

대기경계층 내에 놓인 자유단 원주의 형상비가 후류유동에 미치는 영향에 관한 연구

박철우* · 이상준†

(2001년 4월 30일 접수, 2001년 9월 8일 심사완료)

Effect of Cylinder Aspect Ratio on Wake Structure Behind a Finite Circular Cylinder Located in an Atmospheric Boundary Layer

Cheol Woo Park and Sang Joon Lee

Key Words : Finite Cylinder(FC, 유한실린더), Free End(자유단), Aspect Ratio(형상비), Atmospheric Boundary Layer(대기경계층)

Abstract

The flow around free end of a finite circular cylinder (FC) embedded in an atmospheric boundary layer has been investigated experimentally. The experiments were carried out in a closed-return type subsonic wind tunnel with varying aspect ratio of the finite cylinder mounted vertically on a flat plate. The wakes behind a 2-D cylinder and a finite cylinder located in a uniform flow were measured for comparison. Reynolds number based on the cylinder diameter was about $Re=20,000$. A hot-wire anemometer was employed to measure the wake velocity and the mean pressure distributions on the cylinder surface were also measured. The flow past the FC free end shows a complicated three-dimensional wake structure and flow phenomenon is quite different from that of 2-D cylinder. The three-dimensional flow structure was attributed to the downwashing counter rotating vortices separated from the FC free end. As the FC aspect ratio decreases, the vortex shedding frequency decreases and the vortex formation length increases compared to that of 2-D cylinder. Due to the descending counter-rotating twin-vortex, near the FC free end, regular vortex shedding from the cylinder is suppressed and the vortex formation region is hardly distinguished. Around the center of the wake, the mean velocity for the FC located in atmospheric boundary layer has large velocity deficit compared to that of uniform flow.

기호설명

Re : 레이놀즈수 ($Re=UD/v$)
 L : 실린더 높이
 D : 실린더 직경
 ABL : 대기경계층
 n : 맥법칙계수

1. 서론

2 차원 원주는 기하학적으로 단순한 형상과 후류의 강한 응집구조 때문에 그동안 많은 연구가 수행되어져 왔다. 그러나 균일유동(uniform flow) 속에 놓여진 2 차원 물체의 후류도 완전한 2 차원성을 유지하기 어려우며, 심지어는 뚜렷한 와류출이 존재하는 낮은 레이놀즈수에서도 2 차원성이 유지되는 경우가 드물다.

원주 후류의 3 차원성 (three-dimensionality)은 보통 경사진 와류출이나 기울어진 과도형태의 와의 형태로 나타나는데, 레이놀즈수가 증가함에 따라 이러한 3 차원성은 더욱 크게 나타나게 된다.

Slaouti 등⁽¹⁾은 원주후류가 2 차원성을 나타내기 위해서는 적어도 레이놀즈수가 80 이하이어야 한다고

* 회원, 포항공과대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과

TEL : (054) 279-2169, FAX : (054) 279-3199

하였다. 이처럼 엄밀하게 말하면 원주 후류는 거의 모든 레이놀즈수 범위에서 3차원성을 나타낸다고 볼 수 있다.

그러나 2차원 원주의 근접 후류에서는 원주에 평행하게 규칙적으로 나타나는 와류출과 원주 후방에 형성된 일정길이의 와형성영역 등으로 원주후류의 3차원성이 약화되어진다. 따라서, 적절한 끝판(end plate)을 사용하거나 원주의 길이를 직경에 비해 충분히 길게하여 원주 후류의 응집구조가 잘 유지되고 스트롤수(Strouhal number)가 변하지 않을 경우 원주 후류는 2차원성을 갖는다고 가정할 수 있다.

이러한 2차원 물체와는 달리 실제의 건축구조물들의 꼭대기는 자유단(free end) 형태로 대기경계층 유동에 노출되어 있으며, 이들 구조물의 후류 유동은 3차원 유동특성을 가지게 된다. 따라서, 균일유동 혹은 대기경계층 유동 속에 놓인 자유단을 가진 물체 후류에 관한 연구는 실제 응용측면에서 매우 중요한 의미를 가진다고 할 수 있다. 특히 높은 빌딩이나 냉각탑과 같은 고층 구조물들을 설계할 때에는, 물체에 작용하는 풍하중이나 자유단 주위 유동에 의해 유도되어지는 진동 등을 반드시 고려해 주어야 한다.

자유단을 가진 세장형의 길쭉한 무딘물체(bluff body) 후류는 물체의 양쪽옆에서 뿐만 아니라 상부의 자유단에서도 유동이 박리되어진다. Williamson⁽²⁾은 낮은 레이놀즈수 범위내에서 스트롤수와 레이놀즈수 사이의 관계에서 불연속점이 존재하며, 접근유동의 불균일성 및 높은 난류강도 등으로 인하여 기울어진 형태의 와류출이 발생한다고 밝혔다.

Wieselsberger⁽³⁾는 평판위에 수직으로 세워진 자유단원주(finite cylinder with free end, 이후 FC로 표시) 후류의 3차원성에 관하여 연구하였는데, 작은 형상비를 가진 유한실린더의 경우 항력이 감소되어진다고 하였다. Baban 등⁽⁴⁾은 FC 후류영역에서 매우 높은 난류성분을 가진 와형성영역이 존재하며 이로 인해 원주의 항력변동성분이 크게 증가되어진다고 하였다. Okamoto 등⁽⁵⁾은 작은 형상비(L/D=1~2)의 자유단 원주의 경우, 대칭적인 후류 구조를 가지며, 형상비가 4보다 크게 될 경우 후류 형태가 변화되어 3차원성을 가진다고 밝혔다.

Farivar⁽⁶⁾는 균일유동 속에 놓여진 FC 후류 유동에 관한 연구를 통하여 형상비가 7.5 이하 일 때 주기적인 와류출이 사라진다고 하였다. 그러나 Zdravkovich 등⁽⁷⁾은 형상비가 2인 경우에도 간헐적이기는 하지만 와류출 형태가 존재한다고 밝히고 있다. 따라서 자유단을 가진 원주의 와류출에 관해서는 아직까지 논란의 여지가 남아 있다.

Kareem⁽⁸⁾ 등은 경계층 내에 놓여진 거친 표면의 유한실린더의 표면에 작용하는 압력변동성분의 시

간적-공간적 특성을 연구하였는데, 접근 유동의 난류강도가 압력장 변화에 큰 영향을 미침을 밝혔다. 노⁽⁹⁾ 등은 작은 형상비를 가진 유한실린더의 상면 표면 주위에 형성되는 와류유동을 가시화 기법을 이용하여 연구하였다.

