

톱니형 환이 부착된 원주의 근접후류특성 연구 (Ⅲ)

- 속도회복 메카니즘에 관하여 -

류병남*·김경천**·부정숙*

(2002년 10월 9일 접수, 2002년 12월 24일 심사완료)

Characteristics of Near Wake Behind a Circular Cylinder with Serrated Fins (Ⅲ)

- Mechanism of Velocity Recovery -

Byong Nam Ryu, Kyung Chun Kim and Jung Sook Boo

Key Words: Phase Average(위상평균), Vortex Formation Length(와형성영역길이), Vorticity(와도), Advection Velocity(와이동속도)

Abstract

The characteristics of near wakes of circular cylinders with serrated fins are investigated experimentally using a hot-wire anemometer for various freestream velocities. Near wake structures of the fin tubes are observed using a phase average technique. With increasing fin height and decreasing fin pitch, oscillation of streamwise velocity increases, while oscillation of lateral velocity decreases. The time averaged V-component velocity distribution of the finned tube is contrary to that of the circular cylinder due to the different strength of entrainment flow. This strength is affected by the distance of $\bar{U}/U_\infty = 1.0$ contour lines. $\bar{U}/U_\infty = 1.0$ contour line approaches to the wake center line when the fin density is increased. When the distance between $\bar{U}/U_\infty = 1.0$ contour lines comes close, the shear force should be increased and the flow toward the wake center line can be more strengthened because of the shear force. Factors related to the velocity recovery in the near wake of the finned tube are attributed to the turbulent intensity, the boundary layer thickness, the position and strength of entrainment process.

기호설명

d_i : 내경(inner diameter)
 d_o, d : 외경(outer diameter)
 f : 와류출주파수
 (vortex shedding frequency)
 h : 환 높이(fin height)
 L_B : 와형성영역의 길이

(vortex formation length)
 p : 환 피치(fin pitch)
 t : 환 두께(fin thickness)
 U_a : 와이동속도(advection velocity)
 U_∞ : 자유유동속도(freestream velocity)
 Θ : 위상(phase)
 Ω : 와도(vorticity)
 $\langle \rangle$: 위상평균(phase average)

* 부산대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

† 책임저자, 정회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

E-mail : jsboo@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2302 FAX : (051)512-9835

1. 서론

와류출과 밀접한 관계를 가진 와형성영역의 길이는 분리판(splitter plate)과 같은 물체를 이용하여 인위적으로 원주후류를 제어하면 변화하며, 와류출에 영향을 미치게 된다. Gerrard⁽¹⁾는 원주

후면에 분리판을 후류중심선과 나란히 부착하여 행한 실험에서 분리판의 길이를 증가시킬 경우 분리판의 영향으로 와형성영역이 증가하여 스트로할 수가 감소한 것으로 추정하고 있다. 그는 원주에 설치된 분리판이 원주 후면의 순환(circulation)을 생성하여 와의 강도와 와유출주파수를 감소시킨다고 주장하였다. Nakamura⁽²⁾는 다양한 형상의 뭉툭한 물체에 분리판 등을 이용하여 스트로할 수 변화를 관찰하였으며 스트로할 수의 변화에 가장 중요한 인자는 후면에 부착된 물체길이와 뭉툭한 물체의 특성길이 비로 꼽았다. Szewczyk 등⁽³⁾은 가시화실험 등을 통하여 분리판의 영향을 4 가지의 영역으로 나누어 상세히 설명하고 있다. 그들은 분리판의 길이에 따라 (1) 상·하 진동(transverse oscillation)을 감소시키는 영역, (2) 유입(entrainment)을 증가시키고 스트로할 수가 감소하는 영역, (3) 유입이 감소되고 스트로할 수가 증가하는 영역과 (4) 분리판과 와유출이 상호작용하여 스트로할 수가 감소하는 구간으로 나누어 설명하였다. 이렇게 분리판의 길이에 따라 세부적으로 원주 상·하의 전단층의 변화와 스트로할 수의 변화를 관찰하였으며 Apelt 등⁽⁴⁾의 결과보다 스트로할 수의 변동폭이 작음을 보인 바 있다.

분리판은 원주후면에 부착되어 와유출에 의한 요동에 큰 영향을 미치지만 원류의 경우는 원류 상의 속도구배가 후류에 영향을 미친다. 방법상의 차이는 있으나 그 효과가 유사한 부분이 많은데 이미 Ryu 등⁽⁵⁻⁷⁾이 열교환기용 원류브를 이용하여 행한 연구에서 환에 의해 변형된 원류브 상의 속도분포에 따라 유입류의 위치 및 강도에 차이가 발생하고 와유출에 변화가 발생하는 것을 연구한 바 있다. 그리고 속도회복에 대한 영향도 특이하여 적절한 원류브 상의 속도구배에 따른 유입류의 위치와 강도에서 큰 속도회복이 나타남을 보였는데 본 연구에서는 위상평균해석 및 와형성영역길이의 측정 등 세부적인 실험을 통하여 이러한 속도회복에 영향을 미치는 물리적으로 인을 밝히고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

