

## 서로 다른 두 개의 와류방출 주파수간의 비선형간섭<sup>§</sup>

김상일\* · 승삼선\*\* · 이승철\*\*\*†

\* 강원대학교 기계공학과, \*\* 강원대학교 자동차공학과, \*\*\* 강원대학교 소방방재공학전공

### Harmonized Non-linear Interaction Between Different Two Vortex Shedding Frequencies

Sang Il Kim\*, Sam Sun Seung\*\* and Seung-Chul Lee\*\*\*†

\* Dept. of Mechanical Engineering, Kangwon Nat'l Univ.,

\*\* Dept. of Vehicle Engineering, Kangwon Nat'l Univ.,

\*\*\* Division of Fire Protection Engineering, Kangwon Nat'l Univ.

(Received August 9, 2013 ; Revised November 15, 2013 ; Accepted December 9, 2013)

**Key Words** : Cylinder(원기둥), Non-linear Interaction(비선형간섭), Vortex Shedding Frequency(와류방출주파수)

**초록**: 본 연구는 서로 다른 두 개의 직경을 가지는 원기둥으로부터 나오는 두 개의 와류방출주파수간의 비선형간섭에 관한 것이다. 두 개의 서로 다른 주파수는 두 개의 직경을 가지는 원기둥에 의해 인위적으로 만들어졌고, 원기둥 후류의 속도 변동은 3 차원으로 측정되었다. 그리고 원기둥 표면에는 압력공이 설치되어 원기둥 표면의 압력도 측정하였다. 이 압력 신호를 기준 신호로 사용하였다. TSC 해석을 병행하여 두 주파수간의 비선형간섭의 세기를 조사하였다. 그 결과, 다음과 사실을 알았다. i) 원기둥 후류의 주파수 분포, ii) 위상집합평균법에 의한 원기둥 후류의 3 차원적인 흐름 상태, iii) 두 개의 직경을 가지는 원기둥에서 나오는 두 개의 주파수간의 비선형간섭과 저주파의 종와류와의 관계.

**Abstract**: This study analyzes the nonlinear interaction between two different vortex shedding frequencies from a cylinder with two diameters. In particular, two different vortex shedding frequencies are generated by preparing a cylinder having two diameters artificially. Flow velocity fluctuations behind the cylinder are measured three-dimensionally. Additionally, we fabricated a hole and placed a pressure transducer for measuring the pressure on the cylinder surface. The pressure signal from the pressure transducer is used as basic signal. A TSC(Trans Spectrum Coherence) is used for checking the strength of the nonlinear interaction between two different vortex shedding frequencies. As a result, the following are clarified: i) frequency distribution behind the cylinder, ii) three-dimensional flow state behind the cylinder through calculation of ensemble average, and iii) close relationship between the vertical vortex and change of low frequency by nonlinear interaction between two different vortex shedding frequencies from the cylinder with two diameters.

- 기호설명 -

$d_1$  : 층이진 원기둥에서 굵은 원기둥 직경[mm]  
 $d_2$  : 층이진 원기둥에서 가는 원기둥 직경[mm]  
 $f_1$  : 직경  $d_1$  의 원기둥에서 발생하는 와류방출 주파수[Hz]

$f_2$  : 직경  $d_2$  의 원기둥에서 발생하는 와류방출 주파수[Hz]  
 $f_+$  :  $f_2 + f_1$  에 해당하는 주파수[Hz]  
 $f_-$  :  $f_2 - f_1$  에 해당하는 주파수[Hz]  
 $Re$  : 레이놀즈수  
 $U_0$  : 주류 유속[m/s]  
 $u$  :  $x$  방향의 속도 성분[m/s]  
 $v$  :  $y$  방향의 속도 성분[m/s]  
 $w$  :  $z$  방향의 속도 성분[m/s]

§ 이 논문은 대한기계학회 강원지회 2013년도 춘계학술대회 (2013. 5. 31., 강릉원주대) 발표논문임.

† Corresponding Author, sclee@kangwon.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

## 1. 서론

공업적으로 중요한 유량계 중 하나로 카르만와류 유량계를 들 수 있다. 이 유량계는 흐르는 유체 안에 원기둥형 물체를 배치하여 후류에 형성되는 카르만와류를 유량측정에 응용한 것으로, 엔진의 연료분사 시스템의 공급량 센서 등에 이용된다. 그러나 실제 사용가능 범위의 레이놀즈수에서는 카르만와류 방출에 심한 불규칙성이 있어 유속을 정하기 위한 정확한 변동주파수를 얻는 것이 대단히 곤란하다. 근래 마이크로 컴퓨터에 의한 필터링 기술의 향상 덕분에 불규칙 변동 속도 성분의 제거는 가능해졌지만 필터링 성능 향상과 함께 처리에 필요한 시간이 증가하는 것으로 인해 제어속도에 있어서 시간 지연이 큰 문제가 되고 있다. 이와 같이 연료분사 시스템의 핵심 부품인 혼합기 분사 센서의 성능 향상에는 와류 방출의 규칙성을 높일 필요가 있고, 그러기 위해서는 와류방출의 불규칙한 변동 현상의 메커니즘을 명확히 규명하는 것이 필요하다.

