

## 상류에 있는 물체의 직경변화에 따라 후류 물체가 받는 영향<sup>§</sup>

김 상 일<sup>\*†</sup>

\* 강원대학교 기계공학과

### Effects of Downstream Cylinder by Changing Upstream Object's Diameter

Sang Il Kim<sup>\*†</sup>

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

(Received June 30, 2014 ; Revised August 6, 2014 ; Accepted August 7, 2014)

**Key Words:** Lock-in (록크-인), Vortex(와류), Fluctuating Velocity(변동 유속), Fluctuating Lift Forces(변동 양력)

**초록:** 본 연구는 상류 쪽에 설치된 물체의 직경 변화에 따른 후류에 존재하는 하류 쪽 물체의 영향에 대해 조사한 실험적 연구이다. 풍동의 측정부에서 상류 쪽에는 알파벳 V자 형태의 물체를 삽입하고, 하류 쪽에는 로드셀을 장착한 원기둥을 설치하여 상류 쪽 물체의 직경 변화에 따라 후류의 유속분포가 어떻게 변화하는지를 조사하였다. 그리고 후류에 존재하는 원기둥의 위치를 변화시키면서 원기둥의 변동양력과 카르만 와류 방출 주파수를 조사하므로써 다음과 같은 결론을 얻었다. i) 후류의 유속은 주유속보다 작다. ii) 상류 쪽 물체의 직경이 하류 쪽 물체의 직경보다 클 때 록크-인 현상이 일어난다. iii) 후류에 있는 원기둥의 변동양력이 최대가 되는 위치는 상류 쪽 물체의 직경의 변화에 따라 위치도 함께 변해야 한다.

**Abstract:** This experimental study investigates the effects of a downstream cylinder in the wake change on upstream object's diameter. A V-shaped object is placed in the upstream of the test section and a circular cylinder containing a load-cell is placed in the downstream. The velocity distribution of the wake generated from the upstream object with a change in its diameter is investigated. Further, the fluctuation in the lift coefficient and Karman-vortex emission frequency with a change in the position of the downstream cylinder is examined. The study results reveal the following. i) The flow velocity in the wake is smaller than that in the main stream. ii) The lock-in phenomenon occurs when the diameter of the upstream object is larger than that of the downstream cylinder. iii) To generate maximum fluctuating lift force of the downstream cylinder in the wake, the position of the downstream cylinder must be moved with changing diameter of the upstream object together.

- 기호설명 -

$d$  : 상류 쪽 물체의 투영 길이[mm]  
 $D$  : 하류 쪽 로드셀을 장착한 원기둥[50mm]  
 $U_0$  : 유체 속도[m/s]  
 $U_x$  : 상류 쪽 물체 후류의 속도[m/s]  
 $T$  : 원점과 하류 쪽 원기둥 중심과의 거리 [mm]

$f$  : 상류 쪽 물체 후류의 속도 변동 주파수 [Hz] (= Karman 와류방출 주파수)  
 $\sigma_{CL}$  : 변동양력계수  
 $E$  : 로드셀의 출력 전압[V]  
 $f_1$  : 상류 쪽 물체의 와류방출 주파수[Hz]  
 $f_2$  : 하류 쪽 원기둥의 와류방출 주파수[Hz]  
 $Re$  : 레이놀즈수( $U_0D/\nu$ )  
 $\nu$  : 공기의 동점성계수

§ 이 논문은 2014 년도 대한기계학회 강원지회 춘계학술대회(2014.5.16., 강원대) 발표논문임

† Corresponding Author, kimsangil@kangwon.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

