

대기경계층 내에 놓인 실린더의 자유단 형상변화가 후류유동에 미치는 영향에 관한 연구

박철우* · 이상준†

(2002년 9월 17일 접수, 2002년 11월 28일 심사완료)

Effect of Free End Shape on Wake Structure Around a Finite 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 structure around the free end of a finite circular cylinder (FC) embedded in an atmospheric boundary layer (ABL) over open terrain was investigated experimentally with varying the free end shape. The experiments were carried out in a closed-return type subsonic wind tunnel. A finite cylinder with an aspect ratio (L/D) of 6 was mounted vertically on a long flat plate. The Reynolds number based on the cylinder diameter is about $Re=7,500$. The velocity fields near the FC free end were measured using the single-frame double-exposure PIV method. As a result, for the FC with a right-angled free end, there is a peculiar vortical structure, showing counter-rotating twin vortices near the FC free end. It is caused by the interaction between the entrained irrotational fluids from both sides of FC and the downwash flow from the FC free-end.

기호설명

- Re : 레이놀즈수 ($Re=U_0D/v$)
- L : 원주 높이
- D : 원주 직경
- ABL : 대기경계층
- n : 먹법칙계수
- δ : 경계층 두께
- Δt : 시간간격
- T_u : 주류동방향 난류강도
- TKE : 난류운동에너지
- U_0 : 자유흐름속도

1. 서론

원주 주위의 흐름은 기하학적으로 단순한 형상과

후류의 강한 응집구조(coherent structure) 때문에 그동안 많은 연구가 수행되어 왔다. 그러나 균일유동(uniform flow) 속에 놓여진 2차원 물체의 후류도 완전한 2차원성을 유지하기 어려우며, 뚜렷한 와류출이 일어나는 낮은 레이놀즈수 조건에서도 2차원성이 유지되는 경우가 드물다.^(1,2)

원주 후류의 3차원성(three-dimensionality)은 보통 경사진 와류출이나 기울어진 파도형태의 와(vortex)로 나타나는데, 레이놀즈수가 증가함에 따라 이러한 3차원성은 더욱 커지게 된다. Slaouti 등⁽³⁾은 원주후류가 2차원성을 갖기 위해서는 적어도 레이놀즈수가 80 이하이어야 한다고 하였다. 따라서 엄밀한 의미에서 원주 후류는 대부분 3차원성을 나타낸다고 볼 수 있다.

그러나 2차원 원주의 근접 후류에서는 와류출이 원주에 평행하게 규칙적으로 일어나며 와류출과 원주 후방에 형성된 와형성영역 때문에 원주후류의 3차원성이 약화되어진다. 따라서, 끝판(end plate)을 적절히 사용하거나 원주의

* 회원, 포항공과대학교 기계산업공학부 연구원

† 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과

E-mail : sjlee@postech.ac.kr

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

길이를 직경에 비해 충분히 길게하여 원주 후류의 응집구조가 잘 유지되고 스트롤수(Strouhal number)가 변하지 않게 하면 원주 후류가 2차원성을 갖는다고 가정할 수 있다.

이러한 2차원 원주와는 달리 실제 건축 구조물들의 꼭대기는 자유단(free end) 형태로 대기경계층 유동에 노출되어 있으며, 이들 구조물 주위유동은 매우 복잡한 3차원 유동특성을 가지게 된다. 특히, 자유단을 가진 세장형의 길쭉한 물체의 후류는 물체의 양측면 뿐만 아니라 상부의 자유단에서도 유동이 박리되어진다. 따라서, 대기경계층 속에 놓인 자유단을 가진 물체 후류에 관한 연구는 실제 응용적인 면에서 매우 중요하다고 할 수 있다. 또한, 고층 빌딩이나 냉각탑과 같은 구조물들을 설계할 때에는, 물체에 작용하는 풍하중이나 자유단 주위 유동에 기인한 진동 등을 고려해 주어야 한다.

Williamson⁽¹⁾은 낮은 레이놀즈수 범위내에서 스트롤수와 레이놀즈수 사이의 관계에서 불연속점이 존재하며, 접근유동의 불균일성 및 높은 난류강도 등으로 인하여 기울어진 형태의 와류출이 발생한다고 하였다. Wieselsberger⁽⁴⁾는 평판위에 수직으로 세워진 유한실린더(Finite Cylinder, 이후 FC로 표시) 후류의 3차원성에 관하여 연구하였는데, 작은 형상비(aspect ratio)를 가진 FC의 경우 항력이 감소된다고 하였다. Baban 등⁽⁵⁾은 FC후류 영역에서 매우 높은 난류성분을

가진 와형성영역이 존재하며 이로 인해 원주의 항력변동성분이 크게 증가된다고 하였다. Okamoto 등⁽⁶⁾은 작은 형상비(L/D=1~2)의 자유단 원주의 경우, 대칭적인 후류구조를 가지며, 형상비가 4보다 클 경우 후류 구조가 변화되어 3차원성을 가진다고 밝혔다.

Farivar⁽⁷⁾는 균일유동 속에 놓인 FC후류 유동에 관한 연구를 통하여 형상비가 7.5 이하 일 때 주기적인 와류출이 사라진다고 하였다. 또한, Kareem 등⁽⁸⁾은 경계층 내에 놓여진 거친 표면의 FC에 작용하는 압력변동성분의 시간적-공간적 특성을 연구하였는데, 접근 유동의 난류강도가 압력장 변화에 크게 영향을 미친다고 하였다. 노⁽⁹⁾ 등은 작은 형상비를 가진 FC 자유단 상부에 형성된 와류유동을 가시화 기법을 이용하여 연구하였다. 실린더 형상과 관련하여 Choi⁽¹⁰⁾ 등은 사각실린더의 코너(corner)를 직각에서 개단형으로 변화시킨 경우에 대한 공기역학 및 진동특성을 연구하였다.

그리고 Price 등⁽¹¹⁾이 PIV(Particle Image Velocimetry) 속도장 측정기법과 유동가시화 기법을 사용하여, 2차원 원주와 벽면 사이의 간격을 변화시켜가면서 원주 주위의 전체 유동장에 관하여 연구하였다. Kahraman 등⁽¹²⁾은 얇은 수면에 수직으로 설치된 원주 주위 유동을 해석하였다.

