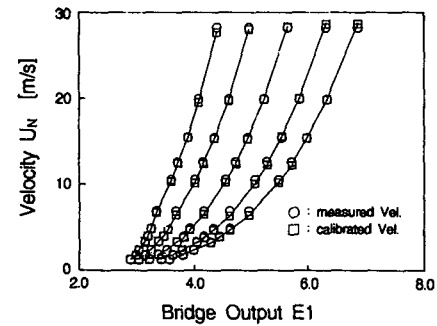
이상의 방법을 통하여 교정속도와 실험시 측정된 실속도를 Fig. 11에 비교하여 놓았는데 전 속도구간에 대하여 교정값이 잘 근사하여 있음을 알 수 있다.

2.4 정적 교정기법간의 비교

King의 법칙과 look-up table을 이용한 정적교정 기법간의 비교를 위하여 저속형 개회로 풍동내에 원형 실린더를 장착하고 근접 후류를 측정된 후가 교정방법을 사용한 자료들을 이용하여 출력신호를 분석하여 보았다. 실험에서 사용된 풍동의 시험구간의 단면적은 305 mm×305 mm이고, 길이는 2430 mm였으며 설치된 원주는 직경이 10 mm인 스테인레스 봉으로 제작되었다. 시험구간 입구에서의 평균 유속  $U_0$ 는 6 m/s였고 Re수는 약 4000 정도였다.  $X/D=3.5$ 인 위치에서의 평균 유속과 난류 강도들을 분석한 결과가 Fig. 12에 나타나 있다. 센서의 특성상 SFP의 검출성능이 뛰어난을 알 수 있고 X형 열선의 경우만 비교하면 look-up table 방식을 이용하는 경우가 측방향의 열전달이 고려되지



(a) X-wire probe



(b) Split film probe

Fig. 11 Comparison of measured and calibrated velocity

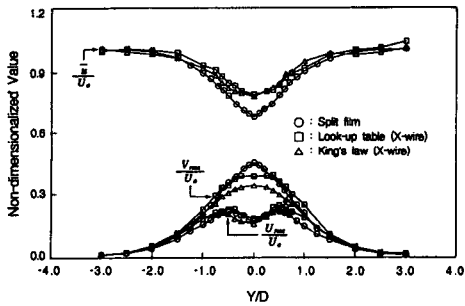


Fig. 12 Distributions of the mean velocity and turbulent intensity

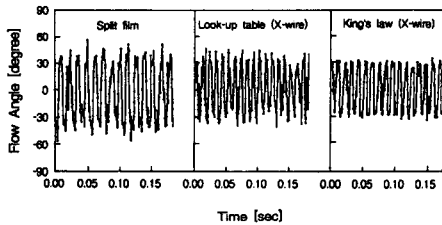


Fig. 13 Distributions of the instantaneous flow angle variation

않는 King의 법칙을 이용한 경우보다 나은 결과를 보이므로, 이러한 경향은 Fig. 13의 피치각 검출 성능 비교에서도 마찬가지로 나타난다. 따라서 유입각이 클 것으로 예상되는 유동장의 측정에는 스플릿 필름을 사용하는 것이 좋으며, X형 열선을 사용하는 경우에는 look-up table 방식으로 교정하여 실험자료를 얻는 것이 신뢰성 측면에서 유리하다.

2.5 동적 교정기법에 의한 민감도 측정

열선풍속계에 의한 난류 측정에서의 최대 난점은 역시 계측기의 교정특성이 갖는 비선형성이라고 볼 수 있다. 열선풍속계의 일반적인 교정방법은 알고 있는 균일 유동장에 프로브를 위치시키고 평균 속도(U)의 변화에 따른 정은 열선풍속계 브릿지의 출력전압(Eo)의 관계를 열선 필라멘트에 대한 열 전달 경험법칙인 King의 법칙을 따라 교정함수 형태를 정하여 계수나 지수를 실험으로 결정하는 것이다.<sup>(12)</sup> 이와 같이 측정된 신호를 이용하여 어떠한 방법으로든 Eo와 U 사이의 관계를 근사하게 알아내어야 하므로 국소도함수  $\partial E_o / \partial U$ 를 구해야 하는데 이 값을 국소민감도(local sensitivity)라 한다. 그러나 측정된 교정자료는 불연속적인 값으로

