

論 文

大韓造船學會誌  
 第23卷 第1號 1986年 3月  
 Journal of the Society of  
 Naval Architects of Korea  
 Vol. 23, No. 1, March 1986

회전하는 회전체 주위의 축대칭 두꺼운 난류경계층 연구

강 신 형\* · 황 정 호\*\*

Axisymmetric Thick Turbulent Boundary Layer Around a Rotating Body of Revolution

Shin-Hyoung Kang\*, Jung-Ho Hwang\*\*

Abstract

Axisymmetric turbulent thick boundary layers on a rotating body of revolution are calculated numerically in the paper. Richardson number is introduced to the mixing length to take account of swirl effects on Reynolds stresses. Interactions of the boundary layer and the external potential flow are included by adding the displacement thickness of boundary layers on the original body. Pressure distributions on the body surface are estimated by integrating normal momentum equation across the boundary layer. A model is designed and tested in the wind tunnel. Mean velocities are measured.

Through the present study, swirl effects on the thick axisymmetric boundary layer development are considerable in comparison with those of non-rotating cases. Rotational motion generally increase boundary layer thickness, axial skin friction coefficients, and form drags. Circumferential flow can be reversed to induce negative skin friction when the section area is reduced.

부 호 설 명

- |                  |   |             |                              |
|------------------|---|-------------|------------------------------|
| $C_{fx}$         | : 축방향 벽마찰계수 ( $=\tau_x / \frac{1}{2} \rho U_0^2$ )              | $A_1$       | : 질량부족면적 (식 (12)에서 정의)       |
| $C_{f\theta}$    | : 회전방향 벽마찰계수 ( $=\tau_\theta / \frac{1}{2} \rho R^2 \Omega^2$ ) | $A_2$       | : 운동량부족면적 (식 (13)에서 정의)      |
| $\kappa$         | : von Karman 상수   | $\lambda$   | : 혼합거리의 계수                   |
| $l$              | : 혼합거리 (식 (7)에서 정의)   | $\mu$       | : 점성계수                       |
| $R$              | : 최대반경  | $\nu$       | : 동점성계수                      |
| $Ri$             | : Richardson 수 (식 (9)에서 정의)                                     | $\nu_{eff}$ | : 유효동점성계수 ( $=\nu + \nu_t$ ) |
| $r$              | : 반경방향 좌표   | $\nu_t$     | : 난류동점성계수                    |
| $u, v, w$        | : $(x, y, \theta)$ 방향 평균속도 성분                                   | $\rho$      | : 밀도                         |
| $U_0$            | : 자유흐름 속도   | $\psi$      | : 유선함수                       |
| $(x, y, \theta)$ | : 좌표축   | $\omega$    | : 무차원 유선함수                   |
| $\delta$         | : 경계층의 두께   | $\Omega$    | : 물체의 회전각속도                  |
| $\delta^*$       | : 배제두께 (식 (12)에서 정의)  |             |                              |

1. 서 론

회전하는 회전체 주위의 점성유동은 터보기계의 축

接受日字: 1985年 11月 28日, 再接受日字: 1986年 2月 11日.

\* 경희원, 서울대학교 기계공학과

\*\* 서울대학교 대학원

이나 수중빙기등의 설계에 응용되리라 생각된다. 지금까지 회전체의 축대칭 경계층 유동의 계산은 물체가 받는 저항이라는 측면에서 관심을 두고 있었으나 이보다도 물체 뒷부분에 형성되는 두꺼운 난류 경계층의 특성을 파악하기 위한 연구가 많이 수행되었다. 이 부분에서는 경계층의 두께가 곡률에 비하여 무시될 수 있는 크기가 아니므로 이에 따른 곡률의 영향, 포텐셜유동과 경계층의 상호작용, 난류모델의 특성변화등이 고려되어야 한다. 이에 관한 대표적인 연구로 Patel and Lee (1)의 연구를 들 수 있으며 축대칭 유동에서 얻은 특성은 선박의 선미와 같은 일반 3차원 물체에서 이용되고 있다.

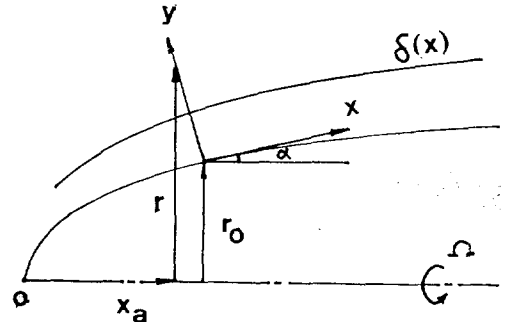


Fig. 1 Coordinate system

회전체가 회전하는 경우에는 회전속도가 유도되며, 이때 원심력에 의해 압력이 변화되며 또 난류특성도 다르게 될 것이다. 경계층이 얇은 경우 회전하는 물체에 대해서는 과거 여러 연구가 있었다. 얇은 전단층에서 속도의 회전성분은 주로 난류전단력에 영향을 주게 된다. Kooslin et. al.(2)에서는 Richardson수를 적절히 정의하고 이를 혼합거리 모델에 반영되도록 하여 회전하는 원추에서의 경계층을 성공적으로 예측하였다. Launder et. al. (3)에서는 혼합거리 모델보다 다양하게 이용되고 있는 소위  $k-\epsilon$  난류모델에 유사한 Richardson수를 도입하였고 회전하는 원추의 경우에 적용하였다.

