

톱니형 흰이 부착된 원주의 근접후류특성 연구 (II) - 시간평균 유동장 비교 -

류병남* · 김경천** · 부정숙*
(2002년 3월 29일 접수, 2002년 6월 10일 심사완료)

Characteristics of Near Wake Behind a Circular Cylinder with Serrated Fins (II) - Comparison of Time Mean Flow Fields -

Byong Nam Ryu, Kyung Chun Kim and Jung Sook Boo

Key Words: Equivalent Diameter(등가직경), Effective Diameter(유효직경), Hydraulic Diameter(수력 직경), Half Width(후류반폭), Maximum Velocity Defect(최대속도결손)

Abstract

The measurements of velocity vectors are made in the near wake($X/d=5.0$) of a circular cylinder with serrated fins. Velocity of fluid which flow through fins decreases as increasing fin height and freestream velocity and decreasing fin pitch. Therefore the velocity distribution at $X/d=0.0$ has lower gradient with increasing freestream velocity and fin height and decreasing fin pitch. The discontinuity of the streamwise velocity gradient is observed near the fin edge and causes significant changes in V-component velocity distribution in the near wake. This change attributes to the differences in Strouhal number and entrainment flow behavior. Increased turbulent intensity around a circular cylinder due to the serrated fins and entrainment flow are important factors for the recovery of velocity defect. The widths of velocity and turbulent intensity distribution of fin tubes are wider than those of a circular cylinder. The normalized velocity and turbulent intensity distributions with a hydraulic diameter which is proposed in this paper are in closer agreement with those of a circular cylinder.

기호설명

d_e : 유효직경(Effective Diameter)
 d_h : 수력직경(Hydraulic Diameter)
 d_i : 내경(Inner Diameter)
 d_o, d : 외경(Outer Diameter)
 h : 흰 높이(Fin Height)
 $L_{1/2}$: 후류반폭(Half Width)

p : 흰 피치(Fin Pitch)
 St : 스트로할 수(Strouhal Number)
 t : 흰 두께(Fin Thickness)
 U_1 : 최대속도결손
(Maximum Velocity Defect)
 U_{Max} : X-방향의 최대속도
(Streamwise Maximum Velocity)
 U_o : 자유유동속도(Freestream Velocity)

* 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

주위환경에서 가장 일반적인 원형단면을 가진 물체는 그 형상이 단순하여 모델링이 편리하므로 많은 연구자들이 유체역학문제를 해결하기 위한

모델로 삼아 실험 및 수치해석을 수행하여왔다. 이의 응용연구로 원주의 항력이나 와류출을 제어하기 위한 연구가 있는데, 주요한 방법으로는 표면거칠기를 조절하거나 헬리컬 스트레이크(Helical Strakes), 트립핑 와이어(Tripping Wire), 슬롯(Slat), 다공판, 분할판(Splitter) 등을 설치하는 방법과 원주를 회전 또는 진동시키는 방법 등이 있다. 이러한 방법들 중에 헬리컬 스트레이크 방식^(1,2)은 주로 철제굴뚝의 진동을 줄이기위해 사용하는 방법으로, 3개의 얇은 철판을 120° 간격으로 굴뚝을 따라 감아가면서 표면에 용접하는 방법이다. 이때의 철판의 높이는 굴뚝직경의 10%, 철판간 피치는 굴뚝직경의 5배 정도가 적당하고 굴뚝상부 40% 가량만 시공되며 이때 항력은 증가하게 된다.

이에반해 열교환기용 환류브는 헬리컬 스트레이크 방식과 비슷한 외형을 가지지만, 전열면적을 높이기 위한 목적으로 톱니형 흰(Serrated Fin)을 나선형으로 부착시켰으며, 피치가 작고 흰 높이가 큰 특징을 가진다. 하지만 환류브도 고온 유동중에서 흰의 영향으로 원주와는 다른 유동특성을 가질 것이며, 이러한 특성들은 다른 열교환기의 전열정도에 영향을 미칠 것이다. 본 연구에서는 열전달특성에 대한 영향은 제외하고, 유체역학적 관점에서 환류브가 특이한 형태의 연구대상이므로 이에 대한 유동특성연구를 수행하고자 하였다. 이미 부정숙 등⁽³⁾은 보일러 열교환기용 환류브에서 자유유동속도와 흰의 피치, 높이 및 두께변화에 대한 와류출 특성실험을 통하여 일반 원주와 와류출특성을 비교할 수 있는 등가직경(Equivalent Diameter)을 제시하였으며, 이의 유용성여부를 검토한 바 있다. 본 연구는 그의 후속 연구로서 근접후류($X/d=5.0$)특성을 관찰하고 여러 가지 형태의 환류브의 후류유동을 비교하는데 등가직경의 유용성을 살펴보고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

후류특성을 관찰하기 위하여 폐회로 아음속풍동(시험부크기 : 2,000(l)×700(h)×700(w) mm)에서 정온형 열선풍속계(TSI, model IFA300)와 X-형(Kanomax, model 0252R-T5)열선을 이용하여 유동장의 각 점에서의 유속을 측정하였다. 자유유동에 나란한 방향을 X-축, 그리고 이에 수직인 방

향을 Y-축으로 정하였으며 이에 해당하는 순간속도성분을 각각 U, V로 표시하였고 이의 난류강도성분을 u_{rms} , v_{rms} 로 나타내었다. 이때 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. 측정위치는 환류브 중심에서 $X/d=5.0$, $Y/d=\pm 3.0$ 이었다. X-형 열선의 교정은 Look-up Table 기법을 이용하였고, 데이터의 추출간격은 100 μs (10 kHz), 측정점 당 4,096 개씩 20 회의 앙상블(Ensemble)을 취하였다.

