

톱니형 환이 부착된 원주의 근접후류특성 연구 (I) - 와유출 메카니즘의 특성변화 규명 -

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

Characteristics of Near Wake Behind a Circular Cylinder with Serrated Fins (I) - Mechanism of Vortex Shedding -

Byong Nam Ryu, Kyung Chun Kim and Jung Sook Boo

Key Words: Equivalent Diameter(등가직경), Effective Diameter(유효직경), Vortex Formation Region(와형성영역), Phase Average(위상평균), Strouhal Number(스트로할 수)

Abstract

An experimental study is performed to investigate the characteristics of near wake behind a circular cylinder with serrated fins using the constant temperature anemometer and through flow visualization. Previous report(Boo et al., 2001) shows that there are three different modes in vortex shedding behavior. This paper is focused on the identification of the physical reasons why the difference is occurred in vortex shedding. The through flow velocity crossing fins decreases as increasing fin height and decreasing fin pitch mainly due to the flow resistance. Vortex shedding is affected strongly by velocity distribution around fin tube, especially by the velocity gradient. The velocity distribution at $X/d=0.0$ has lower gradient with increasing freestream velocity and fin height and decreasing fin pitch. Those differences in velocity gradients generate different vortex shedding mechanism.

기호설명

d_e : 유효직경(Effective Diameter)
 d_i : 내경(Inner Diameter)
 d_o, d : 외경(Outer Diameter)
 f : 와유출주파수
(Vortex Shedding Frequency)
 h : 환 높이(Fin Height)
 p : 환 피치(Fin Pitch)

Re : 레이놀즈수
(Reynolds Number($Re=U_o d/v$))
 St : 스트로할 수(Strouhal Number($St=fd/U_o$))
 t : 환 두께(Fin Thickness)
 t_s : 노출시간(Exposure Time)
 U_o : 자유유동속도(Freestream Velocity)
 θ : 위상(Phase)
< > : 위상평균(Phase Average)

1. 서론

뒤편이 둥근 물체(Bluff Body) 뒤에 수반되는 와유출은 넓은 범위의 레이놀즈 수에서 관찰되며 와형성에 관한 메카니즘의 규명을 위하여 많은 연구가 진행되어 왔다. Gerrard⁽¹⁾에 의하면 와형성영역은 전단층(Shear Layer)으로의 유입(Entrainment)과 역류(Reversed Flow)에 의한 원주후면으로 유체가 재충전(Replenish)하는 균형에 의해 결정된다고 하

* 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

였으며 레이놀즈 수가 증가할 경우 유입률이 증가하여 와형성길이(Length of Vortex Formation Region)가 감소한다고 하였다. 와형성 영역의 끝은 후류(Wake) 외부의 유체가 처음으로 후류중심축을 가로지르는 지점으로 후류중심축을 기준으로 물체 반대편에서 박리하여 성장하는 와에 의해서 유입되게 된다. 그리고 이 지점은 보통 후류중심축 상에서 와유출주파수의 2 배로 섭동하는 속도의 난류강도값이 가장 큰 지점으로 결정된다. 이후 Green과 Gerrard⁽²⁾는 실험을 통하여 와형성영역의 끝 지점과 와의 강도가 최대인 지점이 일치함을 주장하였으며, Griffin⁽³⁾에 의해 다시 확인 되었다. 와유출과 밀접한 관계를 가진 와형성영역의 길이는 분리판(Split Plate)과 같은 물체를 이용하여 인위적으로 원주후류를 제어하면 와유출에 영향을 미치게 된다.^(1,4) 와유출제어는 다양한 방법을 통하여 시도되어져 오고 있는데 주요한 방법으로는 표면거칠기를 조절하거나 헬리컬 스트레이크(Helical Strakes), 트립핑 와이어(Tripping Wire), 슬랫(Slat), 다공판, 분할판(Splitter) 등을 설치하는 방법과 원주를 회전 또는 진동시키는 방법 등이 있다.^(5,6)

