

# 톱니형 환이 부착된 원주의 근접후류특성 연구 (IV) - 와형성영역의 유동비교 -

류병남\*·김경천\*\*·부정숙\*  
(2002년 10월 9일 접수, 2002년 12월 24일 심사완료)

## Characteristics of Near Wake Behind a Circular Cylinder with Serrated Fins (IV) - Comparison of Vortex Formation Regions -

Byong Nam Ryu, Kyung Chun Kim and Jung Sook Boo

**Key Words:** Vortex Formation Length(와형성영역길이), Phase Average(위상평균), Integral Length Scale(적분길이척도), Serrated Fin Tube(톱니형 핀튜브)

### Abstract

An experimental study is performed to investigate characteristics of near wakes of circular cylinders with serrated fins using a hot-wire anemometer for various freestream velocities. The main focus of this paper is to investigate a reason why a vortex formation length is increased suddenly. Velocity of the fluid which flow through fins decreases as fin's height and freestream velocity increases and fin pitch decreases, and a thickness of boundary layer increases. The finned tube has a lower velocity gradient when the higher boundary layer grows. This velocity gradient on finned tube makes a weak shear force in the wake and moves to downstream in a state of lower momentum transfer between the freestream and the wake. The phenomenon makes a vortex formation length increased suddenly. The fluctuations of the velocity distributions on the finned tube and  $\bar{U}/U_{\infty}=1.0$  contour line in the vortex formation region decreases when the fin height increases and the pitch decreases.

### 기호설명

$d_i$  : 내경(inner diameter)  
 $d_o, d$  : 외경(outer diameter)  
 $h$  : 환 높이(fin height)  
 $L_B$  : 와형성영역의 길이  
 (vortex formation length)  
 $L_c$  : 적분길이척도(integral length scale)

$p$  : 환 피치(fin pitch)  
 $t$  : 환 두께(fin thickness)  
 $U_{\infty}$  : 자유유동속도(freestream velocity)  
 $u_{rms}$  : 난류강도(turbulent intensity)  
 $U$  : 시간평균속도(time mean velocity)  
 $X, Y$  : 직각좌표계(rectangular coordinate)  
 $\Theta$  : 위상(phase)  
 $\tau$  : 지연시간(time lag)  
 $\langle \rangle$  : 위상평균(phase average)

\* 부산대학교 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

† 책임지자, 정회원, 부산대학교 기계공학부,  
기계기술연구소

E-mail : jsboo@pusan.ac.kr

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

### 1. 서론

원류브에 대한 연구는 주로 열전달에 관한 연구가 대부분이다. 원류브에 대한 유동적 측면에서 연구된 경우는 소수에 불과한데 그 중에서

Sung 등<sup>(1)</sup>은 환형핀(annular Fin)에 대하여 환간 거리와 높이의 비에 따라 환끝에서 발생된 경계층의 간섭이 다름을 언급한 바 있다. 환간 거리가 작을 경우에는 이웃하는 환에서 성장하는 경계층이 서로 만나게 되어 자유유동이 원주표면에 도달하는 것을 어렵게 하고, 환간 거리가 증가된 경우 두 개의 경계층은 각각 따로 성장한다고 하였다. 따라서 적절한 환간 거리에서 두 개의 경계층이 병합(merge)되어 물질전달 효율을 높임을 보였으며, 두 환 사이에서 발생하는 말굽와류(horseshoe vortex)가 경계층내의 난류구조를 변경시키고 전체적인 대류열전달에 영향을 미친다고 하였다.

환튜브의 경우는 환튜브상의 속도구배가 후류에 큰 영향을 미치며 열교환기에서 다수의 환튜브가 설치될 경우 이러한 특성들은 열교환기의 성능을 좌우하게 된다. 이때 와형성영역에 대한 데이터 등은 관군의 배열 등에 중요한 자료가 된다. 이미 Ryu 등<sup>(2,3)</sup>이 행한 열교환기용 환튜브를 이용한 유동관련 연구에서 자유유동속도와 환 높이가 증가하고 환 피치가 감소할수록 환튜브상의 속도분포가 완만한 기울기를 나타내고 이에 따라 유입류의 위치 및 강도에 차이가 발생하고 와류출과 속도회복에 영향을 미치는 것을 연구한 바 있다. 그리고 와형성영역에 미치는 영향도 특이하여 환의 높이와 환의 피치가 일정한 값에 이르면 그 전의 상황과 확연히 다른 와형성영역, 속도 및 난류강도분포 등을 보였는데 이러한 영향에 대하여 이전의 자료들과 추가적인 실험 등을 통하여 세부적으로 살펴보고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

환튜브의 근접후류특성을 관찰하기 위하여 폐회로 아음속풍동(시험부크기 : 2,000(l)×700(h)×700(w) mm<sup>3</sup>)에서 정온형 열선풍속계(TSI, model IFA300)와 I-형(TSI, model 1210-20), 스플릿 필름(split film, TSI, model 1288)을 이용하여 유속을 계측하였다. 이때 환튜브의 중심을 원점으로 하여 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  $d_o$ )을 기준으

로한 레이놀즈 수의 최소 및 최대값은 각각 약 17,000, 154,000이었다. 속도측정은 I-형 열선을 이용하여 환튜브 중심, X/d=0.0인 위치에서 Y-방향으로 3 mm씩 이송하면서 측정하였고,  $0.8 \leq X/d \leq 2.6$ ,  $-1.0 \leq Y/d \leq 0.2$  영역에서도 스플릿 필름을 이용하여 속도측정이 이루어졌다. I-형 열선의 교정은 3차다항식을 이용하여 수행하였고, 스플릿 필름은 Siddal과 Davies<sup>(6)</sup>에 의해 제안되었던 수정된 King 법칙을 이용하여 교정하였다. 피치각의 응답에 대한 속도의 의존도를 없애기 위하여 Stock 등<sup>(7,8)</sup>이 제시한 무차원함수를 사용하였다.

