

톱니형 핀이 부착된 튜브의 와유출특성 연구

류병남* · 김경천** · 부정숙†
(2001년 1월 31일 접수, 2001년 6월 15일 심사완료)

Characteristics of Vortex Shedding behind a Circular Cylinder with Serrated Fins

Byong Nam Ryu, Kyung Chun Kim and Jung Sook Boo

Key Words: Equivalent Diameter(등가직경), Hydraulic Diameter(수력직경), Effective Diameter(유효직경), Strouhal Number(스트롤 수)

Abstract

An experimental study is performed to investigate the characteristics of vortex shedding behind a circular cylinder with serrated fins using hot-wire anemometer. Strouhal numbers which are calculated using outer diameter of a circular cylinder with serrated fins are higher than that of a circular cylinder. Fin thickness and pitch are closely related with vortex shedding frequency and play increasing or decreasing vortex shedding after transient Reynolds number. Strouhal numbers using effective diameters which are proposed in this paper agree with that of a circular cylinder. After transient Reynolds number, a trend of Strouhal number can be estimated by checking the ratio of effective diameter to inner diameter.

기호설명

- d_e : 유효직경(Effective diameter)
- d_h : 수력직경(Hydraulic diameter)
- d_i : 실린더 직경
- d_o, d : 핀튜브의 외경
- h : 핀 높이($h = (d_o - d_i)/2$)
- p : 핀 피치
- Re : Reynolds 수($Re = U_o d / \nu$)
- St : Strouhal 수($St = fd / U_o$)
- t : 핀 두께
- U_o : 자유흐름속도

1. 서론

유체가 뾰족한 물체(Bluff body)를 지날 때, 특정한 레이놀즈 수를 넘어서면서 박리가 발생하게 된다. 이러한 박리현상은 뾰족한 물체에 공기역학적인 힘을 발생시키는데 유동에 수직인 방향의 힘인 양력은 와유출주파수와 동일한 주파수로 진동하게 되고, 유동과 나란한 방향으로 작용하는 항력은 와유출주파수의 2배로 진동하게 된다.⁽¹⁾ 이런 상태에서 뾰족한 물체는 요동하중하에 있게 되고, 물체의 고유진동수부근에서는 요동하중의 진폭이 증폭되어 물체의 강도에 큰 영향을 주게 된다. 이러한 유동박리현상으로 인한 진동은 구조물을 설계하는 이들에게 더욱 관심있는 분야이며 점차 가볍고 탄력성있는 재료의 사용으로 중요성이 높아지고 있으며 다리나 건물같은 토목구조물에서 해저케이블, 송전선, 열교환기튜브 등에 이르기까지 그 응용분야는 다양하다.

주위환경에서 흔히 볼 수 있는 가장 일반적인

* 부산대학교 대학원 기계공학과
 ** 회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소
 † 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소
 E-mail : jsboo@hyowon.pusan.ac.kr
 TEL : (051)510-2302 FAX : (051)512-9835

형상인 원주, 삼각주, 사각주 등에 대한 유동박리 현상은 일찍부터 연구되었으며 그 응용분야 및 와유출제어방법도 상당히 다양하다. 와유출제어 방법에는 원형실린더 표면에 슬롯(Slot)⁽¹⁾을 설치하는 방법, 트립핑와이어(Tripping wire)를 실린더와 평행하게 설치⁽²⁾하거나 나선형으로 부착하는 방법, 다공판,⁽³⁾ 분할판(Splitter)⁽⁴⁾을 설치하는 방법 등이 있으며 주로 토목·건축분야에서 주위상황에 맞게 응용되어 와유출로 인한 진동 및 파손을 방지하게 된다.

이와같이 많은 분야에서 물체형상과 주변환경에 대한 와유출특성을 연구하여 이를 제어하려는 노력들은 지속되고 있다.

본 연구에서는 원주표면에 튜니모양의 핀을 나선형으로 조밀하게 부착시킨 열교환기용 튜브를 사용하여 다양한 레이놀즈 수 범위에서의 와유출 특성을 살펴보고자 한다. 이전의 연구들에서보다 표면에 부착된 핀의 높이가 높고, 조밀하게 설치되어 있으므로 이러한 형상에서 스트롤 수를 산출하기에 적절한 등가직경을 제시하고 이의 타당성을 검토하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에서 사용된 풍동은 폐회로 아음속 풍동(Closed-circuit subsonic wind tunnel)으로 전체길이는 36 m이며 유속은 0.5~60 m/s의 범위 내에서 적절하게 조절이 가능하다. 수축부의 길이는 1,600 mm, 수축비는 6.6:1이며, Fig. 1과 Fig. 2에 대략적인 형상을 나타내었다.

