

< 論 文 >

# 코리올리 힘이 작용하는 亂流境界層內的 流動에 관한 研究

李 奎 漢\*

(1985年 1月 28日 接受)

## Flow in Turbulent Boundary Layers with Coriolis Force

Kyu-Han Lee

### Abstract

The effect of the Coriolis force on the 2-D turbulent boundary layer which is developed in the side wall of the rotating rectangular flow channel was investigated. In this study, we measured mean velocities, turbulent velocity components(axial as well as lateral ones) and Reynolds stresses of the turbulent boundary layer.

For high Reynolds number flows, the turbulent boundary layer without pressure gradient is hardly affected by the rotation. For low Reynolds number flows, however, the shearing stress at suction side decreases. Consequently, the velocity near the wall become slower so that the thickness of the viscous sublayer expands. On the other hand, the velocity near the wall at pressure side turns out increased.

### 記 號 說 明

$D$  : 入口 流路幅

$N$  : 流路의 回轉率( $=\omega \cdot D/U_m$ )

(壓力側을  $N > 0$ , 負壓側을  $N < 0$ 로 함)

$R$  : 軸 레이놀즈數

$U$  : 主流의 平均速度

$U_s$  : 境界層 外緣의 主流速度

$U_m$  : 入口 斷面에서의 平均速度

$d$  : 트립핑 와이어의 直徑

$h$  : 流路의 높이

$(u', v', w')$  : 亂流의 速度成分의 實放值

$-\overline{u'v'}$  : 레이놀즈 剪斷應力

$(x, y, z)$  : 回轉系 內의 座標系

$\delta$  : 境界層 두께

$\nu$  : 動粘性係數

$\rho$  : 密度

$\omega$  : 流路의 回轉角速度

### 1. 緒 論

資源의 節約과 에너지節約의 一般的인 추세에 따라 遠心터어보機械 分野에 있어서도 小形化 高速化에 따라서 더욱 高性能의 것이 要請되고 있다. 이에 副應하는 高性能의 터어보機械를 設計製作하기 위하여는

\*正會員, 中央大學校 工科大學 機械工學科

먼저 회轉車 內의 流動狀態를 正確하게 파악하여 豫測할 必要가 있다. 이 경우의 流動狀態는 回轉에 依한 코리올리힘을 받기 때문에 靜止流路에 比하여 大端히 複雜하여 진다. 特히 壓縮機나 펌프의 回轉車 內의 流動과 같은 減速流에 있어서는 갇面 위의 境界層의 發達이 甚하여 境界層 內의 코리올리힘의 影響은 더욱 顯著하게 될 것이 豫想된다.

最近 電算機의 發達과 計算方法의 進步에 따라서 回轉車 內의 流動을 主로 非粘性으로 假定하여 數值計算에 依하여 求하려는 研究<sup>(1-22)</sup>와 回轉車 內의 流動을 實驗的으로 究明하려는 研究<sup>(9-14)</sup>가 많은 사람에 依하여 行하여 저서 좋은 成果를 얻고 있으나 回轉車 內의 流動은 코리올리힘, 入口條件, 流路斷面 形狀의 變化, 隣接한 流路의 干涉과 流體가 가지고 있는 粘性에 依하여 影響을 받기 때문에 極히 複雜한 3次元性을 가지고 있어서 回轉車 內의 流動을 正確하게 豫測하기 위하여는 아직도 많은 未解決의 問題가 남아 있다.

本 研究에서는 單純流路인 斷面이 長方形인 角筒을 그것에 垂直한 軸틀레에 回轉시켜서 流路의 壓力側 및 負壓側에서의 速度 및 變動速度成分의 舉動을 實驗的으로 調査함으로써 코리올리힘이 亂流境界層 內의 流動에 미치는 影響을 究明하였다.

2. 實驗의 媒介變數

回轉角速度  $\omega$ 로 回轉하고 있는 定常, 2次元, 非壓縮性 流動에 對한 時間平均流(mean flow)의 亂流境界層 方程式은 다음과 같다.

連續方程式 :

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

運動方程式 :

$$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p^*}{\partial x} + 2\omega V + \nu \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} - \frac{\partial u'v'}{\partial y} \tag{2}$$

$$\frac{\partial v'^2}{\partial y} = -2\omega U - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p^*}{\partial y} \tag{3}$$

여기서  $p^*$ 는 實際의 壓力  $p$ 로 부터 系의 回轉에 依하여 이어나는 遠心力을 減한 값으로서 다음 式으로 주어진다.

$$p^* = p - \frac{1}{2} \rho \omega^2 r^2 \tag{4}$$

式 (2) (3)을 無次元化하여 整理하면 다음과 같은 2個의 無次元量이 생긴다.

$$R_e = \frac{U_m \cdot D}{\nu} \tag{5}$$

$$N = \frac{\omega \cdot D}{U_m} \tag{6}$$

여기서  $R_e$ 는 軸 레이놀즈數이며  $N$ 은 回轉率(rotation number)로 코리올리힘과 慣性力의 比率을 나타낸다.

本 實驗에서는 入口 平均速度  $U_m$ 을 代表速度로 하고 流路 入口幅  $D$ 를 代表 길이로 取하며 레이놀즈數  $R_e = 1.0 \times 10^4$  및  $3.0 \times 10^4$ 로 하여 回轉率을  $R_e = 1.0 \times 10^4$ 의 경우는  $N = 0, \pm 0.075, \pm 0.15$ ,  $R_e = 3.0 \times 10^4$ 의 경우는  $N = 0, \pm 0.025, \pm 0.05$ 의 各各 5種에 對하여 實驗을 하였다. 이 경우 測定壁面이 壓力側 壁面에 對應하는 경우에는  $N > 0$ 로, 負壓側 壁面에 對應하는 경우에는  $N < 0$ 로 表示키로 한다. 또 以下 簡略하게 壓力側 壁面에 發生하는 境界層內 흐름을 壓力側 흐름, 負壓側 壁面에 發生하는 境界層內 흐름을 負壓側 흐름이라 부르기로 한다.