본 실험에 사용된 모델은 열교환기에 사용되는 상용제품으로 톱니모양의 환을 원형파이프 주위에 나선형으로 부착시킨 것이며 이의 형상, 치수를 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다. 총 10 개의 모델이 사용되었으며, 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.

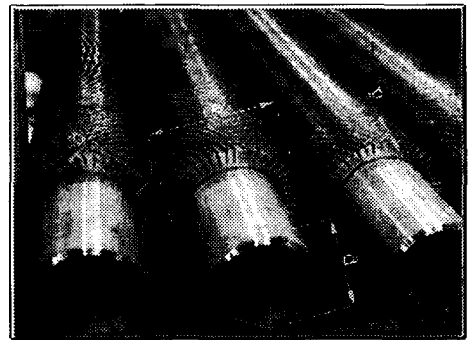


Fig. 1 Configuration of the model

Table 1 Geometries of the models [mm]

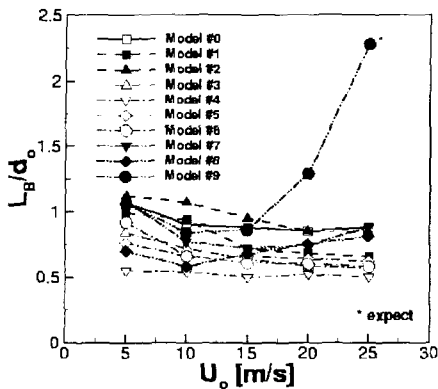
Model	$d_i$	$d_o$	h	t	p	Remark
0	51	51	0	0	-	circular cylinder
1	51	75	12	1.0	8.45	
2	51	75	12	1.0	5.62	
3	51	85	17	1.0	6.76	
4	51	87	18	1.2	6.76	
5	51	87	18	1.2	5.62	
6	51	87	18	1.2	4.81	
7	51	87	18	1.2	4.05	
8	51	93	21	1.3	5.62	
9	51	93	21	1.3	4.05	

3. 실험결과 및 고찰

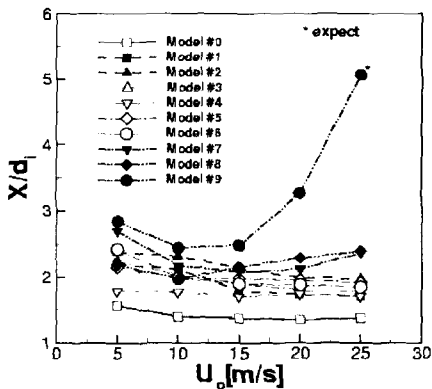
선행연구<sup>(2,5)</sup>에서 흰튜브의 흰 높이가 증가하고 흰 피치가 감소(이하 흰밀도가 증가할수록)할수록 마찰의 영향으로 흰 사이의 속도가 감소하고 이로 인하여 흰튜브 상의 경계층의 두께가 증가하며 유입류(entrainment flow)의 위치가 하류로 이동하였다. 이로 인하여 스트로할 수(Strouhal number)가 감소하였는데 특히 모델 #7-9에서 뚜렷하게 나타났다. 그러나 모델 #8의 경우에는 자유유동속도를 증가시킬 경우 와형성길이도 다소 증가하였지만 후류  $X/d=5.0$  지점에서 다른 모델보다 큰 속도회복을 보였다. 반면 흰밀도가 조금 증가한 모델 #9에서는 자유유동속도를 증가시키면 오히려 속도결손이 증가하였고, Fig. 2에 나타

낸 것처럼 와형성영역의 길이가 눈에 띄게 증가하였다. 따라서 적절한 흰 높이, 피치와 자유유동속도에서 속도회복 및 와형성길이를 유지하지만 이를 벗어나는 임계상황에서는 큰 속도결손과 와형성영역의 증가가 나타나게 된다. 선행연구<sup>(2)</sup>에서 스플릿 필름을 이용하여 측정된 와형성길이를 비교한 바 있었다. Fig. 2에 이를 인용하여 나타내었는데 모델 #9의 경우 자유유동속도가 15.0 m/s를 넘어서면서 와형성영역의 길이가 급격히 증가되는 것을 알 수 있다. 이는 흰 높이나 피치가 비슷한 모델 #7과 모델 #8에 비해서도 크게 증가한 것이다. 이러한 모델에서는 박리에서 와형성까지의 과정이 다른 모델과 특별한 차이가 있을 것으로 생각되는데 이를 살펴보기 위하여 좀 더 세밀한 실험을 하여 관련모델간의 비교를 시도하였다.

