

# 원형단면의 곡관에서의 난류유동 측정

이 건 휘\*

(1997년 12월 13일 접수)

## Experimental Study of Turbulent Flow in a U-Bend of Circular Cross-Section

Gun-Hyee Lee

**Key Words :** Turbulent Flow(난류유동), Bend(곡관), Secondary Flow(2차유동), Hot-Wire Anemometer(열선유속계)

### Abstract

Hot-wire measurement of the longitudinal and radial velocity components and Reynolds stresses are reported for developing turbulent flow in a strongly curved 180° pipe and its tangents. Slanted wire is rotated to 6 directions and the voltage outputs of them are combined to obtain the mean velocities and Reynolds stresses. Significant double maxima in the longitudinal velocity component appear in the bend. V-profiles reveal the development of a strong secondary flow. This secondary flow is induced by the transverse pressure gradient set up between the outer ( $r_o$ ) and inner ( $r_i$ ) wall region of the bend. Another second cross-stream flow develops after  $\theta=135^\circ$  and its direction is opposed to that of main second flow.

$\varphi$  : 원주방향 좌표

### 기 호 설 명

- D : 관 직경
- $r$  : 반경방향 좌표
- $R_c$  : 곡관의 곡률반경
- $Re$  : 레이놀즈수 ( $=DU_b/\nu$ )
- $u'$  : 주유동방향 난류강도 ( $=\sqrt{u'^2}$ )
- $\overline{uw}$  :  $x-r$  평면에서의 레이놀즈응력
- $U$  : 주유동방향 속도성분
- $U_b$  : 주유동방향 단면 평균속도
- $v'$  : 반경방향 난류강도 ( $=\sqrt{v'^2}$ )
- $V$  : 반경방향 속도성분
- $x$  : 직관부에서 주유동방향 좌표
- $\theta$  : 곡관부에서 주유동방향 좌표
- $\nu$  : 유체 동점성계수

### 1. 서 론

곡관내 발달되는 난류유동에 대한 연구는 다양한 산업적 응용성으로 인해 많은 연구가 진행되어 왔다. 초기 연구로 Thomson<sup>(1)</sup>은 곡면을 따라 흐르는 유동의 원심력과 경계층 영역내 느린 유동간의 상호작용으로 2차유동이 발생된다고 제안하였다. Eutice<sup>(2)</sup>는 염색된 물을 곡관부의 상류에 투입한 상당량의 정량적인 실험으로, 2차유동의 존재 형태를 설명하였다. Dean<sup>(3,4)</sup>은 이러한 유동을 수학적 으로 분석하여, 유동을 좌우하는 무차원변수(Dean number)를 정의하였다. 이들 연구는 곡관을 지나 는 유동의 기본적인 특징을 이해하는 기초는 제공 하였으나, 실제 응용에 적용 가능한 상세한 설명은 제공하지 못하였다. 1970년대 이후, 사각단면의 곡 관내 발달되는 난류유동에 대한 많은 실험적 연구<sup>(5-8)</sup>

\*회원, 원광대학교 기계설계공학과

가 진행되었으며, 상당한 실험 자료들이 제공되어 2차유동과 복잡한 난류 특성이 이해되었다. 이들 실험연구에서 사용된 측정장치로 열선유속계나 LDA (Laser Doppler Anemometer)가 사용되었다.

반면 원형 단면의 곡관내 유동은 단면이 사각인 곡관내 유동에 비해 그 적용범위가 광대하지만, 실험장치의 제작이나 측정상의 어려움 때문에 이에 대한 실험적 연구는 상대적으로 적다. 원형단면의 곡관내 유동은 응축기나 보일러와 같은 열전달장치, 터빈 날개, 발전기의 내부 냉각통로, 배관체계 그리고 혈류유동 등에 대한 이해와 설계에 필요한 유동장으로 이 유동에 대한 많은 수치 해석적 연구가 진행되고 있다. 그러나 난류유동장에 대한 해석적 난점 등의 이유로 얻어진 해에 대한 정확성을 판별하기 위해서는 실험적 연구 결과와의 비교가 필요하다. 즉, 원형단면의 곡관으로 유입된 유동은 강력한 3차원 유동장을 형성하며, 발생하는 2차유동은 주유동을 교란시켜 특이한 유동장을 형성하고, 난류응력장에 영향을 미친다. 3차원 난류유동장을 보다 정확히 해석하기위하여 개발되는 수치기법이나 난류모형을 평가하는데 있어서 원형단면의 180° 곡관내 유동은 매우 완벽한 유동조건이라 보여진다.

원형 단면의 곡관내 난류유동에 대해 가장 근래에 이루어진 실험적 연구는 LDA를 사용한 Azzola 등의 연구<sup>(9)</sup>와 열선유속계를 사용한 Rowe<sup>(10)</sup>에 의해 수행된 바 있다. Rowe의 연구 결과는 상대적으로 빈약한 실험 데이터만을 제공하므로 수치결과와 비교하기에 부족하며, Azzola 등의 연구는 곡률반경 방향에 수직인 방향( $\phi=90^\circ$ )에 대한 결

과만을 제시하였을 뿐만 아니라, 속도의 2성분, 레이놀즈응력의 2성분만을 측정하였으므로 해석결과를 판별하는 정량적 기준으로는 미흡하다.

원형단면의 곡관에서의 난류유동 측정 본 연구에서는 원형단면의 곡관내 발달하는 난류유동을 이해하기 위해서, 곡률 반경 방향에 평행한  $\phi=0^\circ$ 인 단면에서, 여러 곡관의 각도에 대해 유동을 열선유속계를 사용하여 측정하고 얻어진 결과를 이용하여 난류속도장과 레이놀즈응력을 구하였다. 본 연구의 결과는 최근에 많이 수행되는 수치 해석적 연구에 있어서, 수치해석 절차와 개발중인 난류모형의 유효성을 판단하는 척도로 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

## 2. 실험장치

원형단면의 곡관내를 흐르는 난류유동의 유동특성과 난류특성을 고찰하기 위해 Fig. 1과 같은 180° 곡관과 곡관 상하류에 부착된 직관을 지나는 유동을 시험유동으로 사용하였다. 유동 시험부의 기본 요소와 유동방향이 Fig. 1에 표시되어 있다. 관의 횡단면은 내경이  $88.9 \pm 0.2$  mm인 원형이다. 곡관의 평균 곡률 반경은 관 직경의 3.357배(곡률비,  $R_c(\text{평균 곡률반경})/D(\text{관의 직경})=3.357$ )이다. 이 곡률비는 강력한 2차유동이 포함된 3차원 유동장이 생성될 수 있으나, 주유동방향으로는 후류가 발생되지 않도록 선택된 곡률비<sup>(9)</sup>이다. 공기 흡입부에는 허니콤(honeycomb)과 가는 철망(screen)을 설치하였고, 곡관 상류의 직관부 길이는 관직경의 48배로서 곡관의 입구부에서 난류유동