원류브의 근접후류특성을 관찰하기 위하여 폐회로 아음속풍동(시험부크기 : 2,000(d)×700(h)×

700(w) mm³)에서 정온형 열선풍속계(TSI, model IFA300)와 X-형(Kanomax, model 0252R-T5)열선, 스플릿 필름(split film, TSI, model 1288)을 이용하여 유속을 측정하였다. 이때 원류브의 중심을 원점으로 하고 자유유동에 나란한 방향을 X-축, 그리고 이에 수직인 방향을 Y-축으로 정하였으며 이에 해당하는 순간속도는 U, V로 난류강도는 u_{rms} , v_{rms} 로 표기하였다. 자유유동속도, U_0 는 5.0~25.0 m/s 범위에서 수행되었으며, 관외경(d 또는 d_0)을 기준으로한 레이놀즈 수 범위는 모델마다 다르게 되며 최소 및 최대값은 각각 약 17,000, 154,000이었다. 속도측정은 원류브 중심에서 $X/d=5.0$, $Y/d=\pm 3.0$ 와 $0.8 \leq X/d \leq 2.6$, $-1.0 \leq Y/d \leq 0.2$ 영역에서 이루어졌다. X-형 열선의 교정은 Look-up Table 기법을 이용하였고, 데이터의 추출 간격은 100 μ s(10 kHz), 측정점 당 4.096 개씩 20 회의 앙상블(ensemble)을 취하였다. 스플릿 필름은 Siddal과 Davies⁽⁸⁾에 의해 제안되었던 수정된 King 법칙을 이용하여 교정하였다. 피치각의 응답에 대한 속도의 의존도를 없애기 위하여 Stock 등^(9,10)이 제시한 무차원함수를 사용하였다. 교정된 결과에서 피치각이 80°를 넘어서면 오차가 다소 증가하였는데 본 실험에서는 역류를 측정하기 위하여 스플릿 필름을 90° 회전시켜 U-속도 성분만 측정하였다. U-속도 산출시에 전속도에 대해서 피치각의 사인(sine)값을 곱하여 산출하는 것을 고려할 때, $\sin(80^\circ) = 0.985$ 이므로 이로 인한 오차는 무시하였다. 그리고 본 방식으로 속도산출을 할 때, 유동변화가 심한 지점에서 90°를 넘는 값이 조금씩 나타났으며, 계산시 이를 제외한 값을 이용하여 시간평균 및 난류강도값을 구하였다.

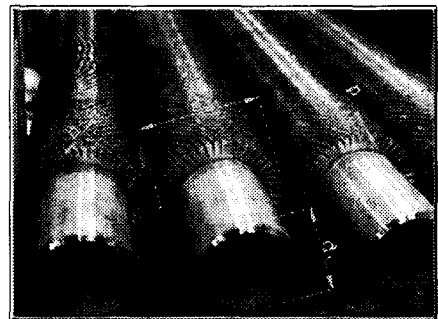


Fig. 1 Configuration of the model

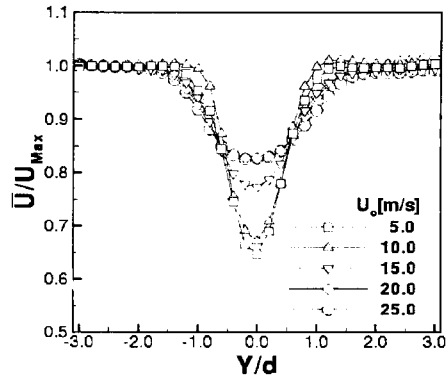
Table 1 Geometries of the models [mm]

Model	d_i	d_o	h	t	p	Remark
0	51	51	0	0	-	circular cylinder
1	51	75	12	1.0	8.45	
2	51	75	12	1.0	5.62	
3	51	85	17	1.0	6.76	
4	51	87	18	1.2	6.76	
5	51	87	18	1.2	5.62	
6	51	87	18	1.2	4.81	
7	51	87	18	1.2	4.05	
8	51	93	21	1.3	5.62	
9	51	93	21	1.3	4.05	

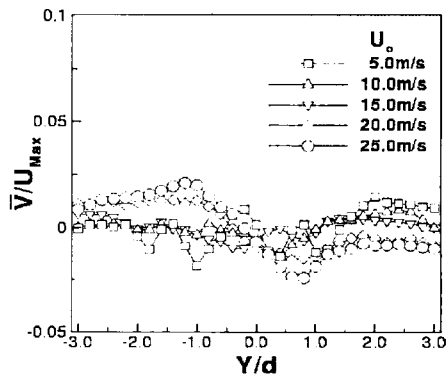
본 실험에 사용된 모델은 열교환기에 사용되는 상용제품으로 툽니모양의 환을 원형파이프 주위에 나선형으로 부착시킨 것이며 이의 형상, 치수를 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다. 총 10 개의 모델이 사용되어졌으며, 모델은 직경 51 mm, 길이 700 mm의 일반 파이프(Model #0, 이하, 원주)에 12~21 mm의 높이의 환이 부착되어 있으며 모델의 외경을 기준으로 한 폐쇄비는 모델에 따라 7.5~13.7 %이었다.

3. 실험결과 및 고찰

선행연구^(5,6)에서 환튜브의 환 높이가 증가하고 환 피치가 감소(이하 환밀도가 증가할수록)할수록 마찰의 영향으로 환 사이의 속도가 감소하고 이로 인하여 환튜브 상의 경계층의 두께가 증가함을 알 수 있었다. 그리고 환밀도와 자유유동속도가 증가할수록 후류에서의 유입(entrainment) 위치가 하류로 이동함을 알 수 있었다. Fig. 2(a)에서 볼 수 있듯이 $X/d=5.0$ 에서 측정된 속도분포 비교를 통하여 환밀도가 높은 모델 #8에서 속도회복이 큼을 알 수 있었다. 또한 Fig. 2(b)에 나타낸 것처럼 V-속도성분의 분포($U_o=5.0\sim 15.0$ m/s의 경우에서)가 원주의 경우와 다르게 나타나는데 원주의 경우에는 원주 상·하에서 일어나는 박리에 의하여 상부에서는 아래쪽으로 하부에서는 위쪽으로 향하는 비율이 높기 때문에 Fig. 2(b)의 자유유동속도 20.0, 25.0 m/s 경우와 같은 분포를 보인다. 그러나 환튜브의 경우는 환밀도가 높아질수록 Fig. 2(b)의 $U_o=5.0\sim 15.0$ m/s와 같은 분포를 보이다가 환밀도와 자유유동속도의 증가와 더불어 다시 원주와 같은 분포를 보였으며 이는