나타나므로 이로부터 정확한 도함수를 얻는다는 것은 매우 힘든 것이 사실이다. 이와 같은 어려움을 극복하기 위하여 Perry와 Morrison<sup>(8)</sup>은 동적 교정기(dynamic calibrator)를 이용하는 방법을 제시하였다. 동적 교정기는 열선 프로브를 정상유동속에서 0~10Hz 사이의 완벽에 가까운 단진동 왕복을 시켜주는 장치인데 이러한 소섭동시험을 통해 계측기의 작동범위내의 각 상태별 민감도  $\partial E_o / \partial U$ 를 쉽게 구할 수 있다. 즉, 속도섭동이 충분히 작은 값을 가지게 된다면 다음과 같은 근사식을 사용할 수 있다는 것이다.

$$\frac{\partial E_o}{\partial U} \approx \frac{\Delta E_o}{\Delta U} \tag{5}$$

선행연구에 의하면 동적 교정실험에 있어 열선의 선형성을 확실히 하기 위하여 교정기의 bias velocity  $U_w$ 이내의 범위에서 구동되어야 한다.<sup>(8)</sup> 이를 Fig.14에서 확인할 수 있는데 이 그림은 bias velocity를 3m/s에 고정시키고 속도 섭동치에 대한 함수로서 열선의 민감도를 표시한 것이다. 0.1  $U_w$  이내의 속도섭동범위에서 열선의 출력이 안정되어 있으며, 이는 흐름방향의 섭동까지 고려하면 이보다 더 작은 범위에서 교정실험이 이루어져야 할 것으로 생각된다.

Fig. 15는 본 실험에 사용된 동적 교정기를 구동하였을때 열선의 실제 출력신호를 나타낸 것인데 (a)와 (b)는 bias flow가 없는 상태이고 (c)와 (d)는 각각 5m/s와 10m/s의 bias flow가 있는 경우이다. 그림에서  $U_w$ 가 커짐에 따라 출력전압의 피크치 진폭이 약간 감소하는 경향을 보이고 있으며 열선이 1호 단진동함에 따라 출력전압은 2사이클을 이루게 됨을 확인할 수 있다.