### 1. 서론

유체의 흐름에 존재하는 물체의 표면에서는 경

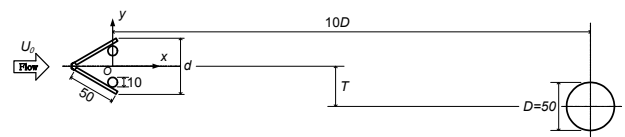
계층의 박리현상으로 인해 후류에는 회전 방향이 반대인 와류가 2 열로 번갈아 가며 생성되는 카르만 와류열(Karman vortex Streets)이 형성된다. 이 카르만 와류열에 관한 연구는 과거 많이 연구되어 왔다. 그 중 대표적인 연구로 OWEN<sup>(1)</sup>은 정지 및 진동하는 원기둥의 카르만 와류열에 대해 레이놀즈수를 144 와 190의 상태에서 와류의 위치, 순환, 와류도 그리고 가시화실험까지 폭넓은 조사를 했다. 이 카르만 와류열이 발생하는 물체 자신 또는 와류열 속에 존재하는 물체에는 유체력의 변동에 의해 물체가 진동을 하게 된다. 예를 들면 와이어로 연결된 출렁다리가 바람에 흔들리는 현상, 고층 건물이 바람에 흔들리는 현상 등이 이러한 것들에 속한다. 이러한 구조물들의 유체력 변동은 소음을 일으키기도 한다. 그리고 물체를 자연와류 방출주파수와 같은 주파수로 진동을 시키면 물체로부터의 와류방출주파수가 진동수와 같을 때 생기는 록크인(Lock-in) 현상이 발생하는 것은 잘 알려져 있다. 이 록크인 현상이 발생 할 경우 공진이 일어나 물체의 피로강도에 영향을 주어 고장 또는 파괴로 이어질 가능성도 있다. 실제 이런 록크인 현상으로 인한 대표적인 사고 사례가 1940년 11월에 미국 워싱턴주 타코마시의 타코마다리의 붕괴이다. 그 이후 현재까지 진동물체에 대한 연구는 많이 이루어 지고 있다. 먼저 실험을 통해 후류내에 존재하는 물체가 받는 영향에 대해 조사한 연구로는 Lam<sup>(2)</sup>이 상류 쪽에 직경이 큰 원기둥을 고정시키고 하류 쪽에 직경이 작은 원기둥을 탄성지지시켜 후류영역에 있는 작은 원기둥의 위치 변화에 따른 진동특성과 가시화 실험으로 흐름 변화를 조사했고, Kim<sup>(3-5)</sup>은 두 개의 같은 직경의 원기둥으로 여러 배열에 따른 진동 특성과 가시화 실험을 통해 흐름변화를 조사한 것이 있다. Rahmanian<sup>(6,7)</sup>은 직경이 다른 두 원기둥(직경비율:0.1)을 병렬로, Prasanth<sup>(8)</sup>는 같은 직경의 원기둥을 직렬과 대각선으로 근접 배열시켜 두 원기둥의 간격변화에 따른 진동특성 및 흐름 변화를 수치해석으로 조사를 했다. Haniu<sup>(9)</sup>는 삼각기둥을 이용하여 회전진동을 강제로 조절하므로써 비록크인 상태에서 록크인 상태로 넘어가는 과도적인 현상을 실험적으로 규명하여 강제진동수와 자연와류 방출 주파수가 록크인시 일치하는 확률이 최대 80%임을 밝혀냈다.

이와 같이 상류 물체의 후류에 의해 록크인 현상이 일어나는 하류 물체에 대한 연구는 드물다. 이런 현 실정을 반영하여 본 연구는 상류 쪽 물체

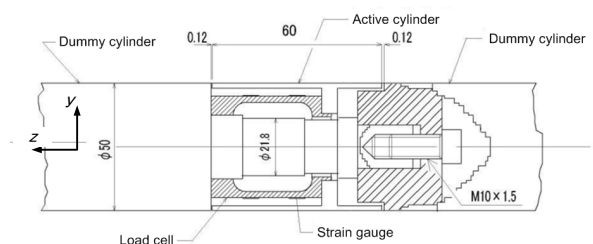
(이하 “상류물체”로 칭함)의 후류에 존재하는 하류 쪽 물체(이하 “하류물체”로 칭함)에 록크인 현상이 발생 할 때 하류물체에 큰 변동 유체력이 작용하는 현상을 규명하는 것을 목표로 한 것이다. 구체적인 방법으로는 물체를 진동시키는 것 대신 상류 쪽에 와류를 방출시키는 물체를 설치하고, 하류 쪽에는 로드셀을 장착한 원기둥을 설치하여 원기둥 주변의 유체에 주기적인 변동을 주었을 때 원기둥에 작용하는 변동양력을 로드셀로 직접 측정하여, 변동양력과 상류물체로부터의 와류 방출과의 관계를 조사했다. 그러기 위해서 본 연구의 실험에서는 상류물체에 직경변화를 주면서 와류방출 주파수, 하류 쪽 원기둥에 작용하는 변동양력의 크기와 그 주파수, 원기둥으로부터의 와류 방출 주파수 그리고 이것들의 파워스펙트럼을 조사했다. 그러므로 상류물체의 직경변화에 따른 후류물체가 받는 영향에 대해 조사한 것이다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

