

## 열선유속계를 이용한 좁은 유로 내 유속 측정법

김 원 갑, 한 성 호\*, 최 영 돈\*\*†

건국대학교 인공근육연구센터, \*고려대학교 기계공학과 대학원, \*\*고려대학교 기계공학과

### Velocity Measurement Technique in a Narrow Passage by Hot-wire Anemometer

Won-Kap Kim, Seong-Ho Han\*, Young-Don Choi\*\*†

Artificial Muscle Research Center, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

\*Graduate School of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 500-700, Korea

\*\*Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 500-700, Korea

(Received August 9, 2006; Revision received December 19, 2006)

**ABSTRACT:** It was noted by the several researchers that the voltage outputs in response to a single yawed hot-wire sensor in a flow perpendicular to the axis deviate from the theoretical voltage output by King's law and Jorgensen's relation. This study noticed that the calibration coefficients of original Grande's method are not constant and fairly sensitive to the radial angle ( $\alpha_R$ ). For more accuracy, this study interpolated the parameters of the Grande relation as a function of radial angle and compared velocity components with ones by Jorgensen and original Grande relation in the calibration jet flow. Finally, as a test case, 3-dimensional turbulent flows of the inlet plane of 180 degree bend are measured and compared the velocity components by above three methods and showed the characteristics of the flows.

**Key words:** Hot-wire anemometer(열선유속계), Calibration(교정), Probe angle(열선각), Radial angle(방사각), Curved duct(곡덕트)

#### 기 호 설 명

#### 그 리 스 문 자

$A, B, h$  : 비례상수  
 $D_H$  : 수력직경(hydraulic diameter)  
 $E$  : 순시전압  
 $k$  : 요오인자, 피치인자  
 $Q$  : 순시속도  
 $U_e$  : 등가냉각속도(effective cooling velocity)  
 $U, V, W$  : 속도성분  
 $U_0$  : 단면평균속도  
 $x, y, z$  : 절대좌표계

$\alpha_P$  : 열선각(probe angle)  
 $\alpha_R$  : 방사각(radial angle)  
 $\theta$  : 열선회전 각도  
 $\phi$  : 요오각(yaw angle)  
 $\psi$  : 보정 파라미터

#### 1. 서 론

복잡한 형상의 유로를 설계하기 위해서는 유동 특성의 정확한 이해가 필요하며 정확한 실험적 자료의 취득이 필수적이다. 유체유동 특성의 측정을 위해서 피토폴(pitot tube)을 비롯한 열선유속계(Hot-wire Anemometry), LDV(Laser Doppler

† Corresponding author

Tel.: +82-2-3290-3355; fax: +82-2-928-1067

E-mail address: ydchoi@korea.ac.kr

Anemometry), PIV(Particle Image Velocimetry) 등 여러 가지 측정법이 개발되어 있다. 이 중에서 열선유속계는 유동장 내에 센서를 직접 삽입하여 측정하는 장치로서 그 측정이 광학적 측정 방법을 이용하는 LDV와 PIV와는 달리 측정장치의 설치비용이 저렴하고 간단히 유속을 측정할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

열선유속계를 이용한 측정에서 측정전압과 속도와의 관계는 King의 법칙과 더불어 유효냉각속도와 실제 속도성분간의 관계를 정의하는 단순 cosine 법칙과 이를 확장한 Jorgensen<sup>(1)</sup> 관계식을 많이 사용해 왔다. 그러나 Jorgensen<sup>(1)</sup> 관계식은 주로 열선이 유동의 반대방향에서 삽입되어 사용되어야 하며 좁은 관내 유동을 측정하는 경우와 같이 유동에 수직으로 열선을 삽입하는 경우에 Jorgensen<sup>(1)</sup>의 관계식을 사용하면 오차를 피할 수 없다. 이와 관련하여 Grande<sup>(2)</sup>는 Jorgensen<sup>(1)</sup>과는 다른 형태의 관계식을 제안하고 방사각이 0°인 경우 측정전압과 이론출력전압을 일치시키는 방법을 사용하였다. Kuroumaru et al.<sup>(3)</sup>은 방사각에 따른 출력전압을 곡선맞춤하는 방법을 사용하였으나 6개의 보정계수를 사용함으로써 보정과정이 복잡해지는 단점이 있다. Menet et al.<sup>(4,5)</sup>은 I-형 열선과 경사형 열선에 대하여 King의 법칙의 지수를 수정하는 방법을 제안하였다. 그러나 Grande<sup>(2)</sup>의 연구에서와 같이 방사각이 0°인 경우만으로 한정되었다. Bruun and Tropea<sup>(6)</sup>는 이 경우 요오인자(yaw factor)와 피치인자(pitch factor)가 열선회전각도에 따라 크게 변한다는 것을 지적하였다. 따라서 이 두 값을 열선회전각도의 함수로 사용하면 보정과정이 매우 복잡해진다.

본 연구에서는 Jorgensen<sup>(1)</sup>과 Grande<sup>(2)</sup>의 관계식을 사용하여 좁은 관내 유동을 측정할 때 발생하는 오차를 검토하였으며 수정 Grande<sup>(2)</sup> 방법에서 방사각에 따른 계수를 보간하여 사용하는 수정 Grande<sup>(2)</sup> 관계식을 제안하였다. 위 방법들은 보정실험과 더불어 단면 축소 180° 꼭덕트의 입구 단면에서 유동을 측정하고 비교하였다.

## 2. 측정이론

### 2.1 Jorgensen<sup>(1)</sup> 관계식

순간전압과 등가냉각속도와와의 관계는 기존 연

구에서 많이 사용되어오던 King의 법칙으로부터 구할 수 있으며 교정화기기를 사용하는 경우에는 다음과 같은 간단한 선형식으로 나타낼 수 있다.

$$E = A + B \cdot U_e^n = h \cdot U_e \quad (1)$$

여기서  $h$ 는 교정화기기를 사용할 때의 비례상수이며  $U_e$ 는 등가냉각속도를 나타낸다.

등가냉각속도는 추상적 개념의 속도로 실제의 속도성분  $U, V, W$ 와는 다르며 등가냉각속도와 실제속도성분과의 관계가 필요하다.