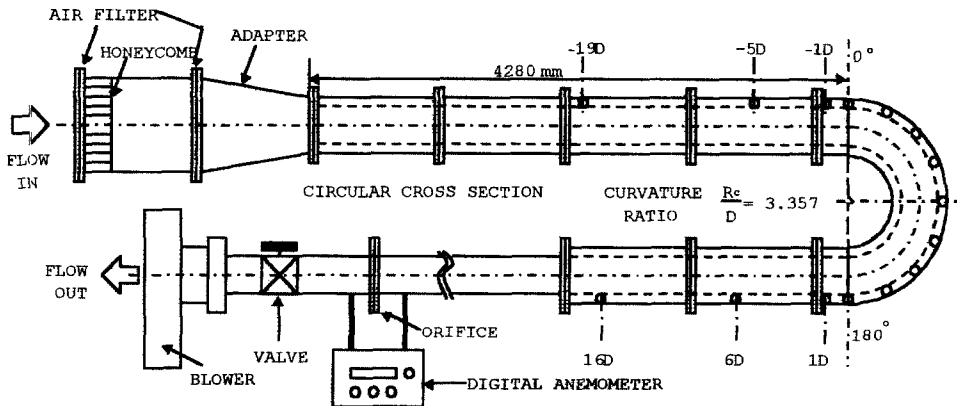


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

이 완전히 확립되도록 제작하였다. 곡관 출구부와 연결된 직관부는 곡관 하류 직관부에서 유동의 회복을 측정하기 위하여, 관직경의 24배 길이의 직관부를 부착시켰다. 이상에서 설명한 180° 곡관부와 곡관부 상하류의 직관부는 투명한 플렉시그래스(plexiglass)를 재료로 하여, CNC 밀링머시인으로 상하 반단면을 가공하여 접합시킴으로서 정밀제작을 하였다. 송풍기 전면에는 오리피스를 설치하여 유량을 측정하였다.

측정위치는 곡관 상류직관부에서는 곡관의 입구부에서 관직경(D)의 5배(-5D)와 1배(-1D)되는 지점, 곡관부에서는 곡관입구부( $\theta=0^\circ$ ),  $22.5^\circ$ ,  $45.0^\circ$ ,  $67.5^\circ$ ,  $90.0^\circ$ ,  $112.5^\circ$ ,  $135.0^\circ$ ,  $157.5^\circ$ 와 곡관출구부( $180^\circ$ )이며, 곡관 하류직관부에서는 관직경의 1배(+1D), 6배(+6D), 16배(+16D)되는 지점이다.

각 지점에서 유동방향에 직각인 단면상에서 곡물반경에 평행한 선상( $\phi=0^\circ$ )을 따라 외벽에 측정구멍을 뚫어 열선프로브를 삽입하고, 자동이송장치를 사용하여 4 mm 간격으로 21점에서 측정을 수행하였다(Fig. 2). Azzola 등<sup>(9)</sup>은 같은 형상의 실험장치에서 곡물반경방향에 수직인 선상( $\phi=90^\circ$ )을 따라 반단면에 대해 수행한 바 있다. 본 실험은 레이놀즈수 57,000에서 수행하였으며, 이는 Azzola 등의 실험조건과 동일하다. Azzola 등은 레이놀즈수 57,400과 110,000에서 유동측정을 수행하였는데 실험의 오차해석으로부터 그 차이가 거의 구분할 수 없다는 것을 보여준 바 있다.

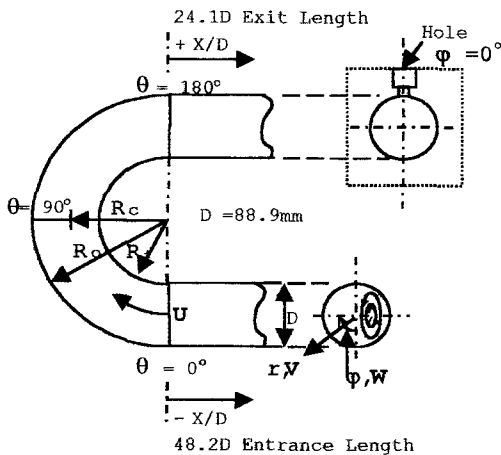


Fig. 2 The test section configuration and definition of coordinate systems.

### 3. 측정이론

본 실험에서는 열선유속계를 사용하여 속도성분과 난류응력성분을 측정하였다. 또다른 대표적인 유동 측정 장비인 LDA와 비교하면, 열선프로브를 유동장에 삽입시켜서 측정하여야 하므로 유동에 교란을 일으키는 단점이 있다. 그러나 단면이 원형인 경우, LDA를 사용하면 빛의 굴절에 의한 장애가 발생하며, 이를 해결해야 하는 기법 역시 매우 난해하므로, 어느 측정 장치가 보다 정확한 결과를 얻게 해줄 수 있는지 또는 보다 효율적인 지는 확실하지 않다.

열선유속계의 기본적인 원리는 King<sup>(11)</sup>에 의해 제시된 바 있으며, 초기에는 정전류형 열선유속계(CCA)가 사용되다가 최근에는 보다 발달된 정은도형 열선유속계(CTA)가 주로 사용되고 있다. 3차원 유동계측은 Champagne 등<sup>(12)</sup>과 Jorgensen<sup>(13)</sup>에 의해 열선의 유입각에 따른 열전달 특성을 고려하여 제시되었다. 또한 3차원 난류유동 측정을 위하여 다양한 형태의 열선이 개발되어 시험되고 여러 가지 측정 방법이 제시되었다.