본 실험에 사용된 모델은 열교환기에 사용되는 상용제품으로 톱니모양의 흰을 원형파이프 주위에 나선형으로 부착시킨 것이며 이의 형상, 치수와 등가직경(Equivalent Diameter)을 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 흰이 부착되어 있으며 모델의 외경을 기준으로 한 폐쇄비는 모델에 따라 7.5~13.7%이었다.

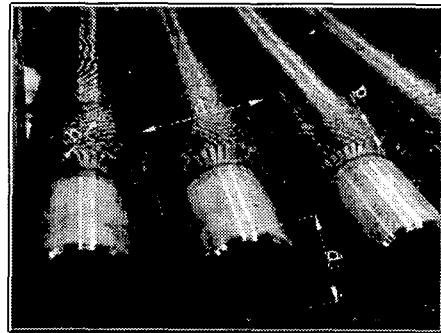


Fig. 1 Configuration of the model

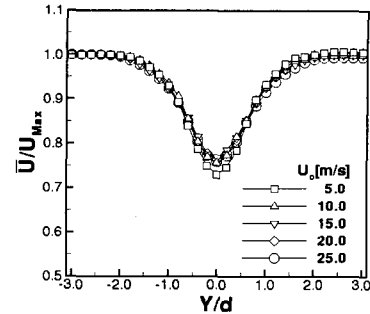
Table 1 Geometry of the models [mm]

Model	d_i	d_o	h	t	p	d_e	d_b	Remark
0	51	51	0	0	-			Circular Cylinder
1	51	75	12	1.0	8.45	54.2	52.2	
2	51	75	12	1.0	5.62	55.8	59.5	
3	51	85	17	1.0	6.76	57.1	65.3	
4	51	87	18	1.2	6.76	58.8	67.7	
5	51	87	18	1.2	5.62	60.3	71.3	
6	51	87	18	1.2	4.81	61.8	73.9	
7	51	87	18	1.2	4.05	63.6	76.4	
8	51	93	21	1.3	5.62	63.1	77.3	
9	51	93	21	1.3	4.05	67.2	82.7	

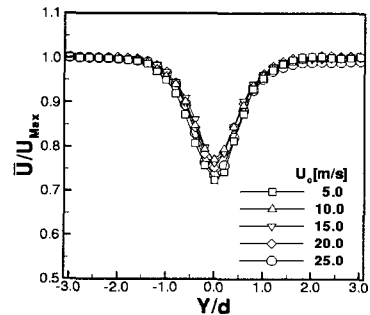
3. 실험결과 및 고찰

흰 사이를 흐르는 유체는 흰 높이가 증가하고 흰 피치가 감소할수록 마찰의 영향을 많이 받게 되는데 이의 영향을 살펴보기 위하여 자유유동속도를 변화시키며 후류를 관찰하였다. Fig. 2는 흰 튜브의 중심을 기준으로 $X/d=5.0$, $Y/d=\pm 3.0$ 의 영역에서 Y -방향으로 $0.2d$ 씩 이송하면서 측정된 U -성분의 시간평균 속도분포를 나타낸 것이다. 폐쇄비가 다른 각 모델의 속도분포를 비교하기 위하여 $Y/d=3.0$ 지점의 최대속도를 이용하여 무차원화 하였다. 흰 사이를 유체가 통과할 수 있기 때문에 흰 튜브의 Y -방향의 속도결손폭은 (a)의 원주에 비해서 대체로 좁게 나타났다. 그리고 (b)의 모델 #1의 경우처럼 흰 피치가 넓고 흰 높이가 작은 모델은 자유유동속도를 증가시켜도 속도분포에 큰 변화가 없음을 알 수 있으며 모델 #2, 3에서도 같은 경향을 보였다. 이러한 모델은 선행연구⁽⁴⁾결과에서 흰에 의해 증대되어진 난류강도의 역할로 흰 튜브의 흰 사이에서 속도증가가 있었던 모델들이다.