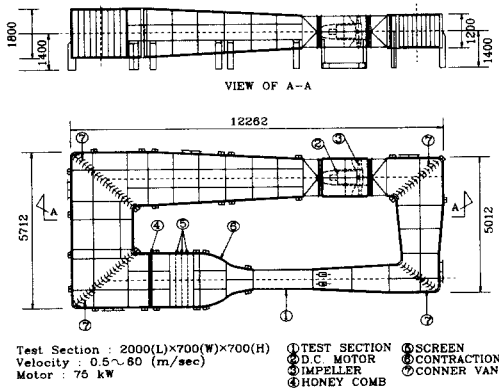


Fig. 1 Schematic diagram of wind tunnel

시험부의 크기는 2,000(l)× 700(h)× 700(w) mm 이고, 시험부에서의 흐름방향의 난류강도는 자유 유동속도가 6, 10 m/s에서 약 0.2 % 미만이며, 속도분포의 균일도는 경계층부분을 제외하고는 약 1.0~1.5 % 정도로 나타났다.

본 실험에 사용된 모델은 주로 열교환기에 사용되는 관으로 열전달 효율을 높이기 위하여 튜니모양의 핀을 원형파이프 주위에 나선형으로 부착시킨 것이며 이의 형상과 치수를 Fig. 3과 Table 1에 나타내었다.

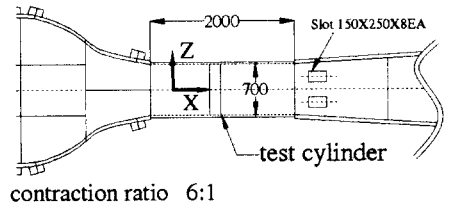


Fig. 2 Schematic diagram of test section

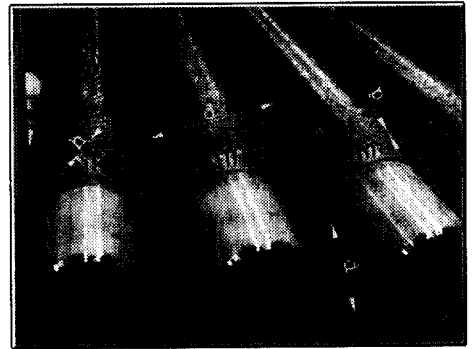


Fig. 3 Configuration of the model

Table 1 Geometry of models [mm]

Model	d_i	d_o	h	t	p	Remark
0	51	51	-	-	-	bare tube
1	51	75	12	1.0	8.475	
2	51	75	12	1.0	4.049	
3	51	85	17	1.0	6.757	
4	51	87	18	1.2	6.757	
5	51	87	18	1.2	5.618	
6	51	87	18	1.2	4.808	
7	51	87	18	1.2	4.049	
8	51	93	21	1.3	5.618	
9	51	93	21	1.3	4.049	

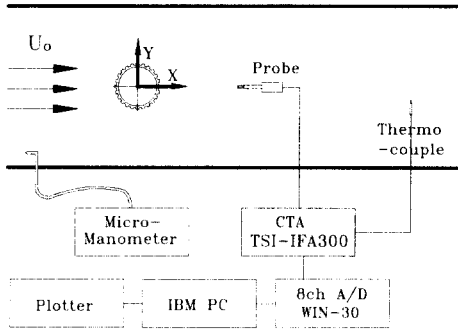


Fig. 4 Measuring and data processing system

총 10개의 모델이 사용되어졌고, 모델은 직경 51 mm의 일반 파이프(Model #0, 이하 베어튜브)에 12~21 mm 높이의 핀이 부착되어 있으며 모델의 외경은 75~93 mm까지 4가지가 사용되었다. 모델은 시험부 입구에서 860 mm 지점에 설치하였고, 모델외경을 기준으로 한 폐쇄비는 모델에 따라 7.3~13.3 %이었다.

자유흐름속도를 변화시키면서 와유출특성을 살펴보았으며 주파수측정에는 정온형 열선풍속계(TSI, model IFA300)와 X형 열선(Kanomax, model 0252R-T5)이 사용되었다. 열선의 교정은 Look-up table 기법을 이용하였고, 데이터의 추출 간격은 100 μ s(10kHz), 측정점당 4,096개씩 10회의 앙상블을 취하였다. Fig. 4에 본 실험의 측정시스템 개략도를 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 5는 자유흐름속도 U_0 가 6.0 m/s, 튜브 중심으로부터 $X/d=5.0$, $Y/d=\pm 3.0$ 에서 $0.2d$ 씩 이송하면서 측정된 와유출주파수(거의 일정한 값을 보임)를 평균하여, 각 모델별 와유출 주파수와 핀튜브의 외경(d_o)을 기준으로한 스트로울 수를 나타낸 것이다. 핀이 없는 매끈한 원주인 베어튜브(Bare tube, Model #0, $d_o=51$ mm)의 경우 스트로울 수는 0.207이었고, 핀튜브의 경우 외경이 증가할수록 와유출 주파수는 감소하여 스트로울 수는 0.265~0.283의 분포를 나타내었다. 이는 매끈한 원주에 비해 25~35 % 높은 수치로 좀 더 정확한 와유출특성을 파악하기 위하여 튜브의 중심으로부터 $X/d=6.0$, $Y/d=0.0$ 지점에서 자유흐름속도 U_0 를