그러나 선행연구들은 대부분 균일유동 내의 FC 후류를 다루고 있으며, 대기경계층 내에 놓여진 FC 후류 유동특성에 관한 연구는 아직 충분하지 못한 실정이다. 본 연구에 앞서 수행된 연구⁽¹⁰⁾에서는 균일유동내에 놓인 단일 형상비를 가진 FC 후류의 유동특성을 연구하였는데, 유동이 원주의 자유단을 지나면서 FC 자유단 부근에서 서로반대 방향으로 회전하면서 하강하는 와동쌍이 존재하며 이들이 와류출 주파수와는 다른 주파수를 가지고 있음을 밝혔다.

본 연구에서는 대기경계층 내에 놓여진 자유단 원주의 형상비를 변화시켜 가면서 이들이 후류유동 및 표면압력 분포에 미치는 영향에 관하여 실험적으로 해석하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험은 폐쇄회로형 POSTECH 아음속 풍동에서 수행되었는데, 시험부의 크기는 높이 0.6m, 폭 0.72m, 길이 6m이다. 풍동시험부에 평활지형에 해당하는 대기경계층을 생성시키기 위하여 풍동시험부 입구에 스파이어(spire)를 설치하고 바닥에 10mm 높이의 인조잔디를 50cm 길이로 설치하였다. 본 연구에서는 자유흐름속도를 $U_0=10\text{m/s}$ 로 고정하였는데, 원주 직경($D=30\text{mm}$)에 기초한 레이놀즈수 ($Re=U_0D/\nu$)는 $Re=20,000$ 이다.

풍동바닥면에서 57mm 떨어진 높이에 30°의 날카로운 모서리를 가진 평판을 설치하고 평판의 선단으로부터 후방으로 3.9m 인 지점에 원주를 수직으로 장착하였다. 그리고 경계층 유동과의 비교를 위한 균일유동(uniform flow) 실험은 풍동시험부 입구에 설치된 spire 와 인조잔디를 모두 제거한 후, 평판 선단으로부터 50cm 후방위치에 원주를 설치하였다. 이 경우 자유흐름의 난류강도는 약 0.06%이었다. Fig. 1 은 본 연구에 사용되어진 풍동의 시험부와 측정시스템을 나타낸 것이다.

Fig. 2 는 피토 정압관과 정온형 열선유속계(TSI IFA100)를 사용하여 FC 가 놓일 위치($X=0$)에서 측정된 대기경계층의 평균속도와 난류강도의 수직분포를 나타낸 것이다. 일반적으로 경계층 두께가 얇은 평판경계층은 평판자체의 거칠기나 수동적인 trip-wire 등을 이용하여 유동이 진행됨에 따라 표면으로부터 수직방향으로 속도구배가

형성되어진다. 그러나 자연풍에 의해 생성되는 대기경계층 유동은 평판경계층과 비교하여 유동형태는 유사하나 경계층 두께가 상대적으로 두껍다. 또한 대기경계층의 경우 수직방향의 난류강도분포가 실제 지표면의 기류와 일치하도록 지표면 근처에서 10~30%의 난류강도값을 갖는다.⁽¹¹⁾

주유동방향 평균속도의 수직방향분포는

평활지형 (open terrain)에 해당하는 전형적인 속도분포를 나타내며, 다음과 같은 멱법칙(power law)에서 지수는 $n=0.14$ 에 해당한다.

$$\frac{U(z)}{U_0} = \left(\frac{z}{h}\right)^n \quad (1)$$

여기서 속도분포는 형상비가 $L/D=6$ 인 자유단 원주의 높이 ($h=18\text{cm}$)로 무차원화 하였으며 생성된 발달된 경계층의 두께(δ)는 약 21.3cm 이었다. 또한 원주 중앙에서 폭방향으로 $Y=\pm 100\text{mm}$ 떨어진 곳에서 측정된 평균속도와 난류강도 결과는 생성된 대기경계층의 2차원성을 보여주고 있다.

자유단 원주(FC)는 유동에 기인한 진동을 피하기 위하여 스테인레스로 제작되었으며 사포로 표면을 매끈하게 하였다. FC의 형상비(L/D)는 원주의 직경에 대한 높이의 비로 나타내며 본 연구에서는 세가지 서로 다른 형상비($L/D=3, 6, 8$)의 원주를 사용하였다.

FC 모델은 평판위에 수직으로 설치되었는데, 바닥판과 원주의 연결부에서는 말굽형와(horseshoe vortex)가 생성되어진다. 그러나 본 연구에서는 FC의 자유단 부분, 즉 중간높이 이상에서의 후류유동을 다루었으므로 이러한 말굽형와의 영향은 매우 적으며 거의 무시할 수 있는 것으로 알려져 있다.⁽⁵⁾ Fig. 3은 본 연구에서 사용한 실험장치와 좌표계를 보여주고 있다.

후류의 속도측정에는 I-형과 X-형의 열선 프로우브와 정온형 열선유속계를 사용하였다. 열선 프로우브는 정확도가 0.01mm인 이송장치에 고정시켜 측정지점으로 이동시키면서 속도를 측정하였다. 속도데이터는 각 측정지점에서 초당 2,000개의 비율로 32,000개의 데이터를 취득하였다. 속도측정시 열교환기를 사용하여 풍동 내부의 온도변화는 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 이내로 유지시켰다.

그리고 압력공을 자유단으로부터 5mm 간격으로 원주의 중간높이까지 배치하였고 원주를

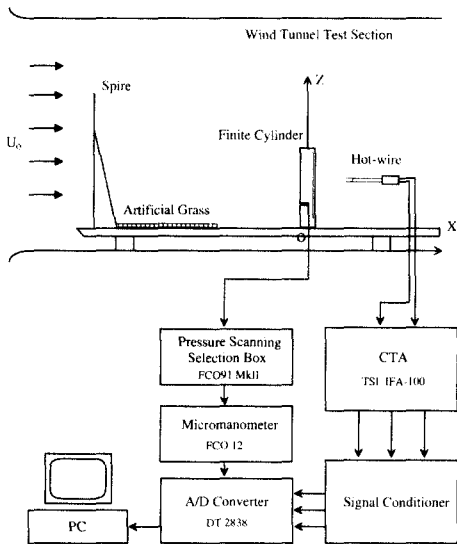


Fig. 1 Wind tunnel test section and measurement system

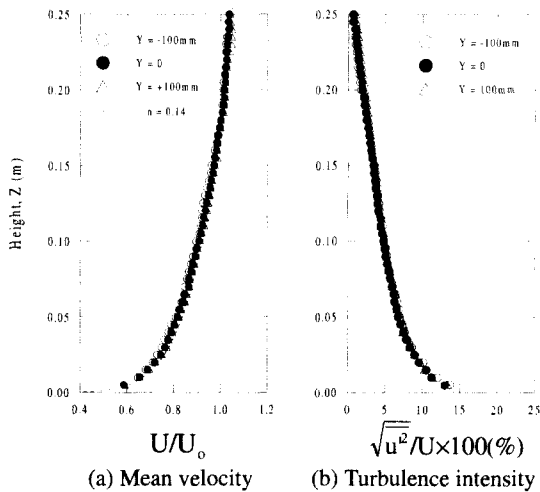


Fig. 2 Mean streamwise velocity and turbulence intensity profiles of atmospheric boundary layer measured at FC location ($X=0$)