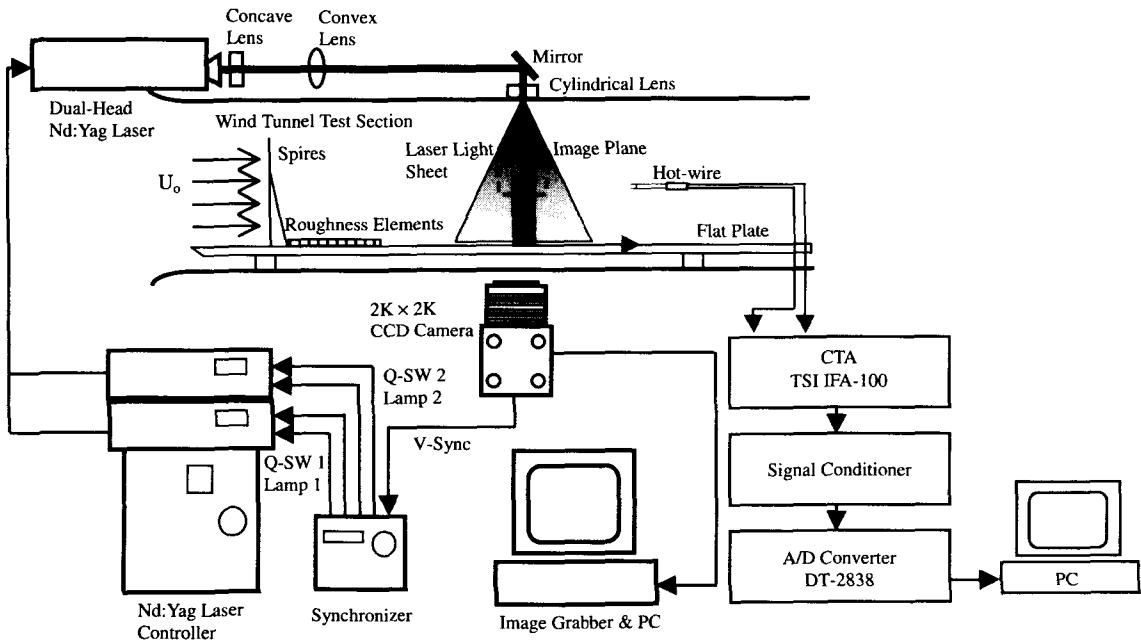


Fig. 1 Wind tunnel test section and measurement system

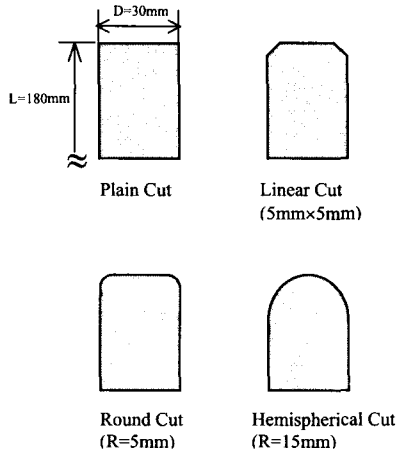


Fig. 2 Tip configurations of four finite cylinder models

이처럼 대부분의 선행연구들은 균일유동 내에 놓인 2차원 원주 혹은 FC 후류를 다루고 있으며, 특히 대기경계층 내에 놓여진 FC 자유단 주위 유동특성에 관한 연구는 아직 충분히 이루어지지 못한 실정이다. 본 연구에 앞서 수행된 연구^(13, 14)에서는 균일유동 및 대기경계층 내에 놓인 단일 형상비를 가진 FC 후류의 유동특성을 연구하였는데, 대기경계층 내에서 평균속도 및 난류강도는 수직방향 구배를 가지게 되어 와형성영역, 속도결손 및 표면압력 등이 균일유동 속에 놓인 원주 후류의 경우와는 다름을 밝혔다. 또한 유동이 FC 자유단을 지나면서 자유단 부근에 서로 반대 방향으로 회전하면서 하강하는 와동쌍이 존재하며, 이들이 와유출 주파수와는 다른 주파수를 가지고 있음을 밝혔다.

따라서, 본 연구에서는 대기경계층 내에 놓여진 유한실린더의 자유단 끝단의 형상을 변화시켜 가면서 이들이 후류유동에 미치는 영향에 관하여 실험적으로 해석하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 열선유속계

본 연구에 사용되어진 풍동의 시험부와 측정시스템을 Fig. 1에 나타내었다. 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

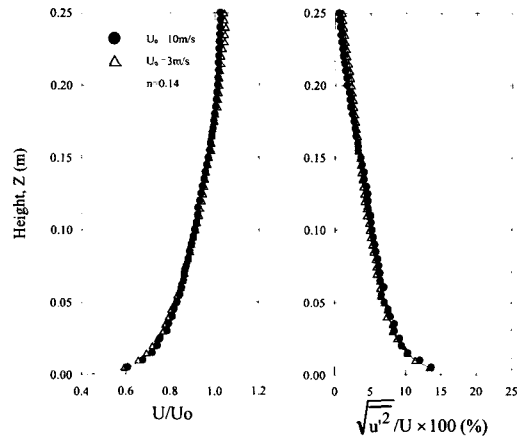


Fig. 3 Streamwise mean velocity and turbulence intensity profiles

설치하였다. 그리고, 풍동바닥면에서 57mm 떨어진 높이에 30°의 날카로운 모서리를 가진 평판을 설치하고 평판의 선단으로부터 후방으로 3.9m인 지점에 원주를 수직으로 장착하였다.

열선유속계를 이용한 후류유동 측정시 자유흐름속도를 $U_0=10\text{m/s}$ 로 고정하였는데, 원주 직경($D=30\text{mm}$)에 기초한 레이놀즈수($Re=U_0D/\nu$)는 약 $Re=2.0 \times 10^4$ 이다. 그러나, PIV 속도장 측정 시스템을 이용한 자유단 주위 속도장 측정에서는 입자영상 취득의 최적성을 고려하여 자유흐름속도를 $U_0=3\text{m/s}$ 로 고정하였다. 이때의 레이놀즈수는 약 $Re=7.5 \times 10^3$ 이므로, 약간의 레이놀즈수 의존성이 있을 것으로 판단되어진다.

Fig. 2는 본 연구에서 시험한 FC 자유단 끝단 형상을 보여주고 있다. FC 모형은 유동에 기인한 진동을 피하기 위하여 스테인레스로 제작하였으며 사포로 표면을 매끈하게 연마하였다. 여기서 형상비(L/D)는 FC 직경에 대한 높이의 비로 나타내며, 본 연구에서는 형상비가 $L/D=6$ 인 원주를 사용하였다. 자유단의 끝단은 모따기를 하지 않은 직각 모서리(plain cut), 선형 모따기(linear cut), 곡선 모따기(round cut) 및 반구형 모따기(hemispherical cut) 형의 네가지 형태로 제작하였다. 그리고 직각 모서리를 가진 FC모델의 경우 막힘비(blockage ratio)는 약 1.38%로 막힘비에 의한 영향은 매우 적은 것으로 판단된다.⁽¹⁵⁾ FC모델은 평판위에 수직으로 설치하였는데, 바닥판과 원주의 연결부주위에서는 말굽형와(horseshoe vortex)가 생성되어진다. 그러나 본 연구에서는 FC의 자유단 부근, 즉 중간높이 이상에서의 후류유동을 다루었으므로 이러한

말굽형와의 영향은 매우 적으며 거의 무시할 수 있는 것으로 알려져 있다.⁽⁶⁾ 후류의 속도측정에는 I형 열선 프로우브를 정확도가 0.01mm인 이송장치로 이동시키면서 속도를 측정하였다. 속도 데이터는 각 측정지점에서 초당 2,000개의 비율로 32,000개 데이터를 취득하였다. 속도측정시 열교환기를 사용하여 풍동 내부의 온도변화를 ±0.5°C 이내로 유지시켰다.

