

<논 문>

나선형의 표면돌출물이 부착된 원주의 근접후류에 관한 실험적 연구

권기정* · 김형범** · 이상준***

(1996년 1월 23일 접수)

Experimental Study on the Near Wake behind a Circular Cylinder with Helical Surface Protrusions

Ki-Jung Kwon, Hyoung-Bum Kim and Sang-Joon Lee

Key Words : Surface Protrusion(표면 돌출물), Circular Cylinder(원주), Hot-Wire(열선 유속계), Wake Control(유동 제어)

Abstract

Surface protrusions have been attached on a cylinder surface to reduce the flow-induced structural vibration by controlling the wake flow. Wind tunnel tests on the near wake of a circular cylinder with surface protrusions were carried out to investigate the flow characteristics of the controlled wake. Three experimental models were used in this experiment; one plain cylinder of diameter D and two cylinders wrapped helically by three small wires of diameter $d=0.075D$ with pitches of $5D$ and $10D$, respectively. Free stream velocity was ranged to have Reynolds number from 5000 to 50,000. Streamwise and vertical velocity components of the wake were measured by a hot-wire anemometry. The spanwise velocity component measured by a one-component fiber optic LDV revealed that time-averaged wake field has a nearly two-dimensional structure. It was found that the surface protrusions elongate the vortex formation region, which decrease the vortex shedding frequency. The suppression of vortices caused by the surface protrusions increases the velocity deficit in the center of wake region.

기 호 설 명

<p>AR : 원주의 종횡비 (=L/D)</p> <p>b : 후류 반폭</p> <p>D : 원주 직경</p> <p>d : 표면 부착물(원주)의 직경 ($d=0.075D$)</p> <p>f_s : 와류출 주파수</p> <p>L : 두 끝판(end plate) 사이의 거리</p> <p>P : 표면 부착물의 피치</p>	<p>Re : 원주 직경을 기준으로 한 레이놀즈 수</p> <p>t : 시간</p> <p>T^* : 무차원화된 시간함수</p> <p>U_0 : 자유흐름속도</p> <p>U_m : 주유동방향의 국부평균속도</p> <p>U_c : 대류 속도</p> <p>U, V, W : 각 방향(x, y, z)으로의 평균 속도</p> <p>V_p : 위상평균화된 속도성분</p> <p>u, v, w : 각 방향(x, y, z)으로의 순간 변동속도</p> <p>$u'v'$: 레이놀즈 전단 응력</p> <p>X, Y : 원주의 중심을 기준으로 한 직각 좌표계</p>
--	---

*한국 항공우주연구소

**포항공과대학교 기계공학과 대학원

***회원, 포항공과대학교 기계공학과

- ϕ : 원주의 단면에서 정체점을 기준으로 시계 방향으로 측정된 각도
 τ : 시간지연

1. 서론

앞 모양이 뚱뚱한 물체(bluff body)의 후류는 주기적인 와류출(vortex shedding)에 의하여 거시적인 응집구조(coherent structure)를 갖는다는 사실이 Strouhal⁽¹⁾에 의해 밝혀진 이후 2차원 원주 후류유동은 많은 사람들에 의해 연구되어져 왔다. 원주 후류유동에서 규칙적인 와류출의 주기는 유동속도와 원주의 직경에 의해 결정되어진다. 유체의 흐름속에 놓여 있는 원주는 원주로부터 규칙적으로 유출되는 와동에 기인하여 표면압력이 주기적으로 변하게 되고, 이는 원주를 상하 방향으로 진동시키게 된다. Weaver⁽²⁾는 와류출 주파수와 탄성체의 고유진동수(natural frequency)가 같아질 경우 공진현상에 의해 진폭이 큰 진동이 발생한다고 보고하였다. 이와같은 표면압력의 변화에 의한 진동은 궁극적으로 구조물의 피로파괴(fatigue)를 야기하기도 한다.

규칙적인 와류출에 기인한 진동은 안테나, 다리, 탑 등과 같은 원주형의 구조물에서 많이 발생하며 주로 토목공학적 관점에서 연구되어져 왔다.^(1,2) 이와 같은 연구를 통하여 유동에 기인한 진동을 억제하거나 구조물 설계에 있어 와류출을 제어하는 여러가지 방법들이 개발되었다.

유동에 기인한 물체의 진동을 억제하는 방법에는 구조적인 방법과 공기역학적 방법의 두 가지가 있다. 과거에는 구조물의 강도(stiffness)를 크게 한 다든가, 아니면 감쇠장치(damping device)를 이용하여 진동을 억제하는 구조적인 방법이 주로 사용되어져 왔다. 와류출을 제어하는 공기역학적 방법으로는 물체 주위에 후류 조절장치(wake controller)를 부착하여 와형성 영역이나 합류점 등을 변화시키는 방법과 물체표면에 부착물을 장착하여 박리선이나 표면유동의 방향을 변화시켜 와 구조를 바꾸는 방법 등이 있다.

원주 후류의 와형성과 와류출은 많은 사람들에 의해 연구되어져 왔으며 이와같은 연구를 통해 몇 가지 공기역학적 방법들이 연구되었다. 후류 조절장치를 사용한 예로 Roshko⁽³⁾는 원주 뒤에 분리판

(split plate)을 설치하여 와를 억제하였고 Strykowski와 Sreenivasan⁽⁴⁾은 원주에 의해 생성된 전단층내부에 작은 직경의 원주를 위치시켜 와류출을 제어하였다.