#### 3.1 속도측정이론

속도측정이론은 기본적으로 열선유속계의 출력 브리지전압(E)과 유효 냉각속도( $U_{eff}$ )와의 관계를 King의 법칙으로 구할 수 있으며, 다음과 같은 선형관계를 갖는다.

$$E = S U_{eff} \tag{1}$$

여기서 S는 비례상수이다. 열선의 유입각에 따른 냉각특성을 고려하여 Jorgensen이 제시한 식은 다음과 같다.

$$U_{eff}^2 = U_N^2 + k^2 U_T^2 + h^2 U_B^2 \tag{2}$$

이 식에서  $U_N$ 은 열선에 수직 방향 속도성분,  $U_T$ 는 접선 방향 속도성분,  $U_B$ 는 중수직 방향 속도성분이다. 또한 k는 yaw factor이며 h는 pitch factor이다.

식 (2)에서  $U_N$ ,  $U_T$ 와  $U_B$ 는 Fig. 3의 좌표계 상에서 다음과 같다.

$$U_N = (U + u) \cos \alpha + [(V + v) \cos \psi - (W + w) \sin \psi] \sin \alpha$$

$$U_T = -(U + u) \sin \alpha + [(V + v) \cos \psi - (W + w) \sin \psi] \cos \alpha$$

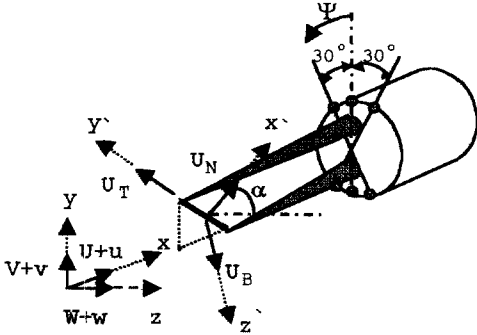


Fig. 3 The hot-wire positions selected.

$$-(W+w)\sin\psi\cos\alpha \quad (3)$$

$$U=(V+v)\sin\psi+(W+w)\cos\psi$$

이 식에서  $\alpha$ 는 경사형 열선의 기울기이며  $\psi$ 는 열선 회전각이다. Acrivellis<sup>(14)</sup>가 제시한 방법은 경사형 열선을 Fig. 3 기준으로

$$\psi=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ(-90^\circ), 45^\circ, 315^\circ(-45^\circ)$$

6방향으로 회전시켜 얻어진 전압을 사용하여 다음과 같은 관계식으로 정리하여 속도를 계산하였다.

$$\begin{aligned} \frac{E(\psi, \alpha)}{S} &= [(U+u)\cos\alpha+(V+v)\cos\psi \\ &\sin\alpha-(W+w)\sin\psi\sin\alpha]^2 \\ &+k^2\{-(U+u)\sin\alpha+(V+v)\cos\psi\cos\alpha \\ &-(W+w)\sin\psi\cos\alpha\}^2 \\ &+h^2\{(V+v)\sin\psi+(W+w)\cos\psi\}^2 \end{aligned} \quad (4)$$

본 연구에서는 위의 식을 사용하였으나, 경사형 열선의 회전각은 회전각이  $90^\circ$ 와  $180^\circ$ 인 경우 열선 지지대의 간섭으로 인해 얻어지는 출력이 매우 불안정하므로 다음과 같은 회전각을 사용하여 실험하였다.

$$\psi=0^\circ, 30^\circ, 150^\circ, 180^\circ, 210^\circ(-150^\circ), 330^\circ(-30^\circ)$$

### 3.2 레이놀즈응력의 측정이론

앞에서 설명한 속도를 측정하기 위해 얻어진 전압 값을 레이놀즈응력을 계산하는데 사용하였다. Dvorak과 Syred<sup>(15)</sup>, King<sup>(11)</sup>이 제안한 식을 기본 식으로, 열선유속계를 선형화시켜 사용할 경우 Dvorak과 Syred, King의 식을 변형시킨 다음 식을 본 측정방법에 적용하였다.

$$\begin{aligned} \overline{u_1 u_m} &= \overline{U_1 U_m} - \overline{U_1} \overline{U_m} \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{\partial \overline{U_1} \partial \overline{U_m}}{\partial Z_i \partial Z_j} z_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial \overline{U_1} \partial \overline{U_m}}{\partial Z_i \partial Z_j} \gamma_{z_i z_j} \\ &\quad - \left[ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 \overline{U_1}}{\partial Z_i^2} z_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2 \overline{U_1}}{\partial Z_i \partial Z_j} \gamma_{z_i z_j} \right] \\ &\quad \times \left[ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 \overline{U_m}}{\partial Z_i^2} z_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2 \overline{U_m}}{\partial Z_i \partial Z_j} \gamma_{z_i z_j} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $\gamma_{z_i z_j}$ 는  $Z_i$ 와  $Z_j$ 사이의 상관관계이며, King이 제시한 다음 식을 사용하였다.

$$\gamma_{z_i z_j} = \eta (\cos 30^\circ)^n \cos \gamma \quad (6)$$

이 식에서  $\eta$ 는 Kelleher 등 (16)이 제시한 값인 0.8을 사용하였으며,  $n$ 은 열선사이의 각도( $\beta$ )와 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$\beta = n \times 30^\circ + \gamma \quad (7)$$

## 4. 결과 및 고찰

본 실험은 레이놀즈수 57,000에서 수행되었다. Azzola 등은 레이놀즈수 57,400에서 실험을 수행하였으며, 보다 큰 레이놀즈수 110,000에서 수행된 Azzola와 Humphrey의 실험결과<sup>(17)</sup>와 비교하여 그 차이가 거의 없음을 보여준 바 있다.

Fig. 4는 측정된 주유동방향 속도성분( $U$ )을 표시한 그림이며,  $U_b$ 는 주유동방향 단면평균속도이다. Fig. 4(a)에 표시된 '-1'은 앞서 설명한 바와 같이 곡관의 입구와 연결된 상류직관부에서, 곡관 입구로부터 1D 떨어진 지점을 의미한다. Fig. 4에 표시된 각도는 곡관의 각도를 나타내며, Fig. 4(b)에 표시된 '+1'과 '+6'은 곡관의 출구와 연결된 하류직관부에서, 곡관의 출구로부터 1D와 6D 떨어진 지점에서 측정된 값을 의미한다. 곡관의 입구 직관부( $X/D=-1$ )에서 속도가 완전히 확립된 유동을 얻을 수 있도록 충분히 긴 상류직관부를 부착시켰다. 그림에서 실 선으로 표시된 곡선은 Laufer의 실험 결과<sup>(18)</sup>로 제시된 다음 식( $n=7$ )을 이용하여 도시한 속도분포이다.

$$\frac{U}{U_b} = \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/n} \quad (8)$$

이 식에서  $r$ 은 반경방향 길이이며,  $R$ 은 관의 반경이다.