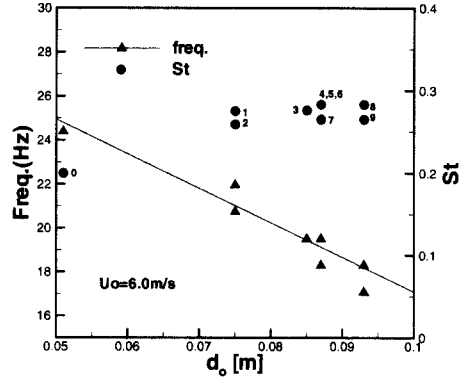


Fig. 5 Vortex shedding frequency and Strouhal number of various models

1.4~36.0 m/s 범위에서 변화시키면서 와유출특성을 살펴보았다. 이때의 튜브의 외경(d 또는 d_o)을 기준으로한 레이놀즈 수 범위는 모델마다 다르게 되며 최소 및 최대치는 약 5,000~220,000이었다. 이렇게 얻어진 스펙트럼분석(v -속도성분에 대하여)중에서 베어튜브(Model #0)와 핀튜브(Model #2)의 경우를 Fig. 6에 나타내었다. 총 11가지 속도의 주파수분석에서 뚜렷한 와유출을 관찰할 수 있다. 본 실험에서는 데이터 추출간격이 100 μ s로 주파수분석을 할 때, 분석간격이 2.4 Hz였다. 따라서 저주파구간에서는 신뢰도가 떨어지게 되므로 이 두 구간의 데이터를 분석에서 제외시켰다. 저속부 두 지점(Fig. 6(a)경우 1.4 m/s, 2.6 m/s, (b)의 경우 1.3 m/s, 2.8m/s)에서는 와유출주파수가 대략 10 Hz 이하였다.

Fig. 7은 각 모델에서 자유흐름속도에 대한 와유출 주파수와 외경을 기준으로한 스트로울 수를 나타낸 것이다. Fig. 7(a) 베어튜브의 경우 스트로울 수가 약 0.2로 자유유동속도가 증가하여도 거의 일정한 값을 유지하였다. 이때 외경을 기준으로한 레이놀즈 수 범위는 약 16,000~121,000이었다. (c)의 핀튜브(Model #3)의 경우도 베어튜브의 경우처럼 자유흐름속도가 증가하여도 스트로울 수가 일정하게 유지되었으며 약 0.3의 값을 나타내어 베어튜브에 비해 50 % 높음을 알 수 있다. Fig. 7(b), (d)의 핀튜브의 스트로울 수 분포에서도 베어튜브의 스트로울 수 0.2보다 높게 나타남을 볼 수 있는데, 핀튜브와 같이 핀 사이의 빈공간이 존재하는 경우에 있어서는 외경을 기준으로하여

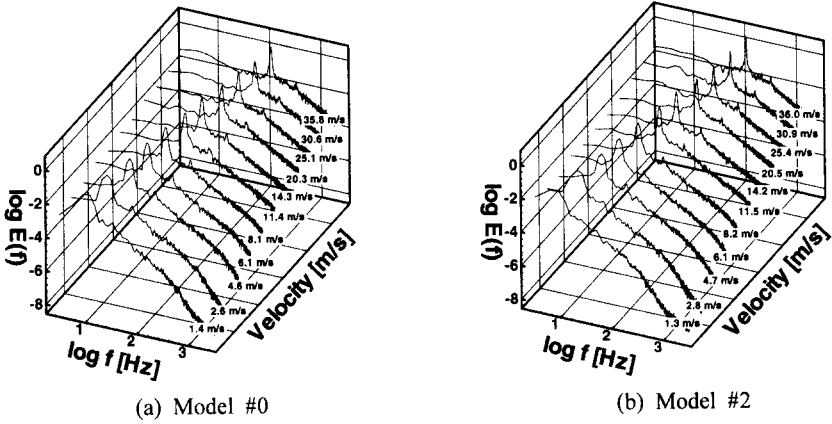


Fig. 6 Power spectrum of lateral velocity at various freestream velocities at $X/d=6.0$ and $Y/d=0.0$