Weaver⁽²⁾는 안테나 형태의 구조물 표면에 나선형으로 와이어를 감아 와류출에 의한 진동을 억제하였는데, 그는 레이놀즈수 변화에 따른 Karman 양력계수의 rms(root mean square)값을 측정하였다. Nebres와 Batil⁽⁵⁾은 네 개의 작은 와이어가 나선형으로 감긴 원주를 사용하여 양력변화와 와형성 영역을 측정하였다. 그들은 와이어가 감긴 원주의 경우 와형성 영역의 길이가 길어짐을 밝혔다. Zdravkovich⁽⁶⁾는 와류출 억제방법에 대한 연구에서 와류출 억제에 가장 크게 영향을 끼치는 인자를 와형성 영역의 길이라고 하였다.

원주 주위에 이와같이 표면돌출물을 감아주는 방법은 기존의 설비에 쉽게 응용할 수 있는 것으로 산업적 응용 가능성이 매우 높다. 그러나 표면돌출물이 부착된 원주에 대한 기존의 연구^(2,5,6)에서 부착물에 기인한 후류구조의 변화에 대해서는 명확하게 밝혀져 있지 않다. 왜냐하면 와류출의 억제가 주로 구조물의 진동과 관련되어 양력이나 항력과 같은 공력측정과 진동해석을 위주로 연구되어 왔기 때문이다.

공기역학적인 관점에서 표면돌출물에 의해 후류구조가 어떻게 변화하는가에 대한 지식은 유동에 기인한 진동문제를 해석함에 있어서 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 나선형의 표면돌출물이 부착된 원주의 근접후류의 유동특성을 실험적으로 해석하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험모델 및 실험장치

본 연구는 시험부가 폭 720 mm, 높이 600 mm, 길이 2,500 mm인 폐쇄형 아음속풍동에서 행해졌다. 자유흐름속도가 10m/s일 때 풍동의 난류강도는 0.2%, 유속의 비균일도는 0.17%이다. Fig. 1은 본 실험에 사용되어진 세 가지 실험 모델의 개략도와 좌표계이다. 이들은 외경(D)이 40 mm인 원주와 이 원주 표면에 직경 $d=0.075D$ 인 세 개의 가느다란 와이어를 피치(P)가 각각 5D, 10D가 되게 나선형으로 부착한 것이다.

본 실험에 사용한 표면돌출물의 피치(P)는

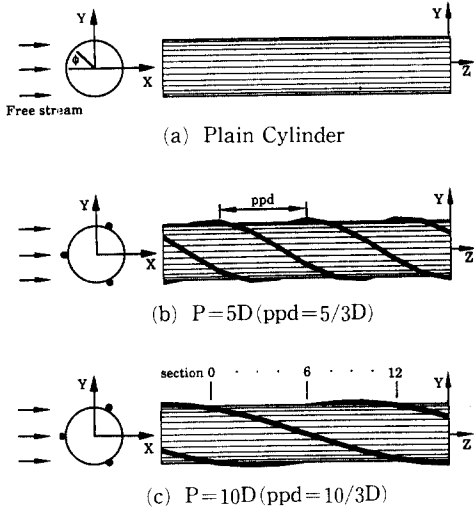


Fig. 1 Schematics of models with coordinate system

Zdravkovich⁽⁶⁾의 연구결과를 토대로 결정하였다. 그는 $Re=10000$ 에서 $P=10D$ 의 모델은 와류출을 효과적으로 제어하나 $P=5D$ 의 경우는 와동의 제어 효과를 보여주지 않는다고 하였다. Fig. 1에서 ppd (pitch to pitch distance)는 같은 형상이 되풀이되는 표면돌출물 사이의 거리를 의미하며 1ppd를 12 등분하여 각 지점을 section 0, 1, 2, ..., 12로 정의하였다. 여기서 section 0는 방위각(정체점으로부터 시계방향)이 $\phi=0^\circ$, $\pm 120^\circ$ 인 단면을 의미한다. 실험모델은 풍동 시험부의 선단으로부터 300 mm, 바닥면으로부터 270 mm 높이에 수평으로 설치하였으며 풍동 벽면으로부터 성장하는 경계층의 영향을 최소화하기 위해 모델의 양 끝단에 사각형의 끝판(end plate)을 설치하였다. 원주의 종횡비 ($AR=L/D$), 즉 두 끝판 사이의 거리(L)와 원주 직경(D)과의 비는 15로 원주 중앙에서 유동의 2차 원성을 확인할 수 있는 최소 종횡비($AR=7$)보다 크다. 끝판과 원주모델을 포함한 막힘비는 7.5%로 막힘비에 따른 보정은 하지 않았다.⁽⁷⁾ 실험은 원주 직경(D)을 기준으로 한 레이놀즈수 $Re=5000, 7500, 10,000, 25,000, 50,000$ 에 해당하는 자유흐름속도에서 수행하였다.

유동가시화는 후류측정실험에 사용되어진 동일한 실험조건에서 수행되었다. 파라핀 오일을 연소시켜 나온 흰 연기를 모델의 section 0 위치의 배면($\phi=165^\circ \sim 195^\circ$)에 만들어진 0.5 mm 두께의 슬릿(slot)을 통하여 유출시켜 원주 후류를 가시화하였다. 세

개의 스트로보스코프(stroboscope)를 사용하여 와류출 주파수에 맞추어 후류영역의 와동을 조명하였으며, Nikon 카메라로 촬영하였다.