Fig. 3은 I-형 열선을 이용하여  $X/d=0.0$ . 흰끝부분에서부터 Y-방향으로 이동하면서 측정된 속도 분포를 나타낸 것이다. Fig. 3(b) 모델 #8에 비해서 Fig. 3(a) 모델 #7의 흰끝부분의 속도가 약간 작으며 이는 흰의 피치의 영향으로 생각되는데 Table 1에서 나타낸 것처럼 모델 #7의 피치는 4.05 mm로 모델 #8의 5.62 mm보다 작다. Fig. 3(c) 모델 #9의 경우는 자유유동속도 20.0 m/s에서부터 흰끝부분의 속도가 급격히 감소하고 있다. 자유유동속도가 20.0 m/s일 때는  $0.95U_0$ , 25.0m/s일 때는  $0.80U_0$ 로 모델 #7, #8의 대략  $1.15U_0$ 인 값보다 많이 감소하였다. 이런 경우 흰끝부분과 내부원주 표면사이에서의 속도기울기는 다른 모델에 비해서 더욱 완만해지게 되며, 두 지점간의 전단력이 약화된다. 이런 경우 운동량 교환 등이 미약하므로 다른 모델에 비해 유동에 큰 변화없이 하류로 이동하게 되며 따라서 후류 중심으로 유입되는 시점이 늦어질 것으로 생각된다. 그리고 흰끝부분과 바로 윗 지점간의 속도기울기가 아주 크므로 이로 인한 작은 와가 발생할 것으로 생각된다. Table 1에서 살펴보면, 모델 #9의 피치는 모델 #8보다 1.6mm 가량 작고, 모델 #7의 흰 높이가 보다 3.0 mm 높은 것을 알 수 있다. 현 실험범위에서는 모델 #7, #8의 형상보다 흰 피치가 작거나, 흰 높이가 크게 되면 마찰의 영향을 크게 받아 흰 사이로 흐르는 유체량이 급감하므로 흰튜브 표면에서 급격한 감속이 발생하는 것으로 생각된다.



(a) Normalization by  $d_o$



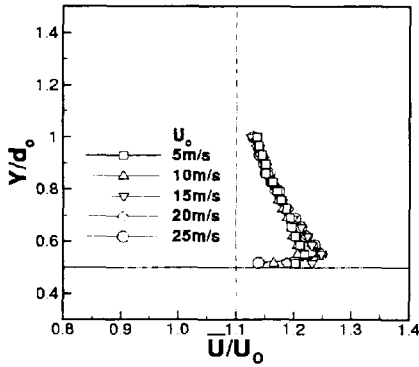
(b) Normalization by  $d_i$

Fig. 2 Vortex formation lengths of various models<sup>(2)</sup>

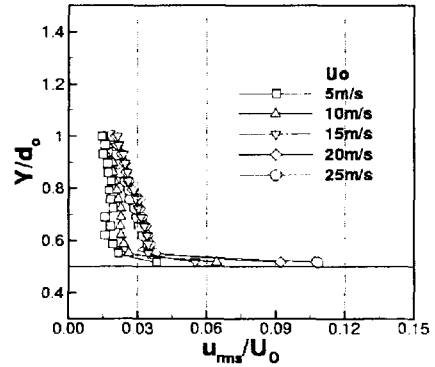
Sung 등<sup>(1)</sup>의 연구에서 환간거리가 작을 경우 이웃하는 환에서 성장하는 경계층의 간섭으로 자유유동이 내부원주표면에 도달하는 것을 어렵게 한다고 하였는데, 본 연구의 톱니형 환튜브를 이용한 경우에는 모델 #9, 자유유동속도 15.0 m/s 이상의 경우가 이와 유사한 상황으로 생각된다.

환의 마찰저항에 의한 것과 환끝에서 성장된 경계층의 영향은 결국 자유유동이 내부원주표면에 도달하기 어렵게 만드는 상황은 유사한 것으로 생각된다.

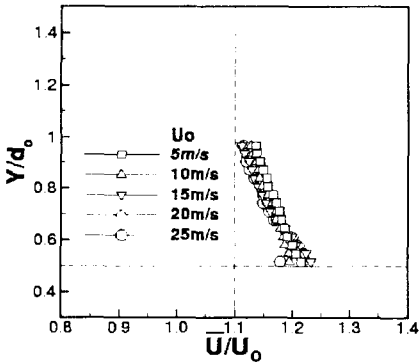
Fig. 4는 난류강도분포를 나타낸 것이다. 전체적으로 환끝부분에서 난류강도가 다른 지점보다