Yokoi 등<sup>(1)</sup>은 170~1340 정도의 레이놀즈수에 있어서 원기둥 표면에서 박리되는 유선의 가시화 실험을 통해 길이 방향으로 생겨나는 박리선의 생성 및 이동하는 3 차원적인 흐름 구조가 와류방출 주기의 약 20 배 긴 시간으로 이동하는 것을 발표했다. 그리고 Hanju 등<sup>(2)</sup>은 80~240 정도의 레이놀즈수에서 연속해서 방출하는 와류 순환의 시간계열 데이터를 스펙트럼 해석을 하므로써 후류 중에 Yokoi 등<sup>(1)</sup>과 같은 시간 스케일의 장주기 변동이 존재하는 것을 발견했다. 요코이의 2 차원 원기둥 연구에서 나타낸 박리선의 뱀 같은 움직임과 함께 박리전단층의 성장은 길이 방향으로 변화하고 있기 때문에 길이 방향에서의 국소적인 Strouhal 수도 변화하는 것으로 생각된다. 그래서 길이 방향에서는 서로 다른 와류 방출 주파수가 동시에 존재하고, 그 서로 다른 와류 방출 주파수간의 2 차 비선형간섭에 의해 주파수차에 해당하는 낮은 주파수 변동(장주기 변동)이 생기고 있는 것으로 생각된다. 서로 다른 와류방출 주파수간의 2 차 비선형간섭이 장주기변동의 주요인인지, 장주기변동의 생성과 동시에 발생하는 것인지는 현시점에서는 밝혀지지 않았지만, 2 차 비선형간섭이 존재하는 영역의 흐름구조를 규명하는 것은 장주기변동 생성 메커니즘의 규명과 연결되는 것 뿐만 아니라, 새로운 난류 제어기법의 개발로 이어질 가능성이 있다. 지금까지 서로 다른 주파수간의 비선형 간섭을 조사하기 위해 주로 고차 스펙트럼 해석법

(High Order Spectral analysis, HOS)<sup>(3-6)</sup>이 이용되었고 복잡한 해석과정이 필요했지만 최근 Vaidya<sup>(7)</sup>에 의해 주파수간의 스펙트럼 위상상관(Trans Spectrum Coherence method, TSC)법이 개발되었다. TSC 법은 주파수간의 위상을 이용하여 비선형간섭을 구하는 방법으로서, 난류의 대규모 구조를 조사하는 데 있어서 비교적 간단한 방법으로 소개된 것이다.

본 연구에서는 두 개의 서로 다른 와류방출 주파수를 발생시키기 위해 중심축이 동일 선상에 직경이 다른 두 개의 원기둥(이하 층이 진 원기둥이라 부름)이 붙어 있는 경우에 두 개의 서로 다른 주파수를 방출시켜 와류 방출간의 비선형간섭에 대해 조사했다.

## 2. 실험장치 및 측정방법

실험에 있어서는 측정부 단면이 500×240mm, 길이 2180mm 를 가지는 회류식 저속풍동을 이용하여 실험을 했다. 실험물체는 Fig. 1(a)와 같이 중심축이 동일선상에 있고, 각각 직경이  $d_1=35\text{mm}$ ,  $d_2=25\text{mm}$  가 되는 층이 진 원기둥을 사용했다. 이 때 두 원기둥의 접합부에서 발생하는 고주파 성분을 제거하기 위해 접합부는 45 도 각도로 면따기를 했다. 실험유속은 기준 직경을  $d_1$  으로 했을 때  $d_1$  으로부터의 와류방출 주파수  $f_1$  이 약 60Hz 가 되도록 10.5m/s 로 설정했다. 좌표계는 유체 흐름 방향이 X 축, 상하방향이 Y 축, 원기둥의 길이 방향이 Z 축이 되는 오른손 좌표축을 사용했고 X, Y, Z 축 방향의 속도 벡터를 각각  $u$ ,  $v$ ,  $w$  로 했다. 그리고 좌표는 원기둥의 기준 직경  $d_1$  으로 무차원화해서 사용했다. 스펙터 해석 및 TSC 해석에 사용되는 유속의 변동은 I 형 열선프로

