

〈논 문〉

열선에 사용되는 새로운 요각함수의 제안

김정훈* · 유정열** · 조성권*

(1997년 7월 30일 접수)

Proposition of a New Yaw Function for the Use of Hot Wire

Jung Hoon Kim, Jung Yul Yoo and Sung kwon Cho

Key Words : Hot wire(열선), Yaw Function(요각함수), Yaw Calibration(요각검정실험)

Abstract

Conventional yaw functions are compared with actual response of a hot wire to various yaw angles, and a new function is proposed, which can be applied at large yaw angles and low velocities. To compare the accuracy of the new yaw function with those of the conventional ones, measurements are made for the jet flow at the nozzle exit and at $x/D=15$ with an X hot-wire probe. In the potential core, the flow angles reduced by the present function, ideal angle method and full velocity-angle method are shown to be more accurate than those reduced by the cosine function and Hinze's formula. No matter which yaw functions are used, the profiles of mean velocity and turbulence intensity show little discrepancy at $x/D=15$. However, there is a significant difference between the probability density functions obtained by the present function, ideal angle method and full velocity-angle method and those obtained by the cosine function and Hinze's formula.

기 호 설 명

b_f : 식 (2b)에서의 파라미터
 k : 식 (2a)에서의 파라미터
 m : 식 (2c)에서의 파라미터
 Nu : 누셀트수
 r : 반경방향 좌표
 Re : 레이놀즈수
 Re_D : 노즐출구직경을 특성길이로 하는 레이놀즈수
 U : 주유동방향 평균속도
 U_c : 제트중심에서의 평균속도
 u' : 유동방향 섭동속도의 제곱평균
 V : 유동속도벡터의 크기
 V_{eff} : 유효속도
 x : 주유동방향 좌표

a : 프로브축을 기준으로 한 요각
 α_{eff} : 프로브축을 기준으로 한 열선 수직방향의 유효각
 α_n : 프로브축을 기준으로 한 열선 수직방향의 각
 θ : 열선 수직방향을 기준으로 한 요각
 θ_e : 열선 수직방향을 기준으로 한 유효각
 θ_{id} : 열선 수직방향을 기준으로 한 이상각도

하첨자

1 : 열선 1
 2 : 열선 2

1. 서 론

정온도식 열선유속계의 출력 전압은 유속과 유동 방향에 따라 달라진다. 2차원 유동장을 측정할 경

*회원, 서울대학교 대학원 기계공학과

**회원, 서울대학교 기계공학과

우, 출력 전압을 속도벡터로 환산하려면 유동 속도와 전압 사이의 관계를 구하는 것이 선행되어야 한다. 이 관계를 해석 함수로 나타낼 경우에는 유속에 대해 출력 전압 및 유동방향 대 출력 전압 사이의 관계식의 형태를 정한 후, 검증실험을 통해 그 관계식에 필요한 계수를 구해야 한다. 유속과 출력 전압 사이의 관계식으로는 널리 알려진 King의 법칙(King's law)이나 이의 변형된 형태(modified King's law), 다항식, 혹은 Nu 수를 Re 수의 급수 형태로 나타낸 확장급수법칙(extended power law) 등이 사용된다.⁽¹⁾ 여기서 위의 관계식에 사용되는 유속은 열선에 수직으로 들어오는 속도벡터의 크기이다.

유동방향과 출력 전압사이의 관계식은 출력 전압 대신에 유효속도를 사용하여 표현된다. 유효속도란, 임의 방향으로 들어오는 유동의 열손실량과 동일한 열손실량을 발생시키는 열선 수직방향의 유속이다. 임의의 방향으로 들어오는 유동의 유효속도는 열선 출력 전압을 유속과 출력 전압사이의 관계식에 대입하여 구한다.

$$V_{eff} = V \cdot f(\theta) \quad (1)$$

여기서 $f(\theta)$ 는 요각함수를 나타내며, 가장 기본이 되는 식인 $f(\theta) = \cos\theta$ 이외에 다음과 같은 식들이 제안되었다.

$$f(\theta) = \begin{cases} \sqrt{\cos^2\theta + k^2\sin^2\theta} & (2a) \\ [1 - b_f(1 - \cos^{1/2}\theta)]^2 & (2b) \\ \cos^m\theta & (2c) \\ \cos\theta_e & (2d) \\ \cos\theta_{id} & (2e) \\ \cos\alpha + \varepsilon(\cos\alpha - \cos 2\alpha) & (2f) \end{cases}$$