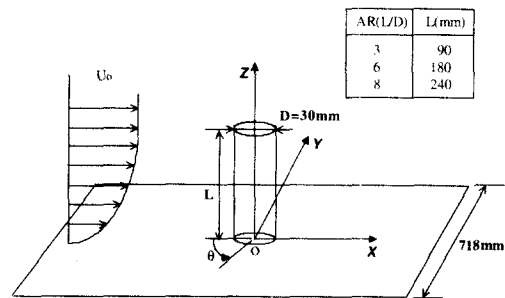


Fig. 3 Experimental set-up and coordinate system

반시계방향으로 10° 간격으로 회전시키면서 표면압력을 측정하였다. 이때 압력변동신호의 동적특성 변화를 가능한 한 최소화하기 위하여 내경이 0.8mm 이고, 길이가 400mm 인 비닐 튜브로 압력공과 다점압력선택기(FCO 91MkII)를 연결하였다.

표면압력은 다점압력선택기에 연결되어진 마이크로 마노미터(FCO12)와 A/D 변환기(DT2838)를 사용하여 측정하였다. 압력변환기로부터 나온 전압시그널은 200Hz 저대역(low-pass) 필터를 거쳐 노이즈를 제거한 후, A/D 변환기를 통해 디지털 값으로 변환되어진다. 압력 측정시 각 채널마다 초당 500 개의 비율로 샘플링하여 16,384 개의 데이터를 취득하여 평균하였으며, 채널을 변경할 때 마다 약 10 초정도의 압력회복 시간을 주었다.

원주 표면에서의 압력계수 C_p 는 측정된 표면압력 P 와 기준 정압(static pressure) P_0 와의 압력차를 평균유속 U_0 와 공기밀도 ρ 로 무차원화시켜 다음과 같이 표현하였다.

$$C_p = \frac{P - P_0}{\frac{1}{2} \rho U_0^2} \quad (2)$$

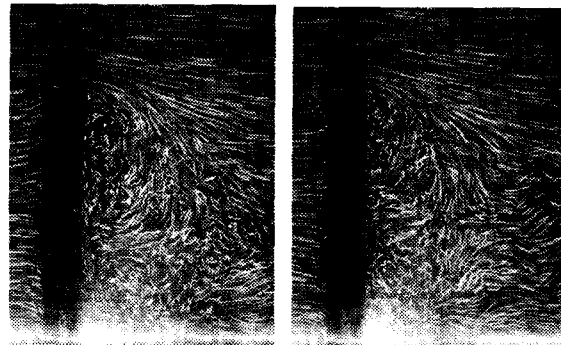
여기서 기준압력 P_0 는 원주의 측방 $Y=0.2m$ 위치에서 수직방향으로 $Z=0.4m$ 인 지점에서 피토펙압관을 설치하여 구하였는데, 이곳은 모형의 영향이 적은 비점성 유동 구간으로 간주되어진다.

자유단 원주 주위의 유동구조를 관찰하기 위하여 입자주입법(tracer method)을 사용하여 유동을 가시화 하였다. 가시화 실험은 시험부의 크기가 폭 300mm, 높이 200mm, 길이 1200mm 인 소형 회류수조에서 수행하였는데, 이때의 자유흐름속도는 12cm/s 이었으며, 원주직경에 기초한 레이놀즈수는 $Re=2,100$ 이다. 가시화 실험의 경우에도 시험부 입구쪽에 스파이어(spire)를 부착시켜 실험조건에 맞는 경계층을 생성시켰다. 유동가시화에 사용된 입자는 직경이 약 $100\mu m$ 인 폴리 비닐클로라이드(poly vinyl chloride)로 비중은 약 1.02 이며, 카메라(Nikon F5)의 노출시간을 조절하여 입자의 유적선(streaky line)을 촬영하였다. 할로겐램프(150W)에서 나온 빛을 절연필터, 광섬유 케이블 및 원주형 렌즈를 지나게 함으로써 가시화 하고자 하는 유동단면을 평면광(sheet) 형태로 조명하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유동가시화

자유단 원주 주위의 유동특성을 정성적으로 관찰하기 위하여 입자주입법을 이용하여 입자들의 궤적을 카메라로 촬영하여 유동을 가시화하였다.



(a) Uniform Flow

(b) ABL

Fig. 4 Visualized flow around a finite circular cylinder placed vertically on a ground ($L/D=6$, $Y/D=0$, side view)

Fig. 4 는 형상비가 $L/D=6$ 인 자유단 원주 주위의 유동을 후류의 중앙선에서 수직인 XZ 평면에서 가시화한 결과를 보여주고 있다.

여기서 보면 접근하는 자유흐름이 원주의 자유단 바로 앞에서 위로 상승했다가 자유단을 지나면서 곧 바로 후류의 중앙단면을 따라 전단층이 회전하면서 하강하는 유동구조를 보여주고 있다. 후류의 중앙단면에서는 자유단 상부에서 박리된 유동이 원주의 중간높이까지 하강한 후 하류로 나아가고 있다.

이러한 박리전단층의 기울기는 접근하는 유동 조건에 따라 차이를 나타내는데, 대기경계층 속에 놓인 FC 의 경우가 균일유동인 경우에 비해 전단층이 보다 빨리 원주의 중간높이까지 내려가고 있으며 이로 인하여 재순환영역의 크기도 감소되어 짐을 알 수 있다. 이것은 접근하는 대기경계층 유동의 난류강도가 균일유동의 경우보다 높아 원주 양쪽 표면에서의 박리점을 후방으로 지연시켜 원주 후방에 생성되는 와형성영역의 크기를 감소시키기 때문으로 생각되어진다. 이는 원주의 중간높이($Z/L=0.5$)에서 근접후류 영역을 가시화한 결과인 Fig. 5 에 잘 나타나 있다.

또한 원주의 바닥면 부근에서는 작은 물결모양의 유동구조를 볼 수 있는데, 이것은 원주와 바닥면이 만나는 지점에 말굽형과 존재하고 있음을 나타낸다. 그러나 이러한 말굽형와는 바닥면 근처에서만 존재하며 상부로 올라가게 되면 와의 크기가 급격히 작아지면서 후류에 미치는 영향은 크게 감소되어진다.