2.2 열선유속계 측정

열선유속계를 이용하여 제어된 원주후류의 속도 분포와 난류강도, 그리고 와형성 영역의 길이를 측정하였다. Fig. 2는 본 연구에 사용되어진 속도측정장치의 개략도를 보여주고 있다.

정온형 열선유속계(TSI IFA 100)를 이용하여 I형 열선프로우브로부터 기준신호를 얻고, X형 열선프로우브로 후류속도를 측정하였다. 열선유속계로부터 나온 아날로그 속도신호를 A/D 변환기(IFA 200)를 이용하여 디지털신호로 바꾸어 컴퓨터에 저장하였다. 속도신호는 초당 2KHz로 샘플링하여 한 측정점에서 16,000개의 데이터를 받았다. 원주 하류 $X/D=5$ 인 위치 단면에서 $Y/D=2.5 \sim -2.5$ 인 구간을 열선프로우브를 $\Delta Y=4$ mm 간격으로 이송시켜가며 속도를 측정하였다. 와형성 영역은 I형 열선을 이용하여 측정하였는데, 본 연구에서는 Bloor⁽⁸⁾처럼 원주로부터 주유동 방향 속도성분의 rms값이 가장 큰 곳까지를 와형성영역이라고 정의하였다. 원주후류의 주기적인 와류출로 인하여 와형성 영역에서는 와류출주파수(f_s)의 두 배가 되는 주파수 성분들이 존재하게 된다. 먼저 후류속도신호의 파워스펙트럼 밀도함수(PSD)로부터 와류출주파수(f_s)를 구한 후 주파수 $2f_s$ 를 중심으로 ± 5 Hz의 대역필터링(bandpass filtering)을 한 후, I형 열선프로우브를 원주의 중심축을 따라 하류방향으로 이동시켜가면서 후류속도의 rms값이 최대값을 갖는 위치를 찾았다.

2.3 LDV 측정

원주 후류의 횡방향(spanwise) 속도성분을 측정하기 위하여 1-D fiber-optic LDV를 이용하였다. 산란입자로는 SAFEX액을 태워서 나오는 흰 연기를 사용하였다. 35mW He-Ne레이저 빔을 광섬유를 통해 자동 이송장치에 설치된 fiber-optic 프로우브에 연결시킨 후 측정점을 형성하도록하였다. $Re=10,000$ 인 조건에서 $X/D=5$ 단면의 $Y/D=-1, 0, 1$ 지점에서 LDV 프로우브를 횡방향으로 이동시키면서 횡방향 속도성분을 측정하였다. 각 측정점에서 512개의 데이터를 받아 횡방향 속도성분의 평균속도와 난류강도를 구하였다.