난류강도가 큰 제트하류의 유동장과 같이 정확한

주유동방향을 알기 어려운 경우에는 이에 알맞은 요각함수의 선택이 중요하기 때문에, 본 연구에서는 위의 식들에 대하여 각각 유효한 요각의 범위를 검토한 후, 큰 요각에서의 열선 거동을 나타낼 수 있는 새로운 요각함수를 제안하고, 제트 출구 단면과 하류에서 실제 유속과 유동방향을 측정하여 기존의 요각함수들과 새로운 요각함수의 정확도를 비교하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

실험 장치는 Fig. 1에 도시하였다. 유동발생장치로는 송풍기(1200 mmAq, 6 m³/min)를 사용하였고 온도 조절을 위하여 열교환기를 부착한 챔버(chamber)를 설치하였다. 온도 변화는 최대 온도와 최소 온도차이가 섭씨 0.8도 이내가 되도록 하였다. 안정실(890×350×330 mm)에는 스크린(메쉬 #40)과 균일 분배판이 설치되어 있고, 노즐이 있는 아크릴관에는 하나콤팩트 스크린(메쉬 #40×1, 메쉬 #50×2)들이 설치되어 있다. 노즐의 출구직경 D는 34 mm이고 수평으로 분사되는 제트의 중심과 지면까지의 거리는 1.2 m이다.

난류강도 0.3%, 비균일도 1.3% 이하인 노즐 출구 직후의 ($x \approx 1$ mm) 제트 포텐셜 코어에서 검증 실험을 수행하였으며 유속은 표준 피토프관과 마노미터(MKS)로 측정하였다. 검증실험 유속의 범위는 2.2–45 m/s였다.

X형 열선(DANTEC 55P61)은 정온도방식의 열선유속계(DANTEC 56C17)를 과열비 1.5로 조정하여 사용하였다. 열선 지름은 5 μ m, 종횡비(aspect ratio)는 250이다. 열선프로브의 요각은 0.0144°/pulse인 스텝모터, 직선이송은 0.01 mm/

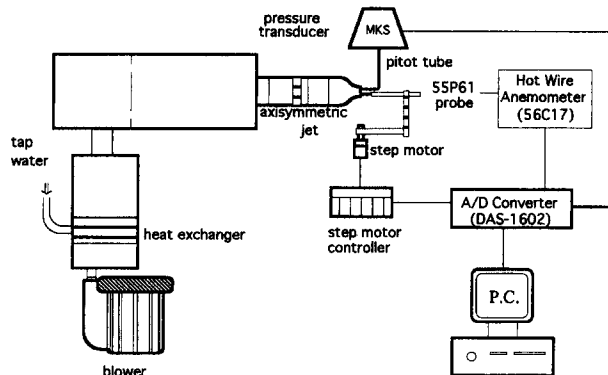


Fig. 1 Schematic of the experimental apparatus.

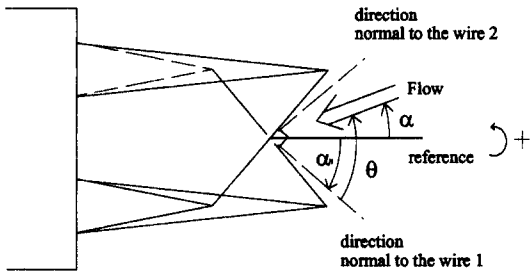


Fig. 2 Angle notation for the X probe.

pulse인 스텝모터를 컴퓨터로 제어하여 변화시켰다. $x/D=15$ 인 단면에서 평균속도, 난류강도 및 확률밀도함수를 측정할 때의 출구속도는 40.7 m/s, $Re_D=99,300$ 였다.

열선에 적용된 좌표계는 Fig. 2에 나타냈고, 좌표계의 기준은 프로브축으로 정하였다.

3. 기존요각함수들이 적용될 수 있는 요각범위의 검토

열선이 무한한 길이의 실린더이고 길이방향으로의 온도분포가 균일하다고 가정할 때, 열선에 수직인 속도성분만이 대류에 의한 열선의 열손실량과 관계 있다는 것이 여러 연구들에 의해 밝혀졌으며,⁽⁸⁾ 이를 코사인 법칙(cosine law)이라고 한다. 그러나 코사인 법칙에서는 실제 열선의 유한한 길이와 처짐 및 프롱(prong)으로의 열전달 등의 효과가 고려되지 않았기 때문에, 코사인 법칙을 기본으로 하고 이들 효과를 고려하여 변형된 여러 요각함수들이 식 (2)와 같이 제안되었다. 이 요각함수들과 열선의 실제 거동과의 비교는 Fig. 3에 나타나있다. 코사인 함수에는 기본 X형 열선에서 열선과 프로브축이 이루는 각이 45°라는 가정이 내포되어 있다. 변형된 요각함수에 포함된 파라미터들 (k, b_r, m)은 $0^\circ \leq \theta \leq 65^\circ$ 범위에서 V_{eff}/V 값에 최소자승법을 적용하여 구해졌다.

