열선유속계를 이용한 180 ° 곡덕트 내 난류유동의 측정

한 성 호*·김 원 갑† ·최 영 돈**

Measurements of Turbulent Flows in the 180° Curved Duct by Hot-wire Anemometer

WonKap, Kim, SeongHo, Han and YoungDon, Choi

Key Words: Hotwire anemometer(열선유속계), yaw angle(요오각), pitch angle(피치각), Curved Duct(곡덕트), Reynolds number(레이놀즈수), Hydraulic diameter(수력직경)

Abstract

This paper reports the characteristics of the three dimensional turbulent flow in the rectangular -sectioned 180 degree bends by Hot-wire anemometer. Grande and Kool proposed a cooling law for the measurements of the flow through the narrow passage. The authors noticed that the calibration coefficients of original method are not constant and fairly sensitive to the flow approaching angle. Measured voltages are converted to three velocity and six Reynolds stress components using the modified method in which the coefficients are treated as a function of approaching angle.

기호설명

A, B, h : 비례상수
D_H : 수력직경(Hydraulic diameter)
E : 순시전압
Q : 순시속도
U_e : 등가냉각속도(effective cooling velocity)
U, V, W : 속도성분
W_B : 단면평균속도
x, y, z : 절대좌표계
α_p, α_R : 요오각, 피치각
θ : 열선회전 각도

† 세종대학교 록히드마틴 우주항공연구소
E-mail : wkkim@sejong.ac.kr
TEL : (02)3408-3896 FAX : (02)3408-3895
* 고려대학교 대학원 기계공학과
** 고려대학교 기계공학과

1. 서 론

유로에 곡률이 있는 경우 곡률에 의해 발생하는 원심력에 의한 2 . 원심력은 평균 주유동 속도를 변화시킴으로서 유동의 평균속도 변화에 의해 원심력의 크기 자체를 변화시키며 따라서 유로 단면에 발생하는 2차 유동의 강도를 변화시킨다. 따라서 유로의 곡률이 있는 경우에 대한 유동특성의 변화를 이해하는 것은 공학적 관점에서 매우 중요한 과제일 뿐 아니라 유체역학적으로도 대단히 흥미로운 일이다.

이러한 효과 때문에 복잡한 형상의 유로를 설계하기 위해서는 이에 대한 정확한 이해가 필요하다. 현재까지의 정사각 곡덕트에 대한 연구가 많이 수행되었으나 여전히 유동특성의 정확한 이해가 부족한 실정이다.

일반적으로 유체의 유동을 측정할 때, 열선유속계를 이용하는 경우 열선유속계의 지지대는 주유

동방향과 되도록 평행하게 삽입하는 것이 일반적이다. 그러나 좁은 관내를 통과하는 유동의 경우에, 더욱이 유로에 곡률이 있는 경우는 주유동방향과 열선지지대의 방향을 평행하게 설치하기는 사실상 불가능하다. 따라서 열선지지대를 유동에 수직한 방향으로 삽입하는 방법을 사용하면서 발생하는 간섭오차의 정도와 변환된 속도의 정확성을 검토하고 간섭오차를 제거할 수 있는 방법이 요구된다.

열선유속계를 이용한 측정에서 측정전압과 속도와의 관계는 King의 법칙과 Jorgensen[(1)]의 방법을 많이 사용해왔다. 그러나 Jorgensen의 관계식은 주로 유동이 지지대와 평행이 되는 경우에 많이 사용되어져야 하는데 좁은 관내의 유동을 측정하는 경우에도 Jorgensen의 관계식이 검증없이 사용되고 있어 이에 대한 검토가 필요하다. 한편 grande와 Kool[(2)]은 좁은 유로를 통과하는 유동의 측정방법으로 Jorgensen과는 다른 형태의 관계식을 제안한 바 있으며 측정된 전압과 이론출력전압을 비교적 근사하게 맞춤으로써 오차를 줄일 수 있음을 보였다.

본 연구에서는 좁은 관내 유동을 측정할 때 Jorgensen과 Grande의 관계식의 사용이 적합한지에 대한 검토를 수행하였으며 Grande방법에 대한 수정식을 제안하였다. 사용하는 센서는 여러 가지가 있으나 본 연구는 경사형 센서의 경우로 한정하였다.