3. 實驗裝置와 方法

Fig. 1은 實驗裝置의 概要圖이며 Fig. 2는 이 實驗裝置의 回轉圓板上的 流路를 나타낸다. 이 裝置는 吸

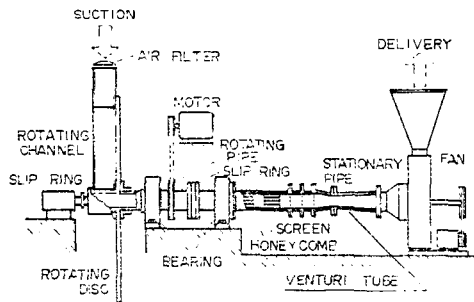


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

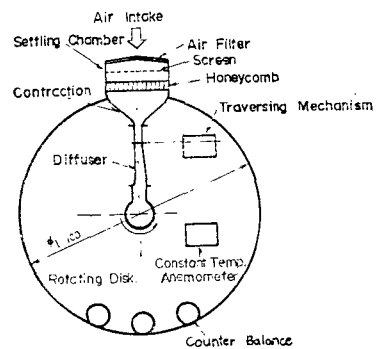


Fig. 2 Rotating disc

込型 風洞의 形式으로, 作動流體는 回轉하는 圓板 위 에 만들어진 吸込口로 부터 吸込된 後 整流筒, 絞縮部 를 거쳐 測定用 流路에 들어 온다. 이곳을 나온 流體는 流動方向이 90° 굽어져서 回轉管 및 靜止管 위의 流量 測定部를 通過한 後 送風機에 依하여 外部로 放出된다.

◎ 整流筒 및 絞縮部

整流筒은 幅 280 mm, 높이 120 mm의 斷面을 가지 며 그 入口部에는 空氣中の 먼지를 除去하기 위하여 거친 것에서 고은 것의 順으로 4枚의 필터가 附着 되어 있다. 流體는 筒 內部에 設置된 鐵網과 整流格子 에 依하여 主流의 不均一性이나 2次流動成分이 除去 되도록 하였다. 또 絞縮部에서의 絞縮比를 1/9.33로 하여 測定用 流路로 들어오는 流動의 均一性을 높여서 變動速度成分을 減少시키도록 하였다.

◎ 回轉圓板

測定用 流路를 固定한 圓板은 中心軸의 돌레를 回轉 할 수 있도록 하고 無段變速 모우터로 驅動하였다. 또 回轉數는 轉의상  $n \leq 250$  rpm로 하였다.

◎ 靜止管 및 送風機

靜止管 內에는 上流로 부터의 旋回의 影響이 下流의 流量 測定部에 미치는 것을 避하기 위하여 整流格子와 鐵網을 設置하였다. 流量測定部는 벤츨리管으로 構成 되었고, 미리 檢定된 流量係數를 써서 流量을 求하였다. 送風機는 遠心型이며 無段變速機에 依하여 風量을 調節할 수 있도록 하였다.

◎ 슬립링(slip ring)

回轉直管에는 電源用 슬립링이 設置되어 있어서 回轉圓板 위의 各 機器에 電力을 供給하고 있다. 또 回轉圓板을 사이에 두고 回轉管의 反對側에는 信號用 슬립링이 設置되어 있어서 熱線風速計의 出力을 靜止系 에 傳達함과 同時에 熱線프로우브의 送込量의 制御信號를 靜止系로 부터 傳할 수 있도록 하였다.

◎ 測定用 流路

測定用 流路의 形狀과 寸數의 詳細 및 剖面계는

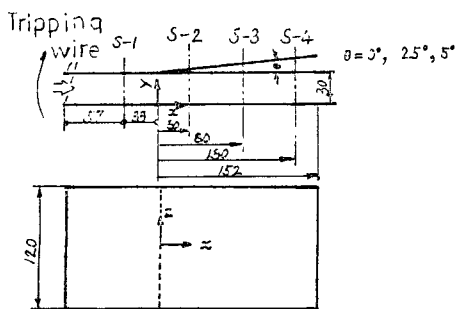


Fig. 3 Details in measuring section

Fig. 3과 같다. 이 測定用 流路 下流에는 平行流路가 접속되어 그 內部에는 格子를 붙여서 下流 曲部의 影 響이 下流에 미치는 것을 防止하도록 하였다. 또 亂流 境界層의 發達을 돕기 위하여 測定用 流路 入口쪽에 直徑 1.0 mm ( $Re_d = U_n d / \nu = 1.0 \times 10^3$ )와 2.5 mm ( $Re_d = 8.3 \times 10^2$ )의 2종류의 트립핑와이어(tripping wire)를 裝착하였다.

◎ 送込機構(traversing mechanism)

熱線프로우브의 送込은 圓板上의 送込機構에 依하여 한다. y方向 送込의 경우 直流모우터를 驅動시켜서 流路 回轉中에도 任意의 送込이 可能토록 하였으며 最小送込量은 0.05 mm 最大誤差는 0.02 mm 以下였다.