Fig. 3에서 알 수 있는 바와 같이, 일정한 유속에서는 $0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ 범위에서 모든 요각함수가 열선의 거동과 일치했지만, 식 (2a)와 식 (2e)를 제외한 나머지 식들은 $\theta \geq 60^\circ$ 범위에서 열선의 거동과 큰 차이를 보였다. 이와 비슷한 경향이 Bruun⁽⁹⁾의 연구결과에도 나타나있다. 식 (2e)만이 열선의 거동과 비슷하였고, 식 (2a)는 식 (2e)보다는 부정확하고 나머지 식들보다는 열선 거동과 근사하였

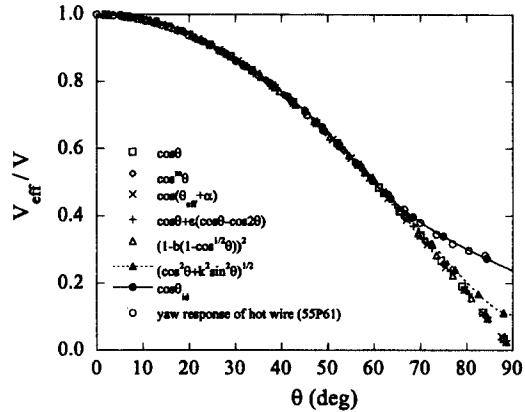


Fig. 3 Yaw response of hot wire at $V=4.7$ m/s and various yaw functions fitted to that response.

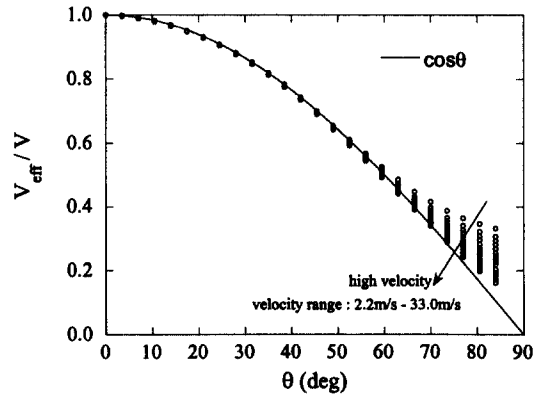


Fig. 4 Yaw response of hot wire at different velocities.

다.

유속 변화에 따른 열선의 거동은 Fig. 4에 나타나있다. $\theta \geq 60^\circ$ 범위에서는 동일한 요각이라도 유속에 따라 열선의 반응이 다르게 나타났으며, 유속이 작을수록 열선의 거동은 코사인 법칙과 많은 차이를 나타내었다.

4. 새 요각함수 및 검증실험의 세부적 절차

4.1 새로운 요각함수의 제안

속도에 따른 영향을 포함한 요각함수를 $f(\theta, V)$ 라고 할 때, $f(\theta, V)$ 를 다음 식과 같은 급수 전개형태로 표현한다 :

$$f(\theta, V) = \sum_{i=0}^{\infty} a_i(V) \cdot \theta^i \quad (3)$$

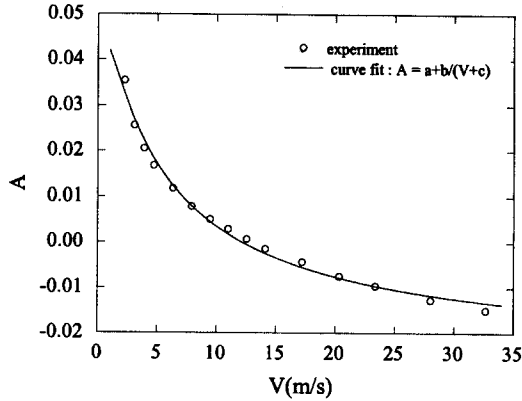


Fig. 5 Dependence of A on velocity.

여기서 $f(\theta, V)$ 는 보통의 사용 조건에서 $\theta=0^\circ$ 에 대해 대칭이어야 하므로 i 는 짝수로 한다. 또한 $f(\theta, V)$ 는 $0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ 범위에서 코사인함수와 일치하므로, 급수의 전개식중 $N-1$ 항까지는 코사인함수로 대체하고 나머지항의 계수를 조절하여 전 요각범위에서 열선의 거동을 잘 나타내도록 구성한다.

$$f(\theta, V) = \cos\theta + \sum_{i=N}^{\infty} a_i(V) \cdot \theta^i \quad (i \text{는 짝수}) \quad (4)$$