2. 측정이론

2.1 선형화과정

기존 연구에서 많이 사용되어오던 순간전압과 등가냉각속도와의 관계는 King의 법칙으로부터 구할수 있으며 선형화기기를 사용하는 경우에는 다음과 같은 간단한 선형식으로 나타낼 수 있다.

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

여기서 k는 비례상수이다 본 연구에서는 Grande 등의 연구에서 제안된 등가냉각속도와 순시속도의 관계식을 측정에 사용하였다. 이 방법은 유로가 좁아서 주유동과 평행한 방향으로 열선지지대를 삽입할 수 없는 경우에 대안으로서 경

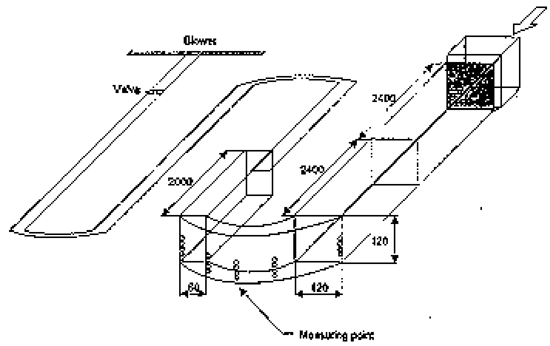

Fig. 1 Experimental setup.

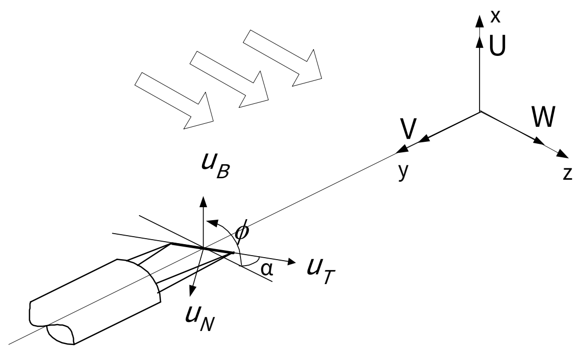

Fig 2 Coordinate of wire

사형 열선의 선형화방법과 속도, 레이놀즈 응력의 측정기법을 발표한바 있다. Fig.1과 같은 좌표계의 설정에서 유체의 속도와 등가냉각속도간에 다음과 같은 관계가 있다.

$$\sin\psi = \cos\alpha_0 \cos\alpha_P \cos\alpha_R + \sin\alpha_0 \sin\alpha_R \quad (2)$$

Grande는 이 식을 그대로 사용할 경우, 출력전압이 기본 cosine 법칙에서 벗어나며 이를 수정하기 위하여 다음과 같은 두 개의 수정계수를 도입하였다.

$$\sin\psi = A_2' \cos\alpha_p \cos\left(\frac{\alpha_R}{A_1'}\right) + A_2' \tan\alpha_0 \sin\alpha_R \quad (3)$$

여기서 ϕ, ψ는 열선을 따르는 단위벡터에 수직인 단위벡터와 속도벡터가 이루는 각도를 의미한다. 속도와 등가냉각속도의 관계는 다음과 같다.

$$U_e = Q\cos\phi \quad (4)$$

여기서 Q는 유체의 순시속도이며 각 좌표방향의 속도성분 U, V, W와의 관계는 다음과 같다.

$$Q^2 = U^2 + V^2 + W^2 \tag{5}$$

이 식을 식(4)에 대입하고 정리하면 다음과 같은 최종식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} U_e^2 = A_1 U^2 + A_2 V^2 + A_3 W^2 + A_4 UV \\ + A_5 VW + A_6 UW \end{aligned} \tag{6}$$

여기서

$$A_1 = 1 - A_2'^2 cos^2(\frac{\theta}{A_1}) \tag{6a}$$

$$A_2 = 1 - A_2'^2 tan^2 \alpha_0 \tag{6b}$$

$$A_3 = 1 - A_2'^2 sin^2(\frac{\theta}{A_1}) \tag{6c}$$

$$A_4 = -2A_2'^2 tan\alpha_0 cos(\frac{\theta}{A_1}) \tag{6d}$$

$$A_5 = -2A_2'^2 tan\alpha_0 sin(\frac{\theta}{A_1}) \tag{6e}$$

$$A_6 = -2A_2'^2 sin(\frac{2\theta}{A_1}) \tag{6f}$$

계수 A_1과 A_2는 선형화 과정에서 결정하면 된다. Grande 등은 계수 A_1과 A_2를 상수로 취급하여 완만하게 굽은 곡덕트의 하류직관부에서 유동을 측정하였다. 그러나 본 연구에서 검토한 결과 계수 A_1과 A_2는 유동각 α_R에 따라 민감하게 변화함을 알 수 있었다.

