

## 단독 원기둥 주위의 후류유동에 관한 연구<sup>§</sup>

이재성\* · 김상일\* · 승삼선\*\*†

\* 강원대학교 기계공학과, \*\* 강원대학교 기계설계공학과

### Study of the Wake Flow Around a Circular Cylinder

Jaesung Lee\*, Sangil Kim\* and Samsun Seung\*\*†

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

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

(Received June 15, 2015 ; Revised September 9, 2015 ; Accepted September 10, 2015)

**Key Words:** Cross Flow Vibration(횡진동), Vortex Efflux Angle(와류 퍼짐각), Circularcylinder(원기둥), Visualization Test(가시화실험)

**초록:** 본 연구는 탄성지지된 단독원기둥의 후류에 관한 실험적연구이다. 본 실험은  $1.4 \times 10^4 \leq Re \leq 3.2 \times 10^4$ 의 레이놀즈수 범위에서 이루어졌으며, 원기둥 후류의 위치별 유속을 측정하여 후류에서 발생하는 와류의 생성에서 소멸까지의 과정 및 와류의 이동 궤적을 조사한 연구이다. 아울러 강제진동실험장치를 이용한 가시화실험을 통하여 풍동실험에서의 결과를 증명하였다. 그 결과 다음과 같은 결과를 얻었다. 1) 흐르는 유체에 존재하는 원기둥의 후류에 생성되는 와류의 생성→성장→소멸 과정을 확인 할 수 있었다. 2) 와류의 퍼짐각도는  $16^\circ \sim 17^\circ$  가량으로 주류속의 변화와 유력진동의 유무에 상관없이 일정하다. 3) 후류에서 변동 유속의 스펙트럼 분석을 통해 와류의 중심이 이동하는 궤적을 유추할 수 있었고, 가시화 실험을 통해 그것을 확신할 수 있다.

**Abstract :** This experimental study investigated the wake flow around an elastically supported circular cylinder. In this study, the Reynolds numbers are varied in the region of  $1.4 \times 10^4 \leq Re \leq 3.2 \times 10^4$ . Under these conditions, we have captured the process of the wake mechanism and the moving path of the vortex by measuring the velocity at each position in the wake around the cylinder. Further, these facts from the wind tunnel test are proved by a flow visualization test through a water channel. From the result, we have arrived at the following conclusions : i) The process (formation→growth→collapse) of vortex is observed in the wake around the cylinder, ii) The vortex efflux angle is approximately  $16^\circ \sim 17^\circ$  under the experimental conditions. These angles have no relationship with the velocity change and the existence of flow-induced vibrations of the cylinder, and iii) The moving path of the vortex center is obtained by spectrum analysis of the fluctuating velocity behind the cylinder. These are confirmed by conducting visualization tests.

- 기호설명 -

$D$  : 원기둥 직경[mm]  
 $U_r$  : 환산 유속[-]  
 $V$  : 주류속도[m/s]  
 $f_n$  : 고유진동수[Hz]

$Re$  : 레이놀즈수  
 $\nu$  : 공기의 동점성계수[m<sup>2</sup>/s]  
 $a$  : 원기둥의 유력진동 진폭[mm]

### 1. 서 론

우리 주변에서 송전선, 교각, 굴뚝 및 각종 열교환기의 파이프 등 흐르는 유체에 존재하는 구조물 중에서 가장 많이 존재하는 형상 중 하나가 원기둥형 구조물이다. 그렇기 때문에 원기둥이 있는

§ 이 논문은 2015년도 대한기계학회 강원지회 춘계학술대회(2015. 5. 22., 강원대) 발표논문임

† Corresponding Author, sseung@kangwon.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