태라고 하자. 지배방정식의 기술을 위하여 Fig. 1과 같이 좌표계를 잡고( $u, v, w$ )를  $(x, y, \theta)$  방향의 평균속도 성분이라 한다. 이에 대한 지배방정식은 다음과 같이 된다. (3)

연속방정식

$$\frac{\partial(ru)}{\partial x} + \frac{\partial(rv)}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

x-운동량 방정식

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial y} (\nu r \frac{\partial u}{\partial y} - ru'v') + \frac{w^2 \sin \alpha}{r} \tag{2}$$

y-방향 운동량 방정식

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = w^2 \frac{\cos \alpha}{r} \tag{3}$$

$\theta$ -방향 운동량 방정식

$$u \frac{\partial(rw)}{\partial x} + v \frac{\partial(rw)}{\partial y} = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial y} \left[ \nu r^3 \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{w}{r} \right) - r^2 v'w' \right] \tag{4}$$

국내에서는 박승호 및 이택식(4)이 참고문헌(2)과 유사한 이론으로 Crawford and Kays (5)의 STAN 5 프로그램을 활용하여 회전원추에서 유동을 계산하고 실험을 수행하였다. Nakamura et. al. (5)에서는 회전체 뒷부분에서 균일속도를 얻도록, 즉 길이방향의 압력구배가 없도록하여 회전이 유동특성에 미치는 영향을 연구하였다. 이들은 회전에 의한 영향이 결국에는 역압력 구배에 해당하는 영향이 있음을 밝히고 실험을 통하여 회전이 난류특성에 많은 영향이 있음을 연구하였다.

위 방정식을 Nach and Patel(7)에서 설명된 2차 경계층 방정식과 비교하면 몇가지 중요한 가정이 포함되었음을 알 수 있다. 첫째, 축방향 곡률의 영향은  $\theta$ 방향 곡률의 영향에 비해서 상대적으로 무시되었다. 둘째로, Reynolds 응력  $-u'v'$  및  $-v'w'$ 만 고려되고 기타 응력 성분들은 상대적으로 무시되었다.

본 연구에서는 회전체가 회전하면서 물체의 후미에 두꺼운 난류경계층이 형성될 때 회전속도가 경계층에 미치는 영향을 혼합거리 모델을 이용하여 수치적으로 연구하였다. 아울러 풍동에서의 모형실험을 통하여 우선 수치해석의 타당성과 평균속도 분포의 특성을 연구하고 이후 구체적인 난류특성에 대한 연구의 기초가 되도록 하였다.

Reynolds 응력은 Boussinesq의 개념에 의해서 다음과 같이 가정되었다.

$$-u'v' = \nu_t \frac{\partial u}{\partial y}, \quad -v'w' = \nu_t r \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{w}{r} \right) \tag{5}$$

$\nu_t$ 는 난류 동점성 계수이고 Kooslin et. al.(2)에서와 같이 다음의 혼합거리 모델을 사용하였다. 이는 Kooslin이 Bradshaw (8)에서의 개념을 이용한 것이다.

$$\nu_t = l^2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left\{ r \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{w}{r} \right) \right\}^2 \right]^{1/2} \tag{6}$$

먼저 유체는 비압축성 뉴턴유체이고 유동은 정상상

$$l = l_0(1 - Z Ri) \quad (7)$$

$$l_0 = \begin{cases} \lambda \delta & : \text{바깥쪽 경계층} \\ ky(1 - \exp \frac{y^+}{A^+}) & : \text{안쪽 경계층} \end{cases} \quad (8)$$

$$Ri = \frac{2w \cos \alpha}{r^2} \frac{\partial}{\partial y} (rw) : \text{Richardson Number} \quad (9)$$

여기서  $l_0$ 는 원심력을 고려치 않을 때 흔히 쓰이는 혼합거리이며 여기에  $Ri$ 수를 도입하고 이를 경험상수  $Z$ 를 통하여 혼합거리  $l$ 을 적당히 조절하자는 의도이다.

위 방정식 (1)~(4)와 난류모델(5)를 해석하기 위한 경계조건은 다음과 같다.

$$y=0; u=v=0, w=r_0(x)\Omega$$

$$y=\infty; u=u_E(x), w=0 \quad (10)$$

식 (3)에서  $y$ 방향의 압력은 원심력에 의해서 주로 변하며  $x$ 방향의 압력구배에 영향을 미치겠지만 작다고 생각하여 무시하였다. 그래서 회전이 없는 경우 포텐셜 유동에서  $u_E$ 를 계산하여 식(1), (2) 및 (4)에서 경계층을 계산한 후 Patel et. al. (9)에서와 같이 물체가 다음식에서 주어지는  $\delta^*$  만큼 표면에서 수직으로 배제되었다고 생각하여  $u_E(x)$ 를 다시 계산하는 식으로 반복 계산을 하였다.

$$r_0 \delta^* (1 + \frac{1}{2} \frac{\delta^*}{r_0} \cos \alpha) = \Delta_1 \quad (11)$$

여기서,

$$\Delta_1 = \int_0^{\delta} (1 - \frac{u}{u_E}) r dy, \delta^* = \int_0^{\delta} (1 - \frac{u}{u_E}) dy \quad (12)$$

이다. 이때  $u_E(x)$ 를 경계층의 바깥 경계에서의 속도로 생각하였다. 경계층내의 속도가 계산된 후에  $y$ 방향의 압력구배 식(3)을 적분하여 경계층의 바깥 경계에서의 압력으로 부터 물체 표면의 압력을 계산할 수 있다. 이렇게하여 원심력에 의해서 벽의 압력이 변하는 양을 계산할 수 있었다.

그밖에 사용되는 적분변수의 정의는 다음과 같다.

$$\Delta_2 = \int_0^{\delta} (1 - \frac{u}{u_E}) \frac{u}{u_E} r dy \quad (13)$$

### 3. 수치계산

경계층을 무시한 경우 또는 배제거리  $\delta^*$ 를 고려한 경우에 포텐셜 유동은 강성형과 홍석원(10)에서와 같이 물체표면에 링소스를 분포시켜서 2중 Fredholm 적분방정식을 수치해석하였다. 적분방정식은 Gaussian quadrature 방법에 의하여 효과적으로 계산하였다.