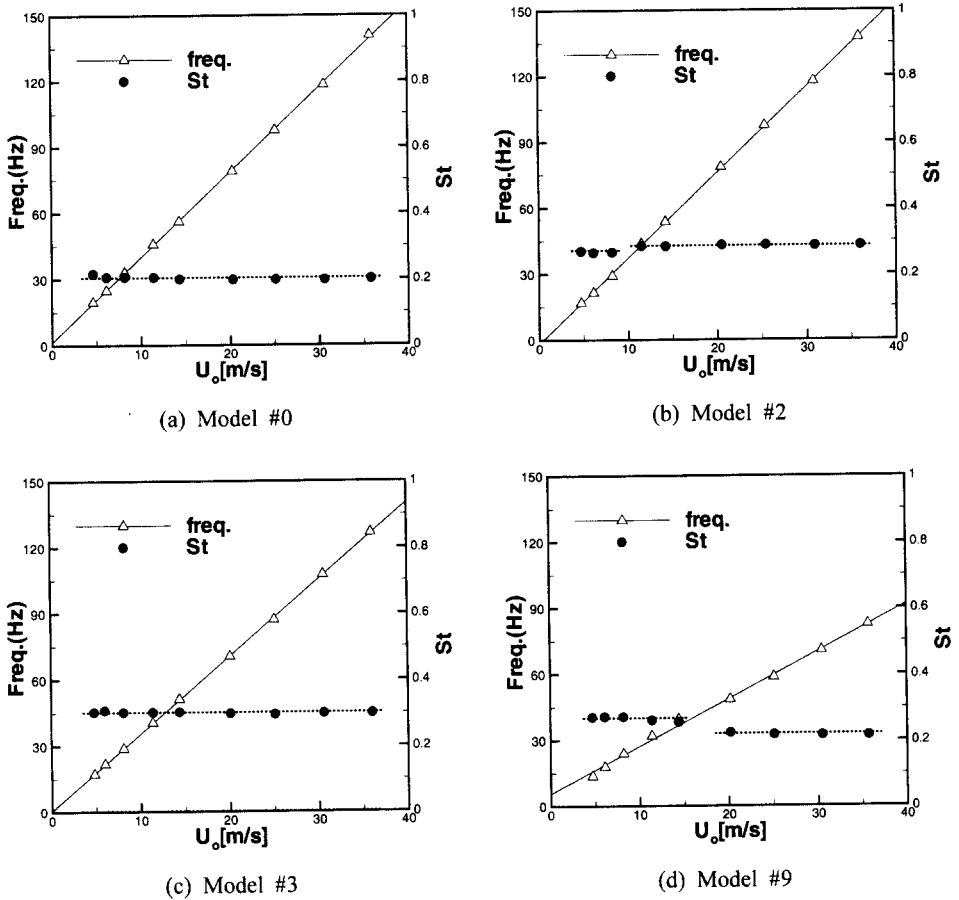


Fig. 7 Strouhal number and vortex shedding frequency for various freestream velocities at $X/d=6.0$

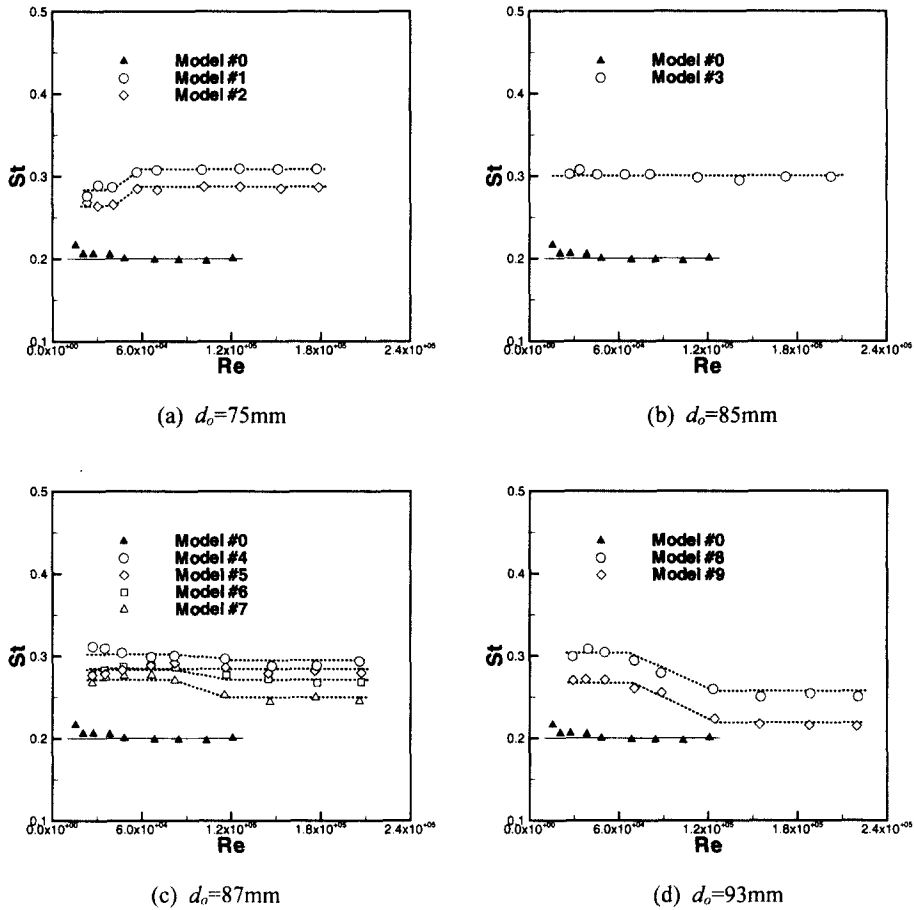


Fig. 8 Strouhal number of various models with outer diameter, d_o

스트롤 수를 산출하는 방식에 한계가 있다고 생각할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 결과에 주목하여 베어튜브와 핀튜브간의 레이놀즈 수 변화에 따른 와유출특성을 비교하고, 핀튜브의 스트롤 수를 계산하는데 적절한 동가직경(Equivalent diameter)을 산출하려고 하였다.