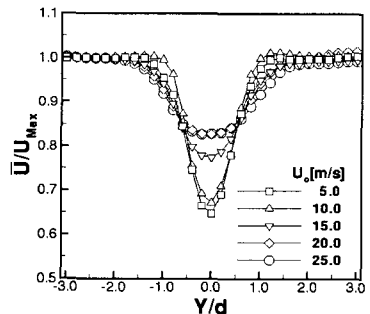
자유유동속도가 5.0 m/s 에 대체서 살펴되며 흰 피치가 큰 모델 #1과 같은 경우는 선행연구⁽³⁾에서 와류출을 증가시키는 결과를 보였으나 평균속도분포에는 영향을 미치지 못하며 이후 흰 피치가 감소하고 흰 높이가 증가할수록(이하, 흰밀도가 증가할수록) 속도결손량이 증가하다가 흰밀도가 더욱 증가된 모델 #6부터는 조금씩 속도결손량이 감소하였으나 (a)의 원주보다는 컸다. 이후 자유유동속도의 증가에 따라 모델 #6 이상에서 속도회복이 눈에 띄게 증가하여 (c) 모델 #8의 경우에서 뚜렷한 속도회복을 나타내었다. 이는 특이한 결과로 스트로할 수가 감소하면서 속도회복이 증가한 경우이다. 트리핑 와이어⁽⁵⁾나 나선형 돌출물⁽⁶⁾을 설치한 경우 물체의 항력은 스트로할 수에 반비례하거나 스트로할 수가 감소하면 속도결손이 증가하는데 반해 본 연구에서는 이와 반대의 결과를 보였으며 이는 원주에 부착된 흰의 특이한 형상(흰 높이가 크고, 흰 피치가 작음)때문으로 생각된다. 이러한 속도회복은 원주와는 다른 흰 튜브 상의 속도구배, 흰밀도의 증가로 인한 난류강도 증가 및 하류로 이동된 유입류와 유입강도등이 복합적으로 작용하여 나타난 결과로 생



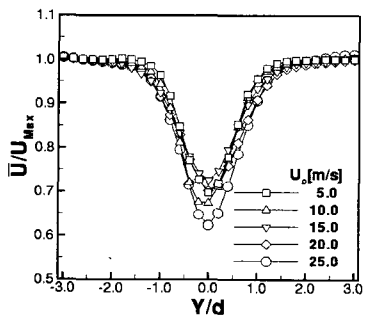
(a) Model #0



(b) Model #1



(c) Model #8



(d) Model #9

Fig. 2 Comparisons of the streamwise velocity distribution at $X/d=5.0$

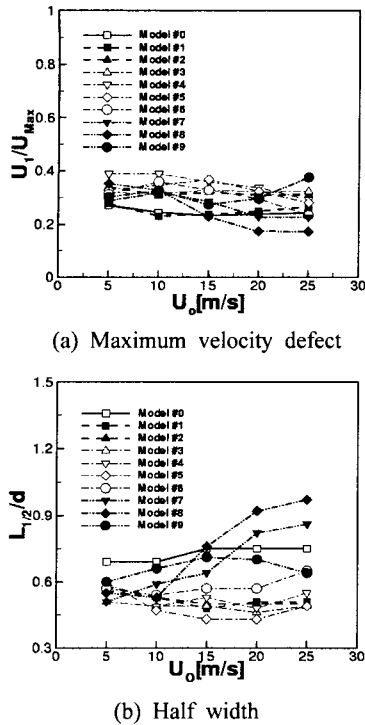


Fig. 3 Variation of maximum velocity defect and half width at $X/d=5.0$

각된다. 하지만 모델 #9의 경우는 자유유동속도 20.0 m/s부터 오히려 속도결손량이 증가하였다. 모델 #9의 경우는 선행연구⁽⁴⁾에서 흰 끝부분의 급격한 속도감소와 요동의 감소를 보였는데 이러한 속도분포와 요동의 감소가 이후 속도회복을 하지 못한 이유라고 생각된다.

Fig. 3에는 시간평균속도 분포를 이용하여 얻은 최대속도결손과 후류반폭비를 나타내었다. Fig. 3(a)에서 모델 #1의 경우는 원주와 거의 비슷한 최대속도결손값을 나타내었으며 흰밀도가 증가할수록 증가하여 모델 #4에서 최대속도결손을 보였다. 이후 흰밀도를 증가시켰을 경우 최대속도결손값이 감소하다가 모델 #9에서 다시 증가하였다. 여기에서 적절한 난류강도, 유입류 위치와 유입강도는 흰튜브 후류의 속도회복에 효과가 있음을 추측할 수 있다.

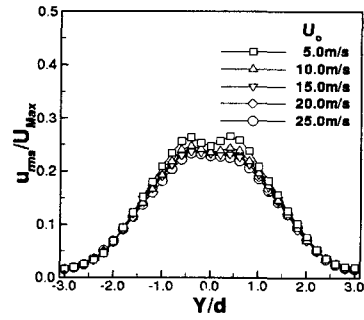
Fig. 3(b)에 나타낸 반폭비 분포에서 살펴보면 대체로 모델 #5까지는 흰밀도가 증가할수록 반폭비가 감소하였으나 이후 흰밀도의 증가에 대해서는 반폭비가 증가하였다. 그리고 모델 #7, 8의 경

우는 자유유동속도증가에 대해 뚜렷한 반폭비의 증가를 살펴볼 수 있다. 그리고 모델 #9의 경우는 자유유동속도 15.0 m/s 이후 반폭비가 감소하였다. 이들의 결과를 (a)의 최대속도결손과 비교하여 볼 때, 속도결손량이 작은 흰튜브의 경우에는 반폭비가 급격히 증가(특히 모델 #7, 8의 경우에서)하였는데 이들의 모델에서는 흰튜브 주위의 요동이 증가⁽⁴⁾하였고 이러한 요동이 자유유동과의 에너지교환에 영향을 미쳐 유동이 더욱 빨리 발달한 결과로 생각된다.