$0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ 범위에서 코사인 함수는 3개의 급수 전개항으로도 충분히 나타낼 수 있으므로 ($\theta=60^\circ$ 에서 0.4%의 오차) $N \geq 6$ 의 정수로 한다.

$$f(\theta, V) = \cos\theta + a_6(V) \cdot \theta^6 + \dots \quad (5)$$

항의 개수가 많아질수록 정확도는 높아지나 검정 실험을 통하여 결정되어야 할 파라미터들의 수도 증가한다. 속도 환산과정의 복잡성을 줄이기 위하여 다른 요각함수들과 같이 파라미터를 하나만 사용하게 되면 항이 하나만 추가될 수 있다. 원형 단면의 열선인 경우에는 그 형상이 열선축에 대해 대칭이므로 동일한 유속하에서 유동각이 $\theta = \pi/2 + \Delta\theta$ 인 유동과 $\theta = \pi/2 - \Delta\theta$ 인 유동에 의한 열전달량이 같다고 가정된다면, 요각함수에 대해 다음의 조건이 성립된다:

$$\left. \frac{\partial f}{\partial \theta} \right|_{\theta = \pi/2} = 0 \quad (6)$$

실제로는 프롱이 존재하여 비대칭 형상이지만, Fig.4에 나타난 바와 같이 $\theta = \pi/2$ 에서 요각함수의 기울기가 0에 근접해가므로 위의 가정이 합당하다고 할 수 있다. 식 (6)의 조건을 사용하면 결정되

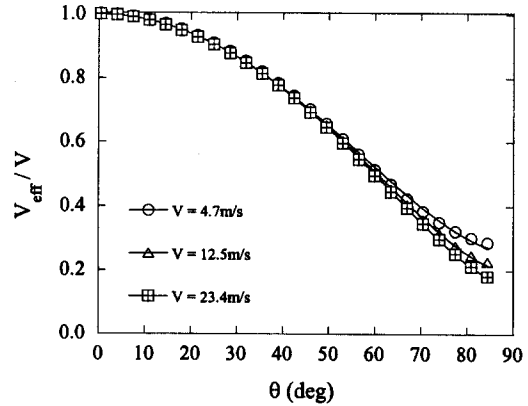


Fig. 6 Proposed yaw function and the wire responses to yaw angles at different velocities.

어야 할 파라미터는 한 개이나 항의 개수를 2개까지 추가할 수 있다.

식 (5)와 식 (6)으로부터 새로운 요각함수는 다음과 같이 된다:

$$f(\theta, V) = \cos\theta + \frac{\theta^8}{8(\pi/2)^7} + A(V) \cdot \theta^6 \left(1 - \frac{3}{\pi^2} \theta^2\right) \quad (7)$$

위 식에서 $A(V)$ 는 요각검정실험을 통해 결정될 수 있다. 사용된 열선의 각 유속에 대한 $A(V)$ 값은 Fig.5에 나타냈다. $A(V)$ 는 다음 식과 같이 비교적 간단한 식으로 표현된다.

$$A(V) = a + \frac{b}{V+c} \quad (8)$$

새로 제안된 요각함수와 열선의 거동은 Fig.6에 나타나 있다. 이로부터 새로 제안된 요각함수는 큰 요각 및 낮은 유속에서도 열선의 거동을 비교적 정확히 표현하고 있음을 알 수 있다.

4.2 유동 속도 대 출력 전압 검정실험

유속과 출력 전압간의 검정실험은 프로브축방향과 검정실험에 사용되는 유동방향을 일치시킨 후, 난류강도가 매우 작은 영역 (제트의 경우는 출구 단면, 평판 유동에서는 경계층 바깥)에서 수행한다.⁽¹⁰⁾ 요각검정실험은 먼저 가용한 유속 범위 내에서 3개의 속도 (최소 속도, 최대 속도 및 둘 사이의 적당한 속도)를 택하여 수행하고, 이 때 각각의 유속과 요각 및 출력 전압을 저장한다. 본 연구

에서는 28.0 m/s, 9.4 m/s, 2.2 m/s에서 각각 요각검정실험을 수행하였다. 요각은 각 열선에 대해 $0^\circ \leq \theta \leq 85^\circ$ 범위에서 7° 간격으로 변화시켰다. Fig. 2의 열선좌표계에서 $\theta = \alpha + \alpha_n$ 이므로 α_n 을 45° 로 가정할 경우 $0^\circ \leq \theta \leq 85^\circ$ 에 해당하는 α 의 범위는 $-45^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$ 가 된다.