핀튜브의 외경을 기준으로 한 스트롤 수가 베어튜브의 값보다 높게 나타난 경우중에서 Fig. 7의 (b)와 (d)의 경우를 살펴보면, 특정속도이상에서 스트롤 수가 급격히 변하는 것을 볼 수 있는데, Fig. 7(d) 경우 대략 15~20 m/s 구간을 지나면서 스트롤 수가 0.27에서 0.22로 낮아졌으며, (b)의 경우는 10 m/s 부근에서 스트롤 수가 0.265에서 0.285 정도로 증가하였다. Fig. 7의 (b)~(d)

의 결과로 미루어볼 때 핀의 형상과 배열에 따라 이러한 특정속도구간에서 와유출특성이 변화하는 것으로 추측된다.

핀간의 간격, 높이 등이 핀 사이를 흐르는 유체에 어떤 영향을 주어 이 유체와 외부유체와의 상호작용으로 와유출 메커니즘을 변화시키는 것으로 생각된다. 핀 사이의 간격이 좁을수록, 높이가 높을수록 핀표면과 유체 사이의 마찰력은 더욱 커져 유체감속이 커질 것이고, 경계층 두께의 증가로 이어질 것이다.

이러한 영향을 좀 더 자세히 살펴보기 위하여 같은 외경을 가진 핀튜브들간의 핀의 피치에 대한 영향을 살펴보았다. Fig. 8은 외경을 기준으로 한 레이놀즈 수에 대한 스트롤 수 분포를 나타낸

것이다. Fig. 8(c)의 경우는 외경 $d_o=87$ mm이고 핀피치가 다른 4가지의 모델에 대한 스트롤 수 분포를 나타낸 것이다. 핀의 피치가 감소할수록 (단위길이당 핀의 개수가 증가할수록) 스트롤 수가 감소하는 경향을 보이고 있으며, 이러한 경향은 Fig. 8의 (a)와 (d)의 경우에서도 확인할 수 있다. 따라서 같은 외경의 핀튜브에서는 피치가 감소(핀밀도증가)할수록 스트롤 수가 감소하는데 이는 핀 사이를 흐르는 유체가 감속되어 와유출을 감소시키는 것으로 생각된다. Fig. 8(c)에서 핀의 피치가 감소하여 208 개/m이상의 모델(Model #6, #7)의 경우 레이놀즈수가 $0.9 \sim 1.0 \times 10^5$ 이상에서 스트롤 수가 감소하는 것을 볼 수 있다. Fig. 8의 (d)에서도 비슷한 경향을 보이지만 (a)의 경우에는 레이놀즈 수 5.0×10^4 부근에서 스트롤 수가 오히려 증가되는 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 8(b)의 경우는 레이놀즈 수 변화에도 스트롤 수는 큰 변화가 없는 경우로 이미 Fig. 7의 (c)에서 언급되었다.

핀튜브의 외경은 핀의 높이에 의해 결정되므로 단순히 핀튜브의 외경만으로 원주의 경우처럼 레이놀즈 수 및 스트롤 수 계산에 사용되는 것은 한계가 있으며 이에 대한 새로운 등가직경이 필요하다.

이상의 결과들에서 핀의 피치, 높이 등이 특정 레이놀즈 수 이후에 스트롤 수의 증감과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었는데 이러한 영향을 파악하기 위하여 핀 사이의 속도를 측정하였다. I형 열선(TSI, model 1210-20)을 이용하여 자유유동속도를 $5.0 \sim 30.0$ m/s 범위에서 변화시키면서 두 핀 사이의 중간지점($X/d=0.0$, $Y=d+h/2$)에서의 속도를 측정하였다. 핀피치의 제약으로 비교적 피치가 큰 5개의 모델(Model 1~5)만 측정할 수 있었다. I형 열선을 사용하였기에 측정지점의 속도크기만 알 수 있지만 자유유동속도 변화에 대한 핀 사이의 속도변화를 관찰할 수 있었다.

Fig. 9에 이 결과를 나타내었는데 모델 1과 2의 경우, 대략 12.0 m/s 부근까지 자유유동속도를 증가시킬수록 속도비가 증가함을 나타내고 있으며 $U_o > 12.0$ m/s의 구간에서는 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 반면 이 보다 핀높이가 높고 피치가 작은 모델 3~5의 경우는 자유유동속도가 증가할수록 속도비가 완만히 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 유량이 증가할수록 핀사이에서 마

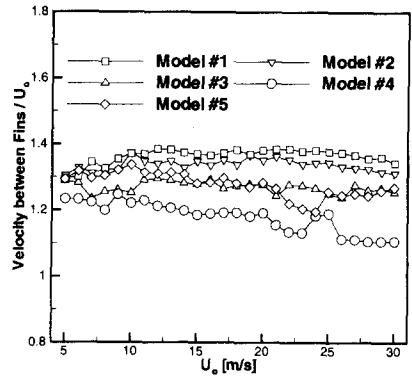


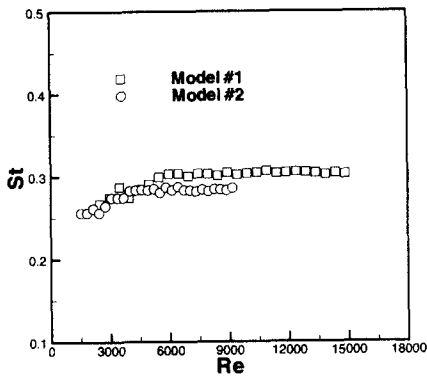
Fig. 9 Comparison of velocity between fins

찰로 인한 압력손실이 증가하기 때문이다. 핀 사이에서 측정된 속도값을 이용하여 와유출특성을 살펴보았으며 분석된 와유출주파수는 하류($X/d=6.0$, $Y/d=0.0$)에서 측정된 값과 거의 일치하였다. 핀이 베어튜브에 부착된 형상을 작은 덕트로 간주하여 핀간의 간격을 기준으로 레이놀즈 수를 산출하고 이에 해당하는 스트롤 수(외경기준)를 Fig. 10에 나타내었다.