앞서 설명한 바와 같이 주유동 방향과 유동장에 열선과 열선지지대를 삽입하는 삽입각도가 평행하고 센서가 지지대보다 상류에 오도록 하여 측정하는 경우에는 다음의 Jorgensen<sup>(1)</sup> 관계식을 사용한다.

$$U_e^2 = u_N^2 + k_T^2 u_T^2 + k_B^2 u_B^2 \quad (2)$$

여기서  $k_T, k_B$ 는 요오인자와 피치인자를 나타내며,  $u_N$ 은 열선 삽입단면 상의 열선에 수직한 속도성분,  $u_T, u_B$ 는 열선의 접선방향과 법선방향을 향하는 유체의 속도성분이다. 식(1)과 식(2)에서  $h$ 와  $k_T, k_B$ 는 교정화 과정을 통해서 결정되며 일반적으로  $k_T$ 는 0.1~0.2,  $k_B$ 는 1.0~1.01의 값이 사용된다.

### 2.2 Grande<sup>(2)</sup> 관계식

한편, 열선 지지축을 주유동 방향의 수직으로 삽입할 수밖에 없는 좁은 관내 유동의 측정에서 Grande<sup>(2)</sup>는 열선출력전압과 이론출력전압에 차이가 있음을 지적하고 새로운 등가냉각속도와 순시속도의 관계식을 사용하여 경사형 열선의 보정과정을 비롯한 속도, 레이놀즈용력의 측정기법을 발표한 바 있다.

Fig. 1과 같은 좌표계의 설정에서 유체의 속도 벡터와 프로브 각도 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\sin \phi = \cos \alpha_0 \cos \alpha_P \cos \alpha_R + \sin \alpha_0 \sin \alpha_R \quad (3)$$

Grande<sup>(2)</sup>는 이 식을 그대로 사용할 경우, 출력전압이 기본 cosine 법칙에서 벗어나며 이를 수

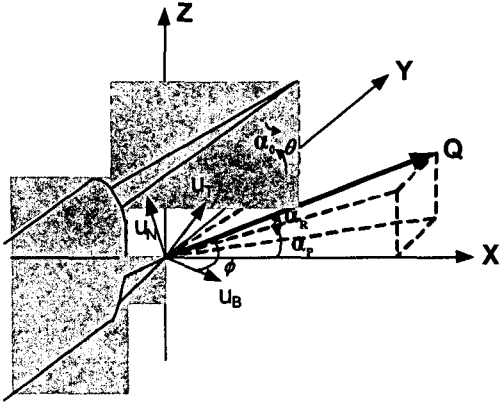


Fig. 1 Coordinate of wire.

정하기 위하여 다음과 같은 보정계수  $A_1, A_2$ 를 사용하는 식을 도입하였다. 여기서  $\psi$ 는 파라미터로써  $\phi$ 가 보정된 값을 의미한다.

$$\sin \psi = A_2 \left\{ \cos \alpha_p \cos \left( \frac{\alpha_R}{A_1} \right) + \tan \alpha_0 \sin \alpha_R \right\} \quad (4)$$

한편 속도와 등가냉각속도의 관계는 다음의 식으로 주어진다.

$$U_e = Q \cos \psi \quad (5)$$

여기서  $Q$ 는 유체의 순시속도이며 식(5)를 제공하고 식(4)에 대입하면 다음의 식을 얻는다.

$$\left( \frac{U_e}{Q} \right)^2 = 1 - A_2^2 \left( \cos \alpha_R \cos \alpha_P^* + \tan \alpha_0 \sin \alpha_R \right)^2 \quad (6)$$

여기서

$$\alpha_P^* = \frac{\alpha_P - \theta}{A_1} \quad (7)$$

이다. 따라서 식(6)을 식(1)에 대입하면 열선출력전압과 유속의 방향을 가리키는  $\alpha_R$ 과  $\alpha_P$ 의 관계를 구할 수 있다. 여기서 매개변수는  $h, A_1, A_2$ 로서 이 값들은 교정화 과정에서 결정되어야 한다. 교정화 과정에서 매개변수  $h, A_1, A_2$ 가 결정되면 식(1)과 식(6)은  $Q, \alpha_R, \alpha_P$ 를 변수로 하는 연립방정식이 된다. 따라서 실제 측정하고자 하는 유

동장에 열선센서를 삽입하여 최소 3개의 각도 이상으로 열선을 회전시키면서 열선출력전압을 측정하면 속도를 구할 수 있다.

식(1)과 식(6)으로부터  $Q, \alpha_R, \alpha_P$ 를 구하면 각 방향의 속도성분  $U, V, W$ 는 다음의 식으로부터 구할 수 있다.

$$U = Q \cos \alpha_R \cos \alpha_P \quad (8a)$$

$$V = Q \sin \alpha_R \quad (8b)$$

$$W = Q \cos \alpha_R \sin \alpha_P \quad (8c)$$

Grande<sup>(2)</sup>는  $\alpha_R=0^\circ$ 인 경우에 대하여 보정계수  $A_1$ 과  $A_2$ 를 구하고 이 값으로 완만하게 굽은 곡덕트의 하류직관부에서 유동을 측정하였다. 보정상수는 Grande<sup>(2)</sup>가 제안한 유효냉각속도 관계식(4)를 사용하여 보정상수  $A_1=1.0069$ 과  $A_2=0.8421$ 로  $\alpha_R=0^\circ$ 의 교정화 실험에서 결정된 값을 사용하였다.

### 2.3 수정 Grande<sup>(2)</sup> 관계식

Jorgensen<sup>(1)</sup> 관계식의 경우는 전체의  $\alpha_R$ 의 범위에서 실제출력전압과의 차이를 보이지만 Grande<sup>(2)</sup> 관계식의 경우는  $\alpha_R=0^\circ$ 인 경우에는 적절한  $A_1$ 과  $A_2$ 의 선정을 통해 실제출력전압과 이론출력전압을 잘 일치시킬 수 있다. 하지만 기존 Grande<sup>(2)</sup> 관계식은  $A_1$ 과  $A_2$ 의 값을 상수로 결정하고  $\alpha_R \neq 0^\circ$ 인 경우에는 고려하지 않아서 식(3)이 정확하지 않기 때문에  $\alpha_R$ 이 크게 변하는 3차원 유동장에서는 정확한 값을 얻을 수 없는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는  $\alpha_R$ 에 따라 보정계수를 각각 결정하고 식(10)과 같이  $A_1$ 과  $A_2$ 를  $\alpha_R$ 의 함수로 사용할 수 있도록 하였다. 특히  $\alpha_R=0^\circ$ 인 경우  $A_2$ 가 pole의 영향을 받지 않으나  $\alpha_R$ 이 0이 아닌 경우에는 pole의 영향이  $\psi$ 에 절대적으로 영향을 미치므로  $A_2$ 는  $\alpha_R$ 의 함수가 되어야 하는 것이다. 또한 기존의 Grande<sup>(2)</sup>의 방법에서  $A_1$ 과  $A_2$ 가 상수이면 식(1)의  $h$ 도 상수로 사용되지만  $A_1$ 과  $A_2$ 가 보간함수이면  $h$ 도  $\alpha_R$ 의 함수로 사용해야 한다는 것에 주의해야 한다. 이것은  $A_1, A_2$ 를 상수로 사용하는 Jorgensen<sup>(1)</sup> 방법이나 Grande<sup>(2)</sup>의 방법에서처럼 교정화 과정에서 출력전압과 교정화 실험장치 유속과의 단순비로  $h$ 가 결정되는 경우에는 상수로 사용할 수 있기 때문이다. 그러

나  $A_1, A_2$ 가  $\alpha_R$ 에 따른 함수로 사용하는 경우에는 이 값이 상수로 취급될 수 없다.