(a) U-mean



(b) V-mean

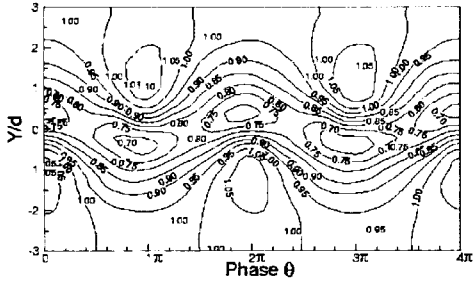
Fig. 2 Comparisons of the velocity distribution at $X/d=5.0$, Model #8⁽⁵⁾

유입류의 강도와 관련이 있을 것으로 생각되었다. 모델 #8의 경우는 Fig. 2(a)에서와 같이 자유유동속도 15.0 m/s 이상에서 큰 속도회복을 보였는데 이러한 유입류의 강도변화와 관련이 클 것으로 생각되었다.

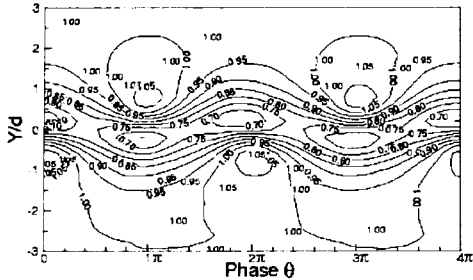
좀더 자세한 분석을 위하여 시간평균분석에 사용된 기존의 데이터를 이용하여 위상평균분석을 수행하였다. Fig. 3에는 자유유동속도 $U_o=25.0$ m/s 일 때 위상평균한 U-속도성분의 등속도선도를 각 모델별로 나타낸 것이다. 후류중심부 상·하 부분에서 와류출에 의한 영향으로 1 주기, 2π 동안 정현파 형태를 보이며 상·하로 진동함을 알 수 있다. Fig. 3(a) 모델 #0, 즉 원주에 대해 살펴보면 위상 π 와 후류중심선($Y/d=0.0$) 부분에서 최대속도결손을 보이는 것을 알 수 있으며 이러한 지점은 1/2 주기가 지난 2π 지점에서 다시 나타

나는 것을 알 수 있다. 이 지점은 Y-방향으로 조금씩 진동하고 있는데 Fig. 3(b)에서는 이러한 진동 및 영역이 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 속도결손이 원주에 비해 큰 다른 모델들에서도 발견된 것인데 회전도의 증가로 인해 경계층이 성장하고 유입류강도가 약해져서 U-속

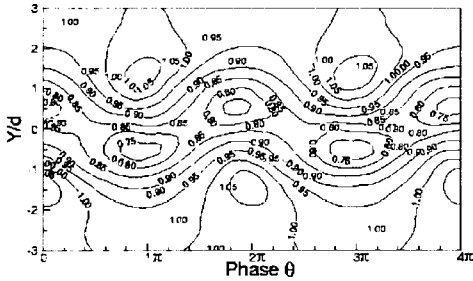
도성분의 진동폭을 감소시켰기 때문이다. Fig. 3(c)의 모델 #8에서 최대속도결손을 보이는 지점의 값이 다른 모델에 비해서 증가하였는데 이는 Fig. 2(a)에서 속도회복에 따른 결과이다. 그리고 이 지점의 상·하 진동폭이 다시 증가되어진 것을



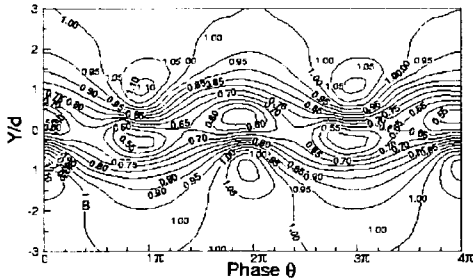
(a) Model #0



(b) Model #1

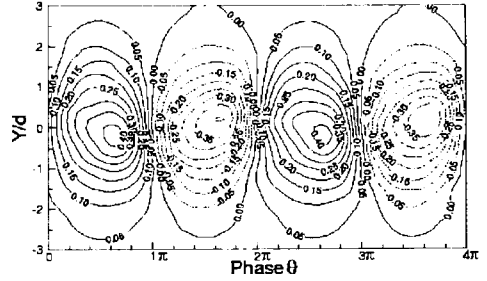


(c) Model #8

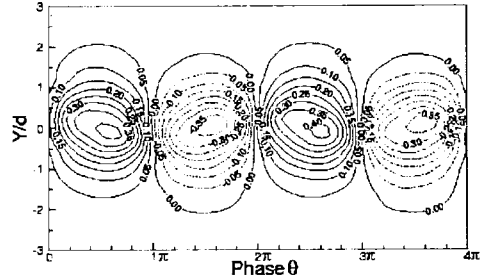


(d) Model #9

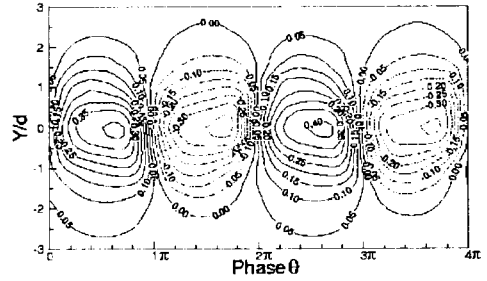
Fig. 3 Equi-velocity lines of the phase averaged velocities. $\langle U \rangle / U_o$ at $X/d=5.0$, $U_o=25.0$ m/s