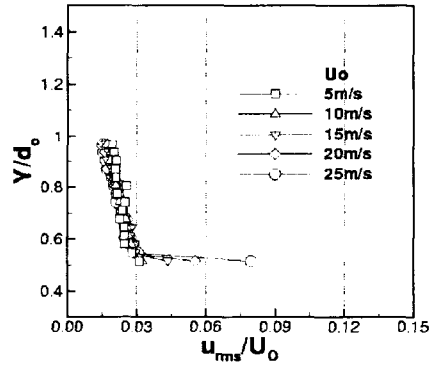
(a) Model #7



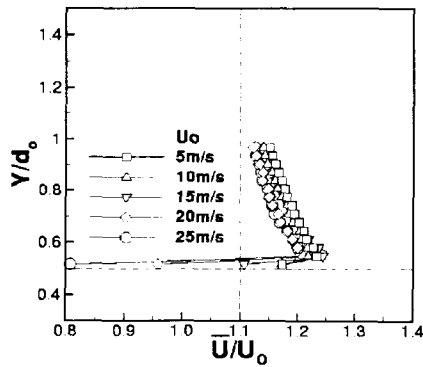
(a) Model #7



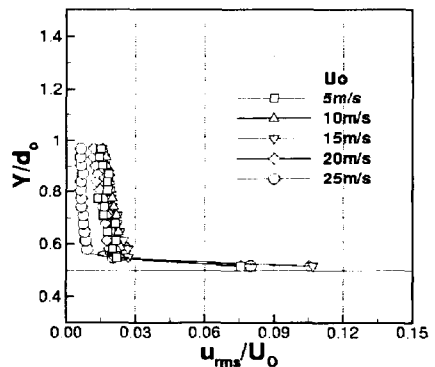
(b) Model #8



(b) Model #8



(c) model #9



(c) Model #9

Fig. 3 Comparisons of the velocity distributions at  $X/d=0.0$

Fig. 4 Comparisons of the turbulent intensity distributions at  $X/d=0.0$

높으며, Fig. 3에서 살펴보았듯이 흰끝부분에서 큰 속도감소를 보였던 Fig. 4(c) 모델 #9의 난류강도값도 다른 모델에 비해 크지 않다. Fig. 4(a) 모델 #7은 자유유동속도가 15.0 m/s 이상에서 난류강도가 약간 증가하였으며 Fig. 4(b) 모델 #8의 경우는 자유유동속도변화에 대하여 흰끝부분을 제외하고는 큰 변화가 없었다. 그런데 Fig. 4(c) 모델 #9의 경우에는 대체로 자유유동속도가 증가할수록 난류강도값이 감소하여 자유유동속도 25.0 m/s의 경우에는 그 값이 대략 1%에 지나지 않아 유동이 아주 안정되어 있는 것으로 생각된다.

와유출에 의한 유동분포변화를 자세히 살펴보기 위하여 I-형 열선으로 얻어진 값들을 위상평균하였으며 모델 #7~9의 결과를 Fig. 5~7에 나타내었다. Fig. 5 모델 #7과 Fig. 6 모델 #8의 경우는 자유유동속도 증가에 대하여 진동폭이나 형태에 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 그러나 Fig. 7 모델 #9의 경우는 자유유동속도가 증가함에 따라 진동폭이 급격히 감소함을 보인다. Fig. 7(c)  $U_0=25.0$  m/s의 경우는 와유출이 1 주기 진행되는 동안 거의 유동에 변화가 없음을 알 수 있다.

흰튜브의 경우에 흰밀도가 높을 경우 흰사이로 흐르는 유체량이 감소하며, 내부원주표면에서 박리된 유체는 흰튜브를 따라 하류로 진행하면서도 계속 흰의 마찰영향을 받게 된다. 따라서 흰밀도가 크게되면 박리때 발생하는 유동의 변동이 흰밖으로 전달되기가 힘들게 되는데 이러한 영향이 모델 #9에서 크게 나타난 것으로 생각된다. 그리고 Fig. 2에서 확인된 것처럼 모델 #9의 경우는 와형성영역의 길이도 컸었는데 이럴 경우 역류에 의한 영향도 다른 모델에 비해서 작을 것으로 생각된다.

Fig. 8은 스플릿 필름을 이용하여 측정된 결과로 자유유동속도 변화에 따라 후류중심( $Y/d=0.0$ )에서 하류로 가면서 변화하는 U-속도성분을 나타낸 것이다. Fig. 8(a) 원주의 경우 자유유동속도를 증가시키면  $X/d=0.8\sim 2.2$  구간에서 속도회복이 빨라지며 이후에는 거의 비슷한 분포를 나타내었다. 그리고  $X/d=2.0$  이후에서는 기울기가 줄어들면서 완만한 속도회복을 보이고 있다. Fig. 8(b) 모델 #7의 경우도 자유유동속도가 5.0 m/s일 경우는 원주와 비슷한 양상을 보이나 자유유동속도를 10.0 m/s 이상에서 속도회복이 빨라졌다. Fig.

8 (c) 모델 #8의 경우는 자유유동속도가 증가할 경우 오히려 속도회복이 느려지며  $X/d=1.4\sim 2.2$  구간에서 큰 차이를 보이고 이후 속도분포 간의 차이가 줄어들었다. 그러나 자유유동속도가 15.0~25.0 m/s인 경우, 본 측정구간에서 속도회복 기울기가 줄어들지 않았으며 선행연구<sup>(3)</sup>에서  $X/d=5.0$  지점의 속도회복이 크게 나타났는데 이와 밀접한 관련이 있는 것으로 생각된다. 대체로 흰밀도가 높은 모델 #7~9의 경우는 자유유동속도가 증가할 경우(특히,  $U_0=25.0$  m/s의 경우) 속도회복이 느려지는 경향을 보였으며 이는 먼저 Fig. 3에서 설명한 흰튜브상의 완만한 속도구배로 인한 것으로 생각된다. 그러나 Fig. 8(d) 모델 #9의 경우는 이러한 경향이 눈에 띄게 나타나는데 자유유동속도 25.0 m/s인 경우는 본 실험구간에서 역류속도를 보였다. 이는 하류로 진행하면서 자유유동과의 운동량전달이 거의 없음을 나타내는 것이다. 이와같은 경우에는 와형성길이를 결정할 수 없는데, Fig. 2에 나타난 와형성영역의 길이는 외삽법을 통하여 추정된 값이었다.

