

열선의 검정방법들에 대한 연구*

정 의 준
기계공학과

<요 약>

단일경사열선의 검정곡선들에 따르는 정확성을 파악하기 위해 수정된 Okiish방법을 이용한 검정식의 검정곡선과 Inoue방법의 검정식을 이용한 검정곡선이 이 검정곡선들을 얻는데 사용한 실험 데이터들과 비교되었다.

그 결과 단일경사열선의 물리적 특성에 좀 더 근접된 모델을 사용한 수정 Okiish방법의 검정곡선이 Inoue방법의 검정곡선 보다 오차가 적다는 것이 판명되었다.

STUDY FOR CALIBRATION METHODS OF HOT WIRE

Wui Jun Chung
Dept. of Mechanical Engineering

<Abstract>

The accuracy of the calibration curve for the slanted hot wire is defined by the difference between the data making the calibration curve and the curve itself. And the error about the accuracy from the result of the difference is obtained.

In comparison the accuracies of the calibration curves modified Okiish method is better than Inoue method from the results of the differences. This may be due to the fact that the model of modified Okiish method may reflect well the closer physical characteristics about the calibration curves for the slanted hot wire than that of Inoue method.

* 본 논문은 1998년 울산대학교 대학연구비에 의해 이루어진 연구결과임

1. 서론

유체기계의 유동은 여러유동이 결합되어 나타나므로 대단히 복잡한 구조를 갖고 있다. 그러므로 에너지를 효율적으로 이용한다는 측면에서 유체기계의 성능의 향상은 설계기술의 향상에서 비롯되며 이것은 유체기계의 복잡한 유동구조를 파악하여 복잡한 여러유동에 대한 서로의 상관관계를 알아야 하며 결국 유동장의 정확한 측정기술에 귀착된다. 이런 이유로 Mikolajczak은 터어보 기계의 설계기술향상은 비정상유동 및 유동구조에 대한 깊은 이해를 통하여 찾아야 한다고 제시하였다.⁽¹⁾

비정상 3차원 유동장의 측정은 여러 가지 계측기기로 할 수 있으나 그 중에서도 간편하고 빠른 주파수 응답을 갖는 기기로서는 열선 풍속계가 가장 적합하다. 그러므로 열선 풍속계에 대한 여러 가지 연구가 지금까지 많이 진행되어 왔다.

열선 중 54.6° 단일경사 열선으로 터어보 기계의 후방유동장을 측정하는 방법이 1972년 Whitfield, C.E.⁽²⁾에 의해 처음 확립되었고 Hirsh, C.⁽³⁾ 및 Schmidt, D.P. & Okiish, T.H.⁽⁴⁾는 각각 1977년 내용은 서로 약간 다르지만 Whitfield 방법을 개량하여 범용적인 임의 각도의 경사열선을 이용하는 방법을 확립하였으며 또한 1982년 Inoue, M.⁽⁵⁾ 등은 Hirsh, C.⁽³⁾ 등에서 제시된 식과는 다른 식을 이용하여 좋은 결과를 얻었다. 국내에서도 Inoue, M.의 방법⁽⁵⁾을 이용하여 얻은 결과에 대하여 비교검토가 이미 이루어졌다.⁽⁶⁾

본 연구에서는 단일경사열선에 대한 Inoue, M.의 방법⁽⁵⁾ 또는 수정된 Schmidt, D.P. & Okiish, T.H.의 방법⁽⁷⁾을 이용한 검정곡선들을 이 검정곡선들을 얻는데 이용된 데이터들과 비교한다. 그 방법으로는 Inoue, M.의 검정방법과 검정곡선은 이미 제시되었기 때문에 참고 문헌(6)을 참조하도록 하고 본 논문에서는 수정된 Schmidt D.P. & Okiish, T.H.의 검정방법을 소개한 다음 앞의 두 방법에서 구한 오차를 서로 비교한다. 그러므로 해서 정확한 3차원 유동해석의 전제조건이 되는 검정곡선들의 상대적인 정확성을 비교,제시하고자 한다.

2. 이론

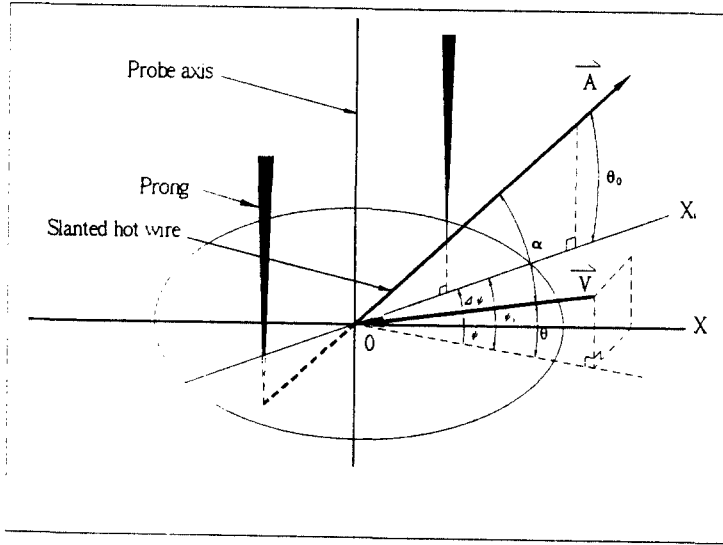


Fig.1 Hot wire configuration

Fig.1은 단일경사열선의 개략도이다.