◎ 熱線風速計 및 信號系統

Fig. 4는 信號系統圖이다. 熱線프로우브는 圓板에 固定된 定溫熱線風速計에 접속되어 그 出力을 슬립링 을 通하여 靜止系에 놓여진 高入力 抵抗增幅器에 들어 간 後, 線形化器에 依하여 演算되어서 流速에 比例하 는 電壓出力으로 變換한다. 이 信號를 平均値計에 依 하여 平均하면 平均流速에 對應하는 값이 얻어지며 한 편 그 交流成分의 實効値가 變動速度에 對應하는 값으 로 된다. 또 回轉系로 부터 靜止系의 信號傳達에 使用한 슬립링에서 發生하는 雜音은 極히 적어서 測定結 果에는 影響이 없도록 하였다.

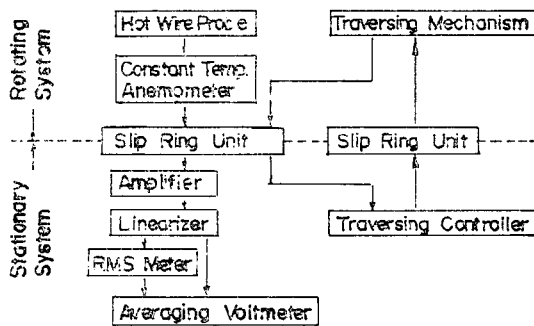


Fig. 4 Signal system

◎ 測定壁面 위의 壓力孔

流路壁面 위의 壓力은 트립핑와이어 裝着位置로 부 터 下流 45 mm에서 135 mm 사이에 15 mm 간격으로 12곳에서 測定하였다. 이 位置에 만든 壓力孔으로 부 터의 壓力은 壓力傳達裝置에 依하여 靜止系로 인도되 어 알코올 마노미터로 測定한다.

作動流體의 速度成分의 測定에는 回轉直管 內의 流 動의 測定<sup>(6)</sup>에 使用되어온 熱線프로우브 回轉法에 따 랐다.

4. 實驗結果 및 考察

測定用 流路上流의 트립핑와이어에 의하여 亂流化한 境界層에 對하여 壓力勾配가 없는 狀態에서 回轉의 影響에 對하여 2種의 다른 軸 레이놀즈數( $R_s=1.0 \times 10^4$  및  $3.0 \times 10^4$ )에 對하여 實驗結果를 考察하였다.  $R_s=1.0 \times 10^4$ 의 경우에는 S-1 斷面으로 부터 上流側 90 mm의 壁面上에 直徑 2.5 mm의 트립핑와이어를, 또  $R_s=3.0 \times 10^4$ 의 경우에는 直徑 1.0 mm의 트립핑와이어를 장착하였다.

S - 1

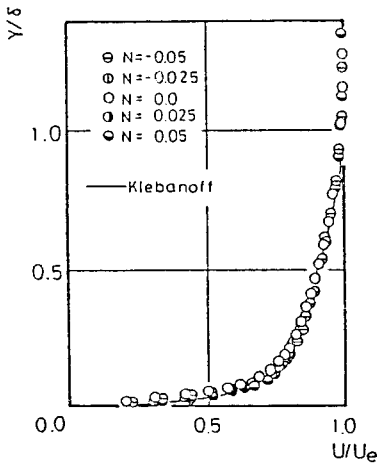


Fig. 5 Velocity profiles at the section S-1,  $R_s=3.0 \times 10^4$

S - 4

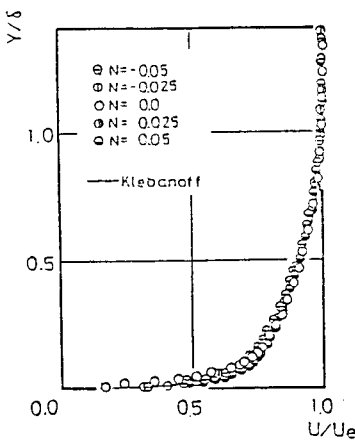


Fig. 6 Velocity profiles at the section S-4,  $R_s=3.0 \times 10^4$

4.1. 平均速度分布

Fig. 5, Fig. 6은 各各  $R_s=3.0 \times 10^4$ 에서의 S-1 斷面 및 S-4 斷面の 平均速度分布  $U/U_e$ 를 나타낸다. 比較를 위하여 Klebanoff<sup>(3)</sup>에 依한 平板上의 平均速度分布도 表示하여 놓았다. S-1 斷面에 있어서는  $N$ 의 값에 關係없이 Klebanoff의 分布와 잘 一致하며 이 斷面에서는 回轉의 影響은 全然 보이지 않는다. 한편 S-4 斷面에 있어서도 速度分布의 形狀은 一致하여 本 實驗 範圍內에서는 回轉의 影響은 거의 없다고 判斷된다.

Fig. 7, Fig. 8은  $R_s=1.0 \times 10^4$ 에 있어서의 S-1 斷面 및 S-4 斷面の 平均速度分布이다. S-1 斷面에 있