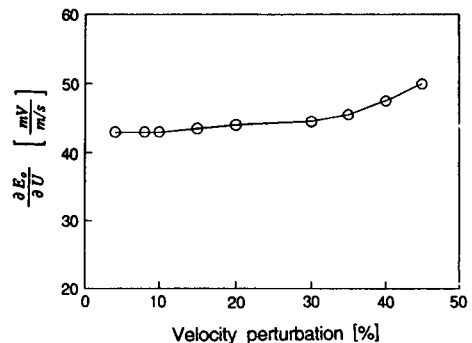


Fig. 14 Non-linearity of system for longitudinal velocity perturbation

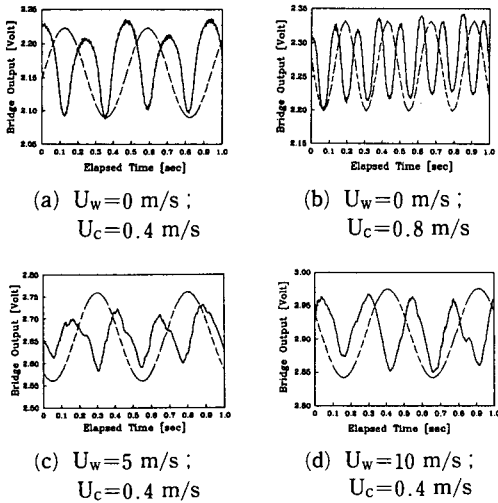


Fig. 15 Typical oscillating waveforms of bridge output and sensor position

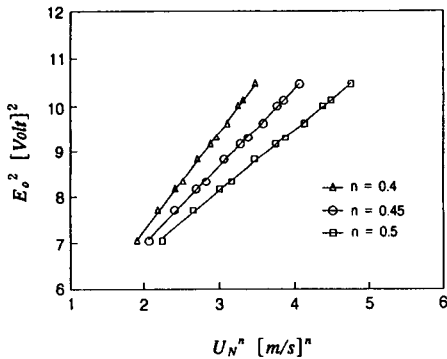


Fig. 16 Alternative forms of static calibration

2.6 정적 교정기법과 동적 교정기법의 국소민감도 비교

일반적인 정적 교정기법에서 사용되는 King의 법칙은 열선주위의 열전달효과로부터 출력전압과 유입 전속도간의 관계를

$$E_o^2 = A + BU_N \tag{6}$$

의 형태로 나타내며 여기서,  $n$ 은 대개 0.4~0.5의 값을 가진다고 알려져 있다. 원래 King의 법칙에서 제시된  $n$ 은 0.5였으나 또 다른 연구자들에 의해 0.45의 값이 보다 유효함이 밝혀졌는데 Fig. 16에서 지수  $n$ 값에 따라 교정식의 선형정도가 달라짐을 알 수 있다. 위 식을 미분하여 국소민감도의 식을 유도하면

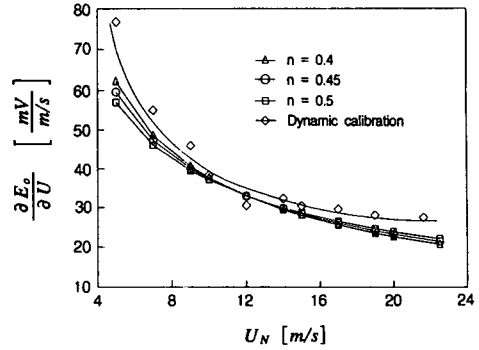


Fig. 17 Local sensibility determined by static calibration and dynamic calibration

$$\frac{\partial E_o}{\partial U_N} = \frac{nBU_N^{n-1}}{2E_o} \tag{7}$$

이 된다. 식(6)에서 교정상수  $A, B$ 는 일반적인 곡선 근사에 의해서 쉽게 결정되어지며 이렇게 결정된  $B$ 를 식(7)에 대입하여 정적교정 국소민감도를 계산해낼 수 있다. 또한 동적교정 국소민감도는 동적교정 실험에서 측정된 자료들을 식(5)에서와 같이 정리하면 얻어지게 되는데 이를 Fig. 17에 함께 나타내었다. 본 연구에서 행한 동적 교정실험은 선행 연구자들<sup>(8,9)</sup>이 지적한대로 센서 및 지지대의 관성에 의한 진동과 구동기어에서 발생하는 규칙적인 진동 등으로 인하여 완벽하게 이루어지지 못했으며 이를 Fig. 15의 센서 출력파형에서 확인할 수 있다. 그 결과 Fig. 17에서의 동적교정 국소민감도의 선형성을 정밀하게 맞추어내지는 못했으나 다른 인자에 독립적인 국소민감도 선형성의 필요성이 제시되었다. Fig. 16과 Fig. 17에서 알 수 있듯이 정적 교정기법에서는 교정식 자체에 의한 선형성은 좋으나 bias velocity가 민감도에 큰 영향을 미치고  $n$ 에 따라 보정곡선의 형태가 달라지게 된다. 따라서 완벽한 소섭동시험을 통한 동적교정을 실시하여 교정식 지수  $n$ 에 의존하지 않는 국소민감도 선형성을 확보할 필요가 있다.

3. 결 론

컴퓨터를 이용하여 열선과 스플릿필름을 교정하는 새로운 기법을 개발하고 종래의 교정기법과 비교하여 개선정도를 알아보았으며 동적 교정기법을 통한 국소민감도를 계산하여 다음과 같은 결론을 얻었다.