본 연구에서는  $h$ 를 직접 수정하는 방법보다는  $h$ 를 보정하는 새로운 보정계수  $A_3$ 를 도입하였으며 다음과 같이 사용한다.

$$U_e = A_3 Q \cos \psi \quad (9)$$

$$A_1 = A_{1,0} + f(\alpha_R) \quad (10a)$$

$$A_2 = A_{2,0} + f(\alpha_R) \quad (10b)$$

$$A_3 = A_{3,0} + f(\alpha_R) \quad (10c)$$

여기서  $A_3$ 는 측정전압과 실제속도  $Q$ 의 비를 나타내는  $h$ 를 수정하는 의미를 가진다. 이러한  $A_3$ 의 도입하면 교정화기기를 사용함으로써 발생하는 교정오차를 보정하는 측면에서 측정 정확도를 향상시킬 수 있다.

### 3. 측정장치

#### 3.1 열선프로브의 교정

열선유속계의 교정은 일반 측정기기와 마찬가지로 유체의 유동조건 중에서 속도를 제외한 다른 조건들은 일정하게 유지시키고 속도변화에 따른 열선유속계의 출력변화를 파악하는 과정이다. 따

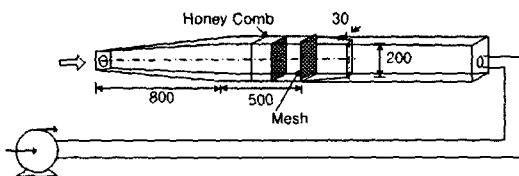


Fig. 2 Schematic of calibration jet apparatus.

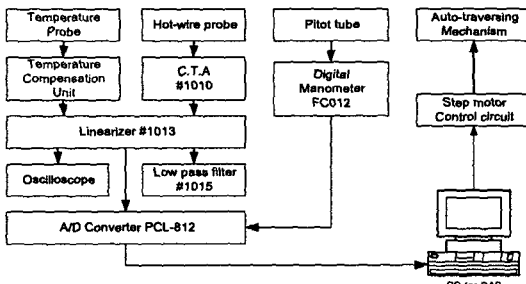


Fig. 3 Automatic data acquisition system.

라서 보정곡선을 찾기 위해서 Fig. 2와 같은 실험장치를 설치하였고 필요로 하는 속도성분의 방향으로 프로브를 고정시켜 열선유속계의 출력과 유속의 관계식을 얻게 된다. 교정 실험장치는 팬에서 공기를 흡입하면 허니콤과 200×200망을 통과한 후 노즐로 분사된다. 노즐의 단면은 30 mm×200 mm이며 그 중심부에서는 2차원 유동을 실현할 수 있다. 열선은 노즐의 출구부에 설치되어 교정되며, 이때 노즐의 속도는 0~10 m/s로 변환시킬 수 있다. 보정계수의 측정을 위한 경우에는 5.5 m/s로 고정하고 열선의 방사각을 15° 간격으로 -30°~30°로 변화시키면서 열선유속계 출력전압을 측정하였다. 이때 열선회전각도  $\theta$ 는 -90°~90°까지 6° 간격으로 변화시켰다.

본 연구에서는 우선 출력전압의 열선회전각도  $\theta$ 에 따른 변화를 도시하고 앞서 설명한 방법에 의한 이론출력전압을 비교하였다.

Fig. 3은 실험에 적용된 자료측정 시스템을 개략적으로 나타내었다. 측정에 사용된 열선유속계는 KONOMAX 7224 모델이다. 교정실험과 180도 곡덕트의 실험에서 A/D 변환기의 샘플링 범위는 5 kHz로 하였으며 한 열선회전각도에서 4080개의 자료를 10번씩 측정하였다. 따라서 열선을 -90°~90°로 6° 간격으로 회전시키므로 한 지점에서의 속도 성분의 계산에 사용된 데이터 수는  $31 \times 4080 \times 10 = 1,264,800$ 개이다. 그러나 속도를 구하기 위해 필요한 측정각도는 3개의 각도, 레이놀즈 응력의 경우는 6개의 각도면 충분하므로 교정과정에서 정확한 보정계수를 구할 수 있다면 측정각도 수를 줄임으로써 전체 측정시간을 절약할 수 있다.

#### 3.2 단면축소 180도 곡덕트 장치

본 연구에서는 교정실험의 검토와 더불어 실제 유동에서 세 가지 측정방법들을 비교하고자 단면 축소 180도 곡덕트의 속도를 측정하였다. Fig. 4는 곡덕트 실험장치의 개념도를 나타내었다. 곡덕트의 입구는 곡덕트가 굽은 형상이므로 주유동 방향과 같은 방향으로 열선을 삽입하여 측정하기가 용이하지 않다. 이런 경우 프로브를 유로에 수직인 방향으로 삽입하게 되며, 이때 기존 열선측정법을 그대로 사용하는 것이 가능한지에 대한 연구가 필요하다.

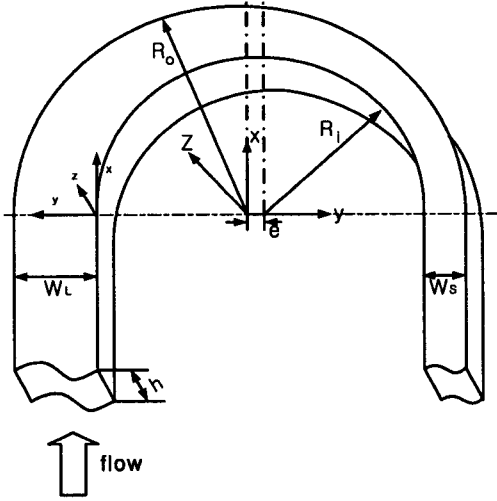


Fig. 4 Schematic view of the 180 degree bend.

