

나선형 핀이 부착된 원주후류의 2차원 난류특성에 관한 연구

안윤수* 남청도**

A study on the characteristics of two-dimensional turbulent flow behind a circular cylinder with helical fin

Yun Soo Ahn, Chung Do Nam

요 약

본 논문에서는 나선형 핀이 붙은 원주 후방의 2차원 난류후류를 정온형 열선유속계를 사용하여 실험적으로 조사하였다. 실험에 사용한 3종류의 모델중 2종류는 원주에 나선형 핀이 부착된 것이고 나머지 한 종류는 핀이 붙지 않은 평원주이며 이 모델들의 외경은 모두 31.4mm로 똑 같다. 원주로부터 유동방향으로 무차원화 한 $X/D=5\sim 20$ 의 범위에 대하여 유동특성을 조사하였으며, 이 때의 레이놀즈 수는 $Re=1.24\times 10^4$ 이다. 후류특성으로서 평균속도분포, 난류운동에너지, 자기상관계수 그리고 스펙트럼을 조사한 결과 나선형 핀이 붙은 원주의 경우에도 칼만(Karman)와의 방출이 분명히 존재하며, 핀의 치수가 작을수록 핀이 조밀하게 감긴 경우가 성기게 감긴 경우보다 후류 폭이 크게 되며 또 와 방출의 주파수가 낮아진다는 사실이 입증되었다.



In this paper, two-dimensional turbulent wake flow behind a circular cylinder with helical fin was investigated experimentally by using the linearized constant temperature hot wire anemometer. Three experimental models were used in this study; two circular cylinders with helical fin and a plain circular cylinder. The out diameter of those models are the same width of 31.4mm.

Turbulent characteristics were investigated for the range of $X/D=5\sim 20$ downstream from the cylinder. The Reynolds number is 1.24×10^4 based on the experimental model diameter and inlet velocity. The distribution of the mean velocity, turbulent kinetic energy, autocorrelation coefficient and its spectrum were measured.

As a result it was made clear that Karman vortex shedding was clearly formed even in the case of a cylinder with helical fin. And it was also found that the width of the wake flow becomes large as the pitch of the fin increase, and the frequency of vortex shedding decrease.

I. 서 론

선박용 및 화력발전용 보일러 등의 열교환기는 가스측의 열전달 특성을 향상시키기 위해 전열관 표면에 핀이 조밀하게 설치되어 있다. 핀 튜브형 열교환기는 내구성, 낮은 압력손실, 구조적 간단성 등의 이점 때문에 다수의 원관으로 구성된 관군(管群)과 이것에 수직으로 삽입된 평판핀(plate fin)이 일정 간격으로 평행하게 배열되어 핀군을 형성하는 형태로 되어있는 것이 많이 이용되고 있다. 이 때 공기는 관군

(管群) 및 핀군(群) 사이를 이동하면서 상변화하는 관 내측의 유체와 열교환을 하게 된다.

최근 고성능, 고밀도 열교환기의 발달과 함께 열교환기의 전열 특성 및 성능개선을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 열교환기의 열전달 특성을 촉진시키기 위한 방법으로는 일반적으로 관 내측에 대해서는 관 내벽에 나선홈을 만들어 유로 전열면적을 확대하는 방법 등이 있으며, 관 외측에 대해서는 핀을 포함한 외부 표면적을 직접 증가시키거나 또는 강제 대류가 일어나는 관 외부형상의 개선으로 유효 열전

* 현대중공업

** 한국해양대학교 기관시스템공학부

달을 증진시키는 방법 등이 있다. 열교환기의 관에 부착된 핀의 형상을 달리하면 평판핀에 비해 35 ~ 45%의 열전달 성능 향상의 효과가 있는 것으로 나타났다(1).

이러한 관심과 더불어 종래에는 단일원관 및 원주, 일렬(·列) 및 일행(·行)관군, 엇갈림 관군 등의 유동특성 및 열전달 특성에 관한 연구가 많이 행해졌다. 그 중 단일 원관 및 원주를 지나는 유동 및 열전달에 관한 연구는 직교류 관군의 열전달에 관한 물리적 현상의 이해를 용이하게 해주는 기초적인 것으로 상당히 의미가 있다. 단일원관 및 원주는 매우 간단한 모양으로 2차원 후류유동을 관찰하기에 매우 적합하기 때문에 많은 참고논문이 있다. 낮은 레이놀즈수 영역에 있어서 단일원관의 유동현상에 관한 실험적연구(2)~(5)는 칼만渦(Karman vortex)의 관찰과 관련된 것이 대부분을 차지하고 있다. 즉, 이들의 연구에서는 레이놀즈수가 40~160 정도의 범위에서는 원관 후방에 규칙적이고 주기적인 안정된 와류가 발생하지만, 160의 범위를 넘으면 불규칙하고 불안정한 와류가 발생하는 것을 관찰하였다. 그리고 단일원관 주위의 층류 유동에 관한 수치적인 연구로는 Thom(6)의 선행적인 연구를 시초로 하여, Navier-Stokes 방정식의 수치해가 매우 신뢰성 있는 결과를 제공한다는 사실이 알려진 후, 최근의 Rumsey(7)와 Nakabayashi(8) 등의 보고에 이르기까지 많은 연구결과(9)~(11)가 있다.

그러나 열효율을 증가시키기 위해 많이 사용되는 핀부착원주에 대한 유동특성을 밝히는 연구는 많지 않은 편이며, 특히 나선형 핀부착원주에 대한 연구는 의외로 적다. 나선형 핀이 부착된 원주의 유동특성을 이해하는 것은 효율적인 열교환기 설계에 있어 매우 기초적이고 필수적인 것임에 틀림이 없다. Hamakawa, Fukano(12) 등은 핀은 원주의 직경을 증대시키는 효과를 갖는다는 것을 밝혀내고, 핀부착 원주의 동가직경의 정리식을 제안하였다. 또 권기정, 김형범(13) 등은 나선형 표면돌출물이 부착된 원주의 근접후류에 대한 연구에서 나선형 표면 돌출물이 감긴 원주는 와형성 영역의 길이가 일반 원주보다 길어지고, 후류의 폭이 줄어든다고 밝혔다. 그러나 이것은 원주에 와이어와 같은 물체를 나선형으로 감아 붙인 것으로 실제로 많이 사용되는 나선형 핀부착원주와는 차이가 있다.

본 연구에서는 나선형 핀부착원주 후류의 난류운동에너지, 상관관계, 파워스펙트럼 등을 측정하여 핀부착원주 후류의 여러 가지 기본적인 특성을 밝히고자 한다.

II. 실험장치 및 실험 방법

2.1 풍 동 (Wind Tunnel)

본실험에서 사용한 풍동은 개회로(Open circuit) 노즐형 흡출식 아음속 풍동으로, 전체길이는 7,350mm이다.

공기는 5.5 Kw 유도전동기로 구동되는 풍속범위 0~30m/s의 축류송풍기에 의해 확대관(Diffuser)과 Screen 部, 노즐형 축소부(Contraction Cone)를 차례로 거쳐 실험구간을 통해 밖으로 빠져나간다. 노즐축소부의 Contraction ratio(축소비)는 9 : 1 이다.

확대관(Diffuser)과 노즐형 축소부(Contraction Cone) 사이에는 한 개의 Honey-comb과 4개의 스크린이 설치되어 실험구간의 난류강도가 1%미만인 균일한 유동을 유지한다. 실험구간의 재질은 투명한 아크릴판을 사용하였으며, 길이는 1800mm이고, 그 단면적은 300 mm X 300 mm 이다.

2.2 실험모델 및 측정부

실험에 사용된 모델은 직경 $D=11.4\text{mm}$ 의 원주표면에 핀높이 10mm, 두께 0.4mm의 띠모양의 얇은 판이 나선형으로 감아붙여진 형상이다. Fig.1에 핀부착원주의 개략적인 외형을 나타낸다.

띠모양의 얇은 판으로는 폭 4mm, 깊이 4mm의 골모양의 주름이진 Serrated Fin이라 불리는 핀을 사용하였다. 이 Serrated Fin은 유동저항은 증가시키나 주위의 흐름에 교란을 발생시켜 전열특성을 증대시키는 특성을 갖는다. 핀외경 D_f 는 31.4mm 이다. 실험에 사용한 핀부착원주는 핀의 피치 (Y_p)가 5.08, 8.47의 두 종류를 사용하였으며, 이것들은 보통 1 in당 핀의 山數 n 으로 표시하며 각각 $n=5, 3$ 이다.