유동장에 관한 연구는 지금까지 많이 행해져 왔다. 그런 원기동에 관한 연구는 크게 네 종류로 분류할 수 있는데 첫 번째가 양력 및 항력 등을 다루는 유체력<sup>(1,3)</sup>에 관한 연구, 두 번째는 원기동의 유력진동에 관한 연구,<sup>(4,5)</sup> 세 번째는 유체력 및 유력진동을 제어하는 연구<sup>(2,6,7)</sup>, 마지막 네 번째는 원기동의 후류에 대한 연구<sup>(4,5,8,9)</sup>이다. 먼저 유체력에 대한 연구로 Xianzhi<sup>(1)</sup>는 직경이 다른 세 원기둥( $D_1=6\text{cm}$ ,  $D_2=8.9\text{cm}$ ,  $D_3=12.2\text{cm}$ )의 배열 순서를 여러 가지로 조합하여 유체 흐름에 수평방향인 직렬 배열일 때의 양력과 항력계수의 변화를 조사한 연구가 있고, Alam<sup>(3)</sup>은 직경이 49mm 인 두 원기둥을 직렬로 배열시켜, 두 원기둥의 간격(0~8D) 변화에 따른 유체력 변화를 조사하였다. 아울러 상류 원기둥으로부터의 박리 전단층이 하류 원기둥에 어떻게 접촉을 하는지도 유체력과 관련지어 조사하였다. 원기둥의 유력진동에 관한 연구로 Kim<sup>(4,5)</sup>은 직경 ( $D=66\text{mm}$ )이 같은 두 원기둥을 탄성 지지시키고, 직렬<sup>(4)</sup> 및 병렬<sup>(5)</sup>로 배열하여 원기둥간의 거리를 실험변수로 하여 유력진동 특성을 조사하였고, 진동 발생 메커니즘을 가시화실험으로 규명하였다. 원기둥의 유체력 및 유력진동을 억제하는 연구로 Alam<sup>(2)</sup>은 두 원기둥( $D=49\text{mm}$ )을  $0^\circ\sim 180^\circ$  사이로 대각선 배열시키고, 원기둥의 간격을  $0.1D\sim 5D$ 로 변화를 주면서 이 때 유체력을 억제하는 방법으로서 원기둥 표면에 직경 5mm의 트립핑 와이어를 설치하여 양력과 항력의 변화를 조사하였고, Kim<sup>(6,7)</sup>은 직렬 배열된 원기둥<sup>(6)</sup> 및 단독 원기둥<sup>(7)</sup>의 유력진동을 원기둥 표면에 부착하는 트립핑 로드<sup>(6)</sup>의 부착각도( $20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 45^\circ$ )에 변화를 주거나 원기둥 뒷면에 플렉서블 쉬트를 부착하여 원기둥의 유력진동 특성을 조사하므로 진동 억제 방법과 그 메커니즘을 연구하였다. 후류에 관한 연구로 Bearman<sup>(8)</sup>은 단독 및 복수의 원기둥 유력진동 특성과 유체력 특성을 가시화 실험<sup>(4,5,9)</sup>을 통해 후류의 거동을 조사하는 것으로 규명하였다. 본 실험은 주류 유속의 변화에 따른 단독 원기둥 후류의 유속 분포를 위치에 따라 조사하는 것으로 후류에서 발생하는 와류의 생성 → 성장 → 소멸의 과정을 명확히 나타낼 수 있었고, 여기서 얻어진 결과를 가시화실험을 통해 확인하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

본 실험의 자유진동 실험에 사용한 풍동은 측정부 단면의 폭과 높이가  $400\times 1000\text{mm}$ , 길이 1200mm 인 측정부를 가지는 개방형이다. 자유진

동 실험장치는 풍동 측정부의 바깥쪽에 설치되어 풍동 모터로부터의 진동 영향을 받지 않도록 설치되어 있다. 한편 자유진동 실험 장치는 Fig. 1 과 같이 알루미늄 프로파일 (DF3060)을 외형 프레임으로 사용했고, 진동 물체인 원기둥을 지지할 수 있는 구조로 설계되어 있다. 진동 물체인 원기둥은 Fig. 1 과 같이 두께 0.3mm 인 두 장의 인칭동판 재질의 판스프링과 두 개의 코일스프링이 상호 자유진동 실험장치의 프레임에 설치가 되어 유체의 흐름 방향에 직각 방향인 수직 방향으로만 진동(cross flow vibration)이 일어날 수 있도록 설치되어 있다. 진동 물체로 사용된 원기둥은 경량화를 위해 직경( $D$ )이 66mm 인 종이 재질의 파이프형 물체를 사용했고, 표면의 조도를 낮추기 위해 0.1mm의 비닐 필름을 표면에 접착하여 원기둥 표면에서 전단층의 박리가 표면조도로 인해 장애가 생기지 않도록 하였다. 그리고 원기둥을 지지하고 있는 중심축은 10mm 직경의 알루미늄 재질의 봉을 사용하였다. 알루미늄 중심축과 원기둥 사이에는 얇은 플라스틱 원판을 삽입시켜 지지시