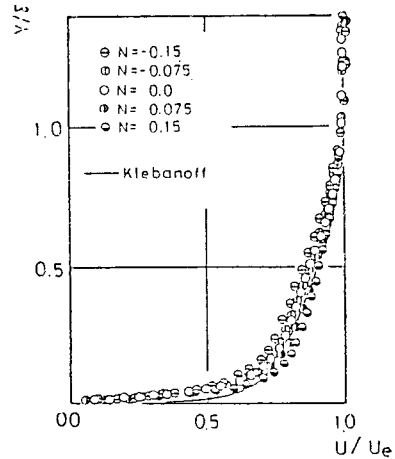


Fig. 7 Velocity profiles at the section S-1,  $R_s=1.0 \times 10^4$

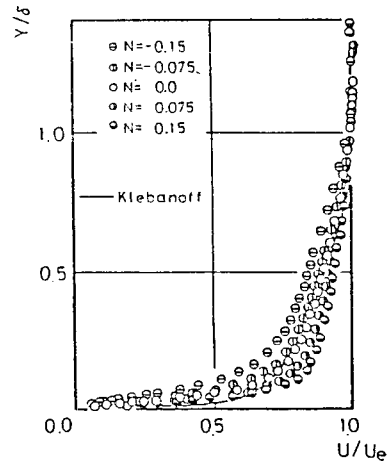


Fig. 8 Velocity profiles at the section S-4,  $R_s=1.0 \times 10^4$

어서는  $R_e=3.0 \times 10^4$ 의 경우와는 달리 回轉의 영향이 조금 보인다. 即  $N=0$ 을 境界로  $N < 0$ 에서는  $0.1 \leq y/\delta \leq 0.9$ 에 있어서의  $U/U_e$ 의 값 및 速度勾配가 減少하지만  $N > 0$ 에서는 增加하고 있어서 그 傾向은 回轉이 增加함에 따라서 強하여 지는 것을 볼 수 있다. S-4 斷面에 있어서는 S-1 斷面에서 보였던  $N$ 의 差異에 依한 分布形狀의 變化는 커지고 回轉의 영향은 더욱 顕著하여진다. 即  $R_e=1.0 \times 10^4$ 의 경우 壓力勾配가 없는 亂流境界層의 平均速度分布는 負壓側에서는 速度

가 減少하고 壓力側에서는 增加한다.

4.2. 變動速度分布

Fig. 9, Fig. 10은 各各  $R_e=3.0 \times 10^4$ 에서 S-1 斷面에서의 變動速度成分  $u'/U_e$  및  $w'/U_e$ 의 分布圖이며 Fig. 11, Fig. 12는 S-4 斷面에서의 分布圖이다.  $u'/U_e$ 의 分布에 있어서는 S-1 斷面 및 S-4 斷面の 兩分布가 모두  $N$ 의 값에 關係없이 Klebanoff의 分布와 一致하는 傾向을 보이고 있어서 回轉의 영향은 없는 것

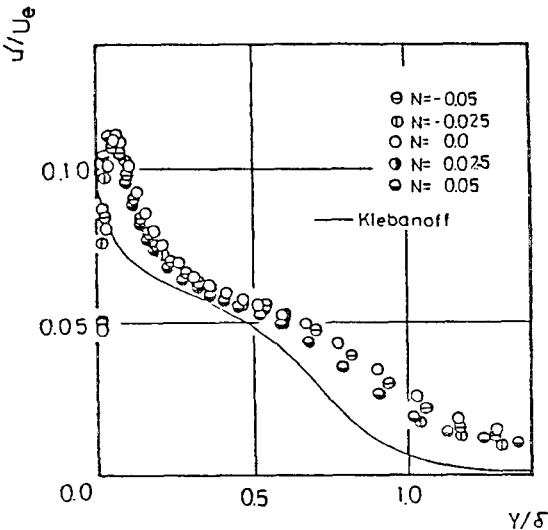


Fig. 9 Turbulence intensity component  $u'/U_e$  at the section S-1,  $R_e=3.0 \times 10^4$

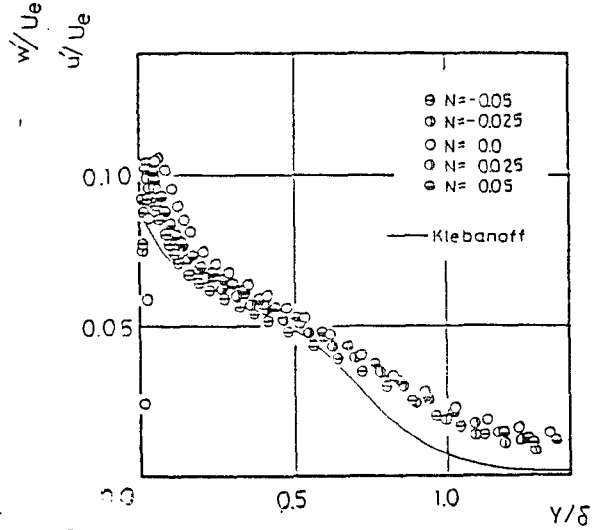


Fig. 11 Turbulence intensity component  $u'/U_e$  at the section S-4,  $R_e=3.0 \times 10^4$

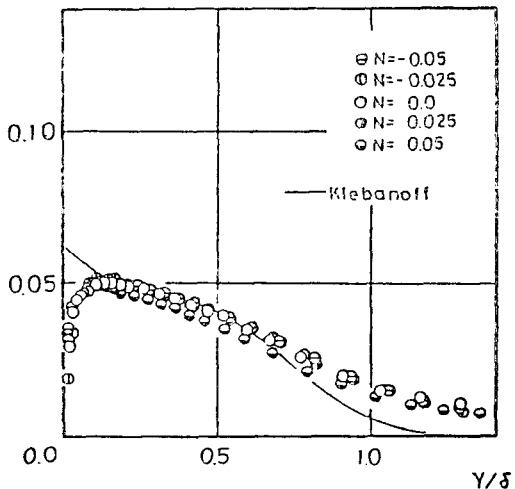


Fig. 10 Turbulence intensity component  $w'/U_e$  at the section S-1,  $R_e=3.0 \times 10^4$

