

〈논 문〉

평판 가까이 놓인 타원형 실린더 주위 유동에 관한 연구

김성민* · 이상준**

(1996년 2월 3일 접수)

Flow around an Elliptic Cylinder Placed Near a Plane Boundary

Sung-Min Kim and Sang-Joon Lee

Key Words : Elliptic Cylinder(타원형 실린더), Cylinder Wake(원주후류), Plane Boundary Layer(평판경계층), Gap Ratio(틈새비), Axis Ratio(중횡비)

Abstract

Flow characteristics and aerodynamic forces acting on an elliptic cylinder placed in a plane boundary layer were investigated experimentally. Four cylinder models with axis ratio (major axis to minor axis, $AR=A/B$) of 1, 2, 3, and 4 having the same equivalent diameter were used in this experiment. The Reynolds number based on the equivalent diameter $D_e (=20\text{mm})$ was 13,000. In the case of circular cylinder, regular vortex shedding occurs for the cylinder gaps larger than $G/B=0.3$ and is not almost related to the boundary layer thickness. But, for the elliptic cylinders, the vortex shedding frequency is increased with increasing the gap ratio (G/B) and the axis ratio (AR) of elliptic cylinders. The maximum drag coefficient acting on a circular cylinder is mainly affected by the boundary layer thickness. But, the elliptic cylinders ($AR \geq 2$), except for the smaller gap $G/B < 0.2$, show a nearly constant drag coefficient which is much smaller than that of a circular cylinder. The base pressure on the flat plate decreases with increasing the axis ratio (AR) of the elliptic cylinder. In the case of a circular cylinder, the base pressure has the minimum value at the gap ratio $G/B=0.4$, but it occurs at $G/D=2$ for elliptic cylinders. The mean velocity of the cylinder wake is quickly recovered at a small cylinder height ratio (H/δ), but the turbulent intensity is rapidly recovered at a large cylinder height ratio (H/δ). The effective wake region in the plane boundary layer is shrinkaged with increasing the axis ratio (AR) of elliptic cylinder. And the drag coefficient and streamwise turbulent intensity of the elliptic cylinder with $AR=4$ are less than half of those for the circular cylinder ($AR=1$).

1. 서 론

유체역학 분야에서 물체 주위의 유동은 오래 전 부터 많은 연구가 수행되어 왔는데, 이는 넓은 용

용분야와 유동특성 자체에 많은 흥미를 가지고 있 기 때문이다. 현재에도 건축 구조물 주위유동, 운 송체 주위의 유동, 대기오염물질의 확산 혹은 유동 에 의한 열전달 촉진등에 대한 많은 연구가 진행 중이다.

이들 중에서 평판에 근접한 위치에 수평으로 놓 여진 원주의 경우도 중요한 연구 대상 중의 하나이

*삼성자동차

**회원, 포항공과대학교 기계공학과

다. 이러한 원주와 평판의 상호작용에 관한 연구는 주로 지면에 놓인 구조물이나 해저에 깔려 있는 파이프라인 주위 유동 및 열교환기에서의 열전달 촉진등과 관련한 기초적인 연구로써 수행되어 왔다.^(1,2,3)

Clouser⁽⁴⁾는 1956년에 원주직경보다 큰 평판경계층 속에 놓여진 원주가 경계층에 미치는 영향을 연구하였다. 그 후로 Marumo 등⁽⁴⁾은 난류경계층에 잠긴 원주후류의 유동특성에 대한 연구에서 높이비 (H/δ), 즉 평판경계층의 두께 (δ)에 대한 원주중심의 높이 (H)의 비를 변화시켜 가면서 후류의 평균속도 및 변동속도성분을 측정하였다. 그들은 원주에 의해 교란되어진 경계층은 평판에 가까운 영역이 바깥 영역보다 더 빨리 회복되어지며 변동속도성분이 평균속도보다 회복이 빠름을 밝혔다.

Taneda⁽⁵⁾는 견인수조(towing tank)에서 벽에 근접시킨 원주를 견인시켜 가면서 원주의 와유출을 유동가시화를 통해 연구하였는데, 원주직경 (D)에 대한 원주와 평판 사이의 거리비를 나타내는 틱새비 (G/B)가 0.6일 때 강한 와유출을 확인하였으며, 틱새비가 0.1일 때는 그런 현상을 관찰할 수 없었다. 이러한 현상은 Bearman⁽⁶⁾에 의해서도 연구되었는데 그는 경계층두께가 원주직경의 0.8배인 경우 틱새비가 $G/B=0.3$ 일 때 원주후류에 주기적인 와유출이 나타나며 틱새비가 0.3 이상일 경우에는 일정한 와유출과파수를 유지한다는 사실을 밝혔다. Roshko⁽⁷⁾와 Göktun⁽⁸⁾은 평판에 근접한 원주의 공력특성을 연구하였다. Roshko⁽⁷⁾의 연구에서는 경계층두께가 원주직경의 0.5배인 경우 항력계수 (C_D)가 틱새비 $G/B=0.6$ 에서 최대값을 가지며 틱새비가 0으로 접근함에 따라 항력계수가 급격히 감소하고 틱새비가 0.6 이상으로 증가하게 되면 항력계수는 완만히 감소하였다. 또한 양력계수 (C_L)는 틱새비가 증가할수록 급격히 감소하였다. Göktun⁽⁸⁾은 아주 얇은 경계층 내에서 유사한 실험을 수행하였는데 항력계수의 최대치가 틱새비가 $G/B=0.5$ 인 지점에서 발생하였다.

평판에 근접한 원주의 형상변화와 두 원주가 나란히 놓여진 경우에 대한 연구가 Bearman 등^(6,9)에 의해 수행되었다. 포텐셜 유동이론의 거울상(mirror image)에 의해 위의 두 가지 경우는 같은 조건일 수 있지만 실제 유동에서는 경계층이 평판을 따라 발달하며 두 원주도 항상 서로가 거울상은 아니므로 원주가 평판에 부착된 경우를 제외하고는

원주후류의 와유출 현상에서 유사성을 발견할 수 없었다. 이밖에 틱새비가 아주 작은 경우 원주의 정체점이 평판쪽으로 이동하는 현상이 연구되었으며,^(6,8,10) 평판경계층내에 놓여진 원주가 평판의 열전달 촉진에 미치는 효과에 관한 연구도 수행되었다.^(11,12)

이와 같은 평판에 근접한 원주에 대한 연구들은 여러가지 매개변수들에 대해 수행되었는데 그 중에서 틱새비 (G/B)가 가장 지배적인 역할을 하고 있다. 그리고 공학적인 응용 측면에서 원주보다 유체 저항이 적은 다양한 형태의 물체에 대한 연구가 요구되고 있다. 원형 실린더에 비해 유체저항이 적고, 이론적 접근이 용이하며 공학적 응용가능성이 큰 것 중 하나가 타원형 실린더이다. 타원형 실린더에 대한 기존의 연구들은 대부분 자유흐름 속에 놓여진 타원형 실린더의 공력특성과 후류의 유동구조를 레이놀즈 수와 받음각을 변화시켜 가면서 연구하였다.^(13,14,15)

본 연구에서 다루고자 하는 평판에 근접한 타원형 실린더 주위유동에 대해 발표된 기존의 연구는 아직까지 없다. 또한 대부분의 연구에서 물체는 두꺼운 경계층 속에 놓여 있지만 경계층 두께가 원주의 직경의 한 배 이상인 얇은 경계층에 대한 공력 해석 연구는 아직도 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 여러가지 종횡비를 가진 타원형 실린더를 평판 가까이 설치하여 타원형 실린더의 종횡비와 틱새비가 실린더 후류와 평판경계층의 상호작용에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험은 시험부의 크기가 폭 720mm, 높이 600mm, 길이 2,500mm이고 난류강도가 0.2% 이하인 폐쇄형 아음속풍동에서 수행되었다. 종횡비가 $AR=1, 2, 3, 4$ 인 네 개의 실린더 모델은 알루미늄을 재료로 CNC 선반으로 제작하였는데, 등가직경이 $D_e=20\text{mm}$ 으로 단면적이 모두 같도록 하였다. 여기서 종횡비가 $AR=1$ 인 경우는 원형실린더로 직경이 $D=20\text{mm}$ 이고 길이가 $L=298\text{mm}$ 이므로 형상비(aspect ratio)는 14.9이다.

