

# 앙각을 가진 타원형 실린더 후류와 평판경계층의 상호작용에 대한 연구

최 재 호\* · 이 상 준\*\*  
(2000년 1월 14일 접수)

## Interaction between Turbulent Boundary Layer and Wake Behind an Elliptic Cylinder at Incidence

Jae-Ho Choi and Sang-Joon Lee

**Key Words :** Elliptic Cylinder(타원형 실린더), Turbulent Boundary Layer(난류 경계층), Angle of Attack(앙각), Ground Effect(지면효과)

### Abstract

The flow characteristics around an elliptic cylinder with axis ratio of  $AR=2$  located near a flat plate were investigated experimentally to study the interaction between the cylinder wake and the turbulent boundary layer. The pressure distributions on the cylinder surface and on the flat plate were measured with varying the angle of attack of the cylinder. In addition, the velocity profiles of wake behind the cylinder were measured using a hot-wire anemometry. As the angle of attack increases, the location of peak pressure on the windward and leeward surfaces of the cylinder moves toward the rear and front of the cylinder, respectively. At positive angles of attack, the position of the minimum pressure on the flat plate surface is moved downstream, but it is moved upstream at negative angles of attack. With increasing the angle of attack, the vortex shedding frequency is gradually decreased and the critical angle of attack exists in terms of the gap ratio. By installing the elliptic cylinder at negative angle of attack, the turbulent boundary layer over the flat plate is disturbed more than that at positive incidence. This may be attributed to the shift of separation point on the lower surface of the cylinder due to the presence of a ground plate nearby.

### 1. 서론

유체역학의 많은 연구 분야들 중에서 물체 주위 유동과 경계층 유동은 각각 많은 학문적 관심과 응용분야를 가지고 있으며, 그동안 많은 연구가 수행되어 오고 있다.

실제의 경우 경계층 유동과 물체 주위 유동이 각각 따로 존재하기 보다는 경계층 유동과 물체 주위 유동이 함께 존재하는 경우도 종종 있다. 이러한 복잡한 유동문제를 해결하기 위해서는 경계층 유동과 물체 주위 유동의 상호작용에 대한 연구가 필요하다. 이와같은 연구는 지면 가까이에

놓인 구조물이나 운송체, 효과익선, 해저에 깔려 있는 송유관, 그리고 열교환기 내부 유동등 많은 분야에 응용할 수 있다.

평판 경계층 내에 놓인 물체 주위유동에 관한 연구는 경계층 유동과 물체 주위 유동의 상호작용을 연구하기 위해 그동안 많이 다루어져 왔다. 물체가 경계층 내부에 놓이게 되면, 물체의 교란에 의해 경계층 내부의 유동구조가 바뀌게 되며, 난류구조도 크게 변화한다. 이렇게 교란된 유동은 초기에 경계층에 크게 영향을 미치다가 하류로 나아가면서 교란이 서서히 분산되어 그 영향력을 점차 상실하게 된다. 반면에 물체 후류의 경우, 경계층 두께 및 평판 사이의 틈새 거리에 따라 전방에서 들어오는 유동조건이 바뀌며, 경계층의 간섭을 받게 되므로 물체 주위의 유동구조와 공력특성 등이 변하게 된다. 따라서 경계층이 물체에 미치는

\* 회원, 포항공과대학교 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 포항공과대학교 기계공학과

E-mail : sjlee@postech.ac.kr

TEL : (0562)279-2169 FAX : (0562)279-3199

영향과 물체가 경계층에 미치는 작용은 서로 밀접한 관계를 가지고 있으므로, 이 둘을 함께 고려하여야만 한다. 평판 경계층과 물체 후류의 상호작용에 영향을 주는 주요변수로는 물체의 기하학적 형상, 자유흐름속도( $U_0$ ), 경계층 두께( $\delta$ ), 그리고 물체와 평판 사이의 간격 등이 있다.

Marumo 등<sup>(1)</sup>은 평판 가까이에 놓인 원주에 대한 연구에서 평판에 가까운 영역이 바깥 영역보다 교란되어진 경계층이 빨리 회복되어지며, 변동속도 성분이 평균속도보다 회복이 빠름을 밝혔다.

Bearman & Zdravkovich<sup>(2)</sup>는 경계층 두께가 원주 직경의 0.8 배인 경계층 내에서 원주와 평판 사이의 간격을 변화시켜 가면서 원주 후류유동의 변화를 연구하였다. 원주와 평판 사이의 틈새비가 0.3 이하인 경우에는 원주 후류에서 주기적인 와류출이 나타나지 않았으나, 0.3 이상일 경우에는 와류출이 주기적으로 일어남을 밝혔다. 반면에 Angrill 등<sup>(3)</sup>은 원주 후류의 와류출에 미치는 평판의 영향에 대한 연구에서 원주가 평판에 접근함에 따라 와류출 주파수가 증가하며, 와류출이 억제되는 임계 틈새비가 존재함을 발견하였다. Taniguchi & Miyakoshi<sup>(4)</sup>는 경계층의 두께가 원주의 와류출에 미치는 효과를 연구하여 경계층 두께가 증가함에 따라 임계 틈새비가 증가하며, 와류출 주파수는 경계층 두께에 상관없이 일정함을 밝혔다.