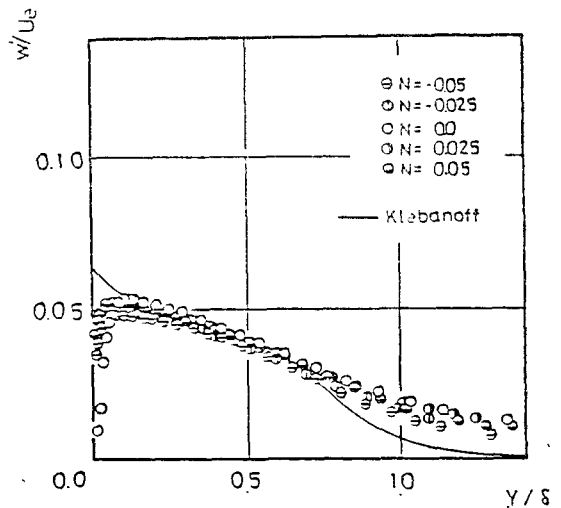


Fig. 12 Turbulence intensity component  $w'/U_e$  at the section S-4,  $R_e=3.0 \times 10^4$

을 알 수 있다.  $w'/U_e$ 에 있어서는 S-1 斷面 및 S-4 斷面 모두 壁 近傍에서 減少하고 있기는 하나 그 變化는 極히 작아서  $u'/U_e$ 에서와 같이 回轉의 影響은 거의 없다고 볼 수 있다.

S-1

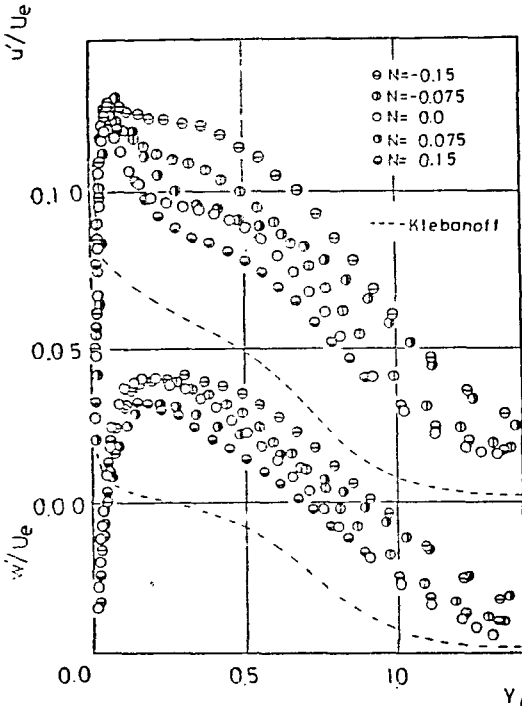


Fig. 13 Turbulence intensity component  $u'/U_e$  at the section S-1,  $R_e=1.0 \times 10^4$

S-1

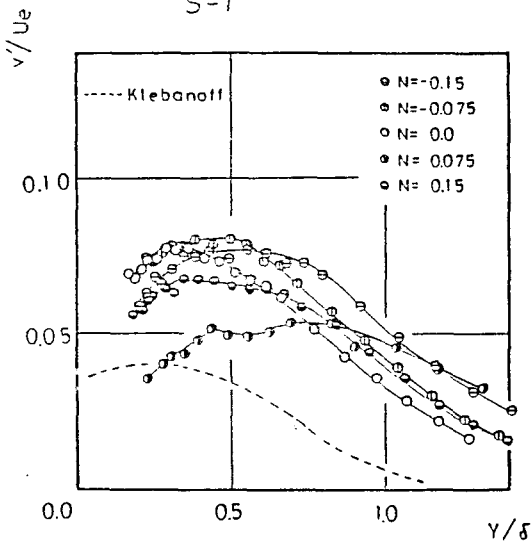


Fig. 14 Turbulence intensity component  $v'/U_e$  at the section S-1,  $R_e=1.0 \times 10^4$

Fig. 13 에서는  $R_e=1.0 \times 10^4$  에서 S-1 斷面에서의 變動速度成分  $u'/U_e$  및  $w'/U_e$  를, Fig. 14 에는  $v'/U_e$  의 分布를 나타낸다.  $u'/U_e$  는  $N=0$  에 있어서 壁 近傍에서 卽족한 極大値를 가지고 있어서 Klebanoff 의 分布와 一致하는 傾向을 나타낸다.  $N>0$  의 경우 壁 近傍의 極大値는 보다 卽족하여지고 있으나, 反對로  $0.2 \leq y/\delta \leq 0.8$  의 領域에서 減少하고 있다. 이것은 코리올리 힘에 依하여 變動領域이 보다 高壓側으로 늘리기 때문이라고 생각된다.  $N<0$  의 경우 壁 近傍의 極大値 및 그 位置는 같으나  $0.2 \leq y/\delta \leq 0.8$  의 領域에서 增加하고 있다.  $w'/U_e$  및  $v'/U_e$  의 兩分布 모두  $u'/U_e$  와 同一한 傾向을 보여  $N<0$  에서 增加하고  $N>0$  에서 減少하고 있다.

Fig. 15 는 레이놀즈 應力成分  $-\overline{u'v'}/U_e^2$  의 分布圖이다. 레이놀즈 應力成分의 分布는 다른 變動分布와는 달리 回轉率  $N$  에는 關係없이 거의 같은 分布形狀을 보인다.

