

# 대기경계층 내에 놓인 자유단 원주의 형상비가 후류유동에 미치는 영향에 관한 연구

박철우\* · 이상준\*\*

## 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 wake structures behind a 2-D cylinder and a finite cylinder located in a uniform flow were also 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 is decreased and the vortex formation length is increased compared to that of 2-D cylinder. Due to the descending counter-rotating twin-vortex, in the region near the FC free end, regular vortex shedding from the cylinder is suppressed and the vortex formation region is hardly established. In the wake center region, 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 : 역법칙계수

### 1. 서론

2 차원 원주는 기하학적으로 단순한 형상과 강한 응집구조 때문에 그동안 많은 연구가

\* 정회원, 포항공과대학교 기계공학과 대학원

\*\* 정회원, 포항공과대학교 기계공학과

수행되어져 왔다. 그러나 균일유동(uniform flow) 속에 놓여진 2 차원 물체의 후류도 완전한 2 차원성을 유지하기 어려우며, 심지어는 뚜렷한 와류출이 존재하는 낮은 레이놀즈수(Reynolds number)에서도 2 차원성이 유지되는 경우가 드물다.

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

Slaouti 등<sup>(1)</sup>은 원주후류가 2 차원성을 나타내기 위해서는 적어도 레이놀즈수가 80 이하이어야 한다고 하였다. 이처럼 엄밀하게 말하면 원주 후류는 거의 모든 레이놀즈수 범위에서 3 차원성을 나타낸다고 볼 수 있다.

이러한 2 차원 물체와는 달리 실제의 건축구조물들의 꼭대기는 자유단(free end) 형태로 대기경계층 유동에 노출되어 있으며, 이들 구조물의 후류 유동은 3 차원 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 부딪물체(bluffbody) 후류는 물체의 양쪽에서 뿐만 아니라 상부의 자유단에서도 유동이 박리되어진다. Williamson<sup>(2)</sup>은 낮은 레이놀즈수 범위내에서 스트로울수와 레이놀즈수 사이의 관계에서 불연속점이 존재하며, 접근유동의 불균일성 및 높은 난류강도 등으로 인하여 기울어진 형태의 와류출이 발생한다고 밝혔다.

Wieselsberger<sup>(3)</sup>는 평판위에 수직으로 세워진 자유단원주(finite cylinder with free end, 이후 FC로 표시) 후류의 3 차원성에 관하여 연구하였는데, 작은 형상비를 가진 유한실린더의 경우 항력이 감소되어진다고 하였다. Baban 등<sup>(4)</sup>은 FC 후류영역에서 매우 높은 난류성분을 가진 와형성영역이 존재하며 이로 인해 원주의 항력변동성분이 크게 증가되

어진다고 하였다.

이러한 선행연구들은 대부분 균일유동 내의 FC 후류를 다루고 있으며, 대기경계층 내에 놓여진 FC 후류 유동특성에 관한 연구는 아직 충분하지 못한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 대기경계층 내에 놓여진 자유단 원주의 형상비를 변화시켜 가면서 이들이 후류유동 및 표면압력 분포에 미치는 영향에 관하여 실험적으로 해석하고자 한다.

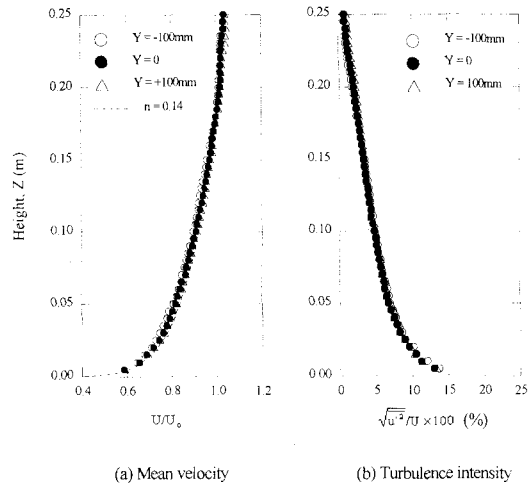


Fig. 2 Mean streamwise velocity and turbulence intensity profiles of ABL

## 2. 실험장치 및 방법

본 실험은 폐쇄회로형 POSTECH 아음속 풍동에서 수행되었는데, 시험부의 크기는 높이 0.6m, 폭 0.72m, 길이 6m 이다. 풍동시험부에 평활지형에 해당하는 대기경계층을 생성시키기 위하여 풍동시험부 입구에 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 ( $Re=U_0 D/\nu$ )는  $Re=20,000$  이다.