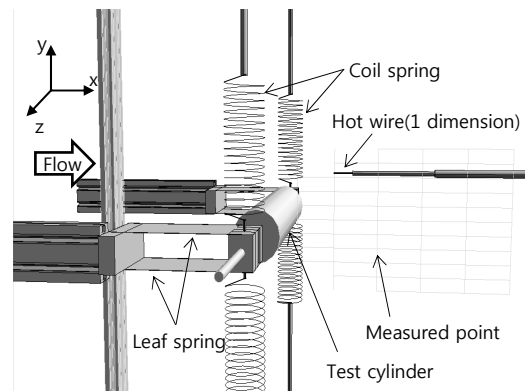


Fig. 1 Free-vibration experimental equipment and coordinate system

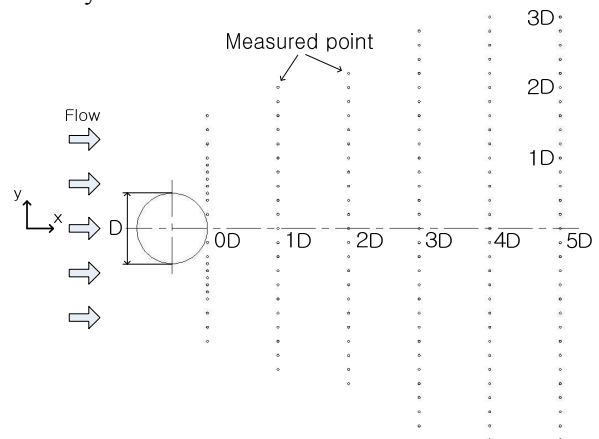


Fig. 2 Position of velocity measurements by one dimensional hotwire probe

키는 방법을 택했다. 이와 같이 경량화를 꾀한 원기둥의 무게는 267g 이고, 고유진동수는 10.2Hz 로 나타났다. 이 원기둥의 진동진폭 및 진동수는 레이저 변위계로 측정을 했다. 그리고 원기둥 후류의 유속은 Fig. 1 과 같이 열선프로브로 측정하였다. 이 때 원기둥으로부터 방출되는 와류의 주파수 및 와류강도도 열선프로브로 측정하였다. 이와 같이 열선프로브에 의한 유속측정은 샘플링 주파수 500Hz, 추출 데이터수 10000 개의 밀도로 측정되어 유속은 평균 유속값을, 와류의 주파수 및 와류강도는 FFT 해석을 통한 파워스펙트럼 분석을 통해 실험 결과를 분석했다. Fig. 2 는 원기둥 후류의 유속을 열선프로브로 측정한 위치를 나타내고 있다. Fig. 2 처럼 본 실험에서는 원기둥에서 원기둥 직경(D)의 다섯 배(5D) 떨어진 곳까지 1D 간격으로 여섯 곳, y 축 방향으로는 0.2D 간격으로 최대 3D 까지 측정하였다. 이 때 주류의 유속은 원기둥의 진동진폭이 최대가 되는 유속을 기준으로 해서 진동이 발생하기 전의 저속과 진동이 사라지는 고속에서 모두 세 곳의 유속에서 후류의 유속분포와 와류강도를 조사했다. 구체적으로 본 실험에서 채택한 환산유속  $U_r(=V/f_n \cdot D)$  은 원기둥의 진동진폭이 최대가 되는 6.36, 진동이 없는 저속은 4.43, 진동이 사라지는 고속은 10.35 일 때를 대표유속으로 삼아 각각의 대표유속에서 후류의 유속 분포 및 와류강도를 조사하였다.