비교를 위해 핀부착원주와 외관상 외경이 같은 직경 31.4mm의 원주에 대해서도 검사하였다. 이것에 핀이 있다라고 가정하면 Y_p 는 0 이라고 간주할 수 있으므로 n (1인치당 산수)으로 표시하면 핀이 가득찬 것으로 해석해서 $n=\infty$ 로 표기할 수 있다. 앞으로 이들 원주를 대표하는 기호로 각각 $n=3, 5, \infty$ 를 사용하기로 한다.

측정부의 개요를 Fig.1에 나타낸다. 실험에 사용된 모델은 유동에 수직한 Z방향에 평행하도록 실험구간의 중앙에 설치하였다. 이 때 폐쇄비(blockage ratio)는 2.6% 이다. 폐쇄비가 5% 이내일 때 폐쇄비에 따른 유동의 영향이 적고 폐쇄비가 증가하면 와 유출 및 항력이 약간 증가된다고 밝혀져 있다(14). 그러므로 본 실험에서는 폐쇄비에 따른 유동의 영향을 무시할 수 있다.

주류속도 U_0 는 6m/s로 하였으며, 실험원주의 외경 D_f 를 갖는 레이놀즈수는 1.24×10^4 정도로 임계레이놀즈수 미만이다.

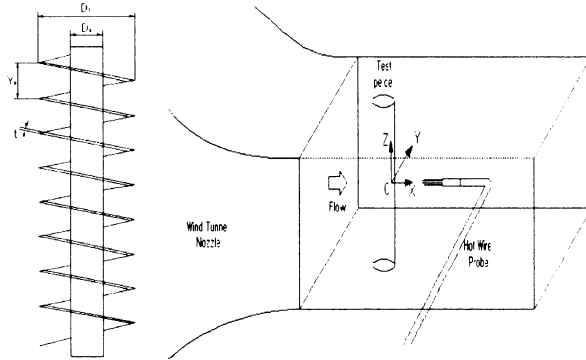


Fig.1 Shape of circular cylinder with fin and Experimental apparatus

2.3 실험 및 데이터 처리방법

2.3.1 열선의 교정

본 실험의 속도 측정에는 8채널까지 동시에 측정이 가능한 TSI사의 정온형열선풍속계(Constant temperature anemometer, IFA300)를 사용하였다. 이 정온형 열선 풍속계는 각각의 브릿지 전압을 체크하여 신호를 OP AMP로 피드백시키는 SMARTUNE 기법을 사용하여 뛰어난 동적특성을 지닌다. 또한 열선풍속계에서 나오는 두 브릿지 출력신호를 5KHz의 저역 통과필터를 거쳐 A/D 변환기를 통해 컴퓨터로 ON-LINE 연결하여 소프트웨어적으로 데이터 처리가 가능하게 하였다.

속도 측정에 사용된 센서로는 X형 열선프로브(Kanomax사, model:0252R-TR)를 사용했다. 열선의 교정에는 TSI Model 1125 교정기를 사용하였다. 이 교정기에는 압력조정기, 흐름조정기 및 여과기가 설치되어 있어 필요한 매우 균일한 흐름을 얻을 수 있다.

2.3.2 속도측정

Fig.2는 데이터 계측장치의 개략도를 나타낸다.

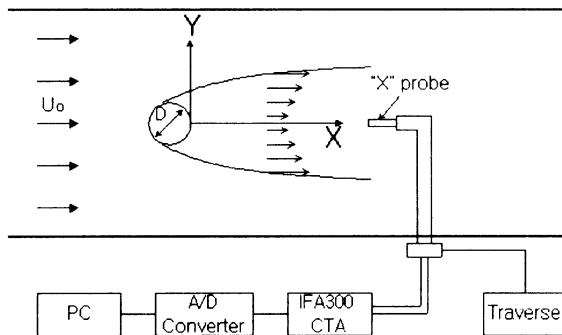


Fig.2 Data acquisition system

자유흐름속도 측정은 표준 피토정압관과 미세압력계(Furness社, FCO12 micromanometer)를 이용하여 측정하였다. 정온형열선유속계(TSI IFA300)를 이용하여 X형 열선프로브(Kanomax, 0252R-TR)로 후류속도를 측정하였다. 열선유속계로부터 나온 아날로그 속도신호를 A/D 변환기(WIN-30)를 이용하여 디지털신호로 변환하여 컴퓨터에 저장하였다. 속도신호는 10KHz로 샘플링하여 한 측정점에서 약 0.1초당 1024개의 데이터를 받았다. 측정점의 위치는 흐름방향(X)으로는 원주 하류 $D/X = 5, 10, 20$ 인 위치에서, 흐름에 수직인 방향(Y)으로는 ± 10 mm씩 이송시켜가며 측정하였다. 열선의 Y방향 이송에는 스텝모터를 이용한 이송장치를 이용하여 정밀이송이 가능하도록 하였다.

III. 실험결과 및 고찰

3.1 속도분포와 난류운동에너지

Fig.3 (a)(b)(c)는 각각 $n=\infty, n=3$ 및 $n=5$ 의 원주에 대한 근접후류영역인 $X/D=5, 10$ 및 20 에서의 시간평균에 대한 평균속도 분포도이다. 횡축 좌표의 범위는 후류중심선을 기준으로 Y의 양방향으로의 거리를 원주의 외경 D_f 로 무차원화한 값이다. 한편 종축 좌표의 범위는 균일류속도 U_0 로 무차원화한 값이다. $X/D=5$ 에서의 후류중심선상의 유속은 각각 $u_c=0.81, 0.63, 0.54$ 로 작은 값이지만 X방향으로 거리가 멀어짐에 따라 속도결손은 적어지고 후류 폭 또한 넓어지고 있다. 핀이 부착되지 않은 원주($n=\infty$) 보다는 핀이 부착된 원주쪽이 후류중심선상에서의 속도결손이 크며, 또한 핀이 조밀하게 부착된 원주($n=5$)가 핀이 성기게 부착된 원주($n=3$)보다 그 값이 크게 나타나고 있다.

Fig.4 (a)(b)(c)는 원주 $n=\infty, n=3$ 및 $n=5$ 에 대한 근접후류영역 $X/D=5, 10$ 및 20 에서의 시간평균에 의한 u 성분의 난류운동에너지 분포도이다. u 변동성분은 후류중심선상에서의 난류운동에너지가 X의 거리에 따라 $n=\infty$ 의 경우는 균일류운동에너지의 각각 2.5%, 2.1%, 0.9% 정도이고, $n=3$ 의 경우에는 2.4%, 1.2%, 0.7% 정도이며, 또 $n=5$ 의 경우에는 2.3%, 1.9%, 0.6% 정도로 나타나고 있다. 또 $X/D=20$ 에서는 거의 일정한 값을 나타내고 있으며, 대체적으로 핀이 부착된 원주의 경우는 $n=5$ 의 경우가 $n=3$ 의 경우보다 에너지 값이 크다는 것을 알 수 있다. 그리고 이들 분포도의 형태는 특이하게도 중심선상에서의 값보다도 Y방향의 양쪽, 즉 $Y/D=\pm 0.5 \sim 1.0$ 사이에서 최대치가 나타나는 쌍봉형식(bimodal)의 형태를 나타내고 있다. 이 현상은 와류유출(vortex shedding)과 관계가 있으며, 각 원주로부터 X방향으로 거리가 멀

어짐에 따라 점차 약해지는 것을 보이고 있고, 이것은 먼 후류에서는 점차 사라지게 된다.

Fig.5 (a)(b)(c)는 각 $n=\infty$, $n=3$ 및 $n=5$ 에 대한 v 성분의 난류운동에너지 분포도이다. 앞서의 u 변동성분과는 달리 v 변동성분은 난류운동에너지가 후류중심선상에서 최대치를 갖으며, X 방향의 위치 $X/D=5$, 10 및 20에 따라 $n=\infty$ 의 경우는 균일류운동에너지의 각각 14.1%, 5.0%, 1.4% 정도이고, $n=3$ 의 경우에는 5.9%, 3.6%, 0.5% 정도이며, $n=5$ 의 경우에는 6.9%, 4.3%, 0.7% 정도로 나타나고 있다. v 성분의 난류운동에너지도 u 성분의 그것과 마찬가지로 $X/D=5$, 10에서는 $n=5$ 의 경우가 $n=3$ 의 경우보다 크며, $X/D=20$ 에서는 거의 같음을 알 수 있다. 후류중심선상에서의 난류운동에너지는 v 변동성분이 u 변동성분보다 상당히 크지만 하류로 갈수록 그 차이는 점차 줄어들고 있다. 이것은 주기적인 와류유출(vortex shedding)이 있을 때 각 원주의 상류에서는 대규모난류가 우세하여 비등방성이고 하류로 갈수록 소규모난류가 우세하여 등방성이 이루어지기 때문이다.