Fig. 3 은 정온형 열선유속계(TSI IFA100)로 FC가 놓일 위치(X=0)에서 측정된 대기경계층의 평균속도와 난류강도의 수직분포를 나타낸 것이다. 일반적으로 두께가 얇은 평판경계층은 평판 자체의 거칠기(roughness)나 trip-wire등을 이용하여 형성할 수 있다. 그러나 자연풍에 의해 생성되는 대기경계층은 평판경계층과 비교하여 유동형태는 유사하나 경계층 두께가 상대적으로 두껍다. 또한 대기경계층의 경우 지표면 근처에서 10~30%의 난류강도값을 갖는다.⁽¹⁶⁾

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

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

여기서 지면으로부터의 거리는 FC 원주의 높이(L=18cm)로 무차원화 하였으며, 경계층의 두께(δ)는 약 21.3cm 이었다.⁽¹⁷⁾

2.2PIV 속도장측정

본 연구에서는 싱글 프레임(single-frame) PIV 기법을 사용하여 FC 자유단 주위 유동의 속도장을 측정하였다. PIV 속도장 측정시스템은 Nd:Yag 레이저, 고해상도 CCD 카메라, 영상처리보드, 렌즈 및 미러, 동기장치, 제어 및 분석용 컴퓨터 등으로 이루어져 있으며, 그 개략도를 Fig. 1 에 나타내었다. 레이저로는 two-head Nd:Yag 레이저를 이용하였는데, 펄스 당 약 100mJ의 에너지를 방출하며 광학 렌즈 및 미러를 거쳐 측정단면에 평면광(sheet) 형태로 조사하였다. 영상취득에 사용한 CCD 카메라(SMD 4M4)는 영상편이(image shift) 기능이 내장되어 있으며, 공간해상도는 2Kx2K pixels이다. 카메라에서 나오는 영상신호(video signal)는 12비트(bit)이며, 카메라의 셀(cell) 충전율은 100%이고, 초당 4장의 영상을 취득할 수 있다. 영상처리는 AM-DIG16R 카드를 장착하고 있는 이미지 보드(IC-PCI)를 사용하였고, 컴퓨터를 이용하여 영상 데이터를

분석하였다. 또한 카메라와 레이저를 동기장치를 사용하여 정확하게 동기시켰다.

싱글 프레임 PIV 기법은 하나의 프레임에 이중 노출된 입자영상으로부터 속도장을 추출하는 방식으로 속도벡터 추출을 위해 상호상관법(cross-correlation)을 사용하였다. 그리고, 싱글 프레임 PIV 속도장 측정시 발생하는 속도벡터의 방향성의 모호함을 해결하기 위하여 카메라에 내장된 영상편이 기능을 이용하여 두번째 입자영상을 9픽셀 만큼 이동시켰다. 이 경우 상호상관 함수는 속도방향을 나타내는 큰 상관 값과 함께 상대적으로 작은 상관 값이 반대위치에 나타나게 되므로 방향 모호성 문제를 해결할 수 있다.⁽¹⁸⁾ 레이저 펄스 사이의 시간간격(Δt)은 유동 조건에 따라 Δt=70~100μs로 설정하였다.

미소조사구간의 크기는 영상 이동량을 고려하여 64x64 픽셀로 정하였고, 50% 오버랩을

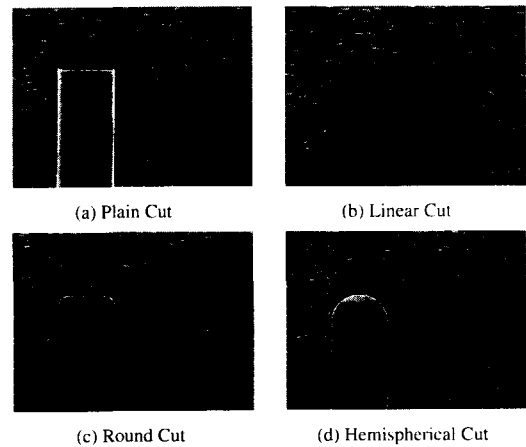


Fig. 4 Visualized flow around the FC (Y/D=0)

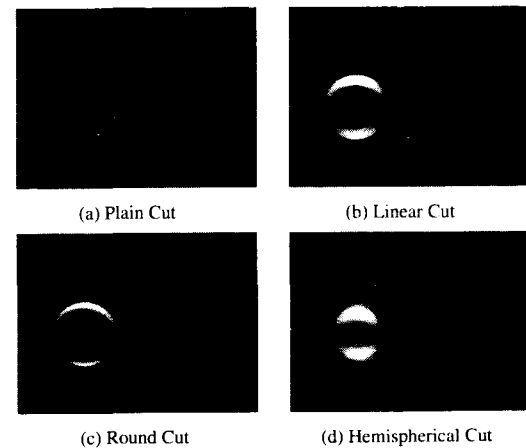


Fig. 5 Visualized flow around the FC (Z/L=0.9)

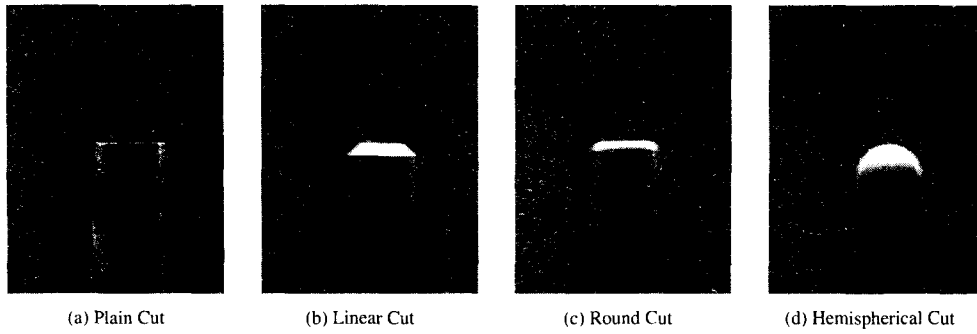


Fig. 6 Cross-sectional flow near the FC free end ($X/D=0.3$)

하였다. FC 주위 종단면과 횡단면에서 취득한 영상의 크기는 각각 $8\text{cm}\times 8\text{cm}$ 와 $11\text{cm}\times 11\text{cm}$ 이다. 산란입자로써 올리브 오일 입자를 사용하였는데, 입자의 평균직경은 $1\sim 3\mu\text{m}$ 이다. 그리고 난류 통계량들은 연속적으로 취득한 순간 속도장 350장을 앙상블 평균하여 구하였고, 결과들을 평균유속으로 무차원화시켜 나타내었다.

