

Serrated Fin이 부착된 튜브의 와류출 특성 연구

류병남* · 김경천** · 부정숙***

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 numbers. 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.

1. 서론

주위환경에서 흔히 볼 수 있는 가장 일반적인 형상인 원주, 삼각주, 사각주 등에 대한 유동박리 현상은 일찍부터 연구되었으며 그 응용분야 및 와류출제어방법도 다양하다. 와류출제어방법에는 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 방법등이 있으며 주로 토목·건축분야에서 주위상황에 맞게 응용되어 와류출로 인한 진동 및 파손을 방지하게 된다. 유동박리현상으로 인한 진동은 구조물을 설계하는 이들에게 더욱 관심있는 분야이고 점차

가볍고 탄력성있는 재료의 사용으로 중요성이 높아지고 있으며 다리나 건물같은 토목구조물에서 해저케이블, 송전선, 열교환기튜브 등에 이르기까지 그 응용분야는 다양하다.

본 연구에서는 원주표면에 튕니모양의 핀을 나선형으로 조밀하게 부착시킨 열교환기용 튜브를 사용하여 다양한 레이놀즈 수 범위에서의 와류출 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 풍동으로 전체길이는 36,000mm이며 유속은 0.5~60m/s의 범위 내에서 적절하게 조절이 가능하고 수축부의 길이는 1,600mm, 수축비는 6.6:1이다. 시험부의 크기는 2,000(l)× 700(h)× 700(w)mm이고, 시험부에서의 흐름방향의 난류강도는 약 0.2%미

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

만이며, 자유흐름속도가 6.0, 10.0m/s에서 속도분포의 균일도는 경계층부분을 제외하고는 약 1.0~1.5% 정도이었다.

본 실험에 사용된 모델은 주로 열교환기에 사용되는 관으로 열전달 효율을 높이기 위하여 튼니모양의 핀을 원형파이프 주위에 나선형으로 부착시킨 것이며 이의 형상과 치수를 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다. 총 10개의 모델이 사용되어졌고, 모델은 직경 51mm의 일반 파이프(Model #0, 이하 베어튜브)에 12~21mm의 높이의 핀이 부착되어 있으며 모델의 외경은 75~93mm까지 4가지가 사용되었다. 모델은 시험부 입구에서 860mm 지점에 설치하였고, 모델외경을 기준으로 한 폐쇄비는 모델에 따라 7.5~13.7%이었다.

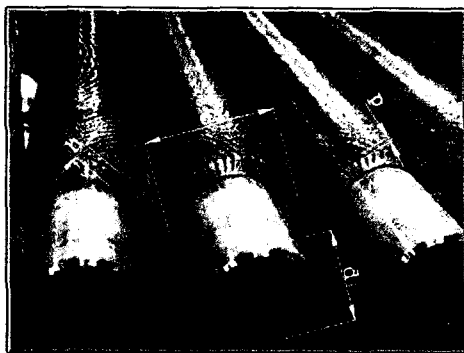


Fig. 1 Configuration of the model

Table 1 Geometry of models [mm]

Model	d_i	d_o	h	t	[Numbers/m]	Remark
0	51	51	0	0	0	bare tube
1	51	75	12	1.0	118	
2	51	75	12	1.0	178	
3	51	85	17	1.0	148	
4	51	87	18	1.2	148	
5	51	87	18	1.2	178	
6	51	87	18	1.2	208	
7	51	87	18	1.2	247	
8	51	93	21	1.3	178	
9	51	93	21	1.3	247	

자유흐름속도, U_0 는 5.0~30.0m/s 범위에서 변화시키면서 와유출특성을 살펴보고, 이때의 관 외경(d 또는 d_o)을 기준으로한 레이놀즈 수 범위는 모델마다 다르게 되며 최소 및 최대치는 각각 약 17,000, 185,000이었다. 주파수측정에는 정온형 열선풍속계(TSI, model IFA300)와 X형 열선

(Kanomax, model 0252R-T5)이 사용되었으며 측정 위치는 핀튜브의 중심에서 $X/d=5.0$, $Y/d=0.0$ 이었다. 열선의 교정은 look-up table 기법을 이용하였고, 데이터의 추출간격은 500 μ s(2kHz), 측정점당 4,096개씩 10회의 앙상블을 취하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 자유흐름속도 U_0 가 6.0m/s일 경우 각 모델의 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 자세한 와유출특성을 파악하기 위하여 자유흐름속도 U_0 를 5.0~30.0m/s 범위에서 변화시키면서 와유출특성을 살펴보았다.