Fig. 9에는 후류중심( $Y/d=0.0$ )에서 X-축방향으로 진행하면서 관찰된 난류강도의 변화를 나타낸 것이다. 대체로 자유유동속도와 흰밀도가 증가할수록 최고의 난류강도값을 나타내는 지점이 하류로 이동하였다. Fig. 2에서 모델 #7~9의 경우 자유유동속도와 흰밀도가 증가할수록 와형성영역이 증가함을 알 수 있었는데 이와 관련이 클 것으로 생각된다. Fig. 9(a) 모델 #0에서는 자유유동속도를 증가시키면 난류강도값이 약간 감소하는 경향을 보였으나 분포형태는 거의 비슷하였다. 하지만 Fig. 9(c) 모델 #8의 경우는 자유유동속도 15.0~25.0 m/s 범위에서 속도증가와 더불어 최고값을 나타내는 지점이 하류로 이동함을 알 수 있으며 그 값도 증가하여 Fig. 8(c)의 고찰에서 언급하였듯이 이 구간 이후  $X/d=5.0$ 에서 속도회복이 지속적으로 이루어진 원인이라고 생각된다. Fig. 9(b) 모델 #7의 경우도 모델 #8과 비슷한 경향을 보였으나 Fig. 9(d) 모델 #9 자유유동속도 25.0 m/s에서는 난류강도값이 아주 낮게 분포하였는데 다른 모델들의 결과로 추론해 볼 때 와형성영역의 끝 지점 부근에서 난류강도값이 최대가 될 것으로 생각되며 이 지점까지 계속 증가할 것으로 생각된다.

Fig. 10에는 U-속도성분의 자기상관함수 그래프

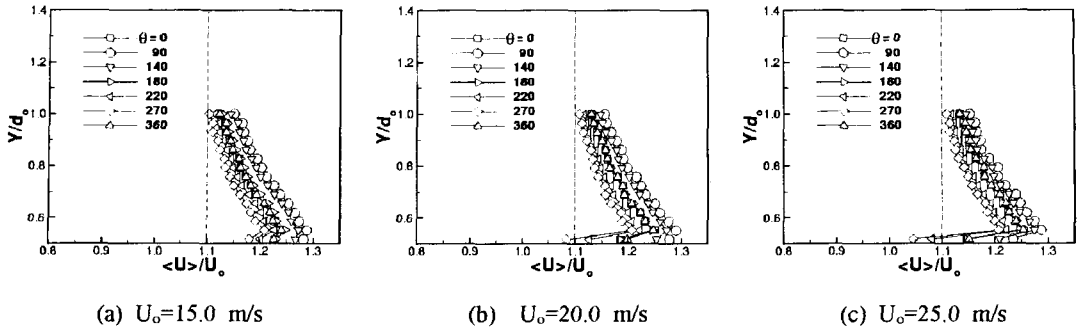


Fig. 5 Phase averaged velocity distributions of Model #7 at X/d=0.0

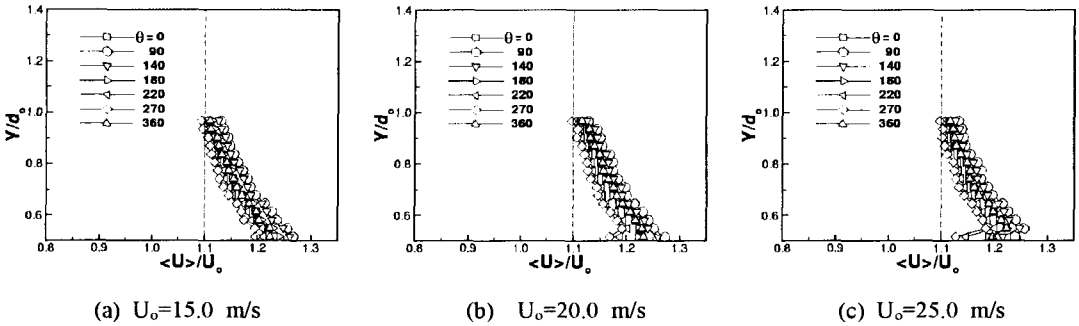


Fig. 6 Phase averaged velocity distributions of Model #8 at X/d=0.0

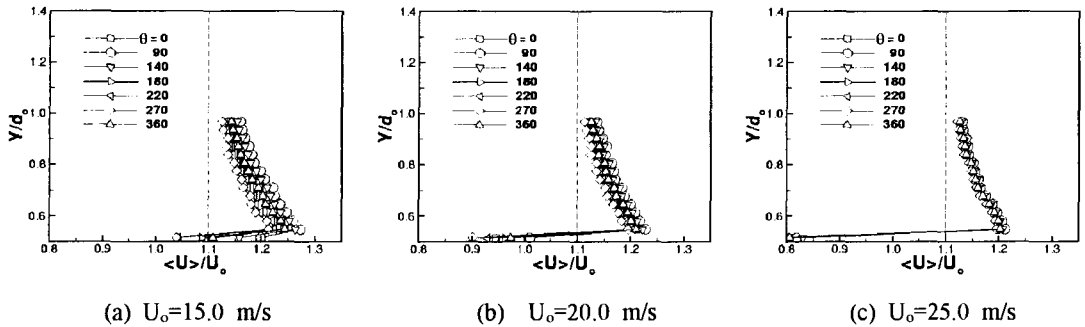
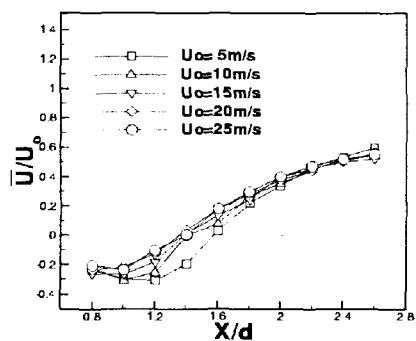