열선의 프루브 축과 수직으로 만나는 평면에 열선 및 속도 벡터가 이루는 각이 각각 프루브 경사각 θ_0 및 피치각 θ 이다. 이 평면에서 X축은 기본 좌표축이고 X_1 는 열선이 평면에 투영된 방향이다. 이 두 축 사이의 각은 스윙(swirl)각의 변화 $\Delta\psi$ 이며 $\psi_1 - \psi$ 와 같다. 열선과 속도 벡터가 이루는 요우각 α 는 열선의 방향벡터 A와 속도벡터 V를 내적 함으로써 다음과 같이 구한다.⁽⁶⁾

$$\cos \alpha = \cos \theta_0 \cdot \cos \theta \cdot \cos(\psi + \Delta\psi) + \sin \theta_0 \cdot \sin \theta \quad (1)$$

열선에 대한 검정은 속도검정과 각도검정으로 이루어지며 이 중 속도검정은 열선의 출력전압과 유체속도와 관계를 나타내며 그 관계는 다음과 같은 식(2)로 나타낼 수 있다.⁽⁴⁾ 절대 속도 (열선에 수직한 유속 : $\alpha = \pm 90^\circ$)는

$$V = K_1 + K_2 E_L + K_3 E_L^2 \quad (2)$$

이다.

또한 각도검정은 유체속도(V), 요우각(α), 피치각(θ)를 변수로하는 유효냉각속도비 (effective cooling velocity ratio)로 제시된다. 이는 요우각이 직각과 임의각일 때 이들 각각의 전압의 비이며 식(4)와 같이 표현된다. 이 식들은 Schmidt, D.P. & Okiishi, T.H.⁽⁴⁾가 처음 제시하였다. 그러나 본 연구에서 이용된 식(4)는 Okiishi, T.H.⁽⁴⁾의 식을 수정, 보완한 Shin, H.W.⁽⁷⁾이 제시한 식이다.

유효속도 (열선에 수직하지 않은 유속 : $\alpha \neq 90^\circ$)는

$$V_e = K_1 + K_2 E_L + K_3 E_L^2 \quad (3)$$

이며

유효냉각속도비는

$$V_e/V = b_0 + b_1 \alpha + b_2 \theta + b_3 V + b_4 \alpha^2 + b_5 \theta^2 + b_6 \alpha^3 + b_7 \theta \alpha + b_8 \alpha V + b_9 \theta V \quad (4)$$

이다.

여기서 식(2)의 K_1, K_2, K_3 는 속도검정으로, 식(4)의 $b_0 - b_9$ 는 각도검정으로 정한다.

3 실험방법

3-1 속도검정

열선의 특성을 알아보기 위하여 열선의 속도검정을 행하였다. 이미 언급했듯이 열선의 출력전압을 열선풍속계에서 기계적으로 선형화하지만 기계적 특성상 완전한 선형이 되기는 어렵다. 따라서 이러한 문제점을 보완하기 위해 열선에 수직한 유체속도 V 와 선형화장치를 통과한 열선풍속계의 출력전압 E_L 을 2차식으로 제시하였다. 그러나 Inoue⁽⁵⁾는 E_L 을 1차식으로 제시하였다.

속도검정방법은 열선의 출력전압이 최대가 되는 조건, 즉 $\theta = 0^\circ$ 일 때 $\alpha = \pm 90^\circ$ 두 조건에서 속도를 0m/s에서 50m/s까지 증가시키면서 열선의 출력을 측정한다. $\alpha = \pm 90^\circ$ 는 열선의 양면에 있어서 그 냉각효과가 서로 다르므로 식(2)의 K_1, K_2, K_3 는 열선의 양면에 대해 각각 최소자승법으로 구한다.

3-2 각도검정

유체의 유동방향에 대한 열선의 특성을 알기 위해 스윙각, 피치각 및 유동속도의 변화에 따르는 열선의 출력전압의 영향을 조사함으로써 각도검정을 수행하였다.

유동방향에 대한 열선의 특성은 식(4)의 V_e/V 로 나타낼 수 있으며 이 값은 열선의 방향과 유동방향의 사이각인 요우각을 평면에 투영시켜 얻은 스윙각을 변화시킬 때 얻어지는 값으로 다시 설명하면 요우각이 직각인 식(2)에 대한 요우각이 임의각인 식(3)의 값을 무차원한 값이다. Inoue의 각도검정방법⁽⁵⁾은 출력전압의 비를 cosine 곡선으로 제시하였다.