경계층의 계산은 STAN 5 프로그램 (5)을 활용하여 본 논문에서 회전속도를 다룰 수 있도록 수정하였다. STAN 5에서와 같이 기본방정식을 Von Mises 변환

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = \rho r u, \quad \frac{\partial \phi}{\partial x} = -\rho r v \quad (14)$$

를 이용하여 독립변수를  $(x, y)$ 에서  $(x, \phi)$ 로 변환하였다. 그러면 운동량방정식 (2) 및 (4)에서  $v$ 가 나타나지 않게 된다. 계속하여 다음의 Patankar-Spalding의 좌표변환을 이용하였다.

$$\omega = \frac{\phi - \phi_I}{\phi_E - \phi_I} \quad (15)$$

여기서  $\phi_E$ 와  $\phi_I$ 는 경계층의 바깥경계와 내벽에서의 유동함수 값이다. 그러면 식 (2) 및 (4)는 다음과 같이 된다. (11)

$$\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial \omega} \left[ \frac{\rho^2 r^2 u \nu_{eff}}{(\phi_E - \phi_I)^2} \frac{\partial u}{\partial \omega} \right]$$

$$= \frac{1}{\rho u} \left( -\frac{dp}{dx} + \frac{\rho \omega^2 \sin \alpha}{r} \right) \quad (16)$$

$$\frac{\partial (rw)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial \omega} \left[ \frac{\rho^2 r^4 u \nu_{eff}}{(\phi_E - \phi_I)^2} \frac{\partial}{\partial \omega} \left( \frac{rw}{r^2} \right) \right] = 0 \quad (17)$$

여기서  $\nu_{eff} = \nu + \nu_t$ 이다.

식 (16)과 (17)을 유한차분법에 의하여 수치계산하던  $u$ 와  $w$ 를 구한다. 이에 의하여 경계층의 적분변수들을 계산하고 식(11)에서  $\delta^*$ 를 얻는다.  $\delta^*$ 만큼 수정된 물체의 포텐셜 유동을 다시 계산하고 위의 경계층 계산을 반복하면서 경계층과 포텐셜유동의 상호영향을 고려하였다. 마지막으로 배제된 물체표면의 압력을 경계층 바깥의 압력이라고 보고 식(3)을  $y$  방향으로 적분하여 물체표면의 압력을 추정하였다. 원심력에 의한  $y$ 방향의 압력구배가  $x$ 방향으로 미치는 영향을 무시하고 위 계산에서 고려하지 않았다.

### 4. 실험장치 및 실험방법

본 연구의 경계층 계산결과를 비교하고 실험적 연구를 수행하기 위하여 Fig. 2와 같은 회전체를 설계하였다. 물체의 앞부분은 4:1 회전타원체의 반으로 하였다. 뒷부분은 유동바리가 일어나지 않고 경계층이 두

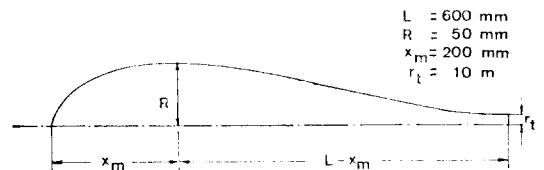


Fig. 2 Outline of the model

꺼워지도록 하면서 회전축에 완만히 연결되도록 하였다. 이 회전체는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$(x_a - x_m)^2 + \frac{r^2}{B^2} = \frac{R^2}{B^2}, \quad 0 \leq x_a \leq x_m$$

$$\left( \frac{r - r_t}{R - r_t} \right)^2 = \left( \frac{x_a - L}{L - x_m} \right)^4 \left\{ a_1 - a_2 \left( \frac{x_a - L}{L - x_m} \right) - a_3 \left( \frac{x_a - L}{L - x_m} \right)^2 - a_4 \left( \frac{x_a - L}{L - x_m} \right)^3 \right\},$$

$$x_m < x_a < L \quad (19)$$

$x_m$ 은 회전타원체와 연결되는 위치로 최대반경이  $R$ 이 된다. 여기서  $L=0.6m$ ,  $x_m=0.2m$ ,  $B=1/4$ ,  $r_t=0.01m$ 이고  $a_1=0.1$ ,  $a_2=20.64$ ,  $a_3=34.58$ ,  $a_4=14.84$ 이다. 위 회전체의 앞부분은 회전할 수 있도록 베어링을 내부에 장치하였고 뒷부분의 축은 풍동에 고정된 베어링에 연결되었다. 축의 끝에는 웜기어를 부착하여 풍동의 바깥에서 DC 가변모터로 회전되도록 하였다. 회전체는 잘 건조된 마티카를 사용하여 제작하였다. 풍동의 단면은  $0.5m \times 0.5m$  정사각형 단면이 되도록 설계하여 제작하였다. 풍동의 입구는 수축부를 설치하여 시험부에서 균일유동이 가능하도록 하였고 난류강도를 조절할 필요가 있을때는 입구에 메쉬를 부착할 수 있도록 하였다. 시험부의 전면은 아크린 창문을 두어 모형의 운전상태가 관찰되도록 하였다. 풍동의 끝에는 축류송풍기를 두어 풍기가 흡입되도록 하였다. 송풍기는 독일 Babcock-BSH회사 모형번호 AXN-12-56-500M/D이다. 동력은 3.7kW이고 모형이 설치된 상태에서 14.5m/sec의 풍속이 얻어졌다.

모형은 앞 끝에 4개의 가는 와이어로 풍동 네 코너에 지지되었다. 유동의 축대칭성을 점검하면서 모형의 위치를 조절하였다. 모형은  $x/L=0.2$  위치에 직경 1mm의 트립 와이어를 부착하여 유동이 안정되고 난류가 되도록 하였다.

모형의 길이  $L$ 을 기준으로 한 Reynolds 수는  $5.6 \times 10^5$ 이었다. 모형의 회전수는 1500rpm으로 하였다.

회전하지 않는 상태에서 경계층의 속도분포와 압력분포는 직경 1.8mm의 피토투브를 이용하여 측정하였다. 회전하는 경우에는 두께 1.0mm, 폭 1.9mm의 3공 피토투브로 측정하였다. 압력은 압력변환기, A/D 변환기, Apple II-plus 마이크로 컴퓨터를 이용하여 측정하였고 푸르브의 이송은 자동장치를 사용하였다.