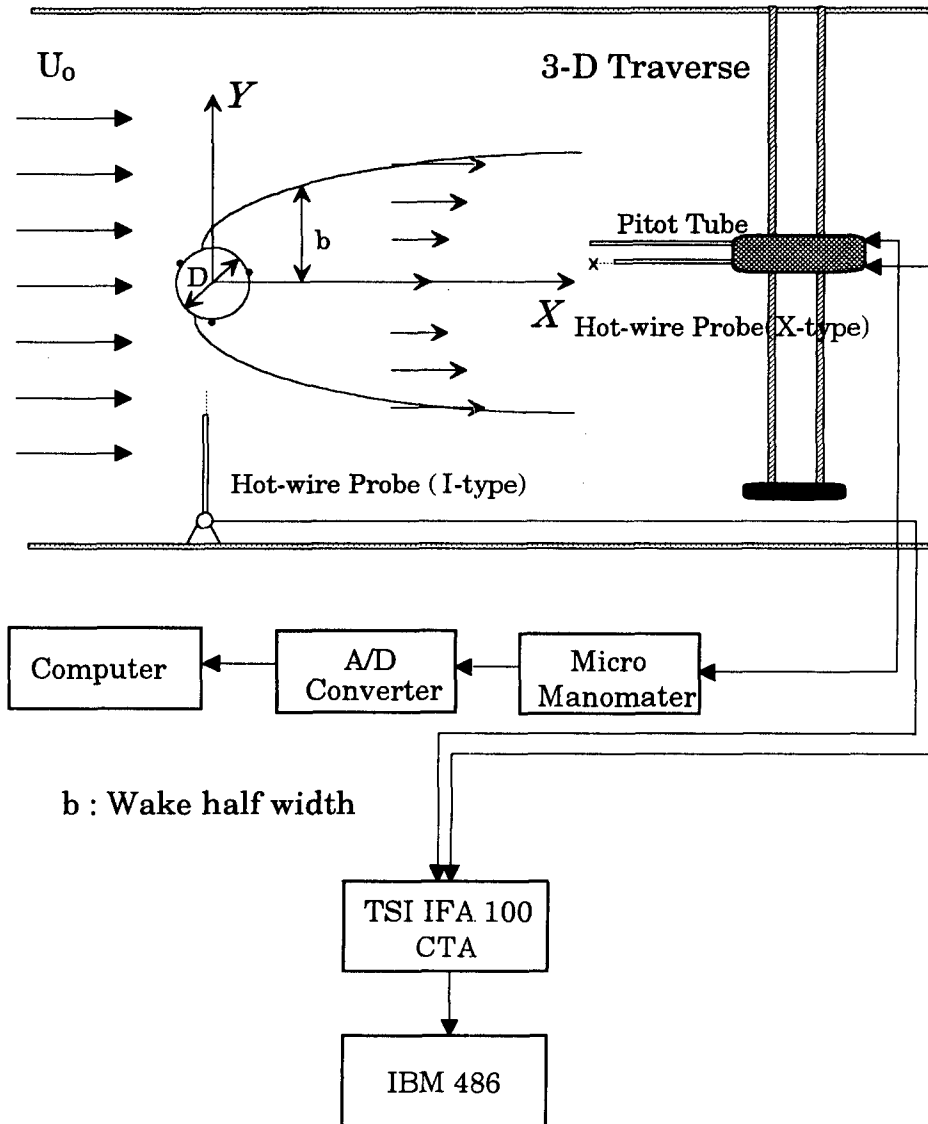


Fig. 2 Velocity measurement system

3. 결과 및 토의

3.1 와형성 영역

표면돌출물이 부착된 원주후류의 횡방향 속도성분을 측정하기 위하여 LDV를 사용하였다. 와이어가 감긴 원주의 경우 표면상의 3차원성에도 불구하고 $X/D=5$ 의 위치에서 횡방향 속도성분(W)의 최대값은 자유흐름속도(U_0)의 약 1% 정도 밖에 되지 않았고 후류 중심부에서 횡방향 평균속도성분의

비대칭성도 크지 않았다. Fig. 3은 원주의 횡방향 중심부에서 $Y=0, \pm 1$ 위치에서 측정된 횡방향 속도성분의 난류강도분포를 보여주고 있다.

표면돌출물이 있는 원주는 없는 경우의 난류강도(약 1.7%)에 비해 조금 높은 횡방향의 난류강도값을 가지나 주유동방향 속도성분의 난류강도(Fig. 9)와 비교해 볼 때 상대적으로 매우 낮은 값을 가진다. 이는 모델 표면의 3차원 형상에 의해 야기된 횡방향의 운동량이 미약하기 때문에 하루로 나아가면서 결국 X, Y 두 방향 속도성분에 의해 후류유

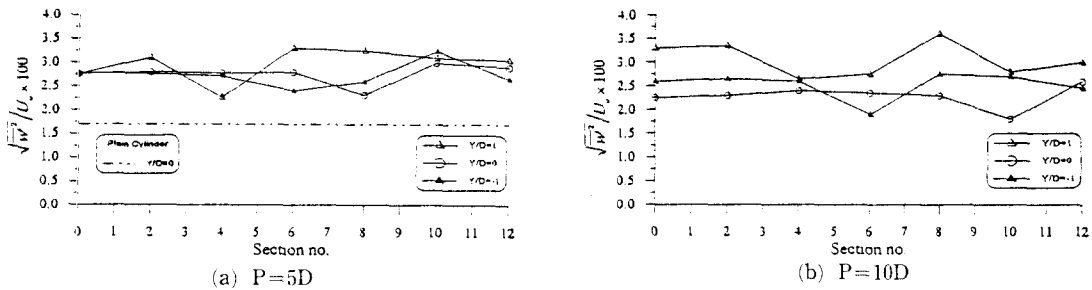


Fig. 3 Spanwise turbulence intensity distribution at X=5D

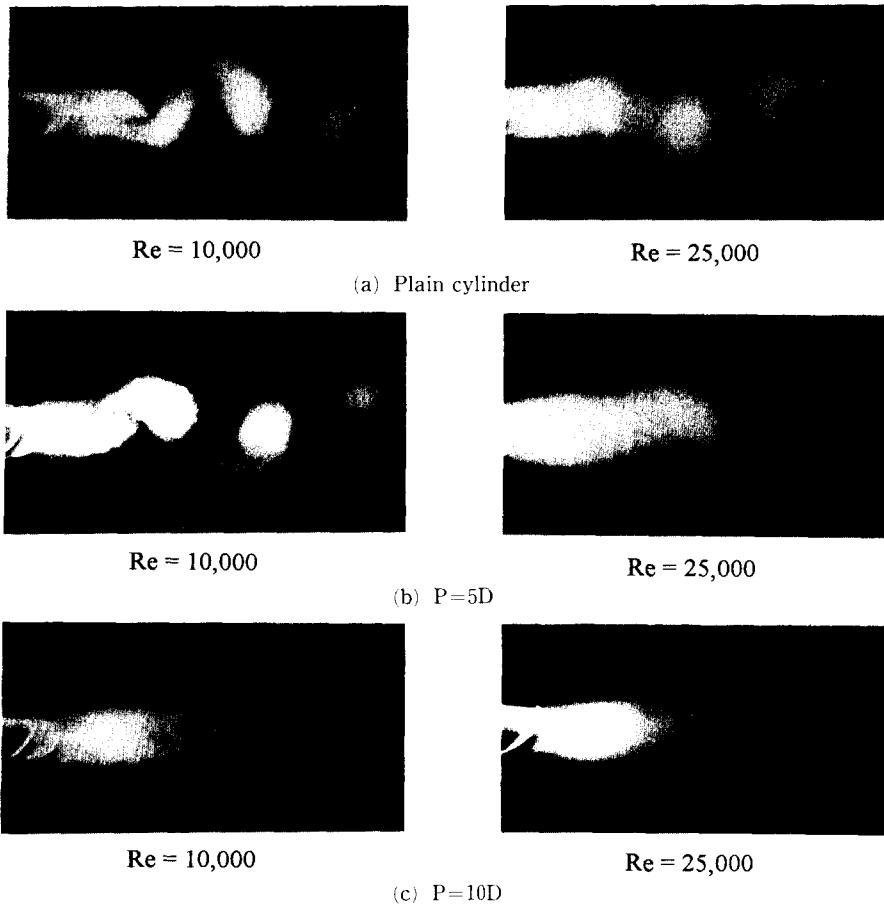


Fig. 4 Flow visualization of wake behind a circular cylinder with/without surface protrusions