실험에 사용된 곡덕트의 입구는 폭과 높이가 120 mm로 정사각 단면 형상이다. 곡덕트의 외벽면 반지름은 344 mm이고, 내벽면의 반지름은 254 mm이다. 곡관부에는 입구직관부와 연결되어 있는 지점들  $\theta=0^\circ$ 로 하여  $45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$ 되는 지점에 아랫면부터 15 mm 간격으로 대칭면까지 6개의 속도측정용 구멍을 가공하여 자동이송장치에 연결된 열선유속계의 프로브가 삽입되도록 제작하였다. 곡덕트를 통과한 공기는 송풍기로 흡입되는데, 원관에는 유량측정용 터빈유량계와 유량 조절용 밸브 및 바이패스가 설치되어 있다.

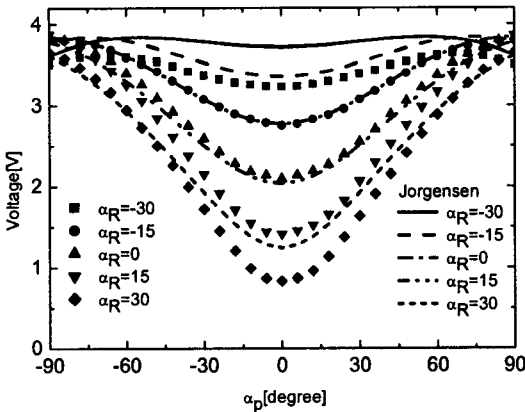


Fig. 5 Calculated voltage output by Jorgensen relation for the calibration jet flow.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 열선프로브 교정에 대한 이론출력전압

앞 절에서 설명된 방법으로 측정된 열선유속계 출력전압을 속도성분으로 변환해야 하는데, 이때 발생하는 오차를 검토해야 한다. 우선 본 연구에서는 교정 실험장치에서 분사되는 유동에 대하여 열선을 삽입하였을 때 삽입된 방식각에 따라 발생하는 오차를 분석하였다.

Fig. 5는 Jorgensen<sup>(1)</sup>의 공식을 이용한 이론출력전압과 열선유속계의 출력전압을 비교한 그림이다. 여기서 요오인자와 피치인자는 각각 0.2와 1.0을 계산에 사용하였다. Fig. 5를 살펴보면 측정된 출력전압과 이론전압이 큰 차이를 보이고 있으며 이러한 차이 때문에 본 실험에서 측정된 출력전압을 속도성분으로 변환할 때 오차가 발생하게 된다. 따라서 열선이 유동에 직각으로 삽입되는 경우에는 Jorgensen<sup>(1)</sup>의 공식을 사용하면 오차를 피하기 어렵다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5에서  $\alpha_R=0^\circ$ 의 경우와  $\alpha_R=-15^\circ$ 의 경우를 살펴보면  $\alpha_R=0^\circ$ 인 경우의 이론출력전압은  $\alpha_R=-15^\circ$ 의 열선유속계 출력전압과 매우 유사하다. 또한  $\alpha_R=15^\circ$ 에서의 이론출력전압은  $\alpha_R=0^\circ$ 의 측정전압과 매우 유사함을 알 수 있으며 다른 각도의 경우도 대체적으로 이러한 경향을 갖는 것을 알 수 있다. 출력전압과 이론전압의 열선회전각도에 따른 변화가 같다고 가정하였을 때 이것은

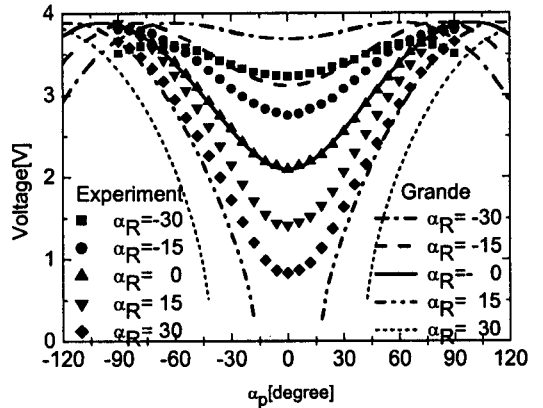


Fig. 6 Calculated voltage output by Grande relation with constant  $A_1, A_2$  for the calibration jet flow.

본 실험에서 Jorgensen<sup>(1)</sup>의 관계식을 이용하여 속도 변환한다면  $\alpha_R = -15^\circ$ 의 전압이 측정되었을 때 변환되어 계산되는 속도성분은  $\alpha_R = 0^\circ$ 일 때의 속도로 계산될 것이다. 즉,  $V = 1.42$  m/s의 속도성분을  $V = 0$ 인 것으로, 주유동속도  $U = 5.3124$  m/s를  $U = 5.5$  m/s로 계산된다는 것이다. 백분율로 환산하면 속도성분  $V$ 의 경우는 약 25%, 주유동속도  $U$ 의 경우는 약 3%의 오차를 보이게 된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 Grande<sup>(2)</sup>가 제안한 유효 냉각속도 관계식을 사용하여 이론출력전압을 도시한 그림이다. 여기서 보정상수  $A_1 = 1.0069$ 과  $A_2 = 0.8421$ 로  $\alpha_R = 0^\circ$ 의 교정실험에서 결정된 값을 사용하였다. 위의 그림에서 보는 바와 같이  $\alpha_R = 0^\circ$ 의 경우에는 보정된 상수를 사용하였기 때문에 이론출력전압이 측정전압과 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있으나 그 이외의  $\alpha_R$ 에서는 큰 차이를 보인다. 이것은 교정실험에서 보정된 상수를 사용하더라도 실제의 유동이  $\alpha_R \neq 0^\circ$ 인 경우에는 오차가 발생한다는 것을 알 수 있다. 더욱이 Fig. 5와 Fig. 6을 비교할 때  $A_1$ 과  $A_2$ 를 상수로 사용하면 Jorgensen<sup>(1)</sup>의 경우보다 실제 측정전압과의 차이가 더욱 크게 발생할 수 있다는 것을 알 수 있다. 특히  $\alpha_R$ 이 양(+ )인 경우  $\alpha_P = \pm 15^\circ$  부근에서는 이론전압이 정의되지 않는 구간이 발생하기 때문에 보정계수의 산정에 매우 주의해야 함을 알 수 있다.