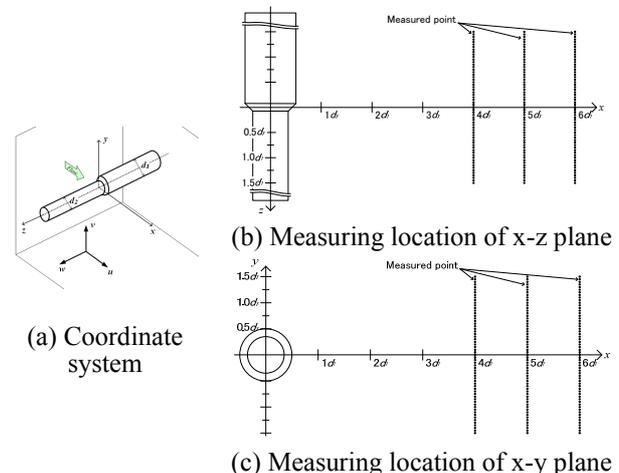


Fig. 1 Schematic view of coordinate system and measuring locations for velocity fluctuation

브 시스템을 사용하여 측정하였고, 샘플링 주파수는 1 kHz, 로패스주파수는 400 Hz로 하였고, 샘플링수는 24 만점으로 했다. 측정영역은  $(x/d_1, y/d_1, z/d_1) = (4.0\sim 6.0, 0\sim 0.5, -1.0\sim 1.0)$ 의 범위에서 행하였고, 측정간격은 X축 방향이  $1.0d_1$ 간격, Y축 방향과 Z축 방향은  $0.1d_1$  간격으로 측정하였다. 종와류의 시간 변동에 따른 변화를 조사하기 위해서는 X형 열선프로브를 이용하여 계측하였고, 샘플링 주파수는 샘플링 주파수는 5 kHz로 하고, 로패스 주파수는 1 kHz, 샘플링수는 6 만점으로 했다. 측정영역은 Fig. 1(b), (c)와 같이  $(x/d_1, y/d_1, z/d_1) = (4.0\sim 6.0, -1.5\sim 1.5, -1.5\sim 1.5)$ 로 했고, X축 방향은  $1.0d_1$  간격, Y축 방향과 Z축 방향은  $0.05d_1$  간격으로 측정했다. 종와류의 변화를 조사하는데 있어서 데이터처리 방법으로 위상집합평균처리법을 이용하였다. 이 때 기준이 되는 신호로서 원기둥 표면의 압력변화를 동시에 측정하여 기준신호로 사용했다. 두 원기둥 표면(굵은 쪽, 가는 쪽)의 압력은 표면에 설치된 압력공에 압력변환기를 연결하므로서 측정했다. 압력공의 위치는 두 원기둥( $d_1, d_2$ )의 접합부에서 40mm 떨어진 곳에 Y축 방향으로 설치하였다.

### 3. 데이터 처리방법

#### 3.1 스펙트럼 위상 해석(특정 위상차 TSC 법)

스펙트럼의 위상해석에는 특정위상차 TSC 법을 사용했다. TSC 란 복수의 주파수성분이 서로 다른 주파수간에서 비선형간섭이 발생되고 있는지를 조사할 때 효과가 있는 기법이다. 2 차 비선형간섭이란 아래의 식과 같이 두 개의 서로 다른 주파수  $f_1$  과  $f_2$  를 가지는 파동인  $X_1(t)$ 와  $X_2(t)$  두 개의 파동의 곱셈으로 표현되는 새로운 파동  $Y(t)$ 가 생성되는 것이다.

$$X_1(t) = A_1 \cos(2\pi f_1 t + \phi_1) \tag{1}$$

$$X_2(t) = A_2 \cos(2\pi f_2 t + \phi_2) \tag{2}$$

$$Y(t) = X_1(t)X_2(t) \\ = (1/2) [A_1 A_2 \cos\{2\pi(f_2 + f_1)t + (\phi_2 + \phi_1)\} \\ + A_1 A_2 \cos\{2\pi(f_2 - f_1)t + (\phi_2 - \phi_1)\}] \tag{3}$$

이것은 좁은 의미로 비선형모델이라 하고, 동시에 존재하는 두 개의 주파수 파동에 대해 2 차 비선형간섭이 일어나면 두 주파수의 합의 성분파와 차의 성분파가 생성된다. 본 연구에서 사용한 TSC 처리에 있어서는 주파수  $f_1$  을 가지는 파동의 위상각  $\phi_1$  과 주파수  $f_2$  를 가지는 파동의 위상각  $\phi_2$  에 대해 두 개의 주파수차에 해당하는 주파수  $f = |f_2 - f_1|$  를 가지는 파동의 위상각  $\phi$ 와 합에 해당하는 주

파수  $f_+ = f_1 + f_2$  를 가지는 파동의 위상각  $\phi_+$ 를 검출하는 것이다.  $f_1$  과  $f_2$  의 주파수를 가지는 파동간의 2 차 비선형간섭이 일어나면 식 (3)의 파동이 발생하고, 아래의 식이 성립한다.