그림에서  $r$ 은 반경방향 길이이며,  $R_o$ 과  $R_i$ 는

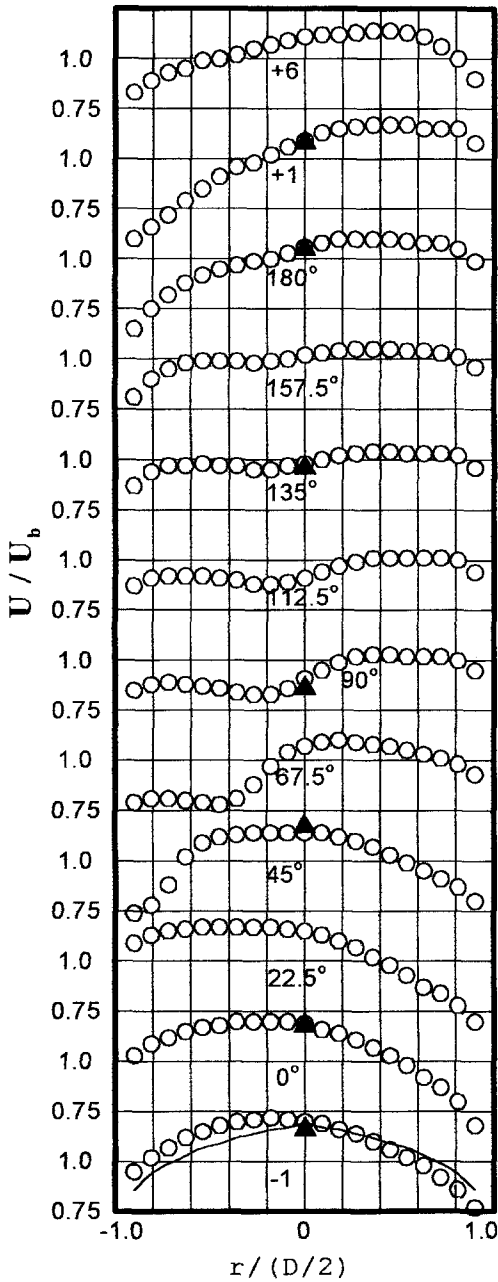


Fig. 4 Measurements of the longitudinal mean velocity components at sequential stations in a 180° curved pipe with straight tangents. Solid line at  $X/D=-1$  correspond to Laufer's developed flow data and triangle corresponds to Azzola's data.

각각 곡관의 곡률 중심에서 외벽과 내벽까지의 거

리이다. 그리므로  $r/(R_o-R_i)$ 가 1인 위치는 곡관의 외벽이며, -1인 위치는 곡관의 내벽이다. Laufer의 결과와 본 실험결과를 비교하면 외벽 쪽에서는 Laufer의 결과 값이 보다 크나, 내벽 쪽에서는 본 실험결과가 보다 크게 나타난다. 곡관 상류에 부착된 직관부 길이는 관 직경의 48배 이상이므로 유동이 충분히 발달되어서 좌우 대칭이어야 하나, 본 실험 결과는 비대칭으로 형성된 속도분포가 측정되었다. 이러한 차이가 발생하는 원인으로 Azzola 등은 이 위치에서 유동이, 미미하나마 곡관의 내측벽쪽으로 가속되고 있다고 추정할 바 있다. 또다른 원인으로서는 측정 방법에 의한 오차로 보여진다. 측정 구멍이 관의 외벽 쪽에 설치되어 있으며, 측정시 열선유속계의 프로브가 내벽 쪽으로 이동함에 따라 프로브 지지대 역시 유로에 삽입되고, 그 결과 점차 유동 단면적이 비록 작지만 다소 감소되어 속도가 증가되는 것으로 추정된다. 이와 같은 실험방법에 의한 오차는 열선유속계를 사용할 때 피할 수 없이 발생한다. 그러나 이 오차를 감안한 속도 환산은 유동이 3차원이므로 해결하기 어려우며, 앞으로 이에 대한 연구가 필요하다고 판단된다. 물론 LDA를 사용하면 이러한 오차는 제거할 수 있으나, LDA를 사용한 많은 실험에서는 빛의 굴절로 인한 오차가 상당히 발생한다고 보고되고 있다. 현재 3차원 유동장에 대한 대표적인 측정장치는 열선유속계와 LDA이며 어떠한 장치를 사용하던지, 이 정도의 오차는 감수할 수 밖에 없다고 보여진다.

Fig. 4에 Azzola 등의 실험 결과(▲)를 본 실험결과와 비교하기 위해 표시하였다. Azzola 등은 곡률 반경에 수직인 반경 상( $\varphi=90^\circ$ )에서 실험을 수행하였으므로 본 실험과 일치하는 측정 위치는 유로의 중앙 한 점뿐이다. 이 위치에서 두 실험 결과는 정확하게 일치하지는 않으나 실험 오차범위내에서 비교적 근사하다고 판단된다.

본 실험은 곡관의 입구인  $\theta=0^\circ$ 에서 실험을 수행할 수 있도록 곡관을 제작하였으며, 이 위치에서 측정된 주유동의 분포는 하류인 곡관의 영향으로 내측면 부근에서 가속되고 외측면 부근에서 감속되는 경향이 나타났다. 이 경향은  $\theta=22.5^\circ$ 까지 계속되며, 이와 같은 현상이 발생하는 이유는 곡관의 입구에서 내외 벽간의 압력 차가 발생하여, 내벽 근처에서는 주유동방향 순압력구배가 외벽면 근처에서 역압력구배가 형성되기 때문이다. 이와 같은

현상은 사각단면의 곡관에서 수행된 Humphrey 등의 연구,<sup>(4)</sup> 문찬 등의 실험<sup>(6)</sup>과 Chang 등의 실험<sup>(7)</sup>에서 제시된 바와 유사하다.

$\theta=45^\circ$ 에서 주유동속도분포는 내벽 면에서 속도가 급격히 작아지며,  $\theta=67.5^\circ$ 에서는 이중극대현상이 나타나  $\theta=157.5^\circ$ 까지 계속됨을 볼 수 있다. 사각단면의 곡관에서 수행된 연구들에서도 이중극대현상이 나타나며 곡관내 유동의 전형적인 특성이란 보여진다. 이러한 이중극대현상은 곡관내 난류 유동에서는 강력한 2차유동이 발생하며 그 결과 초래되는 주유동속도의 변화라고 이해된다.  $\theta=90^\circ$ 에서 주유동속도분포를 살펴보면, 이 선상( $\phi=0^\circ$ )에서 측정된 평균속도는 단면평균속도( $U_b$ )보다 작은 것을 알 수 있다. 본 실험 결과와  $\phi=90^\circ$ 인 선상에서 측정된 Azzola 등의 결과를 종합해서 검토하면 이 두 선상을 제외한 다른 부분에서 보다 빠른 속도가 분포되는 것으로 추정된다.