동장이 지배되어짐을 의미한다. 따라서 표면돌출물이 부착된 원주의 경우 표면유동 자체는 원주의 횡방향으로 주기성을 가짐에도 불구하고 와형성 영역 이후 구간에서 시간평균화된 후류특성은 거의 2차원성을 가짐을 알 수 있다. 그러나 원주 직후의 근접후류에서는 횡방향으로 서로 이웃한 흐름방향

(streamwise)의 와동간의 상호작용이 존재함을 유추할 수 있다. 앞으로 이와 관련한 체계적인 연구가 요구되어 진다.

Fig. 4는 표면돌출물 부착여부에 따른 후류유동의 변화를 가시화한 사진을 보여주고 있다. 유동가시화 결과, 일반 원주의 경우 실험이 수행된 모든

레이놀즈수 범위에서 주기적으로 유출하는 와열을 볼 수 있으며 와형성영역의 길이는 레이놀즈수가 증가함에 따라 약간씩 감소하였다. 표면에 와이어가 감긴 원주의 경우에는 레이놀즈수에 따라 후류의 유동특성이 크게 변화하는 것을 관찰할 수 있다. 피치가 $P=5D$ 인 원주의 경우 레이놀즈수 $Re=10,000$ 이하에서는 일반 원주와 비교하여 와형성 영역의 길이가 약간 길어진 것을 제외하고는 거의 유사한 후류구조를 보여주고 있다. 그러나 $Re=25,000$ 이상의 실험조건에서는 후류폭이 줄어들며 주기적인 와유출현상을 관찰하기가 어렵다. 피치가 $P=10D$ 인 모델에서는 거의 모든 레이놀즈수 범위에서 와동의 억제에 관찰할 수 있고 큰 규모의 와동은 보이지 않았다.

유동가시화 결과로부터 후류폭(b)을 정량적으로 측정하여 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 레이놀즈수 $Re=10,000$ 에서는 $P=5D$ 인 모델의 후류폭은 일반원주와 $P=10D$ 인 원주의 후류폭의 중간정도이다. 그러나 $Re=25,000$ 에서는 피치에 따른 후류폭의 차이는 거의 보이지 않았다. 즉, 레이놀즈수 $Re=25,000$ 이상에서는 피치에 상관 없이 표면돌출물이 부착된 원주는 와동 억제에 효과적임을 알 수 있다. 이와 같은 유동가시화 결과를 토대로 후류의 속도측정을 $Re=10,000$ 과 $Re=25,000$ 인 경우를 중심으로 수행하였다.

Fig. 6은 조건부 위상평균의 기준신호로 사용된 I형 열선의 속도신호로부터 구한 파워스펙트럼 밀도함수(PSD)를 나타내고 있다. 일반 원주에 비해 표면돌출물이 부착된 모델의 경우 와유출주파수가 감소하며 그 현상은 $P=5D$ 모델에 비해 $P=10D$ 모델의 경우에 더욱 뚜렷하다. 일반 원주의 경우, Re 수에 상관 없이 정점(peak)을 가지나 표면돌출물이 부착된 원주의 경우 $Re=25,000$ 에서 피치에 관계 없이 뚜렷한 정점을 보이지 않았다. 특히 피치가 $P=10D$ 인 모델은 정점의 크기가 더욱 작아 와동억제에 보다 효과적임을 알 수 있다. 표면에 돌출물이 부착된 원주에서 정점이 보이지 않는 이유는 원주표면에 나선형으로 부착된 와이어에 의해 유동박리가 횡방향으로 비대칭적으로 발생하고 이로 인해 변화된 횡방향 와(spanwise vortices)는 주유동 방향 와구조의 와형성 메커니즘에 변화를 가져와 규칙적인 와유출을 억제하기 때문으로 생각되어진다.

와형성 영역은 후류폭과 함께 후류구조를 특징짓

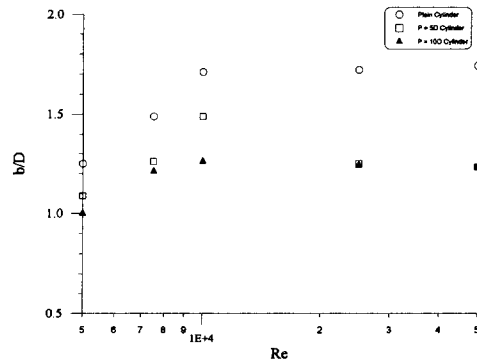
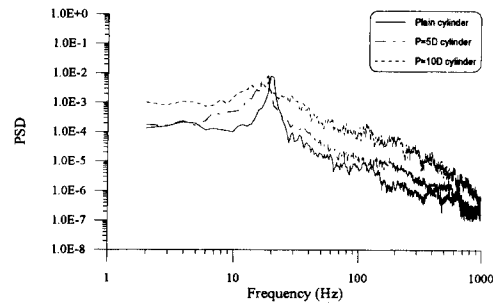
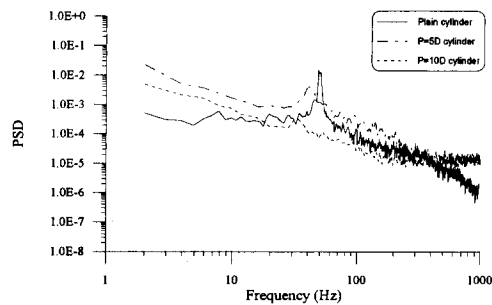