본 실험에서는 후류에 존재하는 물체의 영향을 조사하기 위해 환류형 풍동을 사용하였다. 이 풍동의 측정부는 길이 2000mm, 높이 1000mm, 폭 300mm의 크기를 갖고 있다. 교축부 상류 쪽에는 3장의 정류망이 설치되어 있고, 측정부 입구에는 허니컴이 설치되어 있어 측정부의 흐름이 층류가 되도록 했다. 유속은 축류 송풍기의 회전수를 인버터로 조절하므로써 임의의 속도를 재현 할 수 있도록 되어 있다. 본 실험에서는 유속을  $U_0=10\text{m/s}$ 로 고정하여 실험을 했다. 하류 쪽 원기둥을 기준으로 했을 때 레이놀즈수는  $Re=34,000$



(a) Coordinate system and position of experiment tools



(b) Load cell in the downstream cylinder

Fig. 1 Schematic view of coordinate system and experiment tools

이다. Fig. 1은 풍동 측정부에 설치한 실험장치들의 위치, 크기, 기호, 좌표계(Fig. 1(a)) 그리고 하류 쪽 원기둥에 장착되어 있는 로드셀 구조(Fig. 1(b))를 나타내고 있다. Fig. 1(a)에 나타내고 있는 것처럼 상류 쪽에서 와류를 방출하기 위한 물체는 폭 50mm, 길이 290mm, 두께 2mm인 아크릴판의 한 쪽 모서리를 유연한 플라스틱으로 접합을 하여 V자 형태로 만들었다. 그러므로서 두 장의 아크릴판이 이루는 각도는 자유롭게 조절 가능하여 상류물체의 투영길이  $d$  를 임의로 조절 할 수 있게 했다. 그리고 두 장의 아크릴판 다른 한 쪽 모서리 뒷부분에는 그림과 같이 직경이 10mm인 알루미늄 봉으로 지지하여 와류방출을 위한 물체의 강성을 높였다. 본 실험에서의 좌표계는 그림과 같이 두 알루미늄 봉의 중심을 이은 수직선(y축)과 두 장의 아크릴판의 중심을 이은 수평선(x축)이 만나는 점을 원점으로 했다. 이 원점으로부터 하류 쪽으로 500mm(10D) 떨어진 곳에는 Fig. 1(b)와 같은 로드셀이 장착이 되어 있는 직경  $D=50mm$  의 원기둥을 설치했다. 그림과 같이 이 원기둥은 로드셀이 장착되어 있기 때문에 상류물체로부터의 와류방출로 인한 원기둥의 변동양력을 비롯해서 상류물체의 와류방출 주파수, 원기둥 자신의 와류방출 주파수를 측정 할 수 있다. 그리고 원기둥의 위치에 1차원 열선풍속계를 설치하여 후류의 유속 분포를 측정하였다. 실험은 열선풍속계를 이용한 유속 측정, 로드셀을 이용한 변동양력 측정 순으로 진행하였다.

구체적인 실험 방법으로는 상류물체의 투영면적  $d$  를 30mm 에서 100mm 까지 5mm 간격으로 15 개, 원점과 열선풍속계의 중심과의 거리  $T$  를 -50~90mm 까지 10mm 간격으로 15 개의 위치로 각각 변화를 주어 유속을 측정하였고, 로드셀을 이용한 원기둥의 변동양력 측정은 원점과 원기둥 중심과의 거리(y 축 방향)  $T$  를 0, 25, 30, 35, 50, 75mm 로 변화를 주어 각각의 조건에서 측정하였다. 아울러 로드셀로는 상류 물체로부터의 와류방출 주파수, 원기둥 자신의 와류방출 주파수, 와류의 파워스펙트럼도 조사하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 후류의 유속 분포