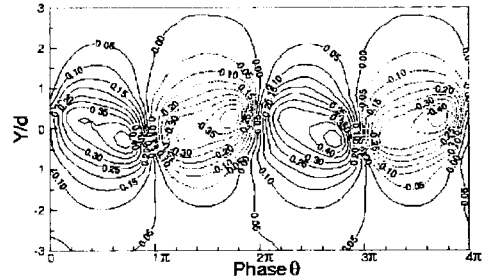
(a) Model #0



(b) Model #1



(c) Model #8



(d) Model #9

Fig. 4 Equi-velocity lines of the phase averaged velocities. $\langle V \rangle / U_o$ at $X/d=5.0$, $U_o=25.0$ m/s

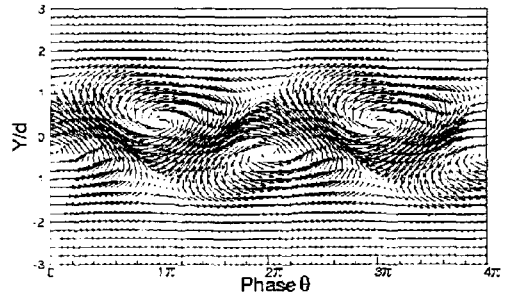
알 수 있는데 이러한 경향은 속도회복이 큰 모델과 자유유동속도에서 나타났으며 모델 #0인 원주에서도 나타난 결과이다. 이를 통하여 환밀도와 자유유동속도가 어느 정도 증가하면 다시 유입류의 강도가 강해지는 것을 추측할 수 있었는데 이의 영향으로 큰 속도회복이 이루어진 것으로 생각된다.

Fig. 4에는 각 모델별로 V-속도성분을 위상평균하여 등속도선도로 나타내었다. 위상 π 마다 "+" 값과 "-" 값이 교대로 나타나고 있는데 이는 와류출의 영향으로 $\langle V \rangle$ 의 방향이 1/2 주기마다 바뀌기 때문에 나타나는 결과이다. Fig. 4(a)의 후류중심선에 인접한 등속도선을 살펴보면 각각의 "+", "-"의 최대값의 위치가 중심선에서 Y-방향으로 일정한 거리를 두고 위치해 있다. 그러나 환밀도가 증가된 Fig. 4(c) 모델 #8에서 이 지점들간의 거리가 감소하였는데 이는 앞서 Fig. 3의 $\langle U \rangle$ 성분에서 환밀도가 증가할수록 후류중심선 부근에서 변동폭이 증가한 것과 대조적이다. 그리고 Fig. 4(d) 모델 #9의 경우는 Fig. 4(c) 모델 #8의 경우보다는 변동폭이 다시 증가하였다. 그러나 모델 #9에서는 자유유동속도가 증가할수록 이 지점의 변동폭이 감소함을 보였는데, 대체로 환밀도가 증가할수록 변동폭이 감소하는 것으로 생각된다.

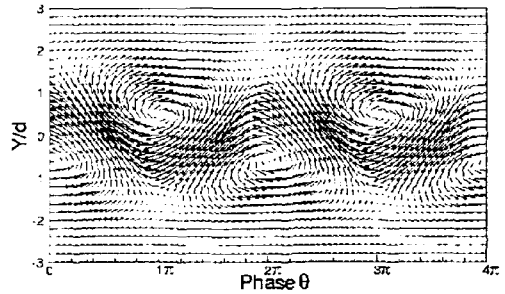
선행연구⁽⁵⁾와 Fig. 3, Fig. 4의 위상평균한 U, V-속도성분의 비교를 통하여 환밀도가 증가할수록 V-속도성분의 요동은 감소하나 U-속도성분의 경우는 이러한 요동이 증가하는 것을 알 수 있었다. 이는 속도회복에 큰 영향을 미치지만 유입류의 위치에 따라 그 효과가 다른 것으로 생각된다. 모델 #9의 경우에는 유입류 위치가 다른 모델에 비해 하류에 위치해 있으므로 본 실험구간 $X/d=5.0$ 에서는 큰 속도회복이 발생되지 않은 것으로 생각된다.

Fig. 5는 모델 #8에 대해 위상평균된 속도를 와이동속도(advection velocity), U_0 를 감하여 나타낸 속도벡터장(velocity vector field)이다. 응집와의 중심과 새들(saddle)을 확연히 볼 수 있는데 자유유동속도를 증가시키면 새들간의 거리가 멀어져서 와의 영향권에 있는 영역이 증가함을 알 수 있다. 따라서 Fig. 3(c)에서 U-속도성분의 후류중심선에서 상·하 진동폭과 와영역의 증가가 속도회복과 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다.