4.3 요각함수에서 계수 결정

α_n 은 기준축과 열선 수직방향과의 기하학적인 각이지만 열선의 처짐이나 열선 제작시의 어려움 등 때문에 α_n 은 이러한 효과를 고려하여 보정되어야 한다. Bradshaw⁽⁶⁾와 Browne⁽¹⁰⁾ 및 본 연구에서는 요각검정실험을 통하여 이를 보정하였다. 요각검정실험에서 얻은 출력 전압을 유속과 출력 전압간의 관계식에 대입하여 얻은 값을 $V_{c,eff}$ 라 한다. $V_{c,eff} = V_{c,eff0} \cdot \cos(\alpha + \alpha_{eff})$ 에 최소자승법을 적용하여 $V_{c,eff0}$ 와 α_{eff} 를 구한다. 최소자승법을 적용하는 α 의 범위는 약 $-35^\circ \leq \alpha \leq 5^\circ$ 가 되도록 한다. 열선 수직방향과 프로브축이 이루는 각이 45° 와 큰 차이가 없다고 가정될 때, 열선의 거동이 코사인함수 형태를 나타내는 α 의 범위는 대개 $-35^\circ \leq \alpha \leq 5^\circ$ 이다. 세가지 유속에서 시행한 요각검정실험에 대해서 α_{eff} 를 각각 구한 후에 최대값과 최소값의 평균을 최종적인 α_{eff} 로 결정하고, 이 값을 기준축과 열선 수직방향이 이루는 각으로 정한다. 최종 α_{eff} 의 값은 Table 1에 나타나있다.

$\alpha_n = \alpha_{eff}$ 로 보정된 후에 $\theta = \alpha - \alpha_{eff}$ 이 되고, 각 속도에서의 $\cos \alpha_{eff} \cdot V_{c,eff} / V_{c,eff0}$ 의 값에 대해 $0^\circ \leq \theta \leq 85^\circ$ 구간에서 식 (7)에 최소자승법을 적용하여 $A(V)$ 를 결정한다. 이와 같이 구해진 세 개의

Table 1 Effective angles of the X hot-wire probe at various velocities.

Velocity (m/s)	$\alpha_{eff,1}$	$\alpha_{eff,2}$
32.7	42.6°	-43.0°
28.0	42.4°	-42.9°
23.4	42.3°	-42.6°
17.2	41.9°	-42.3°
12.5	41.6°	-42.1°
9.4	41.4°	-42.0°
6.3	41.5°	-41.9°
3.9	41.6°	-41.9°
2.2	41.9°	-42.0°
Mean	42.1°	-42.5°

$A(V)$ 값에 대해 식 (8)을 적용하여 계수 a , b , c 를 결정한다.

4.4 속도환산과정

실험시 얻은 각 열선의 출력 전압을 속도와 출력 전압간의 관계식에 대입하여 $V_{c,eff}$ 를 구한다. $V_{c,eff}$ 는 프로브축방향으로 붙어오는 유속으로 환산된 값이므로, 정의에 의해 유효속도와 다음의 관계가 성립된다.

$$V_{eff} = V_{c,eff} \cdot f(\theta) \quad (9)$$

이 때 θ 는 열선 수직방향과 프로브축방향 사이의 값이므로 $\theta = \alpha_n$ 이고, α_n 대신에 보정된 α_{eff} 를 사용한다. 코사인 함수가 α_{eff} 근방의 요각에서 유효한 요각함수이므로 다음의 식이 성립된다.

$$f(\theta) = \cos \alpha_{eff} \quad (10)$$

식 (1), (7), (8), (9), 및 (10)에 의해 X형 열선의 출력 전압을 속도로 환산하는 식은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \cos \alpha_{eff,1} \cdot V_{c,eff,1} = V \cdot (\cos \theta_1 + \frac{\theta_1^8}{8(\pi/2)^7} \\ + (a_1 + \frac{b_1}{V+c_1}) \cdot \theta_1^6 (1 - \frac{3}{\pi^2} \theta_1^2)) \end{aligned} \quad (11a)$$

$$\begin{aligned} \cos \alpha_{eff,2} \cdot V_{c,eff,2} = V \cdot (\cos \theta_2 + \frac{\theta_2^8}{8(\pi/2)^7} \\ + (a_2 + \frac{b_2}{V+c_2}) \cdot \theta_2^6 (1 - \frac{3}{\pi^2} \theta_2^2)) \end{aligned} \quad (11b)$$

$$\theta_1 + \theta_2 = \alpha_{eff,1} - \alpha_{eff,2} \quad (11c)$$

식 (11a)와 식 (11b)는 V 에 대한 2차식으로 표현될 수 있으므로 V 를 θ 에 관해 나타낸 후, 여기에서 얻은 V 를 나머지 식에 대입하여 θ 만의 방정식을 수치적으로 풀어준다. 수치적으로 풀어야 할 식은 기울기의 변화가 심하고 $0 \leq \theta \leq \pi/2$ 범위에서 근이 1개 존재하므로 뉴턴-랩슨(Newton-Raphson) 방법이 아닌 수정된 착오위치(modified false position) 방법⁽¹¹⁾을 사용하였다.