Fig. 16, Fig. 17, Fig. 18 은 各各 S-4 斷面에 있어서의 變動速度成分  $u'/U_e$  및  $w'/U_e$ ,  $v'/U_e$  와 레이놀즈 應力  $-\overline{u'v'}/U_e^2$  의 分布圖이다. 下流인 S-4 斷面에서는 上流인 S-1 斷面에 比하여 回轉의 影響은 보다 顯著하여진다. 卽  $u'/U_e$  의 分布에 關하여 살펴보면  $N>0$  일 때 壁 近傍( $y/\delta=0.1$ )의 極大値는 보다 卽족하고 커져 있으며 그것을 境界로 壁方向 및 境界層의 外側으로 移動하고 있다. 또  $y/\delta \geq 0.4$  의 領域에서는 反對로 變動速度가 減少하고 있다. 또  $w'/U_e$  의 分布도  $u'/U_e$  의 分布와 大略 같은 傾向을 보이고 있고 極大値도 變하지 않는다. 그러나  $N<0$  일 때는 極大値를

S-1

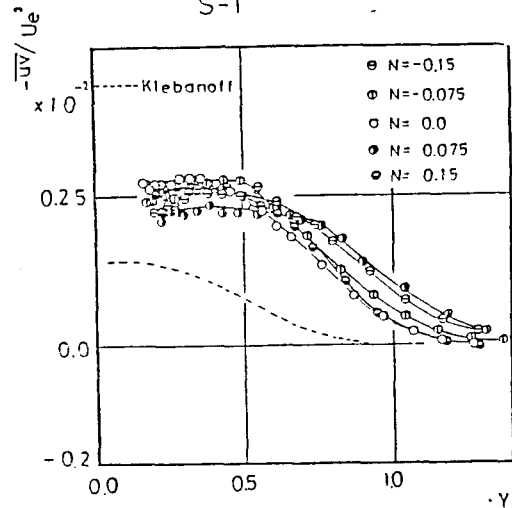


Fig. 15 Reynolds shear stress at the section S-1,  $R_e=1.0 \times 10^4$

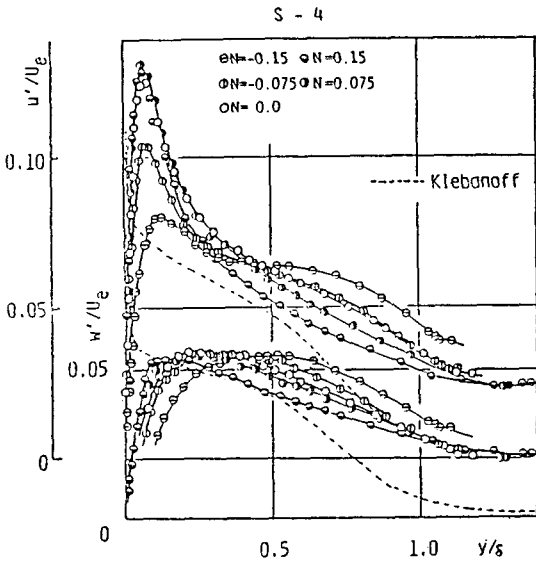


Fig. 16 Turbulence intensity components at the section S-4,  $R_s=1.0 \times 10^4$

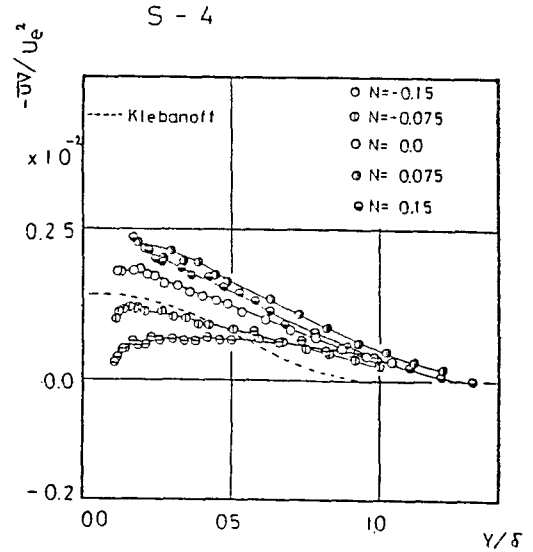


Fig. 18 Reynolds shear stress at the section S-4,  $R_s=1.0 \times 10^4$

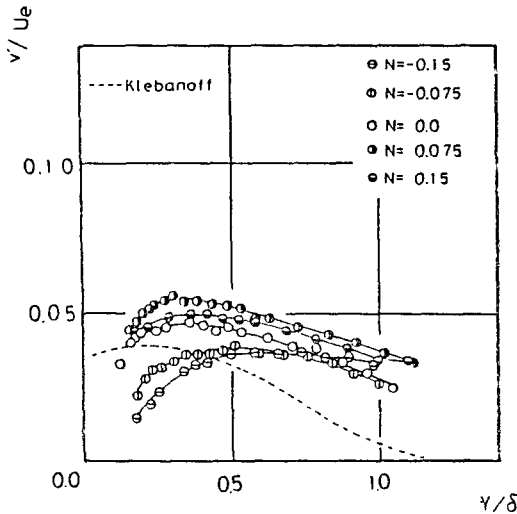


Fig. 17 Turbulence intensity component  $v'/U_e$  at the section S-4,  $R_s=1.0 \times 10^4$

取하는 位置는 回轉이 增加하면  $u'/U_e$ 에 比하여 급격히 境界層 밖으로 移動하며 全體의 分布形狀은 完만하여진다.  $v'/U_e$ 의 分布도 또한  $w'/U_e$ 의 分布와 같은 傾向을 나타내고 있으나 S-1 斷面에서의 分布와는 달리  $N=0$ 을 境界로 하여  $N>0$ 에서는 增加하고,  $N<0$ 에서는 減少하고 있다. 특히  $N<0$ 의 경우  $0.5 \leq y/\delta \leq 1.0$ 에 있어서의 勾配는 完만하고  $y/\delta \approx 0.5$ 로부터 壁을 向하여 급격히 減少하고 있다. 레이놀즈 應力

$-\overline{u'v'}/U_e^2$ 의 分布도 S-1 斷面과는 달리  $N=0$ 을 境界로 하여  $N>0$ 에서 增加하고  $N<0$ 에서 減少하고 있다. 即  $N \geq 0$ 의 경우에는 레이놀즈 應力의 分布는 Klebanoff의 結果 보다는 큰 값을 보이지만  $y/\delta$ 에 對한 變化는 大略 같은 傾向을 찾는다. 그러나  $N<0$ 일 때 그 勾配는 完만하며  $0.4 \leq y/\delta \leq 0.8$ 의 領域에서 大略 一定하게 되고 壁 近傍에서는 급격히 減少하고 있다. 이와 같이 負壓側에서는 剪斷應力이 減少하고 亂流로부터 層流로 옮겨가는 逆 遷移化의 徵候가 나타난다.

