

# 회전하는 정사각 직관내 난류유동

전건호\* · 최영돈\*\* · 김동철\* · 최선용\* · 임홍영\*

## Investigation of Turbulent Flow in Rotating Straight Square Duct

K.H. Chun, Y.D. Choi, D.C. Kim, S.Y. Choi, H.Y. Lim

**Key Words:** Turbulent Flow(난류유동), Rotating Straight square Duct(회전하는 정사각 직관), Reynolds stress(레이놀즈응력), Coriolis force(코리올리힘)

### Abstract

An experimental study was undertaken to investigate the effect of coriolis force for the turbulent flow at low Reynolds numbers in a rotating straight square duct. The study was carried out using a hot-wire anemometer. The flow Reynolds number based on the hydraulic diameter ranged from 4,000 to 18,000 and Rotation number ranged from 0 to 0.196. At Re=9000, developing turbulent flow was calculated for mean velocity and Reynolds stress. Pressure coefficient and energy dissipation spectrum were also calculated.

### 1. 서론

#### 기호설명

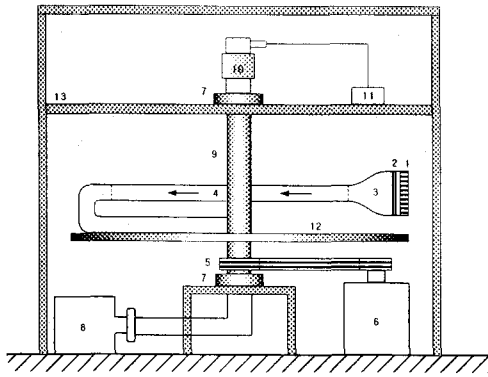
- $C_p$  : 압력계수
- $D_H$  : 수력직경
- $e_{ijk}$  : permutation 텐서
- $P$  : 압력
- $Re_\Omega$  : 회전레이놀즈수 ( $R_e \cdot R_o$ )
- $Re$  : 레이놀즈수 ( $(U_o D_H) / \nu$ )
- $R_o$  : 회전수 ( $(\Omega D_H) / U_o$ )
- $U_o$  : 입구평균속도
- $U_i$  : 속도벡터
- $u, u_i$  : 레이놀즈응력
- $x, y, z$  : 직교 좌표계
- $\delta_{ij}$  : Kronecker delta
- $\nu$  : 동점성계수
- $\Omega$  : 각속도

회전체내 난류유동은 유체기계에 있어서 중요한 영역을 차지하고 있다. 터빈, 펌프, 압축기 등의 대부분의 유체기계들이 회전력을 이용하여 작동유체를 움직이고 있으며 회전체내 난류유동은 회전수, 유로형상, 레이놀즈수에 따라서 그 유동특성이 결정되어 진다. 유체기계내 유동은 높은 회전수와 압력차로 난류가 유동 전영역을 지배하며 이때 2차유동과 레이놀즈응력은 주유동의 변화에 직접적인 원인이 된다.

회전 난류유동의 연구는 이론적, 실험적 그리고 수치해석으로 많은 연구가 이루어지고 있으며 특히 완전달발된 2차원 채널유동<sup>(1)-(3)</sup>과 주유동방향에 수직한 축을 회전축으로 하는 2차원 채널 회전유동<sup>(4)-(8)</sup>은 PIV, LDV, 열선유속계 등 실험장비의 발전과 수치해석적으로 DNS와 LES의 실현가능으로 간단한 유로형상에서 유동특성을 정확히 예측할 수 있는 단계까지 왔다. 3차원 직관유동에 대한 연구는 DNS와 LES를 통하여 유동특성과 와류의 조직적인 구조에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 이러한 전산해석적인 연구에

\* 고려대학교 기계공학과 대학원

\*\* 고려대학교 기계공학과



1. Honeycomb and screen 2. Turbulence generating grid  
3. Contraction duct 4. Test section 5. V-belt set 6. DC motor  
7. Bearing 8. Blower 9. Rotating Axis 10. Slip ring assembly  
11. Tachometer 12. Rotating plate 13. system body(H beam)

Fig. 1 Rotating system and test section

비하여 실험적 자료가 빈약하며 특히 3차원 회전 유동에 대한 연구는 해석과 실험에 있어서 평판 채널에 비하여 2 방향성 난류를 가짐으로 정확한 해석이 수행되지 못하고 있다.<sup>(9)-(14)</sup>

본 연구의 목적은 회전하는 정사각 직관 난류 유동에서 회전수의 변화에 따른 코리올리힘의 영향으로 직관내 주유동속도와 레이놀즈응력이 발달하는 과정을 조사하는 것이며 완전달발된 유동에 대하여 레이놀즈수와 회전수를 변화시켜 유동 특성을 조사하는데 있다. 또한 회전이 있는 경우에 대하여 회전수에 대한 압력계수와 에너지 스펙트럼을 통한 난류에너지 소멸률 특성을 찾는 데 있다.