$$\Delta\theta_- = \phi_- - |\phi_1 - \phi_2| = 0 \tag{4}$$

$$\Delta\theta_+ = \phi_+ - (\phi_1 + \phi_2) = 0 \tag{5}$$

기준이 되는 주파수  $f_1$  을 고정하고  $f_2$  를 여러가지로 변화시켜 처리를 하면 식 (4)와 식 (5)가 성립되는 정도를 상관으로 구하는 지표가 본 연구에서 이용한 TSC 해석이다. 즉 기준이 되는 주파수  $f_1$  에 대해 2 차 비선형간섭이 강하게 나타나는 주파수에서 강한 상관을 나타내는 것이다.

#### 3.2 위상집합평균 처리

위상집합평균 처리를 하기 위한 저주파(장주기) 기준신호를 얻기 위해 다음과 같은 수순으로 처리를 했다. 우선 각각의 원기둥에 삽입한 압력변환기에서 나오는 신호의 노이즈를 제거하기 위해 각각의 원기둥에서 나오는 예상 와류방출 주파수부근을 통과하는 디지털 밴드패스처리를 한다. 다음에 노이즈를 제거한 두 개 신호를 곱하므로써 두 개의 주파수의 합과 차의 파동을 가지는 신호를 얻을 수 있다. 그리고 그 신호 중에 차의 주파수성분 부근을 통과하는 디지털 밴드패스 처리를 하므로써 저주파(장주기) 기준신호를 얻는다. 이 신호의 D.C.성분은 제거되어 있고, 가산처리를 행하는 위상의 시작점은 값이 마이너스(-)에서 플러스(+)의 값으로 변하는 제로크로스점으로 정했다. 압력변환기의 신호와 동시에 샘플링을 한 유속 데이터를 가지고 저주파 기준신호를 이용한 위상집합평균 처리를 행하므로써 기준신호 1 주기분을 60 등분한 각 위상의  $y-z$  단면의  $v-w$  유속 벡터 분포를 얻었다(기준신호의 파장은 변동이 있었기 때문에 파장  $l$ 에 대해 표준편차  $\sigma$ 를 구하고, 파장의 평균치  $lm$ 에서  $+0.5\sigma$ 의 범위에 있는 파장의 데이터만 가산 처리했다).본 연구에서는 기준신호를

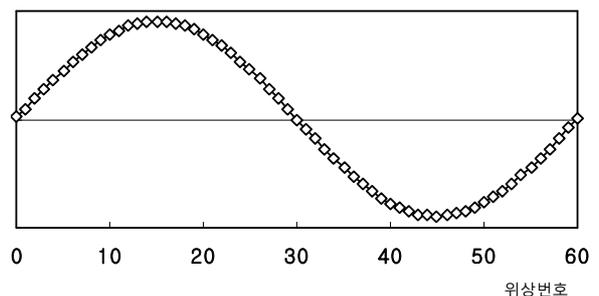


Fig. 2 Ensemble averaged basic signal

위상집합평균 처리 한 결과 Fig. 2 와 같이 1 주기분의 사인(sine)파형이 얻어졌다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 비선형간섭에 의한 와류방출 주파수의 변화  
 Fig. 3 은 기준 원기둥 직경  $d_1$  의 4 배 하류

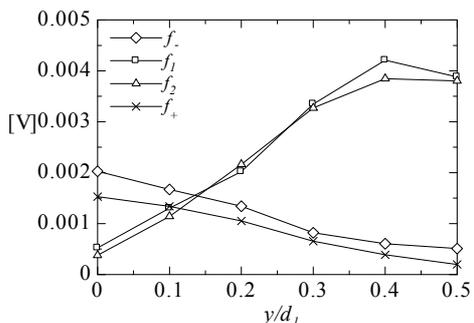
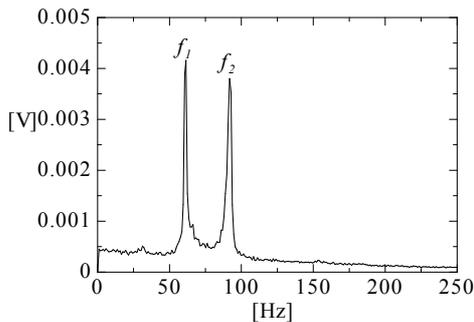
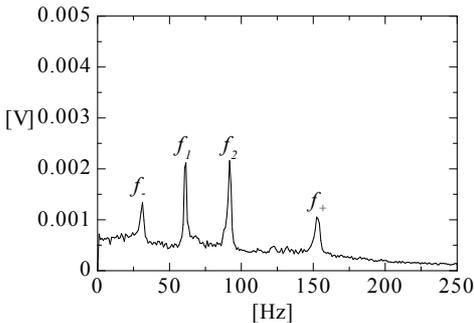
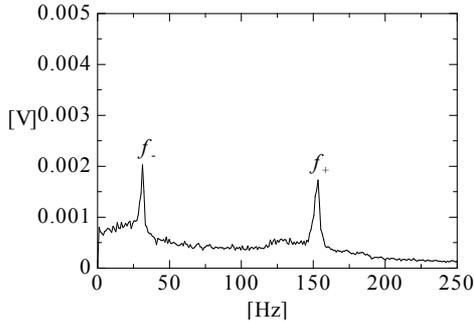