김성민과 이상준<sup>(5)</sup>은 네 가지 서로 다른 종횡비(AR)를 가진 타원형 실린더를 평판 가까이에 설치하여 틈새비 변화에 따른 실린더 주위 유동과 공력특성변화를 실험적으로 연구하였다. 원주와는 달리 타원형 실린더는 종횡비와 틈새비가 증가할수록 와류출 주파수가 증가하였으며, 종횡비가 증가함에 따라 항력계수가 감소하였다.

Ranzenbach & Barlow<sup>(6)</sup>는 평판 가까이에 놓인 익형에 대한 연구에서 익형이 평판에 접근함에 따라 익형에 작용하는 양력이 음의 값을 가지나, 임계 틈새비보다 작게 되면 이러한 지면효과는 약해짐을 발견하였다. Zhou & Squire<sup>(7)</sup>는 익형의 형상 변화에 따른 익형 주위 유동과 평판 경계층 유동간의 상호작용에 대한 연구에서 난류강도의 변화가 크게 영향을 미친다고 밝혔다.

평판에 의해 생성되는 경계층 유동과 물체 주위 유동의 상호작용에 대한 기존의 연구에서는 대부분 상대적으로 작은 두께의 경계층을 사용하였으며, 지면효과가 물체 주위 유동에 미치는 영향에 대한 연구가 주를 이루고 있다. 또한 경계층내에 놓이는 물체도 대부분 기하학적 형상이 단순한 원주나 받음각이 없는 익형으로 제한되어 있다. 따라서 받음각( $\alpha$ )이 있는 다양한 형상의 물체 주

위 유동과 경계층 유동 사이의 상호작용에 대한 기존의 연구는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서 다루고자 하는 타원형 실린더는 단축(minor axis)에 대한 장축(major axis)의 종횡비(AR)를 변화시킴으로써 단면형상을 원형(AR=1)에서부터 평판(AR= $\infty$ )까지 변화시킬 수 있으므로 다양한 기하학적 형상에 대한 일반적인 유동특성을 밝힐 수 있다. 또한 원주에 비해 타원형 실린더는 항력계수는 작지만 비슷한 열전달 계수값을 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다.<sup>(8-11)</sup>

본 연구에서는 두꺼운 평판 난류 경계층내에 놓인 타원형 실린더의 받음각을 변화시키면서 주위 유동의 특성변화와 지면효과를 풍동실험을 통해 측정함으로써 받음각의 변화에 따른 타원형 실린더 주위 유동과 평판 경계층 유동 사이의 상호작용에 대해서 연구하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

본 연구는 폭 0.72m, 높이 0.6m, 길이 6m 의 시험부를 가지는 POSTECH 아음속 풍동에서 수행되었으며, 자유흐름속도  $U_0=10\text{m/s}$  에서 풍동의 난류강도는 0.08 % 이하이다. 난류경계층 유동과 상호작용을 일으키는 물체 주위 유동을 만들기 위해 사용한 실험모델은 수평길이가 600mm 이고, 단축에 대한 장축의 종횡비(AR)가 AR=2 인 타원형 실린더이다. Fig. 1 은 본 연구에 사용되어진 타원형 실린더와 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다.

앞쪽 모서리를 날카로운 형상(sharp-edge)으로 가공한 두께 15mm, 길이 4.8m 인 아크릴판을 풍동 바닥보다 100mm 높게 띄운 상태로 받음각이 없도록 수평으로 설치하였다. 이 바닥평판의 폭은 풍동 시험부 폭과 같으며, 타원형 실린더는 평판의 선단부로부터 1.5m 후방에 설치하였다. 또한  $300^{\text{H}} \times 380^{\text{L}}$  크기의 끝판(end plate)을 실린더의 양 끝단에 부착시켜 풍동 벽면을 따라 발달하는 경계층 유동의 효과를 최소화하여 실린더 중앙부에서 유동이 2차원성을 갖도록 하였다.

실험하는 동안 자유흐름속도  $U_0$  는 10m/s 로 고정시켰다. 충분히 발달한 난류경계층을 생성시키기 위하여 지름 3.5mm 의 trip wire 를 평판의 선단부로부터 100mm 후방에 설치하였다. 형성된 난류경계층의 두께( $\delta$ )는 실린더가 설치된 위치단면에서 약  $\delta=75\text{mm}$  이었다. 또한 실린더 및 끝판에 기인한 최대 막힘비(blockage ratio)는 5% 이하로 막힘 효과를 고려한 수정은 하지 않았다.

타원형 실린더 중심과 평판 사이의 간격(H)는  $H/B=0.7, 1.0, 1.5, 2.5$  의 4가지로 변화시켰다. Fig. 1

에 나타낸 바와 같이 절대 좌표축(X, Y)의 원점은 실린더 중심을 평판에 투영하였을 때 평판과 만나는 지점으로 하류방향을 X 축, 높이방향을 Y 축으로 하였고, 상대 좌표축(x, y)은 실린더 중심을 원점으로 하여 하류방향을 x 축, 높이방향을 y 축으로 정의하였다. 타원형 실린더의 받음각( $\alpha$ )은 시계방향을 양으로 정하였다.