## 2. 실험연구

### 2.1 실험장치

회전 난류유동을 측정하기 위하여 사용한 회전체는 Fig. 1 에서와 같이 측정부, 회전부 그리고 지지부로 나눌 수 있다. 측정부의 입구는 거물망과 허니콤을 통하여 균질한 유동을 만들어 주며, 그와 같은 유동은 난류생성격자를 통과하면서 1~5%의 난류강도를 가진 균질한 난류를 생성시켜 측정부를 통과하면서 난류가 빠르게 발달되게 하였으며, 전산해석시 일정한 난류운동에너지를 입구조건으로 적용하기 위하여 장착하였다. 측정부의 입구측에 곡률이 변하는 축소관을 만들어 보다 높은 회전수에서 입구측에서의 역류 발

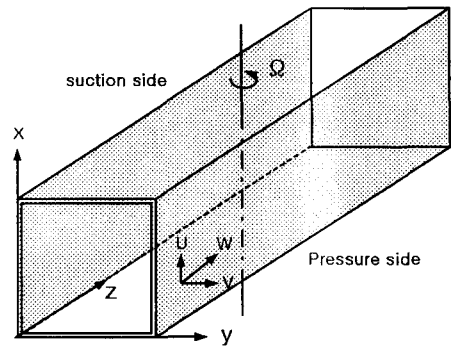


Fig. 2 The coordinate system in rotating straight square duct

생을 억제하게 하였다. 측정부는 단면비가 1인 정사각 덕트(50mm×50mm)로 유선방향의 길이는 1150mm이며 회전축의 중심은 측정부 입구로부터 450mm에 있다. 스테인레스 강으로 구축된 회전축은 회전원판(듀랄미늄)과 일체가 되어 있으며 측정장비는 회전원판 위에 장착하였다. 회전축의 벨트 풀리에 V 벨트를 감속기가 장착된 DC 모터와 연결하여 회전수를 제어하게 하였으며, 회전수는 타코메터를 이용하여 측정하였다. 송풍기는 측정부와 베어링으로 연결되어 있으며 유량제어는 바이패스를 만들어 유량을 제어하였다. 유량 측정을 위하여 일정한 길이의 PVC관에 오리피스를 부착하여 발생하는 압력차를 디지털마노미터로 측정하였다.

### 2.2 실험방법

속도측정은 회전원판 위에 자동이송장치에 정온도형 열선유속계를 부착하여 열선에 의해 감지된 신호를 선형화기기(Kanamax #1013)로 입력되어 출력된 순시전압은 A/D 변환기(PCL-812)를 통하여 PC에 입력되어 평균전압으로 처리된다. 열선의 저항측정시의 온도와 유동측정시의 온도를 보정하기 위하여 온도보상기(Kanamax, #1020)를 선형화기기로 연결시켰다. 자동이송장치는 입·출력 단자를 통하여 제어되며 최소 이송거리는 0.04mm이며 이송오차는±0.2%이다.

난류유동은 광역의 주파수를 가지고 있기 때문에, 난류성분을 정확히 측정하고자 할 때에는 요동전압의 데이터 추출주파수를 결정하는 인자인 미소시간간격을 합리적으로 선정하여야 한다. 수

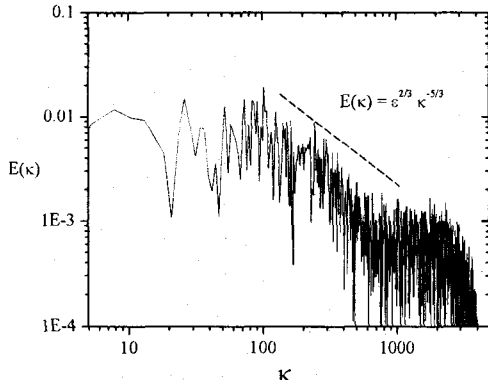


Fig.3 Wave number spectrum for inertial subrange of the rotating straight duct

시로 변화는 요동전압을 왜곡 없이 A/D 변환기를 통하여 받으려면 요동성분 중 가장 작은 시간 척도(Kolmogorov time scale)의 요동성분이 갖는 주파수 범위 이상의 주파수 특성을 열선유속계가 가지고 있어야 한다. 열선프로브는 45° 경사형 열선프로브(Kanomax의 0253-T5)을 사용하였으며 열선의 재질은 텅스텐으로 지름이 5μm이며 열선 감지길이는 1mm 이다.