Fig. 6 은 자유단 상부에서 YZ 평면을 조명한 후, 원주의 후방 $X/D=0, 0.25, 0.6$ 인 지점에서 유동을 가시화한 결과이다. 여기서 보면 자유단의 상부에

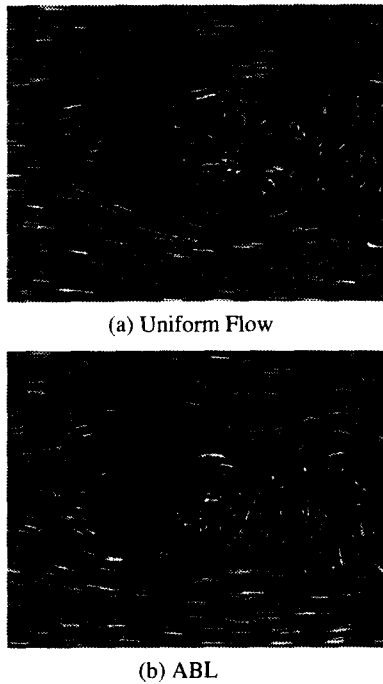


Fig. 5 Top view of wake behind $L/D=6$ finite cylinder at mid-height of the FC ($Z/L=0.5$)

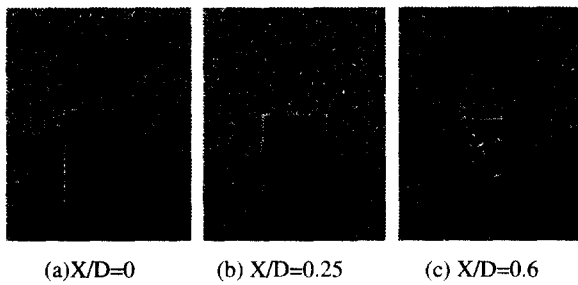


Fig. 6 Cross-sectional flow visualization near the free end of $L/D=6$ cylinder in ABL (counter-rotating twin-vortex)

서는 자유단을 지나면서 박리된 전단유동이 서로 반대 방향으로 회전하는 와동쌍(vortex pair)을 이루고, 와동쌍은 원주 양편에서 근접후류 내부로 규칙적으로 유입되는 유동과 서로 혼합되어 꼬이면서 회전하며, 원주후류의 중앙부분으로 하강하는 유동형태를 이루고 있다.

이 와동쌍은 원주후류의 중앙단면($Y/D=0$)을 기준으로 서로 대칭적이며 크기가 비슷하다. 이러한 와동쌍은 삼각날개(delta wing)의 끝단에서 발생하는 와동쌍과 유사하게 왼쪽의 와는 시계방향, 오른쪽의 와는 반시계방향으로 회전하고 있으며 버섯형 와류구조라고 언급되고 있다.^(9, 12)

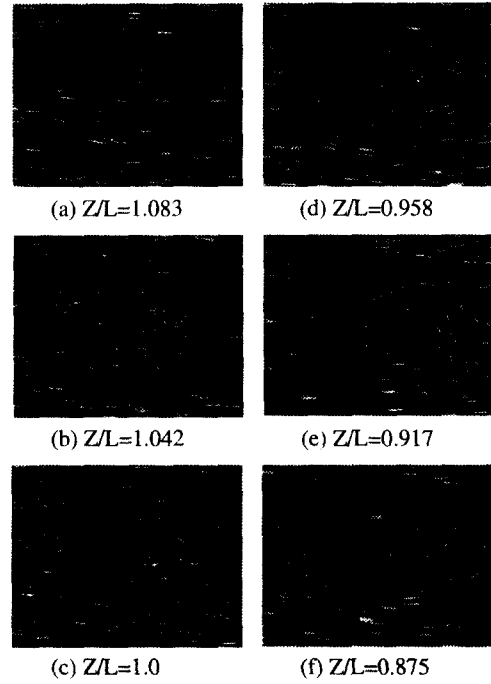


Fig. 7 Top view of visualized flow near the FC free end ($L/D=6$, ABL)

Fig. 7 은 자유단 주위의 유동단면을 수평으로 조명한 후, 조명의 높이를 $Z/L=1.083$ 에서 $Z/L=0.875$ 로 이동시키면서 유동을 가시화한 결과이다. Fig. 7(c)는 접근하는 자유흐름이 원주의 자유단을 지나면서 자유단의 위로 상승하고 있음을 보여주고 있으며, Fig. 7(c)~(e)는 박리유동이 후류의 중심을 따라 하강하게 되어 원주 축을 따라 아래로 내려가면서 재순환영역이 커지고 있음을 나타내고 있다.

또한, 자유단 주위의 유동은 전체적으로 후류의 중앙단면($Y/D=0$)을 중심으로 거의 대칭적 형태를 이루고 있다. 그러나 이러한 재순환영역은 Fig. 5 에서처럼 원주의 중간높이보다 아랫부분으로 내려가게 되면 원주의 양편에서 교대로 유출되는 주기적인 응집구조가 강해지게 되어 비대칭 형태의 와류출이 이루어지게 된다.

3.2 와류출주파수

2 차원 원주의 경우, 근접후류에서 원주축과 평행하게 유출되는 큰 규모의 와가 형성되는데 이러한 와는 일정한 주기를 가지고 있다. 그러나 FC의 경우는 자유단 근처에서 하강하는 박리유동의 영향으로 2 차원 원주와는 다른 와류출 특성을 보인다. 특히 수직방향으로 평균속도 및 난류강도

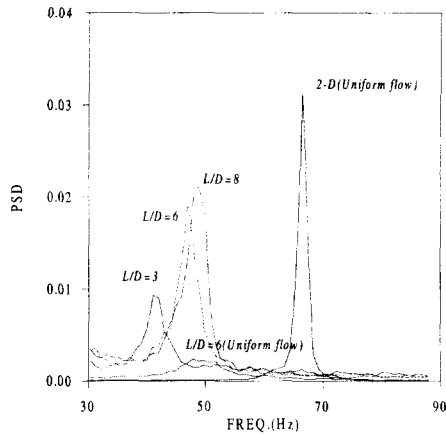


Fig. 8 Comparison of vortex shedding frequencies measured at $X/D=3$, $Y/D=2$ and $Z/L=0.5$

구배가 존재하는 대기경계층 내에서는 전혀 다른 유동형태를 가지게 됨을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 열선유속계를 사용하여 원주의 형상비 (L/D)를 변화시켜 가면서 와유출 주파수를 측정하고 2 차원 원주 및 균일유동 조건에서 측정된 자유단 원주에 대한 결과와 비교하였다.