### 4.3. 測定壁面上에서의 流動의 2次元性

지금까지의 速度測定은 流路의 壁面 中央 높이에서 하였으나 여기에서는 測定壁面上의  $z$ 方向에 있어서의 流動의 狀態變化를 調査하기 위하여 壁面向으로 부터의 距離인  $y=5.0$  mm에서 스트레이트형 프로브를  $z$ 方向으로 送入하여 얻어진 測定結果로부터 흐름의 2次元性を 調査하였다.

Fig. 19는 S-1 斷面에서의  $z$ 方向 平均速度  $U/U_e$  및 變動速度成分  $u'/U_e$ ,  $v'/U_e$ 의 分布圖이다.  $N \geq 0$ 의 경우에는 平均速度의  $z$ 方向 變化는 壁 近傍의 領域을 除外하면 大體로 적으나  $N<0$ 로 되면 中央의  $z/h=0$  近傍에서 큰 값을 나타낸다. 變動速度成分  $u'/U_e$  및  $v'/U_e$ 는  $N \geq 0$ 의 경우에는  $|z/h| \leq 0.3$ 의 中央의 領域에서는  $z$ 方向으로의 變化가 적으나 側壁에 가까운 領域에서는 側壁方向으로 變動速度가 增加되고

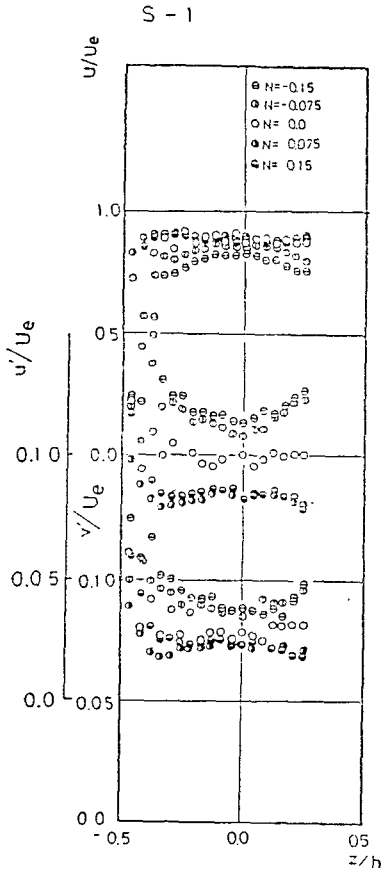


Fig. 19 Plots of the fluctuating velocity components versus  $z/h$  at the section S-1

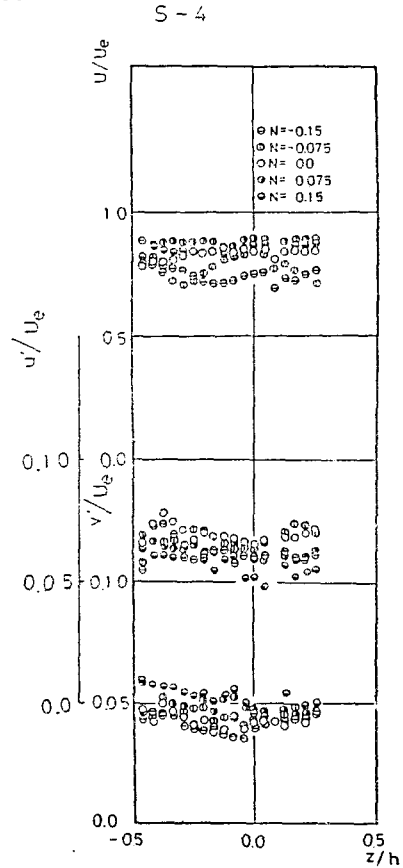


Fig. 20 Plots of the fluctuating velocity components versus  $z/h$  at the section S-4

있다. 이것은 변동속도가 작은 流體가 高壓側으로 移動하기 때문에  $u'/U_e$ 가 減少하고 側壁 近傍의 領域에서는  $N > 0$ 일때 流路 中央의 壁 近傍에 있는 변동이 큰 低速流體가 流入하여  $u'/U_e$ ,  $v'/U_e$ 의 增加를 이르기 때문이다.  $N < 0$ 의 경우에는 변동속도 성분  $u'/U_e$ ,  $v'/U_e$ 의 分布曲線은  $N \geq 0$ 의 경우 보다 윗 쪽에 있다. 側壁에 接近함에 따라서 크게 增加한다. 側壁 近傍에서는 壁 近傍의 변동속도의 큰 流體가 流入하기 때문에 中央( $z/h=0$ )보다 壁에 接近함에 따라 더욱 변동속도가 增加한다고 생각된다.