본 연구에 사용된 모델은 톱니형 환이 부착된 원주로 이미 부정숙 등⁽⁷⁾에 의해 모델별로 독특한 와유출특성을 나타냄을 보였었다. 그들은 자유유동속도와 환의 피치, 높이 및 두께변화에 대한 와유출특성 실험을 통하여 일반원주와 와유출특성을 비교할 수 있는 등가직경(Equivalent Diameter)을 제시하였으며, 이의 유용성 여부를 검토한 바 있다. 본 연구는 이의 후속연구로서 근접후류의 관찰을 통하여 톱니형 환이 후류에 미치는 영향을 살펴보고, 와유출특성 변화에 대한 메카니즘을 규명하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

톱니형 환이 부착된 원주(이하 환튜브)의 와유출 메카니즘과 그 변화를 관찰하기 위하여 풍동(Wind Tunnel)속에 환튜브를 설치하고 그 후류에서 와유출주파수와 유속을 측정하였고, 회류수조(Water Channel)에서 가시화를 통하여 정성적인 관찰을 시도하였다.

본 실험에서 사용된 풍동은 폐회로 아음속 풍동으로 전체길이는 36,000 mm이며 유속은 0.5~60 m/s의 범위 내에서 적절하게 조절이 가능하고

수축부의 길이는 1,600 mm, 수축비는 6.6:1이다. 시험부의 크기는 2,000(l)×700(h)×700(w) mm이고, 시험부에서의 흐름방향의 난류강도는 약 0.2 % 미만이며, 속도분포의 균일도는 경계층부분을 제외하고는 약 1.0~1.5 % 정도이었다. 자유유동에 나란한 방향을 X-축, 그리고 이에 수직인 방향을 Y-축으로 정하였으며 이에 해당하는 순간속도성분을 각각 U, V로 표시하였다. 속도측정에는 정온형 열선풍속계(TSI, model IFA300)와 I-형(TSI, model 1210-20), X-형(Kanomax, model 0252R-T5) 열선이 사용되었다. 주파수측정은 X-형 열선을 이용하여 자유유동속도, U_0 는 5.0~30.0 m/s 범위에서 수행되었고, 이때 관외경(d 또는 d_0)을 기준으로한 레이놀즈 수 범위는 모델마다 다르게 되며 최소 및 최대값은 각각 약 17,000, 185,000이었다. 주파수측정위치는 환튜브의 중심에서 $X/d=6.0$, $Y/d=0.0$ 이었고, 데이터의 추출간격은 500 μ s(2 kHz), 측정점 당 4,096 개씩 10 회의 앙상블(Ensemble)을 취하였다.

그리고 가시화에 이용된 수조는 두 개의 임펠러(Impeller)에 의해 구동되는 수직형 순환식 회류수조(Vertical Circulating Water Channel)로 12,500(l)×5,200(h)×2,200(w) mm의 크기를 가지고 시험부의 크기는 5,000(l)×1,200(h)×1,800(w) mm이며 저수용량은 40 톤 규모이다. 유속범위는 0.1~2.0 m/s 범위에서 조절가능하고, 시험부에서 속도균일도는 1.0 % 이내, 난류강도는 2.8 % 정도이다. 가시화에는 100~200 μ m의 직경을 가지는 비중 1.02인 폴리비닐 클로라이드(Polyvinyl Chloride)를 사용하였고, 조명은 4.0 W의 아르곤-이온(Ar-Ion) 레이저(Coherent, Innova-70)를 사용하였다. 가시화 이미지는 스틸카메라(Still Camera)와 CCD카메라를 이용하여 저장하였다.

본 실험에 사용된 모델은 톱니모양의 환을 원형파이프 주위에 나선형으로 부착시킨 것이며 이의 형상, 치수와 유효직경(Effective Diameter)을 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다. 총 10 개의 모델이 사용되어졌고, 모델은 직경 51 mm의 일반 파이프(Model #0, 이하 원주)에 12~21 mm의 높이의 환이 부착되어 있으며 모델의 외경은 75~93 mm까지 4 가지가 사용되었다. 유동측정시 모델은 시험부 입구에서 860 mm 지점에 설치하였고,