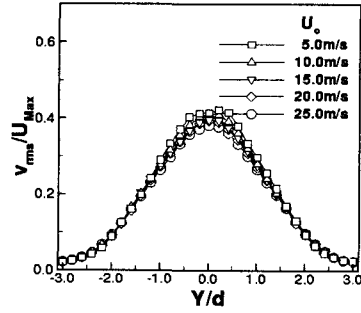
Fig. 4는 U-성분의 난류강도분포를 나타낸 것이다. 전체적으로 평균속도분포에서 확인된 것처럼 Y-방향의 난류강도분포 폭이 원주의 경우보다 작게 나타났으며 대체로 같은 모델에서 자유유동속도가 증가할 경우 난류강도값이 작게 분포하였고 원주의 경우보다 작은 값을 나타내었다. (c)의 속도회복이 컸던 모델의 자유유동속도에서 낮은 난류강도값을 나타내었는데 이는 유동발달의 결과로 생각된다. (d)의 모델 #9의 경우 앞서 언급한 속도분포비교에서는 자유유동속도의 증가에 따라 속도결손량이 증가하였으나 중심부의 난류강도값이 감소함을 나타내었다. 이러한 중심부의 난류강도값은 (c)의 모델 #8에 비해 상대적으로 조금 증가되었으나 비슷한 분포를 보였는데 이는 선행연구⁽⁴⁾에서 보였던 흰튜브 끝부분에서의 큰 속도 감소와 요동의 감소가 주요 원인으로 생각된다.

흰밀도가 증가하고 자유유동속도가 증가할수록 난류강도분포가 쌍봉형상을 나타내고 있다. 일반적으로 원주의 경우 근접후류에서 와류출로 인한 쌍봉형태의 난류강도분포를 보이다가 하류로 갈수록 그 형상은 점차 약해져서 흔적이 없어지는데, $X/d=5.0$ 에서 측정된 (a) 원주에 비해서 (c), (d) 흰튜브의 고속부에서 뚜렷한 쌍봉형태를 관찰할 수 있다. 이는 유입류의 유입강도 영향으로 나타난 결과이며 Fig. 6의 V-속도분포에서 자세히 설명하겠다.

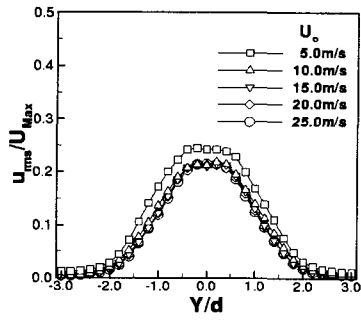
Fig. 5는 V-성분의 난류강도분포를 나타낸 것이다. 여기서 특이한 것은 Fig. 4의 U-성분의 난류강도분포와 달리 각 모델별로 자유유동속도를 증가시켜도 난류강도분포에는 큰 변화가 없었다. Fig. 4(c), (d)에서 U-성분의 난류강도가 크게 감소한 자유유동속도인 U_o 가 15.0 m/s 이상인 경우에서도 V-성분의 난류강도 감소는 미미하거나 거의 나타나지 않았다. 그리고 U-성분에 비해서 V-



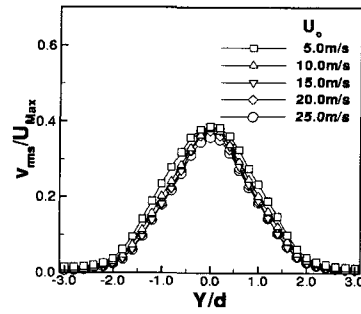
(a) Model #0



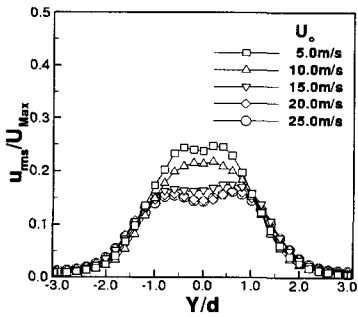
(a) Model #0



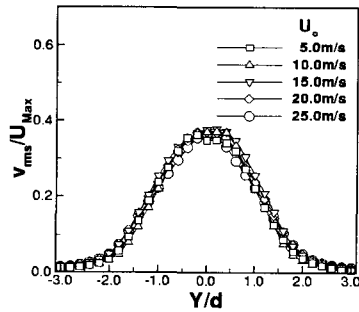
(b) Model #1



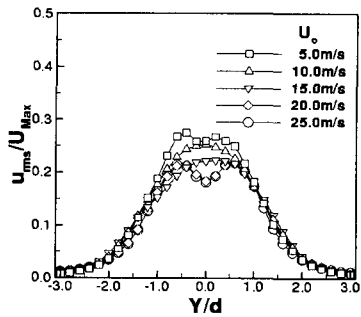
(b) Model #1



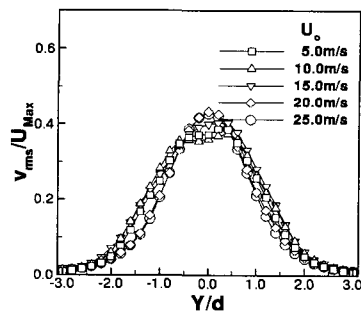
(c) Model #8



(c) Model #8



(d) Model #9



(d) Model #9

Fig. 4 Distributions of streamwise turbulent intensity at $X/d=5.0$

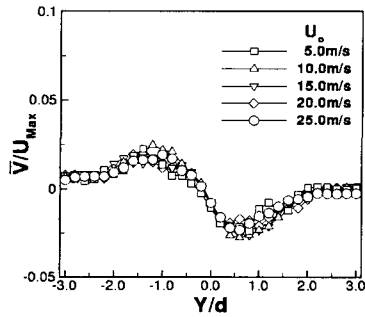
Fig. 5 Distributions of lateral turbulent intensity at $X/d=5.0$