Fig.1은 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도와 좌표계를 보여주고 있다. 평판 위에 난류경계층을 생성시키기 위해 직경이 3mm인 와이어와 같이 230mm의 거친 사포(sand paper)를 평판 선단부위

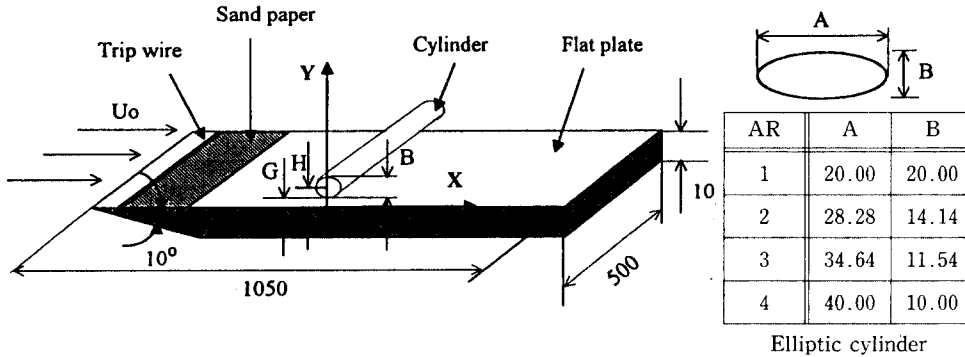


Fig. 1 Experimental model and coordinate system(unit : mm)

에 부착시켜 실린더 모델이 놓이게 되는 지점(평판의 선단으로부터 500mm)에 두께 $\delta=30\text{mm}$ 인 경계층을 생성시킬 수 있었다. 자유흐름속도는 $U_0=10\text{m/s}$ 로 고정하였는데 타원형 실린더의 등가직경(D_e)에 기준한 Re 수는 약 13,000이며, 시험부 전체 단면적에 대한 모형과 지지장치에 의한 막힘비는 4% 미만으로 그에 따른 영향을 무시할 수 있었다. (16, 7)

틈새비(G/B)에 따른 원주후류의 유동변화를 정성적으로 관찰하기 위하여 입자주입법(tracer method)을 사용하여 유동을 가시화하였다. 이 실험은 시험부의 크기가 폭 300mm, 높이 200mm, 길이 700mm인 회류수조에서 수행하였는데 이때의 자유흐름 속도는 0.2m/s이었다. 사용된 입자는 직경이 $300\mu\text{m}$ 인 폴리스티렌(polystyrene)으로 상온에서 입자의 밀도는 약 1.02이다. 원주가 위치한 곳에 30mm 두께의 경계층을 만들기 위해 직경 3mm의 와이어를 평판의 선단부에 부착시켰다. 사진 촬영을 위해 150W용 할로겐 램프(Halogen lamp)를 회류수조 상단부와 하단부에 각각 설치하였으며, 사진기의 노출시간을 조절하여 입자의 유적선(pathline)를 촬영하였다.

원주후류의 속도측정에는 정온형 열선유속계 TSI(IFA100)를 사용하였으며 I형과 X형 열선 프로우브에서 나온 속도신호를 A/D 변환기인 TSI IFA200을 거쳐 디지털 값으로 컴퓨터에 입력한 후 통계처리하였다. 속도신호는 한 지점에서 초당 2,000개의 비율로 샘플링하여 16,000개의 데이터를 얻었으며, 노이즈를 제거하기 위하여 800Hz로 저역(low-pass) 필터링시켰다. X형 열선 프로우브는 후류유동장의 u , v 속도성분 측정에 사용하였는데 프로우브를 5° 간격으로 $\pm 30^\circ$ 까지 변화시켜가며

yaw각을 보정한 결과 $\Psi_1=44.62^\circ$, $\Psi_2=43.61^\circ$ 이었다.

원주와 평판 사이의 틈새비에 따른 평판의 압력 분포를 측정하기 위하여 평판에 0.8mm 직경의 압력공을 뚫었다. 압력공의 간격은 원주가 위치하는 지점부근에서는 5mm 간격으로 하고 차츰 간격을 넓게 하였다. 압력공에 작용하는 압력신호는 48채널 다점압력측정기(Scannivalve)와 마이크로 마노미터(FCO-12)로 연결되어 IBM-PC에 내장된 DT-2838 A/D 변환기를 통해 통계처리하였다. 데이터는 각 채널마다 초당 2,000개의 비율로 샘플링하여 20,000개를 얻어 평균하였으며, 채널을 옮길 때마다 약 10초 정도의 압력회복시간을 주었다. 압력공으로부터 측정된 압력을 시간평균하여 압력계수(C_p)를 다음과 같이 구하였다.

$$C_p = \frac{P_s - P_\infty}{\rho U_0^2 / 2}$$

여기서 P_s 는 평판표면에 작용하는 압력, P_∞ 는 자유흐름의 정압을 나타낸다.

평판에 근접한 원주에 작용하는 항력 및 양력을 측정하기 위하여 3분력계(Nishio LMC 3502)를 사용하였다. 3분력계에서 나오는 전압신호를 스트레인게이지 증폭기로 증폭한 후 A/D 변환기(DT-2838)로 데이터를 통계처리 하였으며 데이터는 초당 2,000개의 비율로 샘플링하여 한 위치에서 총 20,000개를 얻어 평균하였다. 3분력계에 의해 측정된 원주의 항력(D_f)와 양력(L_f)을 다음과 같이 항력계수(C_D)와 양력계수(C_L)로 나타내었다.

$$C_D = \frac{D_f}{\rho U_0^2 A_D / 2} \quad C_L = \frac{L_f}{\rho U_0^2 A_L / 2}$$

여기서 D_f 는 항력(N/m^2), L_f 는 양력(N/m^2)을

나타내며 A_D 는 실린더의 정면적($A \cdot L$)을 A_L 은 실린더의 평면적($B \cdot L$)을 나타낸다.