3.2 자기상관계수(autocorrelation coefficient)

Fig.6 (a)(b)(c)는 $n=\infty$ 인 원주에 대한 후류중심에서의 근접후류영역 $X/D=5$, 10 및 20에서의 u 및 v 변동성분의 자기상관계수 $R(\tau)$ 의 분포도이다. $X/D=5$ 에서 v 변동성분은 강한 주기성(주파수 약 29Hz)을 나타내고 진폭도 비교적 크지만 하류로 갈수록 주기성이 약해지며 진폭도 점차 감소하는 것을 알 수 있다. 하류로 갈수록 점차 약해지기는 하지만 $X/D=20$ 까지도 존재하는 주기성은 이 위치까지도 와류유출에 의해 생성된 와류가 계속적으로 유동해가는 것을 의미하며, 아직 소멸되지 않은 와류가 존재한다는 것을 의미한다. 이 사실은 난류의 대규모의 조직적인 구조가 존재하고 있음을 뜻한다.

한편, u 변동성분의 경우는 v 변동성분과는 달리 주기성을 거의 찾아볼 수가 없다. 자기상관계수가 최초로 0이 될 때까지의 시간은 v 변동성분의 경우 원주 하류의 위치에 관계없이 거의 일정하지만, u 변동성분의 경우는 하류로 갈수록 시간이 증가하고 $R(\tau)$ 함수에 대한 적분면적이 커진다. 즉 u 변동성분의 적분 시간척도(integral time scale)는 원주 하류로 갈수록 증가하고 v 변동성분의 경우는 위치에 관계없이 거의 일정함을 알 수 있다. 또한 $X/D=5$ 에서는 상관계수의 값이 최초로 0이 될 때까지의 시간은 $X/D=10$, 20의 경우에 비해서 u 변동성분과 v 변동성분이 거의 같고, 두 성분에 대한 적분 시간척도도 거의 같다. 전체적인 위치에서 볼 때는 v 변동성분의 자기상관계수가 u 변동성분보다 빨리 감소하므로 v 변동성분의 적분 시간척도는 u 변동성분의 그것보다 작음을 알 수 있다. 이

것은 와류의 신장(vortex stretching)이 Y 방향에서 보다 X 방향으로 크다는 것을 의미하며, 와류의 형태는 원주 근처에서는 원형에 가깝던 것이 하류로 갈수록 X 방향으로 길게 늘어짐을 의미한다.

Fig.7 (a)(b)(c)는 $n=3$ 원주의 후류중심선상에서 근접후류영역 $X/D=5$, 10 및 20에서의 u 및 v 변동성분의 자기상관계수의 분포도이다. 편이 부착되지 않은 원주와 마찬가지로 $X/D=5$ 에서는 v 변동성분이 강한 주기성을 나타내고 진폭도 비교적 크지만 $n=\infty$ 에 비해서 주기도 짧고, 하류로 갈수록 진폭도 감소하며 주기성도 급격히 약해져서 $X/D=20$ 에서는 주기성이 거의 사라지는 것을 알 수 있으며, $n=\infty$ 의 원주에 비해 주기성이 빨리 약해지는 것을 알 수 있다. 즉, 계속되는 와류유동 거리가 짧고, $X/D=20$ 에서는 거의 소멸되는 것을 알 수 있다.

한편, u 변동성분은 $n=\infty$ 의 원주에서와 같이 거의 주기성을 찾아볼 수가 없다. 또 자기상관계수가 최초로 0이 될 때까지의 시간은 v 변동성분의 경우 $X/D=10$ 까지는 거의 일정하지만, u , v 성분 모두 $n=\infty$ 의 원주에 비해서 그 시간이 짧아짐을 알 수 있다. 그리고 $n=3$ 원주의 경우도 v 변동성분의 적분 시간척도가 u 변동성분의 적분 시간척도보다 작은 것에서 알 수 있듯이 $n=\infty$ 의 원주의 경우와 마찬가지로 와류의 신장이 Y 방향에서 보다 X 방향으로 더 크다는 것을 알 수 있다.

Fig.8 (a)(b)(c)는 $n=5$ 의 원주에 대한 후류중심선상에서 근접후류영역 $X/D=5$, 10 및 20에서의 u 및 v 변동성분의 자기상관계수 분포도이다.

$n=3$ 원주의 경우와 그 형태는 비슷하지만 $n=3$ 의 원주보다도 주기성이 더 빨리 사라지고 진폭도 작음을 알 수 있다. 이것은 $n=3$ 의 원주보다도 와류가 더 빨리 소멸된다는 것을 의미한다.

Fig.9 (a)(b)(c)(d)는 $n=\infty$ 의 원주에 대한 $X/D=5$ 의 위치에서의 후류중심선상에서 유동방향과 수직인 Y 방향에 따른 자기상관계수의 측정결과를 나타낸 것이다. u 변동성분의 경우 후류중심선상에서는 주기성이 거의 없지만 $Y/D=1$ 이후에서는 뚜렷한 주기성이 나타나고 있다. 한편 v 변동성분의 경우는 후류중심선상에서 $Y/D=3$ 까지도 뚜렷한 주기성이 존재하고 있다. 그러나 그 진폭은 후류중심선상에서 Y 방향으로 멀어짐에 따라 점차 감소하고 있다. u , v 성분에 대하여 결합해 보면 $Y/D=3$ 에서 두 성분은 주기성과 진폭까지도 거의 일치하고 있다. 이러한 현상은 후류중심에서 와류중심으로 접근할수록 u 변동성분은 v 변동성분과 거의 같은 크기의 주파수와 진폭을 갖게 됨을 뜻하는 것이며, 두 성분의 주파수와 진폭이 거의 일치되는 위치가 바로 와류중심이 될 것이라고 생각된다.

Fig.10 (a)(b)(c)(d)는 $n=3$ 원주에 대한 $X/D=5$ 인 위치에서 후류중심선상에서 유동방향과 수직인 Y 방향에 따른 자기상관계수의 분포도이다. 핀이 부착되지 않은 원주($n=\infty$)와 비슷한 형태를 나타내고 있다. 그러나 이 경우는 뚜렷한 주기성의 존재가 $n=\infty$ 에 비해 더 빨리 사라짐을 알 수 있고, u, v 두성분의 주기와 진폭이 거의 일치하는 지점이 $n=\infty$ 의 원주보다 후류중심선상에서 Y 방향으로 더 가까운 $Y/D=2$ 의 위치에 있다는 것을 알 수 있다. 이것은 와류의 중심이 $n=\infty$ 의 원주보다 후류중심선상에서 Y 방향으로 더 가까운 곳에 존재하고 있다는 사실을 의미한다.

Fig.11 (a)(b)(c)(d)는 $n=5$ 의 원주에 대한 $X/D=5$ 인 위치에서 후류중심선상에서 유동방향과 수직인 Y 방향에 따른 자기상관계수의 측정결과를 나타낸 것으로 $n=3$ 의 원주의 경우와 거의 같은 형태를 갖고 있다. 이 경우 그림에는 나타나있지 않지만 전체적으로 종합해볼 때 $Y/D=2 \sim 3$ 사이에 u, v 두성분의 주기와 진폭이 거의 일치하는 지점이 존재한다는 사실을 짐작 할 수 있다. 즉, 핀이 조밀하게 부착된 원주($n=5$)에서의 와류의 중심이 핀이 성기게 부착된 원주($n=3$)에 비해 후류중심선상에서 Y 방향으로 더 먼 곳에 위치한다는 것을 알 수 있다.