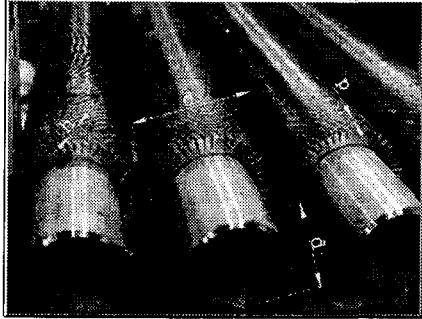


Fig. 1 Configuration of the model

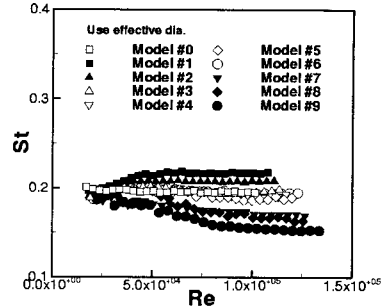


Fig. 2 Strouhal number of various models with effective diameter, d_e

Table 1 Geometry of the models [mm]

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

모델외경(d_o)을 기준으로 한 폐쇄비는 모델에 따라 7.5~13.7%이었으며 흰 사이의 공간으로 인하여 실제의 최대폐쇄비는 10% 미만이다. Apelt 등⁽⁹⁾의 연구결과에 의하면 본 실험에서의 폐쇄비는 항력 및 와류출 등에 미치는 영향이 미미하였으므로 이러한 영향은 무시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

툽니형 흰이 부착된 원주는 흰의 높이와 피치에 따라서 특이한 와류출특성을 나타내었다. Fig. 2는 Table 1에 제시된 모델을 이용하여 자유유동속도 5.0~30.0 m/s에서 측정된 와류출주파수와 각 모델의 유효직경(흰을 포함한 흰튜브의 체적과 같은 체적을 가지는 원봉의 외경⁽⁷⁾)을 이용하여 산출된 스트로할 수 분포이다. 자유유동속도를 증가시킬 경우 흰 높이가 증가하고 흰 피치가 감소할수록(이하, 흰밀도가 증가할수록) 스트로할 수는 감소함을 알 수 있다. 각 모델의 경우 레이놀즈 수에 따라 스트로할 수가 변화하는 영역(이

하, 천이구간)과 거의 일정하게 유지되는 영역으로 나눌수 있다. 천이구간 이후에 스트로할 수가 원주보다 큰 경우와 원주와 같이 일정한 값을 유지하는 경우, 작은 값을 보이는 경우를 확연히 구분할 수 있으며 이는 흰 사이를 흐르는 유체속도의 증·감과 관련될 것으로 생각⁽⁷⁾되었다.

원주의 경우 표면을 따라 흐르는 유체는 원주 표면에서부터 큰 속도감속이 발생한다. 이에 비해 흰튜브의 경우는 흰 사이를 유체가 통과할 수 있으므로 이의 속도는 흰튜브 끝부분(외경)에서 원주의 경우처럼 '0'이 아니며 흰밀도가 적절히 증가된 흰튜브의 Y방향 U-속도분포는 원주의 속도분포보다 완만한 기울기를 가질 것이다. 그리고 흰 피치가 감소하고 높이가 증가할수록 흰 표면의 마찰로 인하여 감속이 커지고 경계층의 성장으로 최대속도점은 내부원주 표면(d_i)에서 점점 멀어지게 되며 이후 와형성영역에도 영향을 미칠 것으로 생각된다. 반면 흰에 의한 난류강도는 증가할 것으로 생각되며 하류방향으로 진행하면서 속도분포, 와형성구조 등과 함께 속도회복에도 영향을 미칠 것으로 생각된다. 이의 영향을 살펴보기 위하여 흰튜브 표면 부근의 속도를 측정하였다.

Fig. 3은 자유유동속도를 변화시켜가면서 I-형 열선을 이용하여 $X/d=0.0$ 위치에서 Y-방향으로 이송하면서 유속변화를 측정한 것이다. 모델 중 흰 사이의 간격이 상대적으로 넓은 일부 모델(모델 #1~5)은 흰 높이의 중간부에서 유속측정이 가능하였으므로 이 값을 같이 나타내었다.

원주(모델 #0)의 경우, 자유유동속도가 증가할수록 원주표면과 $Y/d_o=0.7$ 부근의 속도기울기가 감소하였고 $Y/d_o=0.7$ 이상의 기울기는 증가하는

것을 알 수 있었다. 환튜브의 경우는 자유유동속도를 증가시킬 경우 환 끝부분($Y/d_0=0.5$) 이상에서 속도기울기가 증가하고 있다. (c)의 모델 #4에서 살펴보면 자유유동속도가 증가할수록 환의 마찰에 의해 환 중심부에서 측정된 속도가 감소하였으며 최고속도지점이 Y-방향으로 이동함을 관찰할 수 있었다.