2.3 유동가시화

FC 자유단 주위의 유동구조를 관찰하기 위하여 입자주입법(tracer method)을 사용하여 유동을 가시화 하였다. 가시화 실험은 시험부의 크기가 폭 300mm, 높이 200mm, 길이 1200mm인 회류수조에서 수행하였는데, 이때의 자유흐름 속도는 12cm/s 이었으며, 원주직경에 기초한 레이놀즈수는 $Re=2,100$ 이다. 유동가시화 실험의 경우에도 시험부 입자쪽에 스파이어 (spire)를 부착시켜 풍동 실험과 유사한 경계층을 생성시켰다. 가시화 실험에 사용된 입자는 직경이 약 $100\mu\text{m}$ 인 폴리 비닐클로라이드(poly vinyl chloride)로 비중은 약 1.02이며, 디지털 카메라(Olympus C-3030)의 노출시간을 조절하여 입자의 유적선(streak line)을 촬영하였다. 이때 할로젠 램프(150W)에서 나온 빛을 절연필터, 광섬유 케이블 및 원주형 렌즈를 지나게 함으로써 가시화 하고자 하는 유동단면을 평면광 형태로 조명하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유동가시화

Fig. 4는 FC 자유단 주위 유동을 후류 중앙선을 따라 XZ평면에서 가시화한 결과를 보여주고 있다. 여기서 보면 전체적으로 원주에 접근하는 자유흐름은 FC 자유단 전방에서 상승한 후

자유단을 지나면서 곧 바로 후류의 중앙단면을 따라 전단층이 하강하는 유동구조를 보여주고 있다. 박리전단층의 기울기는 자유단 끝단 형상에 따라 차이를 보여주고 있는데, 직각모서리의 경우는 박리유동이 자유단 초기에 급격하게 상승하고 있으며 반구형의 경우는 자유단의 초기에는 표면을 따라 흐른 후 중앙부에서 박리되어 자유단 후방에서 위로 상승하고 있다.

Fig. 5는 높이 $Z/L=0.9$ 의 수평단면(XY 평면)에서 자유단 주위의 유동을 가시화한 결과이다. 직각모서리와 선형 모따기를 한 원주의 경우, 접근하는 자유흐름이 원주의 자유단을 지나면서 자유단 상부로 상승되고 있음을 뚜렷이 보여주고 있다. 그러나, 끝단이 유선형으로 뭉뚱한 경우(Figs. 5(c)-(d))에는 유동이 자유단 표면을 따라 흘러가고 있음을 나타내고 있다. 또한, 자유단 주위의 유동은 전체적으로 후류의 중앙단면($Y/D=0$)을 중심으로 거의 대칭적인 형태를 이루고 있다. 그러나 같은 높이지만 끝단 형상에 따라 단면적 크기가 다르므로 원주의 후방으로 하강하는 유동에 기인한 와형성영역의 크기는 곡선 및 반구형 모따기의 경우가 상대적으로 작게 나타나고 있다.

Fig. 6은 원주 후방 $X/D=0.3$ 지점을 지나서 횡단면(YZ평면)을 조명하여 얻은 가시화 결과이다 여기서 보면 직각모서리를 가진 자유단의 상부에서는 자유단을 지나면서 박리된 전단유동이 서로 반대 방향으로 회전하는 와동쌍(vortex pair)을 형성하고, 이 와동쌍은 원주 양측면에서 규칙적으로 유출되는 와유동과 서로 혼합되어 꼬이면서 원주후류의 중앙부분으로 하강하는 유동형태를 이루고 있다. 이러한 와동쌍은 삼각날개(delta wing)에서 발생하는 와동쌍과 유사하게 왼쪽의 와는 시계방향, 오른쪽의 와는 반시계방향으로 회전하고 있다.^(9, 19, 20) 이 와동쌍은 원주후류의 중앙단면($Y/D=0$)을 기준으로 서로

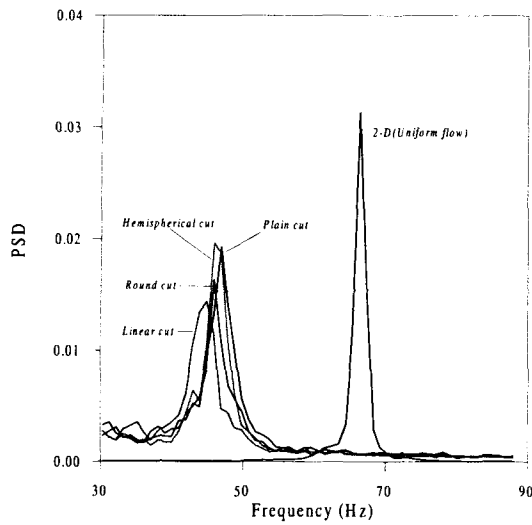


Fig. 7 Comparison of vortex shedding frequencies ($X/D=3$, $Y/D=2$, $Z/L=0.5$)

대칭적이며 크기가 비슷하다. 그러나 다른 형상의 끝단을 가진 FC의 경우에는 이러한 와동쌍이 뚜렷하게 관찰되지 않고 있다.

3.2 와유출주파수

2 차원 원주의 경우, 원주 후방에서 큰 규모의 와가 원주축과 평행하게 유출되는데 이러한 와는 일정한 주기를 가지고 있다. 그러나 FC의 경우는 자유단 근처에서 하강하는 박리전단층의 영향으로 2 차원 원주와는 다른 와유출 특성을 보여주고 있다. 또한 대기경계층 내에서는 수직방향으로 평균 속도 및 난류강도 구배가 존재하여 균일유동 속에 놓인 원주와는 크게 다른 유동형태를 가지게 된다.⁽¹³⁾ Fig. 7은 자유단 끝단의 형상변화에 따른 와유출 주파수 변화를 알아보기 위하여 후류의 한 위치($X/D=3$, $Y/D=2$, $Z/L=0.5$)에서 열선유속계를 사용하여 연속적으로 측정된 속도신호에 대해 파워스펙트럼밀도(Power Spectral Density, PSD)를 분석한 결과이다.

자유단 원주의 경우, 와유출 주파수는 2 차원 원주의 와유출 주파수 66.4Hz에 비해 크게 감소하였다. 와유출 주파수는 약 45~47Hz 사이의 값을 가지며, 모따기를 하지 않은 경우에 비해 모따기를 한 경우 와유출 주파수가 보다 감소하였다. 선형 모따기의 경우, 가장 낮은 와유출 주파수를 가지며, 곡선 모따기와 반구형 모따기는 거의 비슷한 값을 가졌다. 이러한 와유출주파수의 감소는 자유단이 존재함에 따라 자유단에서 박리되어 후류 중심축을 따라 아래방향으로 유입되는 유동의 영향이 상대적으로 강해져 후류의 응집구조가 약

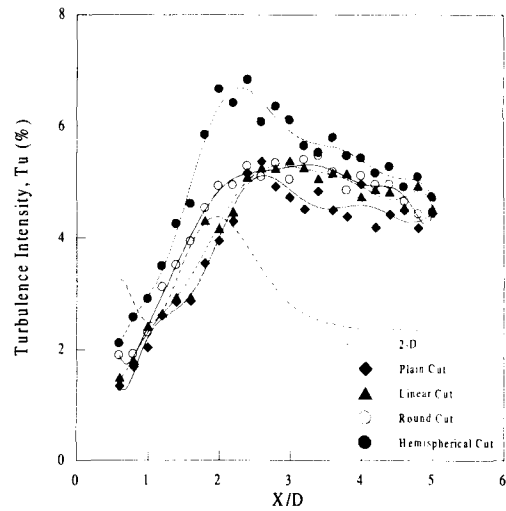


Fig. 8 Comparison of streamwise turbulence intensity along wake centerline ($Y/D=0$, $Z/L=0.5$)

해지기 때문이다.