Fig. 20은 S-4 斷面에서의 速度分布圖이다.  $N \geq 0$ 일 때는 S-1 斷面に 比하여 平均速度  $U/U_e$ 의  $z$ 方向으로의 變化는 작고  $|z/h| < 0.4$  領域에서 大略 一定한 값을 取한다. 그러나  $N < 0$ 로 되면  $z$ 方向으로의 變化가 增加하여 흐름의 2次元性은 나빠진다.  $N = -0.075$ 의 경우를 例로 들면 平均速度  $U/U_e$ 의 分布는  $|z/h| \approx 0.3$ 에서 極小值  $z/h=0$ 에서 極大值를 取하는데 變

動速度成分  $u'/U_e$  및  $v'/U_e$ 의 分布曲線은 各各 이 位置에서 極大值와 極小值를 取한다. 이것들의 平均速度와 變動속도成分의 變化의 對應은 코리올리힘에 依한 2次流動 때문이며 다음과 같이 생각된다. 即  $N = -0.075$ 의 경우의 變動속도分布는 Fig. 16의  $y$ 方向의 測定結果에서 보는 바와 같은 測定壁面 近傍( $y/\delta \approx 0.1$ )에 빠른 極大值를 갖는 分布狀態를 나타내고 있다. 따라서 2次流動에 依하여  $|z/h| = 0.3$ 으로는 流路 中央으로 부터 變動속도가 큰 低速의 流體가, 또  $z/h \approx 0$ 의 中央에서는 境界層 밖의 變動속도가 작은 高速의 流體가 流入하기 때문이라고 생각된다.  $N = -0.15$ 의 경우에도  $U/U_e$ 의  $z$ 方向 變化와 그것에 對應하는  $u'/U_e$  및  $v'/U_e$ 의 變化가 보이지만, 그 變化는 작다.

### 5. 結 論

回轉直管의 流動方向에 壓力勾配가 없는 亂流境界層



内の流動은 高 레이놀즈數에서는 回轉의 영향을 거의 받지 않으나 低 레이놀즈數에서는 負壓側에서 剪斷應力の減少가 일어나고 이것에 따라서 壁 近傍의 速度가 減少하여 粘性底層의 領域이 擴大되지만, 壓力側에서는 反對로 剪斷應力の 增加와 함께 壁 近傍의 速度가 커진다. 따라서 境界層 두께의 增加는 負壓側에서 크고 壓力側에서 작다.

後 記

本 研究는 著者가 문교부 국비해외과전 연구교수로 日本 名古屋大學에 파견되었던 1983年 10月에서 1984年 9月 사이에 遂行되었습니니다. 이에 對하여 관계당국에 심심한 謝意를 表합니다.

參 考 文 獻

(1) Majumadar, A.K., Pratap, V.S., and Spalding, D.B., "Numerical Computation of Flow in Rotating Ducts", ASME, Journal of Fluids Engineering, Vol. 99, Series I, pp.148~153, 1977

(2) Bradshaw, P., Ferris, D.H., and Atwell, N.P., "Calculations of Boundary-Layer Development Using the Turbulent Energy Equation", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 28, Part 3, pp.593~616, 1967

(3) Klebanoff, P.S., "Characteristics of Turbulent in a Boundary-Layer with Zero Pressure Gradient" NACA Rep., 1247, pp.1135~1153, 1955

(4) Johnston, J.P., Hallen, R.M., and Lezius, D.K., "Effects of Spanwise Rotation on Structure of Two-Dimensional, Fully Developed, Turbulent Channel Flow", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 56, pp.533~588, 1972

(5) Moore, J., "A wake and an Eddy in a Rotating Radial-Flow Passage(Part 1 and 2)" ASME, Journal of Engineering for Power, Vol. 95, Series A, pp.205~219, 1973

(6) Kikuyama, K., and Murakami, M., "Development of Three-Dimensional Turbulent Boundary Layers in an Axially Rotating Pipe" ASME, Journal of

Fluids Engineering, Vol. 105, pp.154~160, 1983

(7) Murakami, M., and Kikuyama, K., "Turbulent Flow in Axially Rotating Pipes", ASME, Journal of Fluids Engineering, Vol. 102-1, pp.97~103, 1980

(8) Johnston, J.P., "The Suppression of shear Layer Turbulence in Rotating Systems" ASME, Journal of Fluids Engineering, Vol. 95, Series I, pp.229~239, 1973

(9) Rothe, P.H., and Johnston, J.P., "Effects of System Rotation on the Performance of Two-Dimensional Diffusers", ASME, Journal of Fluids Engineering, Vol. 98, Series I, pp.422~430, 1976

(10) Koyama, H., Masuda, S., Ariga, I., and Watanabe, I., "Stabilizing and Destabilizing Effects of Coriolis Force on Two-Dimensional Laminar and Turbulent Boundary Layers", ASME, Journal of Engineering for Power, Vol. 101, Series I, pp.23~31, 1979

(11) Furuya, Y., and Nakamura, I., "Velocity Profiles in the Skewed Boundary Layers on Some Rotating Bodies in Axial Flow", Journal of Applied Mechanics, Vol. 37, pp.17~24, 1970

(12) Hart, J.E., "Instability and Scoundary Motion in Rotating Channel Flow" Journal of Fluid Mechanics, Vol. 45, Part 2, pp.341~352, 1971

(13) Johnston, J.P., and Eide, S.A., "Turbulent Boundary Layers on Centrifugal Compressor Blades: Prediction of the Effects of Surface Curvature and Rotation", ASME, Journal of Fluids Engineering, Vol. 98, Series I, pp.374~381, 1976

(14) Koyama, H., et al., "Investigation Concerning the Effects of System Rotation on the Turbulent Boundary Layer in a Channel: Effects of Channel Exit Condition(in Jpananese) JSME paper No. 750-4 pp.25~28, 1975

(15) 李奎漢外 4名 "코리올리 힘의作用する亂流境界層内の流れ(壓力勾配のある流れ)", 日本機械學會講演論文集 840-4, pp.1~3, 1984