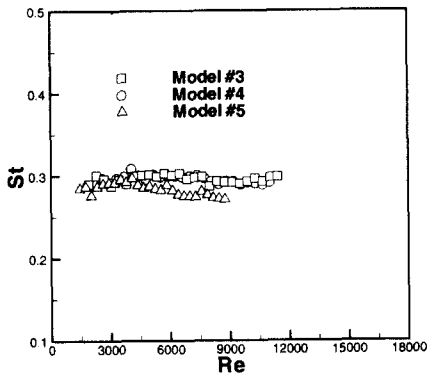
일반덕트유동의 경우 레이놀즈 수가 2,000~4,000범위에서 층류에서 난류로의 천이를 일으키는데 Fig. 10(a)의 결과로 볼 때, 본 연구의 한쪽 면이 개방된 핀튜브의 경우에는 레이놀즈 수 2,000~6,000범위에서 천이가 발생하는 것으로 생각된다. Fig. 10(b)의 경우에는 레이놀즈 수의 증가에 대해 거의 일정(Model 3, 4)한 스트롤 수를 가지거나 약간 감소하는 경향(Model 5)을 나타내고 있다.

Igarashi⁽²⁾는 원주에 부착된 트리핑와이어의 직경과 위치, 레이놀즈 수에 따른 스트롤 수와 항력변화를 관찰하였다. 레이놀즈 수를 증가시키면 스트롤 수가 증가하는 천이구간이 나타나고 이후 일정한 스트롤 수를 유지하는 경우와 천이구간 없이 일정한 스트롤 수를 유지하는 경우 등에 대하여 항력과 연관지어 일반원주의 경우와 비교하고 있다. 일반원주의 경우에 비해 스트롤 수 증가는 항력감소와 스트롤 수 감소는 항력증가와 연관짓고 있다.

이러한 선형연구와 Fig. 9, 10에서 살펴볼 때, 핀 사이를 통과하는 유체는 핀높이가 작고 피치가 클수록 난류로의 천이가 활발해져 유속을 증



(a)



(b)

Fig. 10 Strouhal number of various models

가시적이고 이로 인해 스트롤 수가 증가하는 것으로 생각된다. 그리고 핀높이가 높고 핀피치가 작을 수록 핀 사이를 통과하는 유체의 압력손실의 증가가 유속을 감소시키고 와유출의 지연(스트롤 수 감소)을 유발시키는 것으로 생각된다. 이 두 구간의 중간영역이 스트롤 수가 일정한 모델 (Model 3, 4, 5)의 경우이다. 이상에서 핀튜브의 스트롤 수는 레이놀즈 수가 증가할 경우(천이영역의 전후구간 비교에서), 핀의 크기와 배열(피치)에 따라 와유출이 촉진 또는 감소하는 것을 알 수 있었고 외경을 특성치로 한 핀튜브의 스트롤 수는 베어튜브보다 항상 높은 것을 알 수 있었다. 여기서 적절한 등가직경(Equivalent diameter)을 제시하여 핀이 없는 베어튜브와 적절하게 스트롤 수를 비교할 수 있도록 수력직경

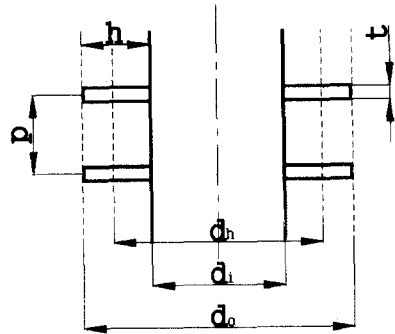


Fig. 11 Concept of hydraulic diameter

(Hydraulic diameter), d_h 와 유효직경(Effective diameter), d_e 를 제시한다.