내부원주 표면(d_i)에 근접한 위치에서 속도를 비교하여 보면 원주의 경우 대략 $1.25U_0$ 정도이나 환튜브 모델 #1의 경우 $1.29 \sim 1.38U_0$ 값을 나타내었고, (c) 모델 #4에서는 조금 감소한 것을 알 수 있다. Chang⁽⁸⁾에 의하면 원주의 표면에서 최대 $1.6U_0$ 까지 가속된다고 하는데 본 연구에서 측정지점은 정체점에서부터 90° 에 위치한 지점이고 레이놀즈 수로 볼 때 층류임으로 최대가속 이후 감속하는 것을 감안하면 그 값이 타당하다고 할 수 있다. (b) 모델 #1에서 나타난 것과 같이 환튜브 주변에서의 최대속도값이 원주보다 큰 것(이는 모델 #2, 3에서도 관찰되었다.)은 환이 난류강도를 증대시켜서 자유유동으로부터 에너지 교환을 촉진시키고 이로 인해 박리가 지연되는 것으로 추측된다. 따라서 스트로할 수가 큰 모델 #1, 2는 위와 같은 속도가속의 결과로 생각된다.

그리고 환밀도가 증가되면 난류강도값이 더욱 증가될 것이나 환 사이를 흐르는 유체가 받는 마찰력도 커지게 되어 경계층이 커지게 된다. 이러한 경계층의 성장은 내부원주에서 최대속도지점까지의 기울기를 줄이게 되어 와유출에 영향을 미칠 것으로 생각된다.

환튜브 상의 속도구배는 Fig. 4에서 나타낸 것처럼 대략 3가지 경우로 구분할 수 있다. 환밀도와 자유유동속도의 증가에 따라 환에 의한 마찰력이 증가되면 환튜브 내부원주 상의 속도분포가 A, B, C의 순서로 변하게 될 것인데 이때 내부원주 표면까지의 속도분포기울기가 완만해지게 된다. 어떻게 되면 유체간의 전단력이 약화되어 후류중심으로 유입되는 시점이 늦어지고 유입강도가 약화되어 와유출에 영향을 미칠 것으로 생각된다. Fig. 3의 (b) 모델 #1과 같이 좀 더 높은 속도를 가지고 원주의 표면(d_i)을 이탈한 유체는 Gerrard 등^(1,2)의 이론에 따라 생각해 볼 때 유입강도가 강화되어 와유출의 촉진을 유발할 수 있다. 하지만 환밀도가 증가되어 B, C와 같은 속도분포를 가지면 후류중심으로 유입되는 시점이 느