Fig. 8 은 원주의 형상비 변화에 따른 와유출 주파수 변화를 알아보기 위하여 후류의 한 위치 ($X/D=3$, $Y/D=2$, $Z/L=0.5$)에서 속도신호를 연속적으로 측정하여 파워 스펙트럼밀도(Power Spectral Density, PSD)를 분석한 결과이다. 2 차원 원주의 경우 스트로틀수는 0.198 로 기존의 연구결과들과 잘 일치하고 있다. 또한 와유출 주파수가 원주의 중간높이에서 측정되었으므로 바닥면 근처에서 발생하는 말굽형과의 영향은 매우 작다고 가정할 수 있다.

자유단 원주의 경우, 와유출 주파수는 2 차원(2-D) 원주의 와유출 주파수 66.4Hz 에 비해 크게 감소하였다. 형상비가 $L/D=3, 6, 8$ 인 FC 의 와유출 주파수는 41Hz, 46.9Hz, 48.8Hz 로 형상비가 감소함에 따라 와유출 주파수가 감소되어진다. 이러한 와유출주파수의 감소는 자유단 원주의 형상비가 감소함에 따라 자유단에서 박리되어 아래쪽으로 유입되는 유동의 영향이 상대적으로 강해져 후류의 응집구조가 약해지기 때문이다. 그러나 형상비가 $L/D=6$ 인 FC 가 균일유동 속에 놓여있는 경우에는 PSD 값이 상대적으로 작게 나타났다. 이것은 대기경계층에 비해 균일유동의 난류강도가 매우 낮아 자유단에서 박리되어 하강하는 전단유동의 영향이 상대적으로 강해졌기 때문으로 생각되어진다.⁽¹³⁾

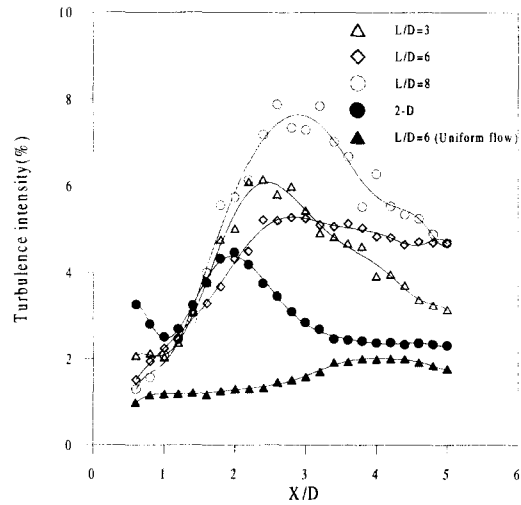


Fig. 9 Comparison of the vortex formation regions at $Z/L=0.5$

3.3 와형성영역

자유단을 지나면서 박리되어진 유동은 후류의 유동구조뿐만 아니라 와형성영역에도 변화를 주게 된다. 본 연구에서는 주유동방향의 난류강도가 최대값을 갖는 지점을 와형성영역의 끝으로 정의하고 1-형 열선프로브를 후류 중심선을 따라 일정 간격으로 이송시키면서 와형성영역 길이를 측정하였다. 열선유속계로 재순환유동을 측정할 경우, 평균속도값에 오차가 존재할 수 있으나 측정하고자 하는 유동의 속도변동성분의 주파수 특성은 그대로 나타나며, 절대값의 상대적 비교는 가능하다. 본 연구와 관련된 기존의 연구에서도 열선유속계를 사용하여 원주후류 영역에서 속도변동성분의 최대값 위치를 기준으로 와형성영역을 효과적으로 해석해오고 있다.⁽¹⁴⁾

속도신호는 디지털 필터를 이용하여 와유출 주파수의 두배로 변동하는 속도성분만을 취득하였는데, 이것은 원주 양편에서 교대로 유출되는 와류의 영향으로 후류 중심선에서는 특성 주파수가 두배가 되기 때문이다.

Fig. 9 는 원주의 중간높이($Z/L=0.5$)에서 후류의 중심선을 따라 측정한 난류강도 분포를 나타내고 있다. 와형성영역의 길이는 FC 의 경우가 2 차원 원주에 비해 상대적으로 크게 나타난다. 또한, 균일유동 속에 놓인 FC 의 경우는 와형성영역의 길이가 길어지고 와형성영역의 경계가 무딘 형태로 분포되어져 있다.

그러나 대기경계층의 경우에는 접근하는 유동의 난류강도가 크기 때문에 원주상에서 박리점이 후퇴하며 후류의 폭도 감소하고 와형성영역의 길이도 줄어들게 된다. 또한

난류강도의 값 자체도 균일유동에 비해 큰 값을 가지는데, 형상비가 큰 $L/D=8$ 조건에서 가장 큰 값을 보여주고 있다. 그러나 대기경계층 하에서 형상비 변화에 따른 와형성영역 길이의 변화는 상대적으로 작게 나타났다. 이러한 와형성영역 길이의 변화는 앞에서 기술한 유동가시화 결과와도 잘 일치하고 있다.

Fig. 10 은 대기경계층 내에 놓인 형상비가 $L/D=6$ 인 FC 후류 중앙단면($Y/D=0$)에서 원주의 축을 따라서 수직방향으로 측정된 난류강도 분포를 보여주고 있다. 자유단에 가까운 일부분을 제외하고 전체적으로 난류강도 및 와형성영역의 길

이가 2 차원 원주의 경우에 비해 상대적으로 크게 나타난다. 특히, 원주의 하부에서 윗쪽으로 갈수록 와형성영역의 길이는 조금씩 증가되었다.

그러나 자유단 가까이로 접근하면서 난류강도 및 와형성영역의 길이는 크게 감소되어진다. 이것은 자유단 상부에 형성된 전단 와동쌍이 자유단을 지나면서 급격히 후류의 중심선을 따라 하강하기 때문이다. 따라서 자유단 부근에서는 원주의 양면에서 교대로 유출되는 규칙적인 와유출이 사라지게 되고 와형성영역의 끝점도 구별하기가 어렵게 됨을 알 수 있다.