3.3 와형성영역

자유단을 지나면서 박리되어진 유동은 후류의 유동구조뿐만 아니라 와형성영역에도 변화를 가져오게 된다. 본 연구에서는 주유동방향 속도성분의 난류강도가 최대값을 갖는 지점을 와형성영역의 끝으로 정의하고 I-형 열선 프로브를 후류 중심선을 따라 일정간격으로 이송시키면서 와형성영역의 길이를 측정하였다. 속도신호는 디지털 필터를 이용하여 와유출 주파수의 두배로 변동하는 속도성분만을 취득하였는데, 이것은 원주 양편에서 교대로 유출되는 와류의 영향으로 후류 중심축에서는 주파수가 두배로 되기 때문이다. 열선유속계로 재순환유동을 측정할 경우, 역방향 속도성분에 기인하여 속도값 크기에 오차가 있을 수 있으나 주파수 특성은 그대로 나타나며, 절대값의 상대적 비교도 가능하다. 기존의 연구에서도 열선 유속계를 사용하여 원주후류 영역에서 속도변동성분의 최대값 위치를 기준으로 와형성영역을 효과적으로 해석해오고 있다.⁽²⁾

Fig. 8은 원주의 중간높이($Z/L=0.5$)에서 후류의 중심선을 따라 측정된 난류강도 분포를 나타낸 것이다. 와형성영역의 길이는 FC의 경우가 2차원 원주에 비해 상대적으로 약간 길게 나타났으며, 최대값 주위가 무딘 분포 형태를 보여주고 있다. 이것은 FC 자유단에서 박리되어 후류중심을 따라 하강하는 유동의 영향에 기인한 것이다. 그러나

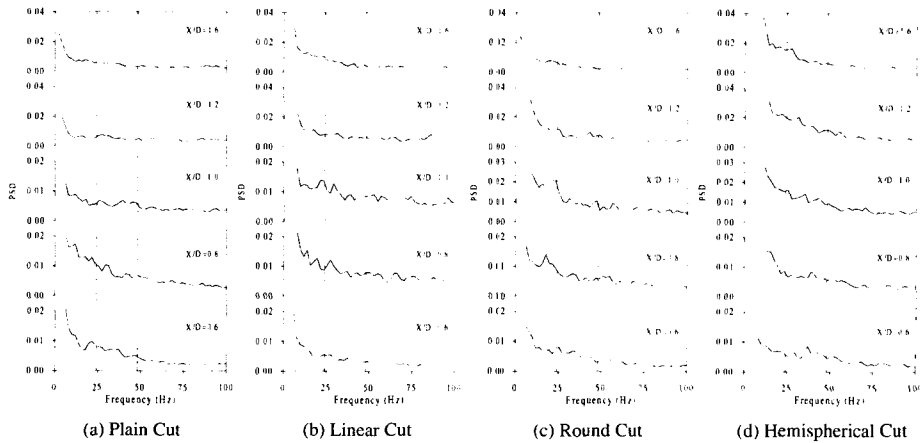


Fig. 9 Power spectral density distributions along the streamwise direction ($Y/D=0, Z/L=0.95$)

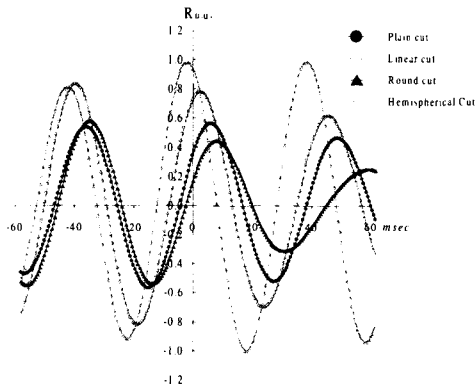


Fig. 10 Cross correlation of velocity signals measured simultaneously at $Y/D=\pm 2$ ($X/D=3, Z/L=0.5$)

대기경계층 내에서 FC의 끝단 형상 변화에 따른 와형성영역 길이의 변화는 상대적으로 크지 않으며, 반구형 모따기를 한 FC가 가장 짧은 와형성영역을 가지는 것으로 나타났다.

3.4 주파수특성

Fig. 9 는 대기경계층 내에 놓인 FC 자유단에 가까운 $Z/L=0.95$ 높이에서 후류 중앙선을 따라 측정된 주유동방향 속도성분의 PSD 분포를 나타낸다. 본 연구에 앞서 수행된 연구에서 Park⁽¹³⁾ 등은 균일유동 속에 놓인 FC의 경우, 자유단 상부에 서로 위상차가 없이 서로 반대 방향으로 24Hz로 회전하는 와동쌍이 형성됨을 밝혔다. 그런데, 이 24Hz 성분은 2차원 원주 후류에서 나타나는 주기적인 와유출 주파수와는 성질이 다른 것으로 자유단 근처에서만 나타났다.

주유동방향 속도성분의 수직방향 PSD 분포를 보면 대기경계층 내에 놓인 자유단 근처에서

존재하는 24Hz 성분은 와유출 주파수에 비해 상대적으로 약하며, 하류로 나아가면서 급격히 약화되어짐을 알 수 있다. 이것은 자유단에서 박리된 와동쌍이 원주 후류 중앙부분으로 급격히 하강하면서 주위 유동과 혼합되면서 24Hz 성분이 사라지기 때문이다.⁽²¹⁾ 그리고, 자유단 끝단에 모따기를 한 경우, 전반적으로 약한 저주파수 성분이 존재하고는 있지만, 직각모서리의 경우에 나타나는 뚜렷한 와동쌍이 생성되지 않아 주파수 특성 변화는 상대적으로 적은 것으로 나타났다. 이것은 Fig. 10 의 FC 자유단 양편에서 동시에 측정된 속도로부터 구한 상호상관함수(cross correlation)에 잘 나타나고 있다. 여기서 보면 본 연구에서 다른 4가지 끝단 형상에 대해 자유단 양편 $Y/D=\pm 2$ 위치에서 측정된 속도의 상호상관함수는 위상차가 없는 $\tau=0$ 조건에서 모두 양의 값을 가지게 되어 대칭적인 유동형태를 가짐을 알 수 있다. 따라서, 이와 같은 유동특성이 기존에 알려진 직각모서리의 FC 경우에만 나타나는 특성 주파수의 영향이라고 판단하기 어려운 것으로 생각된다.

3.5 평균속도장

시간 평균화된 유동구조를 파악하기 위하여 싱글 프레임 PIV 기법을 이용하여 350장의 순간 속도장을 취득한 후 앙상블 평균하여 평균속도장 및 난류강도 분포를 구하였다. 여기서 주유동방향의 난류강도(T_w)는 주유동방향 유속의 변동성분(u')의 rms(root-mean-square) 값을 평균 유속(U_w)으로 무차원화하여 나타내었다. 그리고, 난류운동에너지(TKE)는 등방성(isotropy) 가정을 사용하여 다음과 같이 계산하였다.