Fig. 7은 본 연구에서 제시한  $A_1$ 과  $A_2, A_3$ 을  $\alpha_R$ 의 함수로 나타냈을 때의 이론출력전압을 도시한 그림이다. 보정계수를  $\alpha_R$ 의 함수로 나타내어 측정

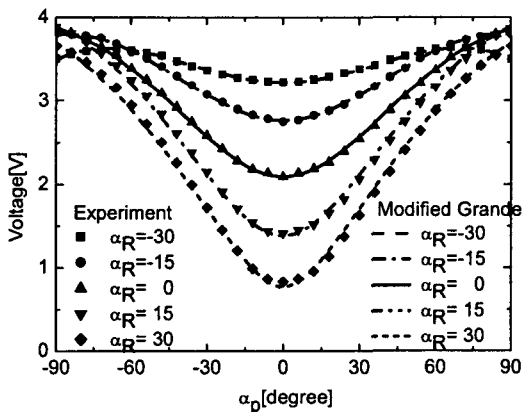


Fig. 7 Calculated voltage by Modified Grande equation with adapted  $A_1$  and  $A_2$ .

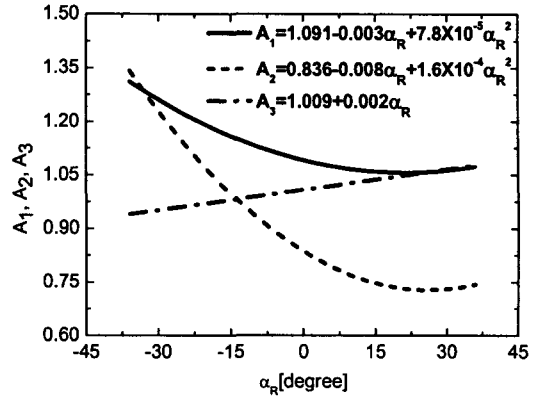


Fig. 8 Variation of  $A_1, A_2$  and  $A_3$  with  $\alpha_R$ .

결과와 비교하여 보면 Fig. 7과 같이 Jorgensen<sup>(1)</sup>의 방법이나 Grande<sup>(2)</sup>의 방법보다 본 연구에서 제시한 방법이 측정값과 정확하게 일치하는 것을 확인할 수 있다.

Jorgensen<sup>(1)</sup> 관계식의 경우는 전체의  $\alpha_R$ 의 범위에서 실제출력전압과의 차이를 보이지만 Grande<sup>(2)</sup>의 관계식을 이용하는 경우  $\alpha_R = 0^\circ$ 인 경우에는 적절한  $A_1$ 과  $A_2$ 의 선정을 통해 실제출력전압과 이론출력전압을 잘 일치시킬 수 있으므로  $\alpha_R \neq 0^\circ$ 인 경우도 적절한  $A_1$ 과  $A_2$ 의 값을 구한다면  $\alpha_R$ 에 관계없이 정확한 이론출력전압을 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

Fig. 8은 본 연구에서 제시한  $A_1$ 과  $A_2, A_3$ 을  $\alpha_R$ 의 함수로 나타낸 그림이다.

Figs. 9~11은 열선프로브의 교정 후 출력전압

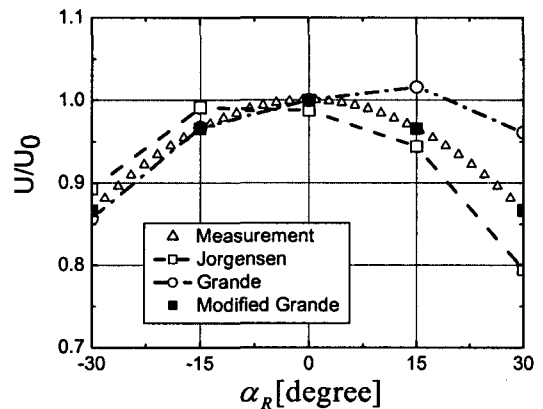


Fig. 9 Comparison of  $U$  velocity component.

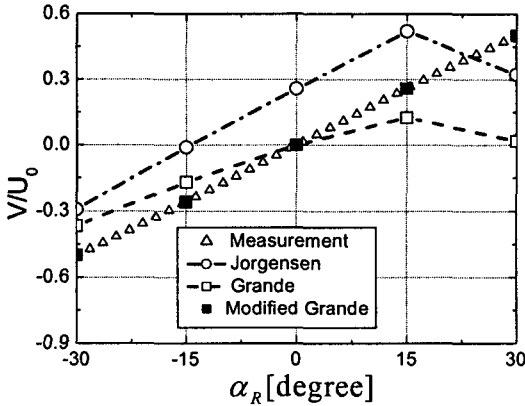


Fig. 10 Comparison of  $V$  velocity component.

을 각각의 방법을 통해 속도성분으로 변화했을 때의 결과를 나타낸 그림이다. 앞서 설명한 바와 같이 교정 실험장치의 주유동 방향 속도는 5.5 m/s 일 때 열선의 삽입각도  $\alpha_R$ 을  $-30^\circ \sim 30^\circ$ 까지  $15^\circ$  간격으로 변화시키면서 측정된 전압을 속도로 변환한 것이다.

Fig. 9는 주유동 방향의 속도를 나타낸 것으로 Jorgensen<sup>(1)</sup>의 방정식을 사용한 경우  $\alpha_R$ 이 음수인 영역에서는 실제유속보다 큰 속도값을,  $\alpha_R$ 이 양수인 영역에서는 대체적으로 실제보다 작은 주유동 속도를 예측하고  $\alpha_R$ 이 증가할수록 오차도 커지는 것을 보이고 있다. 보정계수  $A_1$ 과  $A_2$ 를 상수로 사용하는 Grande<sup>(2)</sup>의 방법은  $\alpha_R=0^\circ$ 에서 보정계수를 결정했으므로 이 각도에서 실제유속과 잘 일치하나  $\alpha_R$ 이 증가하면 실제유속보다 큰 속도 값을 예측하며 오차도 커지는 것을 볼 수 있다. 한편 음의  $\alpha_R$ 인 경우에는 의외로 실제유속과 비교적 적은 오차를 보이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 속도성분  $V$ 를 나타낸 그림이다. Jorgensen<sup>(1)</sup>의 경우  $\alpha_R=30^\circ$ 인 경우를 제외하고는 모든  $\alpha_R$ 의 범위에서  $V$ 를 크게 예측하고 있는데 앞서 설명한 바와 같이 모든  $\alpha_R$ 의 범위에서 대략 30% 정도의 오차를 보이는 것을 알 수 있다. 보정계수  $A_1$ 과  $A_2$ 를 상수로 사용하는 Grande<sup>(2)</sup>의 방법은 Fig. 9의  $U$ 의 경우와 마찬가지로  $\alpha_R=0^\circ$ 에서는 실제 유속과 잘 일치하고 있으나  $\alpha_R=0^\circ$ 에서 벗어날수록 오차가 증가하고 있음을 보인다. 반면 보정계수  $A_1$ 과  $A_2$ 를  $\alpha_R$ 의 함수로 보간하는 수정 Grande<sup>(2)</sup> 방법의 경우는 주유동 방향의 속도성분  $U$ 와  $V$ 가 매우 실제유속에 잘 일치