Fig. 3 Power spectra of velocity fluctuation behind the cylinder

$((x/d_1, y/d_1, z/d_1)=(4, 0, 0))$  부근에서  $y$  좌표를 0 에서  $0.5 d_1$  까지  $0.1 d_1$  간격으로 이동시키면서 각 지점에서의 유속변동을 측정하고, 비선형간섭에 의한 와류방출 주파수의 변화가 잘 보이는 세 개 지점(Fig. 3(a), (b), (c))의 FFT 해석결과를 나타내고 있다. Fig. 3(a)와 같이 층이 진 원기둥의 접합부 중앙의 후류에서는 각각의 원기둥( $d_1, d_2$ )에서의 와류방출 주파수( $f_1, f_2$ )를 볼 수 없고, 비선형간섭의 산물인 합( $f_+$ )과 차( $f_-$ )의 주파수 성분만 나타나고 있다. 이 측정점에서 Y 축방향으로 이동한 측정점에서의 FFT 해석결과가 Fig. 3(b), (c)이다. Fig. 3(b), (c)와 같이 Y 축의 정(플러스)방향으로 이동시키면 시킬수록  $f_+$ 와  $f_-$ 의 스펙트럼은 작아지고,  $f_1$  과  $f_2$  의 스펙트럼은 크게 변하는 것을 알 수 있다. Fig. 3(d)는  $(x/d_1, z/d_1)=(4, 0)$ 의 단면에서  $y/d_1=0\sim 0.5$ 에 걸친  $f_-, f_+, f_1, f_2$  각 주파수의 파워스펙트럼의 피크값을 나타낸 것이다. Fig. 3(d)와 같이 원기둥 후류 중심축 부근( $y/d_1=0$ )에서  $f_-, f_+$ 의 스펙트럼이 크게 됨을 알 수 있다. 그리고 측정점을 Z 축방향으로 이동시키면 이동시킨 쪽의 원기둥의 와류방출 주파수성분이 강하게 나타난다. 그렇기 때문에 층이 진 원기둥의 중심축 후류 부근에서 비선형간섭이 강하게 발생하고 있다고 생각된다. 본 실험에서는 직경  $d_1$ 의 원기둥에서 나오는 와류방출 주파수  $f_1$ 을 기준으로 해서 TSC 해석을 했다. Fig. 4 는 Fig. 3(a), (b)의 측정점에 있어서  $f_1$ 을 기준으로 해서 TSC 해석을 행한 결과를 나타내고 있다. 그림의 가로축은 와류방출 주파수를 세로축은 비선형간섭의 세

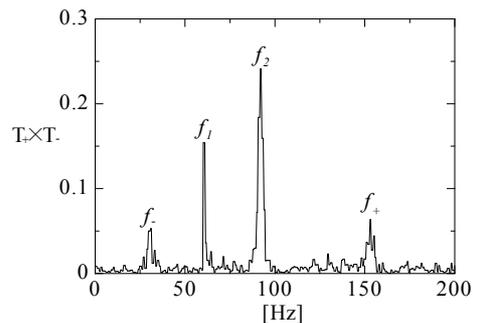
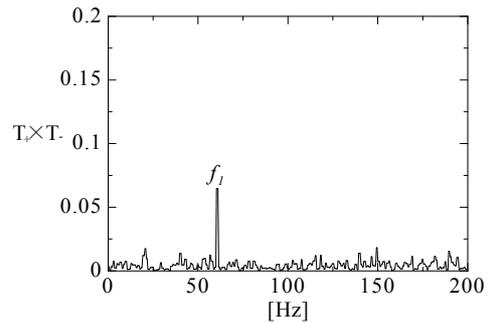