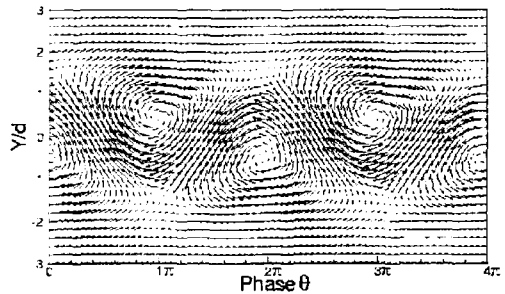
Fig. 6에는 모델 #8에 대해서 자유유동속도 변동와도분포를 나타낸 것이다. 응집와도 $\langle \Omega \rangle$ 는 식 (1)과 같이 나타내고 X-방향은 Taylor의 가정



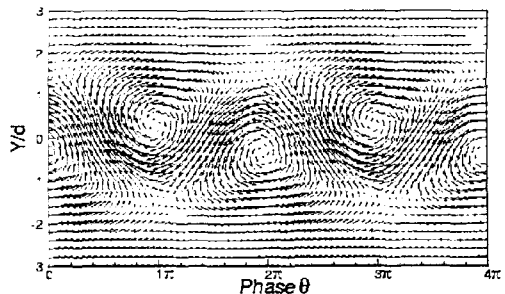
(a) $U_0=10.0$ m/s



(b) $U_0=15.0$ m/s



(c) $U_0=20.0$ m/s



(d) $U_0=25.0$ m/s

Fig. 5 Velocity vector fields($\langle U-U_0 \rangle$, $\langle V \rangle$) at $X/d=5.0$, of Model #8

(Taylor's hypothesis)을 이용하여 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 θ 와 f 는 각각 위상과 와류 출주파수이다.

$$\langle \Omega \rangle = \frac{\partial \langle V \rangle}{\partial X} - \frac{\partial \langle U \rangle}{\partial Y} \quad (1)$$

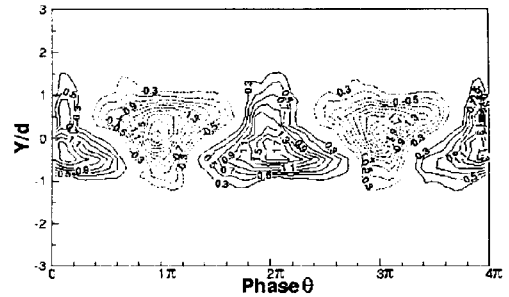
$$X = \frac{U_a \theta}{2\pi f} \quad (2)$$

Fig. 6(a)의 와도분포에서 위상이 2π 인 지점의 와를 살펴보면 아랫부분이 좌·우로 넓게 분포되어 있음을 알 수 있다. 이런 현상은 환밀도가 낮은 경우에는 자유유동속도가 증가할수록, 환밀도가 높은 경우에는 저속에서 관찰되었다. 환밀도가 높은 경우 자유유동속도를 증가시키면 와가 상·하로 신장되면서 Fig. 6(a)와 같은 형상은 사라졌으며, 속도회복이 많은 모델과 자유유동속도에서 Fig. 6(b)~(d)와 같은 형상의 와도분포를 관찰할 수 있었다. 이러한 와도분포는 특이한 형상으로 자유유동과의 에너지교환이 활발하여 와의 성장이 상당히 진행된 결과로 생각된다.

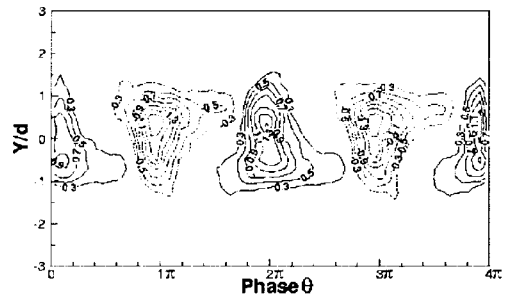
와형성영역에 대해서 정량적으로 살펴보기 위하여 스플릿 필름을 사용하여 근접후류($X/d=0.8 \sim 2.6$, $Y/d=-1.0 \sim 0.2$)에서 U-속도성분을 측정하였다. 데이터의 주출간격은 $100 \mu s$ (10 kHz)이었으며, 측정점 당 4.096 개씩 10 회의 앙상블을 취하였다. Fig. 7(a)에는 자유유동속도가 15.0 m/s일 때 스플릿 필름을 이용하여 모델 #0에서 측정된 U-속도분포를 나타낸 것이다. $Y/d=0.0$ 지점에서 살펴볼 때, 재순환으로 인한 역류가 $X/d=1.2$ 까지 나타나고 있으며 이후 하류로 가면서 자유유동으로부터의 운동량교환에 의해 속도회복이 이루어짐을 볼 수 있다.

Fig. 7(b)에는 이러한 방법으로 측정된 U-속도성분의 값을 이용하여 원주에 대해서 등속도분포를 나타낸 것이다. 여기서 $\bar{U}/U_0=0.0$ 인 선과 $Y/d=0.0$ 인 중심선과 만나는 지점이 와형성영역의 끝을 나타낸다. 자유유동속도를 5.0~20.0 m/s ($17,000 < Re < 68,000$)로 증가시키면 와형성길이는 1.07, 0.90, 0.88, 0.85로 감소하였는데 이는 이전의 Gerrard⁽¹⁾와 Green 등⁽¹¹⁾의 연구에서 레이놀즈수를 증가시킬수록 와형성길이가 감소한다는 주장과 일치하며, Lee 등⁽¹²⁾이 레이놀즈 수 50,000에서 I-형 열선을 이용하여 측정된 와형성길이 $L_B/$

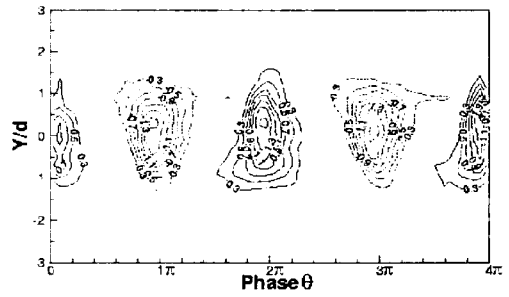
$d \sim 1.0$ 의 값보다는 조금 작게 나타났지만 스플릿 필름을 이용하여 이와 같은 방식으로 와형성영역