3. 결과 및 토의

3.1 유동가시화

Fig. 2(a)는 종횡비가 $AR=1$ 인 원형 실린더의 경우 틸새비가(G/B) 변화에 따른 유동가시화 결과를 보여주고 있다. 틸새비가 $G/B=0$ 인 경우, 즉, 평판에 실린더가 부착되었을 때 실린더의 앞부분과 뒷부분에 재순환영역이 존재하였다. 실린더 앞부분에 발생하는 재순환영역은 뒷부분에 비해 아주 작으며, 원주 뒷부분의 재순환영역은 원주 후방으로 길게 펼쳐져 있고 그 내부에서는 역방향 속도성분이 존재하는 복잡한 형태를 가지고 있다. 틸새비가 $G/B=0.2$ 인 경우 실린더와 평판 사이에 유동은 존재하지만 실린더 후류에서 와류출은 발생하지 않으며 실린더 뒷부분에는 아직도 재순환영역이 존재하고 있다. 그러나 재순환영역의 크기는 $G/B=0$ 인

경우보다 작으며 실린더와 평판 사이를 지나는 유동으로 인해 역방향 속도성분이 약화됨을 알 수 있다. 틸새비가 $G/B=0.3$ 인 경우는 실린더 후방에서 재순환영역을 발견할 수 없고 와류출과 함께 와형성영역의 존재를 관찰할 수 있다. 이것은 원주와 평판 사이의 틈을 지난 빠른 유동이 원주 위쪽의 유동과 상호작용하여 원주 위 아래에서 교대로 와가 유출되기 때문이다. 틸새비가 0.5 이상인 경우에는 균일유동 속에 놓인 원주후류유동에서 볼 수 있는 뚜렷한 와류출을 확인할 수 있다.

Fig. 2(b)는 종횡비가 $AR=2$ 인 타원형 실린더 주위 운동을 가시화한 결과로 전반적으로 원형 실린더와 유사한 유동형태를 보여주고 있으나, 틸새비가 $G/B=0$ 인 경우 실린더의 앞과 뒷부분에 발생하는 재순환영역은 원형 실린더($AR=1$)에 비해 작다. 틸새비 0.5 이상($G/B>0.5$)인 조건에서 와류출이 뚜렷하게 발생하고 있으며 후류폭이 원형실린더의 경우에 비해 좁게 나타난다. 종횡비가 $AR=3$ 과 4인 경우의 유동가시화 결과⁽¹⁸⁾에서도 전체

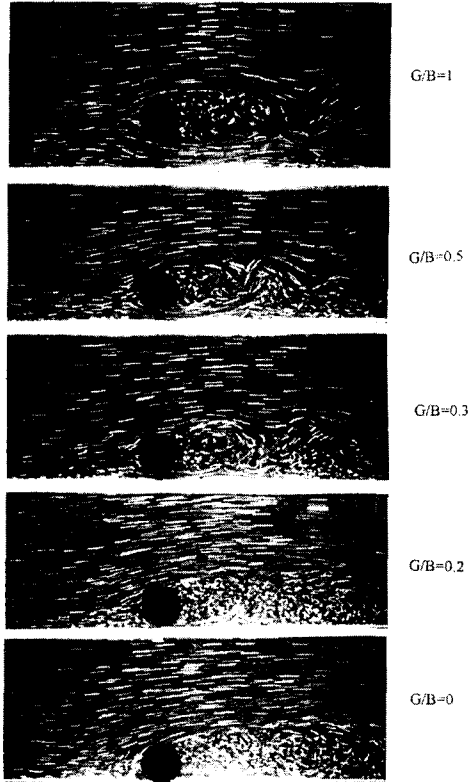


Fig. 2(a) Flow visualization around a circular cylinder

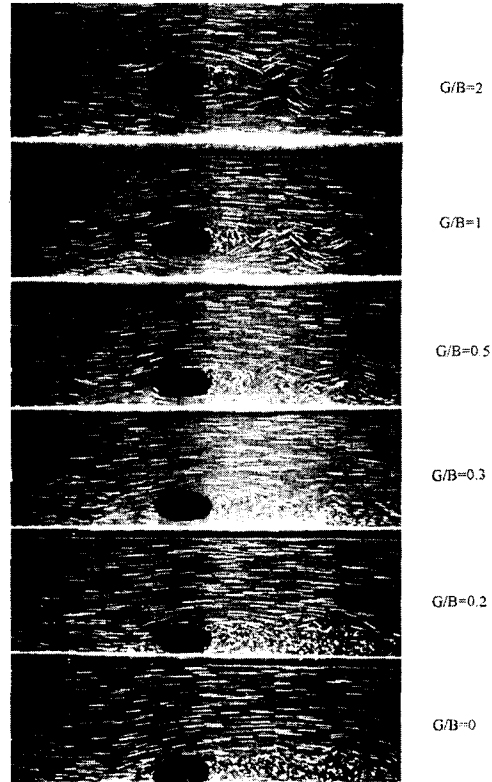


Fig. 2(b) Flow visualization around an elliptical cylinder of $AR=2$

적인 유동형태는 유사하며 틈새비가 $G/B=0$ 인 경우에 발생하는 재순환영역의 길이는 종횡비(AR)가 증가할수록 크게 감소하고 있다. 종횡비가 증가할수록 와류출이 뚜렷하게 발생하는 틈새비(G/B)가 증가하고 있으며 와형성영역의 길이도 짧아진다. 이것은 같은 단면적을 갖고 있지만 종횡비가 증가할수록 단축직경(B)이 감소하고, 유선형에 가까운 형태를 갖게 되어 후류폭과 와형성 영역의 길이가 짧아지기 때문이다. 이와 같은 유동가시화 결과는 뒤에서 언급할 유동특성과 평판에 작용하는 압력분포결과와도 잘 일치하고 있다.

3.2 와류출주파수

평판에 근접한 실린더의 틈새비(G/B) 변화에 따른 와류출주파수의 변화를 알아보기 위하여 I형 열선 프로브로 측정된 속도신호를 스펙트럼 분석하였다. 여기서 구한 와류출주파수(f_s)는 자유흐름속도 U_0 와 타원형 실린더의 단축길이(B)를 이용하여 Strouhal수 $St(=f_s \cdot B/U_0)$ 로 나타내었다.

Fig 3은 실린더의 후방 $X=40\text{mm}$, $Y=30\text{mm}$

인 위치에서 구한 파워스펙트럼밀도(PSD)를 나타낸 것이다. 종횡비 $AR=1$ 인 원형 실린더의 경우 틈새비 $G/B=0.2$ 이하에서 와류출주파수는 나타나지 않으며, 틈새비가 $G/B=0.25$ 인 경우 와류출주파수($St=0.181$)에서 정점(peak)이 발생하기 시작한다. 틈새비 $G/B=0.3$ 이상에서는 거의 일정한 크기의 정점이 발생하였다. 이러한 현상은 유동가시화 결과와 잘 일치하며 Bearman⁽⁶⁾의 실험결과와 유사하다. 그는 경계층 두께가 원주직경의 0.8배인 경우 틈새비 $G/B=0.3$ 이상에서 일정한 크기의 정점이 같은 주파수에서 발생하며 이러한 현상은 Re 수 25,000와 48,000에서도 나타난다고 하였다. 본 실험의 경우는 경계층 두께가 원주직경의 1.5배이므로 평판에 근접한 원주의 와류출주파수는 경계층 두께에 크게 영향받지 않음을 알 수 있다.