각도검정실험은 측정하고자 하는 유동장의 예상되는 속도범위, 피치각 및 요우각 범위 안에서 이루어졌다. 일정한 유속에서 피치각을 -20° 에서 20° 까지 10° 씩 변화시키고 각 피치각에서 스윙각을 -90° 에서 90° 까지 10° 씩 증가시키면서 V_e/V 를 측정한다. 각 피치각에서 측정된 V_e/V 의 출력값을 이용하여 요우각 -90° 에서 0° 까지 또 0° 에서 90° 까지의 각각의 데이터를 최소자승법을 사용하여 식(4)의 $b_0 - b_9$ 를 결정한다. 여기서 요우각 -90° 에서 0° 까지 또 0° 에서 90° 은 열선의 양면을 의미한다.

다음의 Fig.2 및 Fig.3은 Inoue 및 Okiish의 방법으로 속도검정곡선 및 각도검정곡선을 구하는 프로그램의 흐름도이다.

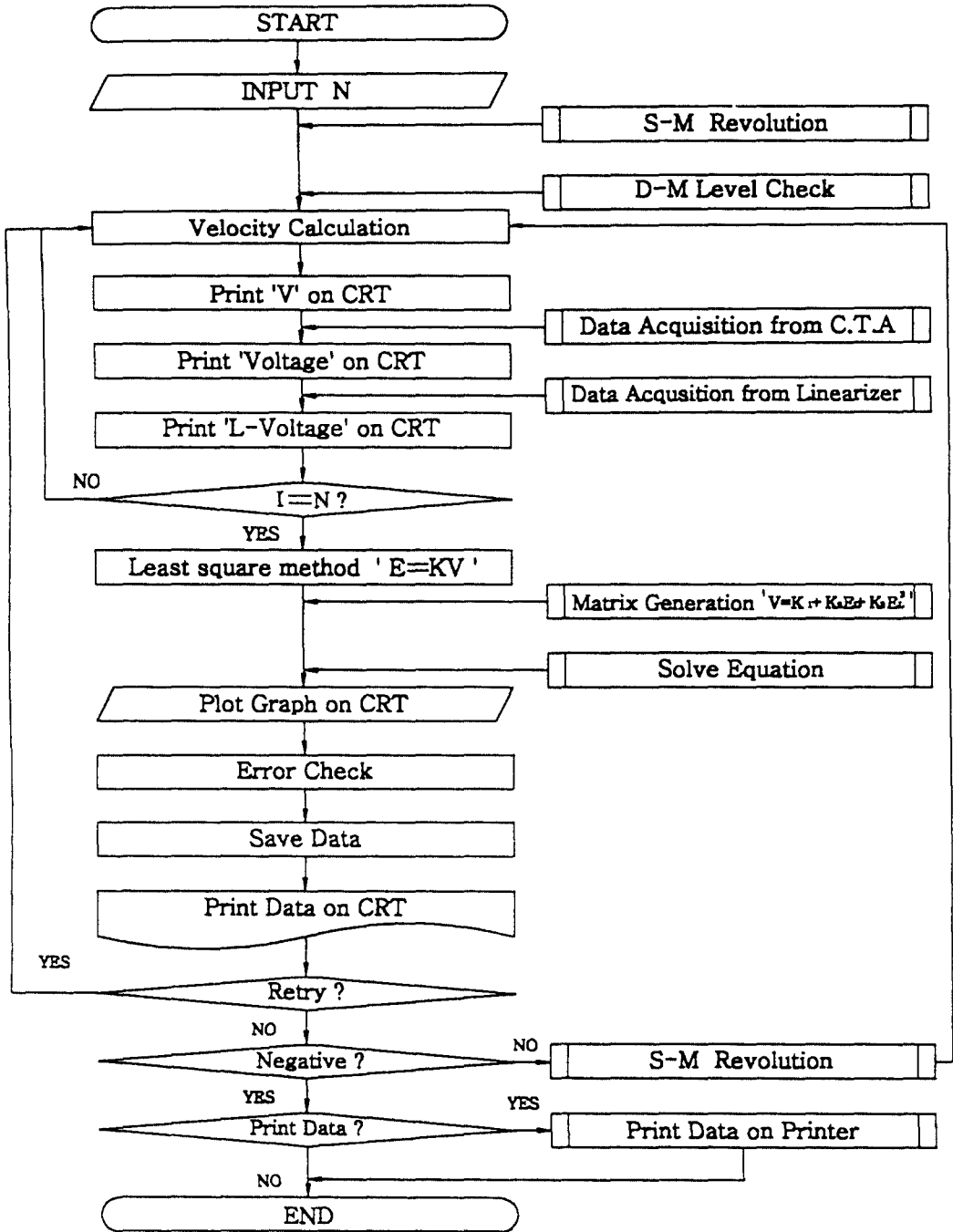


Fig. 2 Velocity calibration flow chart

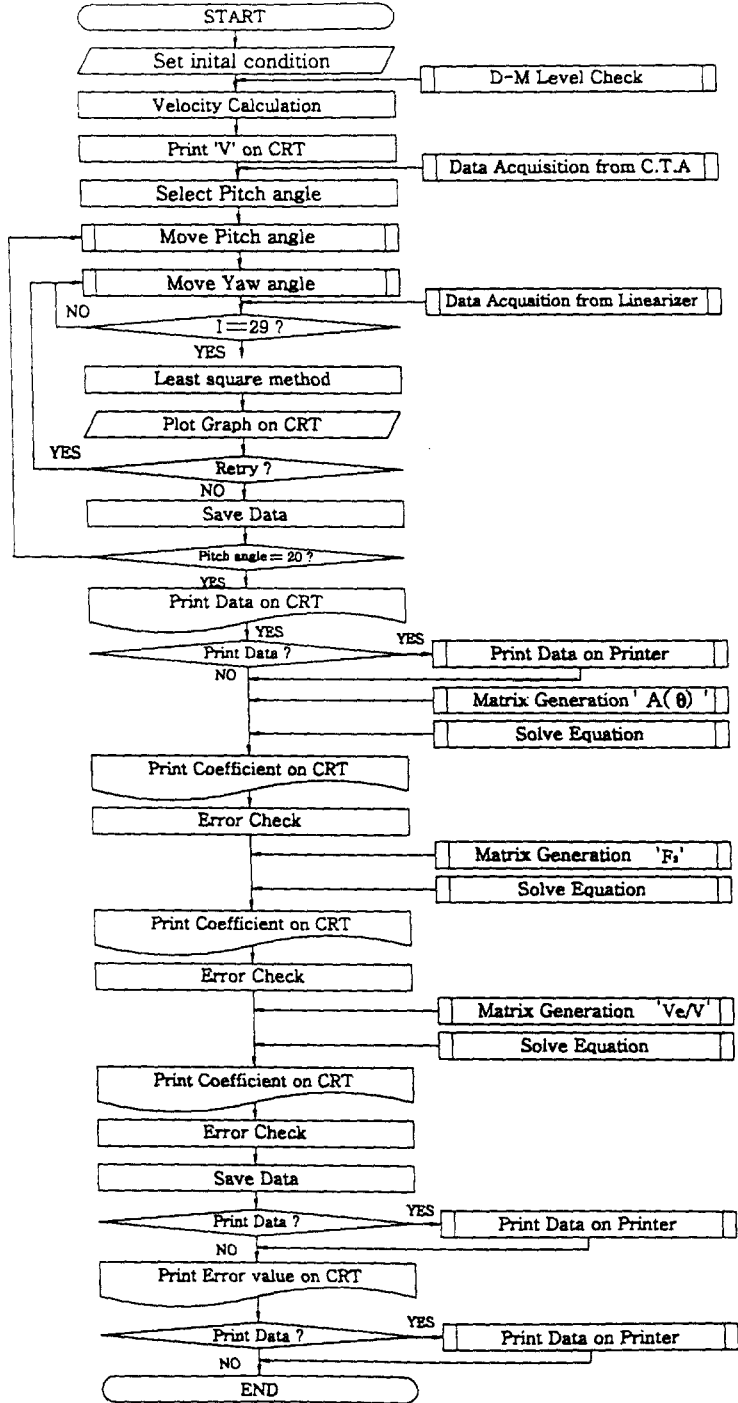


Fig. 3 Angle calibration flow chart

4 실험장치

실험장치는 유동을 발생시키고 균일하게 유지시키는 장치 및 자동계측 장치로 구성된다. 또 자동계측 장치는 데이터 처리장치 및 프루브 이송장치로 되어있으며 이는 퍼스널 컴퓨터로 제어한다. 여기서 사용한 단일경사열선은 재질이 텅스텐이고 길이 및 직경이 각각 1.7mm 및 $5\mu\text{m}$ 이며 경사각이 45° 인 모델 0253R-T5의 KANOMAX제품이다.

실험장치는 참고문헌(6)의 실험장치를 이용하였다.