원주는 풍동바닥에서 57mm 떨어져 있는 평판 위에 설치되었는데, 설치위치는 30°의 날카로운 모서리를 가진 평판 선단으로부터 후방으로 3.9m 지점이다. Fig. 1 은 본 연구에 사용되어진 풍동의 시험부와 측정시스템을 나타낸 것이다.

Fig. 2 는 피도 정압관과 정온형 열선유속계(TSI IFA100)를 사용하여 FC 가 놓일 위치( $X=0$ )에서 측정된 대기경계층의 평균속도와 난류강도분포를 나타낸 것이다. 주유동방향 평균속도의 수직방향분포는 평활지형(open terrain)에 해당하는 전형적인 속도분포를 나타내며 다음과 같은 멱법칙(power law)에서 지수는  $n=0.14$  에 해당한다.

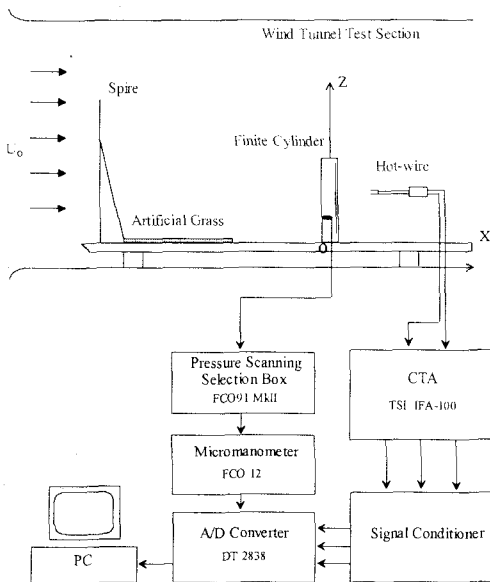


Fig. 1 Wind tunnel test section and measurement system

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

여기서  $h$  는 형상비가  $L/D=6$  인 원주의 높이(18cm)로 무차원화 하였다.

FC 의 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 FC 의 자유단 부근, 즉 중간높이 이상에서의 후류유동을 다루었으므로 이러한 말굽형와의 영향은 매우 적으며 거의 무시할 수 있는 것으로 알려져 있다. Fig. 3 은 본 연구에서 사용한 실험장치와 좌표계를 보여주고 있다.

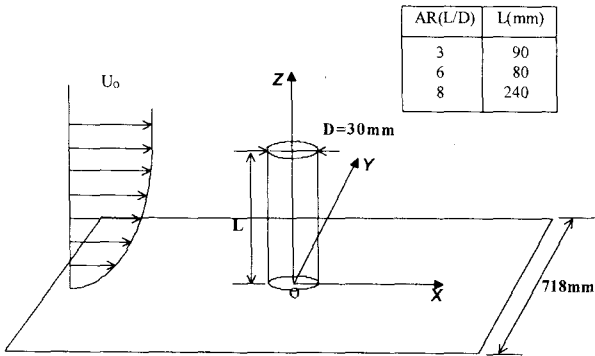


Fig. 3 Experimental set-up and coordinate system

후류의 속도측정에는 I-형과 X-형의 열선 프로우브와 정온형 열선유속계를 사용하였다. 속도데이터는 각 측정지점에서 초당 2,000 개의 비율로 32,000 개의 데이터를 취득하였다.