경계층의 계측은  $x_a/L=0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ 에서 벽에 수직방향으로 측정하였다.

### 5. 결과의 검토

#### 5.1. 계산결과

회전체의 길이  $L$ 을 기준으로 한 Reynolds 수  $(= \frac{U_0 L}{\nu})$ 를  $7.8 \times 10^5$ 으로 고정하고  $R\Omega/U_0$ 를 0.0, 0.3, 0.5 및 1.0으로 변화시키면서 계산을 수행하였다. 한편 회전속도가 혼합거리에 미치는 영향이 얼마나 되는지 정량적인 경향을 보기 위하여  $Z=0$  및  $Z=5$  두 가지에 대하여 계산하였다.

먼저 경계층이 바깥 포텐셜유동에 미치는 배제효과를 무시하고  $Z=5$ 로 하였을때 회전속도에 따른 경계층 속도분포를 Fig. 3~Fig. 7에 나타내었다. Fig. 8에 나타내었듯이 회전속도가 증가하면 전체적인 경계층의 두께는 두꺼워지고 있다. 그러나 벽면 가까이에서 유도되는 회전속도 성분은 의해서 포텐 가까이에서는 오

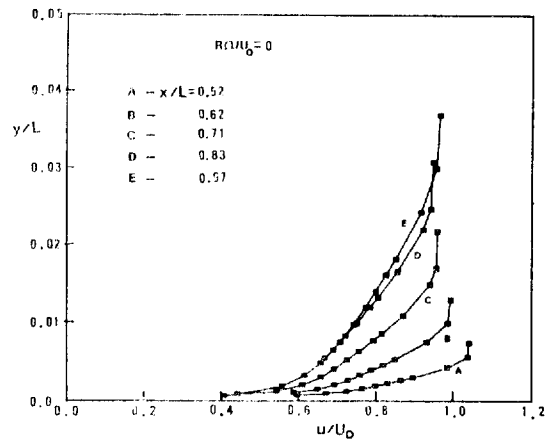


Fig. 3 Tangential velocity profiles ( $R\Omega/U_0=0$ )

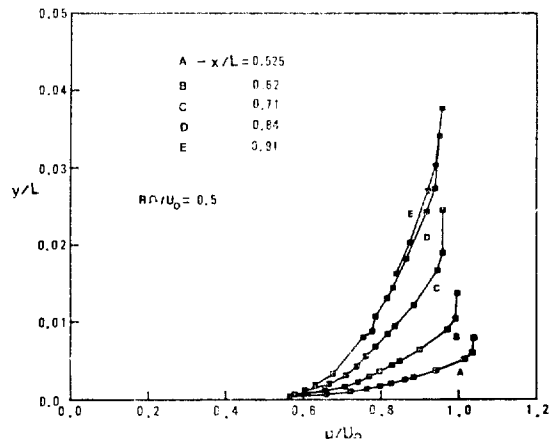


Fig. 4 Tangential velocity profiles ( $R\Omega/U_0=0.5$ )

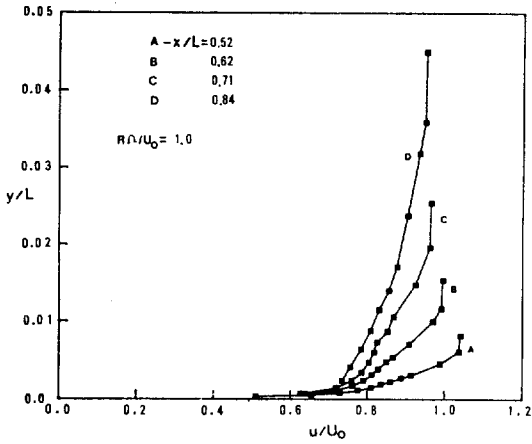


Fig. 5 Tangential velocity profiles( $R\Omega/U_0=1.0$ )

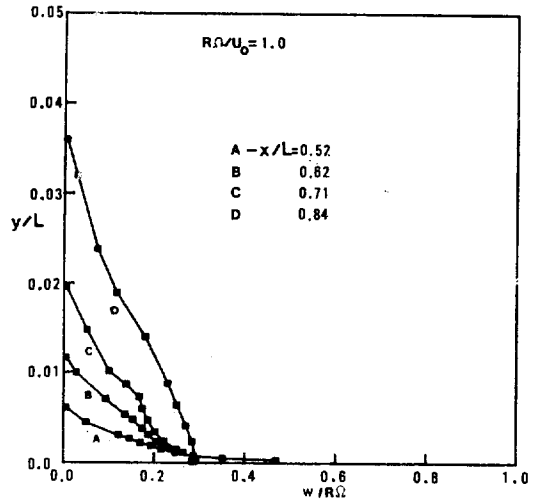


Fig. 7 Swirl velocity profiles( $R\Omega/U_0=1.0$ )

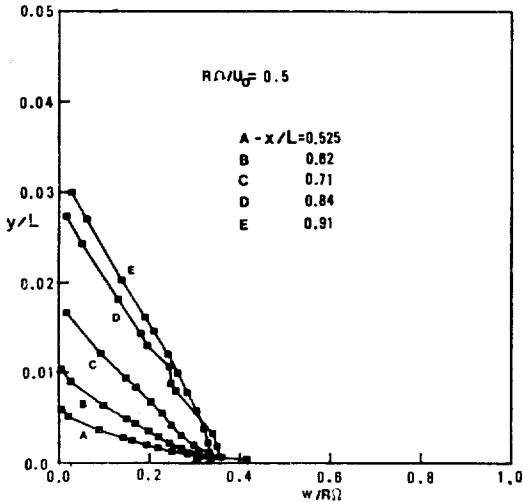


Fig. 6 Swirl velocity profiles( $R\Omega/U_0=0.5$ )