자유진동 실험에서의 원기둥 주변의 흐름을 조사하기 위한 가시화 실험에 있어서는 수로 실험장치에서 물의 전기분해에 의한 수소기포를 이용한 실험을 통하여 원기둥의 진동 유무에 따른 원기둥 후류의 흐름패턴을 조사했다. 자유진동 실험을 재현하기 위한 가시화 실험장치에 이용된 원기둥의 직경은 20mm 로 했고, 원기둥의 유력진동은 모터의 회전을 왕복운동으로 변환시켜주는 크랭크를 이용하여 재현하였다. 가시화 실험은 진동이 없는 패턴과 진동이 있는 패턴 두 가지로 실험을 하였고, 모두 레이놀즈수는 1000 이하로 하였다. 그리고 진동이 있는 자유진동의 재현은 환산유속  $U_r$  을 일치시켜 상사를 이루게 했다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 각 유속에서의 후류의 유속 분포

Fig. 3 은 원기둥에 유력진동이 발생하지 않는 저속( $U_r=4.43$ ), 유력진동 진폭이 최대가 되는 환산유속( $U_r=6.36$ ), 유력진동이 사라지는 고속( $U_r=10.35$ )

에서 원기둥 후류의 각 위치별 유속을 나타내고 있다. 원기둥 후류의 x 축 방향으로 0D에서 5D 까지 y 축 방향으로 최대 3D 까지 유속 측정을 하였지만 이해도를 높이기 위해 y 축의 스케일은 간소화 하였다. Fig. 3 에서 나오는 화살표의 시작점은 유속을 측정한 지점이고 화살표의 길이는 유속에 비례하게 나타낸 것이다. 본 실험에서는 이해도를

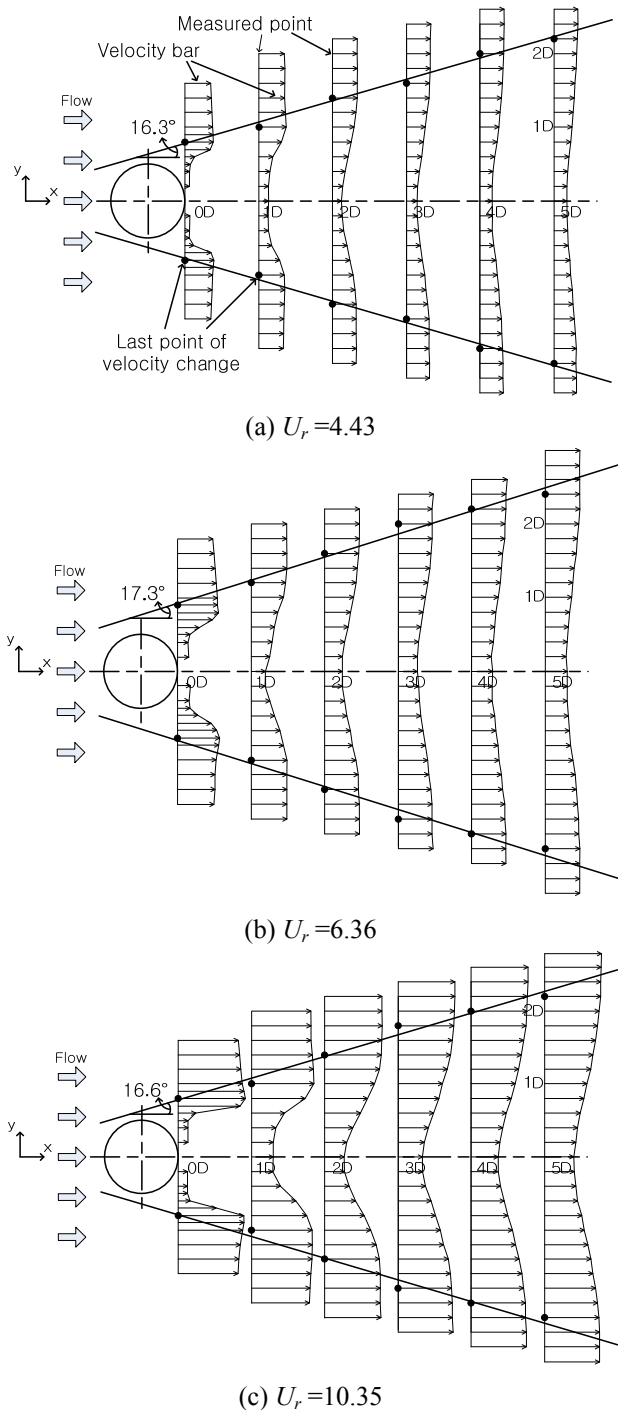
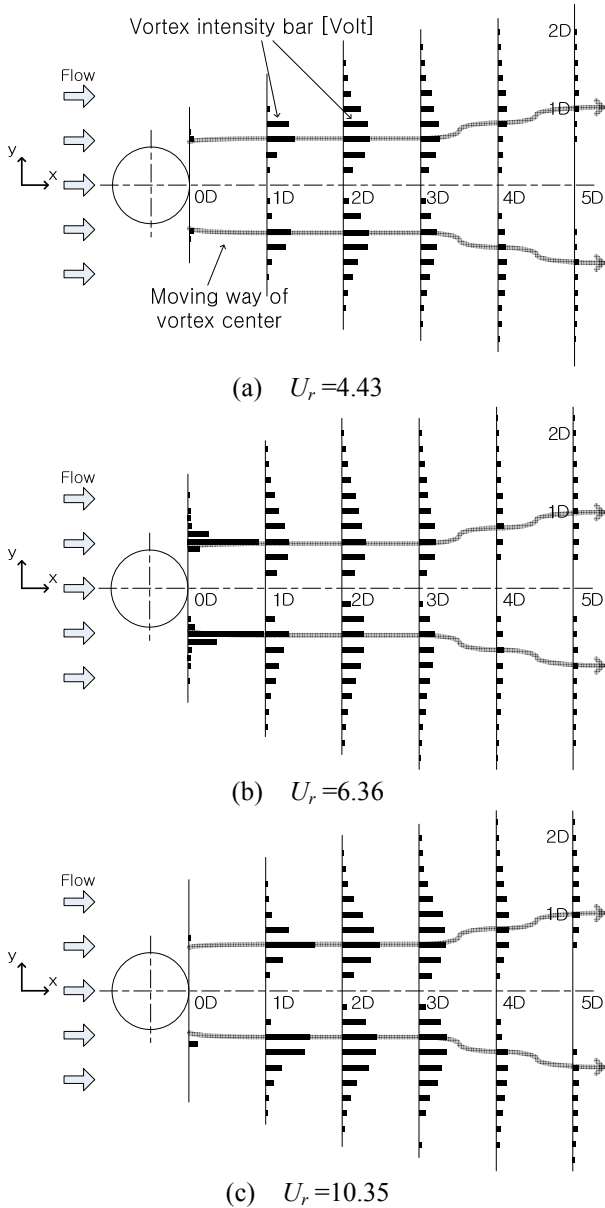