5 실험결과 및 고찰

5-1 속도검정

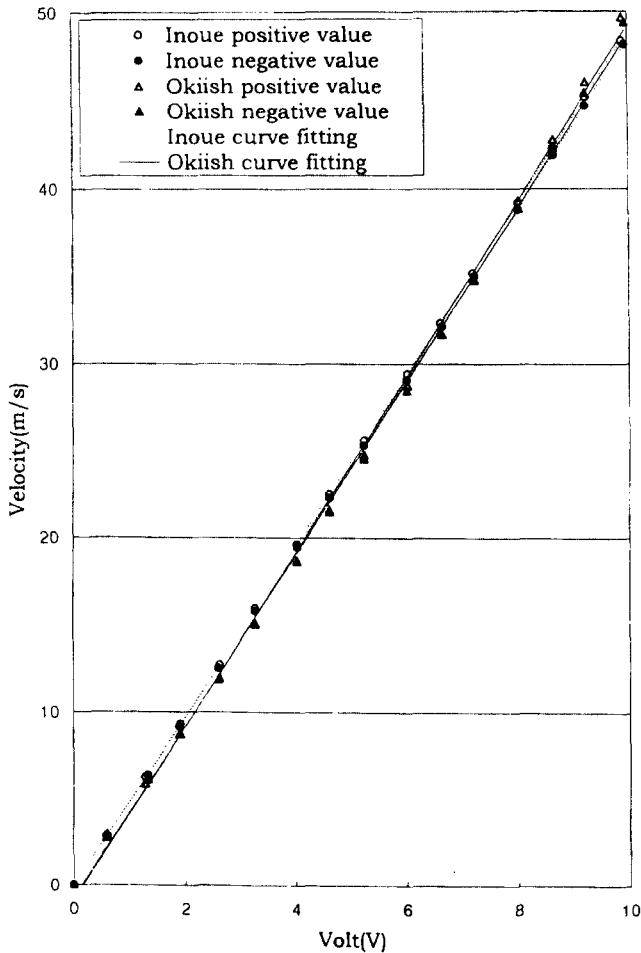


Fig. 4 Velocity cablibration curves

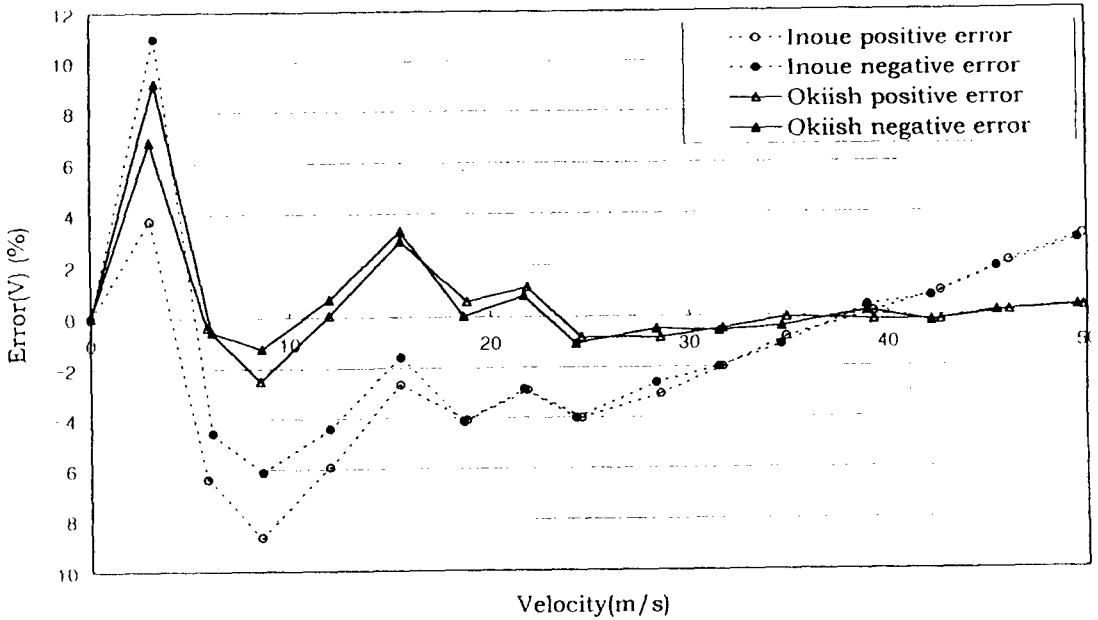


Fig. 5 Errors for velocity calibration curves

Fig.4와 Fig.5에서 기호로 표시한 점들은 열선풍속계의 선형화 장치의 출력전압에 대한 속도데이터와 오차이며 기호안이 하얗게 비워 있는 것과 까맣게 채워 있는 것은 각각 열선이 양 혹은 음의 방향으로 놓여 있을 때 측정된 경우이다. 또 Fig.4에서 점선 및 실선은 각각 Inoue 및 Okiish의 방법으로 구한 검정식을 나타낸 것이며, 이 검정식은 속도데이터를 최소자승법에 적용하여 구하였으며 Fig.5에서 점선 및 실선은 각각 Inoue 및 Okiish의 방법으로 구한 오차를 나타낸 것이다.