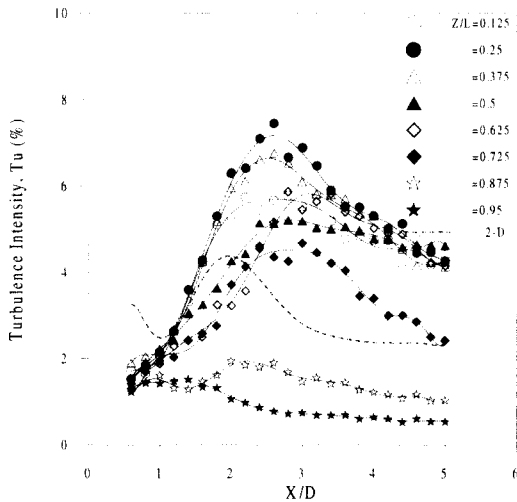


Fig. 10 Streamwise turbulence intensity distributions of wake behind the finite cylinder of $L/D=6$ in ABL along the wake centerline

3.4 속도 및 난류강도 분포

Fig. 11 은 $X/D=5, Z/L=0.5$ 위치에서 측정된 주유동방향 평균속도 및 난류강도 분포를 보여주고 있다. 평균속도는 후류 중심부에서 큰 속도감소를 보여주고 있으며, FC의 경우가 2 차원 원주에 비해 후류의 폭의 변화도 상대적으로 크게 나타났다. 특히, 대기경계층 내에 놓인 형상비가 $L/D=8$ 인 FC 가 가장 큰 속도결손을 보여주고 있다.

이렇게 FC 가 2 차원 원주에 비해 후류의 속도결손이 크게 나타나는 이유는 자유단에서 박리된 전단유동이 후류 중심을 따라 하강하게 됨에 따라 주유동방향의 속도성분이 감소하기 때문으로 생각되어진다.

그러나, 형상비가 큰 FC 와는 달리, 형상비가 작은 $L/D=3$ 인 FC 의 경우에는 와형성영역의 길이가 짧고, $X/D=5$ 위치에서 주유동방향 속도성분이 크게 회복되고 있다. 이것은 형상비가 작아 원주 양옆에서 교대로 유출되는 응집구조보다 자유단에서 박리된 전단유동의

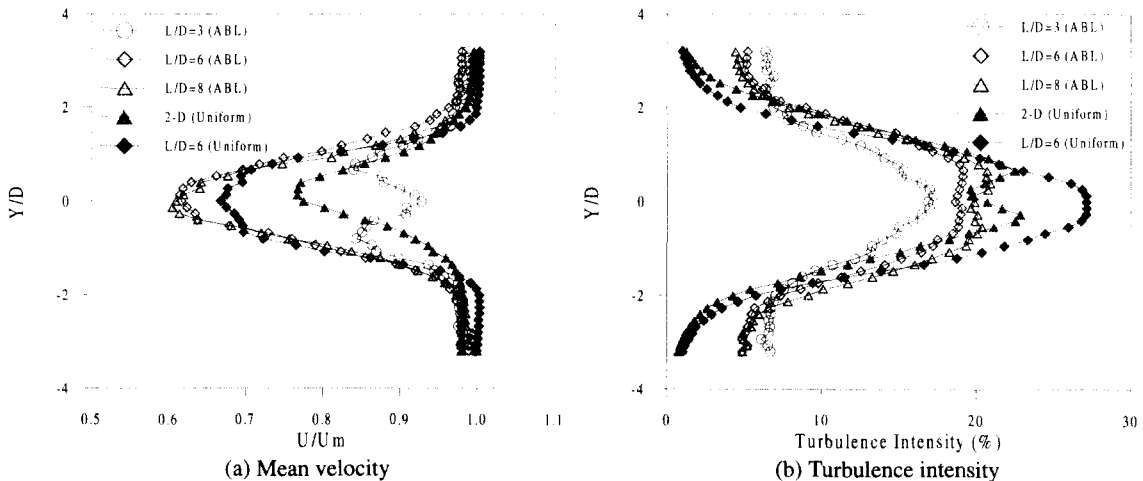


Fig. 11 Mean velocity and turbulence intensity profiles of streamwise velocity component measured at $X/D=5$ and $Z/L=0.5$

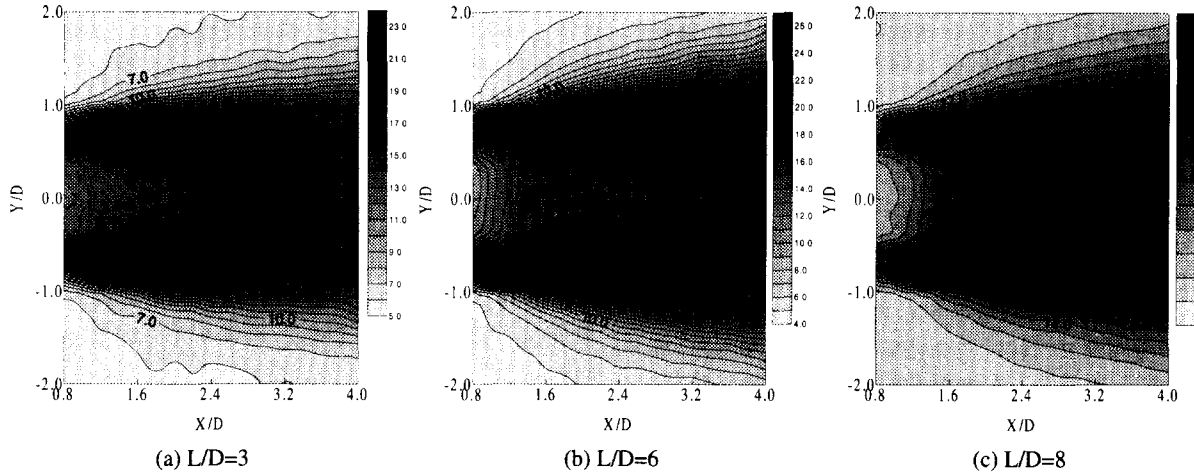


Fig. 12 Turbulence intensity distributions behind the finite cylinders at $Z/L=0.5$

영향을 크게 받고, 박리된 전단유동이 하류로 나아가면서 원주의 하부에서 생성된 말굽형와(horseshoe vortex)와 혼합됨에 따라 형상비가 큰 FC에 비해 후류 중간높이 ($Z/L=0.5$) 부분에서 유속이 크게 증가되기 때문으로 생각된다. 형상비 낮은 $L/D=3$ 의 경우, 다른 형상비의 FC에 비해 난류강도분포도 낮은 값을 갖는 것으로 나타났다.

2차원 원주의 경우 난류강도분포는 후류 중심축을 기준으로 양쪽에 이중 정점(double peak)이 나타난다. 그러나 자유단 원주의 경우는 자유단으로부터 후류중심으로 유입되는 박리전단유동과의 혼합으로 인해 이중정점(double peak)이 사라지고 후류중심 영역에서 편평한 형태의 난류강도분포를 보여주고 있다. 이것은 2차원 원주 후류에서 와유출에 기인한 응집구조가 지배적인데 비해 FC의 경우 자유단 상부로부터 하강하는 높은 난류강도의 박리전단층의 영향이 보다 지배적이기 때문이다. 특히, 대기경계층 내부에 놓인 FC의 경우, 원주의 형상비가 증가할수록 난류강도값이 커지며, 후류의 폭과 와형성영역의 길이가 증가한다. 그러나, 형상비가 $L/D=6$ 인 FC의 경우를 비교해 보면 대기경계층 내에 놓였을 때 난류강도의 최대값은 균일유동에 놓인 경우보다 작은 값을 가졌다.