Fig. 4 Result of TSC analysis that be based on the  $f_1$

기( $T_+ \times T_-$ )를 나타내고 있다.  $T_+$ ,  $T_-$ 는 3.2 절에서 설명한 다수의  $\Delta\theta_+$ ,  $\Delta\theta_-$ 를 푸리에변환 한 평균치이다. 2차 비선형간섭이 강할수록  $T_+$ 와  $T_-$ 는 어느 쪽이든 1에 가까운 값이 되고, 약할수록 0에 가까운 값이 된다. Fig. 4에서는  $T_+$ 와  $T_-$ 가 모두 강한 부분인 것을 알 수 있듯이  $T_+ \times T_-$ 의 값에서 나타나고 있다. Fig. 3(a)와 같이  $f_1$ 와  $f_2$ 만의 주파수가 현저하게 나타나는 점  $(x/d_1, y/d_1, z/d_1) = (4, 0, 0)$ 의 TSC 해석 결과는 Fig. 4(a)와 같이  $f_2$ 와의 2차 비선형간섭이 검출되지 않았다. 이것은 이 점에 있어서는  $f_1$ 과  $f_2$ 가 존재하지 않았기 때문에 2차 비선형간섭이 발생하지 않았기 때문이고, 현저한  $f_+$ 와  $f_-$ 의 스펙트럼 피크는 상류에서 생긴 비선형간섭의 결과로 생각된다. Fig.

4(b)는 네 개의 주파수가 현저히 나타난 점인  $(x/d_1, y/d_1, z/d_1) = (4, 0, 2, 0)$ 의 TSC 해석결과이다. 그림과 같이 TSC 해석결과로 알 수 있듯이 층이진 원기둥 중심축에서 조금  $y$  방향으로 이동한 후류 부근에서 현저한 비선형간섭이 발생하고 있는 것을 알 수 있다.

4.2 위상집합평균 처리 결과와 고찰

위상집합평균 처리 결과는 3.2 절에서 설명한 것처럼 위상번호 0~60번까지 구성되어 있다. 0번과 60번은 같은 위상이므로 이 이후의 고찰에서는 0~59번의 위상집합평균 결과를 가지고 설명한다. 그리고 본 실험에서 층이진 원기둥의 후류의 속도 변동을 측정할 세 개의 단면( $x/d_1=4$ ,  $x/d_1=5$ ,  $x/d_1=6$ )중에서 시간계열의 와류 변화가 잘 보였던  $x/d_1=5$  단면을 대표적으로 예를 들어 설명하겠다. Fig. 5가  $x/d_1=5$  단면의 대표적인 위상각에서의  $v-w$  속도 벡터를 나타낸 것이다. Fig. 5와 같이  $x/d_1=5$  단면에서는  $v-w$  속도 벡터의 변화가  $y/d_1=0$ 을 중심으로 상하가 대칭이 되어 있는 유동장이다. 그리고 위상번호 4번과 45번을 기점으로 해서  $z/d_1 \geq 0$ ,  $-0.8 \leq z/d_1 \leq 0.8$  영역에서  $w$  속도 벡터의 방향이 변하는 것 뿐만 아니라 상하 명확히 종방향 와류가 생성되고 그 와류의 중심이 시간이 지남에 따라 이동하는 것을 알 수 있다. 그 와류의 가장 가장자리는  $(y/d_1, z/d_1) = (0, 0.1)$  부근이고, 이 점에서는 Fig. 5(d)와 같이  $v$ 와  $w$ 의 방향이 대칭이 되고 있다. 본 연구에서는 속도의 방향이 대칭이 되는 이 점을 안장점(saddle point)이라 명명했다. 위상번호 12~42에서는  $z/d_1 = 0.0 \sim 0.25$  부근에서 정체를 하고, 위상번호 43~48에서 Z축상의 플러스 방향으로 반대로 되돌아 가고 있는 것을 알 수 있다. 위상 번