(1) 스플릿 필름 프로브의 교정에서 Stock의 기법을 적용할 때 피치각 응답함수  $Z(\gamma)$ 는 전속도  $U_N$ 에 대해 독립적이지 못하므로  $Z(\gamma, U_N)$ 을 나타내어야 한다.

(2) 열선과 스플릿필름의 교정에 이어 look-up table 방식의 교정기법이 일반적인 King의 법칙을 사용한 경우보다 훨씬 개선된 결과를 보이니, 신호 분석에 소요되는 연산시간은 좀 더 오래 걸리며 교정시 측정된 속도구간 외의 측정은 어렵다는 단점이 있다.

(3) 새로운 교정기법을 사용하면 실험시 열선풍속계의 선형기(linearizer)나 TRUE RMS meter와 같은 아날로그 계측장비의 필요성이 없어지며 실험시에 raw data만 확보하면 되므로 실험시간이 수배 단축되어 실험조건의 변화나 열선의 drift 현상을 최대한 줄일 수 있다.

(4) 정적 교정기법만으로는 bias flow의 속도값이 국소민감도에 주는 영향은 파악하기 어려우며 동적교정기법을 통하여 이를 보완할 수 있다.

아울러 본 연구에서 시도한 동적 교정실험에서 나타난 난점들을 분석할 때 완벽한 소섭동시험을 위하여는 마찰에 의한 진동을 줄일 수 있는 재질로 구동장치를 만들고, 센서에 가해지는 모멘트를 최소화할 수 있는 지지방법을 개발하여 전체 프레임에 최대한의 방진설비를 갖추어야 할 것으로 사료된다.

### 후 기

본 연구는 1991년도 학술진흥재단 자유공모과제로 수행되었으므로 연구수행에 도움을 주신 재단 및 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고문헌

(1) Demirdzic, I. Gosman, D. and Issa, R.I. 1981, "Comparison of computation with experiment-Summary Report," *AFSOR-HTTM, Stanford Conference on Complex Turbulent Flows*, Vol. II, p. 1383.

(2) 김경천, 정명균, 1985, "2차원 수직벽을 지나는 재부착 박리 전단층의 난류구조에 관한 연구 (I)," *대한기계학회논문집*, 제9권, 제4호, pp. 403~413.

(3) 김경천, 정명균, 1987, "2차원 수직벽을 지나는 재부착 박리 전단층의 난류구조에 관한 연구 (II)," *대한기계학회논문집*, 제11권, 제4호, pp. 681~689.

(4) Kiya M. and Sasaki, K. 1983, "Structure of a Turbulent Separation Bubble," *J. Fluid Mech.*, Vol. 137, p. 83.

(5) Tutu N.K. and Chevray, R. 1975, "Cross-wire Anemometry in High Intensity Turbulence," *J. Fluid Mech*, Vol. 71, pp. 785~800.

(6) Westphal R. V. and Metha, R.D. 1984, *Crossed Hot-Wire Data Acquisition and Reduction System*, NASA-TN-85871.

(7) Lueptow, R.M. Breuer, K.S. and Haritonidis, J. H. 1988, Computer-Aided Computer-Aided Calibration of X-probes Using a Look-Up Table," *Experiments in Fluids*, Vol. 6, pp. 115~118.

(8) A.E.Perry and G. L. Morrison, 1971, "Static and Dynamic Calibrations of Constant-Temperature Hot-Wire Systems," *J.Fluid Mech.*, Vol. 47, pp. 765~777.

(9) Bellhouse, B.J. and Rasmussen, C.G., 1968, *Disa Info.*, No. 6, p. 3.

(10) Perry, A.E. 1982, *Hot-Wire Anemometry*, Clarendon press Oxford.

(11) Ra, S.H. Chang, P.K. and park, S.O. 1990, "A Modified Calibration Technique for the Split Film Sensor," *Meas. Sci. Technol.* 1. pp. 1156~1161.

(12) Bradshaw, P. 1971, *An Introduction to Turbulence and Its Measurement*, Pergaman Press, New York.

(13) TSI, 1975, *Split-Film Sensor Calibration and Applications*, Thermo-System Inc. Technical Bulletin TB20, Minnesota