곡관의 출구부인  $\theta=180^\circ$ 에서 주유동방향 속도분포는 내벽근처는 감속되고 외벽근처는 가속되는 경향을 보인다. 곡관하류 직관부  $X/D=1$ 인 지점에서는 이러한 경향이 보다 강화되며,  $\theta=0^\circ$ 에서 속도분포와 비교하면 좌우 대칭에 가깝다.  $X/D=6$ 인 위치에 접근하면 하류인 곡관의 영향이 점차 감소되어 개칭인 유동장에 접근하나 아직 곡관의 영향이 남아있다.

Fig. 5는 반경방향속도( $V$ ) 분포를 도시한 그림이다. 양의  $V$  값은, 위치에 상관없이 내벽 쪽에서 외벽 쪽으로 향하는 속도를 의미한다. 다시 설명하면  $r/(R_o-R_i)$ 가 0보다 작은 위치에서 양의  $V$ 는 내벽 쪽을 향해야 하나, 속도분포의 이해를 보다 용이하게 하기 위하여 외벽 쪽으로 향하는 속도를 양으로 값으로 통일하여 도시하였다.

유로의 중앙부분( $-0.5 < r/(R_o-R_i) < 0.5$ )에서  $V$  속도는 곡관의 입구에 비해  $\theta=22.5^\circ$ 에서는 급격히 발달하며,  $\theta=45^\circ$ 와  $\theta=67.5^\circ$  사이서 최대값( $V/U_b \sim 0.13$ )을 보이며,  $\theta=90^\circ$ 에서는 급격히 감소한다. 유동이 하류로 진행됨에 따라, 유로 중앙부분에서  $V$ 속도는  $135^\circ$  부근에서 0에 가까워지며, 이보다 하류인 위치에서는 음의 값을 가지다가 곡관의 출구부에서 다시 양의 값으로 전환된다. 이와 같은 유로중앙부분에서  $V$  속도의 방향변화는 횡단면 상에서 발생하는 압력구배에 의해 초래되며, 관의 중심에서 입구유동에서 갖고 있는 단면흐름성이 역전됨을 보여준다.

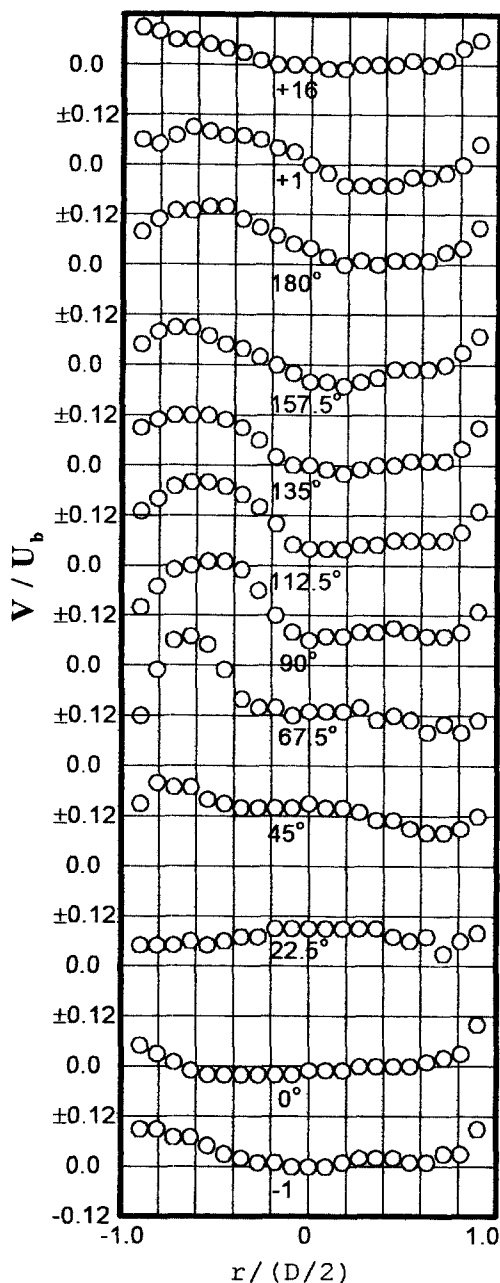


Fig. 5 Measurements of the radial mean velocity components at sequential stations in a  $180^\circ$  curved pipe with straight tangents.

내측벽 부근에서  $V$ 속도는 곡관의  $\theta=22.5^\circ$  이후 점차 증가하며,  $\theta=67.5^\circ$ 에서 최대로 큰 값( $V/U_{b,max} \sim 0.33$ )이 측정되었다. 그러나 본 실험에서 측정된 2차유동의 수준은 동일한 곡률 비와 입구조건

에서 수행된 정사각단면의 곡관에서 측정된 크기<sup>(6,7)</sup> ( $\sim 0.4$ )보다 작으며, Azzola 등의 결과( $\sim 0.3$ ) 보다는 다소 크다. 이보다 하류에서 내벽측 부근에서의  $V$ 속도는 점차 작아지는 경향을 보인다. 내측벽의 반경방향속도가 최대로 되는 위치는 이 부근에서 주유동속도가 2차극대를 갖는 위치와 동일하다. 이는 2차유동의 발달로 말미암아 주유동속도에 영향을 미쳐 주유동속도에 중대한 변화를 야기시키는 것으로 추정된다.

외벽면 부근에서의  $V$  속도는 곡관의 전반부( $\theta=0^\circ$ 에서  $\theta=90^\circ$ )에서는 점차 증가하다가 곡관 후반부에서는 점차 작아지는 경향을 보인다. 내벽 측이나 관의 중심에서와 같은 두드러진 변화는 보이지 않는다. 또한 내외벽면 부근에서의 반경방향속도는 역방향으로 반전되지는 않는다.