Fig. 12는 원주의 중간높이($Z/L=0.5$)에서 측정된 주유동방향 속도성분의 난류강도분포를 나타낸 것이다. 후류의 폭은 일반적으로 와형성영역의 끝에서 난류강도가 가장 큰 지점 사이의 측면거리로 정의되는데, 대기경계층 내에 놓인 FC의 경우, 형상비 변화에 따른 후류의 폭 변화는 상대적으로 적은 것으로 나타났다. 그러나 후류 중심부에서의 난류강도분포는 하류로 나아가거나 형상비가 커짐에 따라 난류강도값이 증가되어진다. 전체적으로

원주의 양쪽면에서 유출되는 전단층의 기울기와 후류의 크기와 형태는 본 연구에서 다른 형상비 변화 범위내에서 차이가 크지 않은 것으로 나타났다.

3.5 주파수해석

Fig. 13은 대기경계층 내에 놓인 FC의 자유단에 가까운 $Z/L=0.95$ 높이에서 후류 중앙선을 따라 측정된 주유동방향 속도성분의 PSD 분포를 나타낸다. 본 연구에 앞서 수행된 연구에서 Park⁽¹⁰⁾ 등은 균일유동 속에 놓인 FC의 경우, 자유단 상부에 서로 위상차가 없이 서로 반대 방향으로 회전하는 와동쌍이 형성되며, 유출 주파수가 24Hz임을 밝혔다. 그런데 이 24Hz 성분은 2차원 원주 후류에서 나타나는 주기적인 와유출 주파수와는 성질이 다른 것으로 자유단 근처에서만 나타난다.

주유동방향 속도성분의 수직방향 PSD 분포를 보면 자유단 근처에서 존재하는 24Hz 성분이 하류로 나아가면서 크게 약화되어짐을 알 수 있다. 이것은 자유단에서 박리된 와동쌍이 하류로 나아가감에 따라 후류 중앙부분으로 급격히 하강하여 24Hz 성분이 사라지기 때문이다. 따라서 원주 하단으로 내려가면서 이러한 24Hz 성분은 약화되어지고, 원주의 양편에서 규칙적으로 유출되는 응집구조가 지배적으로 되면서 와유출 주파수에서의 PSD 값이 점차 증가하게 된다.⁽¹³⁾ 형상비에 따른 주파수 특성의 변화는 적은 것으로 나타났다.

그리고 대기경계층 내에 놓인 자유단 원주의 경우는 접근하는 유동의 난류강도가 높아 자유단 근처에서 24Hz 성분이 상대적으로 약화된 것으로 보인다.

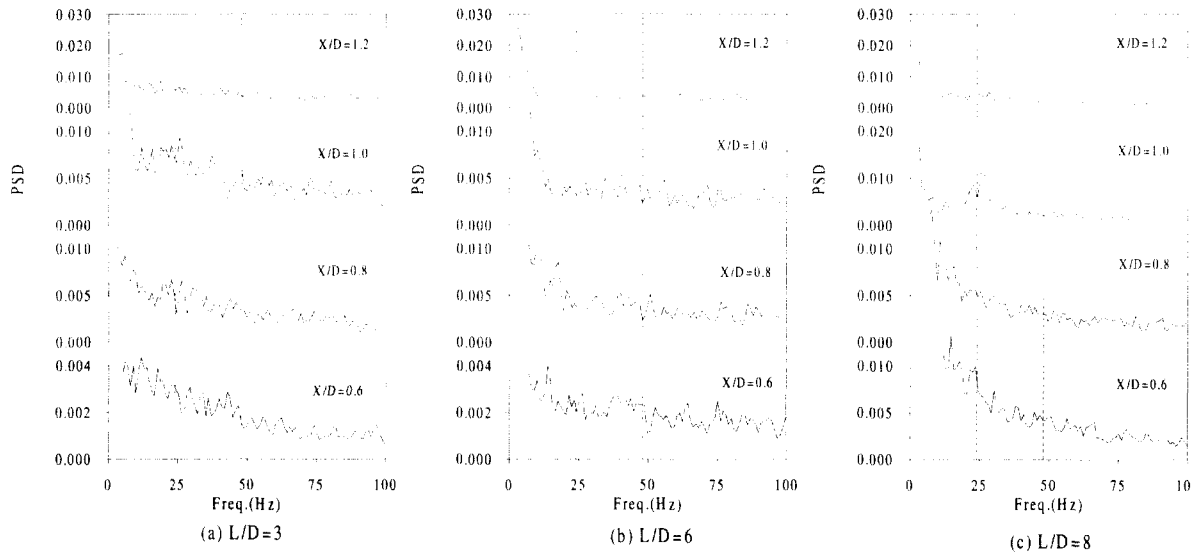


Fig. 13 Power spectral density distributions along the wake centerline of finite cylinders at $Z/L=0.95$

3.6 표면압력

Fig. 14 는 대기경계층 내에 놓인 형상비가 $L/D=3, 6$ 인 FC 의 자유단 상부로부터 아래로 일정간격으로 내려가면서 측정한 원주의 평균압력분포를 보여주고 있다. 자유단 원주의 정체점($\theta=0^\circ$)의 압력분포를 보면 원주의 중간 높이로 내려갈수록 평균압력이 조금씩 감소하고 있다. 이것은 접근하는 대기경계층 유동이 수직방향으로 속도구배를 가지고 있기 때문이며, 균일유동 조건하에서 정체점 압력이 일정하게 나타나는 것과 대조를 보여주고 있다.

원주 전면(windward surface)에서는 자유단에 가까운 부분의 평균압력이 원주의 중간 높이에서의 평균압력보다 많이 감소하는데, 형상비(L/D)가 클수록 전면에서의 압력차이는 크게 나타나고 있다. 또한, 대기경계층 내에 놓인 FC 의 경우 접근하는 유동의 난류강도가 높기 때문에 박리점이 후퇴되어 원주의 중간 아래부분으로 갈수록 2 차원성을 회복하고 있음을 알 수 있다.