3.3 파워스펙트럼밀도함수(power spectral density function)

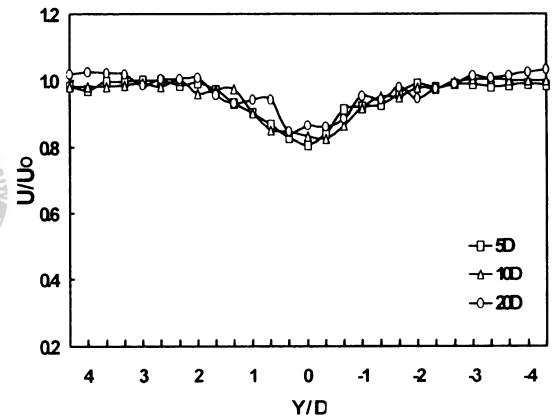
Fig.12 (a)(b)(c)는 $n=\infty, n=3$ 및 $n=5$ 원주에 대한 $X/D=5$ 단면에서 u 변동성분의 파워스펙트럼밀도함수를 나타낸 것이다. 그림에서 각각 세가지 원주의 경우 후류중심선상에서는 탁월한 정점(peak)이 보이지 않으나 $Y/D=1$ 및 $Y/D=2$ 의 위치에서는 각각 주파수 29.3Hz, 48.8Hz, 39.1Hz에서 탁월한 정점이 나타나고 있다. 이것은 Fig.9의 자기상관계수에서 나타난 결과와 일치한다. 또한 $Y/D=0$ 및 $Y/D=1$ 의 위치에서의 에너지 값 $E(F)$ 는 거의 비슷하나 $Y/D=2$ 인 위치에서의 에너지 값은 상당히 적다. 이것은 Fig.4에서의 난류운동에너지 분포도에서 나타난 결과와도 같다.

Fig.13 (a)(b)(c)는 $n=\infty, n=3$ 및 $n=5$ 의 원주에 대한 $X/D=5$ 단면에서 v 변동성분의 파워스펙트럼밀도함수를 나타낸 것이다. 이는 u 변동성분과는 달리 후류중심선상에서, 즉 $Y/D=0$ 에서도 탁월한 정점이 나타나는데 이것 또한 Fig.5에서 나타난 난류운동에너지 분포도에서 나타난 결과와 대응된다.

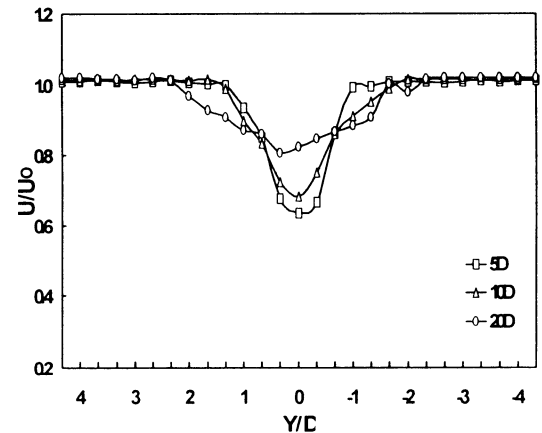
Fig.14 (a)(b)(c)는 $n=\infty, n=3$ 및 $n=5$ 의 원주에 대한 $X/D=5$ 위치에서, 또한 Fig.15 (a)(b)(c)는 $X/D=10$ 위치에서 후류중심선상에서 주파수에 의한 u, v 변동성분의 파워스펙트럼밀도함수를 나타낸 것으로 앞서의 경우와 같이 u 변동성분의 경우는 탁월한 정점이

존재하지 않으나 v 변동성분의 파워스펙트럼밀도함수가 각각 주파수 29.3Hz, 48.8Hz, 39.1Hz에서 나타나는 것은 이 주파수에 해당하는 강한 에너지가 존재함을 나타내는 것이다. 이는 와류유출주파수에 해당하는 것이다. 또 $X/D=5$ 및 10에서의 탁월 주파수에는 거의 변화가 없으나 $X/D=10$ 에서의 에너지의 크기는 $X/D=5$ 에서의 그것보다 작다.

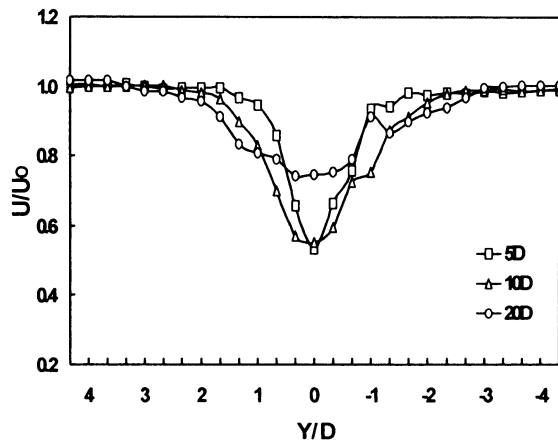
그림에서 u, v 변동성분은 약 100Hz 이하에서 큰 에너지가 생성되며 이것은 난류에너지 생성에 크게 기여하고 있다. 또 100Hz 이상에서는 u, v 변동성분의 파워스펙트럼밀도함수분포가 거의 같아서 이 이상의 주파수영역에서는 소규모 난류구조에서 국부적으로 등방성(local isotropy)이 이루어지는 에너지 소산영역(dissipation region)이 되고 있다.



(a) $n=\infty$

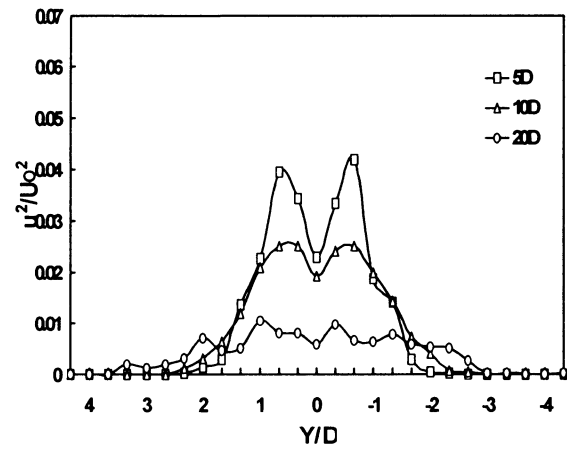


(b) $n=3$



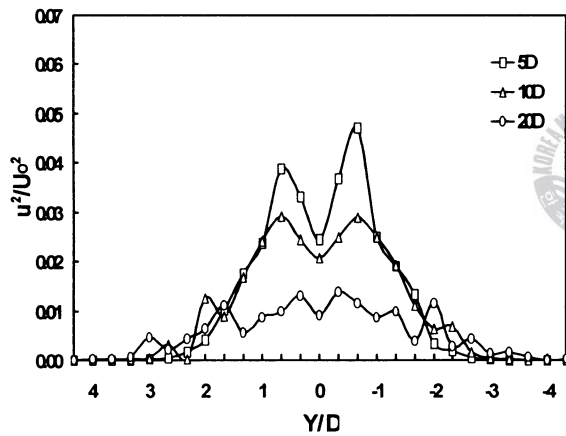
(c) $n=5$

Fig.3 Distribution of the mean velocity \bar{U}/U_0 .

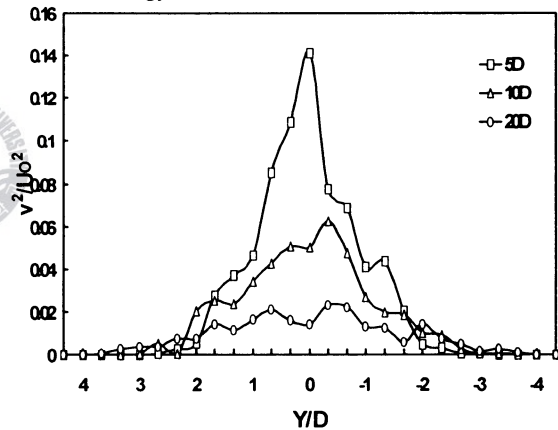


(c) $n=5$

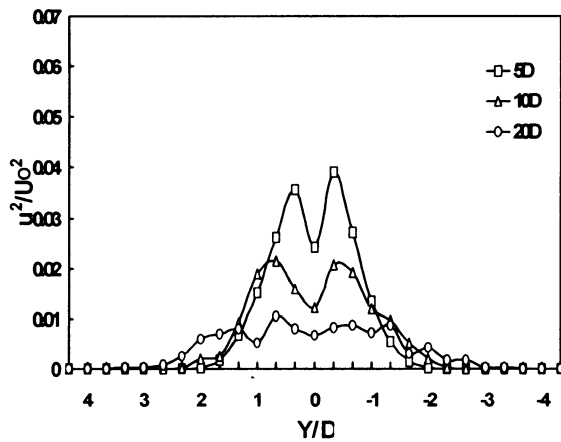
Fig.4 Distribution of the turbulence kinetic energy \bar{u}^2/U_0^2