그리고 압력공을 자유단으로부터 5mm 간격으로 원주의 중간높이까지 배치하였고 원주를 반시계방향으로 10 도 간격으로 회전시키면서 표면압력을 측정하였다. 표면압력은 다점압력선택기에 연결되어진 마이크로 마노미터(FC012)와 A/D 변환기(DT2838) 를 사용하여 측정하였다. 압력변환기로부터 나온 전압시그날은 200Hz 저역(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 평균하였다.

원주 표면에서의 압력계수  $C_p$  는 측정된

표면압력  $P$  와 기준 정압(static pressure)  $P_0$  와의 압력차를 평균유속  $U_0$  와 공기밀도  $\rho$  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 피토 정압관을 설치하여 구하였는데, 이곳은 모형의 영향이 적은 비점성 유동 구간으로 간주되어진다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 와유출주파수

Fig. 4 는 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 스펙트럼 분석한 결과이다. 2 차원 원주의 경우 스트로울수는 0.198 로 기존의 연구결과들과 잘 일치하고 있다. 또한 와유출 주파수가 원주의 중간높이에서 측정되었으므로 바닥면 근처에서 발생하는 말굽형와의 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

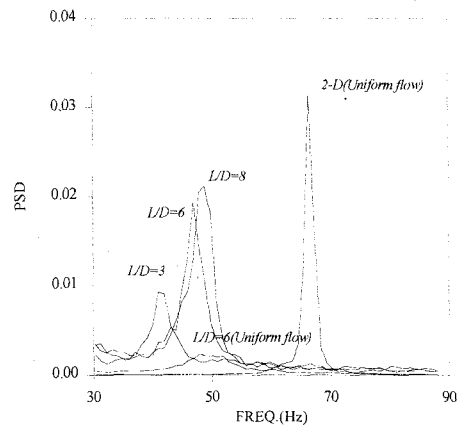


Fig. 4 Comparison of vortex shedding frequency ( $X/D=3, Y/D=2, Z/L=0.5$ )

감소함에 따라 자유단에서 박리되어 아래쪽으로 유입되는 유동의 영향이 상대적으로 강해지게 되어 후류의 응집구조가 약해지기 때문이다.

### 3.2 와형성영역

자유단을 지나면서 박리되어진 유동은 후류의 유동구조뿐만 아니라 와형성영역에도 변화를 주게 된다. 본 연구에서는 주유동방향의 난류강도가 최대값을 갖는 지점을 와형성영역의 끝으로 정의하고 I-형 열선프로브를 후류 중심선을 따라 일정 간격으로 이송시키면서 와형성영역 길이를 측정하였다.

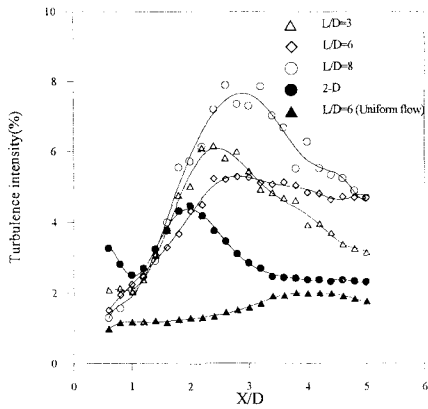


Fig. 5 Comparison of vortex formation region ( $Z/L=0.5$ )

Fig. 5 는 원주의 중간높이( $Z/L=0.5$ )에서 후류의 중심선을 따라 측정한 난류강도 분포를 나타내고 있다. 와형성영역의 길이는 FC의 경우가 2차원 원주에 비해 상대적으로 크게 나타난다. 또한, 균일유동 속에 놓인 FC의 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.

### 3.3 속도 및 난류강도 분포

Fig. 6 은  $X/D=5$ ,  $Z/L=0.5$  위치에서 측정한 주유동방향 평균속도 및 난류강도 분포를 보여주고 있다. 평균속도는 후류 중심부에서 큰 속도감소를 보여주고 있으며, FC의 경우가 2차원 원주에 비해 후류의 폭의 변화도 상대적으로 크게 나타났다. 특히, 대기경계층 내에 놓인 형상비가  $L/D=8$ 인 FC가 가장 큰 속도결손을 보여주고 있다.