원주의 배면(leeward surface)에서는 형상비에 관계없이 자유단 근처로 갈수록 평균압력이 큰 음의 값을 가지게 된다. 이것은 원주 진방에서 가속되어 자유단 상부로 상승한 유동이 자유단 근처의 배면에서 하강되어지기 때문이다. 그러나 원주의 자유단에서 중간부분으로 내려갈수록 배면의 평균압력은 다시 증가하게 되는데, 이것은 원주의 중간부분에서는 원주 양면에서 규칙적으로 와가 유출되어 와형성영역이 존재하게 되어 배면압력이

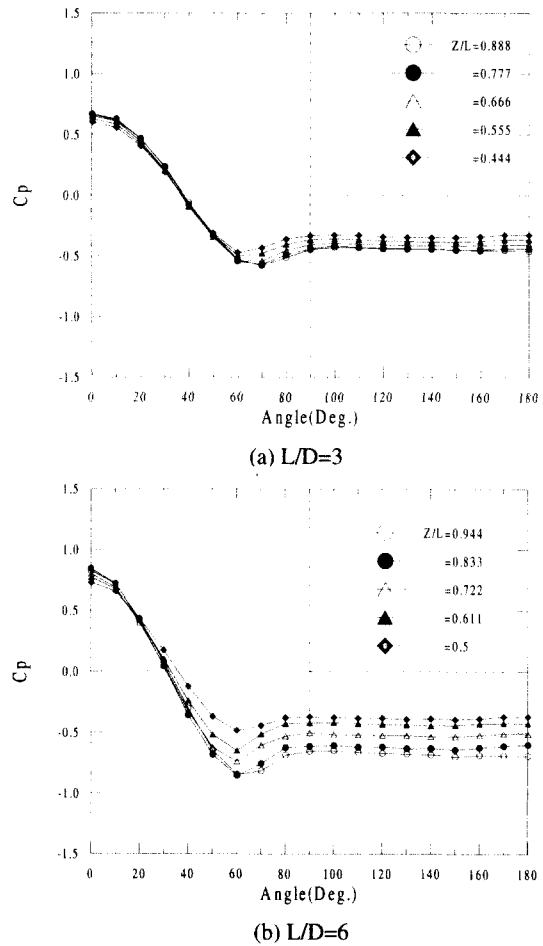


Fig. 14 Comparison of mean surface pressure distributions around the FC free end

다시 회복되기 때문이다. 그리고, 배면에서의 평균 압력 값의 증가폭은 형상비가 클수록 증가되어진다.

4. 결론

본 연구에서는 평활지형에 해당하는 대기경계층 내에 놓인 자유단 원주(FC)의 형상비 변화에 따른 자유단 원주의 후류 유동특성 변화를 실험적으로 연구하였으며 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 대기경계층 내부에 놓인 자유단 원주의 후류에서는 2 차원 원주와는 전혀 다른 3 차원성이 강한 유동특성이 나타난다.

(2) FC의 형상비(L/D)가 감소함에 따라 후류 중앙단면에서 와류출주파수는 감소하고, 와형성영역의 길이는 2 차원 원주에 비해 증가한다.

(3) 자유단 근처에서는 자유단으로부터 박리되어 하강하는 와동쌍의 영향으로 와형성영역이 붕괴되고 주기적인 와류출이 억제되어진다.

(4) 대기경계층 내에 놓인 FC의 경우, 균일유동의 경우에 비해 후류 중심영역에서 큰 속도결손을 가지나 난류강도는 오히려 작은 값을 나타낸다.

(5) 대기경계층 내에 놓인 FC의 정체점 압력은 접근유동의 수직방향 속도구배로 인해 자유단에서 원주 중간부분으로 갈수록 감소하고, 전면과 배면에서의 평균압력 값의 변동폭은 형상비가 클수록 증가한다.

후 기

본 연구는 국가지정연구실 (NRL) 사업 지원에 의하여 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Slaouti, A. and Gerrard, J. H., 1981, "An Experimental Investigation of the End Effects on the Wake of a Circular Cylinder Towed through Water at Low Reynolds Numbers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 112, pp. 297~314.
- (2) Williamson, C. H. K., 1989, "Oblique and Parallel Modes of Vortex Shedding in the Wake of a Circular Cylinder at Low Reynolds Numbers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 206, pp. 579~627.
- (3) Wieselsberger, C., 1923, "Versuche uber den Luftwiderstand Gerundeter und Kantiger Korper," *Ergebnisse Aerodyn. Versuchsanstalt Gottingen (ed. L Prandtl), II. Liferung*, p. 23.
- (4) Baban, F. and So, R. M. C., 1991, "Aspect Ratio Effect on Flow-induced Forces on Circular Cylinders in a Cross-flow," *Exp. in Fluids*, Vol. 10, pp. 313~321.
- (5) Okamoto, S. and Sunabashiri, Y., 1992, "Vortex Shedding from a Circular Cylinder of Finite Length Placed on a Ground Plane," *J. Fluids Eng.*, Vol. 114, pp. 512~521.
- (6) Farivar, D., 1981, "Turbulent Uniform Flow around Cylinders of Finite Length," *J. AIAA*, Vol. 19, pp. 275~281.
- (7) Zdravkovich, M. M., Brand, V. P., Mathew, G. and Weston, A., 1989, "Flow past Short Circular Cylinders with Two Free Ends," *J. Fluid Mech.*, Vol. 203, pp. 557~575.
- (8) Kareem, A. and Cheng, C. M., 1999, "Pressure and Force Fluctuations on Isolated Roughened Circular Cylinders of Finite Length in Boundary Layer flows," *J. Fluids & Structure.*, Vol. 13, pp. 907~933.
- (9) 노성철, 박승오, 2001, "평판에 고정된 유한 실린더 상면표면 주위에 형성되는 와류유동의 가시화," *대한기계학회논문집 B 권*, Vol. 25(1), pp. 71~77.
- (10) Park, C. W. and Lee, S. J., 2000, "Free end Effects on the Near Wake Flow Structure behind a Finite Circular Cylinder," *J. Wind Eng. & Ind. Aerodyn.*, Vol. 88, pp. 231~246.
- (11) Niemann, H. J., 1993, "The Boundary Layer Wind Tunnel: an Experimental Tool in Building Aerodynamics and Environmental Engineering," *J. Wind Eng. & Ind. Aerodyn.*, Vol. 48, pp. 145~161.
- (12) Kawamura, T., Hiwada, M., Hibino, T., Mabuchi, I. and Kumada, M., 1984, "Flow around a Finite Circular Cylinder on a Flat Plate," *Bulletin JSME*, Vol. 27, pp. 2142~2151.
- (13) 이상준, 정용삼, 1996, "자유단이 있는 원주의 후류 유동특성에 관한 실험적 연구," *대한기계학회논문집 B 권*, Vol. 20(6), pp. 2014~2022.
- (14) Szepessy, S. and Bearman, P. W., 1992, "Aspect Ratio and End Plate Effects on Vortex Shedding from a Circular Cylinder," *J. Fluid Mech.*, Vol. 234, pp. 191~217.