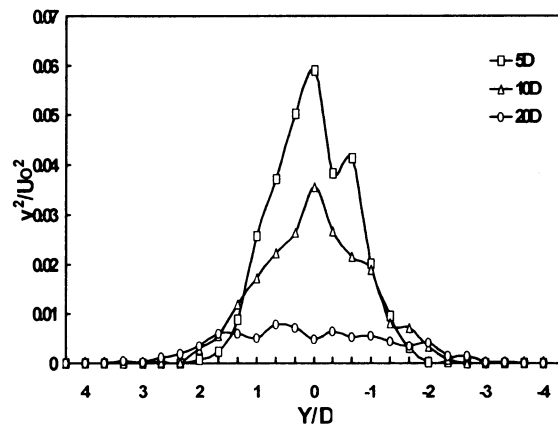
(a) $n=\infty$



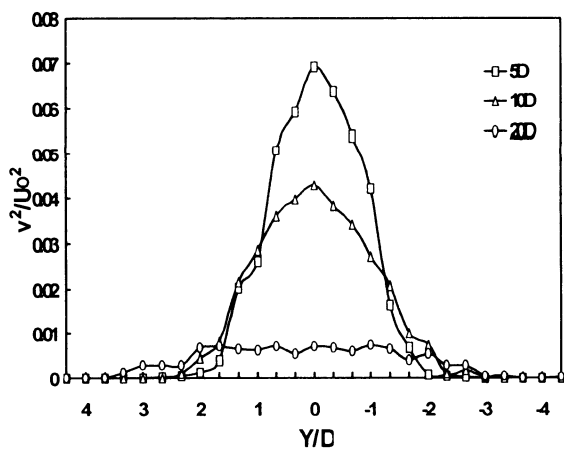
(a) $n=\infty$



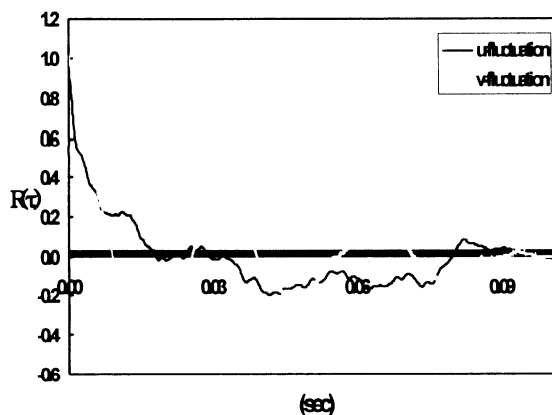
(b) $n=3$



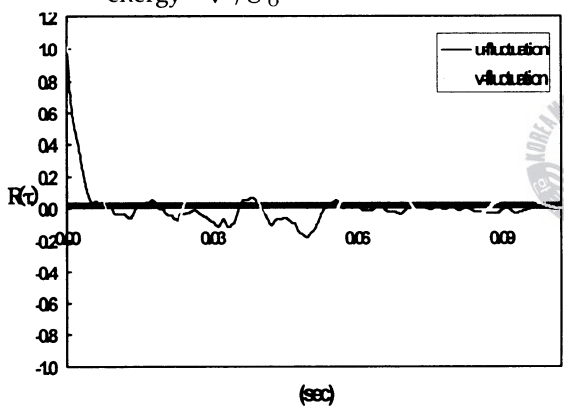
(b) $n=3$



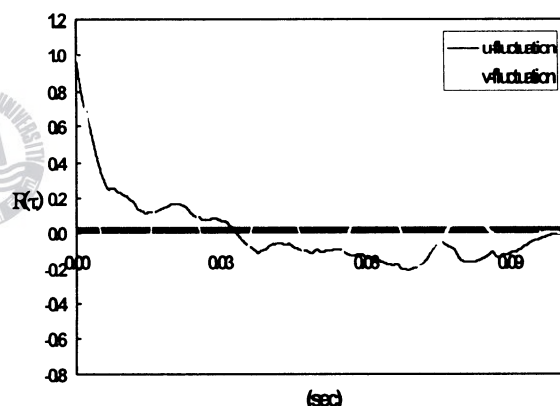
(c) $n=5$
 Fig.5 Distribution of the turbulence kinetic energy $\overline{v^2}/U_0^2$



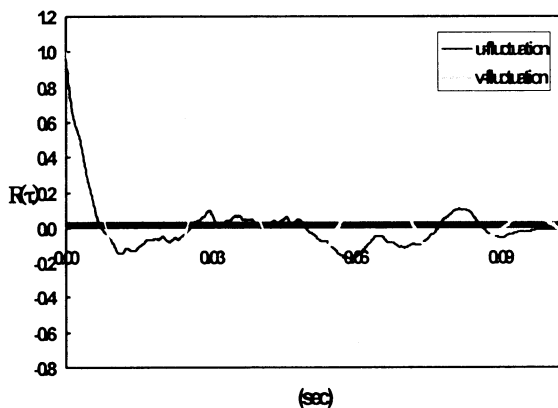
(c) $X/D=20$
 Fig.6 Autocorrelation along the wake center line of circular cylinder ($n=\infty$)



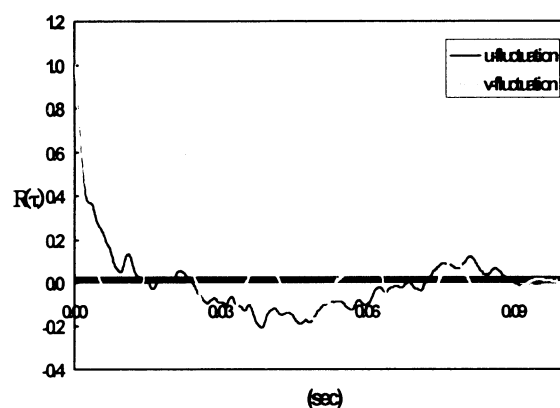
(a) $X/D=5$



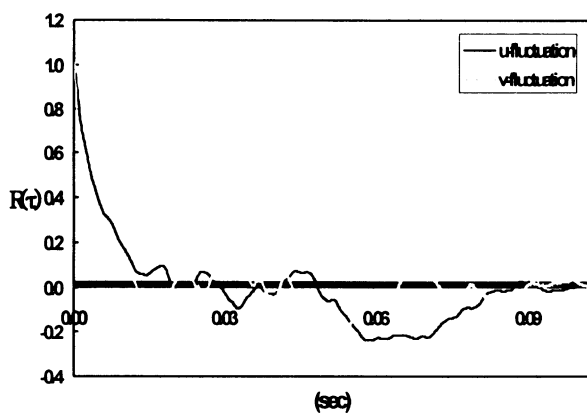
(a) $X/D=5$



(b) $X/D=10$

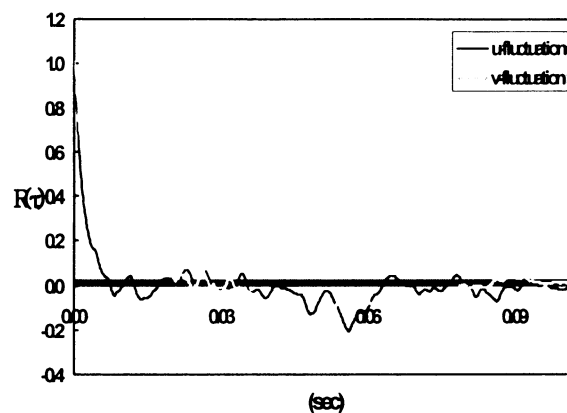


(b) $X/D=10$



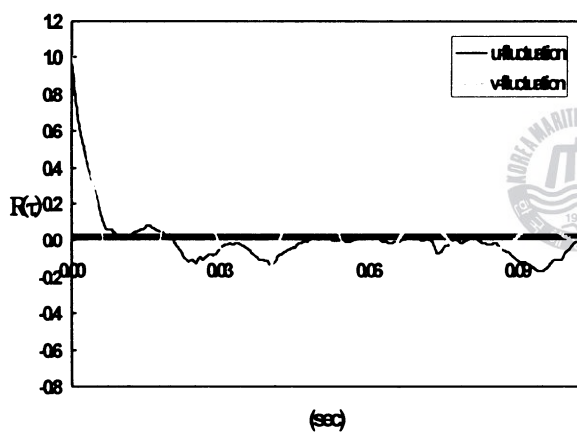
(c) $X/D=20$

Fig.7 Autocorrelation along the wake center of circular cylinder with fin ($n=3$)

