

<논 문>

자유단이 있는 원주의 후류 유동특성에 관한 실험적 연구

이상준* · 정용삼**

(1995년 9월 7일 접수)

Flow Structure of Wake behind a Finite Circular Cylinder

Sang-Joon Lee and Yong-Sam Chung

Key Words : Finite Cylinder(자유단이 있는 원주), Free End(자유단), Cylinder Wake(원주후류), 3-Dimensionality(3차원성), Hot-Wire Anemometer(열선유속계)

Abstract

Flow characteristics of the wake behind a finite circular cylinder (FC) mounted on a flat plate was experimentally investigated. Three finite cylinder models having aspect ratio (length to diameter ratio, L/D) of 6, 10 and 13 were tested in this study. Wake velocity was measured by a hot-wire anemometry at Reynolds number of 20,000, and the results were compared with those of two-dimensional circular cylinder. As a result, the free-end effect on the wake structure becomes more dominant with decreasing the aspect ratio (L/D) of the finite cylinder. Inviscid flow entrained into the wake region decreases the turbulence intensity and periodicity of the vortex shedding due to existence of the free end. From spectral analysis and cross correlation of the velocity signals, vortices having 24Hz frequency characteristics are found in the downwash flow just behind the free end. There exists very complicated flow near the free end due to interaction between the entrained flow and streamwise vortices. Vortex formation region is destroyed significantly in the near wake and shows quite different wake structures from those of 2-D cylinder.

1. 서 론

원주는 2차원적인 후류 유동을 생성시키는 대표적인 물체(bluff body)로서, 특정한 레이놀즈수의 경우를 제외하고는 대규모의 조직적 와류구조(coherent vortex structure)를 가진다. 이와 같은 유동특성 때문에 2차원 원주 후류는 이미 오래 전부터 많은 연구자들의 연구대상이 되어 왔으나 원주 후류의 3차원성(three dimensionality)에 관한 연구는 최근에 들어와서 관심을 받기 시작하였다.⁽¹⁾ 원주 후류의 3차원성은 원주의 축방향으로 후류유

동에 변화가 존재하는 것을 말한다.⁽²⁾

원주 후류의 경우 자유 흐름의 난류강도가 커지면 후류의 3차원성은 더 잘 나타난다.⁽³⁾ 일반적인 레이놀즈수 범위내에 있는 대부분의 원주 후류는 3차원성을 가지고 있다. 그러나 2차원 원주의 근접후류에서는, 와형성영역으로부터 원주축과 평행하게 유출되는 큰 규모의 와동이 지배적이기 때문에 이러한 3차원성이 상대적으로 약하게 작용하고 있다. 따라서 2차원 원주의 후류는 조직적인 와구조의 관점에서 2차원적인 유동으로 가정할 수 있다. 즉, 원주의 축방향을 따라 St수(Strouhal number)에 차이가 없거나 와유출이 축방향과 평행하게 진행되는 경우, 그리고 원주후면에서 축방향의 압력구배가 없다면 원주후류는 2차원성을 가진다고 볼 수

*회원, 포항공과대학교 기계공학과

**삼성중공업 중앙연구소

있다.^(1,4)

원주 후류의 3차원성을 야기하는 주요 요인으로 는 자유 흐름의 비균일성,⁽⁵⁾ 와(vortex) 사이의 연결체(braids)에 존재하는 주유동방향의 와동쌍, 충분하지 않은 형상비(aspect ratio, L/D) 등 여러 가지 인자가 있지만 가장 직접적이고 심각하게 영향을 주는 것은 원주 끝단의 조건이라고 할 수 있다.⁽³⁾ 특히 원주가 자유단(free end)을 가지게 되면 원주의 표면압력, 와형성영역, 그리고 와유출의 형태 및 이로 인한 후류구조의 변화에 이르기까지 전반적으로 후류의 유동특성이 변하게 된다.

Wieselberger (1923)는 자유단을 가지는 원주(이후부터 "FC" (=Finite Cylinder)로 약칭함)가 평판 위에 세워져 있을 경우 원주 후류의 3차원적인 유동특성에 대하여 처음으로 연구하였다.⁽⁶⁾ 그는 형상비가 작은 FC의 경우 측류(cross flow)가 외부 유동과 후류 사이에 존재하는 압력차를 제한하여 항력이 감소한다고 밝혔다. Baban & So⁽⁷⁾는 원주가 자유단을 가지게 되면 원주 끝단에서 유출되는 비정상(unsteady) 유동 때문에 후류 내부에 변동 속도성분이 강한 순환유동이 나타나며 항력성분의 변동도 커짐을 관찰하였다. 자유단을 갖는 원주의 형상비(L/D)가 원주 후류에 미치는 영향에 대한 연구로 Budair⁽⁸⁾는 Re수가 15,000이고 형상비가 7 이하이면 와유출이 정지하며, Sakamoto & Arie⁽⁶⁾는 L/D 에 따라 와유출의 형태가 크게 달라짐을 보였다. Okamoto & Sunabashiri⁽¹⁰⁾는 여러 가지 형상비의 FC 후류에 관한 연구에서 작은 형상비($L/D=1\sim 2$)의 경우 후류가 대칭성을 가지다가 형상비 $L/D=4$ 를 넘어서면서 3차원성을 가진 비대칭적 유동형태로 급격히 바뀜을 밝혔다.