Fig. 3 Velocity distribution at each velocity in the wake of a cylinder



**Fig. 4** Energy distribution at each velocity in the wake of a cylinder

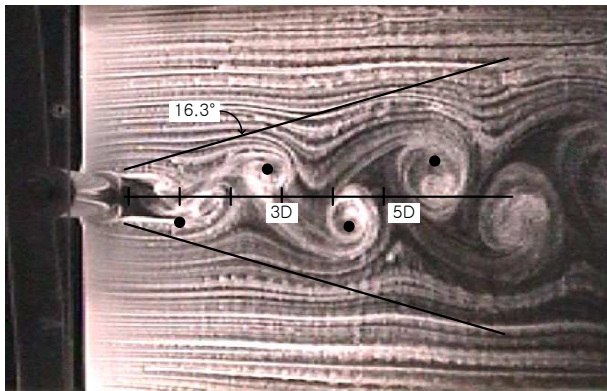
높이기 위해 세 가지 환산유속 중 가장 큰 환산유속인  $U_r=10.35$  일 때의 유속을 기준으로 해서  $U_r=6.36$  일 때와  $U_r=4.43$  일 때의 유속을 비례적으로 나타냈다. 그리고 이 화살표의 크기는 자유유속을 환산유속으로 무차원화 했을 때도 같은 결과를 나타낸다. Fig. 3 과 같이 모든 유속에서 원기동 후류의 유속 분포는 x 축을 기준으로 상하가 대칭적으로 변하고 있다는 것을 알 수 있다. 이것은 원기동으로부터 나오는 전단층의 박리가 상하 대칭적으로 이루어지고 있기 때문으로 생각할 수 있다. 그리고 Fig. 3 (a), (b), (c)에는 후류의 유속이 주류의 유속과 같아지는 지점에 “●”의 표시가 되어