표면압력의 변화를 측정하기 위하여 타원형 실린더와 바닥평판에 내경 0.8mm 의 압력탭(pressure tap)을 일정 간격으로 장착하였다. 여러 지점의 압력을 신속하게 측정하기 위하여 다점압력 측정장치(scannivalve)를 사용하였다. 압력신호는 데이터 취득장치(DT-2838)를 이용하여 취득한 후, 통계처리하여 평균압력계수( $C_p$ ) 값을 구하였다. 압력계수  $C_p$  는 측정된 표면압력( $P_s$ )을 정압( $P_0$ )으로 빼준 후, 동압으로 무차원화한 값으로 다음과 같이 정의된다.

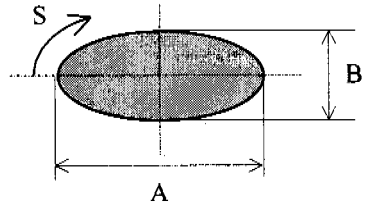
$$C_p = \frac{P_s - P_0}{\frac{1}{2} \rho U_o^2} \quad (1)$$

실린더 주위 유동과 경계층 유동사이의 상호작용을 조사하기 위하여 I 형 열선 프로브(DANTEC 55P11)와 X 형 열선 프로브(DANTEC 55P61)를 자동 이송장치로 이동시키면서 실린더 후류와 평판 경계층 유동의 속도를 측정하였다. 열선 프로브를 정온형 열선 유속계(TSI IFA-100)에 연결하여 나온 전압신호는 먼저 저역필터를 거치도록 하였다. 열선 유속계에서 나온 아날로그 속도신호를 데이터 취득장치(DT-2838)를 이용하여 한지점에서 초당 2000 개 비율로 디지털값으로 취득하였다. 이렇게 구한 데이터를 통계처리하여 각 지점에서의 평균 속도와 난류강도를 구하였다. 또한 속도신호를 스펙트럼 분석하여 실린더 후류에서의 와유출 주파수의 변화도 함께 조사하였다.

열선 유속계에서 나온 전압신호는 다음과 같은 King's law 를 사용하여 실제 속도로 보정하였다.

$$E^2 = A + B \cdot U^n \quad (2)$$

여기서 지수  $n$  은 일반적으로 통용되는 값인 0.45 를 사용하였다. 또한 X 형 열선 프로브는 유효 요각 보정법(effective yaw-angle calibration)을 사용하여 보정하였다. 실험중 풍동 시험부 내부 온도를  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  내로 일정하게 유지시켜 온도차에 기인한 속도측정 오차를 최소화시켰다.<sup>(12)</sup>



AR (A/B)	A (Major Axis)	B (Minor Axis)
2	42.4	21.2

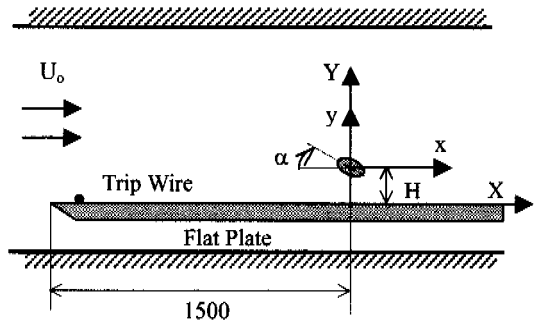
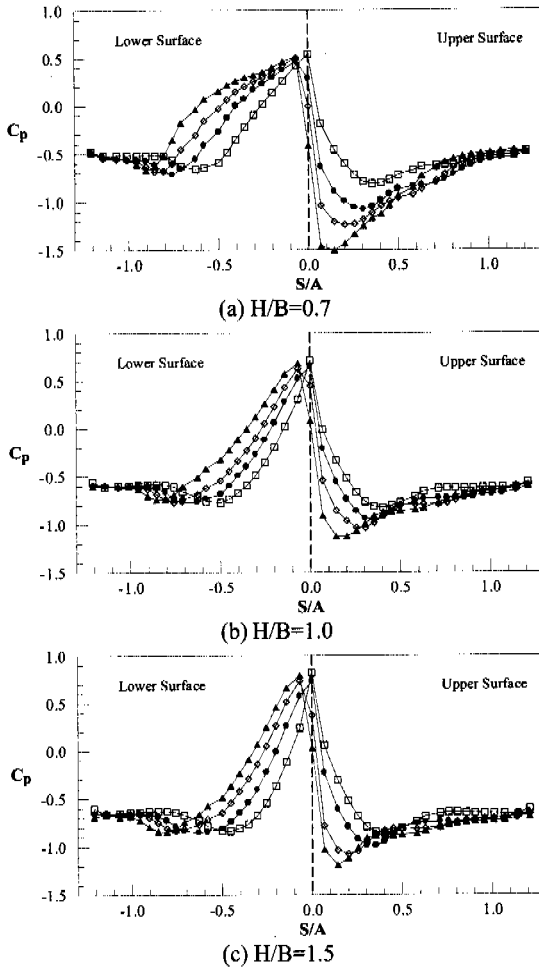


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up and geometric shape of elliptic cylinder (unit:mm)

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 2 와 3 은 받음각 변화에 따른 타원형 실린더 표면에 작용하는 압력변화를 나타낸 것이다. 여기서 S 는 받음각이 없는 경우의 실린더 정체점에서부터 실린더 표면을 따른 거리를 나타낸다. 양의 받음각을 가지는 경우에는 실린더 하단(lower surface)의 압력분포가 실린더의 배면압력(windward pressure)을 나타내고 상단(upper surface)의 압력이 후면압력(leeward pressure)을 나타낸다. 반면에 음의 받음각을 가지는 경우에는 반대로 하단의 압력이 후면압력이고, 상단의 압력이 배면압력을 나타낸다.