종횡비가 $AR=2$ 인 타원형 실린더의 경우(Fig. 3(b)), 틈새비 $G/B=0.3$ 에서 작은 정점을 발견할 수 있으며 틈새비가 증가할수록 와류출주파수에서 더욱 뚜렷한 정점이 나타난다. 그리고 원형 실린더인 경우와는 달리 틈새비가 증가함에 따라 St 수도

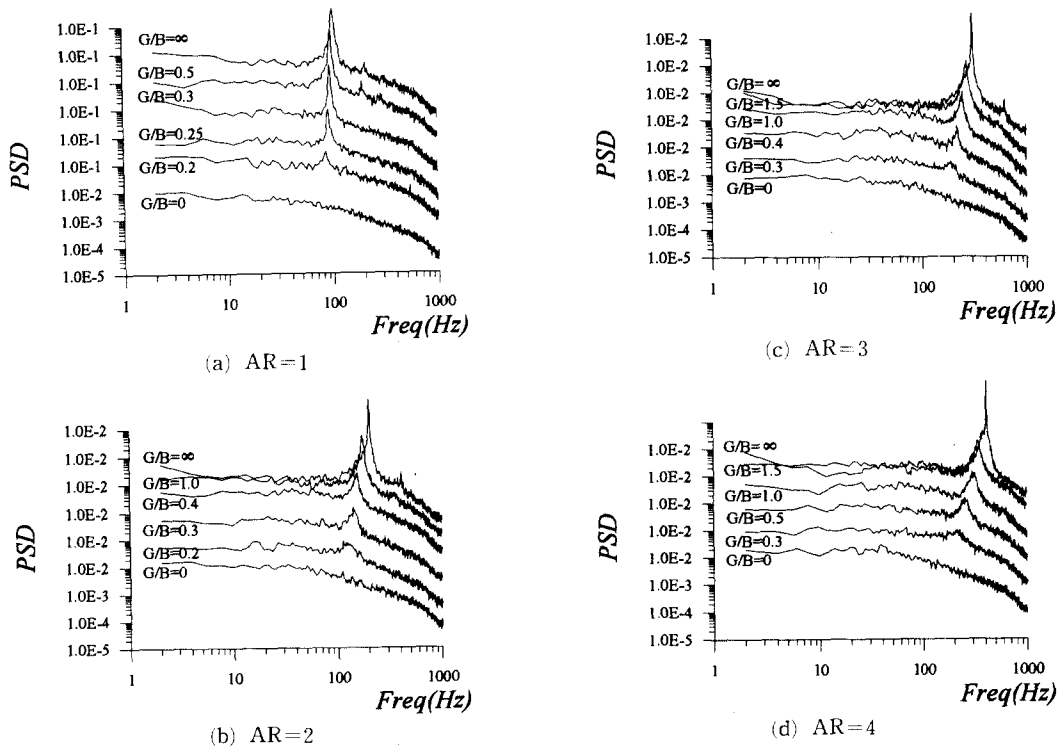


Fig. 3 Power spectral density distribution of streamline velocity at $X=40\text{mm}$, $Y=30\text{mm}$

함께 증가함을 알 수 있다. 종횡비가 AR=3와 4인 경우, 측정된 PSD결과는 종횡비가 AR=2인 경우와 유사하며, 유동가시화에서 볼 수 있듯이 종횡비 AR이 증가할수록 정점이 나타나기 시작하는 틈새비도 증가하며 St수의 증가 폭도 커짐을 알 수 있다. 네 가지 서로 다른 타원형 실린더에 대한 St 수 변화를 종횡비(AR)와 틈새비(G/B)의 함수로 Table 1에 나타내었다.

Fig. 4는 틈새비가 G/B=1.0일 때 타원형 실린더의 종횡비에 따른 와류출주파수 변화를 보여주고 있다. 여기서 보면 타원형 실린더의 종횡비(AR)가 증가할수록 후류폭이 좁아지고 와가 유출되는 주기가 빨라져 와류출주파수는 증가하며 PSD의 절대값은 감소하고 있다. 또한 전 주파수 영역에서 원형 실린더 후류가 타원형 실린더에 비해 높은 운동에너지를 가짐을 알 수 있다.

Table 1 Strouhal number as a function of AR and G/B

AR=1		AR=2		AR=3		AR=4	
G/B	St. no.	G/B	St. no.	G/B	St. no.	G/B	St. no.
∞	0.205	∞	0.289	∞	0.354	∞	0.411
1	0.197	1.5	0.264	1.5	0.312	2	0.375
0.5	0.197	1	0.228	1	0.278	1.5	0.342
0.4	0.195	0.5	0.217	0.6	0.256	1	0.312
0.3	0.189	0.4	0.206	0.5	0.251	0.8	0.283
0.25	0.181	0.3	0.205	0.4	0.235	0.5	0.256

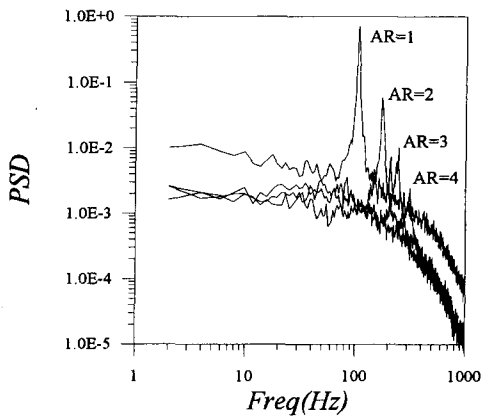


Fig. 4 Comparison of power spectral density at gap G/B=1.0

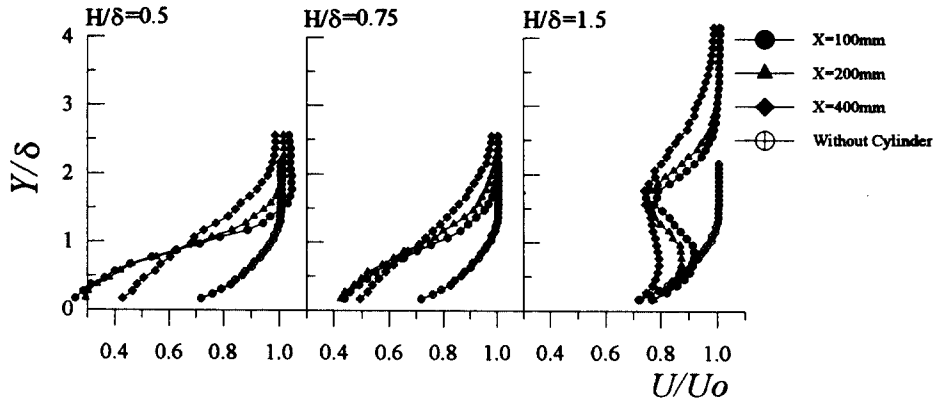
3.3 유동특성

난류경계층을 생성시키는 평판과 그에 근접한 실린더 후류의 유동특성을 해석하기 위해 X형 열선 프로우브를 이용하여 평균속도, 난류강도 및 레이놀즈 전단응력을 측정하였다. 특히 실린더가 평판 경계층에 미치는 영향을 조사하기 위하여 경계층 두께(δ)에 대한 실린더 중심높이(H)의 높이비(H/δ)를 조절하여 실린더의 종횡비(AR)에 상관 없이 실린더의 상대적 위치를 일정하게 유지하였다. 본 실험에서는 실린더의 높이비(H/δ)를 0.5, 0.75 및 1.5로 선택하였으며 후류의 $X=100\text{mm}$, 200mm 및 400mm 위치에서 열선 프로우브를 수직방향으로 일정간격씩 이동시키면서 후류속도를 측정하였다.