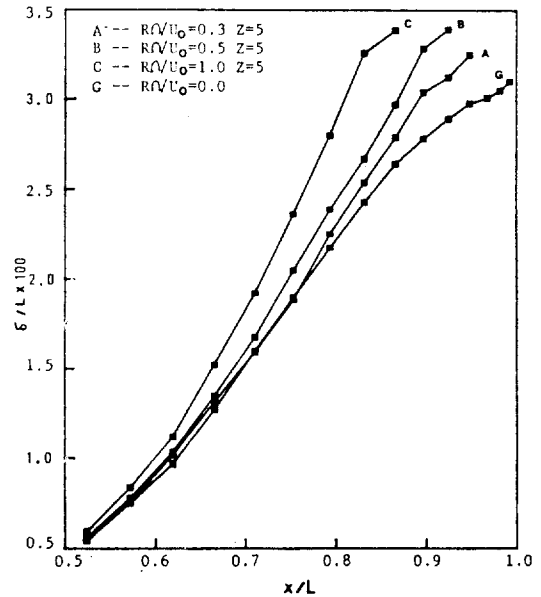


Fig. 8 Boundary layer thickness

히려 속도구배가 증가하고 있음을 Fig. 3~Fig. 5에서 알 수 있다. 난류동점성 계수를 증가시켜서 이에 따라 축방향 마찰저항 계수는 Fig. 11에서와 같이 회전속도에 따라 증가된다. Fig. 9와 Fig. 10에는 속도성분의 극선도를 나타내고 있다. 경계층이 얇을때나 바깥 경계층에서는 대체로 직선적으로 변하지만 표면에서는 상당히 다른 경향을 보이고 있다.

식 (2)와 식 (4)에서 압력구배 및 원심력항을 무시하고 경계층의 두께가 얇은 경우에는  $u_e \sim u$  및  $rw$ 는 상사성이 있게 된다. 이때는

$$1 - \frac{u}{u_e} = \frac{rw}{r_0^2 \Omega} \quad (20)$$

의 관계가 성립하리라 생각된다. Bissonnette and

Mellor(12)에서는 벽면 및 경계층의 바깥 경계에서의 유동특성에 관하여 고찰한 바 있다. 식 (20)이 성립한다고 보면

$$\frac{\tau_\theta}{\tau_x} = \Omega \quad (21)$$

의 관계가 있다. 그러나 일반적으로는 성립되지 않는다. 더구나 물체의 하류로 갈수록 단면적이 줄어들기 때문에 표면에서 회전속도가 감소하게 된다. 그러나 경계층의 가운데에서는 이 영향을 빨리 받지 않는다.

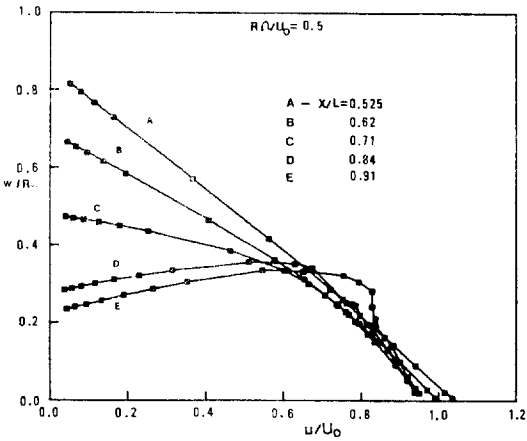


Fig. 9 Polar plot of mean velocity profiles ( $R\Omega/U_0=0.5$ )

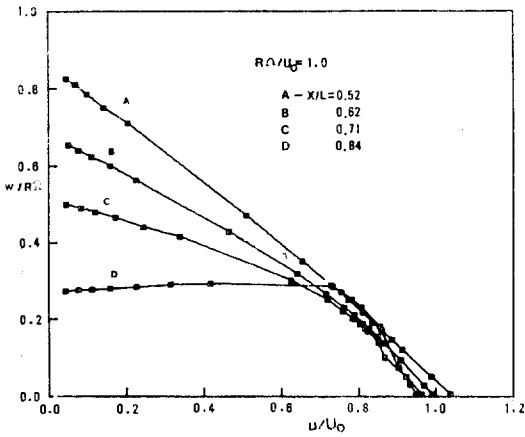


Fig. 10 Polar plot of mean velocity profiles ( $R\Omega/U_0=1.0$ )

Fig. 9와 Fig. 10에서 보듯이 회전속도 성분이 하류로 갈수록 최대속도가 벽표면에서 이루어지지 않는다. 이에 따라 회전방향의 마찰저항계수가 음이된다.

Fig. 11은 표면에서 축방향 마찰저항 계수를 나타내었다. 축방향의 마찰저항계수는 앞서 언급한 바와같이 회전속도의 증가에 따라 증가한다.  $Z=0.0$ 으로 하여 회전속도가 난류혼합 거리에 미치는 영향을 제외하면 마찰저항계수는 상대적으로 감소한다. 이는 단순한 선회전속도에 의한 마찰계수의 증가와는 반대효과를 주고 있다. Fig. 12에는 회전방향의 마찰저항계수를 나타내었다. 물체의 하류에서 벽표면의 회전속도가 감소하기 때문에 앞서 언급한 바와같이 저항계수는 음이된다. 물체 뒷부분은 오히려 유체로 부터 회전토크를 받고 있