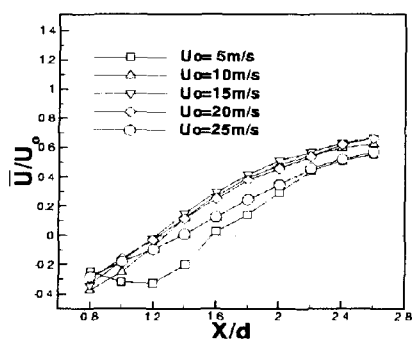
Fig. 7 Phase averaged velocity distributions of Model #9 at X/d=0.0<sup>(4)</sup>

에서 자기상관계수가 최초로 "0"이 되는 지연시간( $\tau$ )까지의 면적을 적분하여 구한 적분시간척도(integral time scale)에 그 지점에서의 시간평균속도를 곱해서 얻은 적분길이척도(integral length scale) 분포를 나타내었다. 이때의 자유유동속도는 20.0 m/s이었는데, 하류로 갈수록 자유유동과의 운동량교환을 통하여 Y/d=-0.8, -1.0 지점과 같은 바깥부분에서는 적분길이척도가 감소하고 후류중심부인 Y/d=±0.2 지점에서는 적분길이척도가 증가하고 있다. 각 모델의 경우에서 Y/d=0.8, Y/d=-1.0 지점에서 적분길이척도는 환밀도가 증가

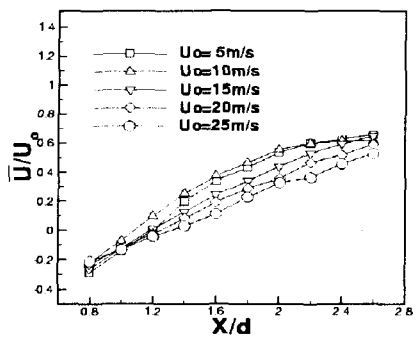
할수록 증가하는데 이는 환밀도의 증가시 환류브상에서 성장하는 경계층 때문에 나타난 결과이다. 그리고 Fig. 8, 9에서 살펴본 바와 같이 (c) 모델 #8의 경우 하류로 진행하면서 운동량교환이 활발한 것을 알 수 있다. 그러나 Fig. 10(d) 모델 #9의 경우는 대략 X/d=1.6 지점까지는 거의 운동량 교환이 없다가 이후 조금씩 진행되는 것을 알 수 있으며, U<sub>0</sub>=25.0 m/s의 경우에는 운동량교환이 더욱 늦게 진행되었다. 따라서 앞서 언급한 것처럼 Fig. 3(c) 모델 #9와 같은 속도분포를 가지는 경우는 이후 하류로 진행하면서 일정시간동안