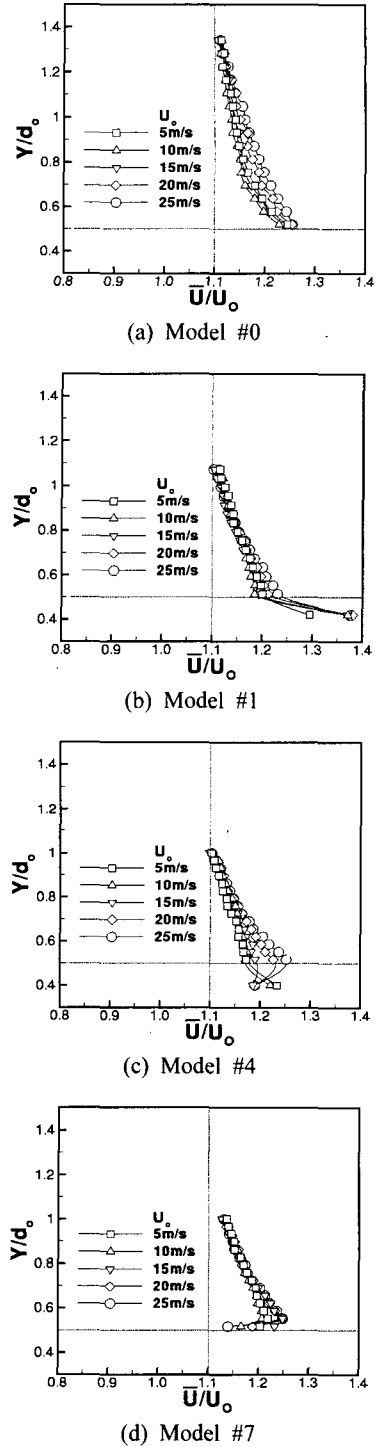


Fig. 3 Comparison of the velocity distribution at $X/d=0.0$

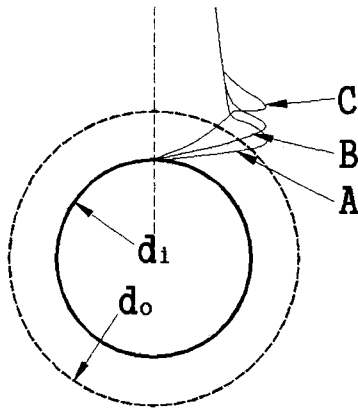


Fig. 4 Sketch of the velocity distribution

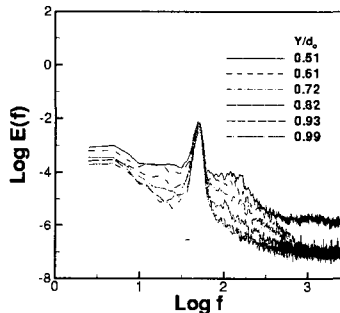


Fig. 5 Power spectrum at $X/d=0.0$, Model #5, $U_0=15.0$ m/s

려지게되어 와유출의 감소를 초래할 것으로 생각된다.

이로 미루어 보아 Fig. 2의 스트로할 수 변화요인으로는 원 사이를 흐르는 유체의 유속감소와 이에따른 속도분포의 변화가 주요할 것으로 생각된다.

Fig. 5에는 모델 #5의 속도($U_0=15.0$ m/s)값을 이용하여 주파수분석을 나타낸 것이다. 각 지점에서 확연한 와유출주파수를 살펴볼 수 있으며 이는 전체 모델에서 관찰되었다. 따라서 이를 이용하면 위상평균법으로 정리할 수 있는데 이의 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6은 자유유동속도 15.0 m/s에서 한 주기의 와유출이 일어날 때의 속도분포변화를 나타낸 것인데 (a)의 원주에 비해 (b) 모델 #1의 경우는 진동폭이 작지만 이후 원밀도가 증가할수록 진동폭이 늘어남을 (c)와 (d)에서 살펴볼 수 있다. 이는 원에 의한 난류강도의 증진과 약화된 역류의 영

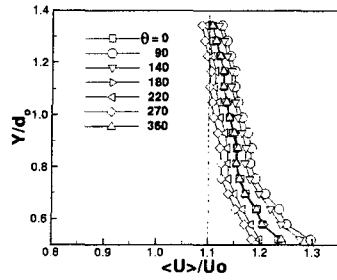
향으로 요동폭이 증진되는 것인데, 이러한 요동은 자유유동과 경계층 내의 유체간 에너지교환을 활발히 하는 요인이 될 것으로 생각된다. 이러한 경향은 모델 #7까지 지속되다가 원밀도가 더욱 증가한 모델 #8에서 약간의 감소하는 경향을 나타내었다.

그리고 모델 #9에서는 자유유동속도를 증가시키면 요동폭이 크게 감소하였다. 이는 특이한 결과로 모델 #9의 경우를 Fig. 7에 나타내었는데 속도가 증가할수록 원 끝부분에서 속도감속이 크고 요동폭이 줄어드는 것을 알 수 있다. 대부분의 모델에서 자유유동속도가 증가할 경우 요동폭이 증가하였는데 모델 #9의 경우와 같이 원밀도가 큰 모델에서는 오히려 유동이 안정화되는 것을 알 수 있다. (c), (d)와 같은 경우에서 원 끝부분의 속도가 너무 낮아지게 되면 원튜브 끝에서 박리하는 것과 유사한 효과를 나타낼 것으로 생각된다. 그리고 좁은 원간 거리로 인한 완충역할로 원튜브 상·하에서 박리되는 유동에 의한 요동이 감소된 것으로 생각된다.