현재까지 자유단이 있는 원주 후류의 3차원성에 대하여는 그 발생원인에서부터 기본 메커니즘에 이르기까지 제대로 해석이 되어 있지 않다. 특히, 높은 레이놀즈수에서의 FC 후류유동에 대한 연구는 아직 초보적인 단계에 머무르고 있다. 예를들어 Farivar⁽¹¹⁾는 L/D 가 7.5 이하에서는 원주표면에서 감지되는 특정주파수가 없다고 밝힌데 반하여 Zdravkovich 등⁽¹²⁾은 L/D 가 2까지 감소해도 와유출은 계속된다고 주장하였다. 이같은 사실은 자유단 원주 후류에 관한 연구가 아직까지 체계적으로 정리되지 않았음을 단적으로 보여주는 것이다.

따라서 본 연구에서는 자유단을 가진 원주(FC)가 평판위에 수직으로 고정되어 레이놀즈 수 $Re=$

20,000의 자유 흐름 속에 노출되어 있을 때 형상비(L/D)에 따른 FC 후류의 유동특성을 실험적으로 해석하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구는 시험부의 크기가 폭 0.72m, 높이 0.6 m, 길이 2.5m이고 난류강도가 0.2% 이하인 폐쇄형 아음속 풍동에서 이루어졌다. 실험중 자유 흐름 속도를 10m/s로 유지하였는데, 실험 모델로 사용된 원주의 직경 $D(=30\text{mm})$ 에 기준한 레이놀즈수는 $Re=20,000$ 이다. Fig. 1은 본 연구에 사용되어진 실험모델과 좌표계를 보여주고 있다. 각도 20° 의 날카로운 모서리를 갖는 평판을 풍동 시험부 바닥에 수평되게 설치한 후 자유단이 있는 원주(FC)를 이 평판 위에 수직되게 장착하였다.

본 연구에서는 세 가지 서로 다른 형상비($L/D=6, 10, 13$)의 원주를 사용하였는데, 여기서 형상비(L/D)는 원주 직경(D)에 대한 FC 높이(L)의 비로 정의하였다. FC의 연구결과와 비교하기 위해 사용된 2차원 원주의 경우 실제 형상비 L/D 는 17.3이지만 원주의 위쪽 끝단이 시험부 천정에 닿아 있으므로 원주 축방향으로의 유동변화가 적다. 이때의 막힘비(blockage ratio)는 약 4.2%로서, 막힘비와 형상비가 압력분포, 항력계수 그리고 St 수 등에 거의 영향을 주지 않는다.^(13,14)

후류의 속도측정에는 정온형 열선유속계와 DANTEC I형 프로우브(55P11)를 사용하였다. 열선의 출력신호는 열선유속계(TSI IFA100)와 12bit A/D 변환기(IFA200)를 거쳐 DMA 방식으로 컴퓨터에 입력된 후 통계처리되었다. 후류 속도는 한 지점에서 32,000개의 데이터를 초당 2,000개의 비율로 샘플링하였고, 신호의 잡음과 오차를 방지하

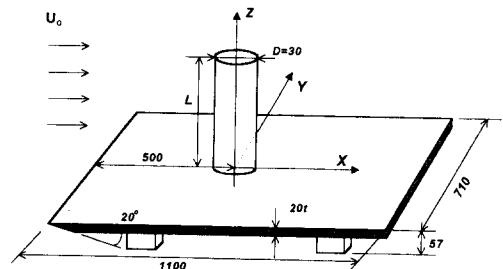


Fig. 1 Experimental model and coordinate system (unit : mm)

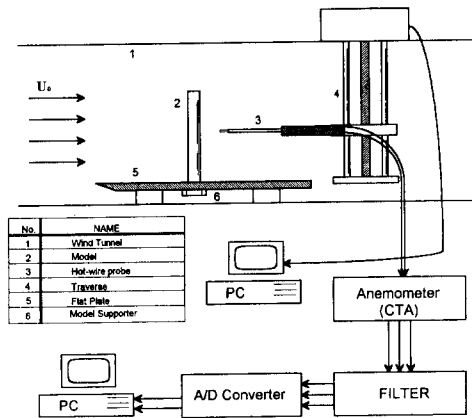


Fig. 2 Schematic diagram of velocity measurement system

기 위해 800Hz의 저역 필터를 거치게 하였다. 한편 열선은 0.01mm의 정확도를 가지는 3차원 이송 장치에 장착하여 원하는 위치로 이동하였다. Fig. 2는 열선유속계를 포함한 속도측정장치의 개략도를 나타낸다.