Fig. 5 Variation of wake half width



(a) $Re=10,000$



(b) $Re=25,000$

Fig. 6 Variation of power spectral density

는 특성길이의 하나로 중요한 의미를 갖는다. 와형성 영역은 원주모델로부터 자유흐름이 후류중심축을 가로지르는 지점까지를 의미하고, 이 영역내부에서는 역방향 흐름이 존재한다. 또한 원주의 위아래에서 교대로 유출되는 두 와동에 영향을 받아 와형성 영역의 끝부분에서는 와유출주파수의 두 배되는 주파수($2f_s$)에서 속도의 rms값이 가장 크게 나타난다.

Fig. 7은 I형 열선을 후류 중심축($Y=0$)을 따라 하류로 이동시키면서 측정된 주유동방향 속도성분

의 난류강도분포를 나타낸다. 여기서 와형성 영역의 길이를 비교하여 보면 표면돌출물이 부착된 원주의 경우 와형성 영역의 길이가 일반 원주에 비해 길어짐을 알 수 있다.

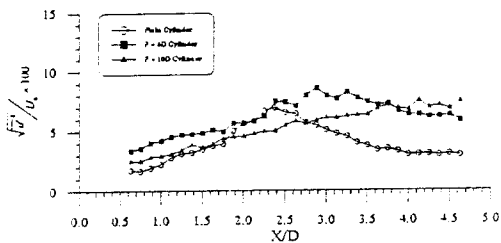
일반 원주의 경우 레이놀즈수가 증가함에 따라 최대값을 갖는 위치가 원주쪽으로 이동하며 뚜렷한 정점(peak)을 가진다. 그러나 표면돌출물이 부착된 원주의 경우 $Re=25,000$ 에서 피치에 상관 없이 정점의 위치가 명확하지 않다. 이것은 표면에 돌출된 와어의 영향으로 주유동방향 와동의 주기적 유출이 억제되기 때문이다. 레이놀즈수 $Re=10,000$ 에서 피치가 $P=5D$ 인 원주의 경우 난류강도분포가 정점을 가지나 그 위치는 일반 원주보다 뒤쪽에 위치한다. 그러나 피치가 $P=10D$ 인 원주의 경우에는 $Re=25,000$ 에서와 마찬가지로 정점의 위치가 명확하지 않다. Fig. 6에서 보듯이 와유출주파수의 PSD값이 Re 수가 증가함에 따라 감소하기 때문에 와유출주파수를 중심으로 협대역필터링한 Fig. 7의 결과에서는 주유동방향 속도성분의 rms값이 Re 수가 증가함에 따라 줄어들었다. 와형성 영역의 측정은 section 0, 6에서 이루어졌는데 이 두 위치에서 측정된 와형성 영역의 길이는 거의 일치하였다. Nebres⁽⁵⁾도 이와 유사한 결과를 발표하였다. 따라서, 본 연구에서 다른 Re 수 범위내에서는 횡방향으로 와형성 영역의 길이가 거의 일정함을

알 수 있다.

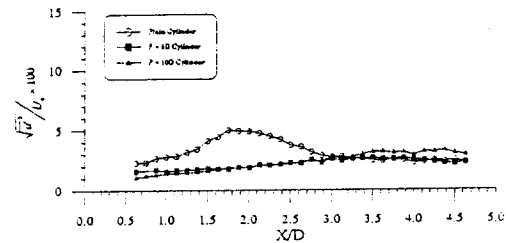
3.2 후류특성

Fig. 8은 모델 뒤 $X/D=5$ 위치에서 측정된 후류 유동장의 주유동방향 국부 평균속도(U_m) 분포를 나타내고 있다.

일반 원주의 경우 레이놀즈수 변화에 관계 없이 유사한 속도분포를 가지나 표면돌출물이 부착된 원주의 경우는 부착되지 않은 일반 원주보다 큰 속도결손을 보여주고 있다. $Re=10,000$ 일 때는 $P=10D$, $P=5D$, 일반 원주의 순으로 속도결손의 크기가 나타났고, $Re=25,000$ 에서는 $P=10D$ 와 $P=5D$ 가 거의 같은 크기의 속도결손을 보였다. 이것은 후류폭에 관한 Fig. 5의 결과와 잘 일치한다. 레이놀즈수 $Re=10,000$ 에서 피치가 $5D$ 인 모델은 $P=10D$ 인 모델과 비교하여 와동의 억제효과가 적으나 레이놀즈수가 $Re=25,000$ 에서는 두 경우 모두 효과적으로 와를 억제하고 있음을 나타낸다. 또한 후류의 중앙부분에서 속도결손이 크고 후류폭이 작다는 것은 자유흐름과 후류 사이에 큰 속도구배가 존재한다는 것을 의미하고 이것은 후류와 자유흐름 사이에 존재하는 전단력과 주유동방향 와동 사이에 강한 상호작용이 존재함을 나타낸다. 2차원