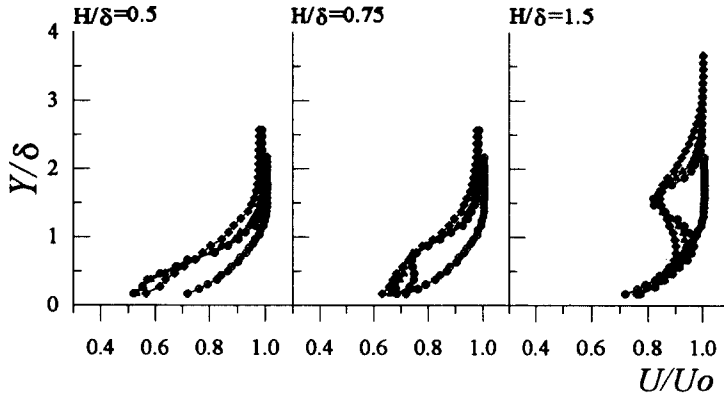
Fig. 5는 종횡비 변화에 따른 주유동방향의 평균속도분포(U)를 나타낸 것으로 자유흐름속도(U_0)로 무차원화시켰다. 종횡비가 AR=1인 원형 실린더의 경우 높이비가 $H/\delta=0.5$ 일 때 실린더에 의해 경계층은 상당히 교란되어 주유동방향의 평균속도성분이 크게 감소함을 알 수 있다. 또한 하류로 나아갈수록 평균속도성분이 점차 회복되어지며 경계층의 두께도 약간씩 증가하고 있다. 원주의 높이비가 $H/\delta=0.75$ 인 경우에는 $H/\delta=0.5$ 인 경우에 비해 속도결손이 적으며 속도회복은 다소 느리게 진행됨을 관찰할 수 있다. 이러한 현상은 평판 상부의 난류경계층이 실린더가 평판에 근접할수록 근접후류에 크게 영향을 주어 후류 와구조가 하류로 가면서 약해지기 때문이다. 높이비가 $H/\delta=1.5$ 일 때는 실린더가 경계층 바깥에 위치하는 관계로 경계층이 실린더의 근접후류($X=100\text{mm}$)에 거의 영향을 주지 못하나 하류로 나아갈수록 점차 경계층이 실린더 후류에 영향을 미치고 있다.

종횡비가 AR=2인 경우에는 원형 실린더(AR=1)의 경우에 비해 실린더에 의한 교란은 약해지며 하류로 나아감에 따라 속도 회복도 점차 느려짐을 관찰할 수 있다. 비슷한 현상은 종횡비가 큰 AR=3과 AR=4인 경우에도 확인할 수 있는데 종횡비가 가장 큰 AR=4의 $H/\delta=1.5$ 인 경우 후류위치에 상관 없이 거의 일치된 속도분포를 보여주고 있다. 이것으로부터 타원형 실린더의 종횡비가 증가할수록 후류 안쪽으로 유입되는 비점성 유체가 크게 감소함을 알 수 있다.

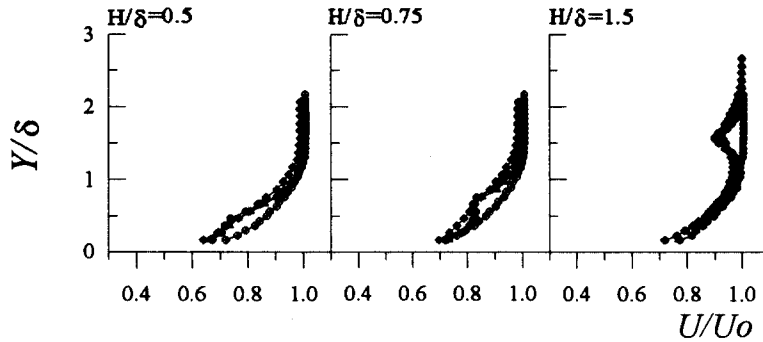
Fig. 6은 주유동방향 속도성분의 난류강도 분포를 나타낸 것인데 경계층에 대한 실린더의 높이비



(a) AR=1



(b) AR=2



(c) AR=4

Fig. 5 Mean streamwise velocity distribution

(H/δ)가 증가할수록 보다 넓은 영역에서 큰 난류 강도값을 가지며 하류로 나아감에 따라 난류강도가 크게 감소하고 있다. 또한, 종횡비에 상관 없이 높 이비가 $H/\delta=1.5$ 이고 실린더 후방으로 $X=100$ mm인 위치 단면에서 균일유동 속에 놓인 원주후

류에서 볼 수 있는 쌍봉(double peak) 형상의 난 류강도 분포를 보여주고 있다. 실린더의 종횡비가 증가할수록 유선형에 가까운 형상을 갖게 되어 주 유동방향 속도성분의 난류강도는 줄어들며 후류전 단층의 폭도 감소한다. 예를들어 AR=4인 타원형

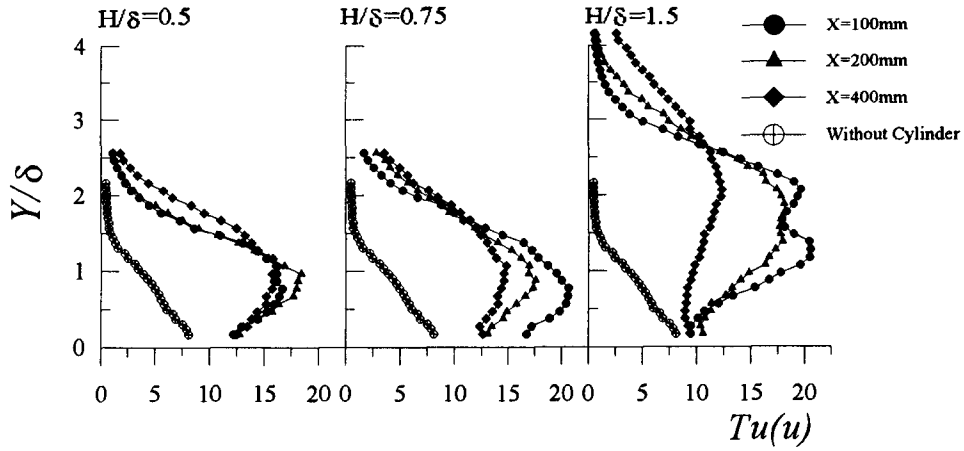
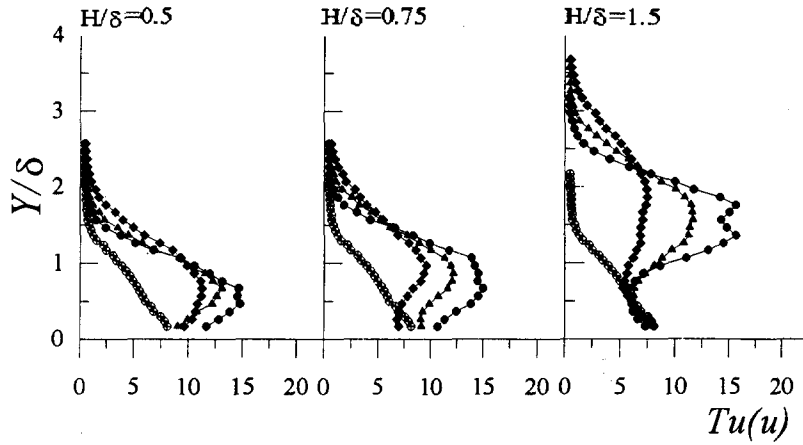
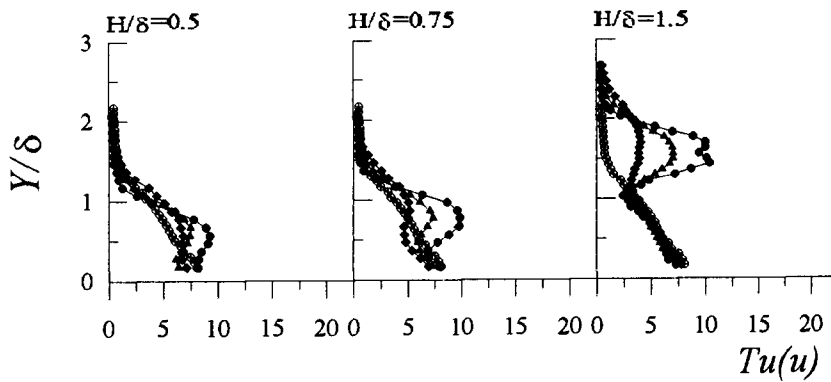
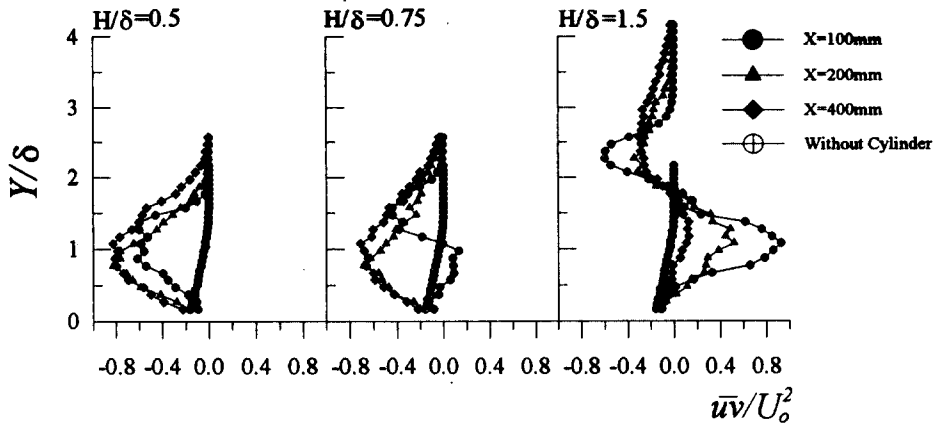
(a) $AR=1$ (b) $AR=2$ (c) $AR=4$