한편 원주자유단 주위의 유동을 관찰하기 위해 직경 0.2mm 니켈선을 꼬아서 만든 연선(smoke wire)을 원주 상류지점 ($X/D = -2.16$) 위치에 설치하여 원주후류를 가시화하였다. 가시화 실험은 자유 흐름 속도 2m/s ($Re = 4000$)에서 수행하였는데, Re 수 8000 이상에서는 연기유맥(streak)이 붕괴되어 정성적인 유동가시화가 불가능해진다. 원하는 후류 단면에서의 유동을 가시화하기 위해 레이저 저빔(4W Argon-ion laser)을 광케이블과 원통형 렌즈를 통과시켜 약 5mm 두께의 레이저 시트를 만들어 조명한 후 일반 카메라와 비디오카메라를 사용하여 촬영하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 와류출주파수

원주의 형상비(L/D)에 따른 와류출주파수의 변화를 알아보기 위하여 후류의 한 위치에서 측정된 속도신호를 스펙트럼 분석하였다. Fig. 3은 $X/D = 3$, $Y/D = 2$, $Z/L = 0.5$ 위치에서 구한 주유동방향 속도성분의 파워스펙트럼 밀도를(PSD) 나타낸 것이다. 와류출 주파수는 각각 65Hz(2-D), 60Hz($L/D = 13$), 54Hz($L/D = 10$), 47Hz($L/D = 6$)로서 형상비(L/D)가 감소함에 따라 와류출주파수가 감소

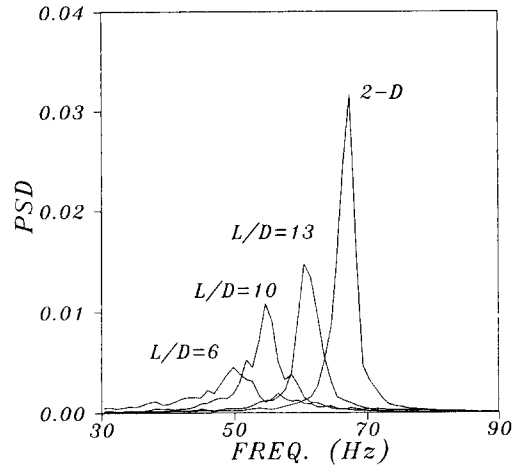


Fig. 3 Comparison of vortex shedding frequency measured at $X/D = 3$, $Y/D = 2$ and $Z/L = 0.5$

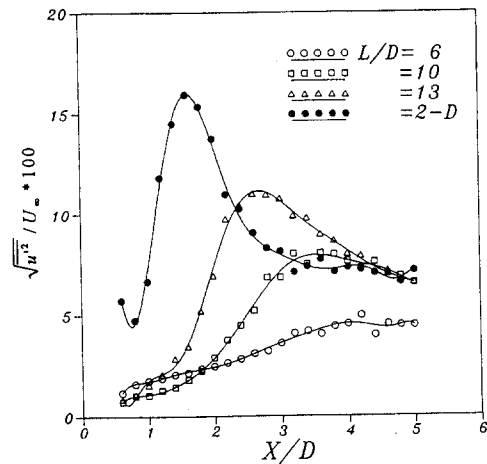


Fig. 4 Comparison of vortex formation region at $Z/L = 0.5$

하고 있다.

또한 형상비가 작아질수록 PSD의 크기도 작아지고 있는데, 이것으로부터 형상비가 감소하면 후류의 응집구조가 약화됨을 알 수 있다. 여기서 2-D 원주의 St 수는 0.195로 2차원 원주에 관한 기존의 연구결과와 잘 일치하고 있다.

3.2 와형성영역의 길이

외부유체의 유입은 후류에 영향을 미칠뿐 아니라 와형성 메커니즘에도 영향을 주게 된다. 본 실험에서는 주유동방향 속도성분의 제곱평균(rms, $\sqrt{u'^2}$)이 최대인 지점을 와형성 영역의 끝으로 보

고 와형성 영역의 길이 (length of vortex formation region) 를 구하였다.

Fig. 4는 네 가지 원주 모델의 중간 높이($Z/L=0.5$)에서 하류(X 축)를 따라 측정된 난류강도분포를 나타내고 있다. 여기서 보면 형상비(L/D)가 감소함에 따라 와형성영역의 길이가 증가하고 있으며, 형상비가 작은 FC의 경우 와형성영역이 이차원 원주에 비해 두배 이상 길다. 이것은 FC 원주 후류의 유동특성 중의 하나로 자유단이 와형성영역의 길이를 증가시키며 외부유동의 유입으로 후류속도의 난류 떨림을 감소시킴을 나타낸다.

그리고 형상비(L/D) 감소에 따라 난류강도는 전반적으로 감소하며 난류강도의 정점 (peak) 부근에서 완만한 분포를 가지게 되어 형상비 $L/D=6$ 인 FC의 경우 정점 부근에서 거의 평평한 분포를 보여주고 있다. 이것으로부터 FC의 형상비가 감소할수록 자유단의 효과가 커져 후류의 넓은 영역에서 외부유체가 유입됨을 알 수 있다. Fig. 5는 형상비 $L/D=13$ 인 FC 후류 중앙단면 ($Y=0$)에서 측정