### 2.3 측정범위

회전하는 정사각직관의 측정은 벽으로부터 1mm 지점으로부터 중앙선 25mm까지 부등간격으로 측정하였으며, 측정방향은 열선프로브의 길이와 지름으로 인한 오차를 줄이기 위하여 덕트의 양측 벽면으로부터 덕트의 절반씩 측정하였다. 측정 위치는 측정부 입구로부터 출구측까지 2D<sub>H</sub> 간격으로 측정하였다. 직관을 따라 발달되어지는 유동에서 레이놀즈수가 9000인 경우, 회전수가 0, 0.038, 0.077 그리고 0.116 에 대하여 주유동속도, 레이놀즈응력 그리고 압력계수의 변화를 조사하였다. 측정부 출구측 측정점에서 레이놀즈수를 5,200~17,400까지 5경우에 대하여 회전수를 0~0.196 범위에서 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

회전하는 난류유동에서 회전 생성항이 추가되어진 레이놀즈응력 방정식은 다음과 같다.

Table 1. Production rate of system rotation( $F_{ij}$ )

j\i	1	2	3
1	0	$-2\Omega_x \overline{uw}$	$2\Omega_x \overline{vw}$
2	$-2\Omega_x \overline{uw}$	$-4\Omega_x \overline{vw}$	$-2\Omega_x \times (\overline{w^2} - \overline{v^2})$
3	$2\Omega_x \overline{vw}$	$-2\Omega_x \times (\overline{w^2} - \overline{v^2})$	$4\Omega_x \overline{vw}$

$$\frac{D \overline{u_i u_j}}{Dt} = P_{ij} + F_{ij} + D_{ij}'' + D_{ij}' + D_{ij}'' + \phi_{ij} - \epsilon_{ij} \quad (1)$$

$$P_{ij} = - \left\{ \overline{u_k u_i} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} + \overline{u_k u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \right\} \quad (2)$$

$$F_{ij} = -2\Omega_k (\overline{u_i u_m} e_{ikm} + \overline{u_j u_m} e_{jkm}) \quad (3)$$

$$D_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left\{ \nu \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_k} - \overline{u_i u_j u_k} - \frac{\rho}{\rho} (\overline{u_i \delta_{ik}} + \overline{u_j \delta_{jk}}) \right\} \quad (4)$$

$$\phi_{ij} = \frac{\rho}{\rho} \left\{ \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right\} \quad (5)$$

$$\epsilon_{ij} = 2\nu \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_k} \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_k} \quad (6)$$

여기서  $P_{ij}$ ,  $F_{ij}$ ,  $D_{ij}$ ,  $\phi_{ij}$  그리고  $\epsilon_{ij}$  는 각각 레이놀즈응력의 생성항, 회전항, 확산항, 재분배항 그리고 소멸항이다.

회전하는 정사각 직관내 발달하는 난류유동은 1-방향 비등방성 유동이 아닌 벽면의 영향으로 2-방향 비등방성 난류 유동이 된다. 회전 난류유동의 특성을 찾기 위하여 높은 레이놀즈수 보다는 낮은 레이놀즈수에서 그 회전에 의한 난류특성이 잘 나타난다<sup>(4)</sup>. 따라서 본 연구에서는 레이놀즈수가 낮은 4000에서 18000까지 조사하였으며 회전수는 0.0에서 0.2까지 조사하였다. 회전시 덕트내 난류가 발달하는 과정을 알아보기 위하여 레이놀즈수가 9000인 경우에 대하여 유선방향을 따라서 평균속도와 레이놀즈응력에 대하여 계산하였다. 그리고 회전수의 변화에 따른 압력계수의 변화를 유선방향을 따라 압력면과 흡입면의 중앙점에서 측정하였으며, 실험에서 유동 측정의 정확성을 검증하기 위하여 선정된 저역통과 주파수와 샘플링 간격이 적절하였는지 확인하기 위하여 Fig.3에서 파워 스펙트럼을 파수에 대하여 알아보았다.