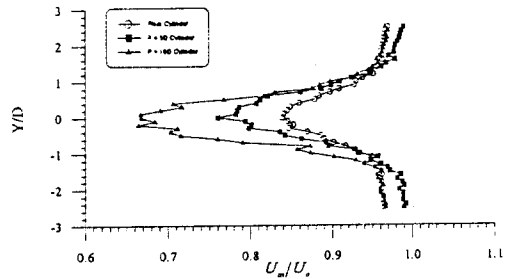


(a) $Re=10,000$

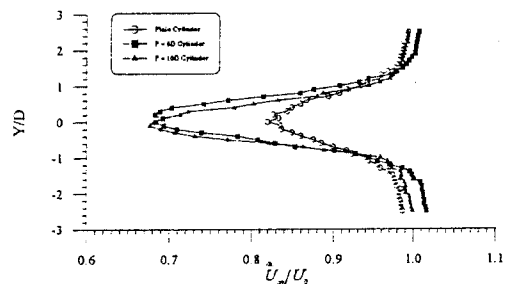


(b) $Re=25,000$

Fig. 7 Length of vortex formation region



(a) $Re=10,000$



(b) $Re=25,000$

Fig. 8 Mean streamwise velocity distribution at $X/D=5$

원주의 크고 뚜렷한 와동은 비점성유동을 후류내부로 유입시키고 후류유동에 운동량을 전달하여 전단력을 감소시킨다. 그러나 표면돌출물이 부착된 원주의 경우는 와동이 억제되어 후류폭이 줄어들며 일반 원주에 비해 자유흐름의 유입이 충분하지 못하여 결과적으로 속도결손의 회복이 늦어지게 된다.

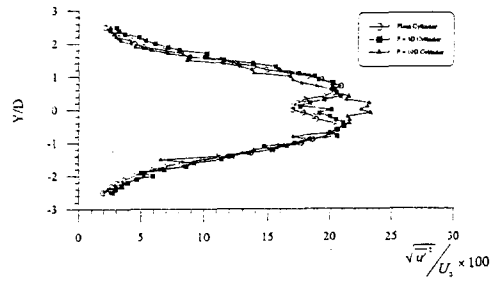
주유동방향 속도성분의 난류강도분포를 나타낸 Fig. 9를 보면 와동이 억제된 후류유동의 중앙 부위에서 일반 원주에 비해 큰 난류강도 값을 가지며, 후류 전단층에서는 낮은 값을 가진다. 이것은 표면돌출물에 의해 와동이 수직방향으로 눌러져 후류중심쪽으로 모이게 되고 와섭동이 억제됨을 의미한다. 이와같이 억제된 와섭동은 자유흐름 유체로부터 후류유동 내부로의 운동량 전달을 원활히 하지 못하게 하고 속도결손의 큰 원인이 된다.

Fig. 10은 표면돌출물 부착이 원주후류의 레이놀즈 전단응력 변화에 미치는 영향을 나타내고 있다. 여기서 보면 표면돌출물이 부착된 원주의 경우 일반 2차원 원주에 비해 보다 큰 전단응력값을 보여주고 있다. 즉, 표면돌출물이 부착된 원주의 경우 강한 전단유동이 형성되어 난류에너지의 생성이 일반 원주보다 더 크음을 알 수 있다.

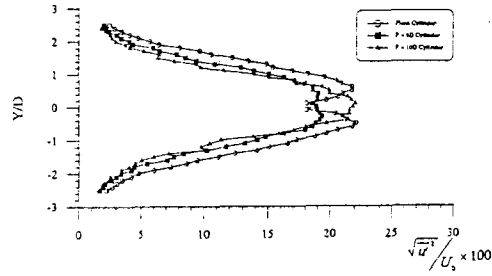
후류의 조직적 유동구조를 파악하기 위하여 비점성 구간에 설치한 I형 열선유속계의 속도신호를 기준신호로 하여 후류유동의 위상평균속도를 구한 후 와도분포를 구하였다. 와도계산에 필요한 대류속도는 와도분포에서 먼저 와중심의 위치(t, Y)를 알아낸 후 그 위치에서의 속도를 앙상블 평균하여 다음과 같은 식으로 구하였다.

$$U_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i(t, Y); U_c(Y) = \Delta X / \tau$$

위 식에서 N은 앙상블 평균횟수이고, τ 는 거리가 $\Delta X = 1D$ 만큼 떨어진 두 지점에서의 속도상관함수 $(\overline{V_p(t, Y) \cdot V_p(t-\tau, Y)})$ 를 최대로 만드는 지연시간이다. 상관관계식에서 X방향의 위상평균속도 대신에 Y방향의 위상평균속도를 사용한 것은 본 연구에서 다른 원주후류의 경우 주유동방향 속도성분(U)보다 수직방향 속도성분(V)신호가 주기성을 보였기 때문이다. 이와같이 구한 위상평균속도로 부터 와도분포를 구할 수 있다. 일반 2차원 원주의 경우, 유동가시화 결과와 유사하게 Re수에 상관 없이 거의 유사한 와도분포를 보였다.