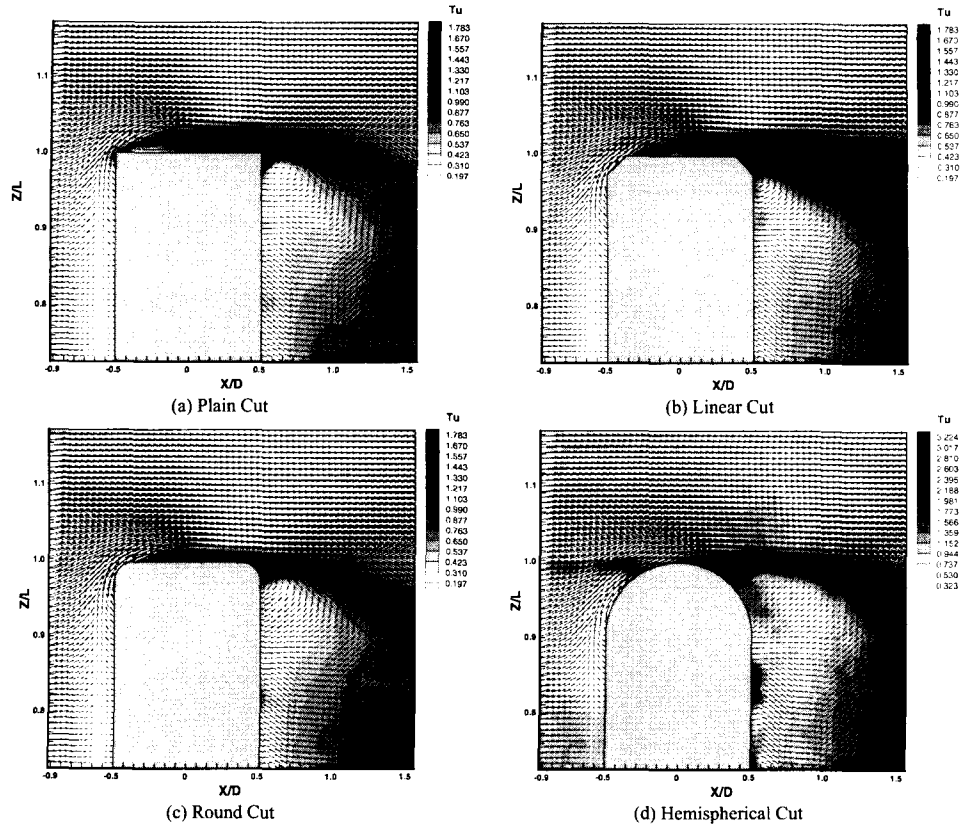


Fig. 11 Spatial distributions of mean velocity vectors and streamwise turbulence intensity at Y/D=0 (XZ-plane)

$$\frac{1}{2}q^2 = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \approx \frac{3}{4}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2}) \quad (2)$$

따라서, 본 연구에서 계산된 난류운동에너지는 등방성 난류구조의 가정이 적용되지 않는 구간에서는 실제값과 약간의 차이를 보일 수 있다.

Fig. 11과 Fig. 12는 FC 자유단 주위 유동을 후류 중앙선(Y/D=0)을 따라 XZ평면에서 측정된 주유동방향 평균속도, 난류강도 및 난류운동에너지 분포를 보여주고 있다. Fig. 11에서 평균속도는 벡터로 표시하고, 난류강도는 명암(gray scale)으로 표시하였다. 여기서 보면 접근하는 경계층 유동은 원주의 자유단 전방에서 상승한 후 자유단을 지나면서 곧 바로 후류 중앙단면을 따라 전단층이 하강하는 유동구조를 보여주고 있다. 따라서 자유단 전단 주위와 박리된 유동이 하강하기 시작하는 자유단 후단 주위에서 난류강도 및 난류운동에너지가 상대적으로 큰 값을 보여주고 있다.

특히, 직각모서리와 선형 모따기의 경우는

박리유동이 자유단의 전반부에서 박리된 후 높게 상승하고 다시 자유단 뒤쪽 끝단 부근에서 하강한다. 그중 일부는 재부착(reattachment)되어 자유단 상부에 역방향 속도성분을 가진 재순환영역이 형성되어진다. 따라서 자유단 후반부, 특히 끝단 주위에서 국부적으로 매우 높은 난류강도와 난류에너지 값을 나타내고 있다. 반면에, 곡선 및 반구형 모따기를 한 FC의 경우, 유선형의 끝단 형태로 인하여 자유단 주위의 난류강도 및 난류운동에너지가 크게 감소되며 자유단 상부에 존재하던 재순환영역도 거의 사라지게 된다. 그리고 FC 끝단으로부터 박리된 유동은 전반적으로 자유단을 지난 후 후류의 중앙단면을 따라 전단층이 하강하는 유동구조를 나타낸다. FC 근접 후류영역에서는 하강하는 전단층과 원주 양측면에서 유입되는 규칙적인 와들이 혼합되면서 낮은 역방향 속도성분을 가지게 되고 이로 인해 원주의 후방에는 와형성영역이 형성되게 된다.

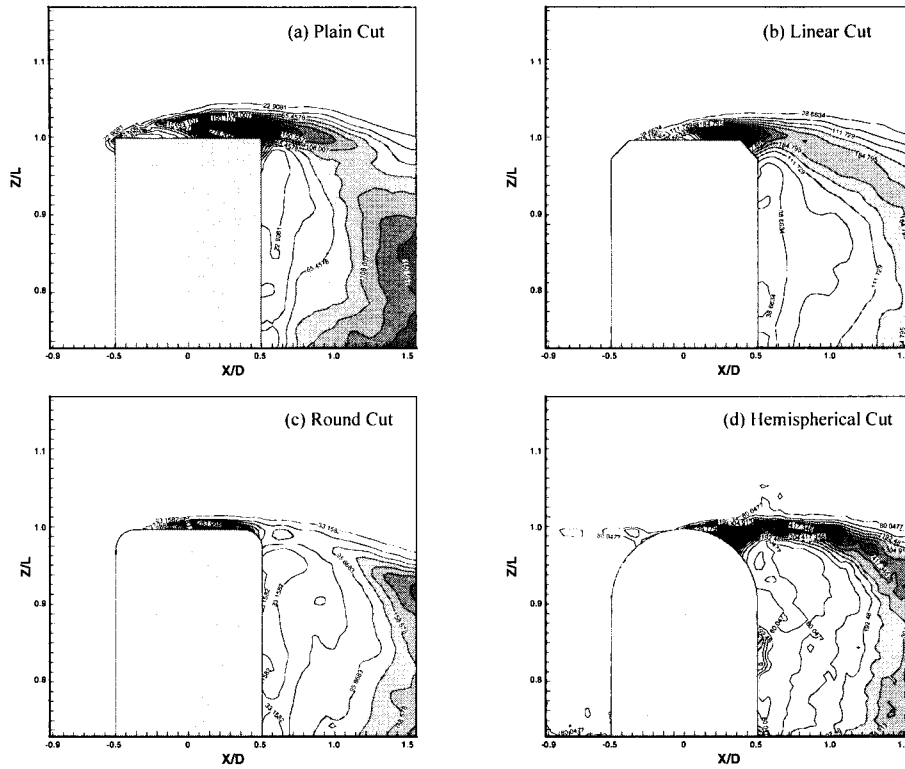


Fig. 12 Contour plots of turbulent kinetic energy at $Y/D=0$ (XZ -plane, $TKE \times 10^2$)