2.2.1 레이놀즈 응력

레이놀즈 응력은 다음과 같이 열선유속계로 측정하여 얻은 실험결과로 레이놀즈 응력을 계산하기 위해 Ganjua등은 Dvorak과 Syred(1972), King(1978)이 제안한 식이 다음과 같이 변형된다고 하였다.

$$\begin{aligned} \overline{u_l u_m} = & \sum_{i=1}^{6}\left(\frac{\partial \overline{u_l u_m}}{\partial E_i}\right)\overline{\sigma_{E_i}^2} + \sum_{i=1, i\neq j}^{6}\sum_{j=1}^{6}\frac{\partial \overline{U_l}}{\partial E_i}\frac{\partial \overline{U_m}}{\partial E_j}K_{E_iE_j} \\ & -\left[\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{6}\frac{\partial^2 \overline{U_l}}{\partial E_i^2}\overline{\sigma_{E_i}^2} + \sum_{i=1, i<j}^{6}\sum_{j=1}^{6}\frac{\partial^2 \overline{U_l}}{\partial E_i \partial E_j}K_{E_iE_j}\right] \\ & +\left[\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{6}\frac{\partial^2 \overline{U_m}}{\partial E_i^2}\overline{\sigma_{E_i}^2} + \sum_{i=1, i<j}^{6}\sum_{j=1}^{6}\frac{\partial^2 \overline{U_m}}{\partial E_i \partial E_j}K_{E_iE_j}\right] \end{aligned} \tag{7}$$

여기서 $\overline{\sigma_{E,i}^2}$은 프로브를 회전각 θ 로 놓았을 때 $\overline{e_i^2}$을 의미하며 하첨자 i와 j는 식 (3-21)에서 측정각도 중 하나를 의미한다. $K_{E_iE_j}$는 i열선과 j열선 사이의 covariance로 다음과 같이 계산된다.

$$K_{E_iE_j} = \gamma_{E_iE_j}\left[\overline{\sigma_{E_i}^2} \cdot \overline{\sigma_{E_j}^2}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{8}$$

여기서 $\gamma_{E_iE_j}$는 E_i와 E_j사이의 상관계수이며 본 연구에서는 다음과 같이 가정하여 사용하였다

$$\gamma_{E_iE_j} = \eta(\cos 30°)^n \cos\alpha \tag{9}$$

. 본 연구에서는 식(4)를 사용하여 레이놀즈응력을 계산하였고 η는 King이 제안한 바와 같이 0.8을 사용하였다.

한편, Grande 등은 식()을 이용하여 요동전압에 대하여 다음과 같은 식을 유도하였다.

$$\begin{aligned} \overline{e^2} = (\frac{dE}{dV})^2(f^2\overline{u^2} + f'^2 A_{\alpha R}^2 \overline{v^2} + f'^2 A_{\alpha P}^2 \overline{w^2} \\ + 2ff' A_{\alpha R}\overline{uv} + 2f'^2 A_{\alpha R} A_{\alpha P}\overline{vw} + 2ff' A_{\alpha P}\overline{uw}) \end{aligned} \tag{10}$$

여기서 $f = cos\psi$ 이다.

2.1 실험장치

실험장치의 개략도를 Fig. 111에 나타내었다. 사용된 열선유속계는 KONOMAX 모델이며 선형화 제트의 속도는 선형화할 때는 0 ~ 10m/s 로 변환시킬 수 있으며 보정계수의 측정을 위한 경우에는 5m/s 로 한정하였다. 즉 제트의 속도는 5m/s로 고정하고 열선의 피치각을 15°간격으로 -30° ~ 30°로 변화시켰다.