성분의 난류강도는 대체로 원주와 비슷한 분포를 나타내었다.

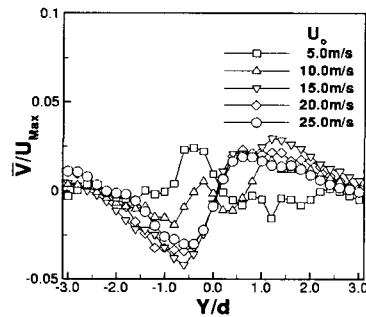
Fig. 6은 V-속도성분의 시간평균값을 나타낸 것이다. (a)의 원주에서 값의 크기는 작지만 원주 상·하의 V-속도분포가 반대의 값을 가짐을 확연히 알 수 있다. 이는 원주 상·하 반대편에서 일어나는 와류출에 의한 결과로 원주하부에서는 위쪽으로 상부에서는 아래쪽으로 향하는 유동의 비율이 높기 때문에 나타난 결과이다.

하지만 원튜브의 경우에는 이의 윤곽이 뚜렷하지 않고 평평하게 분포된 경우와 원주와 상반되

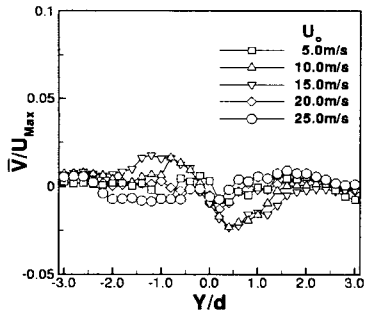
게 분포하는 경우가 나타남을 알 수 있다. 이는 와류출에 의한 후류중심선 반대편으로의 유입이 약화되면서 나타난 결과로 (b) 모델 #1과 같은 경우는 고속부에서 V-성분 시간평균속도가 평평하게 분포하며 이보다 원밀도가 조금 증가된 (c) 모델 #3에서는 원주와는 완전히 상반된 분포를 보였다. 이는 미약하지만 유동이 후류중심으로 모이게 하는 속도분포(모델 #0, 원주의 경우)와는 다르게 자유유동쪽으로 향하는 것을 의미한다. 이러한 원주와 상반된 분포는 정도에 차이는 약간 있으나 (d) 모델 #7까지 지속적으로 유지하다



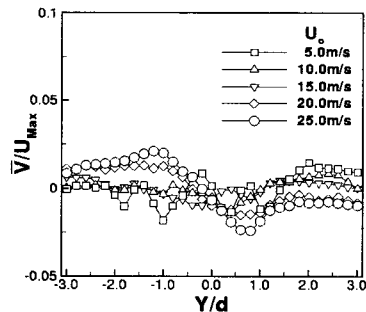
(a) Model #0



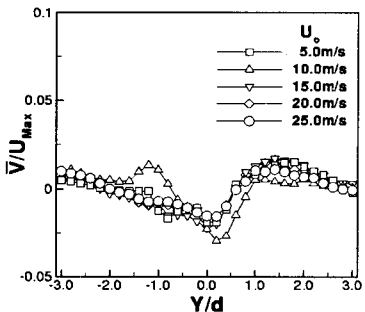
(d) Model #7



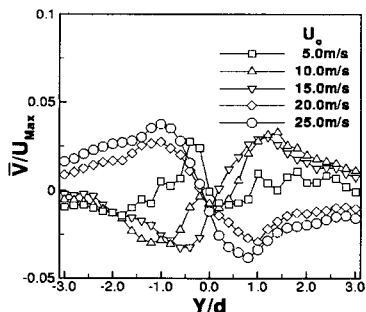
(b) Model #1



(e) Model #8



(c) Model #2



(f) Model #9

Fig. 6 Comparisons of the lateral velocity distribution at X/d=5.0

가 (e) 모델 #8의 고속부에서 다시 원주와 같은 속도분포를 나타내었다. 그리고 모델 #9에서는 원주의 속도분포와 같은 경우와 상반된 경우가 자유유동속도에 따라 함께 나타났다.