곡관에서 발생하는 주된 2차유동은 상하 벽에서는 외벽 측에서 내벽 측으로 이동하며, 유로 중심부에서는 내벽에서 외벽 쪽으로 이동하는 형상을 가지나, 앞서 살펴본 바와 같이 유로 중앙에서의  $V$  속도의 반전은 이 형상과 일치하지 않는다. 이는 유로 중심에서는 역방향으로 반전된 또 다른 와류가,  $\theta=135^\circ$  이후에서 발생되며, 곡관의 출구와 연결된 직관부까지 비록 작지만 유지됨을 의미한다.

곡관의 하류 직관부  $X/D=16$ 인 지점에서 측정된  $V$  속도는 이 위치에서도 완전히 유동이 회복되지 않았음을 보여준다. 그러므로 곡관에 의해 교란된 유동의 회복을 이해하기 위해서는 본 실험에서 사용한 곡관 하류 직관부의 길이보다 긴 하류직관부가 필요하다고 판단된다.

곡물 반경에 수직인 반경 상( $\varphi=90^\circ$ )에서 실험을 수행한 Azzola 등의 연구에서는 이러한 현상을 설명한 바 있다. 그들의 연구에서는  $\theta=45^\circ$ 와  $135^\circ$  사이에서 이러한  $V$ 속도분포는 유동의 두드러진 형상을 보여주고 있다고 설명하였다.  $\theta=135^\circ$ 의 하류에서 유동중심부의 단면흐름유동은 그 방향성에 있어서 반전을 겪으면서, 관의 내벽 쪽으로 방향이 바뀔을 보여 주었다. 즉, 내벽에서 외벽으로 향하는 단면흐름유동 지역이 중심부에 나타나며, 하류 직관부  $X/D=5$ 까지 이 반전된 단면유동흐름이 나타나는 지역이 점차 사라지나, 측정범위 내에서 이 음의 단면흐름유동의 흔적이 남아있다고 하였다. 이 결과와 본 실험결과는 일치하며, 본 실험 결과에 이들의 실험 데이터를 결합해서 고찰하면 곡관

내 2차유동의 흐름을 보다 정확히 이해할 수 있다. 그리고 Azzola 등의 실험에서는 양의  $V$ 속도 방향이 본 실험결과와는 반대로 설정되어 있음을 참고로 밝혀둔다.

Fig. 6과 7은 주유동방향 난류강도( $u'$ )와 원주방향 난류강도( $v'$ )의 측정 결과를 도시한 그림이다. 주유동방향 난류강도에 대한 그림에서, 곡관 상류 직관부  $X/D=-1$ 인 위치에 실선으로 표시된 분포는 직관에 대한 Laufer의 결과이며, 본 실험 결과와 매우 일치함을 보여준다. 측정된 모든 위치에서 두 난류강도(turbulent intensity)의 분포는 비교적 유사한 형상을 보여주나, 그 크기에 있어서는 반경방향 난류강도가 다소 크게 나타났다.

유동이 곡관으로 진입하면 양벽 부근에서 난류강도가 서서히 증가함을 볼 수 있으며,  $\theta=45^\circ$ 의 위치에서 내측벽 부근( $r/(R_o-R_i) \sim -0.8$ )에 급격히 난류강도가 증가한다. 또한  $\theta=67.5^\circ$ 의 위치에서는  $r/(R_o-R_i) \sim -0.3$  부근에 또 하나의 증가된 난류강도가 발생하여 곡관의 출구부까지 지속됨이 측정되었다. 내측벽에 인접한 지역에서 발생하는 큰 난류강도는 같은 지역에서 발생하는 반경방향속도의 급격한 변화와 관련 있는 것으로 판단된다. 또한  $r/(R_o-R_i) \sim -0.8$  부근에서 급격히 증가된 난류강도는 같은 위치에서 발견되는 주유동방향속도의 비교적 큰 구배와 관련 있는 것으로 판단된다. 곡관내 유동은 곡물 반경이 서로 다른 두 곡면을 따라 원심력이 불균형하게 작용하며 이로 인해 횡단면상에 형성되는 압력구배가 2차유동을 초래한다. 발생한 2차유동은 주유동에 상당한 변화를 야기시키며, 이에 따라 난류강도 역시 변화되는 것으로 이해되며, 변화된 난류강도는 다시 유동속도들에 영향을 미쳐 대단히 복잡한 3차원유동이 발생하는 것으로 추정할 수 있다.

Fig. 8은 측정된 레이놀즈응력  $\overline{uw}$ 를 도시한 그림이다. 관 상류 직관부  $X/D=-1$ 인 위치에서 레이놀즈응력  $\overline{uw}$ 는 내벽 측에서 음의 값을 외벽 측에서 양의 값을 보여준다. 내벽 측에서  $\overline{uw}$ 가 음의 값을 갖고  $\partial U/\partial r$ 의 값이 양의 값이면  $-\overline{uw}(\partial U/\partial r)$ 의 값은 양의 값이 되며, 외벽 측에서는  $\overline{uw}$ 가 양의 값을 갖고  $\partial U/\partial r$ 의 값이 음의 값이 되어  $-\overline{uw}(\partial U/\partial r)$ 의 값은 양의 값이 되므로, 내외 벽에서의 난류생성을 나타낸다.  $X/D=-1$ 인 위치에서 레이놀즈응력  $\overline{uw}$ 는 내외 벽간 비대칭이며, 외벽 측에서 절대 값이 보다 크게 나타난다. 곡관의