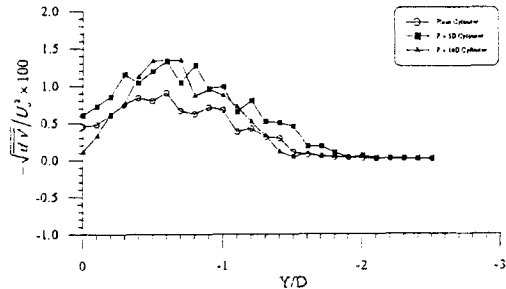


(a) Re=10,000

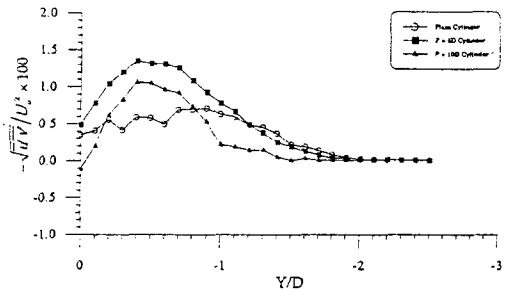


(b) Re=25,000

Fig. 9 Streamwise turbulence intensity distribution



(a) Re=10,000



(b) Re=25,000

Fig. 10 Reynolds shear stress distribution

Fig. 11은 P=5D인 원주후류의 와도분포를 나타낸 것으로 Re수가 증가함에 따라 원주 상하의 박리전단유동에서 생성된 두 와동이 억제되어 와동쌍

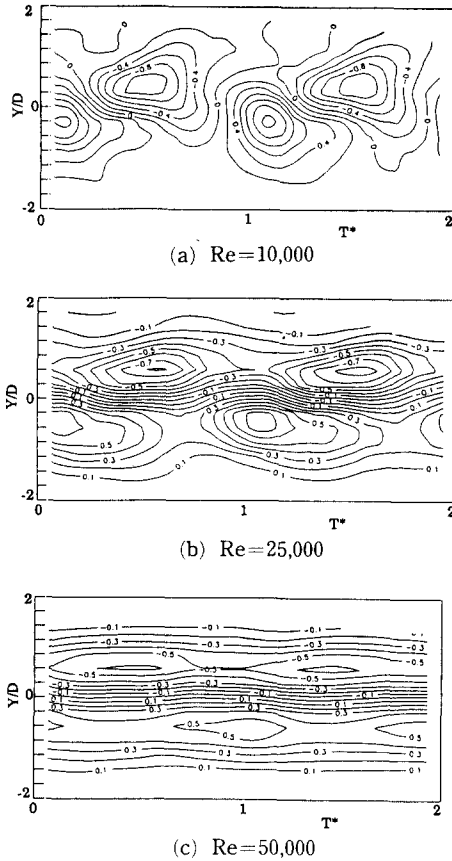


Fig. 11 Vorticity contour plot of P=5D cylinder

이 서로 가까워진다. $Re=10,000$ 의 경우에는 아래와 위쪽에 교대로 유출되어지는 뚜렷한 와동이 존재하는 데 비해, $Re=25,000$ 과 $Re=50,000$ 에서는 두 와동이 납작해지며 길게 늘어남을 확인할 수 있다. 즉 후류 중심축을 기준으로 상하 와동이 분리되고 주유동 방향으로 길쭉한 와동형태를 가진다. 이와 같은 표면돌출물에 의해 억제된 와류구조가 원주의 상하진동을 감소시키는 기본 메커니즘으로 생각되어진다.

4. 결 론

원주 표면에 가느다란 와이어를 나선형으로 감아서 만든 표면돌출물 부착 원주의 근접후류를 실험적으로 연구하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 나선형 표면돌출물이 감긴 원주는 와형성 영역의 길이가 일반 원주보다 길어지고, 후류의 폭이

줄어든다.

(2) 표면돌출물에 의해 제어된 후류유동의 경우 PSD의 정점이 사라지고 와유출 주파수가 감소하여 Re 수 증가에 따라 와동이 억제되어 상하와동이 분리되며 납작한 형태로 변화한다.

(3) 피치가 $P=5D$ 인 모델은 레이놀즈수 $Re=10,000$ 이하에서 와동 억제효과가 작았으나 레이놀즈수 $Re=25,000$ 이상에서 와동 억제효과를 보였다.

(4) 피치가 $P=10D$ 인 경우에는 본 연구에서 다룬 레이놀즈수 범위내에서 항상 와동 억제효과를 보였다.

(5) 표면돌출물은 원주 후류의 규칙적인 와유출과 와형성을 억제시키고 상하와동을 분리시킴으로써 유동에 기인한 진동을 감소시키는 것으로 보인다.

후 기

본 연구는 과학재단지정 첨단유체공학연구센터(AFERC)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Blavins, R. D., 1990, "Flow-induced Vibration," Van Nostrand Reinhold.
- (2) Weaver, W., 1961, "Wind-Induced Vibration in Antenna Members," *Proc. ASCE, J. Eng. Mechanics Division*, Vol. 87, pp. 141~165.
- (3) Roshko, A., 1954, "On the Drag and Shedding Frequency of Two-dimensional Bluff bodies," *National Advisory Committee for Aeronautics, NACA TN 3169*.
- (4) Strykowski, R. J. and Sreenivasan, K. R., 1990, "On the Formation and Suppression of Vortex Shedding at Low Reynolds Numbers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 218, pp. 71~107.
- (5) Nebres, J. V. and Batill, S. M., 1992, "Flow Around Cylinders with Helical Surface Protrusions," *Proc. 30th Aerospace Sciences Meeting*, Reno, Nevada, *AIAA Paper No. 92-0540*.
- (6) Zdravkovich, M. M., 1981, "Review and Classification of Various Aerodynamic and

- Hydrodynamic Means for Suppressing Vortex Shedding," *J. Wind Eng. & Industrial Aero.*, Vol. 7, pp. 145~189.
- (7) Maskell, E. C., 1965, "A Theory of the Blockage Effects on Bluff Bodies and Stalled Wings in a Closed Wind Tunnel," *ARC R & D*, No. 3400.
- (8) Bloor, M. S., 1963, "The Transition to Turbulence in the Wake of a Circular Cylinder," *J. Fluid Mech.*, Vol. 19, pp. 290~304.