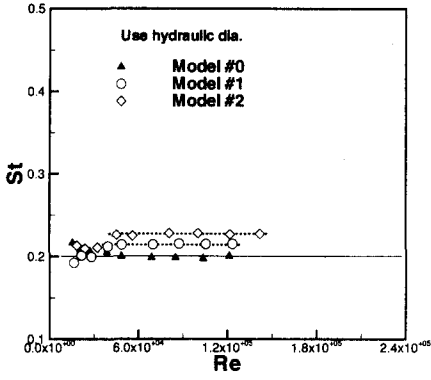
· 수력직경(Hydraulic diameter), d_h :

$$d_h = d_o - 2 \times \left(\frac{4 \times (p - t) \times h}{p - t + 2 \times h} \right) \quad (1)$$

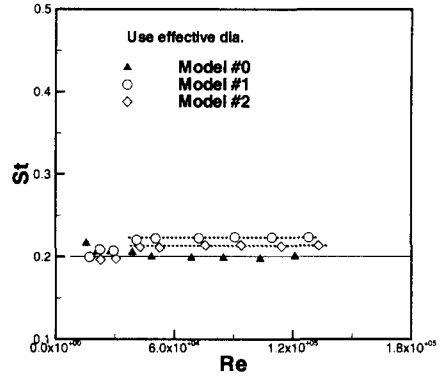
· 유효직경(Effective diameter), d_e : 핀을 포함한 핀튜브의 체적과 같은체적을 가진 원봉의 외경.

여기서 d_h 는 비원형덕트의 수력반경을 산출하는 방식과 같은 방법을 사용하였다. 본 모델에서 핀이 X축과 이루는 경사각은 대략 2.3~4.7° 이고 3차원의 형상을 가지지만, 본 연구에서 적절한 등가직경을 찾고자하는 시도로 핀 사이 유동에서 접촉면적의 영향을 고려하기위해 여러 영향을 간략화하여 수력직경의 개념을 도입한 것이다. Fig. 11에서 알 수 있듯이 핀 사이의 공간은 한쪽면이 개방된 사각덕트로 간주하여 얻어진 수력직경(식 (1)의 오른쪽 2번째 항)을 외경 d_o 에서 감해줌으로써 구할 수 있었다. Table 2에 유효직경(d_e)과 수력직경(d_h)을 나타내었다. 피치와 핀높이에 따라 d_h 는 외경의 69.6~88.9 %의 값이었고, d_e 는 67.2~74.4 % 정도로 d_h 보다 작았다.

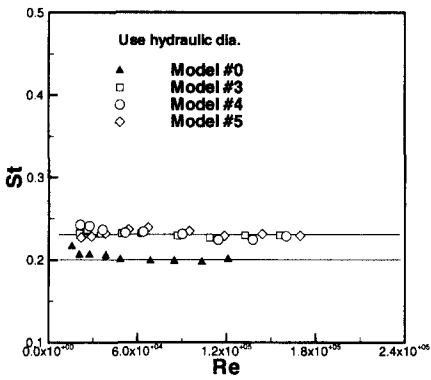
Fig. 12에는 이렇게 정의된 등가직경중 d_h 를 이용하여 레이놀즈 수와 스트롤 수를 계산하여 나타내었다. 전체적으로 d_h 는 외경에 비해 작으므로 Fig. 8의 경우에 비해 스트롤 수가 감소하였다. 핀튜브 3, 4, 5 모델의 스트롤 수를 Fig. 12 (b)에 나타내었다. 세 개 모델의 스트롤 수가 0.23 정도로 거의 일정하여 핀튜브간에는 여기서 정의된



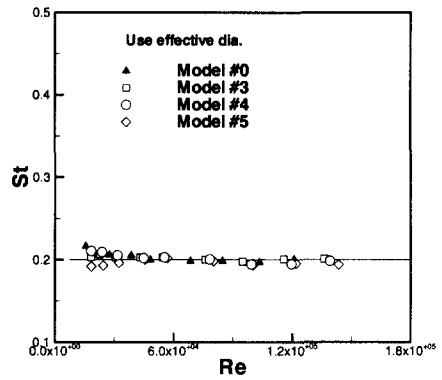
(a)



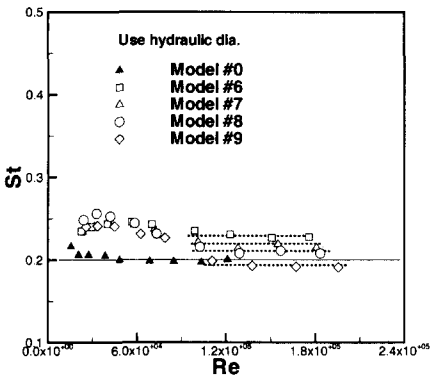
(a)



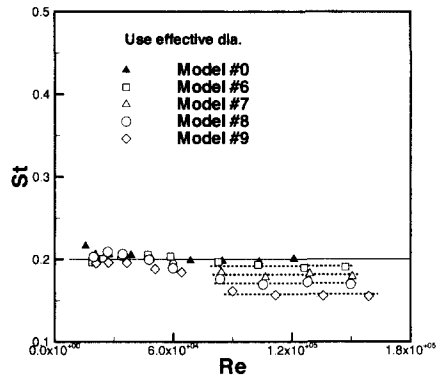
(b)



(b)



(c)



(c)

Fig. 12 Strouhal number of various models with hydraulic diameter, d_h

Fig. 13 Strouhal number of various models with effective diameter, d_e

Table 2 Equivalent diameters and ratio of equivalent diameter and inner diameter

Model	d_e [mm]	d_h [mm]	$\frac{d_e - d_i}{d_i}$ [%]	$\frac{d_h - d_i}{d_i}$ [%]	Sr Mode after Transition
1	54.2	52.2	6.27	2.35	Increase
2	55.8	59.5	9.41	16.69	
3	57.1	65.3	11.96	28.06	Constant
4	58.8	67.7	15.29	32.82	
5	60.3	71.3	18.24	39.73	
6	61.8	73.9	21.18	44.86	Decrease
7	63.6	76.4	24.71	49.88	
8	63.1	77.3	23.73	51.65	
9	67.2	82.7	31.76	62.12	

d_h 가 등가직경 설정방식으로 어느 정도 타당함을 알 수 있으나, 일반원주와는 0.03정도 차이를 보이고 있다. (a)~(c)에서 천이이전의 스트롤 수를 비교해 보면 0.05정도의 차이가 발생함을 알 수 있다.