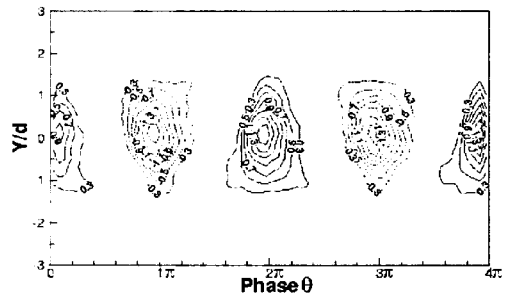
(a) $U_0=10.0$ m/s



(b) $U_0=15.0$ m/s

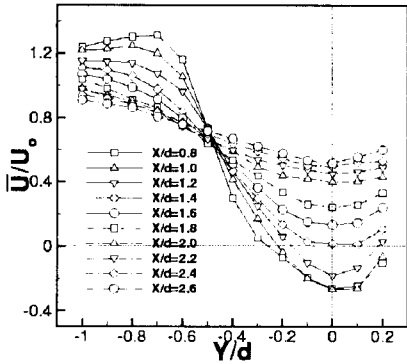


(c) $U_0=20.0$ m/s

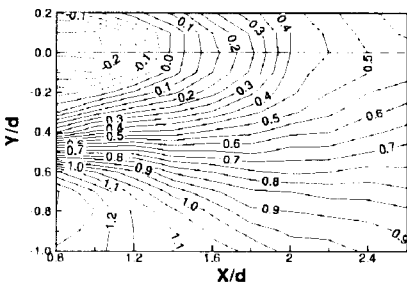


(d) $U_0=25.0$ m/s

Fig. 6 Contours of vorticities at $X/d=5.0$. Model #8



(a) Streamwise mean velocity



(b) Contour for streamwise mean velocity

Fig. 7 Variations of the velocities of Model #0. $U_0=15.0\text{m/s}$

을 결정짓는 것이 타당함을 입증한다고 할 수 있다. 이후 레이놀즈 수를 증가시키면 와형성 길이가 더욱 줄어들게 되는데 Breuer⁽¹³⁾와 Cantwell 등⁽¹⁴⁾의 CFD와 실험을 통한 결과에 의하면 레이놀즈 수가 140,000일 때 $L_p/d=0.4\sim 0.5$ 정도인 것으로 알려져 있다.

Fig. 8은 이와 같은 방식을 사용하여 본 연구에 사용된 전 모델에 대해서 자유유동속도 변화에 대한 와형성길이의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 8(a)에서 와형성길이를 외경으로 무차원화한 결과를 살펴보면, 레이놀즈 수 변화에 대해 일정한 스트로할 수를 나타내었던 모델 #3~6의 경우 와형성영역이 모델 #0~2의 경우보다 작게 나타났다. 선행연구⁽⁶⁾의 가시화결과와 비교하기 위하여 내부원주의 직경($d=51\text{ mm}$)을 이용하여 유입류의 X-방향위치를 비교하여 그 결과를 Fig. 8(b)에 나타내었다. 이를 살펴보면, 선행연구⁽⁶⁾의 가시화결과에서 살펴보았듯이 휨밀도가 증가할수록 와형

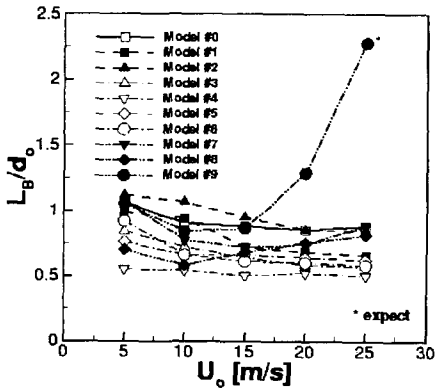
성길이가 대체로 증가함을 알 수 있다. 그리고 원주보다 전 모델의 와형성 길이가 긴 것을 알 수 있으며 모델 #1~6까지의 와형성길이는 휨밀도의 증가에 큰 영향이 없었다. 이 모델들은 선행연구⁽⁶⁾에서 원뿔부 상의 속도분포가 완만한 형태를 가지는 모델들이었으며 휨밀도가 증가할수록 원뿔부 상의 속도분포의 요동폭이 증가하였던 모델들이다. 따라서 휨밀도가 증가할수록 원뿔부 상의 속도분포가 완만해지지만 증가된 요동성분으로 인하여 속도회복에 도움이 되어 와형성영역의 길이가 크게 증가하지 못한 것으로 생각된다. 자유유동속도를 5.0 m/s에서 10.0 m/s로 증가시켰을 경우 전 모델의 와형성길이는 감소하였다. 이후 자유유동속도 변화($U_0 \geq 15.0\text{ m/s}$)에 대하여 각 모델별로 와형성길이를 비교하여 보면, 와형성길이가 증가, 감소 또는 일정하게 유지하는 형태 등 3 가지의 변화추이를 나타내었다. 모델 #1, 2의 경우는 자유유동속도가 증가할수록 와형성길이가 미약하나마 지속적으로 감소하였다. 그리고 모델 #7~9의 경우는 자유유동속도가 증가할수록 와형성 길이도 증가하였으며 모델 #3~6은 거의 일정한 값을 보였다.