Kolmogorov 스펙트럼 법칙에 의하면 에너지가 생성되어 소멸하면서 관성아영역에서 에너지 스펙트럼의 기울기가  $x^{-5/3}$ 에 비례한다고 하였다.

Fig. 4 - Fig. 5는 유선방향으로의 주유동속도와 레이놀즈응력의 발달되는 과정을 회전수 변화에 대하여 나타내었다. 덕트의 입구로부터 출구까지의 거리는  $23D_H$ 이며 측정점은  $1D_H \sim 21D_H$  사이에 압력면( $y=1$ )과 흡입면( $y=0$ )에 각각 8개의 중앙점에서 측정되었다. 회전수가 영인 경우는 입·출구 속도구배가 회전이 있는 경우와 비교하여 적다는 것을 알 수 있다. 이것은 회전이 없는 정사각 직관의 경우  $40D_H$  이상에서 완전달달되기 때문이다. 그러나 회전이 있는 경우  $1D_H \sim 7D_H$  까지 내벽측(흡입측)에서 회전수에 비례하여 속도구배가 생성되고 있음을 알 수 있으며, 하류에서 속도구배는 모든 회전수에서 완전달달된 속도 형상을 가짐을 알 수 있다. 이것은 속도구배에 의한 생성항 보다는 회전에 의한 원심력과 코리올리힘이 유동을 지배하기 때문이다. 실질적으로 회전이 있는 경우 2차유동의 강도는 회전이 없는 유동과 비교하여 한 차수 높게 나타난다. 이것은 레이놀즈응력에서도 찾아볼 수 있다.

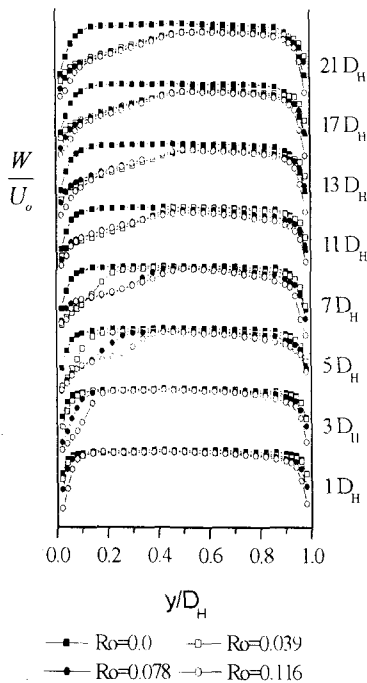
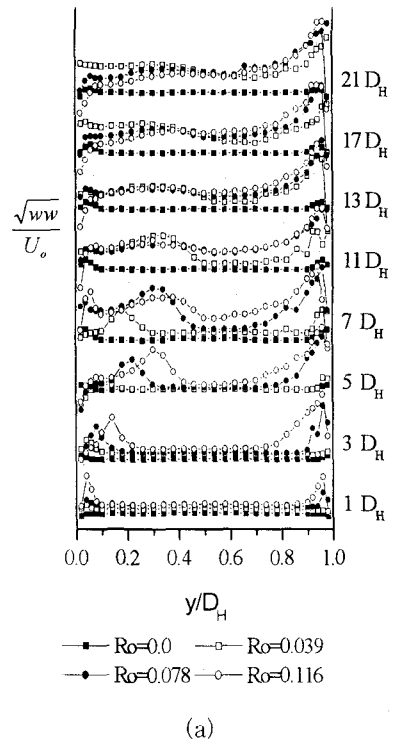
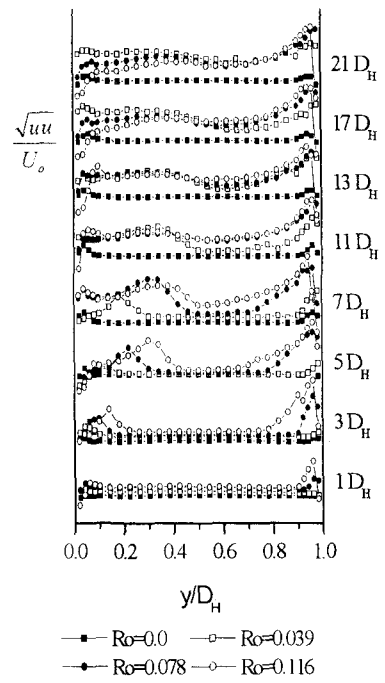


Fig. 4 Axial mean velocity distribution along center line at  $Re=9000$



(a)



(b)