Fig. 13에는 등가직경 d_e 를 이용하여 계산한 레이놀즈 수와 스트롤 수를 나타낸 것이다. 전체적으로 d_h 의 경우처럼 Fig. 8에 비해 스트롤 수가 많이 감소하였으며 천이구간이전의 스트롤 수는 일반원주(베어튜브, Model #0)의 값과 거의 유사한 분포를 나타내었다. 이는 흥미있는 결과로 생각되며 일반원주와 스트롤 수 비교시 유효직경, d_e 가 핀튜브와 같은 형상을 가진 물체의 스트롤 수 산출에 적절할 수 있음을 나타낸 것이라고 생각된다. 모델 3, 4, 5를 Fig. 13 (b)에서와 같이 비교한 결과 레이놀즈 수가 증가할 경우에도 스트롤 수 분포가 거의 베어튜브의 경우와 거의 일치하였다. Fig. 13 (c)의 경우는 천이구간이후에 베어튜브의 경우보다 스트롤 수가 감소하는 모델들을 나타내었다. 앞에서 언급된 것처럼 천이구간 이후의 스트롤 수는 핀높이가 갈수록, 핀피치가 감소할수록 와유출이 감소하였으며, 천이구간 이후 스트롤 수가 증가하는 (a)의 경우에서도 확인할 수 있다.

이상에서 핀튜브의 등가직경으로 제안된 수력 직경, d_h 와 유효직경, d_e 를 이용하여 핀튜브간의 스트롤 수 계산하여 베어튜브의 경우와 비교하여 보았으며 유효직경, d_e 는 일반원주와의 스트롤 수

비교시에 적절하게 사용될 수 있는 등가직경으로 생각된다.

천이구간이후의 와유출 증감등을 평가하기 위하여 Table 2와 같이 등가직경과 내부직경 d_i 의 비를 나타내었다. Table 2의 $\frac{d_e - d_i}{d_i}$, $\frac{d_h - d_i}{d_i}$ 은 표면거칠기를 표시하는 한 방법으로 이 수치를 살펴본 결과, $\frac{d_e - d_i}{d_i}$ 값이 ~10 %까지는 천이구간 이후의 와유출증가, 대략 20 %이상은 와유출감소가 나타났고 그 중간영역은 일정구간으로 생각할 수 있다. d_h 의 값은 대부분 d_e 값보다 크므로 $\frac{d_h - d_i}{d_i}$ 의 값은 $\frac{d_e - d_i}{d_i}$ 값보다 높게 나타났다.

이렇게 제시된 $\frac{d_e - d_i}{d_i}$, $\frac{d_h - d_i}{d_i}$ 값들을 이용하면 핀튜브의 천이구간이후의 와유출 증감을 판별할 수 있을 것으로 생각된다. 만약 핀튜브의 핀의 크기가 아주 미세하여 $d_e \approx d_i$ 가 될 경우는 $\frac{d_e - d_i}{d_i} \approx 0$ 이 되어 베어튜브(Model 0)의 경우에 접근하게 되는데, 모델 0의 스트롤 수는 본 실험구간에서 일정하게 유지되므로 천이구간 이후 와유출이 증가되는 $\frac{d_e - d_i}{d_i}$ 값의 하한치도 있을 것으로 생각된다.

4. 결론

이상과 같이 9가지의 핀튜브 모델을 이용하여 자유흐름속도를 변화시키면서 정온형 열선풍속계를 사용하여 측정된 와유출특성을 살펴보고, 두 개의 등가직경을 제시하여 비교 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 핀튜브의 핀높이, 핀피치는 와유출의 촉진 및 감소와 밀접한 관계가 있다.
- (2) 본 연구에서 제시된 유효직경(d_e)은 핀튜브와 일반원주의 스트롤 수를 비교하는데 적절한 것으로 생각된다.
- (3) 유효직경, d_e 에서 산출된 $\frac{d_e - d_i}{d_i}$ 값을 이용하여 천이구간 이후의 스트롤 수 증감여부를 판 가름 할 수 있다.

참고문헌

- (1) Robert, D. Blevins, 1990, Flow-Induced Vibration, 2nd edition.
- (2) Tamotsu Igarashi, 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.
- (3) Emil Simiu and Robert, H. Scanlan, 1986, Wind Effects on Structures, 2nd edition.
- (4) Nakamura, Y., 1996, "Vortex Shedding from Bluff Bodies and a Universal Strouhal Number," *Journal of Fluids and Structures*, 10, pp. 159~171.