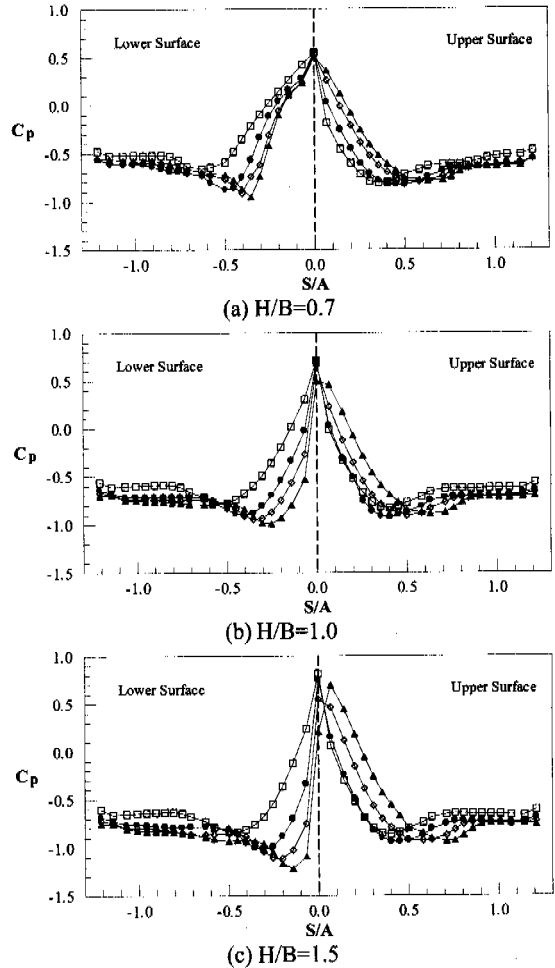
받음각이 없는 경우( $\alpha=0^\circ$ ), 실린더 하단과 상단에서의 표면압력 분포는 평판과 실린더 사이의 거리가 증가함에 따라 서로 대칭적인 분포형태로 접근하고 있다. 틸새비 변화에 따른 압력분포의 변화는 실린더 하단에서 더욱 두드러지게 나타나고 있는데, 이것으로부터 평판과 실린더 사이의 거리가 증가함에 따라 틸새유동의 영향이 사라지고 있음을 알 수 있다. 특히, 실린더가 평판 가까이 놓인 경우( $H/B=0.7$ )에는 틸새유동의 영향으로 실린더 하단에서의 최소압력의 위치가 실린더 뒤쪽



**Fig. 2** Surface pressure distributions on the elliptic cylinder at positive angles of attack  
 $\square$  :  $\alpha=0^\circ$ ,  $\bullet$  :  $\alpha=5^\circ$ ,  $\diamond$  :  $\alpha=10^\circ$ ,  $\blacktriangle$  :  $\alpha=15^\circ$

으로 이동하고 있다. 이것은 틈새유동에 기인하여 실린더 하단에서의 박리점이 실린더 후단방향으로 이동하고 있음을 나타내고 있다.

양의 받음각에서 받음각이 증가함에 따라, 압력 분포의 정체점이 실린더 배면으로 이동하고 있으며, 최소압력의 위치는 실린더 하단(배면압력)에서는 실린더 후방으로, 실린더 상단(후면압력)에서는 실린더 전방으로 이동하고 있다. 또한 실린더 하단에 나타나는 최소압력값은 받음각에 상관없이 거의 일정한 값을 유지하는데 반해, 실린더 상단에서는 받음각이 커짐에 따라 음의 방향으로 커져 가고 있음을 볼 수 있다. 특히 평판과 실린더사이 거리가 적은  $H/B=0.7$  의 경우에는, 받음각이 커짐에 따라 실린더 아랫면에서는 양의 압력분포가 크게 증가하고 있으며, 실린더 윗면에서는 음의 압력값이 크게 커지고 있다. 이러한 현상은 받음각



**Fig. 3** Surface pressure distributions on the elliptic cylinder at negative angles of attack  
 $\square$  :  $\alpha=0^\circ$ ,  $\bullet$  :  $\alpha=-5^\circ$ ,  $\diamond$  :  $\alpha=-10^\circ$ ,  $\blacktriangle$  :  $\alpha=-15^\circ$

의 영향으로 틈새유동의 교란이 커져 뾰족한 물체 (bluff body)가 유동을 막는 효과를 가져옴을 알 수 있다.