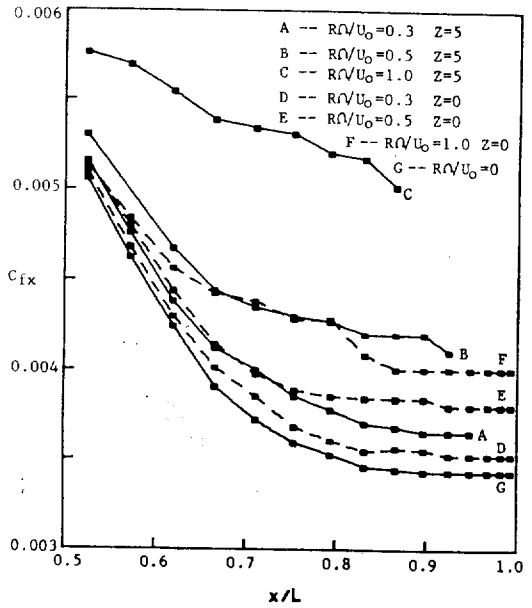


Fig. 11 Axial friction coefficient

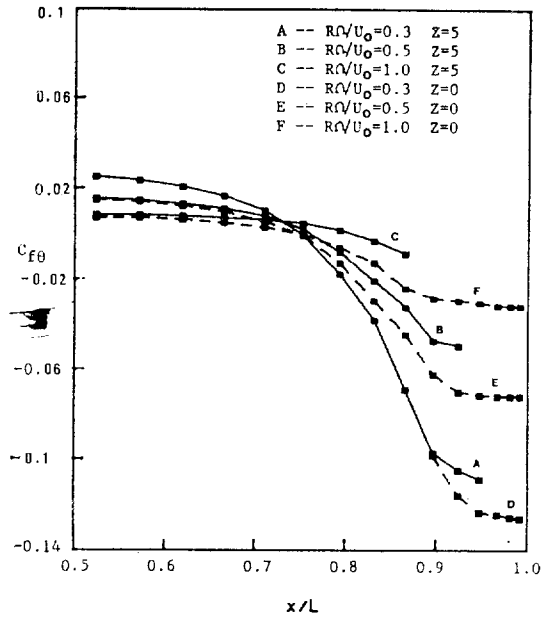


Fig. 12 Swirl friction coefficient

음을 의미한다. Fig. 13와 Fig. 14에는 각각 질량부족면적  $A_1$  및 운동량 부족면적  $A_2$ 를 나타내었다. 회전속도의 증가에 따라 이들은 감소하고 있다. 이는 앞서 언급한대로 축방향 속도성분이 회전속도의 영향으로 벽 근처에서는 증가하고 경계층 바깥에서는 감소하기 때

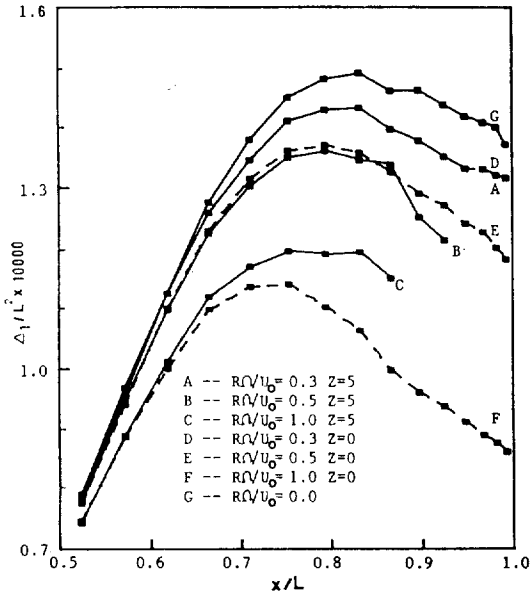


Fig. 13 Mass deficit area

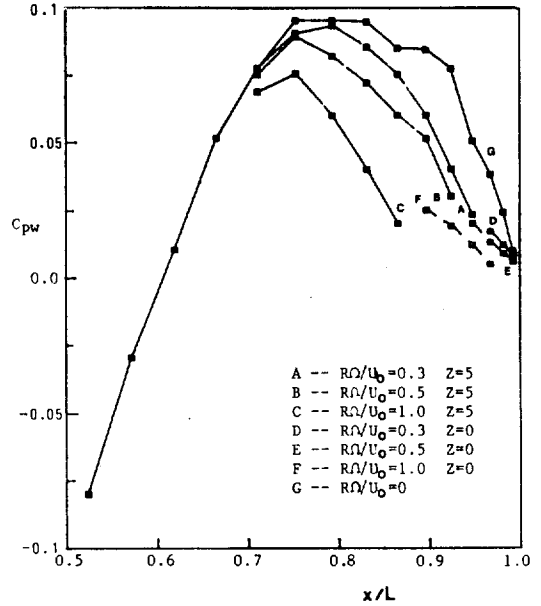


Fig. 15 Pressure coefficient

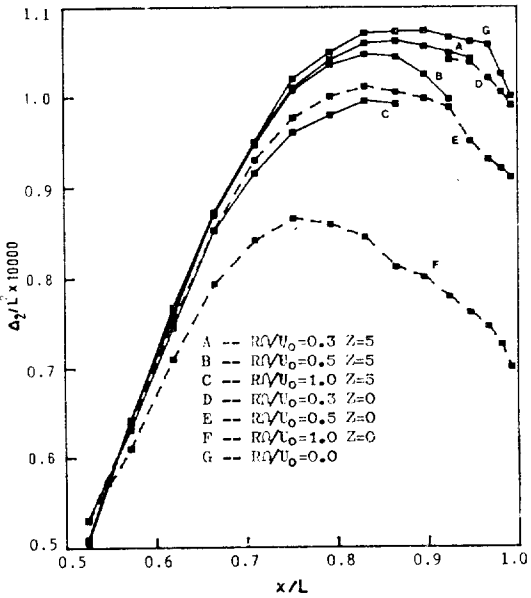


Fig. 14 Momentum deficit area

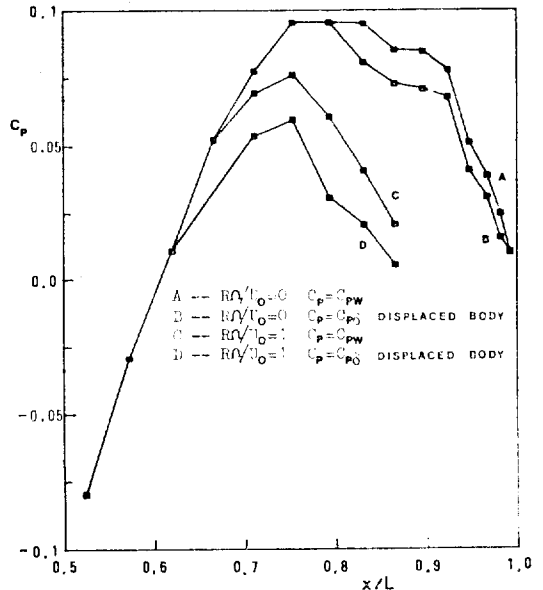


Fig. 16 Pressure coefficient with the consideration of the interactions between the boundary layer and the potential flow

문이다. 여기서도  $Z=0$ 일때는 이에 상반되는 효과를 보이고 있다.