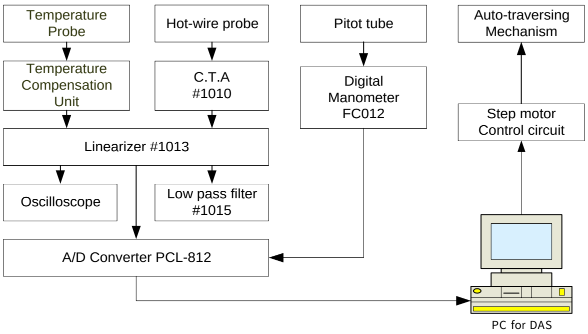

Fig.3 Automatic data acquisition system

본 연구에서는 우선 출력전압의 열선회전각도 (yaw angle)에 따른 변화를 도시하고 기존이론에 의한 이론출력전압을 비교하였다. 이를 위하여 여기서는 선형화제트유동을 선정하고 기류의 속도는 6m/s로 고정하였다. 또한 센서지지대와 유동의 상대적인 각도를 정의하기 위하여 유동각(flow angle)을 제트의 유동방향과 센서지지대와의 각으로 정의하였다. 유동각은 60°부터 120°까지 15°간격으로 설정하였고 센서는 stepping motor로 회전할수 있도록 하였고 A/D변환기의 sampling rate는 5kHz로 하였다. Figure 3에 이에 대한 개념도를 나타내었다.

곡관부는 높이는 160mm로 일정하고 곡덕트의 폭은 입구에서 160mm이며 출구에서 입구의 1/2인 80mm의 폭으로 감소하는 180° 곡덕트이다. 곡덕트의 외벽면의 반지름은 344mm이고 내벽면의 반지름은 254mm 이다. 곡관부에는 입구직관부와 연결되어 있는 지점을 $\theta = 0°$로 하여 45°, 90°, 135°, 180°되는 지점에 아랫면부터 15mm 간격으로 속도측정용 구멍을 뚫어 자동이송장치에 연결된 열선유속계의 프로브가 삽입되도록 제작하였다. 또한 내외벽면의 중심선을 따라 10°간격으로 각각 19개의 직경 1mm의 구멍을 뚫어 압력을 측정할 수 있도록 제작하였다. 출구직관부는 정사각형의 직관으로 한쪽은 곡덕트와 연결되어 있으며 다른 한쪽은 원관과 연결되어 있다. 이 원관을 통과한 공기는 송풍기로 흡입되는데 원관에는 유량측정용 터빈유량계와 유량조절용 밸브 및 바이패스가 설치되어 있다.

측정은 Fig. 2에서 보인 바와 같이, 곡덕트의 형상이 상하부 대칭으로 보고 곡덕트 대칭면의 하부만 측정하였다.

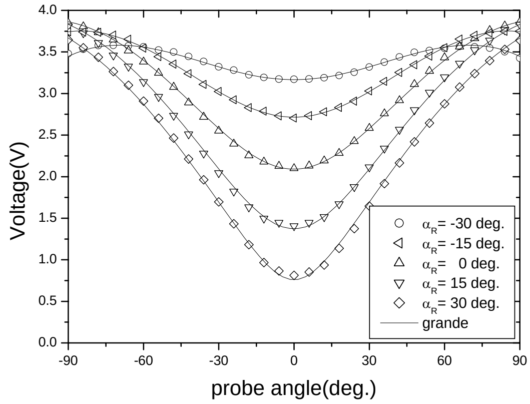

Fig. 4 Calibration curves of anemometer output as a function of α_P for different values of α_R.

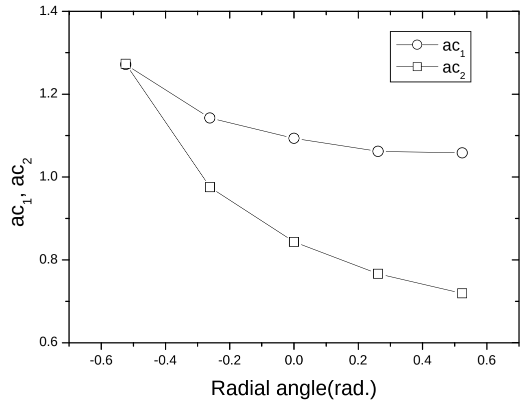

Fig. 5 Variation of the calibration coefficients A'_1 and A'_2 as a function of α_R.