Fig. 6 Turbulent intensity profile of streamwise velocity component

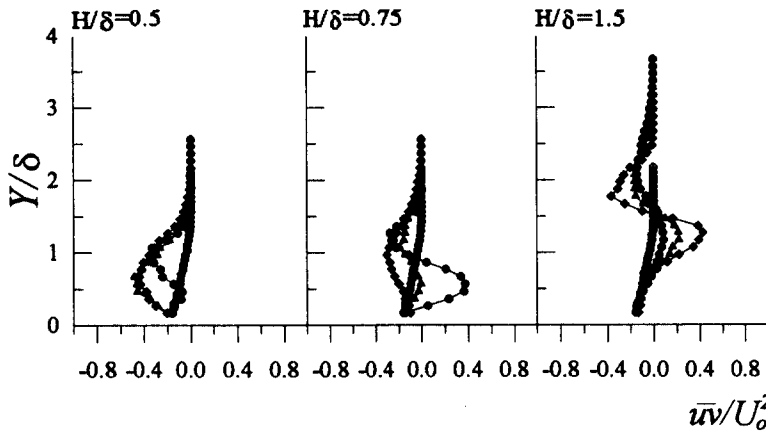
실린더의 경우 원형 실린더($AR=1$)에 비해 약 절반 정도 크기의 난류강도값을 보여주고 있다.

Fig. 7은 높이비(H/δ) 변화에 따른 레이놀즈 전단응력의 분포를 나타낸 것이다. 종횡비가 $AR=1$

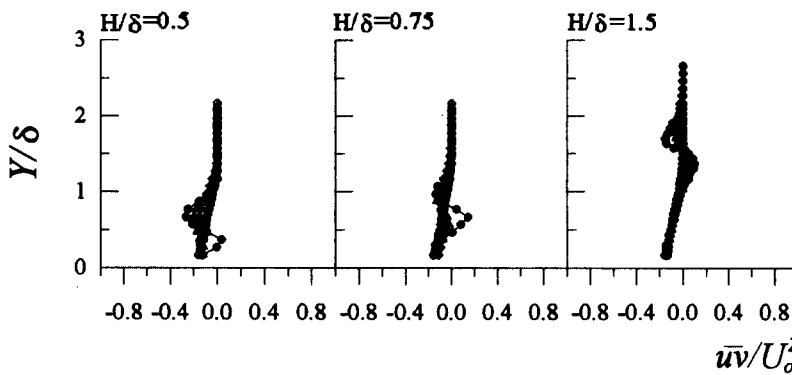
인 원형 실린더의 경우 높이비가 $H/\delta=0.5$ 와 0.75 일 때 실린더 후류영역에서 음의 값을 갖는다. 반면에 높이비 $H/\delta=1.5$ 의 경우 주유동방향 속도 성분이 최대값을 갖는 높이($y/\delta \approx 1.7$)를 기준으로



(a) $AR=1$



(b) $AR=2$



(c) $AR=4$

Fig. 7 Reynolds shear stress profiles

하부영역에서는 양의 전단응력값을 갖고 상부영역에서는 음의 전단응력값을 갖는다. 이것은 실린더의 높이비(H/δ)가 낮을 경우, 낮은 속도의 실린더 하부유동에 비해 실린더의 윗부분에서 후류 안쪽으로 유입되는 유동이 지배적이기 때문이다. 높이비가 $H/\delta=1.5$ 인 경우에는 자유흐름 속에 놓여 있는 실린더 후류의 전단응력분포와 유사한 분포를 보여주고 있다. 타원형 실린더의 경우 종횡비(AR)가 증가할수록 전단응력의 절대치가 감소하며 실린더 후류가 평판경계층에 영향을 미치는 영역이 크게 감소하고 있다. 이것은 종횡비가 증가할수록 후류폭이 좁아지며 와류출이 약화되어 운동량 전달이 감소하기 때문으로 생각되어진다.

4.4 평판의 압력분포

Fig. 8은 평판바닥면에서 측정된 압력신호를 시간 평균하여 구한 압력분포를 나타낸 것이다. Fig. 8(a)에 원형 실린더($AR=1$)에 대한 Bearman⁽⁶⁾의 연구결과를 함께 비교하였는데, 그의 연구에서 경계층두께는 원주직경의 0.8배이며 Re수는 48000이었다. 두 결과는 높은 틈새비(G/B)에서 서로 유사한 경향을 보여주고 있으나, 낮은 틈새비에서 최소압력계수(C_p, min)의 절대치가 Bearman의 경우가 다소 높게 나타났다. 이것은 각각의 실험에서 사용되어진 경계층두께와 Re수의 차이에 원인이 있다고 생각되어진다. 실린더가 평판에 부착되어 있는 경우($G/B=0$), 실린더 부착지점($X=0$)은 압력의 불연속점이 되며 그 앞부분에서 양의 압력계수값을, 뒷부분에서는 음의 압력계수값을 가진다. 실린더 하류에서 발생하는 음의 압력분포는 대략 $X=$

80mm까지 일정한 값을 유지하다가 그 후로 조금씩 회복되는 경향을 보여주고 있다. 틈새비가 $G/B=0.1$ 인 경우에는 실린더 하류에서의 음의 압력분포가 보다 빨리 회복되며, 틈새비 $G/B=0.4$ 인 경우부터는 실린더 직후에서 가장 큰 압력계수값을 보여주고 있다. 이것은 실린더와 평판 사이의 틈을 지나가는 빠른 유동 때문에 기인한 것으로 판단되어진다. 틈새비가 $G/B=0.4$ 보다 크게 되면 실린더 직후에 나타나는 압력계수의 정점(peak) 위치는 점차 하류로 이동하며, 압력계수의 절대값도 감소되어진다. 이상의 결과들을 종합해 볼 때 유동가시화에서 관찰되었던 정체점 이동현상은 실린더와 평판 사이에서 야기되는 이와 같은 압력구배에 의한 것으로 판단되어진다.