Fig. 15에는 포텐셜 압력으로 부터 벽 표면의 압력을 식 (3)에 의해 계산된 결과를 나타내었다. 회전 원심력에 의해 경계층 바깥의 압력보다 표면에서 압력이 적게 된다. 이러한 차이도 회전속도가 증가하면 커지게 된다. 이로 비무어 물체가 회전할때 마찰저항과 형상

저항은 모두 증가하는 경향을 알 수 있다.

Fig. 16은 경계층의 배제효과를 고려하여 계산할 수 행한 결과이다. 회전하지 않는 경우 경계층의 배제효과에 의해서 압력곡선은 B로 된다. 순수하게 회전하는

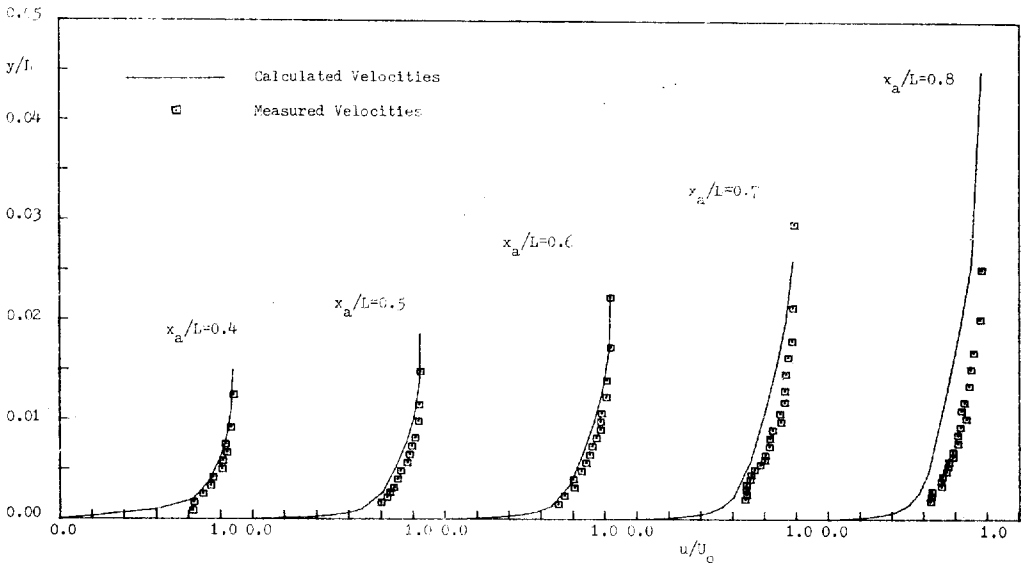


Fig. 17 Comparison of calculated and measured velocities (non-rotating)

효과 즉 원심력에 의해 압력은 곡선 **C**로 된다. 이때 배제효과를 고려하면 곡선 **D**가 된다. 이로 미루어 경계층의 배제효과 및 원심력의 영향은 모두 하류에서 벽표면 압력을 감소시키며 저항을 증가시키고 있다.

5.2. 실험결과

Bissonette et. al. (12)에서는 회전 실린더에 관한 난류유동계측이 수행되었고 Nakamura (6)는 원추형태의 뒷부분을 이용하였으나 외부유동의 압력구배가 없는

경우에 대하여 연구하였다. 본 연구에서는 압력구배가 포함되는 일반적인 물체이기 때문에 다른 연구의 결과와 차이점을 알아보는 것이 흥미로운 일이다.

먼저 Fig. 17에서 회전하지 않는 경우에 계측된 속도분포를 보이고 실험조건과 같은 Reynolds수에서 계산된 결과와 비교하였다.  $x_a/L=0.4$ 에서의 계측된 속도를 초기조건으로, 계측된 외부속도를 경계조건으로 하여 계산을 수행하였다. 외부유동속도에서 계산된 압

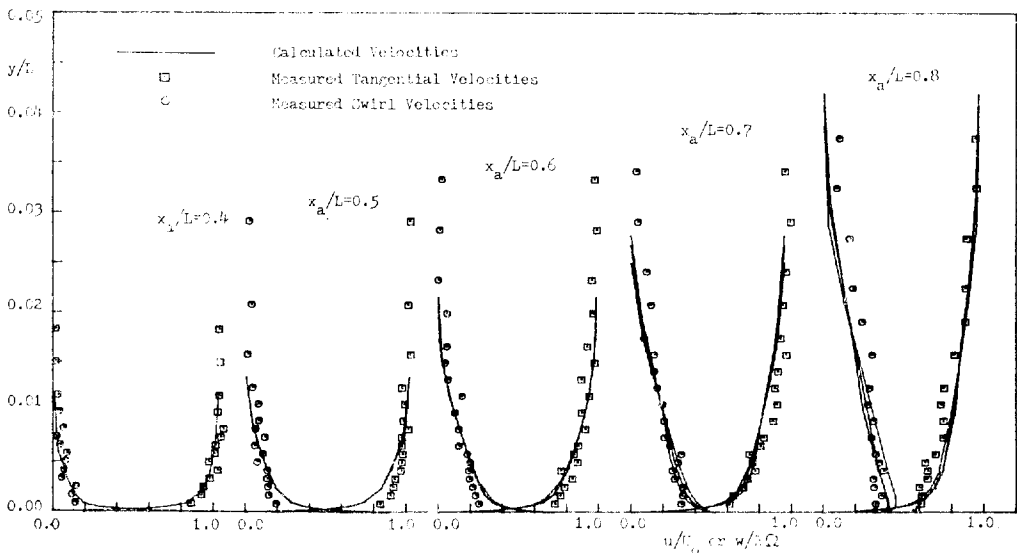


Fig. 18 Comparison of calculated and measured velocities (rotating)



력분포는 배제효과를 고려한 포텐셜 유동 계산 결과와 비교하여 합리적인 경향을 보였으나 2% 정도의 Blockage 효과가 포함되어 있는듯 하였다. 대체적으로 잘 일치하고 있으나 하류에서의 계산결과는 약간 두꺼운 경계층을 보이고 있다. 한편 벽면면 근처에서 실험데이터는 벽면이 피토투브에 주는 영향에 의해 신빙성이 떨어진다. 정밀한 계측을 위해서는 남작하게 만든 작은 튜브를 이용해야 하겠다. 이로써 경계층계산에 사용된 혼합거리 모델 및 수치계산 과정이 합리적이었다고 생각된다.