Fig. 2는 하류 쪽 원기둥이 없는 상태에서 그 위치에 열선 유속계를 설치하고, 상류물체의 투영길이  $d$ 와  $y$ 축 방향의 위치( $T$ )의 변화에 따른

유속( $U_x$ , 시간평균 유속) 의 변화를 주유속도 ( $U_0$ )와의 비( $U_x/U_0$ )로 나타낸 것이다. 그림과 같이 모든 투영길이  $d$ 에 있어서 유속비( $U_x/U_0$ )는  $y=0$ 을 중심으로 거의 대칭으로 나타나고 있다 이것은 와류의 분포가 시간 평균으로 봤을 때 상하 대칭형으로 방출이 되고 있음을 시사한다. 그리고 모든 투영길이  $d$ 에 있어서  $y=0$ 에 가까워 질수록 유속비가 작아지는 것을 알 수 있다. 이것은

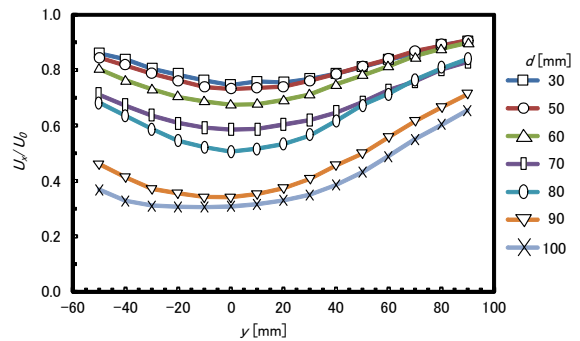
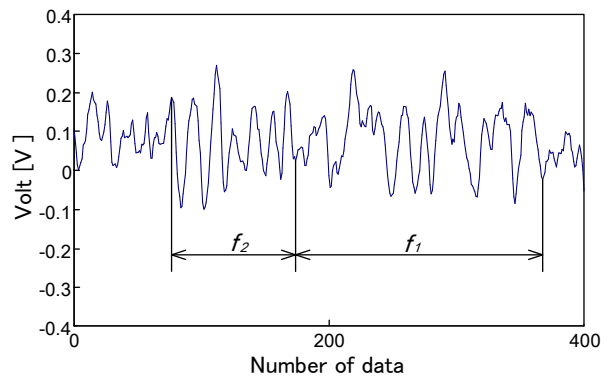
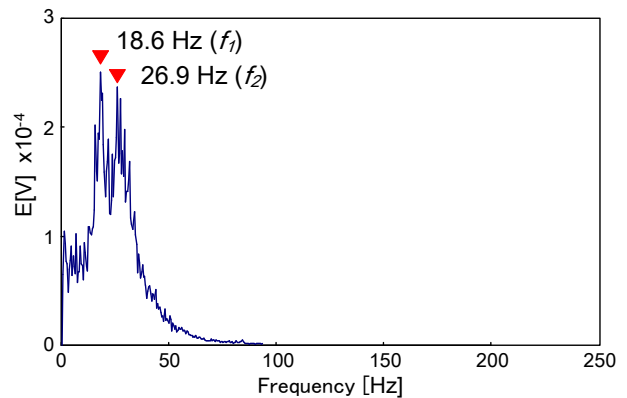


Fig. 2 Velocity ratio between  $U_0$  and  $U_x$  change on  $y$  at each  $d$



(a) Wave of volts from load-cell



(b) Distribution of power spectrum

Fig. 3 Wave of volts from load-cell and distribution of power spectrum with  $T=30mm$ ,  $d=70mm$

상류물체로 인해 생기는 후류(wake)의 중심이기 때문에 사료된다. 또 투영길이  $d$ 가 커짐에 따라 유속비( $U_x/U_0$ )는 작아지고 있는 것으로 나타나고 있다. 이것은 투영길이  $d$ 가 길어짐에 따라 후류의 영역도 같이 넓어지기 때문으로 사료된다.