이와같이 가시화실험 결과⁽⁶⁾와 스플릿 필름을 이용한 와형성영역의 측정과 비교에서 확인하였듯이 원뿔부 상의 속도구배에 의한 유입류의 위치 및 강도가 와형성에 주요하게 작용하며, 휨밀도가 증가할수록 원뿔부 상의 속도구배를 완만하게 변화시켜 와형성영역이 증가되는 것을 알 수 있었다.

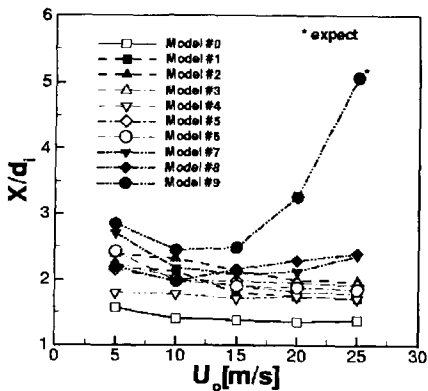
여기서 특이한 것은 모델 #9의 경우는 자유유동속도가 15.0 m/s를 넘어서면 와형성영역이 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 모델 #9보다 휨밀도가 약간 작은 모델 #7, 8에 비해 큰 차이를 보이고 있는데 이런 상황에서는 열교환기의 실시간격 및 열효율 등에 큰 영향을 미칠 것으로 생각된다. 선행연구⁽⁵⁾에서는 속도회복에서도 모델 #7, 8과 큰 차이를 보였는데 이에 대한 자세한 것은 차후 논문⁽¹⁵⁾에서 논하도록 하겠다.

Apelt 등⁽¹⁴⁾은 원주후면에 부착된 분리판의 길이 변화에 따른 근접후류에 대한 연구에서 자유유동속도에 해당하는 평균속도, $\bar{U}/U_0=1.0$ 인 등속도선을 이용하여 후류폭의 변화를 관찰하였으며 분리판의 길이가 증가할수록 후류폭이 줄어들음을 보였다. 본 연구에서도 스플릿 필름을 이용하여

얻어진 결과를 정리하여 Fig. 9에 나타내었는데 여기서 $\bar{U}/U_o=0.0$ 의 등속도선도 함께 나타내어 와형성영역의 변화와 후류폭의 변화를 연관지어 관찰할 수 있었다. 전체적으로 (a) 원주보다 흰 튜브의 후류폭($\bar{U}/U_o=0.0$ 의 등속도선의 Y-방향 폭)이 작고, 흰밀도와 자유유동속도가 증가할수록 후류폭이 감소함을 알 수 있는데 (e) 모델 #8과 (f) 모델 #9의 경우에서 다른 모델들에 비해 후류폭이 크게 감소하였다. 이는 흰튜브 상에서 흰밀도가 증가할수록 경계층의 두께가 증가하는 것과는 대조적인 결과이다. 그리고 각 모델에서 자유유동속도에 따른 후류폭과 와형성길이의 변화는 특이한 관계를 보였는데 (a) 모델 #0과 (b) 모델 #1에서는 후류폭이 증가하면서 와형성영역의 길이가 감소하였고, (e) 모델 #8과 (f) 모델 #9에서

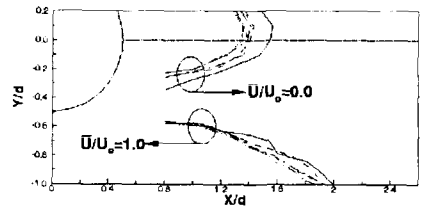


(a) Normalization by d_o

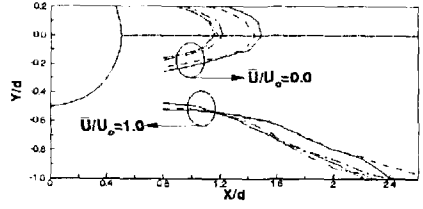


(b) Normalization by d_i

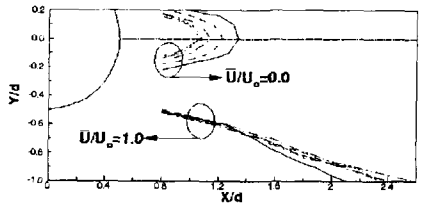
Fig. 8 Vortex formation lengths of various models



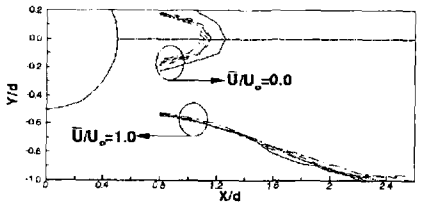
(a) Model #0



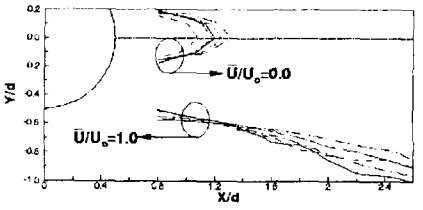
(b) Model #1



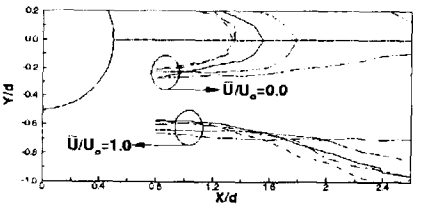
(c) Model #3



(d) Model #5



(e) Model #8



(f) Model #9

Fig. 9 Wake envelopes from mean velocity contours(— : $U_o=5.0$ m/s, --- : $U_o=10.0$ m/s, - - - : $U_o=15.0$ m/s, ... : $U_o=20.0$ m/s, - · - · : $U_o=25.0$ m/s)