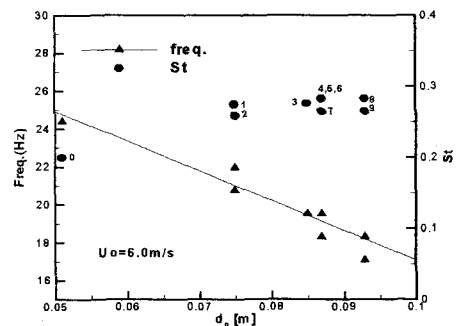


Fig. 2 Vortex shedding frequency and Strouhal number of various models

Fig. 3은 각 모델에 대해 자유흐름속도에 대한 와유출 주파수와 외경을 기준으로한 스트로울 수를 나타낸 것이다. Fig. 3(a) 베어튜브의 경우 스트로울 수가 약 0.2로 자유유동속도가 증가하여도 거의 일정한 값을 유지하였다. (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. 3(b), (d)의 핀튜브의 스트로울 수 분포에서도 베어튜브의 스트로울 수 0.2보다 높게 나타남을 볼 수 있는데, 이는 핀이 와유출을 촉진시키는 역할을 하거나, 핀튜브와 같이 핀 사이의 빈공간이 존재하는 경우에 있어서는 외경

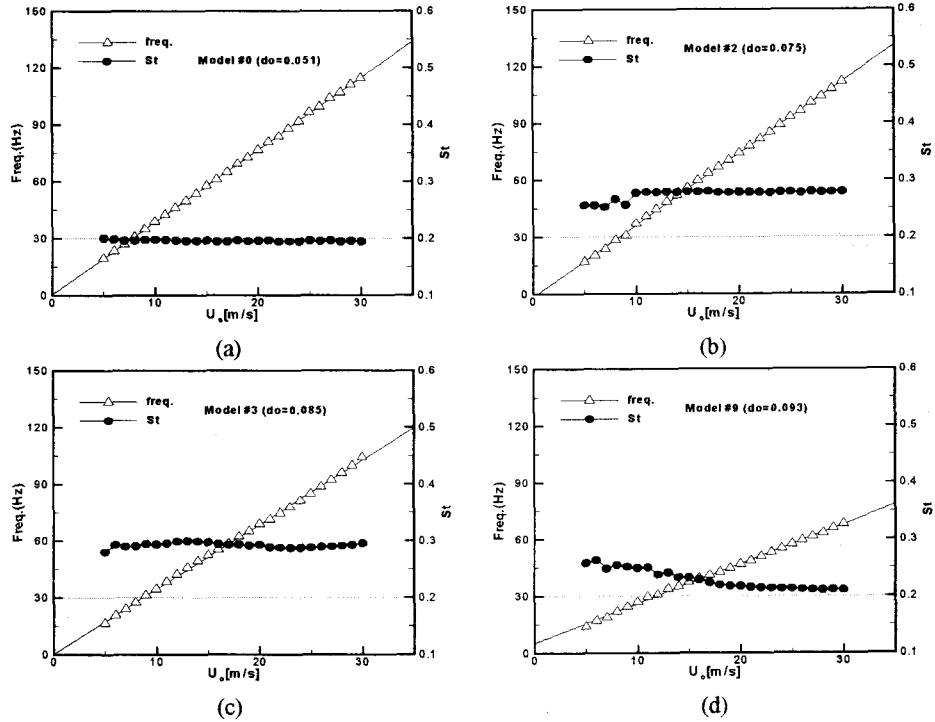


Fig. 3 Strouhal number and vortex shedding frequency at various freestream velocities at $X/d=5.0$ and $Y/d=0.0$

을 기준으로하여 스트로울 수를 산출하는 방식에 한계가 있다고 생각할 수 있다. 핀튜브의 외경을 기준으로 한 스트로울 수가 배어튜브의 값보다 높게 나타난 경우 중에서 Fig. 3의 (b)와 (d)의 경우를 살펴보면, 특정속도이상에서 스트로울 수가 급격히 변하는 것을 볼 수 있는데, Fig. 3(d) 경우 대략 $10\sim 20\text{m/s}$ 구간을 지나면서 스트로울 수가 0.25에서 0.22 정도로 낮아졌으며, (b)의 경우는 $7.0\sim 10.0\text{m/s}$ 부근에서 스트로울 수가 0.26에서 0.28 정도로 증가하였다. 이러한 결과로 미뤄볼 때 핀의 형상과 배열에 따라 이러한 특정속도구간에서 와유출특성이 변화하는 것으로 추측된다.