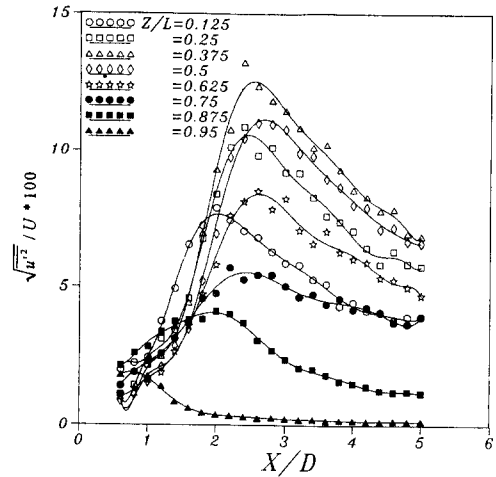
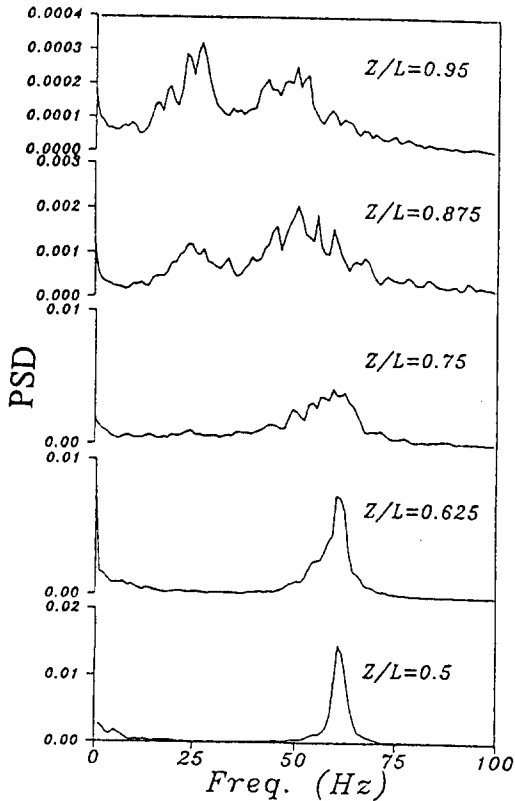
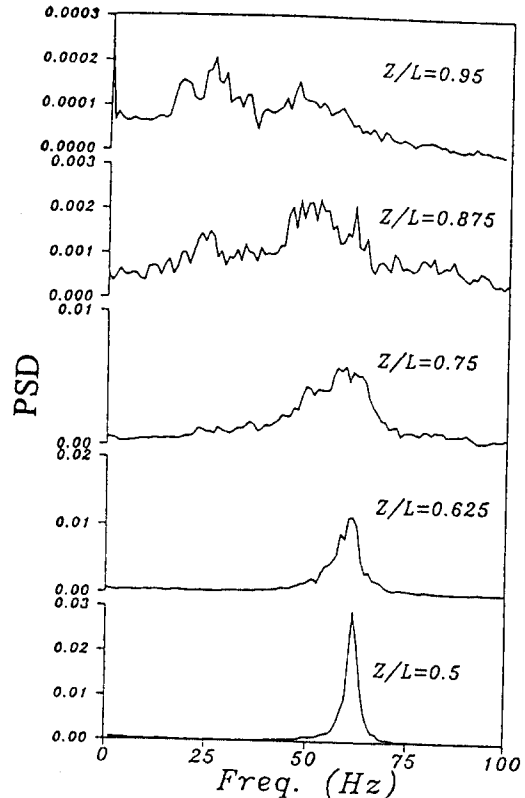


Fig. 5 Turbulent intensity distribution in the wake behind a finite cylinder of $L/D=13$

한 주유동방향 속도성분의 난류강도 분포를 나타낸다. Fig. 4의 2차원 원주의 값과 비교해 볼 때 FC의 경우 2차원 원주보다 작은 난류강도값을 가지며