는 후류폭이 감소하면서 와형성영역의 길이가 증가하였다. Fig. 9를 통하여 회전도가 증가할수록 $\bar{U}/U_0=1.0$ 의 선이 후류중심선 가까이 접근함을 알 수 있는데 이럴 경우 이 부근에서 큰 전단력이 발생할 것으로 생각되며 이러한 전단력으로 인하여 후류중심으로 향하는 유동이 강화될 것으로 생각된다. 따라서 이 영역보다 더욱 하류인 $X/d=5.0$ 에 위치한 Fig. 2(b)에서 V-속도성분의 변화요인은 이러한 와형성영역 부근의 속도분포로 인해 발생하는 것으로 생각되며 이러한 영향으로 $X/d=5.0$ 에서 시간평균된 V-속도분포의 정상변화가 발생되었고 U-속도성분의 Y-방향 요동이 증가되는 것으로 생각된다.

4. 결론

X-형 열선과 스플릿 필름을 이용하여 근접후류 유동장을 측정하였고 시간 및 위상평균법과 통하여 회전브 모델의 근접후류구조를 비교·검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) $X/d=5.0$ 에서 측정된 와유출에 의한 U, V-속도성분의 요동의 증·감은 상반된 결과를 보였는데 대체로 회전도가 증가할수록 U-속도성분의 요동은 증가하였고 V-속도성분의 요동은 감소하였다.

(2) 회전브에서 V-속도가 원주와 상반된 분포를 나타낸 경우가 나타나는데, 이는 유입류의 강도 등과 밀접한 관련이 있었다.

(3) 회전도가 증가할수록 와형성영역 부근에서 $\bar{U}/U_0=1.0$ 선은 후류중심선 $Y/d=0.0$ 에 접근하며, 이때 전단력이 증가되어 후류중심으로 향하는 유동이 강화될 것으로 생각된다.

(4) 회전도에 의한 난류강도, 경계층의 두께, 유입류의 위치 및 강도는 속도회복과 밀접한 관련이 있는 인자로 생각된다.

참고문헌

(1) Gerrard, J. H., 1966. "The Mechanics of the Formation Region of Vortices behind Bluff Bodies." *J. Fluid Mech.* Vol. 25, Part 2, pp. 401~413.

(2) Nakamura, Y., 1996. "Vortex shedding from bluff bodies and a universal Strouhal number." *J. Fluids and Structures*, Vol. 10, pp. 159~171.

(3) Szewczyk, A. A., Anderson, E. A., 1997. "Effects of a splitter plate on the near wake of a circular cylinder in 2 and 3-dimensional flow configurations." *Experiments in Fluids*, Vol. 23, pp. 161~174.

(4) Apelt, C. J., West, G. S. and Szewczyk, A. A., 1973. "The Effects of Wake Splitter Plates on the Flow Past a Circular Cylinder in the Range $10^4 < R < 5 \times 10^4$." *J. Fluid Mech.*, Vol. 61, Part 1, pp. 187~198.

(5) Ryu, B. N., Kim, K. C. and Boo, J. S., 2002. "Characteristics of Near Wake behind a Circular Cylinder with Serrated Fins (II) : Comparison of Time Mean Flow Fields." *Transactions of the KSME, B*, pp. 1191~1200.

(6) Ryu, B. N., Kim, K. C. and Boo, J. S., 2002. "Characteristics of Near Wake behind a Circular Cylinder with Serrated Fins (I) : Mechanism of Vortex Shedding." *Transactions of the KSME, B*, pp. 1183~1190.

(7) Ryu, B. N., Kim, K. C. and Boo, J. S., 2001. "Characteristics of Vortex Shedding behind a Circular Cylinder with Serrated Fins." *Transactions of the KSME, B*, pp. 1077~1086.

(8) Siddal, R. G., and Davics, T. W., 1972. "An Improved Response Equation for Hot Wire Anemometry." *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 15, pp. 367~368.

(9) Stock, D. E., Wells, M. R., Barriga, A. and Crowe, C. T., 1977. "Application of Split-Film Anemometry to Low-Speed with High Turbulence Intensity and Recirculation as Found in Electrostatic Precipitators." *Proc. Fifth Biennial Symp. on Turbulence*(University of Missouri, Rolla), pp. 117~123.

(10) Stock, David E. and Jaballa, Tuhani M., 1985. "Turbulence Measurements Using Split-Film Anemometry." *Proc. Int. Symp. on Refined Flow Modeling and Turbulence Measurement* (University of Iowa), H15-1-10.

(11) Green, R. B. and Gerrard, J. H., 1993.

- "Vorticity Measurements in the Near Wake of a Circular Cylinder at Low Reynolds Numbers." *J. Fluid Mech.* Vol. 246, pp. 675~691.
- (12) Lee, S. J., Kim, H. B., 1997, "The Effect of Surface Protrusions on the Near Wake of a Circular Cylinder." *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol. 69-71, pp. 351~361.
- (13) Breuer, M., 2000, "A Challenging Test Case for Large Eddy Simulation : High Reynolds Number Circular Cylinder Flow." *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 21, pp. 648~654.
- (14) Cantwell, Brian and Coles, Donald 1983. "An Experimental Study of Entrainment and Transport in the Turbulent Near Wake of a Circular Cylinder." *J. Fluid Mech.*, Vol. 136, pp. 321~374.
- (15) Ryu, B. N., Kim, K. C. and Boo, J. S., 2002, "Characteristics of Near Wake behind a Circular Cylinder with Serrated Fins (IV) : Comparison of Vortex Formation Regions." *Transactions of the KSME, B*, at press.