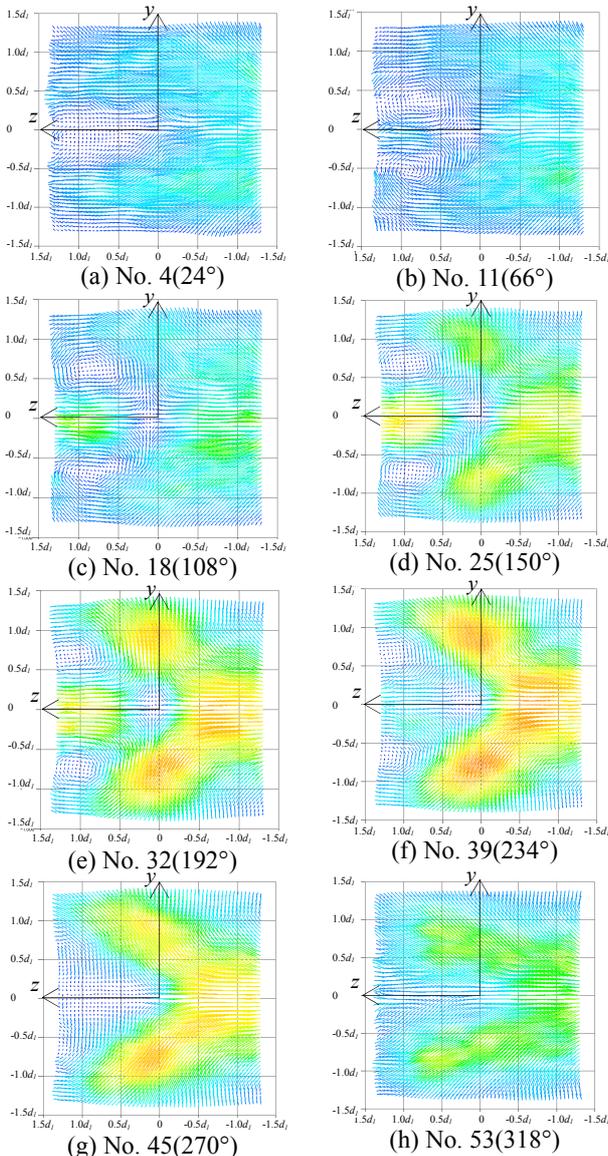


Fig. 5 Changing of vector distribution at  $y-z$  plane with time ( $x/d_1=5$ )

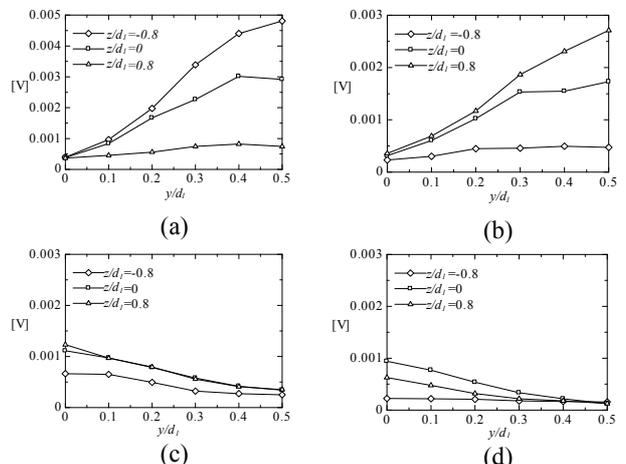


Fig. 6 The maximum value of power spectra with  $y/d_1$  and  $z/d_1$  ( $x/d_1=5$ )

호 12~42 에서  $(y/d_1, z/d_1)=(0,0)$  부근에 안장점이 존재하고 있는 것으로 봐서 장주기 변동의 한 주기 중 절반의 시간 동안 종와류의 중심이  $(y/d_1, z/d_1)=(0,0)$  부근에서 정체하고 있었다는 것을 증명한다. 그렇기 때문에 Fig. 5 과 같이 시간평균의 벡터 분포에서도 안장점이  $(y/d_1, y/d_1, z/d_1)=(0, 0.25, 0)$  부근에 존재하고 있다. 안장점에서는 흐름이 y 방향으로 모여서 z 방향으로 움직이는 것을 봐서 후류 중심에서 y 방향으로 조금 떨어진 곳에서 생긴 비선형간섭에 의해 생성된  $f_+$  과  $f_-$ 의 속도변동이 안장점으로 옮겨진 것으로 사료된다. Fig. 5(b)와 같이 위상번호 11 에 있어서 속도 벡터분포는  $(y/d_1, z/d_1) = (\pm 0.5, 0.75)$  부근에서 상하로 소규모의 종와류 구조가 보인다. 이 종와류는 위상번호 18(Fig. 5(c))에 있어서는  $(y/d_1, z/d_1) = (\pm 0.65, 0.85)$  부근, 위상번호 25(Fig. 5(d))에 있어서는  $(y/d_1, z/d_1) = (\pm 0.75, 1.0)$  부근, 위상번호 32(Fig. 5(e))에 있어서는  $(y/d_1, z/d_1) = (\pm 0.7, 1.1)$  부근, 위상번호 39(Fig. 5(f))에 있어서는  $(y/d_1, z/d_1) = (\pm 0.7, 1.3)$  부근으로 시간이 지남에 따라 이동함을 알 수 있다. 이와 같이 이 종와류는 시간이 지남에 따라 두 개의 와류 중심이 떨어지면서 Z 축의 플러스 방향으로 이동하는 것으로 사료된다.