선행연구⁽⁴⁾에서 흰튜브 상의 속도기울기에 대해서 언급한 바 있으며 흰밀도가 증가할수록 흰사이의 마찰과 경계층 성장으로 완만한 속도기울기가 나타나는 것을 확인하였고 이의 결과로 후류중심을 가로지르는 유입류의 위치가 하류로 이동함을 알 수 있었다. 유입류의 위치가 하류로 이동하는 원인은 속도기울기 감소로 자유유동과 후류 사이의 전단력의 감소가 주요인으로 생각되는데 흰밀도가 증가할수록 완만한 속도기울기 때문에 더욱 전단력이 줄어들 것으로 생각된다. 따라서 유입강도도 약해질 것이고 후류중심선 반대편 유동까지 영향력을 미치지 못하며 정도의 차이에 따라 Fig. 6과 같은 속도분포를 나타내는 것으로 생각된다. 이런 이유로 Fig. 4 (c), (d)의 고속부의 U-성분 난류강도분포가 쌍봉형상을 나타내는 것이다.

모델 #8, 9와 같이 고속부에서 속도분포의 변화는 흰튜브 상의 속도분포에서 내부원주와 흰끝사이의 속도구배와 흰끝 이후의 속도구배의 차이에서 오는 결과로 생각된다. 선행연구⁽⁴⁾에서 I-형 열선을 이용하여 흰튜브 상의 속도분포를 측정하였으며 이를 토대로 다음과 같이 3 가지의 속도분포를 가정한 바 있었다. 흰밀도가 증가할수록 Fig. 7의 개념도에서와 같이 A에서 C의 속도분포로 변화하는데 A와 B의 분포에서도 발생되겠지만 특히 C분포의 경우 흰 끝부분에서 큰 속도구배가 발생할 것이다. 이러한 경우는 흰밀도가 높은 모델에서 자유유동속도가 높을 경우 발생되는데 특히 모델 #9에서 눈에 띄게 나타났었다.⁽⁴⁾ 이러한 속도구배의 불연속성이 유입류의 특성을 변화시킬 것으로 생각되는데, Fig. 6의 (e), (f)의 고속부의 V-속도분포로 보아 흰 끝부분에서 극부적으로 증가된 속도구배에 의해 후류중심으로 유입되는 유입강도가 다소 증가되었다는 것을 추정할 수 있다. 하지만 선행연구⁽⁴⁾에서 이러한 모델의 유입류 위치가 다른 모델보다 더욱 하류에 위치한 것으로 보아 유입강도를 높이는 또다른 이유가 있을 것으로 생각된다. 그리고 모델 #9에서 유입강도가 증가되었지만 Fig. 2의 속도결손이 증가된 것은 유입강도의 증가가 절대적으로 속도회

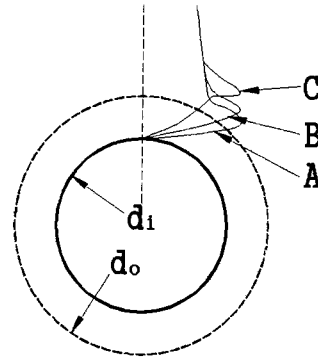


Fig. 7 Sketch of the velocity distribution⁽⁴⁾

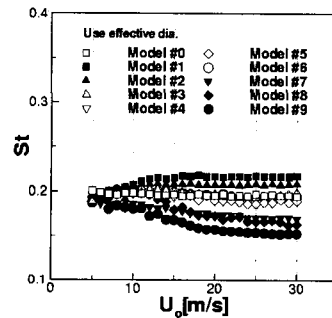
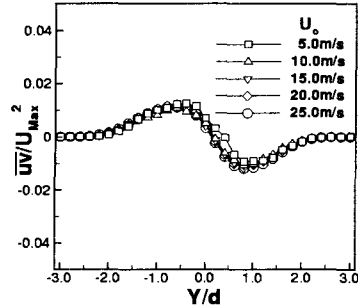


Fig. 8 Strouhal numbers of various models with effective diameter, d_e

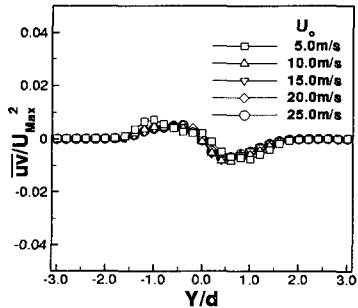
복에 도움이 되는 것이 아님을 나타내며 이는 하류로 이동된 유입류의 위치로 인한 흰튜브 상의 요동의 감소가 주요인임을 이미 언급한 바 있다.

Fig. 8은 유효직경을 이용하여 산출한 스트로할 수를 자유유동속도에 대하여 나타낸 것이다. 이를 Fig. 6의 V-속도분포와 비교하여 보면, (b) 모델 #1에서 자유유동속도가 15.0 m/s부터 평평한 V-속도분포를 보이는데 Fig. 8에서 모델 #1의 스트로할 수가 대략 $U_0=15.0$ m/s에서 다른 형태의 변화추이를 보이기 시작하여 이후 거의 일정한 값을 나타냄을 알 수 있다. 그리고 Fig. 6 (e), (f)의 모델 #8, 9의 경우에는 대략 $U_0=20.0$ m/s에서부터 원주와 같은 V-속도분포를 보이는데 Fig. 8에서 모델 #8, 9의 스트로할 수는 이 부근의 유속($U_0=20.0$ m/s)에서 일정한 분포를 보이기 시작한다. 따라서 유입류의 위치와 유입강도가 복합적으로 스트로할 수를 결정하고 이후 속도회복에도 영향을 미치는 것으로 생각된다.