음의 받음각을 받는 경우에는 Fig. 3 에 나타난 바와같이 받음각이 증가함에 따라, 압력분포의 정체점이 실린더 상단 즉 배면압력측으로 이동하고 있으며, 최소압력의 위치는 실린더 상단에서는 실린더 후방으로, 실린더 하단에서는 실린더 앞쪽으로 이동하고 있다. 또한 실린더 배면측에서의 최소압력은 받음각에 상관없이 거의 일정한 값을 유지하는데 반해, 실린더 후면측(하단)에서는 받음각이 커짐에 따라 절대값이 커지고 있음을 볼 수 있다. 그러나 양의 받음각을 가지는 경우에 비해, 음의 받음각을 받는 실린더가 평판에 접근함에 따라 틈새유동의 영향이 크게 나타나고 있다. 즉 실린

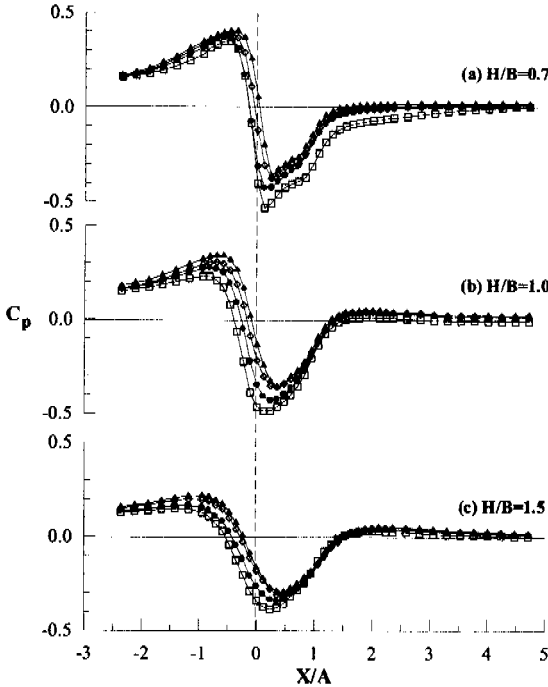


Fig. 4 Surface pressure distributions on the flat plate at positive angles of attack  
 □ :  $\alpha=0^\circ$ , ● :  $\alpha=5^\circ$ , ◇ :  $\alpha=10^\circ$ , ▲ :  $\alpha=15^\circ$

더 하단에서 최소압력의 위치가 실린더 후방으로 이동하고 있으며, 정체점의 이동도 거의 나타나지 않고 있다. 특히 평판과 실린더간의 거리가 적은  $H/B=0.7$ 의 경우에는 받음각의 크기에 상관없이 정체점이  $S/A=0.0$ 인 위치에 형성되고 있는데, 이것은 틈새유동의 영향으로 정체점이 평판쪽으로 이동하고 있기 때문으로 보인다.

Fig. 4와 5는 받음각 변화에 따른 평판에 작용하는 표면압력의 변화를 나타내고 있다. 받음각이 없는 경우( $\alpha=0^\circ$ ), 평판 가까이에 설치된 실린더의 영향으로 평판 전방( $X<0.0$ )에서의 표면압력이 증가하고 있으며, 실린더와 평판 사이의 틈새유동의 영향으로  $X=0.0$ 부근에서 최소값을 가진다. 또한 하류로 나아감에 따라 실린더 존재에 기인한 평판 압력의 교란은 점차 사라지고 있다. 이러한 평판 가까이에 놓인 실린더 존재에 의한 평판 표면압력의 변화는 실린더와 평판 사이의 거리가 증가함에 따라, 최소 표면압력의 위치는 점차 하류쪽으로 이동하고 있으며, 최소압력값의 절대치도 감소하고 있다. 또한 하류위치에서 표면압력도 빨리 회복되고 있다. 이러한 바닥평판에서의 표면압력분포는 김성민과 이상준<sup>(5)</sup>의 결과와도 잘 일치하고 있다.

받음각을 양의 방향으로 증가시키에 따라 받음

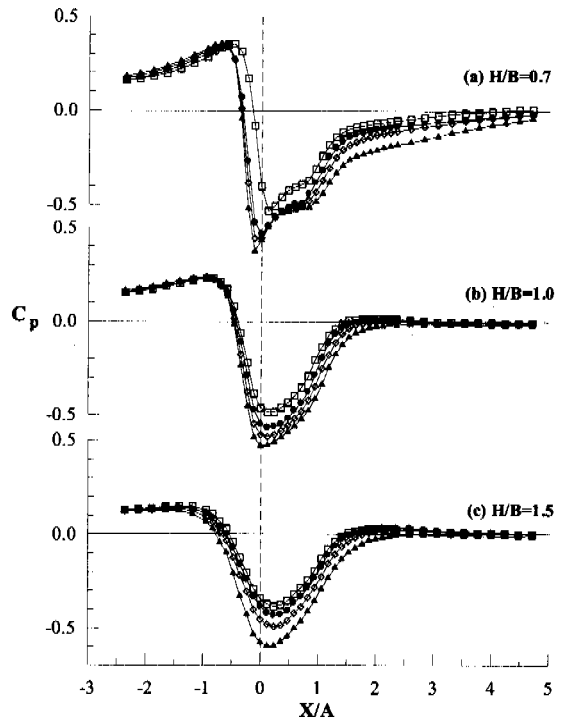


Fig. 5 Surface pressure distributions on the flat plate at negative angles of attack  
 □ :  $\alpha=0^\circ$ , ● :  $\alpha=-5^\circ$ , ◇ :  $\alpha=-10^\circ$ , ▲ :  $\alpha=-15^\circ$

각이 없는 경우에 비해 전방( $X<0.0$ )에서 표면압력이 증가하고 있다. 또한 바닥평판에서 최소압력값을 갖는 위치는 평판 중심( $X=0.0$ )에서 하류방향으로 이동하고 있으며, 최소압력값의 절대치도 작아지고 있다. 또한 평판 하류에서의 압력회복도 점차 빨라지는데, 이러한 경향은 실린더와 평판 사이의 거리가 커짐에 따라 점차 약해지고 있다.