3. 결과 및 고찰

본 실험을 수행하기 전에 먼저 선형화 제트의 유동을 이용하여 열선의 보정실험을 수행하였다. 앞서 설명한 바와 같이 Grande와 Kool의 방법을 사용하는 경우 열선의 선형화 과정에서 경험상수 A'_1과 A'_2를 결정해야 한다. 곡덕트내의 유동은 기존의 많은 연구결과들로부터 주유동방향 속도의 최대 30%까지 이차유동이 발생하는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서 측정하고자 하는 곡덕트 내의 유동은 열선 삽입방향을 따라 유동방향의 변화가 있으며 삽입방향에 따라 연속적

으로 변하게 된다. 따라서 선형화과정에서 각각의 α_R에 대응하는 보정계수 A'_1과 A'_2를 결정해야 한다. 각 α_R에 대응하는 측정전압의 변화와 Grande와 Kool의 냉각법칙으로부터 구한 보정계수 A'_1과 A'_2를 Fig. 4에 나타내었다. Fig.4는 각각 유동각 α_R이 -30°, -15°, 0°, 15°, 30°일 때의 비선형 곡선맞춤으로 나타낸 것으로 유동각 α_R에 따라 계수 A_1과 A_2가 변화하고 있음을 알 수 있으며 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5를 살펴보면 계수 A_1과 A_2는 α_R가 음수의 경우에는 크게 증가하며 양수가 되면서 어떤 값으로 수렴하고 있는 경향을 보인다. 이것으로부터 α_R이 음의 큰 값을 갖는 유동장을 α_R이 0도의 값으로 측정한다면 큰 오차를 낼 수 있다는 것을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서는 계수 A_1과 A_2를 15° 간격으로 -30° ~ 30°로 5개의 각도에서 전압을 측정하여 α_R의 함수로 보간하여 사용하였다.

Fig. 6은 대칭면을 따르는 주유동방향의 속도를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 y/W=0은 내벽면, y/W=1은 외벽면을 나타내며 U_B는 곡덕트 입구에서의 단면평균속도로 5.5m/sec 이다. 출구방향으로 진행하면서 단면이 축소되고 출구의 단면적이 입구단면적의 1/2이므로 속도는 점차적으로 가속되고 있음을 알 수 있다. 곡덕트의 입구인 0도에서 주유동방향속도는 포물선 형을 이루고 있으며 최대속도는 내벽면 쪽으로 치우쳐 있어 기존 연구결과와 잘 일치하는 경향을 보이고 있다. 곡덕트의 중간부인 90°에서의 결과는 y/W=0.4부근에서 이중극대를 예측하고 있다. 이러한 이중극대는 기존 180° 곡덕트내 유동에 대한 연구에서 이미 예측되었던 현상이며 이것은 단면상에 발생하는 이차유동에 의한 것으로 알려져 있다. 기존의 연구중에서 본 연구와 유동장과 유동조건이 매우 유사한 김[3]의 연구결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7은 Jorgensen[1]의 방법을 이용한 측정결과로서 전산해석 결과와 비교하고 있다. Fig. 6과 Fig. 7을 비교하면 90° 이후에서의 주유동속도분포가 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 즉, 90°에서의 이중극대는 김[3]의 결과에서는 내벽면 쪽에 치우쳐 작게 나타나고 있는데 반하여 본 연구 결과는 90°에서 이중극대가 나타나고 있지 않으며 135°

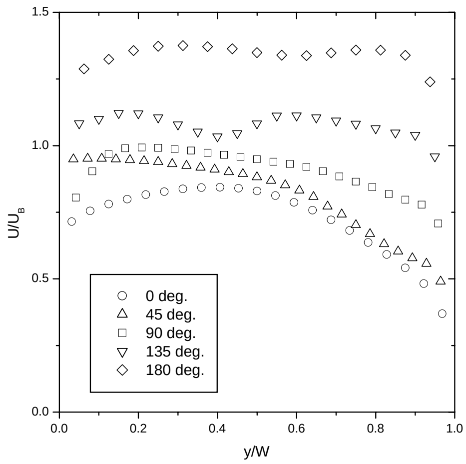

Fig. 6 Development of mainstream velocity in the plane of symmetry.