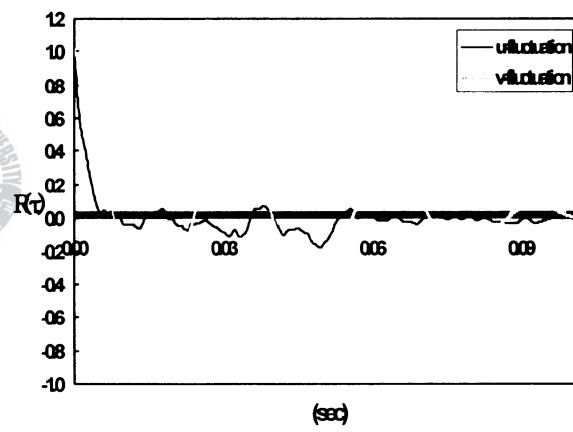


(c) $X/D=20$

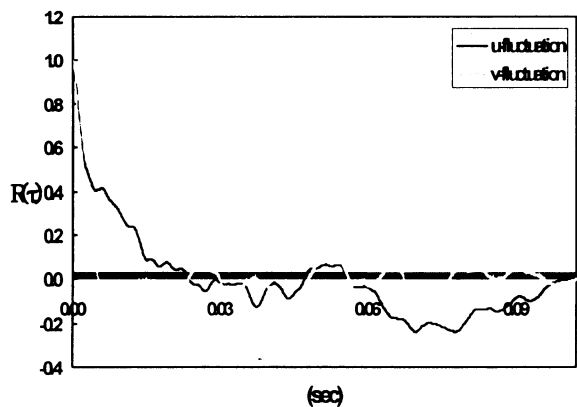
Fig.8 Autocorrelation along the wake center of circular cylinder with fin ($n=5$)



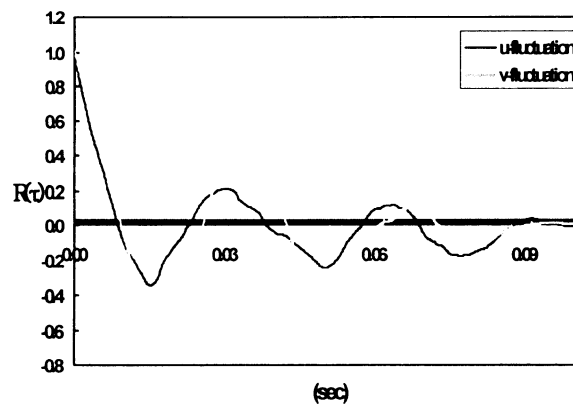
(a) $X/D=5$



(a) $Y/D=0$



(b) $X/D=10$



(b) $Y/D=1$

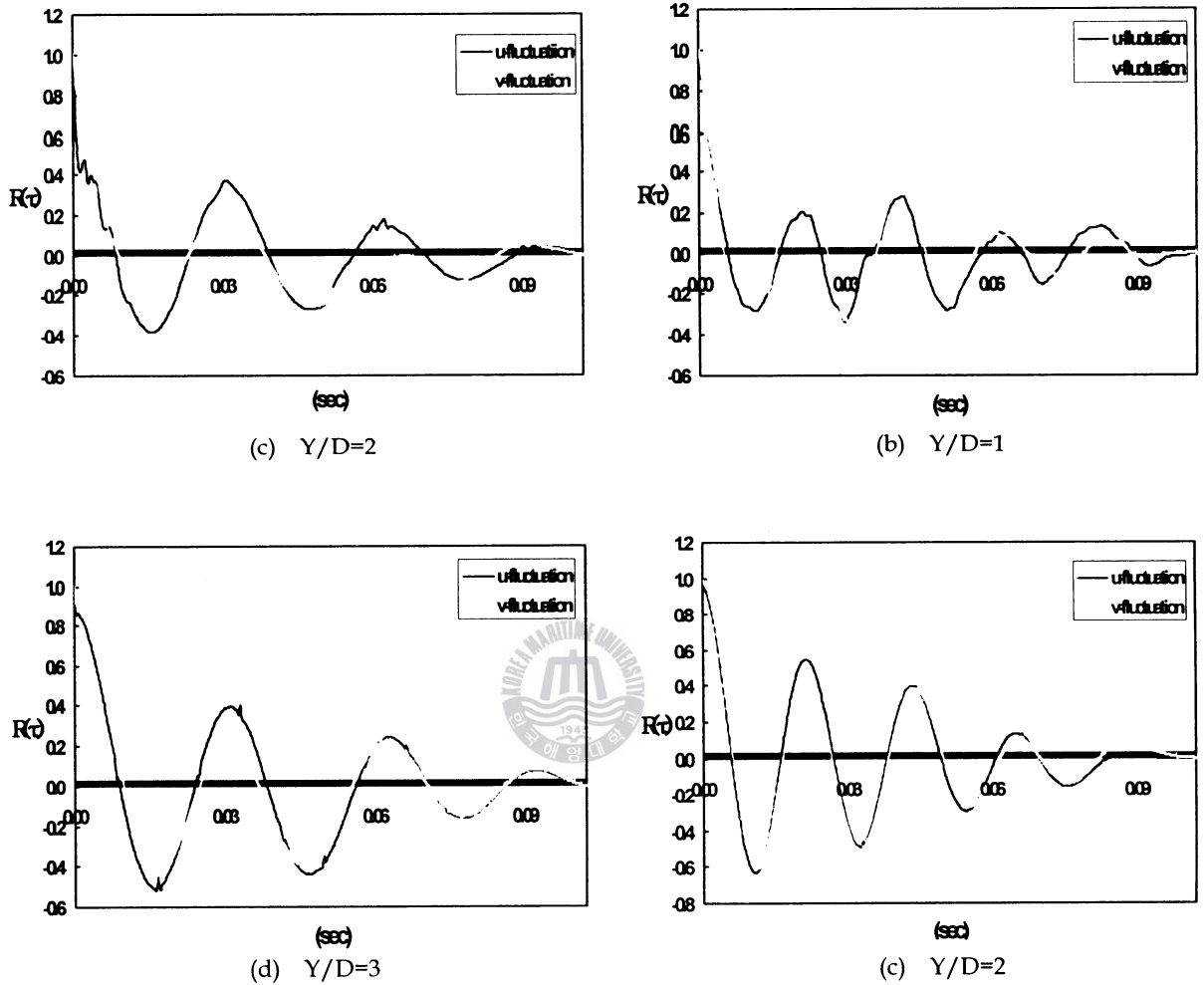


Fig.9 Autocorrelation of at $X=5D$ of circular cylinder ($n=\infty$)

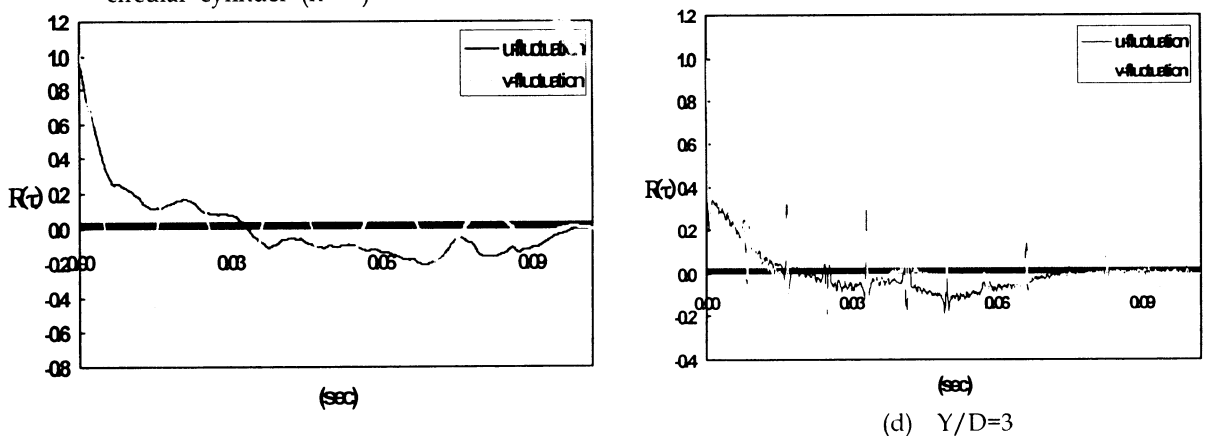
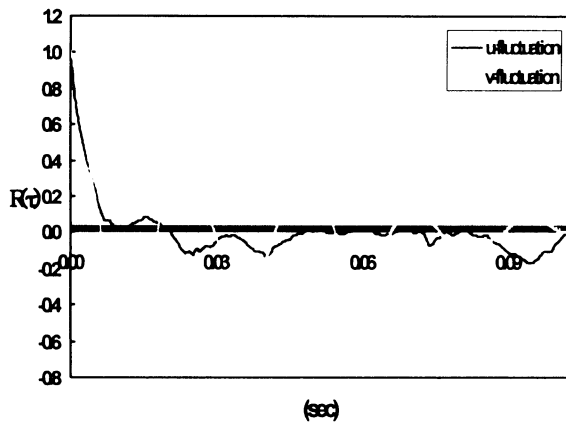
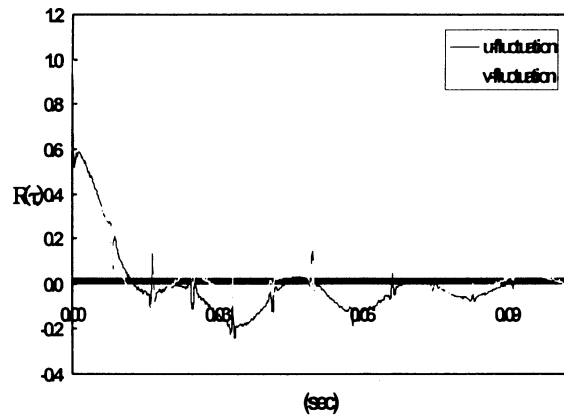