있다. 이 표시(●)으로 알 수 있는 것은 이 지점이 원기동 후류에서 발생하는 와류의 이동 경로에서 가장 바깥자리를 의미한다는 것을 알 수 있다. 그러므로 원기동 후류에서 발생하는 와류의 이동 경로는 유체의 흐름방향인 x 축 방향으로 V 자 형태로 퍼지면서 이동하고 있는 것을 알 수 있다. 아울러 Fig. 3 (a), (b), (c)에는 이 점들의 규칙적인 변화를 조사하기 위해 추세선을 그어 그 기울기를 각도로 분석한 결과  $16^\circ \sim 17^\circ$  부근이라는 것을 알 수 있다. 이것은 유속의 변화와 원기동의 진동 유무에 상관없이 원기동 후류에서의 와류의 이동 경로(퍼짐각도)는 거의 일치함을 의미한다. 단지 Fig. 3(b)와 같이 원기동에 유력진동이 발생하는  $U_r=6.36$  에서는 원기동의 진동진폭이 직경의 20% 정도로 발생하고 있는 만큼 추세선이 y 축 방향으로 수평이동하여 Fig. 3(a), (c)의 경우에 비해 상하의 추세선간의 거리가 넓어진 것을 알 수 있다.

3.2 후류의 스펙트럼 분석

Fig. 4 는 Fig. 2 에 나타난 각 유속별로 각 위치에서 측정된 속도 변동의 데이터를 FFT 해석을 통해 얻어진 파워스펙트럼의 결과를 나타내고 있다. 파워스펙트럼의 결과는 전압의 단위인 볼트[V]로 나타나게 되는데 이 볼트의 크기로 와류의 강도를 알 수가 있다. 이것은 곧 와류의 에너지를 의미한다. Fig. 4 는 각 위치에서의 에너지의 크기를 막대 그래프로 나타내고 있고, 막대 그래프의 크기는 에너지의 최대값이 존재하는  $U_r=6.36, 0D$  일 때의 에너지 크기를 기준으로 해서 나타냈다. Fig. 4 의 스펙트럼 결과와 같이 모든 위치에 있어서 에너지의 크기는 서로 다르지만 원기동 중심인 x 축을 기준으로 상하 대칭의 모양으로 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 4(a), (c)와 같이 유력진동이 없는 원기동 후류에서 생기는 와류는 거리에 따라 생성(0D) → 성장(1D~3D) → 소멸(4D~5D)의 과정을 거치는 것을 알 수 있다. 그러나 원기동에 유력진동이 발생하는 Fig. 4(b)에서는 와류의 생성부터 소멸까지의 과정이 원기동에 매우 근접하게 이루어짐을 알 수 있고, 에너지(와류강도)도 가장 크게 나타나고 있다. 이것은 원기동에 유력진동이 있기 때문에 원기동표면의 전단층이 박리가 일어나는 장소가 원기동에 유력진동이 없을 때 보다 뒷부분으로 후퇴하고, 원기동 표면에서 박리되는 전단층의 길이가 늘어나기 때문에 와류의 생성이 원기동에 근접하게 생기며, 에너지도 큰 이유로 생각된다. 또, Fig. 4 와 같이 원기동 후류의 각 거리(1D~5D)에서 에너지가 가장 크게 나타나는 y 축





(a) No vibration,  $Re=650$



(b) On vibration,  $a/D=0.2$ ,  $Re=700$

**Fig. 5** Visualization test of a cylinder without and with vibration in the water channel

의 좌표는  $\pm 0.6D$  부근으로 나타났다. 이 위치는 원기둥의 유력진동 유무, 유속의 변화와 상관없이 유사하게 나타나고 있다. 이것은 후류에서 생성되는 와류의 중심 이동궤적이 원기둥의 유력진동 유무, 유속의 변화와 상관없이 이동궤적이 같다는 것을 의미한다. Fig. 4에서는 이 궤적을 열은 색의 화살표로 나타내고 있다. 이렇듯 원기둥 후류의 스펙트럼 분석을 통해 와류의 생성→성장→소멸의 과정을 확인할 수 있고, 그 와류의 중심이 이동하는 궤적을 알 수 있었다.