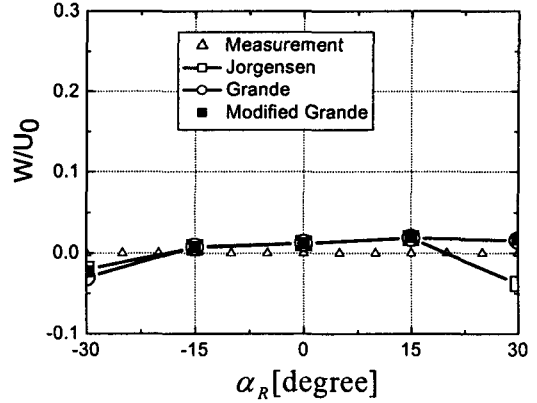


Fig. 11 Comparison of  $W$  velocity component.

하고 있음을 보인다. Fig. 11의 경우는 속도성분  $W$ 를 나타낸 그림으로 실제유속의 값은 0이 된다. 그림에서 보는 바와 같이 세 경우 모두 유사한 결과를 보이며 이때의 오차는 약 2%를 넘지 않는다.

#### 4.2 곡덕트 입구단면의 유속측정

이 절에서는 단면이 감소하는 180도 곡덕트의 입구단면을 선정하여 이 단면상의 속도성분을 측정하고 앞 절에서의 3가지 방법을 이용한 결과를 비교하였다. 대칭면 상에서는 대칭면을 가로지르는 속도성분  $W/U_0$ 가 0이어야 하므로 각 방법에 대한 비교가 간편하다.

일반적으로 곡덕트 내 압력은 원심력으로 인해

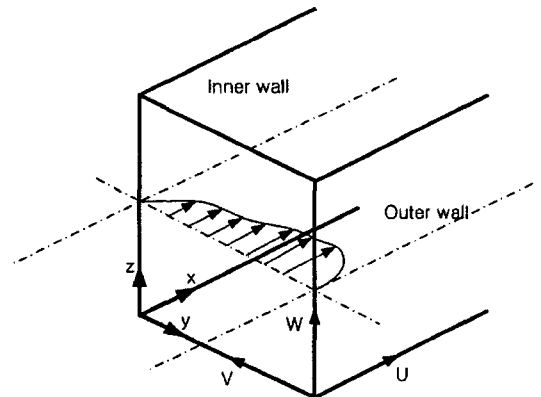


Fig. 12 Definition of coordinate and direction of velocities of the bend.

외벽면 쪽이 증가하게 된다. 곡덕트의 입구부에서는 하류의 높은 압력으로 인해 역압력구배가 형성되고 유체는 상대적으로 압력이 낮은 내벽면 쪽으로 이동하게 된다. 따라서 주유동 방향 최대 속도( $U/U_0$ )는 내벽면 쪽으로 치우치고 단면상의 속도성분  $V/U_0$ 는 양수(+),  $W/U_0$ 는 0에 가까운 분포로 나타나야 하고, 따라서  $\alpha_R$ 도 양수(+)가 됨을 알 수 있다.

Figs. 13~15는 곡덕트 입구 대칭면 상의 속도 성분을 나타낸 그림으로 3가지 방법을 비교하였다. 주유동 방향 속도성분을 나타낸 Fig. 13을 살펴보면 세 방법 모두 최대속도가  $y/D_H=0.4$  부근에서 발생하고 있는데 상수 보정계수를 사용하는 Grande<sup>(2)</sup>의 관계식이 다른 두 방법보다 전체적으로 크게 나타나며, Jorgensen<sup>(1)</sup> 관계식의 경우가 가장 작게 나타나고 있다. 이것은 앞 절의 Fig. 5에서  $\alpha_R$ 이 양(+)일 때의 결과와 일치한다.

$y/D_H=0.4$ 에서 각 방법의 오차를 살펴보면 수정 Grande<sup>(2)</sup> 관계식과 상수 보정계수의 Grande<sup>(2)</sup> 관계식은 평균 유속  $U_0$ 를 기준으로 3.8%의 차이를 보이며 Jorgensen<sup>(1)</sup> 관계식의 경우는 2.8%의 차이를 보인다.

Fig. 14의  $V/U_0$ 를 살펴보면 각 방법의 오차는 더욱 크게 나타남을 알 수 있는데, Jorgensen<sup>(1)</sup> 관계식의 경우가 매우 큰 값으로 분포하는 것을 보이며 상수 보정계수의 Grande<sup>(2)</sup> 관계식은 다른

두 방법보다 작은 분포를 보이고 있다.

최대  $V/U_0$ 가 나타나는  $y/D_H=0.3$ 에서의 오차는 수정 Grande<sup>(2)</sup> 관계식과 상수 보정계수 Grande<sup>(2)</sup> 관계식과의 차이가 11.4%의 오차를 보이며, Jorgensen<sup>(1)</sup>의 방법의 경우는 무려 33.6%의 오차를 보인다. 이것은 Fig. 10에서의 설명과 일치하며 이러한 오차는 실험장치의 설치와 측정에서 발생하는 다른 편의오차와 정밀오차보다 매우 크기 때문에 전체 측정오차를 지배하게 된다.

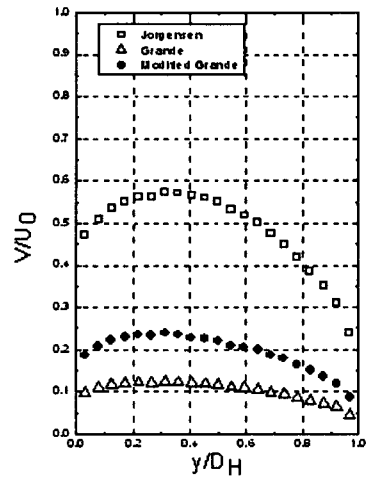


Fig. 14 Distribution of normalized  $V$  velocity components at the bend inlet ( $\theta=0^\circ$ ).