반면에 받음각을 음의 방향으로 증가시키게 되면(Fig. 5), 받음각이 없는 경우에 비해 전방에서의 평판압력이 감소하고 있으나, 그 변화폭이 크지 않다. 평판 하류에서의 압력회복도 받음각이 커짐에 따라 느려지고 있다. 또한 표면압력이 최소값을 갖는 위치는 평판 전방으로 이동하고 있으며, 절대값의 크기는 증가하였다. 특히, 틈새간격이 좁은  $H/B=0.7$ 의 경우, 받음각이 커짐에 따라 최소압력값이 날카로운 정점형상으로 바뀌고, 그 절대값의 크기도 양의 받음각의 경우에 비해 큰 값을 가진다. 그리고 최소값의 위치도 평판의 전반부( $X<0.0$ )쪽으로 넘어오게 된다. 이러한 결과들로부터 음의 받음각을 가지는 경우가 같은 크기의 양의 받음각에 비해 평판 표면압력에 보다 큰 변화를 가져오고 있음을 알 수 있다. 이것은 실린더가 음의 받음각을 가질 때, 실린더로부터 박리된 유

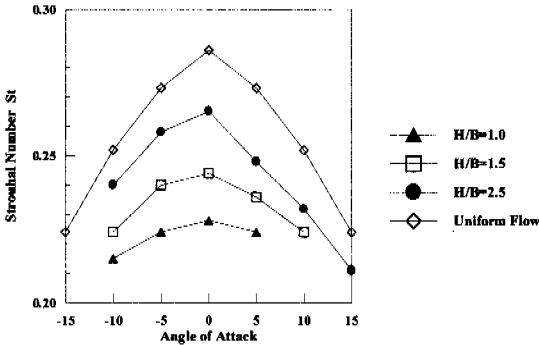


Fig. 6 Variations of the Strouhal number in terms of angle of attack

동이 양의 받음각을 가진 경우보다 넓은 영역에서 평판에 접하게 되어 평판 경계층에 훨씬 큰 교란을 주고 있기 때문으로 보인다.

받음각의 변화에 따른 실린더 근점 후류에서의 와유출 주파수 변화를 조사하기 위하여 I 형 열선 프로브로 측정된 주유동방향의 속도신호를 스펙트럼 분석하였다. 여기서 구한 와유출주파수( $f_s$ )는 자유흐름속도  $U_0$  와 타원형 실린더의 단축길이(B)를 이용하여 Strouhal 수 St로 나타내었다.

$$St = f_s \cdot B / U_0 \quad (3)$$

Fig. 6는 실린더 하류  $x/A=1.0$  위치에서 구한 받음각에 따른 Strouhal 수 St의 변화를 나타낸 것이다. 두개의 y 축 측정위치( $y/B=\pm 0.5$ )에서 측정된 Strouhal 수는 모두 동일하였다. 균일 유동속에 놓인 타원형 실린더의 경우, 받음각이 증가함에 따라 Strouhal 수는 감소하였다. 이러한 결과는 기존의 균일 유동조건하에서 연구한 타원형 실린더 주위 유동에 대한 결과와 잘 일치하고 있다.<sup>(8,11)</sup>

받음각이 없는 경우( $\alpha=0^\circ$ ), 실린더와 평판사이의 거리가 작은  $H/B=0.7$ 의 경우에는 뚜렷한 와유출이 관측되지 않았다. 이보다 실린더와 평판사이의 거리가 증가함에 따라 와유출이 점차적으로 뚜렷해지며 와유출 주파수는 점차적으로 증가하였으나, 균일 유동에서의 와유출 주파수보다는 작은 값을 가졌다. 이러한 경향은 김성민과 이상준<sup>(5)</sup>의 결과에서도 확인되었다.

받음각이 있는 경우에도 실린더와 평판사이의 거리가 가장 작은  $H/B=0.7$ 의 경우에는 와유출이 나타나지 않았으나, 실린더와 평판 사이의 거리가 증가함에 따라 와유출이 관측되었으며, 와유출 주파수는 점차적으로 증가하였다. 실린더와 평판사이 틈새가 같은 경우, 받음각이 증가함에 따라 와유출 주파수는 점차적으로 감소하였다. 받음각이

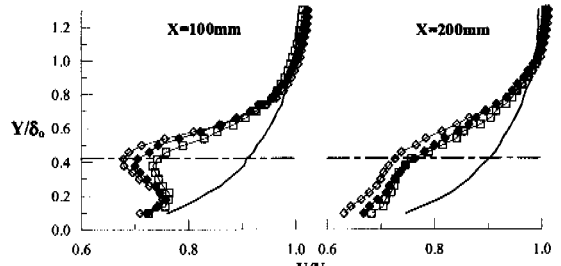


Fig. 7 Mean streamwise velocity profiles at  $H/B=1.5$   
 $\diamond : \alpha=-15^\circ, \square : \alpha=0^\circ, \blacklozenge : \alpha=15^\circ$

있는 경우에는 와유출 현상이 나타나는 임계 틈새비에 받음각이 영향을 미침을 알 수 있다. 받음각이 없는 경우를 기준으로 음과 양의 받음각에서의 와유출 주파수를 살펴보면, 음의 받음각을 받는 경우가 같은 크기의 양의 받음각을 가지는 경우에 비해 보다 큰 와유출 주파수를 가진다.