Fig. 13은 $Z/L=0.983$ 높이의 수평평면에서 측정된 주유동방향 평균속도 및 난류강도 분포를 보여주고 있다. 평균속도는 후류 중심부에서 큰 속도감소를 보여주고 있다. 이렇게 FC 근접 후류에서 속도결손이 크게 나타나는 것은 자유단에서 박리된 전단유동이 후류 중심을 따라 하강하게 됨에 따라 자유단 주위 영역에서 주유동방향의 속도성분이 현저히 감소되기 때문이다. 그리고 반구형 모따기의 경우, 후류의 폭 및 와형성영역의 크기가 가장 작은 것으로 나타났다. 이것은 Fig. 11에서 볼 수 있듯이 자유단 중앙의 반구부분에서 박리되어 박리유동 구간이 좁으며 실린더 후방으로 어느정도 나아간 후 빠르게 실린더 중앙부로 하강되기 때문이다. 이 경우 후류중앙부에서 난류강도분포가 상대적으로 큰 값을 갖는 것으로 나타났다.

본 연구에서 다른 4가지 FC의 경우, 자유단 부근 후류 중심 영역에서 거의 대칭적인 난류강도분포를 보여주고 있다. 이것은 2차원 원주 후류에서 와유출에 기인한 응집구조가 지배적인데 비해 FC의 경우는 자유단 상부로부터 빠른 속도로 하강하는 박리전단층의 영향이 보다

지배적이기 때문이다. 그러나 직각모서리의 경우에는 다른 끝단 형태와는 달리, 동일한 측정 높이에서 자유단 원주 모서리로부터 박리된 유동이 서로 반대 방향으로 회전하는 와동쌍을 형성함에 따라 평균속도 및 난류강도 분포가 후류 중심축을 기준으로 양쪽에 이중 정점(double peak)을 갖는 형태로 나타나게 된다.

3.6 순간속도장

Fig. 14는 FC 자유단 상부에서 원주 후방 $X/D=0.3$ 지점의 YZ 평면에서 측정된 순간 속도장 결과를 나타내고 있다. 유동가시화 결과에서 관찰된 바와 같이 직각모서리를 가진 자유단의 경우, 상부에서 자유단을 지나면서 박리된 전단유동이 서로 반대 방향으로 회전하는 와동쌍을 이루고, 이 와동쌍이 원주 양편에서 근접 후류 내부로 유입되는 유동과 서로 혼합된 후 원주후류의 중앙부분으로 하강하는 속도장 분포를 보여주고 있다. 왼쪽의 와는 시계방향, 오른쪽의 와는 반시계방향으로 회전하고 있으며, 이들 와동쌍은 원주후류의 중앙단면($Y/D=0$)을 기준으로 서로 대칭적이며 크기가 비슷하다.

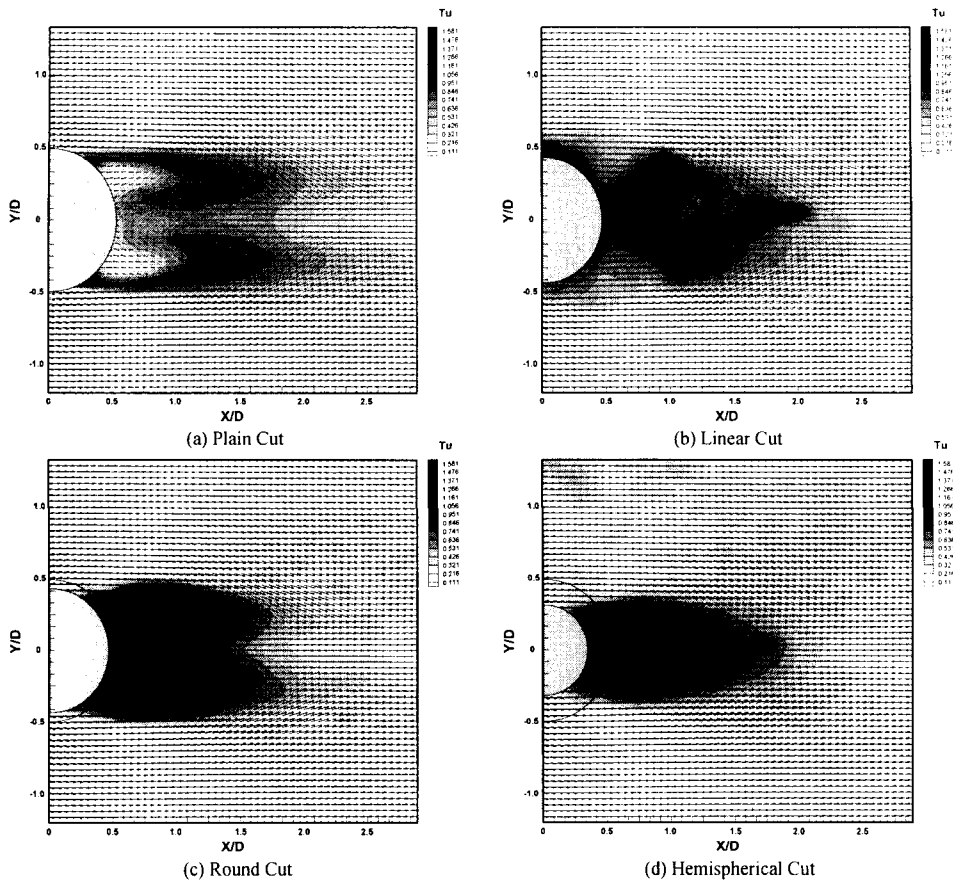


Fig. 13 Mean velocity field and streamwise turbulence intensity distribution at $Z/L=0.983$ (XY-plane)

Park⁽¹³⁾ 등은 직각모서리를 가진 자유단 상부에 위치한 와동쌍은 서로 위상차가 없으며, 그 특성 주파수가 24Hz이고 주기적인 와유출과는 달리 자유단 근처에서만 나타난다고 하였다. 그러나 선형 모따기와 곡선 모따기를 한 FC의 경우에는 이러한 특성 주파수를 가진 와동쌍이 매우 약하게 존재하며 뚜렷하게 관찰되지 않고 있다. 특히, 반구형 모따기의 경우는 원주 표면을 따라 후류의 중앙단면 쪽으로 단순히 유입되는 전혀 다른 형태의 유동구조를 보여주고 있으며 직각모서리의 경우에 관찰되는 와동쌍은 나타나지 않았다.

4. 결론

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

(1) 대기경계층 내부에 놓인 자유단 원주의 후

류에서는 2 차원 원주와는 전혀 다른 3 차원성이 강한 유동특성이 나타난다.