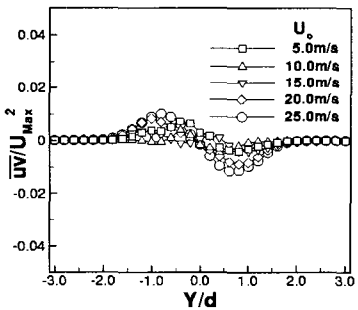
Fig. 9는 전단응력분포를 나타낸 것으로 원주의



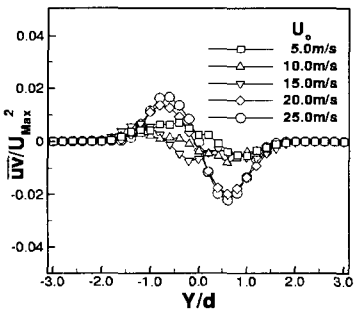
(a) Model #0



(b) Model #1



(c) Model #8



(d) Model #9

Fig. 9 Distributions of shear stress, uv at $X/d=5.0$

경우에는 자유유동속도변화에 대하여 큰 차이가 없지만 환튜브의 경우에는 환밀도가 증가할수록 큰 변화를 보이고 있다. 전단응력이 '0'에 가까워지는 지점은 자유유동에 근접한 지점으로 판단할 수 있는데 환튜브의 경우가 원주에 비해 후류중심선에서 가까운 지점에서 '0'에 접근함을 볼 수 있다. 이는 환 사이의 유체통과로 인한 후류폭의 감소와 관련있음을 이미 언급한 바 있다. 모델 #4까지는 원주와 같은 형태의 분포를 보였으며 절대크기는 감소하였다. 그러나 모델 #5에서 부터는 전단응력의 분포가 원주의 경우와는 확연히 다른 분포를 나타내었으며 환 피치와 높이가 더욱 증가된 모델 #8, 9에서는 자유유동속도가 증가하면 원주의 분포와 같은 형태를 보였다. 이의 원인은 Fig. 6의 V-성분의 시간평균속도분포 설명에서 이미 언급하였다.

앞서 언급한 바와 같이 환튜브는 환 사이의 공간으로 인해서 속도 및 난류강도분포 등에 원주와 차이가 있음을 알 수 있었으며 부 등⁽³⁾은 선행연구에서 등가직경을 제시하여 스트로할 수 비교에 유효직경이 적절함을 밝혔다. 여기서 등가직경의 정의를 다시 언급하면 아래와 같다.

· 수력직경(Hydraulic diameter), d_h :

$$d_h = d_o - 2 \times \left(\frac{4 \times (p-t) \times h}{p-t+2 \times h} \right) \quad (3)$$

· 유효직경(Effective diameter), d_e : 환을 포함한 환튜브의 체적과 같은체적을 가진 원봉의 외경.

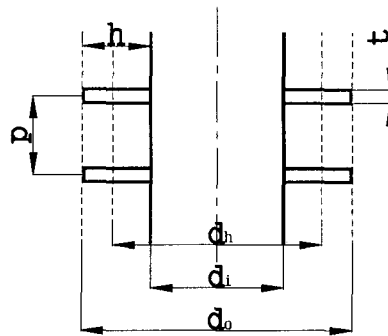
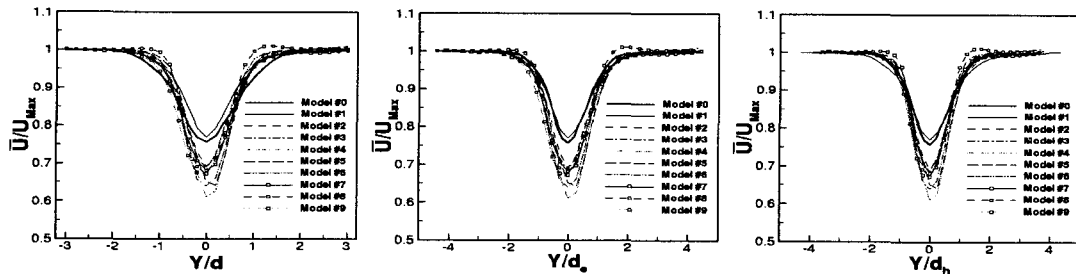
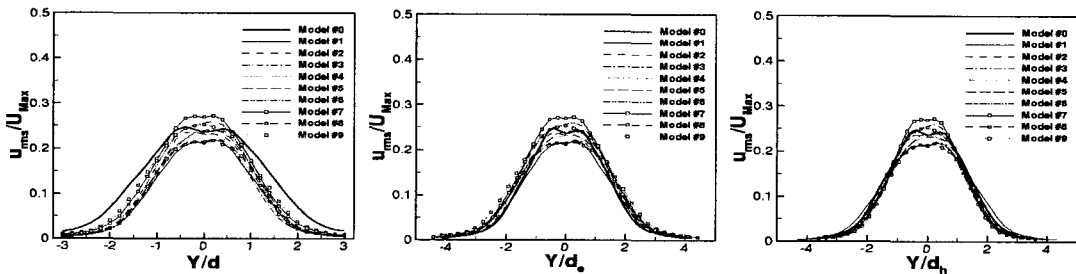