형상비가 큰 FC와는 달리, 형상비가  $L/D=3$ 인 FC의 경우에는 와형성영역의 길이가 크게 감소되고,  $X/D=5$  위치 부근에서 주유동방향 속도성분이 크게 회복되고 있다. 이것은 원주 양옆에서 교대로 유출되는 응집구조가 자유단에서 박리된 전단유동에 비해 지배적인 영향을 미침에 따라 후류 중앙 부분에서 유속이 크게 증가되고 있음을 알 수 있다. 형상비 낮은  $L/D=3$ 의 경우, 다른 형상비의 FC에 비해 난류강도분포도 낮은 값의 난류강도를 갖는 것으로 나타났다. 대기경계층 내부에 놓인 FC의 경우, 원주의 형상비가 증가할수록 난류강도값이 커지며, 후류의 폭과 와형성영역의 길이가 증가한다. 그러나, 형상비가  $L/D=6$ 인 FC의 경우를 비교해보면 대기경계층 내에 놓였을 때 난류강도의 최대값은 균일유동에 놓인 경우보다 작은 값을 가졌다.

Fig. 7 은 원주의 중간높이( $Z/L=0.5$ )에서 측정한 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

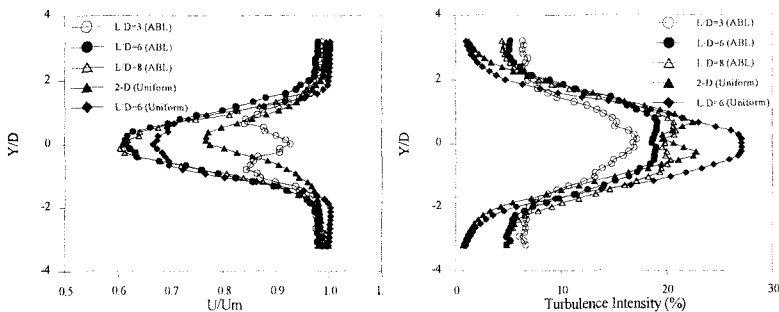


Fig. 6 Mean velocity and turbulence intensity profiles of streamwise velocity component ( $X/D=5$ ,  $Z/L=0.5$ )

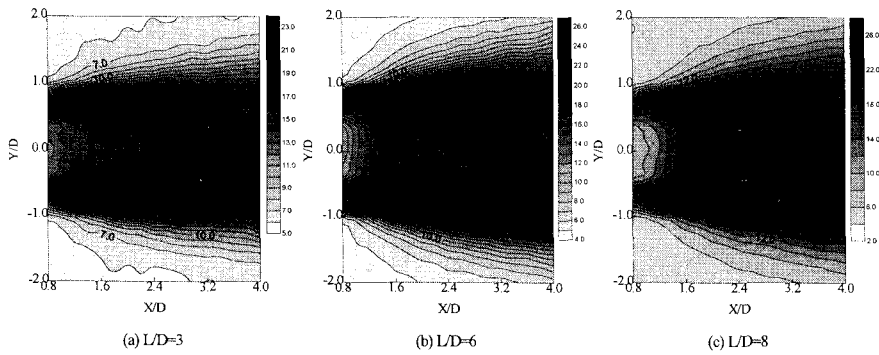


Fig. 7 Turbulence intensity distributions behind the FC ( $Z/L=0.5$ )