유동장의 속도는 속도검정에서 제시한 최소자승법으로 구한 검정식을 이용하여 구하므로 검정식의 정확성은 측정된 속도의 신뢰도를 반영한다. 따라서 측정속도의 신뢰도를 알아보기 위해 측정된 속도와 검정식으로 나타나는 속도 그 차를 검정식의 속도를 기준으로 하는 백분율의 오차로 식(5)와 같이 나타내어 그 결과를 Fig.5에 제시하였다.

$$\text{Error}(V) = (V - V_2) / V_2 * 100 \quad (5)$$

Fig.5에서 약 6m/s이하의 저속에서는 큰 오차값을 갖는다. 이것은 작은 속도차라 할지라도 작은 값의 검정식에 대한 상대적인 수치이므로 큰 오차로 나타난다. 또한 음, 양의 오차가 속도의 증가에 따라 같은 경향을 보여주고 있을 뿐만 아니라 Inoue, Okiish 각각의 오차도 같은 경향을 보이고 있다. 그러나 Inoue의 오차는 저속에서 음, 양의 오차가 불일치를 보이거나 속도가 증가할수록 일치함을 보이고 있고 그 크기는 -8% ~ 3%까지 큰 폭으로 변화하고 있다. 한편 Okiish의 오차는 약 9m/s 혹은 약 15m/s에서 $\pm 3\%$ 를 제외하고는 저속에서 고속까지(6m/s이상) 오차 1%이내의 고른 분포를 보여주고 있다.

5-2 각도검정

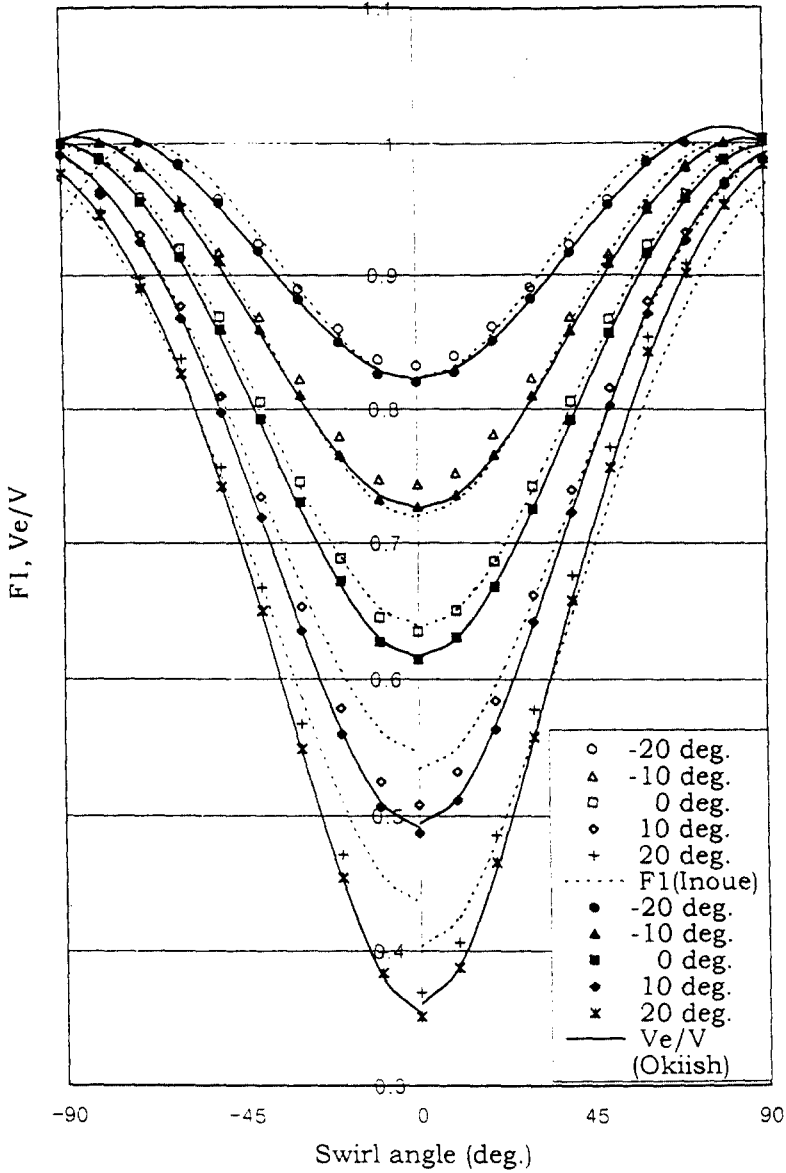


Fig. 6 Angle calibration curves

Fig.6에서 기호로 표시된 각 점들은 열선이 5개의 각 피치각(-20°, -10°, 0°, 10°, 20°)에서 요우각(-90° ~ 0, 0~90°)을 변화시킴에 따라 속도비(F1, Ve/V)를 측정된 값들이다. 점선 및 실선은 이들 각 점을 요우각이 0°에서 ±90°까지 각각 최소자승법을 적용하여 구하였으며 여기서 점선은 Inoue, 실선은 OKiish 방법을 표시한다. Inoue, OKiish의 점선 및 실선은 경향은 같지만 약간의 차이가 있다.