3.2 변동양력특성

Fig. 3 은 하류 쪽의 로드셀이 장착된 원기둥이 후류(wake)내에 존재 할 때 유속 변동에 따라 얻어진 전압의 변화와 그 파워스펙트럼을 나타내고 있다. 그림은 그 중 대표적인  $T=30\text{mm}$ ,  $d=70\text{mm}$  일 때

의 전압의 변화(Fig. 3(a))와 파워스펙트럼(Fig. 3(b))을 보여주고 있다. Fig. 3(a)와 같이 로드셀로부터 얻어진 파형은 상류물체로부터의 와류방출주파수  $f_1$  과 원기둥 자체에서 발생하는 와류방출주파수  $f_2$  가 혼합된 형태로 나타남을 알 수 있다. Fig. 3(a)에서  $f_1$ ,  $f_2$ 가 발생하는 곳(Number of data)은 항상 일정한 위치에서 발생하지 않고 불규칙적으로 발생하지만 두 주파수가 항상 혼합되어 나타난다. 이것을 파워스펙트럼으로 나타낸 것이 Fig. 3(b)이다. 이것으로 두 개의 주파수가 혼합되어 있음을 확인 할 수 있다. 이 현상은 주류 속도가 10m/s 인 것에 반해 후류의

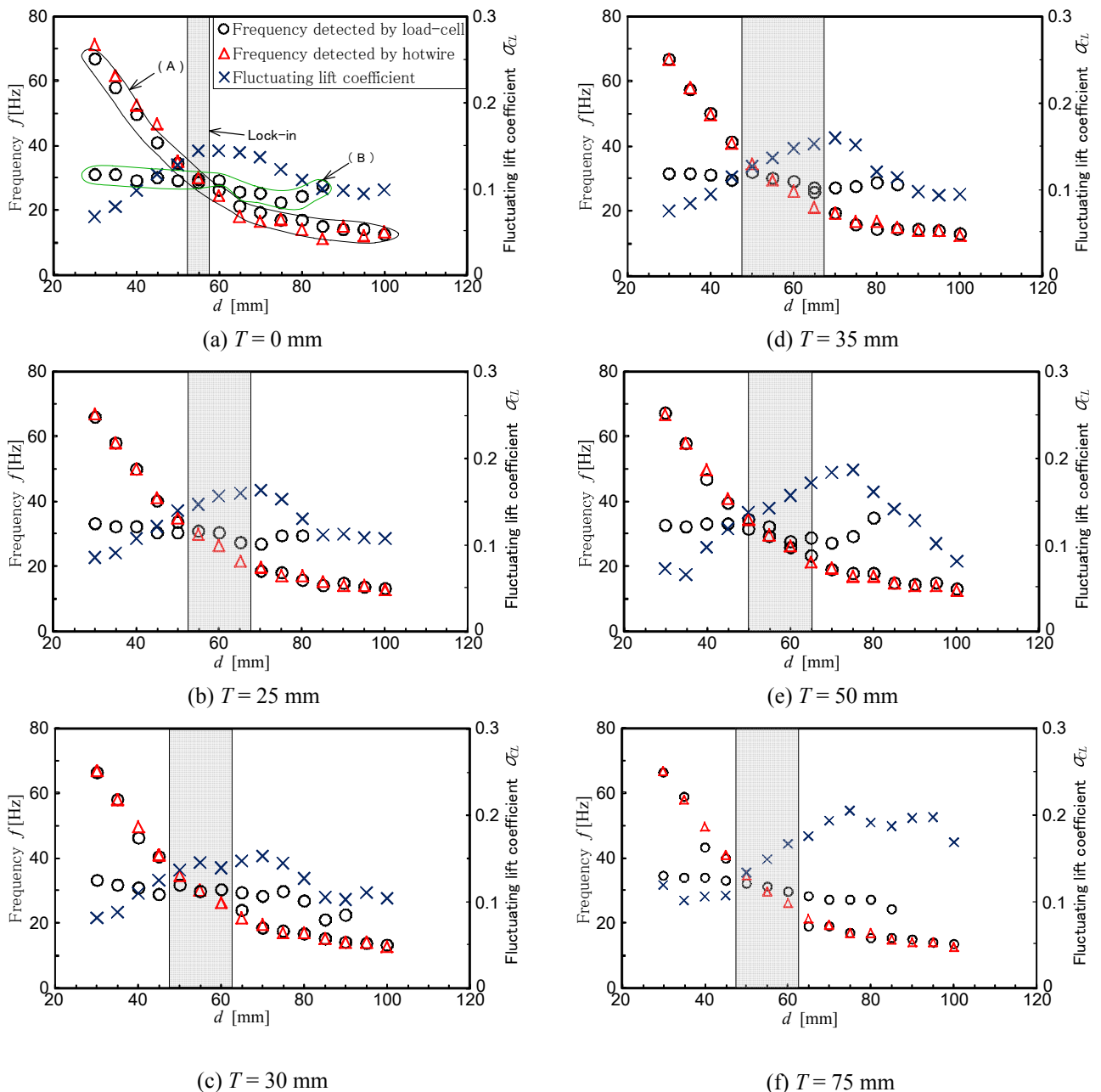


Fig. 4 Frequency of fluctuating velocity and fluctuating lift coefficient change on diameter  $d$  at each  $T$

속도는 Fig. 2 에 나타난 것처럼 6m/s 정도로 유속에 있어서 차이가 있고, 상류물체( $d=70\text{mm}$ )와 하류물체( $D=50\text{mm}$ )의 크기가 다르기 때문에 두 개의 와류방출주파수가 생긴 것으로 사료된다. Fig. 4(a)~(f)는 원기둥의 위치가 각각의  $T(0\text{mm}, 25\text{mm}, 30\text{mm}, 35\text{mm}, 50\text{mm}, 75\text{mm})$ 에 있어서 상류물체의 투영길이  $d(x$  축)의 변화에 따른 와류방출주파수(왼쪽  $y$  축)의 변화와 변동양력 계수(오른쪽  $y$  축)의 변화를 나타내고 있다. 