좀 더 자세한 고찰을 위하여 같은 외경을 가진 핀튜브들간의 핀의 피치에 대한 영향을 살펴보았다. Fig. 4는 외경을 기준으로한 레이놀즈 수에 대한 스트로울 수 분포를 나타낸 것이다. Fig. 4(c)의 경우는 외경 $d_o=87\text{mm}$ 이고 핀피치가 다른 4가지의 모델에 대한 스트로울 수 분포를 나타낸 것이다. 핀의 피치가 감소할수록(단위길이당 핀의 개수가 증가할수록) 스트로울 수가 감소하는 경향을 보이고 있으며, 이러한 경향은 Fig. 4의 (a)와 (d)

의 경우에서도 확인할 수 있다. 같은 외경의 핀튜브에서는 피치가 감소(핀밀도증가)할수록 핀 사이를 흐르는 유체가 더욱 감속되어 와유출 감소에 관여하는 것으로 생각된다. Fig. 4(c)에서 핀의 피치가 감소하여 247개/m 의 모델(Model #7)의 경우 레이놀즈수가 $0.9\sim 1.0\times 10^5$ 이상에서 스트로울 수가 감소하는 것을 볼 수 있다. Fig. 4의 (d)에서도 비슷한 경향을 보이지만 (a)의 경우에는 레이놀즈 수 5.0×10^4 부근에서 스트로울 수가 오히려 증가되는 것을 알 수 있다.

이상의 결과로 판단할 때, 핀의 피치, 높이등이 특정 레이놀즈 수 이후에 와유출을 촉진 또는 감소시키는 것과 밀접한 관계가 있고, 외경을 특성치로한 핀튜브의 스트로울 수는 배어튜브보다 항상 높은 것을 알 수 있었다. 여기서 적절한 등가직경(Equivalent diameter)을 제시하여 핀이 없는 배어튜브와 적절하게 스트로울 수를 비교할 수 있도록 수력직경(Hydraulic diameter), d_h 와 유효직경(Effective diameter), d_e 를 제시한다.

· 수력직경(Hydraulic diameter), d_h :

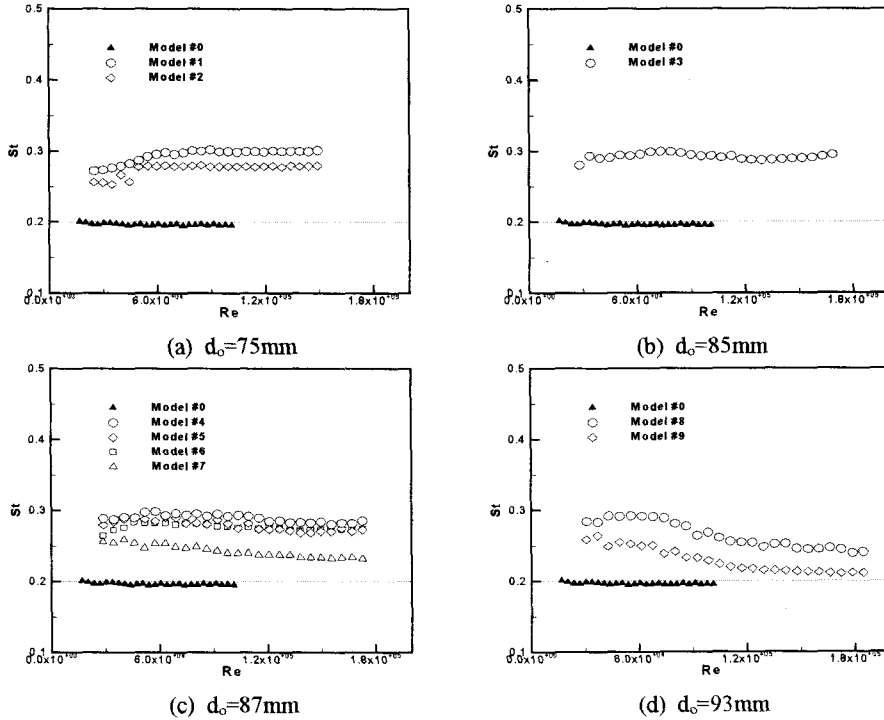


Fig. 4 Strouhal number of various models with outer diameter, d_o

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

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

여기서 d_h 는 비원형덕트의 수력반경을 산출하는 방식과 같은 방법을 사용하였고, Fig. 5에서 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.