#### 4.3 종와류의 발생과 비선형간섭의 관련성

Fig. 6 은 층이 진 원기둥 직경의 5 배 하류 ( $x/d_1=5$ )의 y-z 단면 중 종와류가 발생하는 영역 ( $0 \leq y/d_1 \leq 0.5, -0.8 \leq z/d_1 \leq 0.8$ )에서 비선형간섭에 의해 발생하는 주파수 성분  $f_+$  와  $f_-$  각 원기둥으로부터의 와류 방출 주파수인  $f_1$  과  $f_2$  의 z 좌표 변화( $z/d_1 = 0.8, 0, 0.8$ )와 y 좌표의 변화에 따른 파워 스펙트럼 값을 나타내고 있다. Fig. 6 의 가로축은  $y/d_1$  을 세로축은 스펙트럼의 크기를 나타내는 전압[V]을 나타내고 있다. Fig. 6(a), (b)와 같이 와류방출 주파수  $f_1$  과  $f_2$  의 스펙트럼 피크는 모두  $y/d_1$  의 증가와 함께 값이 커지고, 직경  $d_1$  의 원기둥 후류에서는  $f_1$  이 강하게 나타나고, 직경  $d_2$  의 원기둥 후류에서는  $f_2$  의 파워 스펙트럼이 크게 나타나고 있다. 그렇기 때문에  $f_1$  과  $f_2$  의 파워스펙트럼의 최대값은 각각의 원기둥에서 나오는 와류방출의 영향이 크다고 말할 수 있다. Fig. 6(c), (d)의  $f_+$  와  $f_-$  는 어느 쪽의 파워스펙트럼이든  $y/d_1$  의 증가와 함께 작아지고 있다. 따라서 비선형간섭에 의해 생기는 주파수 성분인  $f_+$  와  $f_-$  는  $y/d_1=0$  부근에서 뚜렷히 보이고, 그 부근의 흐름 구조에 기인하고 있는 것으로 사료된다. 그리고 Fig. 6(c), (d)에서  $z/d_1$  좌표에 따른

차이를 비교하면  $z/d_1=-0.8$  에서 보다도  $z/d_1=0.8$  에서 보다 강한(선명한)  $f_+$  과  $f_-$ 의 파워스펙트럼 값을 볼 수 있다. 이것은 4.2 절에서 설명한 것과 같이 안장점이  $z>0$  쪽에서 발생하여 Z 축의 정방향으로 움직이기 때문으로 사료된다.

## 5. 결론

본 연구는 두 개의 와류방출 주파수간의 비선형간섭의 특성을 조사하기 위해 직경이 다른 층이 진 원기둥을 이용하여 인위적으로 두 개의 와류방출 주파수를 발생시켜 비선형간섭의 특성을 조사함과 동시에 종와류와의 관계를 규명한 연구이다. 그 결과 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 비선형간섭에 의해 생기는  $f_+$  와  $f_-$ 의 주파수 성분은 층이 진 원기둥의 접합부 중앙부 영역에서 발생하는 것을 알 수 있었다.

(2) 층이 진 원기둥 중심축 후류 부근에서는 비선형간섭의 산물로서 생긴  $f_+$  와  $f_-$ 만이 확인됐지만, 그 위치에서는 비선형간섭이 발생하지 않는다. 층이 진 원기둥의 접합부 중심에서 y 방향으로 조금 이동한 위치에서 비선형간섭에 의해 생성된  $f_+$  와  $f_-$ 의 변동 웨이크중심이 안장점으로 옮겨지는 것을 알았다.

(3) 저주파성분을 기준으로 한 위상집합평균으로 인해 종와류의 발생 → 성장 → 소실의 과정을 확인 할 수 있었고, 이 종와류가 두 개의 서로 다른 와류방출 주파수의 차와 일치하는 주기로 일어나고 있다는 것을 확인할 수 있었다.

## 참고문헌

### (References)

- (1) Yokoi, Y. and Kamemoto, K., 1991, "The Initial Stage of a Three-Dimensional Vortex Structure Existing in a Two-Dimensional Boundary Layer Separation Flow," *Trans. of the JSME(B)*, Vol. 57, No. 534, pp. 427~433.
- (2) Haniu, H., Sakamoto, H., Nakamura, J. and Obata, Y., 1995, "Long Time Scale Fluctuation in the Irregularity of Vortex Shedding," *Trans. of the JSME(B)*, Vol. 61, No. 582, pp. 379~387.
- (3) Collis, W.B., White, P.R. and Hammond, J.K., 1998, "Higher Order Spectra: the Bispectrum and Trispectrum," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.12, No. 3, pp. 375~394.
- (4) Lii, K. S., Resenblatt, M. and Van Atta, C., 1976, "Bispectral Measurements in the Turbulence," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 77, pp. 45~62.

- (5) Kim, Y. C. and Powers, E. J., 1979, "Digital Bispectral Analysis of Self Excited Fluctuation Spectra," *The Physics of Fluids*, Vol. 21, pp. 2406~2416.
- (6) Kim, Y. C. and Powers, E. J., 1979, "Digital Bispectral Analysis and Its Applications to Nonlinear Wave Interaction," *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol.PS-7, pp. 120~131.
- (7) Vaidya, P.J. and Anderson, M.J., 1991, "Use of the Trans-Spectral-Coherence Technique to Separate Signal from Noise," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 89, pp. 2370~2377.