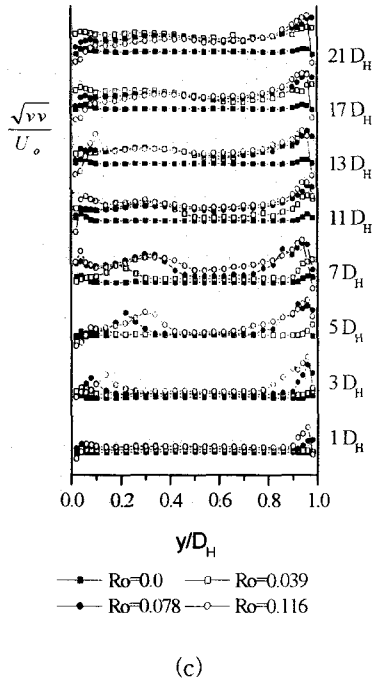


Fig. 5 Reynolds stress distribution along center line at Re=9000.

Fig. 6(a)에서 주유동방향의 난류강도에서 회전이 없는 경우와 회전이 있는 경우를 비교하면 회전이 있는 경우 내·외벽면 뿐만 아니라 전 단면에서 상대적으로 높은 난류강도를 유지하고 있다. 여기서 특이한 것은 내벽측 보다 내벽면에서 먼 곳에서 높은 난류강도가 발달과정중에 나타난다는 것이다. 이것은 코리올리힘에 의한 강한 전단응력이 내벽측에서 중앙으로 강하게 생성되어 나타나는 것이다. 이와 같은 현상은 2차유동, 레이놀즈응력 그리고 주유동속도와와의 관계에서 해석할 수 있다. 주유동속도를 변화시키는 직접적인 원인은 레이놀즈응력이며 이것은 간접적인 원인인 2차유동을 발생시키는 요인이 된다. 즉 내벽면에서 층류화 현상은 낮은 레이놀즈응력과 강한 2차유동이 원인이 되는 것과 같은 것이다. Fig. 6은 RPM을 일정하게 유지하고 레이놀즈수를 증가시켜 회전수의 변화에 따른 주유동속도와 레이놀즈응력을 나타낸 것이다. 회전수가 높을수록 속도 및 레이놀즈응력이 흡입면측 감소하고 압력면측에서는 증가하였다. 이것은 유동방향에 수직하게 작용하는 코리올리힘의 영향 때문이다.

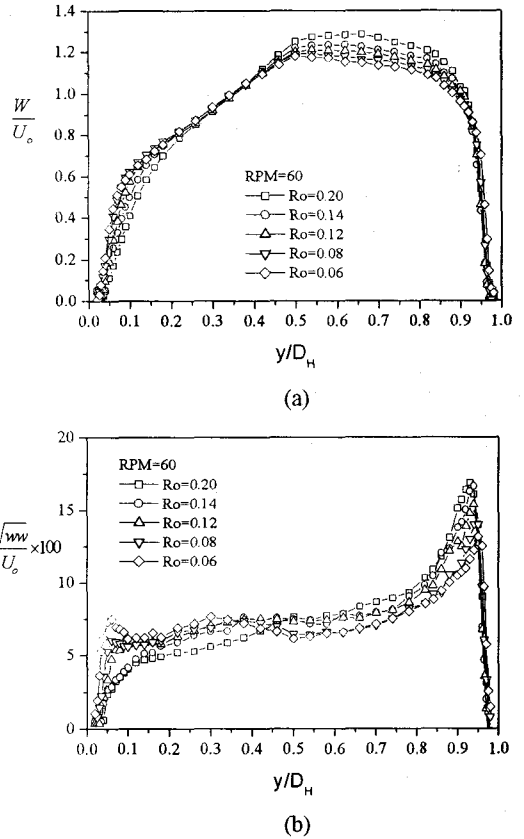


Fig. 6 (a)Mean velocity profile and (b)streamwise intensity for rotation number at rpm=60.