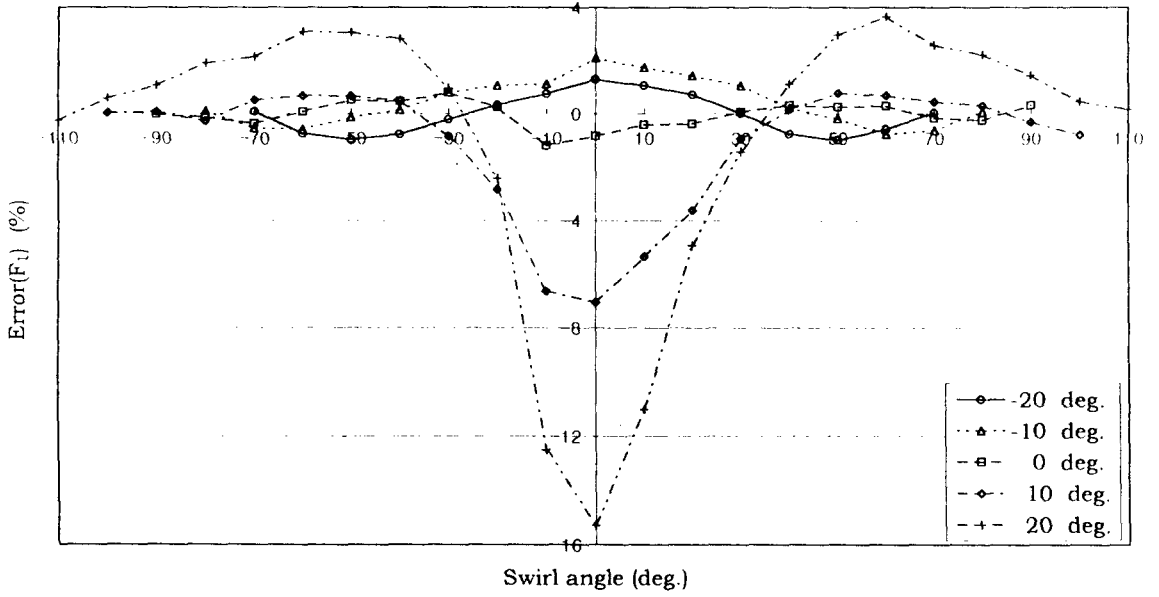


Fig. 7 Errors of F_1 (Inoue)

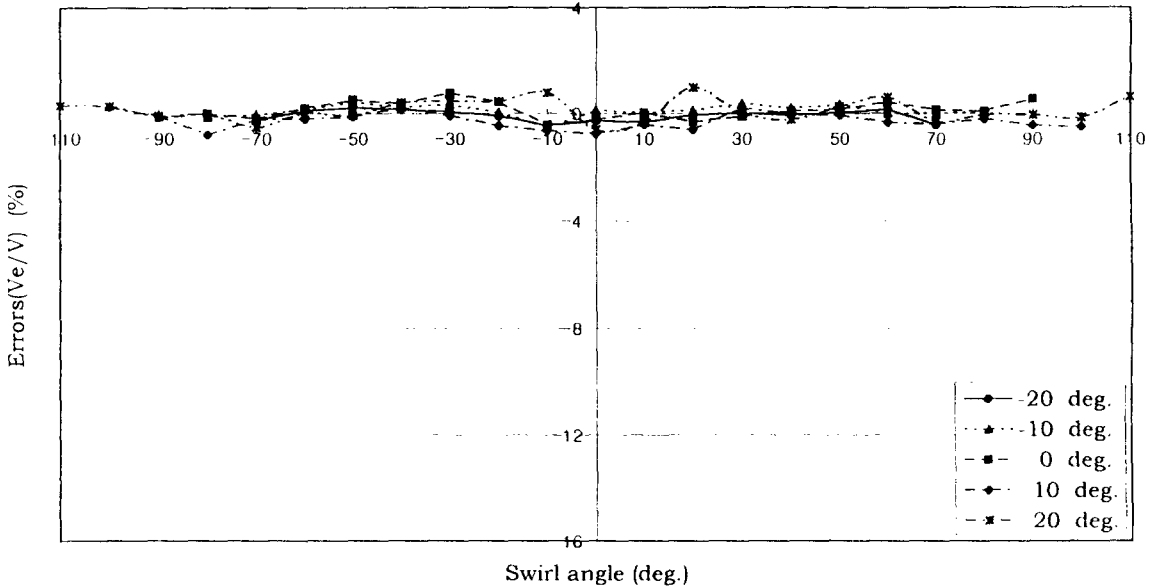


Fig. 8 Errors of V_e/V (Okiish)