Fig.10 Autocorrelation at $X=5D$ of circular cylinder with fin ($n=3$)

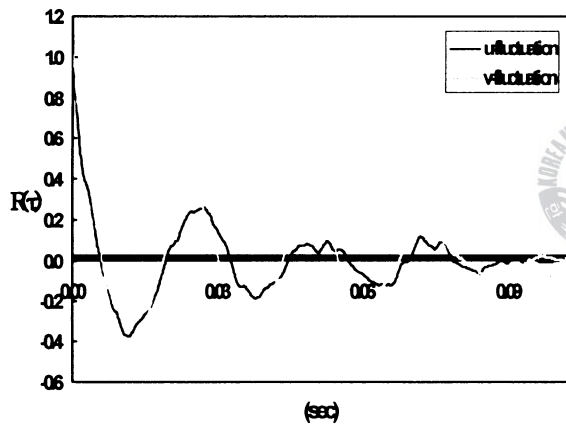


(a) $Y/D=0$

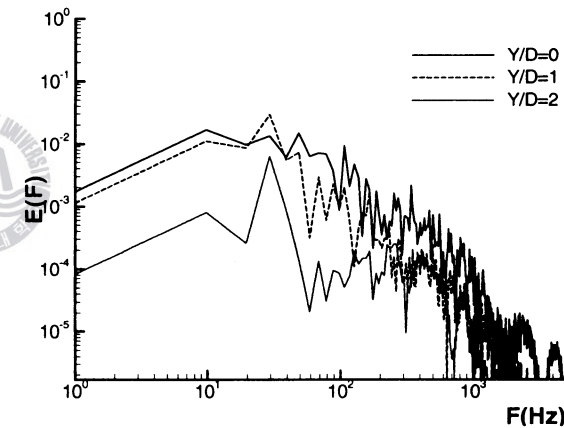


(d) $Y/D=3$

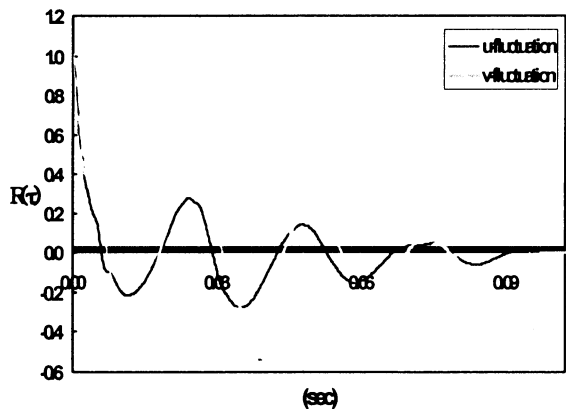
Fig.11 Autocorrelation at $X=5D$ of circular cylinder with fin ($n=5$)



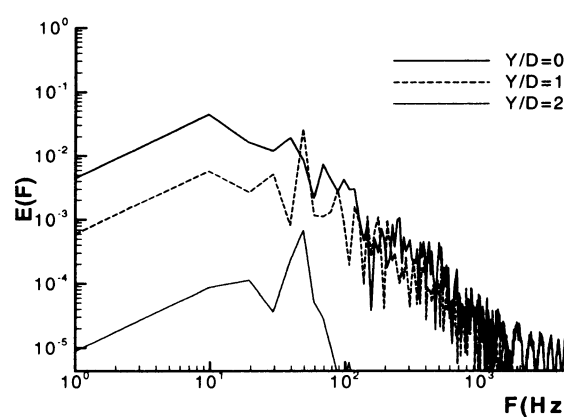
(b) $Y/D=1$



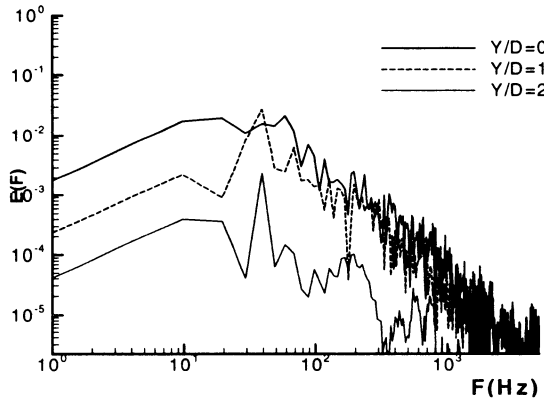
(a) $n=\infty$



(c) $Y/D=2$

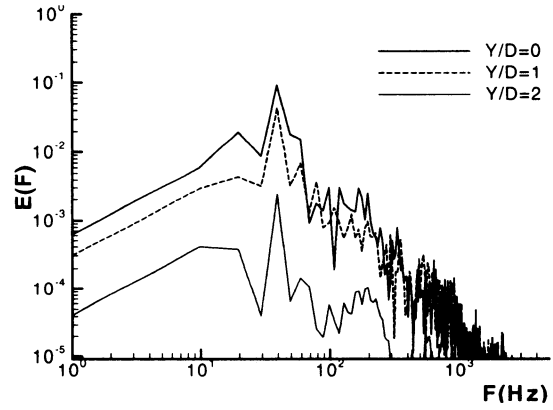


(b) $n=3$



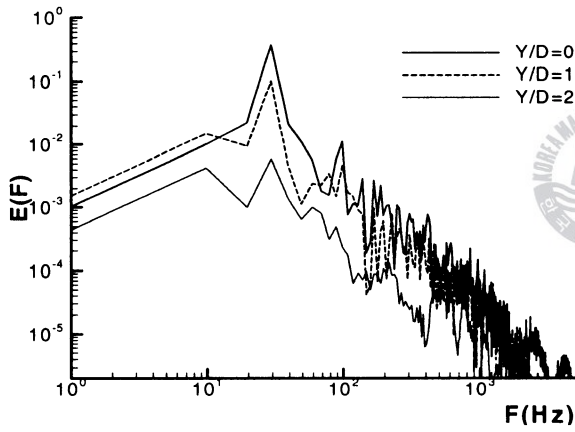
(c) $n=5$

Fig.12 Power spectral density function of the u-fluctuation at $X=5D$ along the Y-direction

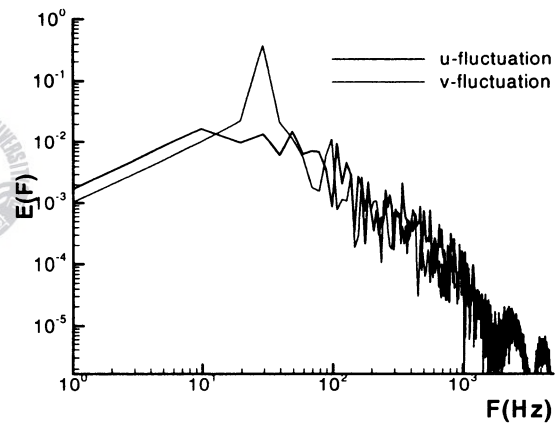


(c) $n=5$

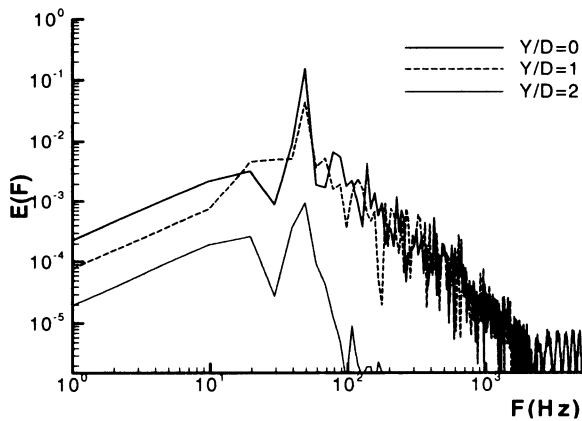
Fig.13 Power spectral function of the v-fluctuation at $X=5D$ along the Y-direction