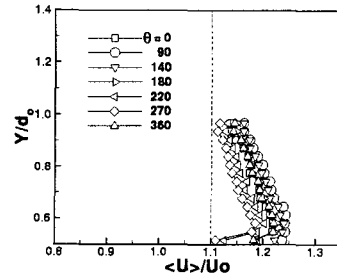
Fig. 8은 회류수조에서 CCD 카메라로 얻은 가시화결과를 나타낸 것이다. 이때의 자유유동속도는 0.99 m/s이었는데, 이는 레이놀즈 수를 근거로 비교하면 풍동에서의 자유유동속도는 약 15.0 m/s에 해당되는 값이며 모델은 풍동실험에서 사용된 원튜브를 그대로 사용하였고 이때의 노출시간은 1/30 초였다.

전체적으로 뚜렷한 와형성영역의 끝지점을 구분할 수는 없었지만 CCD로 촬영된 영상관찰을 통하여 Gerrard 등^(1,2)이 주장한 후류중심선을 가로지르는 유입류의 위치등을 검토한 결과 대체로 원밀도가 증가할수록 이 지점(X-방향의 절대위치)이 하류로 이동하고 있음을 정성적으로 관찰할 수 있었다. 그리고 원밀도가 증가할수록 유입류의 X-방향위치에 변화가 많은 것을 관찰할 수 있었다. 이로써 앞서 언급하였던 와유출이 원튜브 상의 속도구배에 주요하게 영향을 받는다는 것을 정성적으로 확인할 수 있었다.

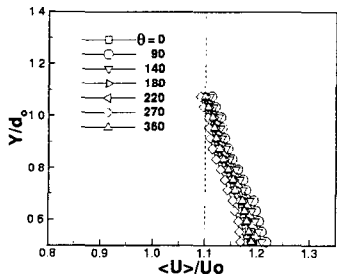
이를 좀 더 자세히 관찰하기위하여 노출시간을 길게하여 얻은 사진을 관찰하였다. Fig. 9는 원주와 나머지 다섯 개의 모델에 대한 가시화 사진으로 노출시간은 1/4 초였다. 원주에 비해 원튜브의 경우 후류폭이 좁음(외경으로 비교할 경우)을 알 수 있으며 이는 원 사이로 유체가 통과할 수