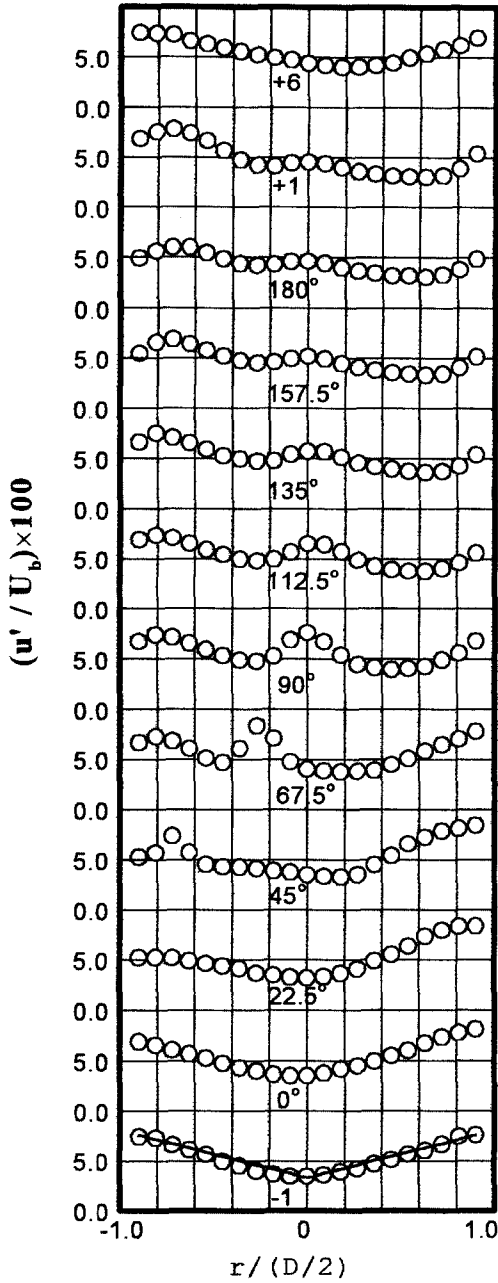


Fig. 6 Measurements of the longitudinal turbulent intensity components at sequential stations in a 180° curved pipe with straight tangents. Solid line at  $X/D = -1$  correspond to Laufer's developed flow data.

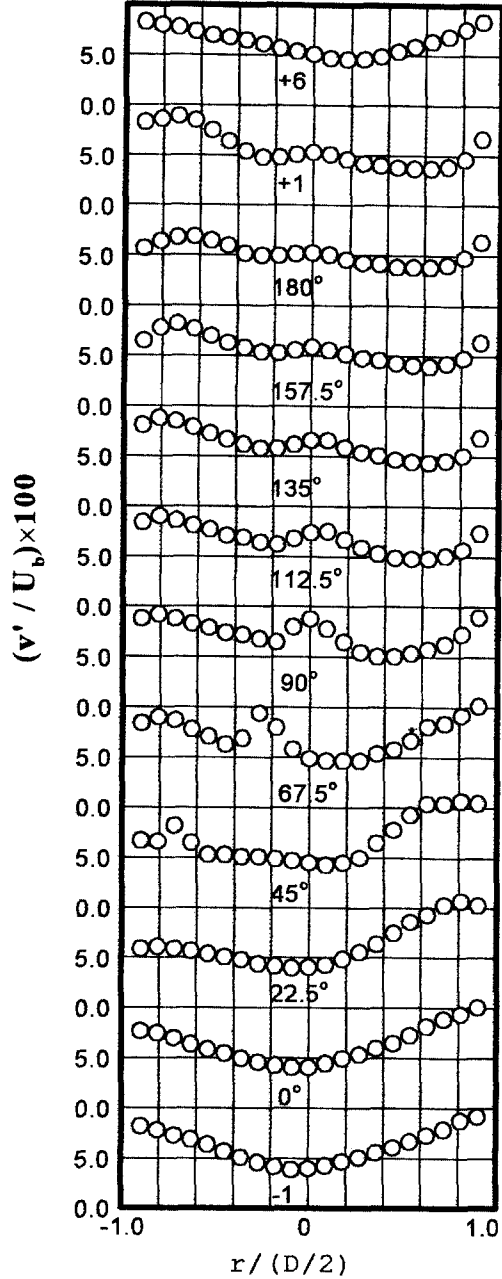


Fig. 7 Measurements of the radial turbulent intensity components at sequential stations in a 180° curved pipe with straight tangents.

입구에서  $\theta = 135^\circ$  지역까지 내측 벽에 인접한 지역에서 레이놀즈응력을 검토하면, 벽에서 다소 떨어

진 위치에서 벽 근처보다 크게 형성되는 경향을 보이는데 이는 이 지역에서 발달되는 2차유동에 의해 경계층이 벽에서 보다 멀리 떨어져 나오는 현상 때문이라고 판단된다.  $\theta = 67.5^\circ$  지역에서는  $r/(R_o$



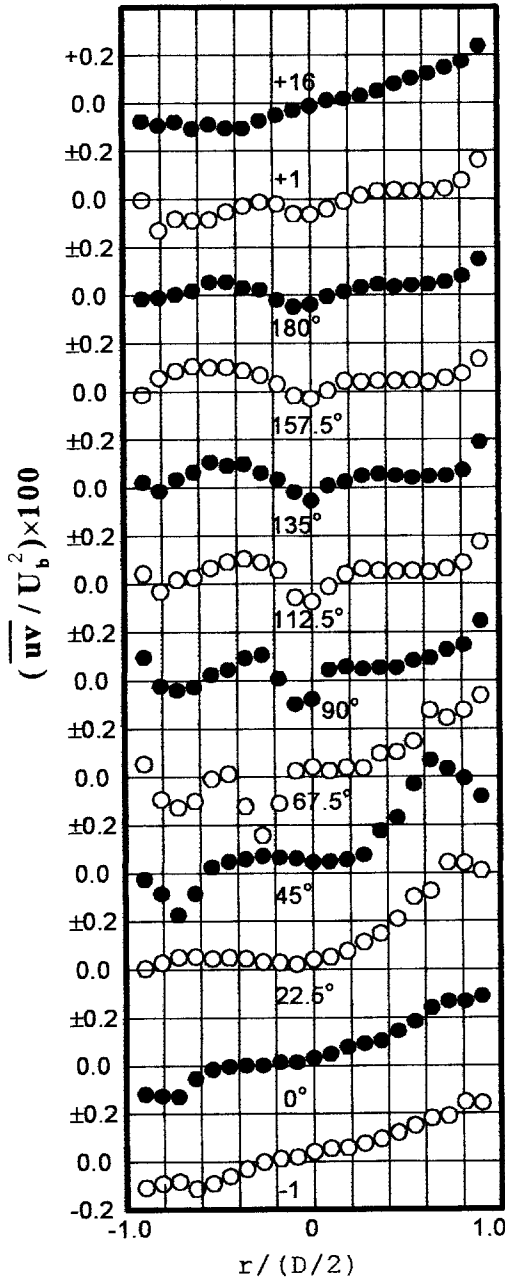


Fig. 8 Measurements of  $\overline{uv}$  Reynolds stresses at sequential stations in a  $180^\circ$  curved pipe with straight tangents.