앞서 속도검정에서 언급한 것과 같은 이유로 각 피치각의 각도검정측정데이터와 이들 측정데이터를 최소자승법으로 정리한 각도검정식과의 차를 각도검정식에 대한 백분율로 오차를 정의했으며 이 오차는 Inoue, Okiish방법에 따라 각각 식(6) 및 식(7)과 같고 그 결과를 Fig.7 및 Fig.8에 각각 나타내었다.

$$\text{Error}(F_1) = ((F_1)_r - (F_1)_L) / (F_1)_L * 100 \quad (6)$$

$$\text{Error}(V_e/V) = ((V_e/V)_r - (V_e/V)_L) / (V_e/V)_L * 100 \quad (7)$$

Inoue 방법에 따라 제시된 Fig.7은 피치각이 20°일 때 오차가 -15%~4%에 달하며 피치각 10°일 때는 -7%~1% 오차를 나타내고 있다. 따라서 피치각이 양인 경우 심한 오차를 보이고 있다. 한편 오차를 보여 Inoue 방법과 좋은 대조를 보이고 있다.

Inoue 및 Okiish의 각도검정 및 속도검정을 살펴보면 그 경향은 같게 나타나고 있다. 따라서 물리적 접근 방법은 두 방법 모두 타당하다고 볼 수 있다. 하지만 Inoue방법 보다 Okiish방법이 오차의 범위가 적다는 것은 Okiish방법의 모델이 실질적인 상황에 더 근접하다고 보여진다.

6 결론

단일경사열선을 이용하여 3차원 유동장의 유속을 측정하는데 있어 유속에 따르는 각도검정곡선식 또 유속, 스윙각 및 피치각의 변화에 따른 각도검정곡선식들의 정확성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 유속이 6m/s이상이고 50m/s이하인 구간에 대한 속도검정곡선식의 오차는 Inoue는 8%, Okiish는 거의 1% 이내의 오차를 갖는다.
2. 각도검정곡선식은 Inoue경우 피치각에 따라 다르며 특히 큰 피치각 20°일 때 스윙각에 따라 제일 큰 오차로 15%정도이나 Okiish 경우 피치각 및 스윙각에 관계없이 오차 범위가 1%이내이다.
3. 따라서 각도검정 및 속도검정을 종합하면 속도가 6m/s이상이고 50m/s이하인 유체유동장에서는 Okiish방법의 유속측정이 오차범위가 거의 1%이내의 신뢰성을 갖는다.

참고 문헌

1. Mikolajczak, A. A., April 1976, "The Practical Importance of Unsteady Flow," in "Unsteady Phenomena in Turbomachinery," AGARD-CP-177.
2. Whitefield, C. E., Barry, B., 1972, "A Three-Dimensional Analysis of Rotor Wake", Aeronautical Quarterly, Vol.23, No.4, pp.285-300.
3. Hirsh, C., Kool, P., 1977, "Measurement of the Three-Dimensional Flow Field Behind

- an Axial Compressor Stage”, ASME Journal of Eng. for Power, Vol.99, No.2, pp.168-180.
4. Schmidt, D. P., Okiishi, T. H., 1977, "Multistage Axial Flow Turbo- machine Wake Production Transport and Interaction". AIAA Joural Vol. 15, No. 8. pp. 1138-1145.
 5. Kuromaru, M., Inoue, M., Higaki, T., 1882, "Measurement of Three dimensional flow field Behind an Impeller by Means of periodic Multi-Sampling With a Slanted Hot Wire", Bulletin of JSME, Vol. 25, No. 209, pp.1674-1686.
 6. 정의준외 2명, 1992, "단일경사열선을 이용한 3차원 유동장의 자동측정방법", UOU report, Vol.23, No.1, pp. 1-16.
 7. Shin, H.W. ,1990 "Hot-wire Measurement Technique in Turbomachinery." The 2nd KSME -JSME FLUID Engineering Conference Proceeding, Vol. 1, pp. 357-360.

* 기호설명

$b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9$: 각도 검정계수
K_1, K_2, K_3	: 속도 검정계수
$(F_1)_r, (F_1)_L$: 측정열선출력비(Inoue), 검정식열선출력비(Inoue)
E_L	: Linearizer 전압
V, V_e, V_2	: 절대속도, 측정유효속도, 속도검정유효속도
$(V_e/V)_r, (V_e/V)_L$: 측정유효냉각속도비, 검정식유효냉각속도비
X, X_i	: 기준축, 열선 방향축
α	: 열선 요우각
θ	: 절대유동의 피치각
θ_o	: 열선의 경사각
$\psi, \psi_i, \Delta \psi_i$: 스윙각