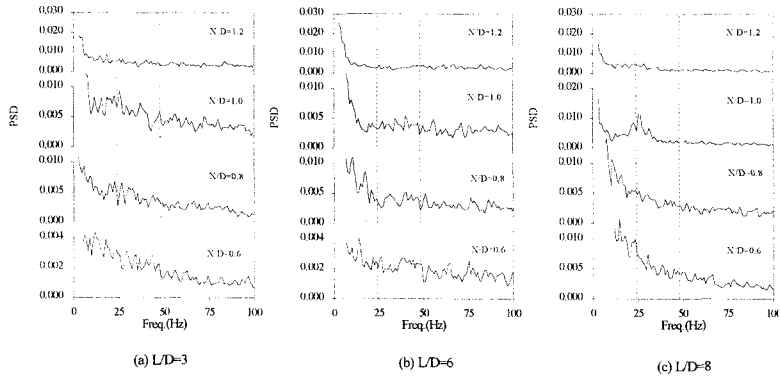


Fig. 8 Power spectral density distributions along the wake centerline ( $Z/L=0.95$ )

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 않는 것으로 나타났다.

### 3.4 주파수해석

Fig. 8 은 대기경계층 내에 놓인 FC의 자유단에서 가까운  $Z/L=0.95$  높이에서 후류 중앙선을 따라 측정된 주유동방향 속도성분의 PSD 분포를 나타낸다. 본 연구에 앞서 수행된 연구에서 Park<sup>(5)</sup> 등은 균일유동 속에 놓인 FC의 경우, 자유단 상부에 형성된 반대 방향으로 회전하는 와동쌍은 서로 위상차가 없으며 유출되는 주파수는 24Hz 임을 밝혔다. 그런데 이 24Hz 성분은 2 차원 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 후류 중앙부분으로 급격히 하강하기 때문에, 하류로 나아감에 따라 24Hz 성분이 사라지기 때문이며, 형상비에 따른 변화는 적은 것으로 나타났다.

### 3.5 표면압력

Fig. 9 는 대기경계층 내에 놓인 형상비가  $L/D=3, 6$  인 FC의 자유단 상부로부터 아래로 일정간격으로 내려가면서 측정한 원주의 평균압력분포를 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.

원주의 배면(leeward surface)에서는 형상비에 관계없이 자유단 근처로 갈수록 평균압력이 더욱 큰 음의 값을 가지게 된다. 이것은 원주 전방에서 가속되어 자유단 상부로 상승한 유동이 자유단 근처의 배면에서 하강되어지기 때문이다. 그러나 원주의 자유단에서 중간부분으로 내려갈수록 배면의 평균압력은 다시 증가하게 되는데, 이것은 원주의

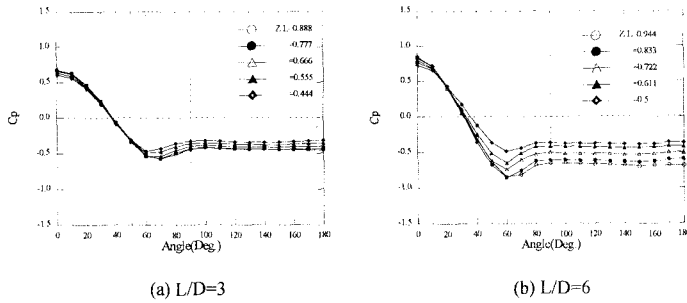


Fig. 9 Comparison of mean pressure distributions around the FC free end

중간부분에서는 원주 양편에서 규칙적으로 와가 유출되어 와형성영역이 존재하게 되어 배면압력이 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 와유출주파수는 감소하고, 와형성영역의 길이는 2 차원 원주에 비해 증가한다.
- (3) 자유단 근처에서는 자유단으로부터 박리되어 하강하는 와동쌍의 영향으로 와형성영역이 붕괴되고 주기적인 와유출이 억제되어진다.
- (4) 대기경계층 내에 놓인 FC의 경우, 균일 유동의 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 NRL(National Research Laboratory) 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.*, 112, 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.*, 206, 579-627.
- (3) Wieselsberger C., Versuche uber den luftwiderstand gerundeter und kantiger korper, *Ergebnisse Aerodyn. Versuchsanstalt Gottingen* (ed. L Prandtl), II. Liferung, (1923) 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*, 10, 313-321.
- (5) 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.*, 88, 231-246.