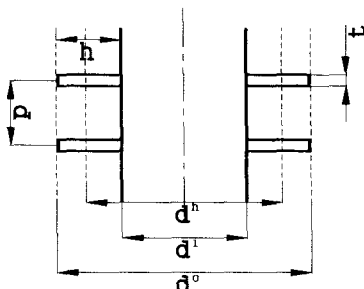


Fig. 5 Concept of hydraulic diameter

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.

Table 2 Equivalent diameters [mm]

Model	d_o	Effective dia. d_e	Hydraulic dia. d_h	Remark
0	51	-	-	bare tube
1	75	54.2	52.2	
2	75	55.8	59.5	
3	85	57.1	65.3	
4	87	58.8	67.7	
5	87	60.3	71.3	
6	87	61.8	73.9	
7	87	63.6	76.4	
8	93	63.1	77.3	
9	93	67.2	82.7	

Fig. 6에는 이렇게 정의된 등가직경중 d_h 를 이용하여 레이놀즈 수와 스트로울 수를 계산하여 나타내었다. 전체적으로 d_h 는 외경에 비해 작으므로 Fig. 4의 경우에 비해 스트로울 수가 감소하였다. Fig. 6(b)에서 네 개모델의 스트로울 수가 0.23 정도로 거의 일정하여 여기서 정의된 d_h 가 핀튜브

간의 등가직경 설정방식으로 어느정도 타당함을 알 수 있다. Fig. 6(a), (c)의 경우에서도 모델별 천이 이전의 스트롤 수간의 차이는 상당히 좁혀진 것을 볼 수 있다.

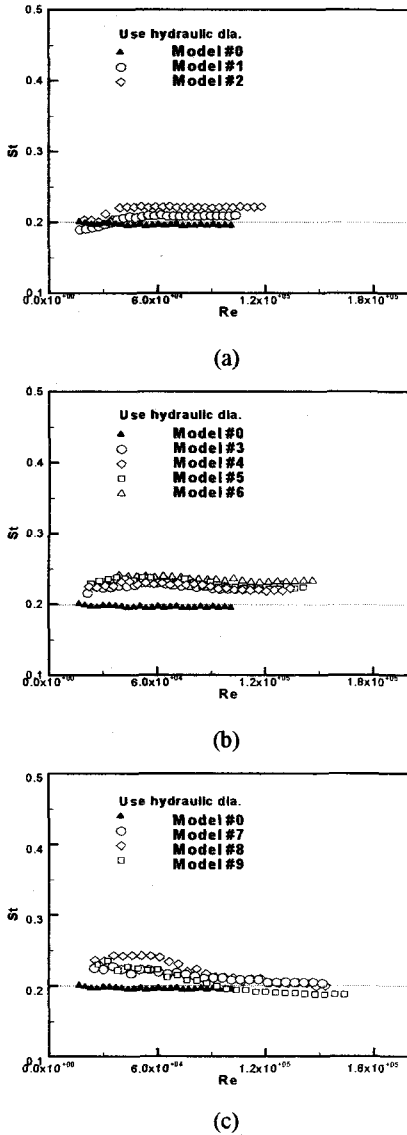


Fig. 6 Strouhal number of various models with hydraulic diameter, d_h

Fig. 7에는 등가직경 d_e 를 이용하여 레이놀즈 수에 대한 스트롤 수를 나타내었다. 전체적으로 d_h 의 경우처럼 Fig. 4에 비해 스트롤 수가 많이 감소하였으며 천이구역이전의 스트롤 수는 일반

원주(베어튜브, Model #0)의 값과 거의 유사한 분포를 나타내었다. 모델 3, 4, 5, 6을 Fig. 7(b)에서와 같이 비교한 결과 레이놀즈 수가 증가할 경우에도 스트롤 수 분포가 거의 베어튜브의 경우와 일치하였다. 이는 흥미있는 결과로 생각되며 유효직경, d_e 가 편튜브와 같은 형상을 가진 물체의 스트롤 수 산출에 적절하여 일반원주와 스트롤 수 비교시 적절한 등가직경이라고 생각된다.