(a) $X/D=3$



(b) $X/D=4$

Fig. 6 Continued

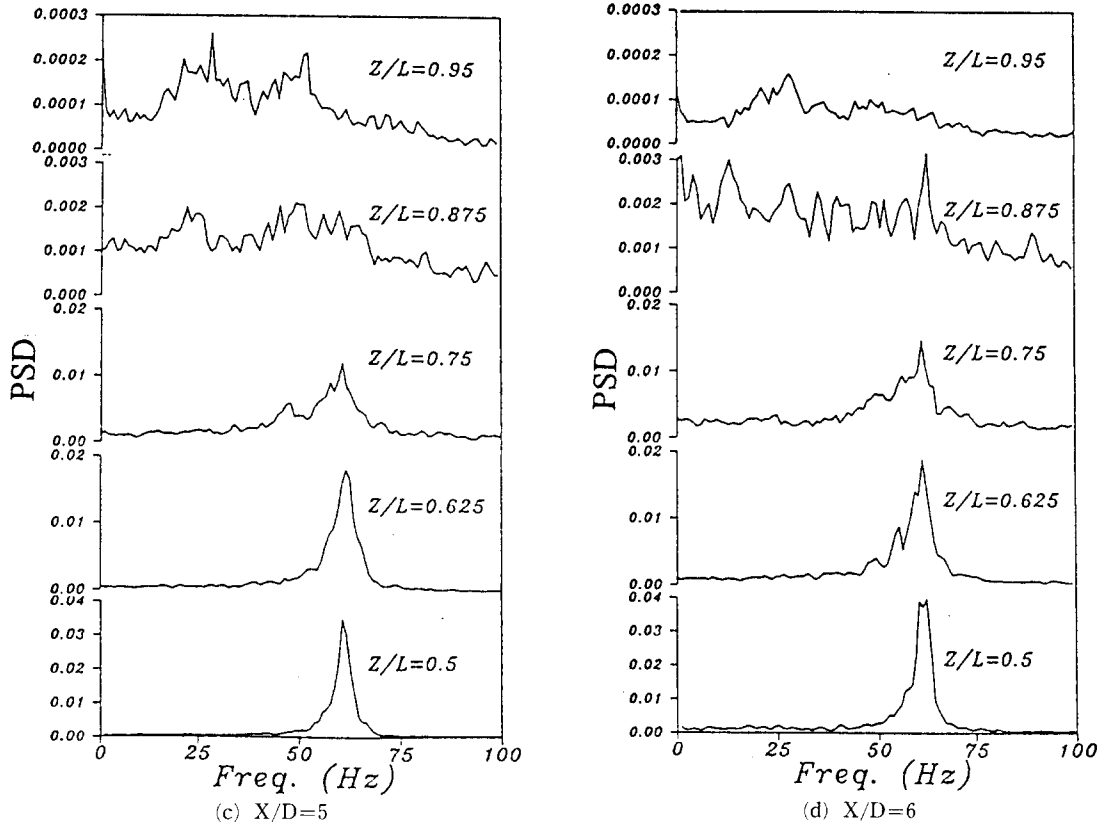


Fig. 6 Power spectral density distribution at $Y/D=2$ of wake behind a finite cylinder of $L/D=13$

자유단에 가까운 지역을 제외하고는 큰 와형성영역을 가짐을 알 수 있다.

FC의 와형성영역과 관련하여 Fig. 5에서 발견할 수 있는 또 다른 사실은 자유단에 접근함에 따라 난류강도와 와형성영역의 길이가 크게 감소한다는 것이다. 이것은 자유단에서 박리되어져 나온 유동과 원주의 양쪽에서 교대로 유출되는 와동의 상호작용으로 FC자유단 후면의 압력이 증가하고 이로 인해 원주의 길이 방향으로 압력구배가 형성되면서 자유단으로부터 하강하는 유동이 유도되기 때문이다. 즉, 자유단근처에서는 외부유체의 강한 유입으로 규칙적인 후류전단층이 크게 붕괴되어 난류강도와 와형성영역의 길이가 급격히 감소하는 것으로 유추되어진다.

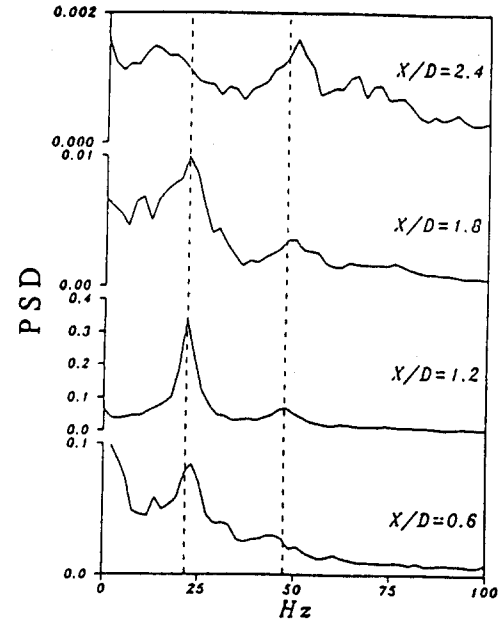
3.3 상관관계

Fig. 6은 형상비가 $L/D=13$ 인 자유단 원주로부터 $X/D=3, 4, 5, 6$ 떨어진 위치 단면에서 원주 높

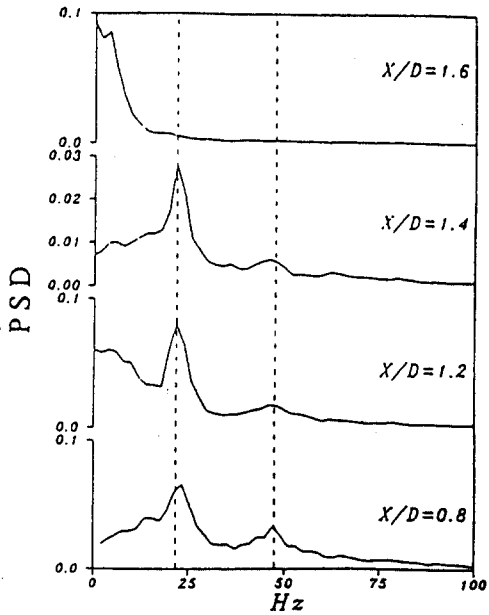
이(Z)에 따른 FC 후류의 주파수 특성을 보여준다. FC에 가까운 위치인 $X/D=3$ 에서는 와유출주파수에서의 PSD값이 와구조가 강한 중앙 높이($Z/L=0.5$)에서 최대값을 가지며 자유단으로 가까워 갈수록 와유출주파수의 감소와 함께 PSD 크기도 작아지고 있다. 또한 자유단에 아주 근접한 위치에서는 전혀 성질이 다른 주파수 특성을 가지는데 약 24 Hz에서 정점(peak)을 보여주고 있다. $Z/L=0.875$ 위치에서는 $Z/L=0.75$ 이하에서 나타나는 와유출주파수와 $Z/L=0.95$ 에서 나타나는 24Hz 성분이 섞여있어 이곳이 서로 다른 주파수 특성을 가지는 두 가지 유동이 서로 만나는 과도적인 위치에 해당함을 알 수 있다. 이 24Hz 성분은 자유단에 근접한 위치에서만 존재하고 Z/L 이 0.75 이하로 감소하게 되면 사라진다. Ayoub & Karamcheti⁽¹⁵⁾도 $Re=8.5 \times 10^4$ 일 때 자유단에 가까운 위치에서 본 실험과 유사한 24Hz 주파수특성을 발견했지만 자세한 메커니즘은 밝히지 않았다. 하류방향 위치

(X/D)에 따른 주파수특성을 살펴보면 하류로 나아갈수록 와류출에 의한 영향은 커지고 24Hz 주파수 성분은 감소한다.