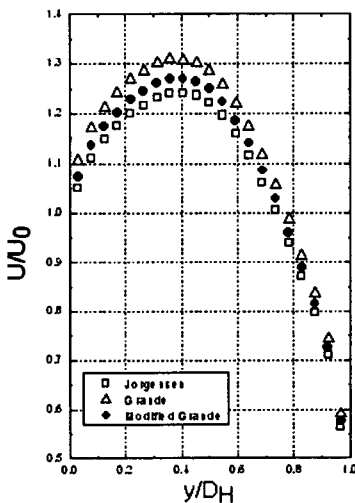


Fig. 13 Distribution of normalized  $U$  velocity components at the bend inlet ( $\theta=0^\circ$ ).

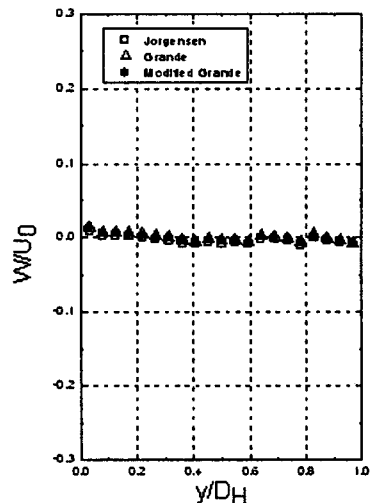


Fig. 15 Distribution of normalized  $W$  velocity components at the bend inlet ( $\theta=0^\circ$ ).



Fig. 15는 이차유동 성분  $W/U_0$ 를 나타낸 것으로 대칭면에서의  $W/U_0$ 는 엄밀하게는 0이 되어야 한다. 따라서 이 그림을 통해 측정시 발생하는 열선회전각도의 기준 설정에 대한 편의오차의 정도를 가늠할 수 있다. 그림을 살펴보면 측정값이 0을 중심으로 약간씩 편차를 보이고 있으며, 이러한 오차는 곡덕트의 설치오차와 열선유속계 이송장치의 설치오차, 열선의 기준 삼입각도( $\alpha_R$ )와 열선회전각도( $\alpha_P$ )의 기준설정오차, 열선의 회전오차, 열선의 이송오차 등이 포함된다.

측정점 중 가장 큰 오차를 나타내는 내벽면 ( $y/D_H=0$ )에서 첫번째 측정점의 속도는 0.013 (1.3%)이고 나머지 측정점에서는 0.0068(0.68%) 이하의 값으로 나타났다. 이 값을 열선회전각도 오차로 대치하면 각각 0.75°와 0.37°이다. 따라서 측정시 발생한 총 오차는 평균 유속  $U_0$ 의 1.3% 이하로 추정할 수 있다.

180도 곡덕트 좌표는 곡덕트의 유로를 따라 각 단면에서 좌표를 설정하는 방법을 사용하였다.

주어진 단면에서 주유동 방향을  $x$ -축으로 하고 곡덕트의 내벽면에서 외벽면으로 향하는 반경 방향을  $y$ -축, 곡덕트의 상부측 벽에서 하부측 벽면으로의 방향을  $z$ -축으로 설정하였다. 이것은 앞서의 열선유속계의 교정실험에서 설명한 열선좌

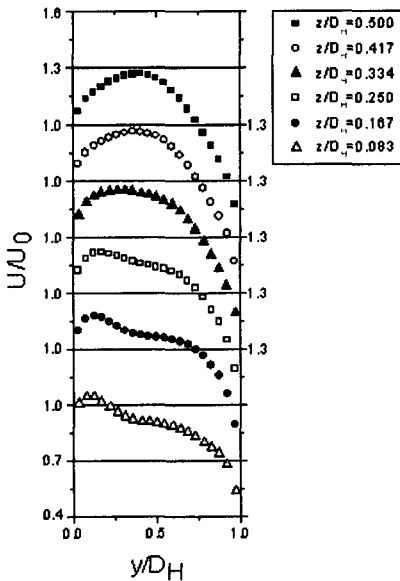


Fig. 16 Distribution of normalized  $U$  velocity components at the bend inlet ( $\theta=0^\circ$ ).

표계와는 차이가 있으며 이후의 곡덕트 내 유동에 대한 설명에서는 곡덕트 좌표계로 나타내었다.

Fig. 16은 곡덕트의 입구단면에서의 단면상 주유동 속도성분( $U/U_0$ )을  $A_1$ 과  $A_2$ 를 보간하여 사용하는 수정 Grande<sup>(2)</sup> 관계식을 이용하여 나타낸 그림이다. 기존 곡덕트의 연구들과 마찬가지로 최대유속이 내벽면( $y/D_H=0$ ) 쪽으로 치우쳐 나타나고 있으며 이러한 현상은 하류 외벽면 쪽의 압력이 원심력에 의해 높기 때문에 상대적으로 압력이 낮은 내벽면 쪽으로 유체가 이동하기 때문이다.

곡덕트의 대칭면( $z/D_H=0.5$ )에서의 속도분포는 포물선형을 이루지만 측벽쪽( $z/D_H=0$ )의 속도분포는 굴곡이 있는 형태를 보인다. 이 현상은 곡덕트로 유입되면서 하류의 역압력구배와 중첩되어 나타나는 현상으로 완전 발달한 곡덕트의 상류 직관부의 난류유동에서 수직속력의 구배에 의해 주유동 방향에 수직한 단면에 발달하는 2차유동에 의한 것이다.

Fig. 17은 측정된 주유동 속도를 3차원적으로 나타낸 그림이다. 측정은 곡덕트의 하부만 측정되었으나 유동이 대칭면을 중심으로 상하대칭이므로 여기서는 곡덕트의 전체 단면을 함께 나타내었다. 앞서 설명한 바와 같이 역압력 구배로

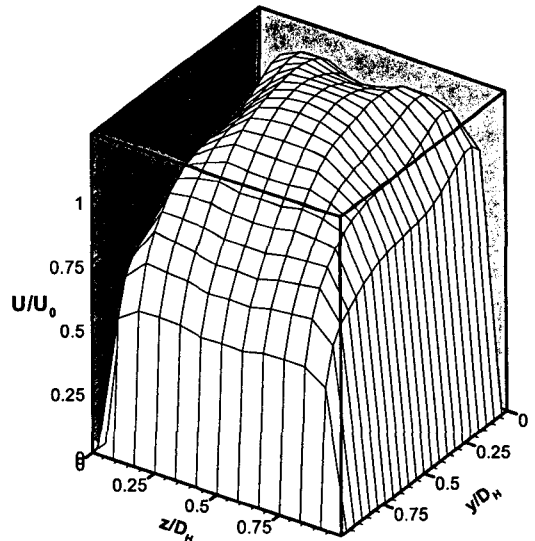


Fig. 17 3-dimensional normalized  $U$  velocity components distribution at the bend inlet ( $\theta=0^\circ$ ).