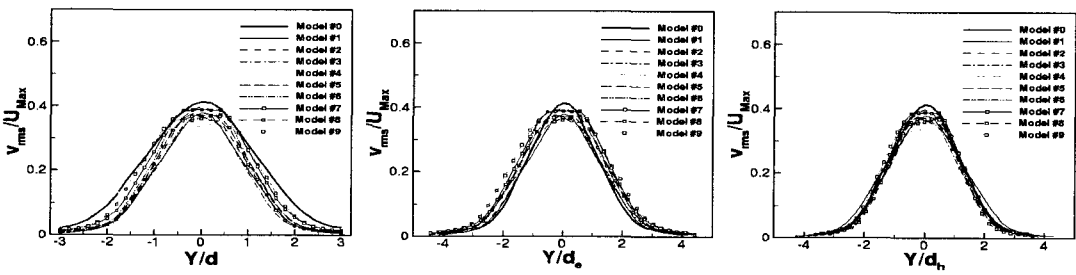
Fig. 10 Concept of hydraulic diameter⁽³⁾



(a) Outer diameter, d_0 (b) Effective diameter, d_e (c) Hydraulic diameter, d_h
Fig. 11 Comparisons of the time mean velocity with various diameters at $X/d=5.0$, $U_0=10.0$ m/s



(a) Outer diameter, d_0 (b) Effective diameter, d_e (c) Hydraulic diameter, d_h
Fig. 12 Comparisons of the streamwise turbulent intensity with various diameters at $X/d=5.0$, $U_0=10.0$ m/s



(a) Outer diameter, d_0 (b) Effective diameter, d_e (c) Hydraulic diameter, d_h
Fig. 13 Comparisons of the lateral turbulent intensity with various diameters at $X/d=5.0$, $U_0=10.0$ m/s

이와같은 등가직경과 외경을 이용하여 원주와 환튜브 간의 시간평균속도 분포를 비교한 것을 Fig. 11에 나타내었다. 자유유동속도가 10.0 m/s에 대해서 나타내었는데, 중심점의 최대속도 결손값에는 모델별의 차이가 많이 있으나 Y-방향의 속도결손폭을 비교해 보면 외경을 이용해 무차원화된 (a)는 환 사이의 공간으로 인해서 원주보다 좁은 분포를 나타내었다. (b) 유효직경의 경우는 오히려 환튜브의 속도분포폭이 넓은 것으로 나타났

으며 마찰력을 고려한 수력직경을 이용하여 정리된 (c)의 경우에서 원주의 분포와 가장 근사함을 나타내었다. 중심부에서 $Y/d=\pm 0.5$ 범위를 제외한 구역에서 원주의 속도분포와 비슷한 분포를 보였다.

Fig. 12과 Fig. 13에는 U-성분과 V-성분의 난류 강도를 등가직경과 외경으로 무차원화하여 나타내었다. Fig. 11의 시간평균속도 비교에서와 마찬가지로 중심부의 값을 제외하면 수력직경을 이용

한 비교가 더욱 원주의 경우에 접근하고 있으며 거의 일치하고 있다. 선행연구⁽³⁾에서 유효직경은 스트로할 수를 비교하는데 적절함을 주장하였는데 유동장의 비교에서는 수력직경이 더욱 흰튜브와 원주와의 비교에 적절함을 Fig. 11~13을 통하여 알 수 있었다.

4. 결 론

자유유동속도를 변화시켜가면서 9가지의 흰튜브 모델을 사용하여 $X/d=5.0$ 에서의 유속을 측정하여 시간평균유동장을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 흰튜브에서 V-속도가 원주와 상반된 분포를 나타낸 경우가 발견되는데 이는 흰 끝부분에서 속도기울기의 불연속성에 의한 결과로 생각된다.

(2) 자유유동속도에 대해 스트로할 수가 일정해 지는 지점에서 V-속도분포 형상이 변화하여 와류출주파수와 V-속도분포의 변화는 깊은 관련이 있음을 알 수 있었다.

(3) 흰튜브 상의 요동의 증가와 유입강도의 증가는 이후 속도회복에 중요한 영향을 미쳤다.

(4) 등가직경을 이용한 속도 및 난류강도분포의 비교에서 접촉면적을 고려한 수력직경이 원주와 흰튜브의 후류유동분포의 비교에 있어서 더욱 적절하였다.

참고문헌

- (1) Blevins, R. D., 1990, *Flow-Induced Vibration*, Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 77~81.
- (2) Simiu, E. and Scanlan, R. H., 1986, *Wind Effects on Structures*, John Wiley & Sons, New York, pp. 356~359.
- (3) 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*, Vol. 25, No. 8, pp. 1077~1086.
- (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*, at press.
- (5) Igarashi, T., 1986, "Effect of tripping wires on the flow around a circular cylinder normal to an airstream," *Bulletin of JSME*, Vol. 29, No. 255, pp. 2917~2924.
- (6) Kwon, K. J., Kim, H. B. and Lee, S. J., 1996, "Experimental Study on the Near wake behind a Circular Cylinder with Helical Surface Protrusions," *Transactions of the KSME, B*, Vol. 20, No. 8, pp. 2601~2610.