$-R_1) \sim -0.3$ 인 위치에 매우 큰 레이놀즈응력이 보이며, 곡관의 하류로 갈수록 작아지기는 하나 그 경향이 지속된다. 이는 같은 위치에서 보여지는 주유동속도의 2중극대와 연결해서 레이놀즈응력의 변

화를 이해할 수 있다. 이상의 난류량 분포를 직관에서와 비교하면, 직관에서의 난류량들은 벽근처에서 전단효과에 의해 상대적으로 큰 값을 갖지만, 곡관에서는 곡면으로 인해 전단효과가 다르게 발생하며 또한 2차유동의 영향으로 상당히 다른 형상이 나타남을 알 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구는  $180^\circ$  곡관을 흐르는 난류유동의 거동에 대한 Rowe의 정성적 이해를 정량적으로 확고히 하자는 데 있다. 또한  $\phi=90^\circ$ 인 선상을 따라 측정된 Azzola 등의 실험에서 볼 수 없는 단면의 대칭면을 따라 유동 측정을 시행하여, 곡관내 유동 특성을 보다 정확히 이해하고자 하였다. 본 실험을 통하여 유로 중심에서는 역방향(관의 대칭면을 따라 외측 벽에서 내측벽 방향)으로 반전된 또 다른 와류가,  $\theta=135^\circ$  이후에서 발생되며, 비록 작지만 곡관의 출구부까지 지속됨을 확인하였다.

2차유동으로 인하여 주유동방향속도에 2중극대가 곡관의 일부지역에서 발생하며, 실험으로 측정된 2차유동의 크기는 정사각단면을 갖는 곡관에서의 2차유동 크기에 비해 전반적으로 낮은 수준이었다. 이는 2차유동을 초래하는데 있어서 정사각단면의 곡관에서의 평평한 면들이 보다 우월하다는 것을 의미한다. 하류직관부에서 유동은 본 측정범위내 ( $X/D=+16$ )에서는 곡관을 지나면서 교란된 유동이 완전히 회복되지 않았다.

측정된 모든 위치에서 길이방향 난류강도( $u'$ )와 반경방향 난류강도( $v'$ )의 분포는 비교적 유사한 형상을 보여주나, 그 크기에 있어서는 반경방향 난류강도가 다소 크게 나타났다. 난류강도들의 변화는 주유동방향속도분포와 반경방향속도분포와 매우 밀접한 관계가 있는 것으로 보여졌다.

본 실험과 Azzola 등의 실험의 결과로만은 곡관내 유동을 완전히 이해(특히, 난류구조의 변화에 대한 이해)할 수 없다고 보여지며, 이후의 곡관에 대한 연구에서는 전체 관단면상에서 1차 및 2차유동 그리고 응력분포의 완전한 도시화(mapping)를 목표로 진행되어야 할 것이다.

### 후 기

본 연구는 1995년도 학술진흥재단의 자유공모연

구과제 지원 연구비에 의하여 수행된 연구이며, 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

- (1) Thomson, J., 1876, "On the Origins of Windings of Rivers in Alluvial Planes, with Remarks on the Flow of Water Round Bends in Pipes," *Proc. Roy. Soc., Series A*, Vol 75, pp. 5~8.
- (2) Eustice, I., 1911, "Flow of Water in Curved Pipes," *Proc. R. Soc. London, Series A*, Vol. 85, pp. 119~131.
- (3) Dean, W. R., 1927, "Note on the Motion of Fluid in a Curved Pipe," *Philos. Mag.*, Vol. 20, pp. 208~223.
- (4) Dean, W. R., 1928, "The Streamline Motion of Fluid in a Curved Pipe," *Philos. Mag.*, Vol. 30, pp. 673~693.
- (5) Humphrey, J. A. C., Whitelaw, J. H. and Yee, G., 1981, "Turbulent Flow in a Square duct with Strong Curvature," *J. Fluid Mech.*, Vol. 103.
- (6) 문 찬, 양승효, 최영돈, 유석재, 1988, "열선 유속계에 의한 180° 곡관을 갖는 정사각 단면의 덕트에서의 난류유동특성의 측정," 대한기계학회 논문집, 제12권, 제4호, pp. 900~915.
- (7) Chang, S. M., Humphrey, J. A. C. and Modavi, A., 1983, "Turbulent Flow in a Strongly Curved U-bend and Downstream Tangent of Square Cross Sections," *PCH Physico Chemical Hydrodynamic*, Vol. 4, pp. 243-269.
- (8) 맹주성, 류명석, 양시영, 장용준, 1991, "직사각형 단면을 갖는 90° 굽곡관 내의 3차원 난류유동에 관한 실험적 연구," 대한기계학회논문집, 제15권, 제1호, pp. 262~273.
- (9) Azzola, J., Humphrey, J. A. C., Iacovides, H. and Launder, B. E., 1986, "Developing Turbulent Flow in a U-bend of Circular Cross Section: Measurement and Computation," *J. Fluid Eng.*, Vol. 108, pp. 214~221.
- (10) Rowe, M., 1970, "Measurement and Computations of Flow in Pipe Bends," *J. Fluid Mech.*, Vol. 43, pp. 771-783.
- (11) King, L. V., 1914, "On the Convection of Heat from Small Cylinders in a Stream of Fluid, With Applications to Hot-wire Anemometry," *Philos. Trans. Roy. Soc. London*, Vol. 214, No. 14, pp. 373.
- (12) Champagne, F. H., Sleicher, C. A. and Wehrmann, O. H., 1967, "Turbulence Measurements with Inclined Hot-wires. Part1: Heat Transfer Experiments with Inclined Hot-wire," *J. Fluid Mech.* Vol. 28, Part. 1, pp. 153~175.
- (13) Jorgensen, F. E., 1971, "Directional Sensitivity of Wire and Hot-Film Probes," DISA INFO., No. 11.
- (14) Acrivlellis, M., 1977, "Hot-Wire Measurements in Flow of Low and High Turbulence Intensity," DISA INFO. No. 22.
- (15) Dvorak, K. and Syred, N., 1972, "The Statistical Analysis of Hot-Wire Anemometer Signals in Complex Flow Fields," DISA Conference, Univ. of Leicester.
- (16) Keller, M. D., Flotie, D. L. and Mckee, R. J., 1980, "Experimental Study of the Secondary Flow in a Curved Rectangular Channel," *J. Fluids Eng. Trans. ASME*, Vol. 102, pp. 92-101.
- (17) Azzola, J. and Humphrey, J. A. C., 1984, "Developing Turbulent Flow in a 180° Curved Pipe and its Downstream Tangent" Rep. LBL-17681, *Materials Science & Molecular Research Div., LBL*.
- (18) Laufer, J., 1954, "The Structure of Turbulence in Fully Developed Pipe Flows," NACA Technical Report, No. 1174.