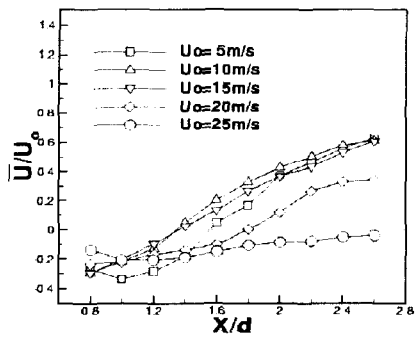
(a) Model #0



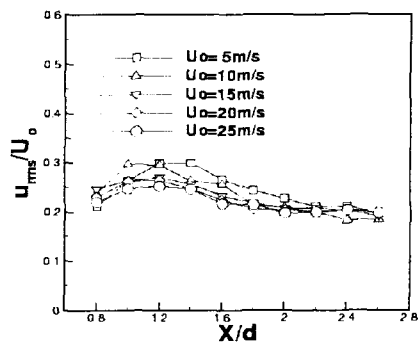
(b) Model #7



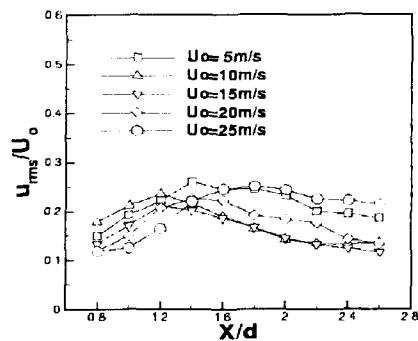
(c) Model #8



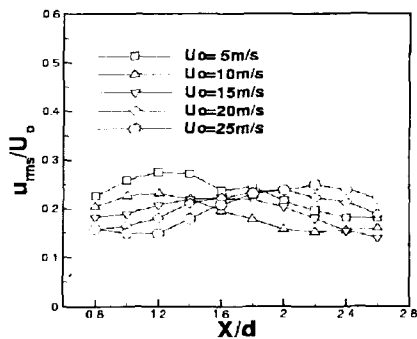
(d) Model #9



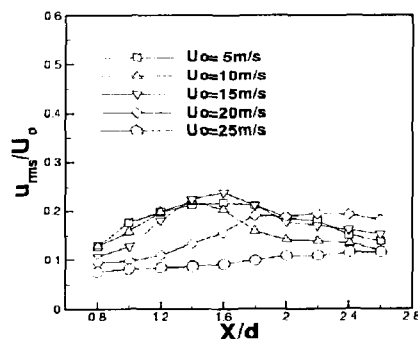
(a) Model #0



(b) Model #7



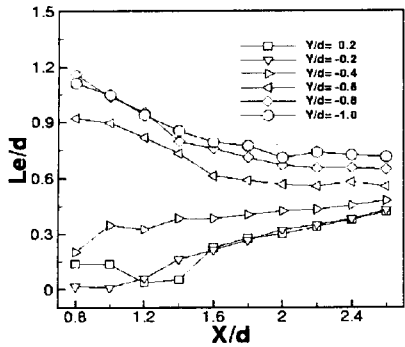
(c) Model #8



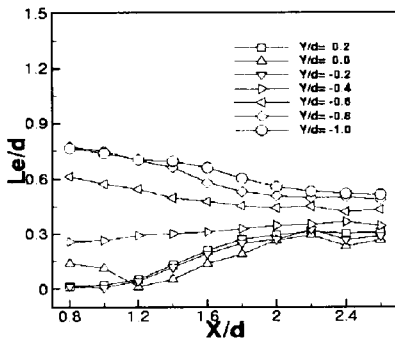
(d) Model #9

Fig. 8 Streamwise velocity distributions at  $Y/d=0.0$

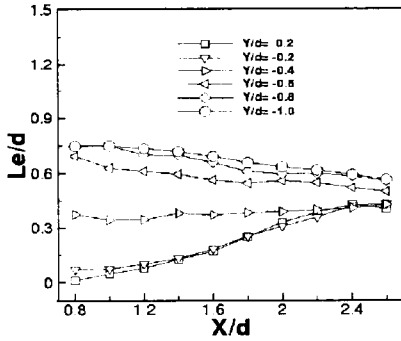
Fig. 9 Distributions of the streamwise turbulent intensities at  $Y/d=0.0$



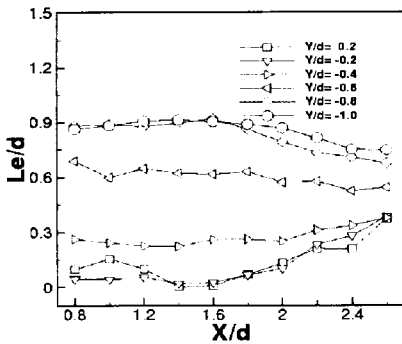
(a) Model #0



(b) Model #7



(c) Model #8

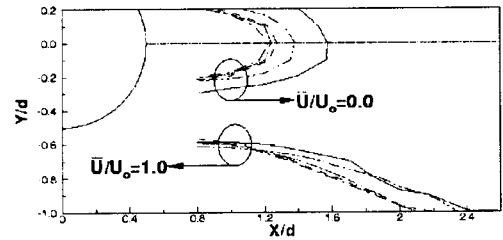


(d) Model #9

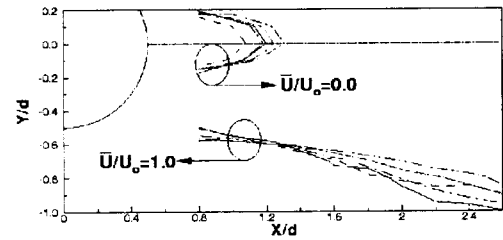
Fig. 10 Integral length scales of U-component.  $U_o=20.0$  m/s

은 주위의 유동과 운동량교환이 거의 이루어지지 않는 것으로 생각된다.

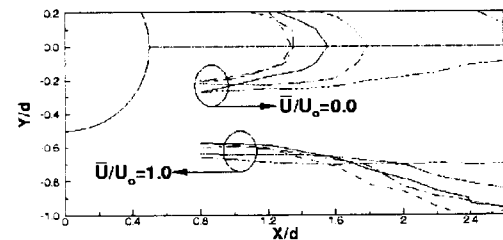
Apelt 등<sup>(9)</sup>이 원주후면에 부착된 분리판의 길이 변화에 따른 근접후류에 대한 연구에서 자유유동 속도에 해당하는 평균속도,  $\bar{U}/U_o=1.0$ 인 등속 도선을 이용하여 후류폭의 변화를 관찰한 바 있었으며 부 등<sup>(2)</sup>도 이와 같은 방식으로 원튜브의 후류폭을 관찰한 바 있다. 이해를 돕기위해 이의 일부를 인용하고 모델 #7에 대한 결과와 함께 Fig. 11에 나타내었다. 여기서 원밀도가 증가할수록 후류폭이 줄어들음을 알 수 있는데 Fig. 11(c) 모델 #9의 경우는 자유유동속도 증가와 더불어 와형성영역이 급격히 증가하고 후류폭이 감소함