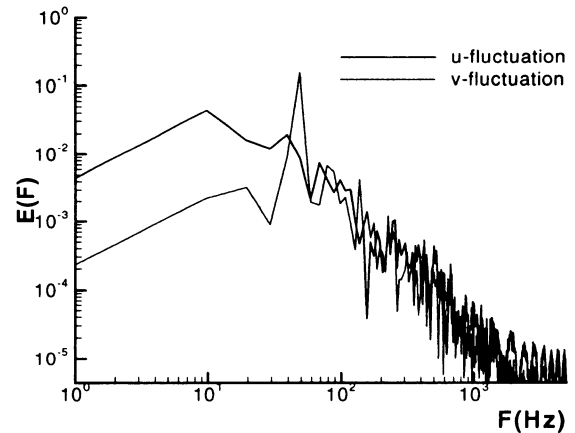
(a) $n=\infty$



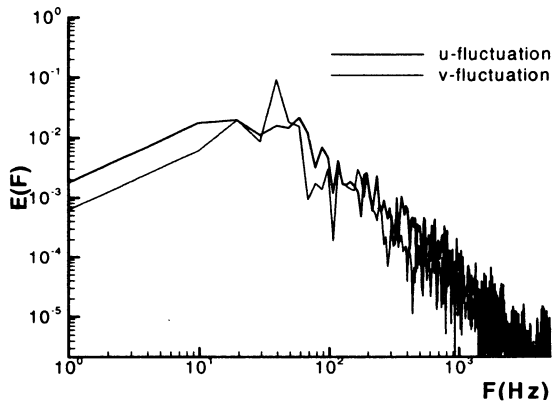
(a) $n=\infty$



(b) $n=3$

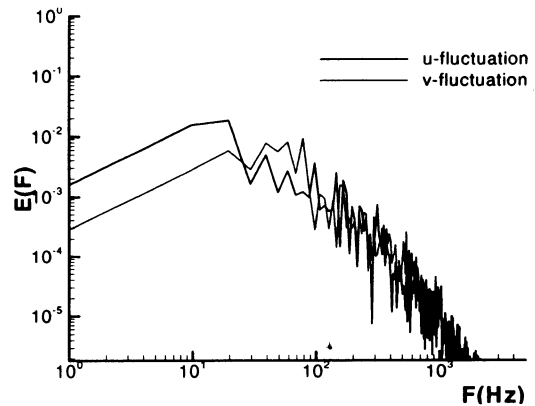


(b) $n=3$



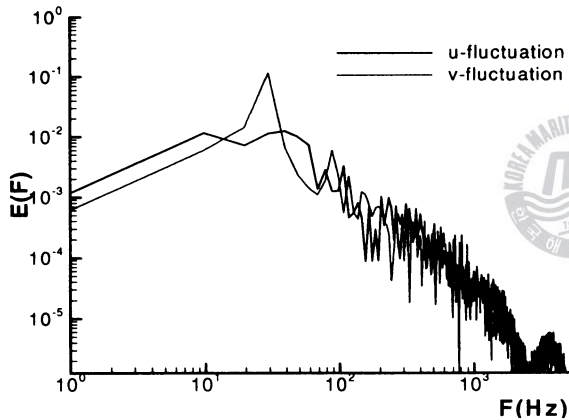
(c) n=5

Fig.14 Power spectral density function at X=5D along the wake center line

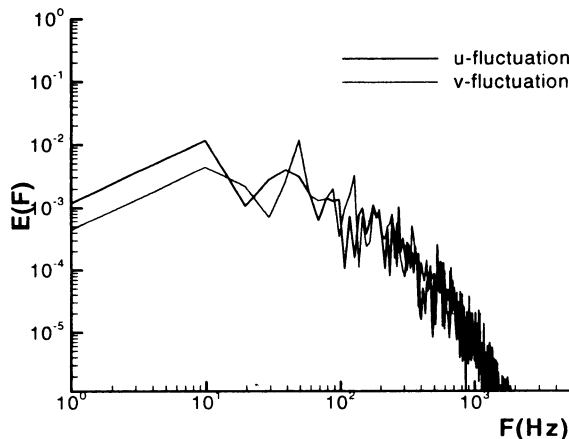


(c) n=5

Fig.15 Power spectral density function at X=10D along the wake center line



(a) n= ∞



(b) n=3

IV. 결론

레이놀즈수가 1.24×10^4 에 있어서 Fin의 피치가 25.4mm 이하의 핀부착원주 두종류의 후류의 특성을 측정 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) Fin부착 원주에서는 핀이 부착되지 않은 원주에 비해서 후류중심선 상에서의 속도결손이 크며, 핀이 부착된 원주에서는 핀이 조밀할수록 속도결손이 크며 그 폭도 넓다.
- (2) Fin부착 원주와 같은 복잡한 형상의 경우에도 그 후류에는 단일주파수의 전형적인 칼만(Karman) 와열이 형성된다.
- (3) Fin이 부착되지 않은 원주와 마찬가지로 핀이 부착된 원주의 경우에도 u변동성분은 와류중심근처에서, v변동성분은 후류중심선상에서 최대진폭을 갖는 주기성이 있다.
- (4) Fin의 피치가 작을수록 즉 n=5의 원주가 n=3의 원주보다 후류의 와류의 폭이 크게되고 와방출 주파수가 낮아진다.
- (5) 후류에서 발생하는 와류는 핀이 부착되지 않은 원주에 비해 핀이 부착된 원주쪽이, 핀이 부착된 원주의 경우에는 조밀하게 핀이 부착된 원주쪽이 더 빨리 소멸된다.

참고 문헌

- (1) 방성돈, 이재현, 이승갑 "표면 형상 개선에 의한 에어컨 응축기용 핀의 성능향상에 관한 연구. 공기조화 냉동공학회 동계학술발표논문집, pp. 24~29, 1996.
- (2) Relf, E. F., A.R.C. Tech.Rep., R. and M., No. 102, 1914.
- (3) Taneda, S., "Experimental Investigation of the Wake behind Cylinders and Plates at Low Reynolds Numbers", J.Phys.Soc.Japan , Vol.11, No.3, pp.302~307, 1956.
- (4) Taneda, S., "Downstream Development of the Wake behind Cylinders", J.Phys.Soc.Japan , Vol.14, No.6, pp. 843~848, 1959.
- (5) Honji, H. and Taneda, S., "Unsteady Flow Past a Circular Cylinder", J.Phys.Soc.Japan , Vol.27, No.6, pp.1668~1677, 1969.
- (6) Thom, A., "The Flow Past Circular Cylinders at Low Speed", Proc.R.Soc., Ser.A, No.141, pp.651~666, 1933.
- (7) Rumsey, C.L., "Details of the Computed Flowfield Over a Circular Cylinder at Reynolds Number 1200", Trans.of the ASME, J.of Fluid Engineering, Vol.110, pp.446~452, 1988.
- (8) Nakabayashi, K., Aoi, T. and Yoshida, N., "Analysis for Shear Flow Past a Circular Cylinder at Low Reynolds Number", Trans.of the JSME, Vol.54, No.507, pp.3069~3075, 1988.
- (9) Son, J.S. and Hanratty, T.T., "Numerical Solution for the Flow Around a Cylinder at Reynolds Number of 40, 200 and 500", J. Fluid Mech., Vol.35, Part2, pp.369~386, 1969.
- (10) Thoman, D.C. and Szweczyk, A.A., "Time Dependent Viscous Flow Over a Circular Cylinder", Phys,Fluid, Supp.2 Vol.12, pp.76~87, 1969.
- (11) Martinez, G., These Docteur-Ingenieur, I.N.P. Toulouse, 1979.
- (12) Hamakawa, Fukano, Masashi Aragaki and Eiichi Nishida, "Vortex Shedding from a Circular Cylinder with Fin, JSME, Vol.65, No.89-1066, pp.2204~2211, 1999.
- (13) 권기정, 김형범, 이상준, "나선형의 표면돌출물이 부착된 원주의 근접후류에 관한 실험적 연구", 대한기계학회지, 제20권 제8호, pp.2601~2610, 1996.
- (14) Richter, A. and Naudascher, E, "Fluctuating Forces on a Rigid Circular in Confined Flow", J. Fluid Mech., Vol.78, pp.561~567, 1967.