Fig. 7은 자유단에 가까운 $Z/L=0.95$ 높이에서



(a) $L/D=13$



(b) $L/D=10$

Fig. 7 Power spectral density distribution along the wake centerline at $Z/L=0.95$

형상비가 $L/D=10$ 과 13 인 자유단 원주의 후류 중앙선($Y/D=0$)을 따라 측정된 주유동방향 속도성분의 PSD 분포를 나타낸다. 여기서 보면 형상비 $L/D=13$ 인 FC 경우에는 $X/D=1.8$ 까지 24Hz 성분이 남아 있지만 형상비 $L/D=10$ 인 경우 $X/D=1.4$ 이상에서 그 성분이 사라져 버린다. 즉, 24Hz 성분은 하류로 나아감에 따라 점점 사라지는데 형상비(L/D)가 작을수록 빨리 사라짐을 알 수 있다.

와류출주파수는 형상비 변화에 따라 달라지는 데 비해 이 24Hz 성분은 자유단이 존재하기만 하면 형상비에 상관 없이 항상 같은 주파수 특성을

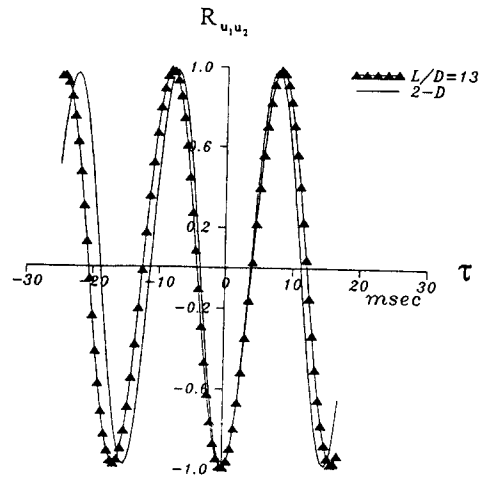


Fig. 8 Cross correlation of velocity signals from each side of a finite cylinder at $X/D=3, Z/L=0.5$

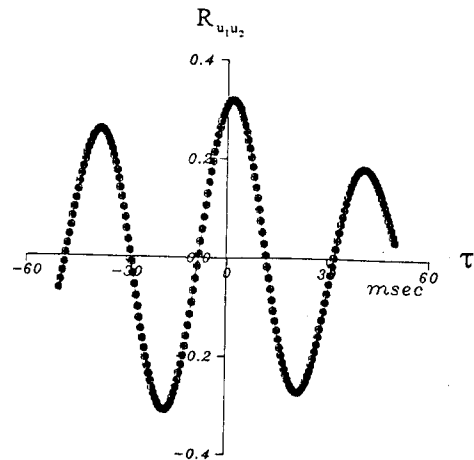


Fig. 9 Cross correlation of velocity signals of finite cylinder wake at $X/D=3, Z/L=0.95$ ($L/D=13$)

보여주고 있다. 따라서 이것이 이차원 원주에서 교대로 일어나는 주기적인 와류출과는 다른 성질의 것이라는 것을 알 수 있다. 이것을 확인하기 위하여 원주 양편에서 동시에 획득한 속도신호의 상호상관함수(cross-correlation)를 구하여 보았다.

원주의 양쪽에서 교대로 유출되는 와(vortices) 사이의 상관관계를 살펴보기 위하여 원주 양편에 I형 열선프로우브 두 개를 $Y = \pm 2D$ 위치에 오게 나란히 배치한 후 X 방향 및 Z 방향으로 이동시키면서 두 점의 속도신호를 동시에 획득하여 상관함수를 구하였다. Fig. 8은 $X/D=3$, $Z/L=0.5$ 위치

에서 원주 양편에서 동시에 얻은 두 개의 속도신호가 시간지연에 따라 어떠한 상관관계를 가지는지를 나타내고 있다. 시간지연이 없을 때($\tau=0$) 상호상관함수(cross correlation)가 음의 최소값을 가지므로 원주 양편에서의 유동은 서로 180° 어긋난 위상차(out of phase)를 가지고 있음을 알 수 있다. 이것은 원주로부터 교대로 유출되는 주기적인 와동이 후류의 중앙 단면에서 지배적임을 의미한다. 자유단이 있는 FC($L/D=13$)와 2차원 원주 모두 원주 중간 높이($Z/L=0.5$)에서 비슷한 상관함수를 가지나 FC의 경우 시간 지연이 상대적으로 약간