5. 제트의 출구 단면과 하류에서의 측정 결과

X형 열선으로 제트 출구 단면 및 $x/D=15$ 인 단면에서 측정된 후, 기존의 요각함수들과 새로 제시된 요각함수를 사용하여 속도로 환산했을 때 유동

Table 2 Comparison of flow angles reduced by different yaw functions in the potential core.

V (m/s)	Yaw Function	$\alpha=0^\circ$	$\alpha=10^\circ$	$\alpha=20^\circ$	$\alpha=30^\circ$	$\alpha=40^\circ$
4.7	Present	0.0 \pm 0.1 $^\circ$	10.4 \pm 0.0 $^\circ$	20.8 \pm 0.2 $^\circ$	30.6 \pm 0.3 $^\circ$	37.4 \pm 0.7 $^\circ$
	Full vel. & ang.	0.1 \pm 0.0 $^\circ$	9.9 \pm 0.2 $^\circ$	20.1 \pm 0.2 $^\circ$	29.5 \pm 0.4 $^\circ$	39.6 \pm 0.7 $^\circ$
	Hinze	0.2 \pm 0.2 $^\circ$	10.4 \pm 0.4 $^\circ$	20.0 \pm 0.6 $^\circ$	27.7 \pm 0.8 $^\circ$	31.7 \pm 0.9 $^\circ$
	Ideal ang.	0.0 \pm 0.1 $^\circ$	9.9 \pm 0.3 $^\circ$	19.8 \pm 0.2 $^\circ$	29.6 \pm 0.3 $^\circ$	36.9 \pm 0.5 $^\circ$
	Cosine	0.0 \pm 0.1 $^\circ$	9.9 \pm 0.1 $^\circ$	19.3 \pm 0.2 $^\circ$	26.6 \pm 0.4 $^\circ$	30.3 \pm 0.6 $^\circ$
20.0	Yaw function	$\alpha=0^\circ$	$\alpha=10^\circ$	$\alpha=20^\circ$	$\alpha=30^\circ$	$\alpha=40^\circ$
	Present	0.0 \pm 0.2 $^\circ$	9.7 \pm 0.3 $^\circ$	19.6 \pm 0.3 $^\circ$	29.8 \pm 0.3 $^\circ$	40.2 \pm 0.3 $^\circ$
	Full vel. & ang.	0.0 \pm 0.1 $^\circ$	9.9 \pm 0.2 $^\circ$	20.0 \pm 0.2 $^\circ$	29.6 \pm 0.3 $^\circ$	35.0 \pm 0.6 $^\circ$
	Hinze	0.1 \pm 0.1 $^\circ$	10.0 \pm 0.2 $^\circ$	19.6 \pm 0.2 $^\circ$	28.6 \pm 0.3 $^\circ$	35.0 \pm 0.6 $^\circ$
	Ideal ang.	0.0 \pm 0.1 $^\circ$	10.2 \pm 0.1 $^\circ$	20.2 \pm 0.2 $^\circ$	29.7 \pm 0.3 $^\circ$	40.0 \pm 0.3 $^\circ$
	Cosine	-0.1 \pm 0.2 $^\circ$	9.6 \pm 0.2 $^\circ$	18.9 \pm 0.3 $^\circ$	27.4 \pm 0.2 $^\circ$	33.3 \pm 0.6 $^\circ$

각에 발생하는 오차를 조사하였다.

Fig. 3에 나타난 바와 같이 유사한 정확도를 갖는 식 (2b), (2c), (2f)를 제외하고, 새로 제안된 식 (7), 전체 속도-각도(full velocity and angle) 점정 실험방법, 식 (2a), (2d), (2e)를 서로 비교하였다. 식 (7)과 식 (2a) 및 식 (2e)에는 기준축과 열선 수직방향사이의 각으로 45 $^\circ$ 대신 요각점정 실험에서 구한 α_{eff} 을 사용하였다.

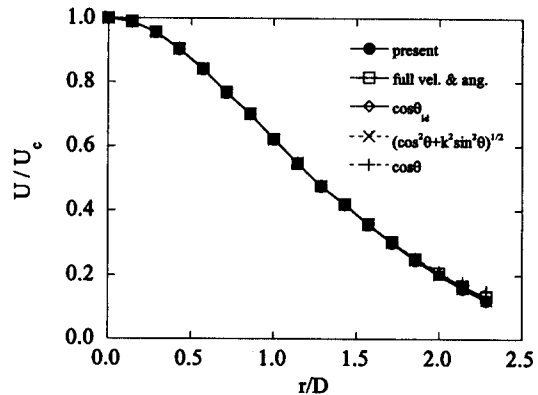
전체 속도-각도 점정실험은 여러 가지 속도와 각도에서의 열선 출력 전압을 저장하고(lookup table) 이를 이용하여 실험에서 얻은 열선 출력 전압을 속도와 각도로 환산하는 방법이다. 여기서는 Panchapakesan⁽¹²⁾의 방법을 사용하였다.