그래프의 ○는 로드셀이 검출한 상류물체로부터의 와류방출주파수와 원기둥이 방출하는 와류방출주파수를, ×는 로드셀이 검출한 변동양력을, △은 하류 쪽 원기둥의 위치에서 열선 유속계로 측정한 상류물체로부터의 와류방출주파수를 의미한다. Fig. 4(a)와 같이 로드셀이 검출한 와류방출주파수(그래프의 ○)는 두 종류((A), (B))의 주파수가 검출됨을 알 수 있다. (A)집단의 주파수는 열선 유속계로 측정한 와류방출 주파수(△)와 유사하게 상류물체의 투영길이  $d$  가 커짐에 따라 주파수가 작아지는 경향이 같기 때문에 (A)집단은 상류물체로부터의 와류방출 주파수임을 알 수 있고, 나머지 (B)집단의 주파수는 상류물체의 투영길이  $d$  의 변화와 상관없이 주파수가 거의 변함이 없는 것으로 보아 로드셀을 장착한 하류 원기둥 자체에서 방출하는 와류의 주파수임을 알 수 있다. 그리고 그림에서 알 수 있듯이 각각의  $T$  에서 상류물체로부터의 와류방출 주파수와 하류 원기둥으로부터의 와류 방출 주파수가 같아지는 록크인(lock-in) 구간이 존재함을 알 수 있다. 이 록크인 구간은  $T$  가 커짐에 따라 넓어지며  $T=35\text{mm}$  일 때 가장 넓고, 그 이상  $T$  가 커지면 작아지는 경향이 있다. 이들 록크인 구간의 중심  $d$  는 Fig. 4 와 같이  $d=55\text{mm}$  부근임을 알 수 있다. 이것은 하류 원기둥의 직경이 50mm 인 것에 비하면 약 10% 정도 큰 직경인데 이 큰

직경에서 록크인 현상이 일어나고 있는 것은 상류 물체의 후류(wake)내의 유속( $U_x$ )은 앞서 3.1 절에서 설명한 바와 같이 주유속( $U_0$ )보다 다소 느리기 때문에 상류물체의 크기가 하류 원기둥의 직경보다 약간 큰 사이즈에서 록크인 현상이 활발히 발생된 것으로 사료된다. Fig. 5 는 각각의  $T$  에서 변동양력이 최대가 되는 상류물체의 투영길이  $d$  의 크기를 정리한 것이다. 그림과 같이 변동양력( $\sigma_{CL}$ )이 최대가 되는  $d$  는  $T$  가 커짐에 따라 동시에 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 상류물체로부터 발생된 와류가 생성 → 발전 → 소멸 되기까지 일정한 경로로 이동하고 있음을 시사한다.