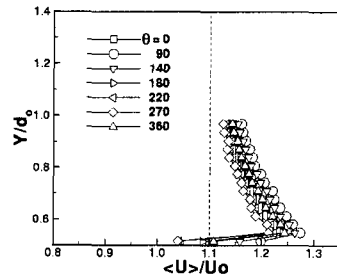
(a) Model #0



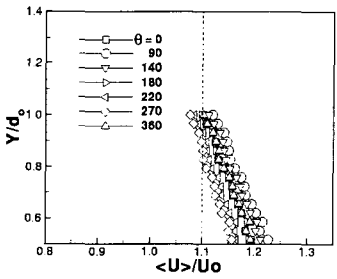
(a) $U_0=10.0$ m/s



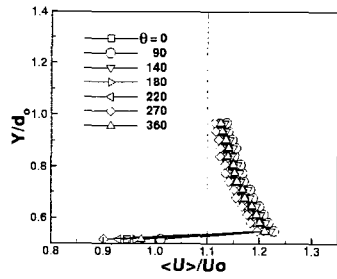
(b) Model #1



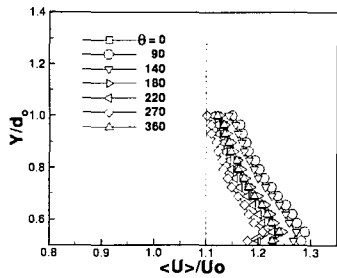
(b) $U_0=15.0$ m/s



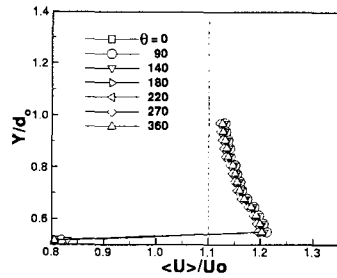
(c) Model 4



(c) $U_0=20.0$ m/s



(d) Model 7



(d) $U_0=25.0$ m/s

Fig. 6 Phase averaged velocity distribution at $X/d=0.0$, $U_0=15.0$ m/s

Fig. 7 Phase averaged velocity distribution of Model #9 at $X/d=0.0$

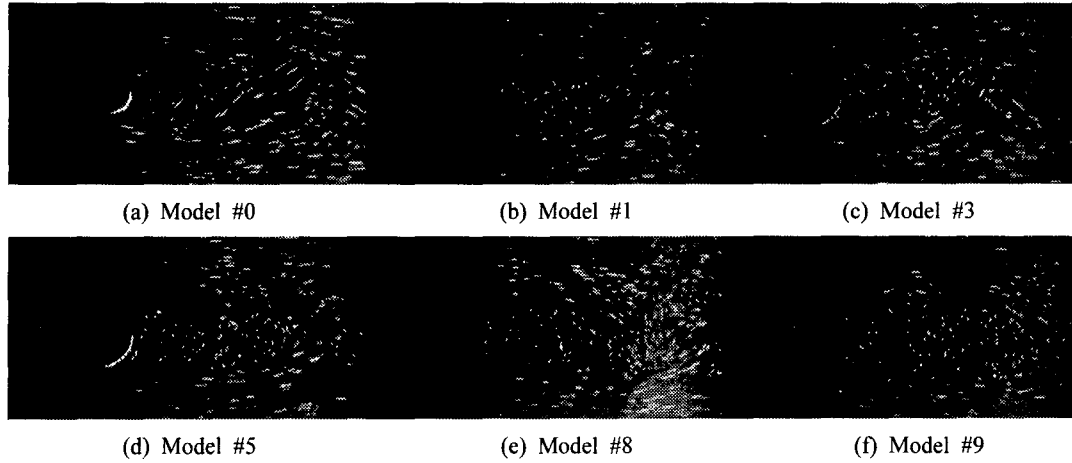


Fig. 8 Results of flow visualization of various models($U_0=0.99$ m/s, $t_s=1/30$ sec)

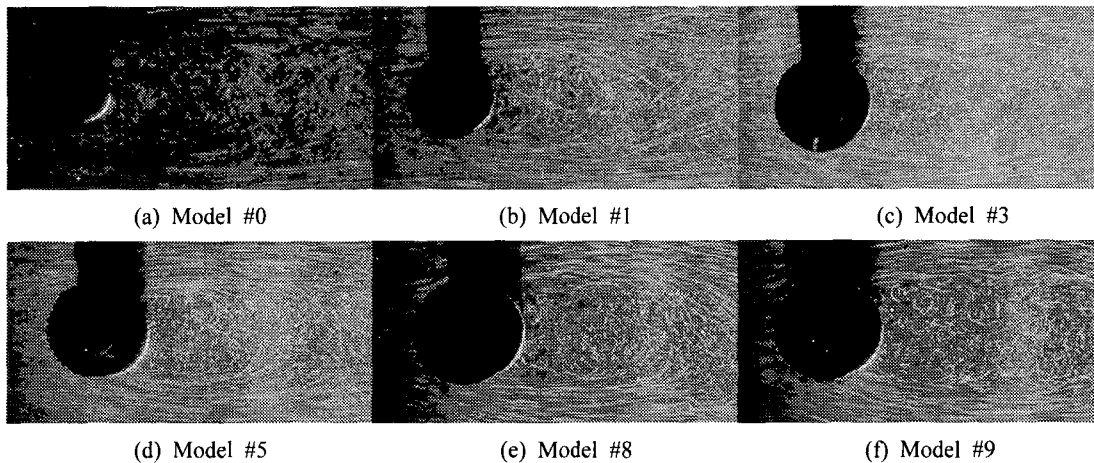


Fig. 9 Results of flow visualization of various models($U_0=0.99$ m/s, $t_s=1/4$ sec)

있음으로 발생한 결과다. 흰튜브 간에서 Y-방향의 절대폭을 비교하여 보면 흰밀도가 증가할수록 넓어짐을 알 수 있다. 이는 Fig. 3에서 흰밀도의 증가시 흰튜브 상의 속도감소가 증가함을 보였는데 이를 뒷받침하는 결과이다. 흰튜브의 전 모델에서 박리가 원주보다 흰튜브 후반부에서 발생하는 것을 볼 수 있는데 이는 유체가 흰 사이를 통과할 수 있고 흰의 역할로 증대되어진 난류강도의 영향으로 박리지연된 결과로 생각된다.