5.1 출구 단면에서의 측정 결과

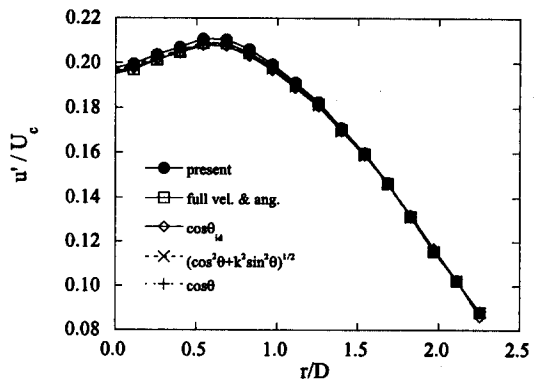
출구 단면의 난류강도는 매우 작으므로, 열선이 기준축에서 α 만큼 회전하면 실제 유동각 역시 α 라고 가정할 수 있다. 여러 속도에서 요각을 10 $^\circ$ 씩 변화시켜가며 측정한 후 환산된 유동각과 열선의 실제 회전각을 Table 2에 나타내었다.

실험은 8회 시행하였으며, 환산된 유동각의 분포를 T분포로 가정하여 신뢰도 95%에서 오차의 한계를 결정하였다.

식 (2a)와 식 (2d)는 큰 요각에서의 열선거동을 제대로 나타내지 못하기 때문에, 이 식들을 사용할 경우 $\alpha=30^\circ$, 40° 에서 유동각은 정확히 계산되지 못했다. 새로 제안된 식 (7)과 식 (2e) 및 전체 속



(a) Mean velocity



(b) Turbulence intensity

Fig. 7 Distributions of streamwise mean velocity and turbulence intensity at $x/D=15$.

도-각도 검정실험방법은 큰 요각에 대한 열선의 거동이 고려되었기 때문에 $\alpha=30^\circ, 40^\circ$ 에서도 실제 유동각과 큰 차이가 없었다. 전체 속도-각도 검정 실험방법은, 유동각과 속도를 실제 실험에 필요한 전 범위에서 바꾸어 가면서 검정실험한 자료를 이용하기 때문에 속도에 관계없이 가장 높은 정밀도를 나타냈으나, 이를 위해서는 속도와 각도를 촘촘히 변화시켜가면서 장시간 검정실험을 해야했다.

5.2 제트 하류에서의 측정 결과

제트 하류에서의 측정은 $x/D=15$ 인 단면에서 수행하였다. 이 영역은 난류강도가 매우 커서 순간 속도의 정확한 방향 및 크기를 알 수 없으며 유동장은 발달하고 있는 상태이기 때문에 실험 조건에 따라 실험결과가 다르게 나올 수 있다. 따라서 다른 실험 결과와는 비교할 수 없으므로 Browne⁽¹⁰⁾의 연구방법과 같이 전체 속도-각도 검정실험으로

확산한 속도를 기준으로 삼았다.

평균량들은 Fig. 7(a), (b)에 나타난 바와 같이 크기에 있어 차이가 거의 없었다. 이는, 프로브축을 주유동방향과 같게 놓을 경우에 Fig. 8에 나타난 바와 같이 대부분의 유동이 $|\alpha| < 20^\circ$ 의 유동각을 갖게 되며 이 범위에서는 모든 요각함수들이 거의 같은 정확도를 나타내기 때문이다. $r/D=0$ 인 단면의 확률밀도함수 (Fig. 8(a))는 요각함수에 따른 차이가 거의 없었지만, $r/D=2.0$ 인 단면의 확률밀도함수 (Fig. 8(b))에서는 전체 속도-각도방법과 새로 제안된 식 및 이상각도방법이 같은 경향을 보였으며 나머지 검정실험식은 많은 차이를 나타내었다. 평균량이 아닌 순간속도의 측정에서는 요각함수의 선택이 매우 중요함을 알 수 있다.