종횡비가 $A/R=2$ 인 타원형 실린더의 경우(Fig. 8(b)) 틈새비가 $G/B=0$ 일 때 원형 실린더에 비해 음의 압력계수가 상당히 빨리 회복되며 틈새비가 $G/B=0.1$ 인 높이에서 압력계수의 정점(peak)을 확인할 수 있다. 그리고 틈새비 G/B 가 1보다 작은 경우 타원형 실린더는 원주($AR=1$)보다 낮은 압력계수값을 갖는 반면 틈새비가 $G/B=1$ 이상인 경우에는 원주($AR=1$)와 유사한 압력계수 분포를 보여주고 있다. 종횡비가 $AR=4$ 인 타원형 실린더의 경우 평판에 작용하는 압력분포는 $AR=2$ 인 경우와 유사하며, 종횡비(AR)가 커질수록 낮은 압력계수값을 가진다. 이것은 높이비(H/δ)에 따른 평균속도분포를 나타낸 Fig. 5의 결과와 잘 일치하는 내용이다.

Fig. 9은 틈새비(G/B) 변화에 따라 평판에 작용하는 최소압력계수(C_p, min)의 변화를 나타낸 것이

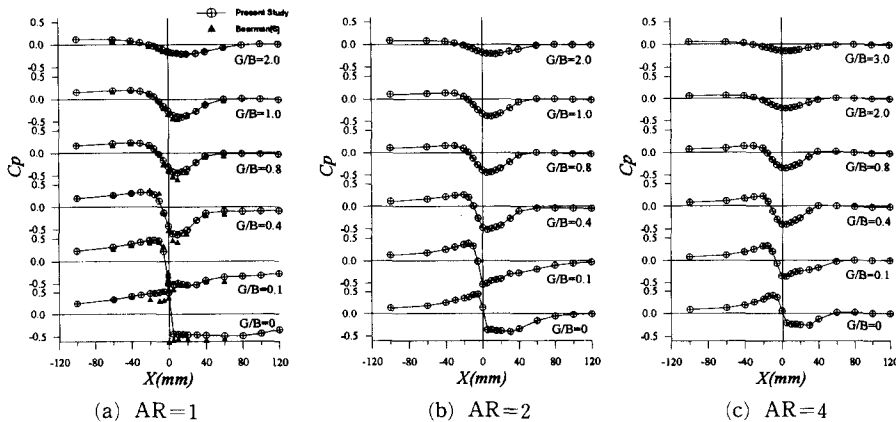


Fig. 8 Base pressure distribution on the flat plate

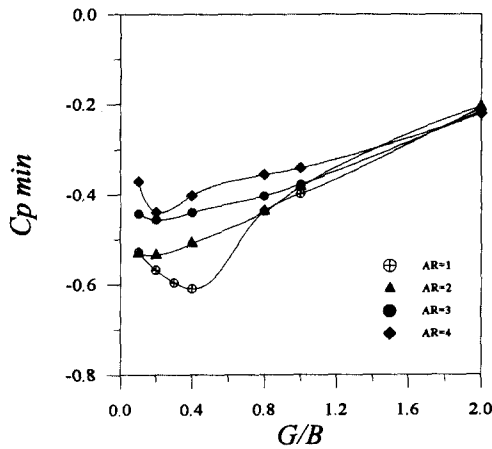


Fig. 9 Variation of minimum base pressure on the plate

다. 원형 실린더(AR=1)의 경우 틈새비가 $G/B=0.4$ 일 때 최소값을 가지나 타원형 실린더의 경우 최소압력이 틈새비 $G/B=0.2$ 부근에서 발생함을 알 수 있다. 또한 틈새비가 $G/B=1.0$ 보다 큰 경우에는 틈새비가 커짐에 따라 압력계수는 계속적으로 증가하나 종횡비(AR)에 따른 최소압력계수의 차이는 크게 감소하고 있다. 따라서 타원형 실린더의 종횡비가 평판에 미치는 효과는 낮은 틈새비($G/B < 1.0$)에서 지배적임을 알 수 있다.

3.5 공력특성

평판에 근접한 실린더에 작용하는 양력계수와 항력계수를 3-분력계(3-component dynamometer)를 이용하여 측정하였다. Fig. 10은 종횡비(AR)와 틈새비(G/B) 변화에 따른 항력계수(C_D)의 변화를 보여주고 있다. 종횡비가 AR=1인 원형 실린더의 경우 틈새비(G/B)가 증가함에 따른 항력계수(C_D)가 크게 증가하다가 $G/B=0.75$ 부근에서 최대값을 가진 후 다시 완만하게 감소하고 있다. 이러한 현상은 얇은 경계층내에 놓인 원주의 표면압력분포로부터 구한 Gökten⁽⁸⁾ 항력계수와 유사하다. Gökten의 경우 본 연구결과보다 조금 높은 항력계수값을 가지며, 틈새비가 $G/B=0.5$ 인 위치에서 최대값을 가진다. 이와 같은 약간의 차이는 주유동방향 평균속도 분포(Fig. 5)에서 보는 바와 같이 각각의 실험에 사용되어진 경계층두께에 대한 원주의 높이비(H/δ)와 레이놀즈 수의 차이에 기인한 것으로 보인다. 또한 본 연구에서는 실린더에 걸리는

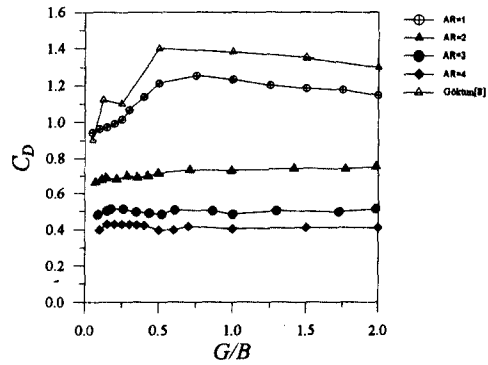


Fig. 10 Drag coefficient acting on the cylinder

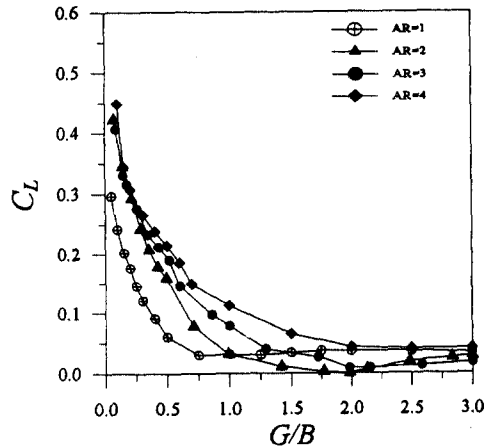


Fig. 11 Lift coefficient acting on the cylinder

힘을 직접 측정하였지만, Gökten⁽⁸⁾의 경우 표면압력에 의한 형상저항(form drag)만 측정된 것이다. 종횡비가 AR=2인 타원형 실린더의 경우 틈새비가 증가함에 따라 항력계수가 조금씩 증가하는 경향을 보이나 AR=3과 AR=4인 경우 아주 작은 틈새비($G/B < 0.2$)을 제외하고는 거의 일정한 값을 갖는다. 또한 실린더의 종횡비가 증가할수록 항력계수는 감소하였는데 종횡비가 AR=3과 4인 타원형 실린더의 항력계수는 원형 실린더에 비해 절반 이하의 값을 가진다. 이와 같은 결과는 유동가시화에서 볼 수 있는 좁은 후류폭과 주유동방향 평균속도에서 나타난 적은 속도결손으로부터도 알 수 있다.