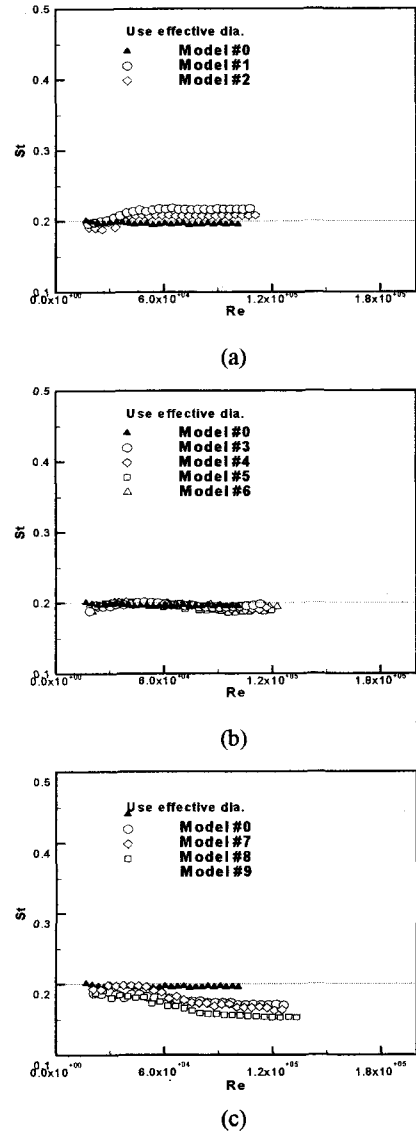


Fig. 7 Strouhal number of various models with effective diameter, d_e

Fig. 7(c)의 경우는 천이구간이후에 베어튜브의 경우보다 스트롤 수가 감소하는 모델들을 나타내었다. 앞에서 언급된 것처럼 천이구간이후의 스트롤 수는 핀높이가 클수록, 핀피치가 감소할수록 감소하였으며, 천이구간이후 스트롤 수가 증가하는 (a)의 경우에서도 확인할 수 있다.

이상에서 핀튜브의 등가직경으로 제안된 수력 직경, d_h 와 유효직경, d_e 는 핀튜브간의 스트롤 수 계산시 적절한 것으로 생각되며, 유효직경, d_e 는 일반원주와의 비교시에 더욱 적절한 등가직경으로 생각된다.

천이구간이후의 스트롤 수 증감을 평가하기 위하여 Table 3과 같이 등가직경과 내부직경 d_i 의 비를 나타내었다. Table 3의 $\frac{d_e - d_i}{d_i}$, $\frac{d_h - d_i}{d_i}$ 은 표면거칠기를 표시하는 한 방법으로 이 수치를 살펴본 결과, $\frac{d_e - d_i}{d_i}$ 값이 ~10%까지는 천이구간이후의 스트롤 수 증가, 24%이상은 스트롤 수 감소가 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.

Table 3 Ratio of equivalent diameter and inner diameter [unit : %]

Model	$\frac{d_i}{d_e}$	$\frac{d_i}{d_h}$	$\frac{d_e - d_i}{d_i}$	$\frac{d_h - d_i}{d_i}$	S_t Mode after Transient
1	94.1	97.7	6.27	2.35	Increase
2	91.3	85.7	9.41	16.69	
3	89.3	78.1	11.96	28.06	Constant
4	86.7	75.3	15.29	32.82	
5	84.5	71.6	18.24	39.73	
6	82.6	69.0	21.18	44.86	
7	80.2	66.7	24.71	49.88	Decrease
8	80.9	65.9	23.73	51.65	
9	75.9	61.7	31.76	62.12	

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 경우에 $\frac{d_e - d_i}{d_i} \approx 0$ 이 되어 베어튜브(Model 0)의 경

우에 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 변화($U_0=5.0 \sim 30.0\text{m/s}$)시키면서 핀튜브의 중심으로부터 $X/d=5.0$, $Y/d=0.0$ 위치에서 정온형 열선풍속계를 사용하여 측정된 와유출 특성을 살펴보고, 적절한 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 판가름 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.