6. 결론

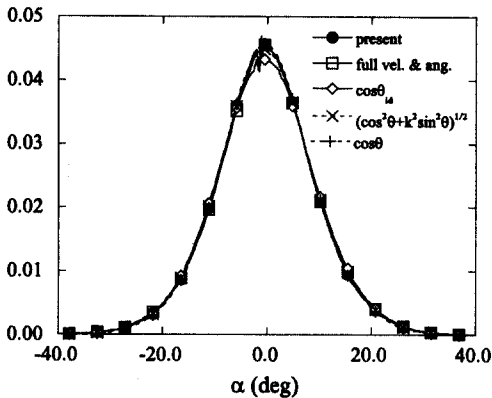
기존의 요각함수중에서 이상각도방법은 $-30^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ 범위에서 정확했으며 그 외의 요각함수는 $-20^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$ 범위에서 정확하였다. 제트 유동장과 같이 주유동방향이 어느 정도 예상될 수 있는 경우, 평균량의 계산에서는 어떤 요각함수를 사용했는가에 따라 정확도의 차이가 거의 없었지만 순간량들은 큰 차이를 보일 수 있음을 알 수 있었다. 새로 제안된 식은 속도에 대한 요파라미터의 의존도와 계산과정에서 이상각도방법과 차이가 있으나 전반적인 각도범위에서 이와 비슷한 정확도를 나타냈으며 전체 속도-각도 검정실험과는 큰 차이를 나타내지 않았다. 따라서 이상각도방법이나 새로 제안된 식을 쓸 경우, 전체속도 및 각도 검정실험에 드는 많은 시간과 수고를 줄일 수 있다.

후 기

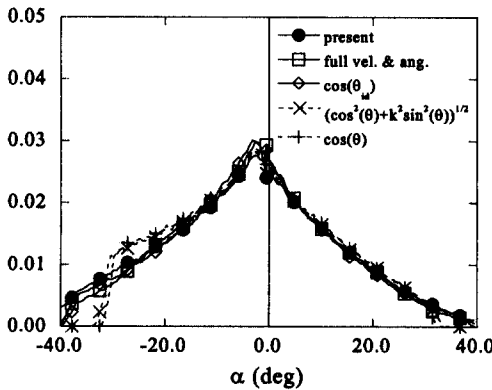
이 연구는 한국과학재단 국제공동연구의 일부로 수행되었으므로 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) Wu, S and Bose, N., 1994, "An Extended Power Law Model for the Calibration of Hot-Wire/Hot-Film Constant Temperature Probes," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 37, No. 3, pp. 437~442.



(a) $r/D=0$



(b) $r/D=2$

Fig. 8 Probability density functions at $x/D=15$.

- (2) Hinze, 1975, *Turbulence*, McGraw-Hill, p. 124.
- (3) Friehe, C. A. and Schwarz, W. H., 1968, "Deviations from the Cosine Law for Yawed Cylindrical Anemometer Sensors," *J. Appl. Mech.*, Vol. 90, pp. 655~662.
- (4) Davies, P. O. A. L. and Bruun, H. H., 1968, "The Performance of a Yawed Hot-Wire," *Proc. Symp. Instrum. and Data Proc.* (Teddington: NPL) 10.1~10.15.
- (5) Bradshaw, P., 1975, *An Introduction to turbulence and its Measurement*, Pergamon Press, Headington Hill Hall, pp. 121~123.
- (6) John, J. and Schobeiri, T., 1993, "A Simple and Accurate Method of Calibrating X-Probes," *J. Fluids Eng.*, Vol. 115, pp. 148~152.
- (7) Fujita, H. and Kovasznay, L. S. G., 1968, "Measurement of Reynolds Stress by a Single Rotated Hot Wire Anemometer," *Rev. Sci. Instr.*, Vol. 39, pp. 1351~1355
- (8) Champagne, F. H., Sleicher, C. A. and Wehrmann, O. H., 1967, "Turbulence Measurements with Inclined Hot-Wires. Part 1. Heat Transfer Experiments with Inclined Hot-Wire," *J. Fluid Mech.*, Vol. 28, pp. 153~175.
- (9) Bruun, H. H., Nabhani, N., Al-Kayiem, H. H., Fardad, A. A., Khan, M. A. and Hogarth, E., 1990, "Calibration and Analysis of X Hot-Wire Probe Signals," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 1, pp. 782~785.
- (10) Browne, L. W. B., Antonia, R. A. and Chua, L. P., 1989, "Calibration of X-Probes for Turbulent Flow Measurements," *Exp. Fluids*, Vol. 7, pp. 201~208.
- (11) Shioichiro Nakamura, 1991, *Applied Numerical Methods with Software*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, pp. 68~72.
- (12) Panchapakesan, N. R. and Lumley, J. L., 1993, "Turbulence Measurements in Axisymmetric Jets of Air and Helium. Part 1," *J. Fluid Mech.*, Vol. 246, pp. 197~223.