#### 4. 결론

유체의 흐름에 존재하는 물체의 직경이 변할 때 와류방출주파수 및 유속분포 변화와 같은 후류의 특성과 그 후류 내에 존재하는 물체가 받는 영향(변동양력과 와류방출주파수)을 조사한 본 실험을 통해 후류 및 후류내에 존재하는 물체가 받는 영향을 구체적으로 알 수 있었다. 후류의 유속은 주유속보다 작고, 이러한 특성으로 인해 후류내에 존재하는 물체가 록크인 현상이 일어나기 위한 조건으로는 상류물체가 하류 쪽 물체보다 직경이 커야 한다. 후류내에 존재하는 물체의 변동양력이 최대가 되려면 상류물체의 크기와 함께 하류 쪽 물체의 위치도 변해야 한다. 변해야 한다.

#### 후 기

본 연구는 2014 년도 강원대학교 학술연구조성비로 연구하였음(관리번호-220140043)

#### 참고문헌

(References)

- (1) Griffin, O. M. and Ramberg, S. E., 1974, "The Vortex-street Wakes of Vibrating Cylinders," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 66, Part 3, pp. 553~576.
- (2) Lam, K. M. and To, A. P., 2003, "Interference Effect of an Upstream Larger Cylinder on the Lock-in Vibration of a Flexibly Mounted Circular Cylinder," *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 17, No. 8, pp. 1059~1078.
- (3) Kim, S., Mahbub Alam, Md., Sakamoto, H., Zhou, Y., 2009, "Flow-induced Vibration 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.
- (4) Kim, S., Mahbub Alam, Md., Sakamoto, H., Zhou, Y., 2009, "Flow-induced Vibration of Two Circular Cylinders

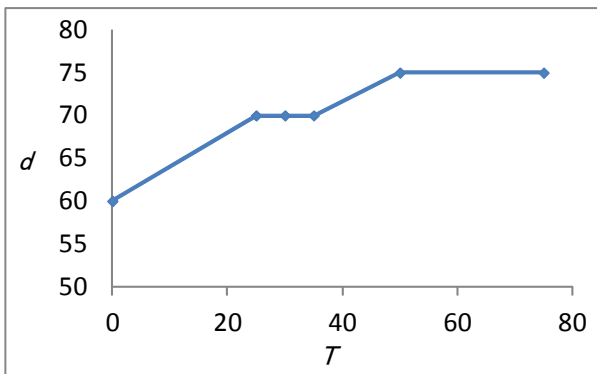


Fig. 5 Condition of "T" and "d" being a maximum fluctuating lift coefficient  $\sigma_{CL}$

- in Tandem Arrangement. Part 2: Suppression of Vibrations,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 97, No. 5-6, pp. 312~319.
- (5) Mahbub Alam, Md. and Kim, S., 2009, “Free Vibration of Two Identical Circular Cylinders in Staggered Arrangement,” *Fluid Dynamics Research*, Vol. 41, No. 3, 035507.
- (6) Hahmanian, M., Cheng, L., Zhao, M. and Zhou, T., 2014, “Lock-in Study of Two Side-by-side Cylinders of Different Diameters in Close Proximity in Steady Flow,” *Journal of Fluids and Structures*, In Press, Corrected Proof, Available online 2, pp. 1~26.
- (7) Rahmanian, M., Cheng, L., Zhao, M. and Zhou, T., 2014, “Vortex Induced Vibration and Vortex Shedding Characteristics of Two Side-by-side Circular Cylinders of Different Diameters in Close Proximity in Steady Flow,” *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 48, No. , pp. 260~279.
- (8) Prasanth, T. K. and Mittal, S., 2009, “Vortex-induced Vibration of Two Circular Cylinders at Low Reynolds Number,” *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 25, No. 4, pp. 731~741.
- (9) Haniu, H., Kim, S., Miyakoshi, K., Takai, K. and Rofiqul Islam, M., 2009, “Transitional Characteristics of Phase Shift in Lock-in Phenomena of an Oscillating Cylinder,” *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 4, No. 3, pp. 479~489.