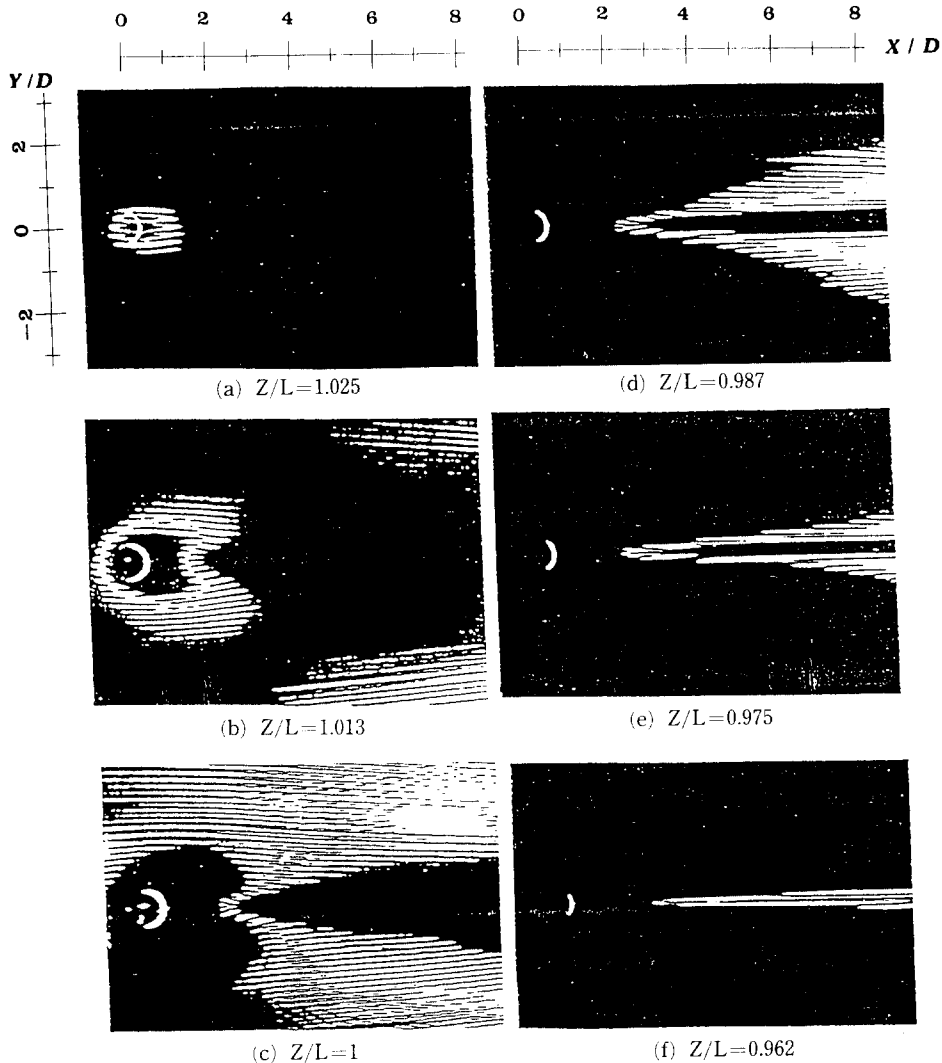


Fig. 10 Top view of flow visualization near the free end ($L/D=13$)

크게 나타나고 있다.

Fig. 9는 형상비 $L/D=13$ 인 자유단원주의 하류 $X/D=3$, $Z/L=0.95$ 위치의 두 점 ($Y=\pm 2D$)에서 얻은 속도신호를 24Hz 성분만을 선택적으로 주파수 대역 필터링(band pass filtering)시켜 구한 상호 상관함수 결과이다. 이 위치($Z/L=0.95$)는 자유단에 아주 근접한 곳으로 2차원 원주와는 크게 다른 상관함수를 가지는데 지연시간이 없을 경우 양의 최대값을 가진다. 이것은 위상차가 없는(in phase) 와의 유출을 의미하며, 이 영역에서는 원주 양쪽에서 교대로 주기적으로 일어나는 와유출보다 자유단 주위의 난류전단유동에 크게 지배받음을 나타낸다. 이것으로부터 24Hz 성분이 2차원 원주 후류의 규칙적인 와유출과는 무관함을 알 수 있다.

3.4 유동가시화

Fig. 10은 연선기법을 이용하여 형상비가 13인 FC 자유단 주위유동을 가시화한 것으로 자유단의 위쪽에서 촬영한(top view) 것이다. 이때 연선은 원주 상류지점($X/D=-2.16$)에 원주(FC) 높이($Z/L=1$)로 수평으로 고정시키고 레이저 시트를 후류영역의 위쪽 $Z/L=1.025$ 위치에서 아래방향으로 수평으로 평행이동시키면서 사진 촬영하였다. 이렇게 함으로써 한 곳에서 출발한 유동이 자유단을 거치면서 어떻게 움직이는지를 정성적으로 알 수 있다.

그림에서 회계 나타나는 부분은 자유단 전방에서 발생한 연기가 레이저 시트로 조명한 단면에 도달하였음을 의미한다. 이 그림들을 종합해 보면 자유흐름이 원주자유단 바로 앞에서 위로 상승했다가 자유단을 지나면서 곧바로 하강함을 알 수 있다. 또한 자유단에서 박리되어져 나온 유동은 주로 후류의 중앙단면을 따라서 하강하고 있다는 사실도 알 수 있다.