### 3.3 가시화 실험

Fig. 5는 원기둥에 유력진동이 없을 때 (a)와 있을 때 (b)의 원기둥 주변의 흐름을 수로 실험장치에서 수소기포로 가시화한 결과를 나타내고 있다. 그림과 같이 원기둥 후류에는 진동의 유무와 상관없이 카르만 와류가 생성되고, 하류로 갈수록 와류의 크기가 커지고 있는 것을 알 수 있다. 원기둥이 고정되어 있는 경우인 Fig. 5(a)에는 앞서 3.1절에서 설명한 와류의 퍼짐각도  $16.3^\circ$ 의 선을, Fig. 5(b)에는  $17.3^\circ$ 의 선을 포함하고 있다. 그림과

같이 풍동 실험에서 나타난 와류의 퍼짐각도는 가시화 실험에서도 유사한 퍼짐각도로 와류가 생성되고 있음을 알 수 있다. 그리고 Fig. 5(a)에는 원기둥에서  $5D$  부근까지의 와류 중심에는 “●”표시가 되어 있다. 그 결과 3.2절에서 설명한 결과와 같이 풍동실험에서의 원기둥 후류에서 와류의 중심 이동궤적이  $x$  축을 기준으로  $y$  축 좌표  $\pm 0.6D$  부근을 통과함을 가시화실험을 통해서도 재확인할 수 있었다.

## 4. 결론

원기둥의 유력진동 유무와 주류 속도의 변화에 따른 원기둥 후류의 유속을 조사하고, 그 유속의 스펙트럼 조사를 한 자유진동 실험(풍동실험)과 그것을 강제진동 실험장치로 재현한 가시화실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다. 흐르는 유체에 존재하는 원기둥의 후류에 발생하는 와류의 생성→성장→소멸 과정을 확인할 수 있었다. 그리고 이 와류의 퍼짐각도는  $16^\circ \sim 17^\circ$  가량으로 주류 속도의 변화와 유력진동의 유무에 상관없이 일정함을 알 수 있었다. 또한 후류의 스펙트럼 분석을 통해 와류의 중심이 이동하는 궤적을 유추할 수 있었고, 가시화 실험을 통해 그것을 확인할 수 있었다. 이 결과는 원기둥의 유력진동 억제 및 구조물 설계시에 중요한 기초자료로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 후기

본 연구는 2014년도 강원대학교 학술연구조성비로 연구하였음(관리번호-220140047)

## 참고문헌

(References)

- (1) Liu, X., Levitan, M. and Nikitopoulos, D., 2008, "Wind Tunnel Tests for Mean Drag and Lift Coefficients on Multiple Circular Cylinders Arranged In-line," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 96, pp. 831-839.
- (2) Alam, M. M. and Zhou, Y., 2013, "Suppression of Fluid Forces on Two Staggered Cylinder," *Procedia Engineering*, Vol. 56, No. 5, pp. 173-178.
- (3) Alam, M. M., Moriya, M., Takai, K. and Sakamoto, H., 2003, "Fluctuating Fluid Forces Acting on Two Circular Cylinders in a Tandem Arrangement at a Subcritical Reynolds Number," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 91, pp. 139-154.

- (4) Kim, S., Alam, M. M., Sakamoto, H. and Zhou, Y., 2009, "Flow-induced Vibrations of Two Circular Cylinders in Tandem Arrangement. Part 1 : Characteristics of Vibration," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 97, No. 5-6, pp. 304~311.
- (5) Kim, S. and Alam, M. M., 2015, "Characteristics and Suppression of Flow-induced Vibrations of Two Side-by-side Circular Cylinders" *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 54, pp. 629~642.
- (6) Kim, S., Alam, M. M., Sakamoto, H. and Zhou, Y., 2009, "Flow-induced Vibrations of Two Circular Cylinders in Tandem Arrangement. Part 2: Suppression of Vibration," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 97, No. 5-6, pp. 312~319.
- (7) Kim, S. and Lee, S.-C., 2012, "Suppression of Flow-induced vibration of a circular cylinder by means of a Flexible Sheet," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 26, No. 6, pp. 1773~1779.
- (8) Bearman, P. W., 2011, "Circular Cylinder Wakes and Vortex-induced Vibrations," *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 27, pp. 648~658.
- (9) Alam, M. M. and Kim, S., 2009, "Free Vibration of Two Identical Circular Cylinders in Staggered Arrangement," *Fluid Dynamics Research*, Vol. 41, No. 3, 035507.