Fig. 7는 받음각 변화에 따른 주유동방향의 평균속도분포를 나타낸 것이다. 여기서 실선은 타원형 실린더가 없는 경우의 평판 경계층유동을 나타내고, 일점 쇄선은 실린더의 중심높이를 나타낸다. Y 축은  $X=0.0$ 에서 측정된 경계층의 두께  $\delta_0=75\text{mm}$ 로 무차원화하였다. 이때 실린더와 평판사이의 거리는  $H/B=1.5$ 로 실린더 후류와 경계층 유동의 상호작용을 잘 보여주고 있다. 실린더와 평판사이의 거리가 작은 경우( $H/B<1.5$ )에는 실린더 후류와 경계층유동사이의 교란이 매우 빠르게 형성되어 이들 사이의 상호작용을 잘 관찰할 수 없었다.

받음각이 없는 경우( $\alpha=0^\circ$ ), 타원형 실린더 중심영역에서는 실린더 후류영역의 존재로 큰 속도결손이 존재하고 있으며, 평판 근처에서는 경계층유동이 형성되어 있음을 관찰할 수 있다. 하류로 나아감에 따라, 실린더 후류영역에서의 속도결손은 감소하고 있다. 반면에 실린더 후류영역이 평판 근처까지 확장해 감에 따라 평판 근처에서의 경계층 유동이 크게 교란되어 속도분포가 실린더가 없는 일반 경계층유동에 비해 크게 감소하고 있다. 이러한 결과는 김성민과 이상준<sup>(5)</sup>의 결과와도 잘 일치하고 있다.

받음각이 있는 경우에는 실린더 후류영역에서 받음각이 없는 경우에 비해 보다 큰 속도결손이 존재하며, 평판 근처에서는 경계층유동이 형성되고 있음을 관찰할 수 있다. 그리고 음의 받음각을 가지는 경우가 양의 받음각을 가지는 경우보다 실린더 후류영역에서의 속도결손이 더 크게 나타났다. 하류로 나아감에 따라, 실린더 후류영역에서의 속도결손은 빠르게 회복되고 있으며, 바닥평판 근

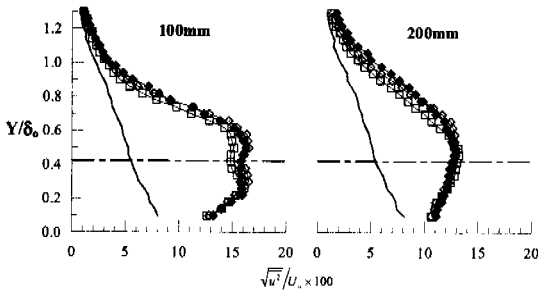


Fig. 8 Streamwise turbulence intensity profiles at  $H/B=1.5$

◇ :  $\alpha=15^\circ$ , □ :  $\alpha=0^\circ$ , ○ :  $\alpha=-15^\circ$

처에서의 유동은 일반 평판 경계층유동에 비해 크게 감소한 주유동방향 속도분포를 보여주고 있다. 또한,  $X=200\text{mm}$  하류 위치에서 양의 받음각을 가지는 경우는 받음각이 없는 경우와 거의 유사한 속도분포를 보이는데 반해, 같은 크기의 음의 받음각을 가지는 경우에는 받음각이 없는 경우에 비해 작은 속도값을 가져 속도결손의 회복이 상대적으로 느림을 알 수 있다. 이러한 결과들은 음의 받음각을 가지는 경우가 양의 받음각을 가지는 경우보다 평판 경계층을 보다 더 잘 교란시키고 있음을 나타내는 것으로, 앞에서 언급한 평판 표면 압력 결과에서도 이러한 사실을 확인할 수 있다.

타원형 실린더 후류와 경계층유동의 상호작용은 주로 실린더 하단에서 박리된 전단층 유동과 경계층 유동간의 상호작용임을 생각할 때, 양의 받음각을 가지는 경우는 실린더 아랫면에서의 유동박리가 빠른 유속의 틈새유동의 영향을 크게 받는 실린더 뒤부분에서 발생하는데 반해, 음의 받음각을 가지는 경우는 실린더 아랫면에서 유동박리가 실린더 앞부분에서 발생하여 평판 가까이의 경계층유동에 보다 많이 영향을 주게 된다. 이와 같은 유동특성이 음의 받음각을 가지는 경우가 평판 경계층을 보다 잘 교란시키는 이유로 생각되어진다.

Fig. 8 은 받음각의 변화에 따른 주유동방향 속도성분의 난류강도 분포를 나타낸 것이다. 앞의 평균속도 결과와 마찬가지로 실선은 실린더가 없는 경우의 평판 경계층 유동을 나타내고, 일점쇄선은 실린더의 중심위치를 나타내고 있으며, 실린더와 평판사이의 거리는  $H/B=1.5$  이다.