(2) 자유단 원주의 경우, 2 차원 원주에 비해 와유출 주파수는 감소하고 와형성영역의 길이는 증가하였다. 그러나 자유단 끝단의 형상 변화에 따른 와유출주파수 및 와형성영역의 길이의 변화는 상대적으로 크지 않은 것으로 나타났다.

(3) 직각모서리를 가진 FC의 경우, 자유단 부근에서는 자유단으로부터 박리되어 하강하는 와동쌍의 영향이 지배적이며 주기적인 와유출이 억제되어졌다.

(4) 직각모서리와 선형 모따기를 한 FC 경우에는 접근유동이 자유단의 앞쪽 끝단에서 박리되어 높게 상승한 후, 다시 자유단 후방 끝단 부근에서 하강하며 일부는 재부착(reattachment)되어 자유단 후반부에 국부적으로 매우 높은 난류강도와 난류 운동에너지를 가진다.

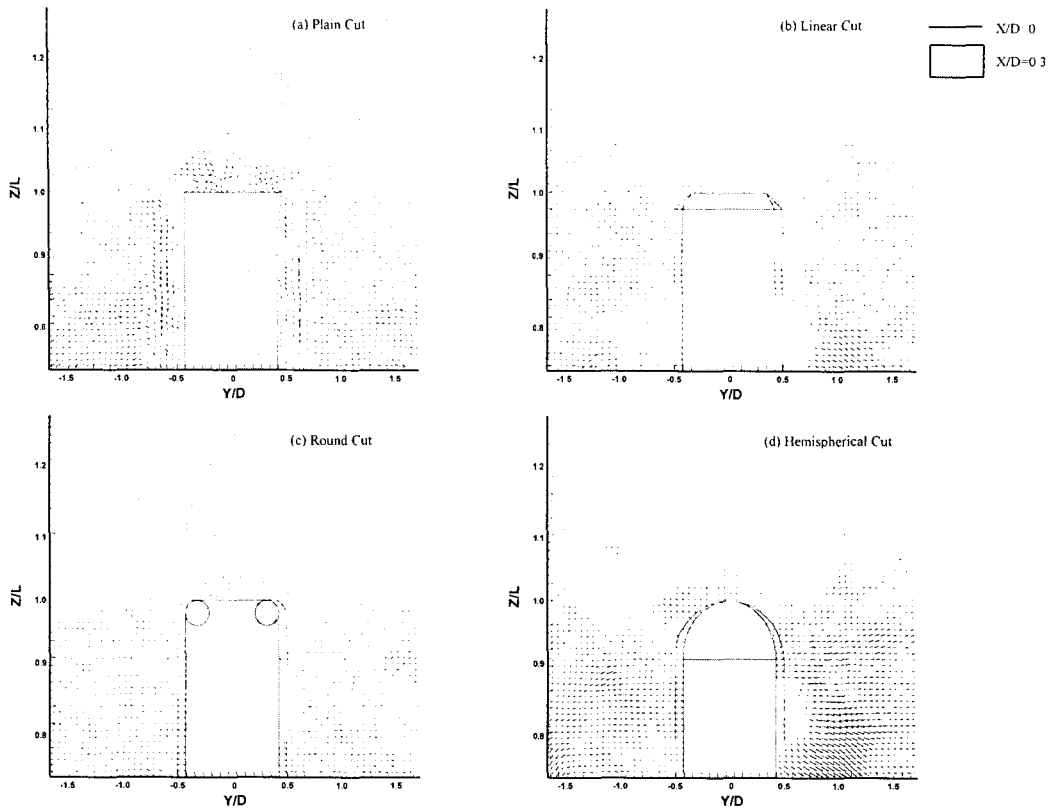


Fig. 14 Instantaneous velocity field behind the FC ($X/D=0.3$, YZ -plane)

(5) 곡선 및 반구형 모따기와 같이 유선형의 끝단 형태를 가진 FC의 경우에는 자유단 표면을 따라 후류의 중앙단면으로 단순히 유입되는 형태의 유동구조를 가지게 되어 자유단으로부터 박리된 유동에 기인한 와동쌍은 관찰되지 않았다.

후 기

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

참고문헌

(1) 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.
 (2) Szepešsy, 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.
 (3) 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.
 (4) Wieselsberger, C., 1923, "Versuche über den Luftwiderstand Gerundeter und Kantiger Körper," *Ergebnisse Aerodyn. Versuchsanstalt Gottingen (ed. L. Prandtl), II. Lieferung*, p. 23.
 (5) 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.
 (6) 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.
 (7) Farivar, D., 1981, "Turbulent Uniform Flow around Cylinders of Finite Length," *J. AIAA*, Vol. 19, pp. 275-281.
 (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) Roh, S. C. and Park, S. O., 2001, "Visualization of Vortical Flow Around the Free End Surface of a Finite Circular Cylinder Mounted on a Flat Plate," *KSME J.(B)*, Vol. 25(1), pp. 71-77.

- Circular Cylinder Mounted on a Flat Plate," *KSME J.(B)*, Vol. 25(1), pp. 71~77.
- (10) Choi, C. K. and Kwon, D. K., 2000, "Aerodynamic Characteristics of Rectangular Cylinders with Corner Cut," *Proc. 1st Int. Sym. On Wind & Structures*, pp. 303~314.
- (11) Price, S. J., Sumner, D., Smith, J. G., Leong, K. and Paidoussis, M. P., 2002, "Flow Visualization around a Circular Cylinder near to a Plane Wall," *J. Fluids & Structures*, Vol. 16(2), pp. 175~191.
- (12) Kahraman, A., Sahin, B. and Rockwell, D., 2002, "Control of Vortex Formation from a Vertical Cylinder in Shallow Water: Effect of Localized Roughness Elements," *Exp. in Fluids*, Vol. 33, pp. 54~65.
- (13) 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.
- (14) Park, C. W. and Lee, S. J., 2001, "Effect of Cylinder Aspect Ratio on Wake Structure Behind a Finite Circular Cylinder Located in an Atmospheric Boundary Layer," *KSME J.(B)*, Vol. 25(12), pp. 1821~1830.
- (15) 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.
- (16) 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.
- (17) Park, C. W. and Lee, S. J., 2002, "Flow Structure Around a Finite Circular Cylinder Embedded in Various Atmospheric Boundary Layers," *Fluid Dynamics Research*, Vol. 30(4), pp. 197~215.
- (18) Adrian, R. J., 1986, "Image Shifting Technique to Resolve Directional Ambiguity in Double-Pulsed Velocimetry," *Appl. Opt.*, Vol. 25, pp. 3855~3858.
- (19) Gordnier, R. E. and Visbal, M. R., 1998, "Numerical Simulation of Delta-Wing Roll," *Aerospace Sci. & Tech.*, Vol. 6, pp. 347~357.
- (20) Banks, D. and Meroney, R. N., 2001, "A Model of Roof-Top Surface Pressures Produced by Conical Vortices: Evaluation and Implications," *Wind & Structures*, Vol. 4(4), pp. 279-298.
- (21) Lee, S. J. and Chung, Y. S., 1996, "Flow Structure of Wake behind a Finite Circular Cylinder," *KSME J.(B)*, Vol. 20(6), pp. 2014~2022.