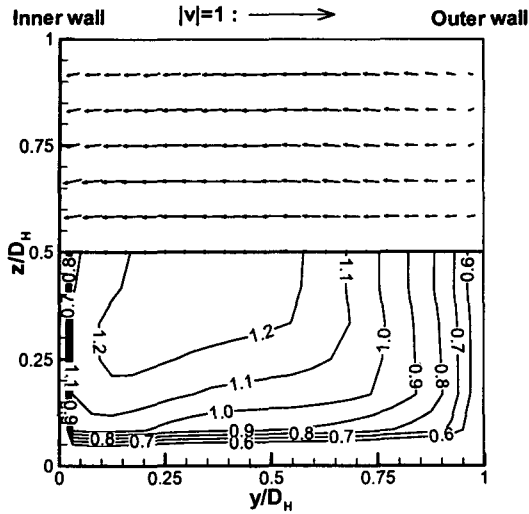


Fig. 18 Secondary velocity vectors and contours of normalized  $U$  velocity component on the inlet plane ( $\theta=0^\circ$ ).

인해 최대속도 부분이 내벽면 쪽으로 이동하는 것을 보이고 있으며 또한 입구 직관부의 이차유동으로 인한 주유동 방향의 굴곡도 함께 나타나고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 18은 단면상에 발생하는 이차유동의 벡터선도와 함께 주유동 속도성분의 등속선을 나타낸 그림이다.  $z$ -방향의 속도성분  $W$ 가  $V$ 에 비해 작기 때문에 각 벡터들의 대부분 수평적인 분포를 하고 있으며 내벽면 쪽으로 이동하는 것을 보이고 있다. 한편 주유동 방향 등속도 선도는 내벽면으로 치우쳐지는 정도가  $z/D_H=0.25$ 에서 대칭면보다 크게 발생하고 있음을 나타내고 있다.

5. 결 론

열선유속계를 유로에 수직으로 삽입하게 되는 경우 측정전압으로부터 속도성분으로 변환하는 과정에서 발생하는 오차를 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

Jorgensen<sup>(1)</sup> 관계식을 사용하는 경우 측정된 출력전압과 이론전압이 큰 차이를 보이며 결국 변환된 속도성분도 오차가 발생하게 된다. 따라서 열선이 유동에 직각으로 삽입되는 경우에는 Jorgensen<sup>(1)</sup>의 공식을 사용하면 오차를 피하기 어렵다는 것을 알 수 있다.  $\alpha_R$ 이 음수인 영역에

서는 실제 유속보다 큰 속도 값을 예측하고  $\alpha_R$ 이 양수인 영역에서는 대체적으로 실제보다 작은 주유동 속도를 예측하며  $\alpha_R$ 이 증가할수록 오차도 증가하였다.

보정계수를 상수로 사용하는 Grande<sup>(2)</sup> 관계식의 경우는  $\alpha_R=0$ 의 경우에는 보정된 상수를 사용하였기 때문에 이론출력전압이 측정전압과 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있으나  $\alpha_R$ 이 0에서 벗어날수록 오차가 증가하였다.

보정계수를 방사각의 함수로 취급하는 경우에는 Grande<sup>(2)</sup>의 관계식에 하나의 새로운 상수를 추가로 도입하였으며 주유동방향의 속도성분  $U$ 와  $V$ 가 매우 실제유속에 잘 일치하고 있음을 보였다.

3차원 유동인 곡덕트의 입구단면에서 측정된 속도의 오차는 최대속도 위치에서 수정 Grande<sup>(2)</sup> 관계식과 기존 Grande<sup>(2)</sup> 관계식은 평균 유속  $U_0$ 를 기준으로 3.8%의 차이를 보이며, Jorgensen<sup>(1)</sup> 관계식의 경우는 2.8%의 차이를 보인다. 단면상의 속도  $V/U_0$ 는 Jorgensen<sup>(1)</sup> 관계식이 실제보다 큰 속도를 보이며 상수 보정계수를 사용하는 Grande<sup>(2)</sup> 관계식은 다른 두 방법보다 작은 분포를 보였다. 최대  $V/U_0$ 에서 수정 Grande<sup>(2)</sup> 관계식과의 차이는 상수 보정계수의 Grande<sup>(2)</sup> 관계식이 11.4%의 오차, Jorgensen<sup>(1)</sup> 관계식의 경우 33.6%의 오차를 보였다.

곡덕트의 유동을 수정 Grande<sup>(2)</sup> 관계식을 이용하여 나타내면 곡덕트의 대칭면( $z/D_H=0.5$ )에서의 속도분포는 포물선형을 이루고 있지만 측벽쪽( $z/D_H=0$ )의 속도분포는 굴곡이 있는 형태를 보였다.

후 기

본 연구는 고려대학교 교내특별연구비(No. K0173000)에 의하여 수행되었으며 이에 감사한다.

참고문헌

1. Jorgensen, F. E., 1971, Directional sensitivity of wire and fiber-film probes, DISA Information, Vol. 11, pp. 31-37.
2. Grande, G. D and Kool, P., 1981, An improved experimental method to determine the

- complete Reynolds stress tensor with a single rotating slating hot wire, *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, Vol. 14, pp. 196-201.
3. Kuroumaru, M., Inoue, M., Hikaki, T., Abdelkhalek, F. A. and Ikui, T., 1982, Measurement of three dimensional flow field behind an impeller by means of periodic multi-sampling with a slant wire, *Bulletin of JSME*, Vol. 25, No. 209, pp. 1674-1681.
  4. Menet, J. L., Valdes, L. C. and Menart, B., 1998, An accurate modelling of the angular voltage output response of a single normal hot wire, *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 9, pp. 1715-1720.
  5. Menet, J. L., Valdes, L. C. and Menart, B., 1999, An improved model for the directional sensitivity of single yawed hot-wire probes, *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 10, pp. N47-N50.
  6. Bruun, H. H. and Tropea, C., 1985, The calibration of inclined hot-wire probes, *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, Vol. 18, pp. 405-413.