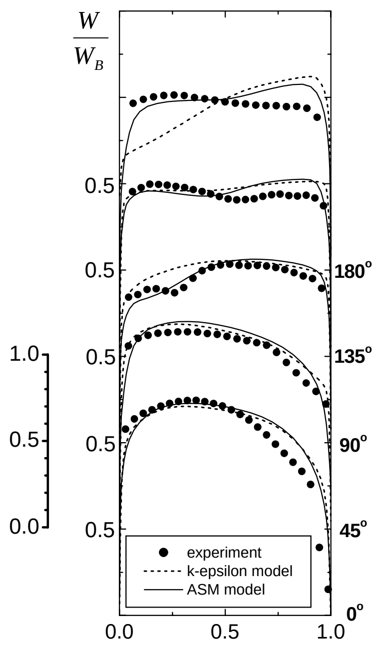

Fig. 7 The results of the mainstream velocity from Kim[3]

에서 나타나고 있음을 알 수 있고 이러한 경향은 출구까지 유지되지만 김(3)의 결과에서는 못한 것을 알 수 있다. 이러한 차이는 곡덕트의 크기와 레이놀즈수 차이등 여러 가지 요인이 있을 것으

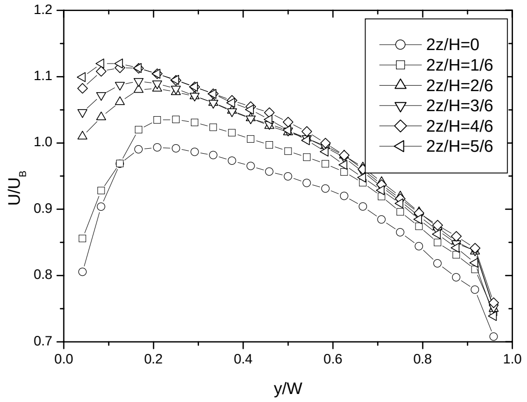

Fig. 8 Mainstream velocity component at θ=90 deg.

로 판단된다.

Fig. 8은 90°에서의 높이에 따른 주유동방향 속도성분의 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 최대속도분포는 내벽면 쪽에 위치하며 단면 전체에 이중극대분포가 나타나고 있지 않다.

4. 결 론

유로가 비교적 좁은경우나 곡률이 있는 덕트내의 유동을 측정하기 위하여 열선유속계를 유로에 수직으로 삽입하게 되는 경우 Grande와 Kool[(2)]의 방법을 그대로 사용하면 α_r이 0이 아닌 경우 오차를 발생시킬 수 있음을 알 수 있었다. 본 연구에서는 보정계수 A'_1과 A'_2 를 α_r에 대한 함수로 취급함으로써 좁은 유로의 측정에서 보다 결과의 정확도를 높일 수 있는 가능성을 보였다. 본 실험과 유사한 조건에서 Jorgensen[(1)]의 방법을 사용한 연구와 비교한 결과 곡덕트 입구에서의 유동특성은 유사하게 일치하지만 90° 이후의 유동특성은 차이를 보임을 알 수 있었다. 특히 곡덕트의 중요한 유동특성인 이중극대의 예측에서 차이를 보임으로서 이러한 차이에 대한 보다 자세한 검토가 필요함을 알 수 있었다.

참고문헌

(1) Jorgensen, F. E., 1971, "Directional Sensitivity of Wire and Fiber-film Probes", *DISA Information*, No.11, pp.31-37.

(2) Grande, D. G. and Kool, P., 1981, "An Improved Method to Determine the Complete Reynolds Stress Tensor with a Single Rotating Slant Hot Wire.", *J. Phys., E: Sci. Instrum.*, vol.14, pp.196-201.

(3) 김원갑, 1997, 가변 사각단면 180° 곡덕트에서의 난류유동 특성 측정 및 해석에 관한 연구, 고려대학교 박사학위 논문.

(4) 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. Fluids Engr.*, vol.108, June, pp.214-221.

(5) So, R.M.C. and Mellor, G.L., 1973, "Experiment on convex curvature effects in turbulent boundary layers", *J. Fluid Mech.*, vol.60, part 1, pp/43-62.

(6) Smits, A.J., Young, S.T.B. and Bradshaw, P., 1979, The Effect of Short Regions of High Surface Curvature on Turbulent Boundary Layers", *J. Fluid Mech.*, vol.94, part 2, pp.209-242.

(7) Humphrey, J.A.C , Whitelaw, J.H. & Yee, G., 1981, "Turbulent flow in a square duct with strong curvature", *J. of Fluid Mech.*, vol.103, pp443-463