여기서 특이한 것은 모델 #1의 경우에서도 유입류의 위치가 원주보다 하류에 있음을 알 수 있는데 이에 대해서는 좀 더 자세한 연구가 필요할 것으로 생각된다. 이 모델은 원주에 비해 흰튜브 상의 속도구배가 커서 와형성영역이 짧아질 것으

로 예상되었었다. 그렇지만 전체적으로 흰밀도가 증가될수록 후류중심을 가로지르는 유선(X-방향의 절대위치)이 점점 하류로 이동함을 살펴볼 수 있는데 이는 흰밀도가 증가할수록 속도구배가 완만하게 변화되고 유입류의 위치와 강도 등에 영향을 미쳐서 와유출이 결정된다는 앞서의 추측을 뒷받침하고 있다. 이와같이 흰튜브 상의 속도분포와 가시화결과를 통해 확인하였듯이 Fig. 4의 개념도에서 설명한 속도구배에 의한 유입류의 위치가 와형성에 주요하게 작용함을 알 수 있었다. 따라서 흰밀도가 증가할수록 속도구배를 완만하게 변화시키고 유입류의 위치를 좀 더 하류로 이동시키며 이의 결과 와유출주파수가 감소되는 것을 알 수 있었다. Fig. 10은 자유유동속도 변화에

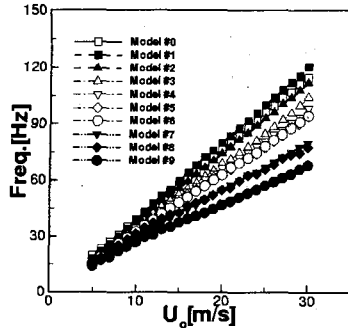


Fig. 10 Variation of vortex shedding frequency

대한 절대 주파수변화를 모델별로 나타내었다. 여기서 횡밀도가 증가할수록 와유출주파수가 순차적으로 감소함을 확연히 구분할 수 있었으며 자유유동속도가 증가할수록 큰 차이를 보였다.

주파수가 대략 자유유동속도 10.0~15.0 m/s 범위에서 기울기가 변하는 것을 알 수 있다. Fig. 2에서 스트로할 수가 증가된 모델 #1, 2에서는 미약하지만 기울기 변화가 관찰되었으며, 스트로할 수가 감소한 모델 #7~9에서는 더욱 뚜렷하게 나타났다. 따라서 이 구간에서 유동에 특별한 변화가 발생한 것으로 생각되며, 이러한 변화요인에 대한 추가적인 연구가 더 필요할 것으로 생각된다.

4. 결론

이상과 같이 흰 높이와 피치가 다른 9가지의 열교환기용 흰튜브 모델을 사용하여 상온에서 자유유동속도를 변화시키며 정온형 열선풍속계를 이용한 유속측정 및 가시화실험을 통하여 흰튜브의 와유출변화 요인을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 흰튜브의 스트로할 수 증·감은 흰튜브 상의 속도 증·감여부와 밀접한 관계가 있었다.

(2) 흰튜브 상의 속도분포는 자유유동속도와 흰 밀도가 증가할수록 흰 사이의 유체속도가 감소하고 경계층이 성장되어 완만한 기울기를 나타내었

다.

(3) 흰튜브 상의 속도기울기는 하류에서 유입류의 위치를 결정하는 중요한 인자이며 기울기가 완만할수록 유입류의 위치가 하류로 이동하였으며, 와유출주파수를 감소시켰다.

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) 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.
- (3) Griffin, O. M., 1995, "A Note on Bluff Body Vortex Formation," *J. Fluid Mech.*, Vol. 284, pp. 217~224.
- (4) 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.
- (5) Blevins, R. D., 1990, *Flow-Induced Vibration*, Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 77~81.
- (6) Simiu, E. and Scanlan, R. H., 1986, *Wind Effects on Structures*, John Wiley & Sons, New York, pp. 356~359.
- (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*, Vol. 25, No. 8, pp. 1077~1086.
- (8) Chang, P. K., 1979, *Separation of Flow*, Pochinchai Printing Co., Ltd., Korea, pp. 11~18.
- (9) Apelt, C. J. and West, G. S., 1982, "The Effects of Tunnel Blockage and Aspect Ratio on the Flow Past a Circular Cylinder with Reynolds Numbers between 10^4 and 10^5 ," *J. Fluid Mech.*, Vol. 114, pp. 361~377.