Fig. 18에는 회전하는 경우 예측된 속도분포와 실험 조건과 같은 Reynolds 수에서 계산결과를 비교하였다. 3공피토투브에 의한 계측의 정밀도는 피토투브에 의한 계측보다 약간 떨어짐을 고려하더라도 실험데이터가 다소 불안정하였다. 본 실험의 경우  $Re/U_0=0.5$ 이다. 전체적인 경향은 계산결과와 잘 일치하고 있다. 계산은  $Z$ 를 0, 3, 5로 변화시켜 수행하여 Fig. 18에 나타내었는데  $x_s/L=0.7$  이후에는 약간의 영향을 볼 수 있었다. 앞서 수치계산결과로 보아  $Re/U_0=1.0$  정도 되어야  $Z$ 에 따른 영향이 크음을 알 수 있는바 실험의 정도 범위내에서 적절한  $Z$ 는 판단하기 어려웠다.

Nakamura(6)에서는  $Z=3$ 이 적합하다고 보나 본연구에서 역압력구배를 고려한다면  $Z=5$  정도가 무난하리라 생각된다.

## 6. 결 론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 맺는다.

(1) 축대칭 물체의 후미에서 경계층이 두꺼워 지는 경우 포텐셜 유동과 경계층의 상호작용이 크며 이때 배제효과를 고려하여 경계층의 외부유동을 수정하는 방법이 비교적 합리적이다.

(2) 물체가 회전하는 경우는 물체의 후미에서 역압력 구배와 유사한 영향을 경계층 유동에 준다. 따라서 경계층의 두께는 일반적으로 두꺼워진다. 그러나 벽면 근처에서는 회전속도의 유도에 의해서 경계층은 하류로 가속이 되어 배제두께 및 운동량 두께는 감소한다. 따라서 마찰저항 계수는 보통 증가한다.

(3) Richardson수를 고려한 혼합거리 모델은 유동을 합리적으로 예측하며 회전이 빠른 경우, 즉  $Re/U_0=1.0$  정도 이상이면  $Z$ 의 선택이 중요하다.

(4) 원주방향의 속도는 보통 벽면위에서 최대가 되나 반경이 하류로 갈수록 감소하는 경향이 심하면 최대속도가 벽에서 떨어져 나타날 수도 있다.

(5) 원주방향의 속도는 원심력을 유기시키며 이에 평형상태를 유지키 위해 두께방향으로 압력의 변화를 일으켜 물체표면의 압력을 경계층 바깥보다 감소시킨다. 이는 회전하지 않는 경우 경계층의 배제효과와 비슷하다. 따라서 물체의 저항을 증가시키는 효과가 있다.

## 후 기

본 연구는 1984년도 한국과학재단 학술연구비로 지원되어 수행되었으며, 이에 제단 관계자 여러분에게 깊은 감사를 드립니다. 또한 연구를 도와준 서울대 대학원 백세진, 오건제, 이승배군에게 감사합니다.

## 참 고 문 헌

- [1] V.C. Patel and Y.T. Lee, "Thick axisymmetric turbulent boundary layer and near wake of a low-drag body of revolution", IIHR Report 210, The Univ. of Iowa, Dec. 1977.
- [2] M.L. Kooslin, B.E. Launder, and B.I. Sharma, "Prediction of momentum and mass transfer in swirling turbulent boundary layers", *J. of Heat Transfer*, Vo. 96, 1974.
- [3] B.E. Launder, C.H. Priddin, and B.I. Sharma, "The calculation of turbulent boundary layers on spinning and curved surfaces", *J. of Fluids Eng.*, ASME, 231-239 March. 1977.
- [4] 박승호, 이택식, "자유유동중에 놓인 회전하는 원추체의 난류 경계층 유동에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, 제 7 권, 3호, 1983.
- [5] M.E. Crawford, and W.M. Kays, "STAN5-A program for numerical computation of two-dimensional internal/external boundary layer flows", Report HMT-23, Dept. of Mech. Eng., Stanford University, 1975.
- [6] Nakamura I., S. Yamashita, and Y. Furuya, "Experiments on Turbulence Properties in the Thick Turbulent Boundary Layer on a Rotating Conical Body of Radius Decreasing Toward Downstream", 2nd Int. Symp. on Turbulent shear Flows, 1979.
- [7] J.F. Nash and V.C. Patel, *Three-dimensional turbulent boundary layer*, SBC Technical Books,

- 1972.
- [8] P. Bradshaw, "The analogy between streamline curvature and buoyancy in turbulent shear flow", *J.F.M.* 36(1), 1969.
- [9] V.C. Patel, A. Nakayama, and R. Damian, "Measurements in the thick axisymmetric turbulent boundary layer near the tail of a body of revolution", *J.F.M.*, 63(2), 345-362.
- [10] 강신형, 홍석원, "회전체 주위의 포텐셜유동 계산", 한국선박연구소 소보 2권 2호, 1979.
- [11] 황정호, "회전하는 회전체 주위의 난류경계층 해석", 서울대학교 대학원 석사학위 논문, 1985.
- [12] Bissonnette and Mellor, "Experiments on the behavior of an axisymmetric turbulent boundary layer with a sudden circumferential strain", *J. F.M.*, 63(2), 1974.