받음각이 없는 경우( $\alpha=0^\circ$ ), 실린더 중심영역에서는 일반적인 실린더 후류유동에서 볼 수 있는 쌍봉(double peak) 형상의 난류강도 분포가 나타나고 있다. 하류로 나아감에 따라, 이러한 쌍봉 형상은 사라지고 단일 정점형태로 바뀌며, 난류강도도 감소하게 된다.

받음각이 있는 경우에도  $X=100\text{mm}$  위치의 후류 중심영역에서 쌍봉형상의 난류강도 분포가 나타나고 있다. 양의 받음각을 받는 경우에는 아랫쪽 정점이 약하게 나타나는데 반해, 음의 받음각을 가지는 경우에는 뚜렷한 쌍봉형상을 보여주고 있다. 이러한 난류강도 분포는 실린더 아랫면에서의 유동박리 위치의 변화와 관련있는 것으로 생각되어진다. 또한 음의 받음각을 가지는 경우가 양의 받음각에 비해 큰 난류강도값을 가져 평판 경계층을 보다 잘 교란시킴도 알 수 있다. 하류로 나아감에 따라, 난류강도값은 감소하며 받음각의 방향에 상관없이 유사한 분포형태를 가진다. Fig. 7 의 평균속도 분포결과와 비교하여 볼 때, 지면효과에 의한 변동속도성분의 변화가 평균속도보다 빨리 회복되어짐을 보여 주고 있으며, 이러한 결과는 Marumo 등<sup>(1)</sup>의 연구에서도 확인되었다.

#### 4. 결론

평판 가까이에 놓인 타원형 실린더의 받음각과 틈새비를 변화시키면서 후류유동과 경계층유동간의 상호작용을 실험적으로 연구하였다. 본 연구의 결과를 정리해 보면 다음과 같다.

(1) 지면 가까이에 놓인 타원형 실린더의 표면 압력 분포는 받음각이 증가함에 따라, 배면에서는 실린더 후방으로, 후면에서는 전방으로 이동하였다.

(2) 평판표면에서 최소압력값을 갖는 위치는 양의 받음각에서는 후방으로 이동하고, 음의 받음각에서는 전방으로 이동하였다.

(3) 받음각이 증가함에 따라 와유출 주파수는 점차적으로 감소하며, 음의 받음각을 받는 경우가 같은 크기의 양의 받음각에 비해 큰 와유출 주파수를 가진다.

(4) 음의 받음각을 가지는 타원형 실린더가 양의 받음각보다 평판 경계층유동을 더 잘 교란시켰으며, 이러한 결과는 실린더 아랫면에서의 유동박리점의 변화에 기인하는 것으로 생각되어진다.

#### 후기

본 연구는 BK21 사업과 첨단유체공학연구센터 과제지원을 통해 수행되었으며, 이에 감사드립니다

#### 참고문헌

- (1) Marumo, E., Suzuki, K. and Sato, T., 1978, "A Turbulent Boundary Layer Disturbed by a Cylinder,"

- Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 87, pp. 121~141.
- (2) Bearman, P. W. and Zdravkovich, M. M., 1978, "Flow around a Circular Cylinder near a Plane Boundary," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 89, pp. 33~47.
  - (3) Angrilli, F., Bergamaschi, S. and Cossalter, V., 1982, "Investigation of Wall Induced Modifications to Vortex Shedding from a Circular Cylinder," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 104, pp. 518~522.
  - (4) Taniguchi, S. and Miyakoshi, K., 1990, "Fluctuating Fluid Forces Acting on a Circular Cylinder and Interference with a Plane Wall," *Experiments in Fluids*, Vol. 9, pp.197~204
  - (5) 김성민, 이상준, 1996, "평판 가까이에 놓인 타원형 실린더 주위 유동에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제 20 권, 제 8 호, pp. 2637~2649.
  - (6) Ranzenbach, R and Barlow, J. B., 1994, "Two-dimensional Airfoil in Ground Effect, an Experimental and Computational Study," SAE 942509.
  - (7) Ranzenbach, R and Barlow, J. B., 1994, "Two-dimensional Airfoil in Ground Effect, an Experimental and Computational Study," SAE 942509.
  - (8) Ranzenbach, R and Barlow, J. B., 1994, "Two-dimensional Airfoil in Ground Effect, an Experimental and Computational Study," SAE 942509.
  - (9) Zhou, M. D. and Squire L. C., 1985, "The Interaction of a Wake with a Turbulent Boundary Layer," *Aeronautical Journal*, Vol. 89, pp. 72~81.
  - (10) Modi, V. J. and Wiland, E., 1970, "Unsteady Aerodynamics of Stationary Elliptic Cylinders in Subcritical Flow," *AIAA Journal*, Vol. 8, pp. 1814~1821.
  - (11) Modi, V. J. and Dikshit, A. K., 1975, "Near Wakes of Elliptic Cylinders in Subcritical Flow," *AIAA Journal*, Vol. 13, pp. 490~497.
  - (12) Ota, T., Nishiyama, H. and Taoka, Y., 1984, "Heat Transfer and Flow around an Elliptic Cylinder," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 27, pp. 1771~1779.
  - (13) Ota, T., Nishiyama, H. and Taoka, Y., 1987, "Flow around an Elliptic Cylinder in the Critical Reynolds Number Regime," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 109, pp. 149~155.
  - (14) Perry, A.E., 1982, "Hot-wire Anemometry," Clarendon Press, Oxford.