Fig. 11은 주유동방향과 수직한 $X=0$ 위치 단면(YZ 평면)을 레이저 시트로 조명한 후 하류쪽에서 바라본 자유단 부근의 유동가시화 결과이다. 이 그림에서 자유단 상부에 서로 반대방향으로 회전하고 있는 와동쌍을 볼 수 있는데, 왼쪽의 와동은 시계 방향으로 오른쪽에 위치한 와동은 반시계 방향으로 회전하고 있다.

이 와동쌍은 유동이 자유단 앞 모서리에서 박리되어 자유단 상부에서 전단층을 이루다가 꼬아지면서 생성된 것으로 앞에서 설명한 24Hz 유동성분과

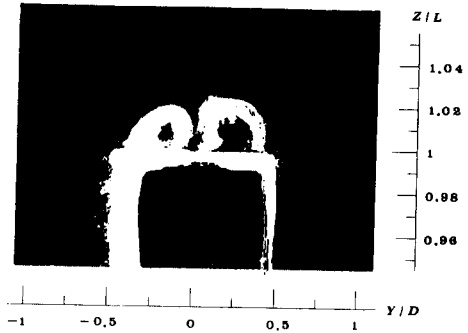


Fig. 11 End view of flow visualization of streamwise vortices at $X/D=0$ ($L/D=13$)

관련 있는 것으로 보인다. 자유단 근처에서는 이와 같은 와동쌍과 외부유체의 유입, 그리고 원주후류와의 상호작용으로 와형성영역이 크게 붕괴되고, 주기적인 와유출도 억제되는 복잡한 유동형태를 가진다.

4. 결 론

본 연구에서는 자유단을 가지는 원주(FC)의 근접후류의 유동특성을 유동가시화와 열선유속계를 이용하여 실험적으로 연구하였다. 자유단을 가진 원주후류의 3차원성은 자유단을 통한 외부유체의 유입에 크게 기인하였으며 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- ① FC의 형상비(L/D)가 감소함에 따라 자유단 효과로 인하여 후류 중앙단면에서 와유출주파수는 감소하고 와형성영역의 길이는 증가한다.
- ② 자유단 근처에서는 유동방향의 와동쌍, 외부유체의 유입 등의 영향으로 와형성영역이 크게 붕괴되고 주기적인 와유출이 억제되어진다.
- ③ FC의 자유단근처에는 형상비에 관계 없이 24Hz 주파수 특성을 가지는 유동이 존재하며 형상비가 낮아지거나 하류로 나아갈수록 그 영향력이 감소한다.

후 기

본 연구는 과학재단지정 첨단유체공학 연구센터(AFERC)의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다. 또한 논문 작성에 도움을 준 박철우 군에게도 감사를 표한다.

참고문헌

- (1) Szepešy, 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.
- (2) Yokoi, Y and Kamemoto, K., 1993, "Initial Stage of a Three-Dimensional Vortex Structure Existing in a Two-Dimensional Boundary Layer Separation Flow," *JSME Int. J.*, Vol. 36, pp. 201~206.
- (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) Baban, F., So, R. M. C. and Otugen, M. V., 1989, "Unsteady Forces on Circular Cylinders in a Cross-Flow," *Experiments in Fluids.*, Vol. 7, pp. 293~302.
- (5) Eisenlohr, H. and Eckelmann, H., 1989, "Vortex Splitter and its Consequences in the Vortex Street Wake of Cylinders at Low Reynolds Number," *Phys. Fluids A.*, Vol. 1(2), pp. 189~192.
- (6) Schewe, G., 1983, "On the Force Fluctuations Acting on a Circular Cylinder in Crossflow from Subcritical up to Transcritical Reynolds Number," *J. Fluid Mech.*, Vol. 133, pp. 265~285.
- (7) Baban, F. and So, R. M. C., 1991, "Aspect Ratio Effect on Flow-Induced Forces on Circular Cylinders in a Cross-Flow," *Experiments in Fluids.*, Vol. 10, pp. 313~321.
- (8) Budair, M., Ayoub, A. and Karamcheti, K., 1991, "Frequency Measurements in a Finite Cylinder Wake at a Subcritical Reynolds Number," *AIAA J.*, Vol. 29, pp. 2163~2168.
- (9) Sakamoto, H. and Arie, M., 1983, "Vortex Shedding from a Rectangular Prism and a Circular Cylinder Placed Vertically in a Turbulent Boundary Layer," *J. Fluid Mech.*, Vol. 126, pp. 147~165.
- (10) Okamoto, S. and Sunabashiri, Y., 1992, "Vortex Shedding from a Circular Cylinder of Finite Length Placed on a Ground Plane," *Trans. ASME, J. Fluids Engineering*, Vol. 114, pp. 512~521.
- (11) Farivar, D., 1981, "Turbulent Uniform Flow Around Cylinders of Finite Length," *AIAA J.*, Vol. 19, pp. 275~281.
- (12) 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.
- (13) 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.
- (14) Farrell, 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," *Trans. ASME, J. Fluid Engineering*, Vol. 99, pp. 470~479.
- (15) Ayoub, A. and Karamcheti, K., 1982, "An Experiment on the Flow Past a Finite Circular Cylinder at High Subcritical and Supercritical Reynolds Numbers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 118, pp. 1~26.