Fig. 11은 틈새비 변화에 따른 양력계수(C_L)의 변화를 나타낸 것이다. 원형 실린더(AR=1)는 틈새비가 작은 경우($G/B < 1.0$) 타원형 실린더에 비

해 상대적으로 낮은 양력계수값을 가지며, 틈새비 증가에 따라 양력계수가 급격히 감소하고 있다. 타원형 실린더의 경우에도 비슷한 경향을 보이거나 같은 틈새비에서 종횡비가 증가함에 따라 큰 양력계수값을 가진다.

4. 결 론

본 연구에서는 네 가지 서로 다른 종횡비(AR)를 가진 타원형 실린더를 평판 가까이에 설치하여 틈새비(G/B) 변화에 따른 실린더 주위유동과 공력 특성 변화를 실험적으로 연구하였다. 유동가시화를 통하여 정성적인 유동특성을 파악하였고, 열선유속계를 이용하여 $Re=13,000$ 에서 실린더 주위유동의 와류출주파수, 평균속도, 난류강도 및 레이놀즈 전단응력을 측정하였으며, 평판 바닥의 압력분포와 공력계수 변화를 측정하였다. 본 연구에서 얻은 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 원형 실린더(AR=1)의 경우 틈새비 $G/B=0.3$ 이상에서 경계층두께에 거의 상관 없이 와류출주파수가 일정하였다. 타원형 실린더의 경우는 종횡비(AR)와 틈새비(G/B)가 증가할수록 와류출주파수가 증가하였다.

(2) 후류의 평균속도 성분은 실린더의 높이비(H/δ)가 작을 때 빠른 회복을 보였으나, 난류강도는 높이비가 클수록 빠른 회복을 보였다. 전체적으로 평균속도보다 난류강도의 회복이 빨리 일어났다.

(3) 종횡비(AR)가 증가할수록 실린더 후류가 평판경계층에 영향을 미치는 영역이 감소하며 AR=4인 타원형 실린더의 난류강도는 원형 실린더(AR=1)의 절반 이하의 값을 가진다.

(4) 평판 바닥에 작용하는 압력계수는 실린더의 종횡비(AR)가 커질수록 낮은 값을 가지며, 원형 실린더의 경우 틈새비 $G/B=0.4$ 에서 타원형 실린더는 $G/B=0.2$ 의 틈새비에서 최소압력계수값을 가진다.

(5) 틈새비(G/B)의 변화에 따라 원형 실린더에 작용하는 항력계수는 틈새비와 경계층두께의 영향을 크게 받는다. 반면에 타원형 실린더의 경우 아주 작은 틈새비를 제외하고는 거의 일정한 항력계수 값을 가지며 종횡비(AR)가 증가함에 따라 항력계수가 감소하여 원형 실린더에 비해 절반 이하의 값을 가진다.

후 기

본 연구는 POSCO 개발과제 및 첨단유체공학연구센터(AFERC)의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사를 드린다. 또한 논문작성에 도움을 준 소수현군에게도 감사를 포함한다.

참고문헌

- (1) Farell, C., Carrasquel, S., Guven, O. and Patel, V. C., 1977, "Effect of Wind-Tunnel Walls on the Flow Past Circular Cylinders and Cooling Tower Models," *J. Fluid Engineering*, Vol. 99, pp. 470~479.
- (2) Roshko, A., 1954, "On the Drag and Shedding Frequency of Two-Dimensional Bulff Bodies," *NACA Technical Note* 3169.
- (3) Uzuki, H., 1982, "On Lift-Coefficient of Circular Cylinders in Two-Dimensional Flows," *Trans. Japan Soc. Aeronaut. Space Sci.* Vol. 25, pp. 53~64.
- (4) Marumo, E., Suzuki, K. and Sato, T., 1978, "A Turbulent Boundary Layer Disturbed by a Cylinder," *J. Fluid Mech.*, Vol. 87, part 1, pp. 121~141.
- (5) Taneda, S., 1965, "Experimental Investigation of Vortex Streets," *J. Phys. Soc. Japan*, Vol. 20, pp. 1714~1721.
- (6) Bearman, P. W. and Zdravkovich, M. M., 1978, "Flow around a Circular Cylinder Near a Plane Boundary," *J. Fluid Mech.*, Vol. 89, part 1, pp. 33~47.
- (7) Roshko, A. Steinolfson, A. and Chattoorgoon, V., 1975, "Flow Forces on a Cylinder Near a Wall or Near Another Cylinder," *Proc. 2nd US Conf. Wind Eng. Res., Fort Collins*, paper IV-15.
- (8) Göktun, S., 1975, "The Drag and Lift Characteristics of a Cylinder Placed Near Plane Surface," *M. Sc thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California*.
- (9) Bearman, P. W. and Wadcock, A. J., 1973, "The Interaction between a Pair of Circular Cylinders Normal to a Stream," *J. Fluid Mech* Vol. 61, pp. 495~511.

- (10) Figueiredo, A. R. and Viegas, D. X., 1988, "External Forced Convection around a Circular Cylinder Near a Plane Boundary," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 31, No. 1, pp. 47~53.
- (11) Aiba, S., 1985, "Heat Transfer around a Circular Cylinder Near a Plane Surface," *J. of Heat Transfer*, Vol. 107, No. 4, pp. 916~921.
- (12) Suzuki, H., Suzuki, K. and Sato, T., 1988, "Dissimilarity between Heat and Momentum Transfer in a Turbulent Boundary Layer Disturbed by a Cylinder," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 31, No. 2, pp. 259~265.
- (13) Ota, T., Nishiyama, H. and Taoka, Y., 1987, "Flow around an Elliptic Cylinder in the Critical Reynolds Number Regime," *J. Fluids Eng.*, Vol. 109, pp. 149~155.
- (14) Ota, T. and Nishiyama, H., 1984, "Heat Transfer and Flow around an Elliptic Cylinder," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 27, No. 10, pp. 1771~1779.
- (15) Kondjoyan, A. and Daudin, J. D., 1995, "Effects of Free Stream Turbulence Intensity on Heat and Mass Transfers at the Surface of a Circular Cylinder and an Elliptical Cylinder, Axis Ratio 4," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 38, No. 10, pp. 1735~1749.
- (16) West, G. S. and Apelt, C. J., 1982, "The Effects of Tunnel Blockage and Aspect Ratio on the Mean Flow Past a Circular Cylinder with Reynolds Numbers between 10^4 and 10^5 ," *J. Fluid Mech.*, Vol. 114, pp. 361~377.
- (17) Maskell, E. C., 1965, "A Theory of the Blockage Effect on Bluff Bodies and Stalled Wings in a Closed Wind Tunnel," ARC R & M 3400, Aeronaut. Res. Council, U.K.
- (18) 김성민, 1996, "Flow around an Elliptic Cylinder Placed near a Plane Boundary," 포항공과대학교 석사학위논문.