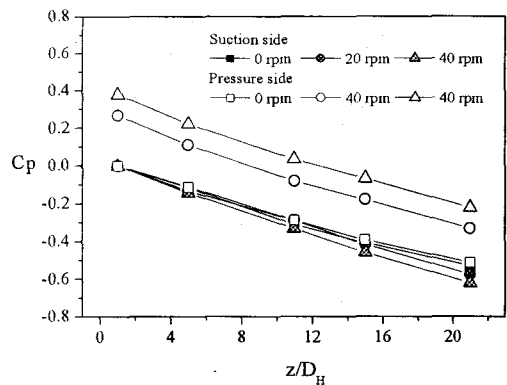


Fig. 7 Comparison of pressure coefficient for rotating number between pressure side and suction side

Fig. 7에서는 회전수의 변화에 대한 압력계수를 유선방향을 따라 측정한 것이다. 기준 압력을 입구측 흡입면의 중앙으로 하였으며, 회전수 증가에 대한 내·외벽의 압력차는 상대적으로 증가하였으며 그 기울기는 변화가 적었다. 압력계수의 기울기는 완전달발된 직관유동에서의 압력계수보다 5% 높게 나타났다. 이것은 압력의 변화가 입구영역에서 크기 때문이다. 그리고 흡입면과 압력면의 압력차는 입구와 출구에서 20rpm 인 경우는 0.29, 40 rpm 에서 0.38로 나타났다.

#### 4. 결론

본 연구는 열선유속계를 이용하여 회전하는 정사각 직관내 난류유동을 조사하였다. 회전이 있는 난류유동은 높은 레이놀즈수 보다 낮은 레이놀즈수에서 코리올리힘의 영향을 강하게 받는다. 따라서 레이놀즈수 4000에서 18000까지 낮은 유동에서 덕트의 입구로부터 출구로 주유동속도, 레이놀즈응력, 그리고 압력계수의 변화와 출구측에서 회전수의 변화에 따른 유동특성을 조사하였다.

레이놀즈수가 9,000인 경우, 덕트내 난류유동이 발달하는 과정은 2차원 채널유동과 비교하여 주유동속도와 레이놀즈응력이 다른 분포를 가지는데 이것은 채널유동에서 측면벽의 영향이 실험에서는 단면 중횡비를 충분히 크게 함으로 2차유동의 영향이 배제되기 때문이다. 그러나 단면 중횡비가 1인 경우의 회전유동은 코리올리힘, 강한 2차유동 그리고 측면벽 근방에서 높은 레이놀즈응력의 발생으로 주유동속도가 채널유동과는 달리 흡입면보다 상대적으로 압력면에서 높은 속도분포 하였다. 이것은 코리올리힘의 방향이 흡입면에서 압력면으로 작용하여 흡입면 근방에서 강한 2차유동의 발생과 측면벽과 압력면에서 높은 레이놀즈응력이 발생하기 때문이다.

#### 참고문헌

- (1) Kim, J., Moin, P. and Moser, R., 1987, "Turbulence statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number," *J. Fluid Mech.*, Vol. 177, pp. 133
- (2) Launder, B. E., Tselepidakis, D. P. and Younis, B. A., 1987, "A second-moment closure study of rotating channel flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 183, pp. 63
- (3) Mansour, M. N., Kim, J. and Moin, P., 1988, "Reynolds-stress and dissipation-rate budgets in a turbulent channel flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 194, pp. 15
- (4) Johnston, J. P., Hallen, R. M., Lezius, D. K., 1972, "Effects of spanwise rotation on the structure of two-dimensional fully developed turbulent channel flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 56, pp. 533.
- (5) Koichi, N. and Osami K., 1996, "Low Reynolds number fully developed two-dimensional turbulent channel flow with system rotating," *J. Fluid Mech.* Vol. 315, pp.1-29
- (6) Piomelli, U and Liu, J., 1995, "Large-eddy simulation of rotating channel flows using a localized dynamic model," *Phy. Fluids*, Vol. 7, pp. 839
- (7) Kristoffersen, R and Andersson, H., 1993, "Direct simulation of low-Reynolds number turbulent flow in a rotating channel," *J. Fluid Mech.*, Vol. 256 pp. 163
- (8) Madabhushi, R. V. and vanka, S. P., 1991, "Large-eddy simulation of turbulence-driven secondary flows in a square duct," *Phys. Fluids*, A 3, pp. 2734
- (9) Gavrilakis, S., 1992, "Numerical simulation of low-Reynolds-number turbulent flow through a straight square duct," *J. Fluid Mech.*, Vol. 244, pp. 101
- (10) Huser, A and Biringen, S., 1993, "Direct numerical simulation of turbulent flow in a square duct," *J. Fluid Mech.*, Vol. 257, pp. 65
- (12) Speziale, C. G., 1982, "Numerical study of viscous flow in rotating rectangular ducts," *J. Fluid Mech.*, Vol. 122, pp. 251
- (13) Nickels T.B. and Joubert P.N., 2000, "The mean velocity profile of turbulent boundary layers with system rotation," *J. Fluid Mech.*, Vol. 408, pp. 323-345