(a) Model #7



(b) Model #8



(c) Model #9

Fig. 11 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)<sup>(2)</sup>



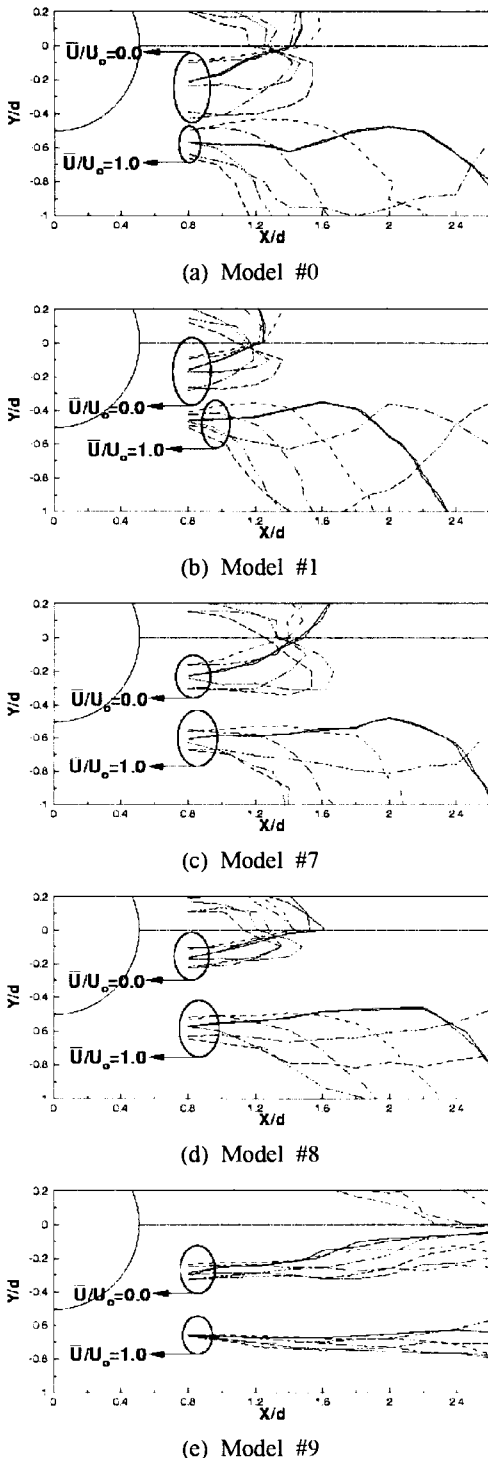


Fig. 12 Wake envelopes from phase averaged velocity contours.  $U_0=25.0$  m/s (— :  $0^\circ$ , - - - :  $60^\circ$ , ···· :  $120^\circ$ , ···· :  $180^\circ$ , - - - - :  $240^\circ$ , ···· :  $300^\circ$ )

을 알 수 있다. 이전의 결과에서 원튜브상의 속도구배와 난류강도 등의 감소로 인한 자유유동과의 운동량교환 미흡 등으로 나타난 결과이다.

Fig. 12는 스플릿 필름으로 와형성영역 부근을 측정된 데이터를 이용하여 위상평균을 수행한 결과를 나타낸 것이다. 원주 및 원튜브 상·하에서 박리되는 유동에 의하여 와유출 1 주기동안 변동하는  $\bar{U}/U_0=0.0$ ,  $\bar{U}/U_0=1.0$ 인 등속도선의 움직임을 나타내고 있어 와형성영역의 변화와 후류폭의 변화를 관찰할 수 있다. 원밀도가 증가할수록 이러한 움직임은 대체로 감소하는 것을 알 수 있으며 Fig. 12(e) 모델 #9의 경우는 앞의 결과들로 예상되었듯이 위상변화(와유출 1 주기 동안)에 대하여 등속도선의 변화가 아주 작은 것을 알 수 있다. 모델 #9의 경우는 와형성영역 이후에서 유입류가 후류중심선을 가로지른 후에 이러한 등속도선의 변화가 크게 나타날 것으로 예상된다.

#### 4. 결론

정온형 열선풍속계를 이용하여 근접후류 유동장에 대한 비교를 원밀도가 높은 모델 3가지(모델 #7~#9)에 대하여 중점적으로 수행하였다. 이러한 모델은 속도회복, 와형성영역 등에 대하여 특이한 결과를 보이는 모델로서 비교결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 원밀도와 자유유동속도가 증가할수록 원튜브상의 속도구배는 완만해지는데 이의 결과 전단력의 감소로 하류로 계속 진행함으로 후류중심으로 유입되는 시점이 늦어졌다.
- (2) 원밀도가 일정한 값에 도달하면(모델 #9의 경우) 원끝에서 큰 속도감소가 발생하고 원튜브상의 속도구배를 더욱 완만하게 하여 와형성영역이 급격히 증가되었다.
- (3) 원밀도가 증가할수록 원사이로 흐르는 유체량이 감소하고 박리에 의한 요동이 적어 원튜브상의 속도분포가 안정화되었다.
- (4) 원밀도와 자유유동속도가 증가할수록 와형성영역 부근의 운동량교환이 늦게 진행되는 것을 알 수 있었다.
- (5) 원밀도가 증가할수록 와형성영역 부근에서  $\bar{U}/U_0=1.0$  등속도선의 요동도 감소되었다.

## 참고문헌

- (1) Sung, H. J., Yang, J. S. and Park, T. S., 1996, "Local convective mass transfer on circular cylinder with transverse annular fins in crossflow," *International J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, No. 5, pp. 1093~1101.
- (2) Ryu, B. N., Kim, K. C. and Boo, J. S., 2002, "Characteristics of Near Wake behind a Circular Cylinder with Serrated Fins (III) : Mechanism of Velocity Recovery," *Transactions of the KSME, B*, at press.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) Stock, David E. and Jaballa, Tuhami M., 1985, "Turbulence Measurements Using Split-Film Anemometry," *Proc. Int. Symp. on Refined Flow Modeling and Turbulence Measurement* (University of Iowa), H15-1-10.
- (9) Apelt, C. J., West, G. S. and Szweczyk, 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.