

## 2차원 다원주 주위의 유동 특성에 관한 실험적 연구 ( I )

김두홍\*, 조철희\*, 정우철\*\*, 박찬원\*\*, 나인삼\*

\* 인하대학교, \*\*인하공업전문대학

## An Experimental Study of the Flow Characteristics around 2D Multi-Cylinders ( I )

Doo-H. Kim\*, Chul-H. Jo\*, Uh-C. Jeong\*\*, Chan-W. Park\*\*, In-S. Na\*

\* Inha University, \*\* Inha Technical College

**KEY WORDS** : PIV(particle image velocimetry, 입자영상속도계), Flow-Visualization(유동가시화), Cylinder Arrays(원주배열), Manometer(압력계), Imaging Processing Technique(화상처리기술)

**ABSTRACT** : Flow patterns are very complex and interactive between cylinders. The patterns are turbulent and non-linear caused by various factors. In this paper, flow patterns and pressure gradient around vertical cylinders were investigated by experiment. Changing gaps between cylinders the flow patterns are measured at a fixed coming velocity. Flow patterns showed very complex and closely related to the coming velocity and cylinder space. The pressure gradient around the flow field is observed by twelve hole pitot tubes and manometer. The experiment has been conducted in circulating water channel with PIV system. That can visualize flow patterns. The laser beam was used to reflect the image from particles and recorded by CCD camera. The cylinders were spaced from 1D to 5D with 0.5m/sec of incoming flow velocity. The experimental results using pitot tube showed in good agreement with results of precious by others study. The results can be applied in the understanding and design of multiple pile array structures.

### 1. 서론

원주는 2차원적인 후류 운동을 생성시키는 대표적인 물체로서 특정한 레이놀즈 수의 경우를 제외하고는 대규모 조직적 와류구조를 형성하며, 해양구조물에 유체역학적 영향을 준다(이와 정, 1996). 특히 다수 원주 주위의 유동장 해석은 유체역학적으로 대단히 중요한 분야이며, 해양공학에서도 실제 해양구조물은 다수의 원주로 이루어져 있는 경우가 대부분이기 때문에 이에 대한 많은 연구가 수행되어져 왔다. 극한의 하중이 해양구조물에 가해졌을 경우나 임의의 외부환경조건에 의하여 발생하는 구조물의 손상에 관한 연구는 많이 수행되어 왔지만, 다수 원주 주위에서 발생하는 유체 역학적인 상호간섭작용과 그에 따른 원주 주위의 압력에 대한 상호연관성은 유체역학적으로 대단히 중요한 분야임에도 불구하고 아직 명확하게 규명되어 있지 않은 현실이다. 과거에는 각각의 레그에 파력, 조력 등의 환경하중을 따로 적용시켜서 구조물을 해석하였으나 최근에 들어서는 레그 주위에서 발생하는 유동의 상호간섭효과를 구조물에 중요한 해석인자로서 적용한 연구 사례가 보고되고 있다(Zhao and Faltinsen, 1988).

Spring & Monkmeyer(1974)는 동일한 직경과 서로 다른 직경의 실린더를 일정간격으로 배열하고 그들의 상호간섭에 대한 유체역학적인 특성에 대하여 연구를 실시하였으나, 유동특성에 따른 압력변화는 고려하지 않았다. Kagemoto & Yue(1986)는 대수학적(algebraic method)인 방법을 이용하여 2개 및 4개의 원주가 일정한 형태로 배열되었을 경우 부가질량(added mass)과 댐핑(damping)값을 각 원주에 대하여 산출해 냈으며, 그 결과는 상호간섭 효과에 의한 대략적 해석법으로 사용되고 있다. 최근에는 Williams & Rangappa(1994)가 Large-spacing Approximations 방법에 의하여 연구를 수행하고 있으며, Green's Theorem에 기본을 둔 Three-dimensional Linear Diffraction Theory를 적용하여 동일한 직경을 가진 2개 원주의 간섭작용에 대해 연구를 실시하였다. Zdravkovich는 수치해석을 이용하여 간섭효과에 의한 다 원주 주위의 유동현상을 연구하였고 그 결과는 그림 1에서와 같이 나타났다(Zdravkovich, 1985). 전 등(1996)은 PIV를 이용하여 Zdravkovich가 밝힌 유동현상을 해석하였다. 이와 같이 기존에 선행되었던 연구는 다원주 주위의 유동특성에 대한 수치해석 및 가시화실험이 주류를 이루었으나 압력변

화에 대한 실험적 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 실험을 통하여 다원주간의 간섭효과에 의해 발생하는 압력의 변화를 계측하고 그 결과와 유동특성과의 상호 연관성을 조사하였다.

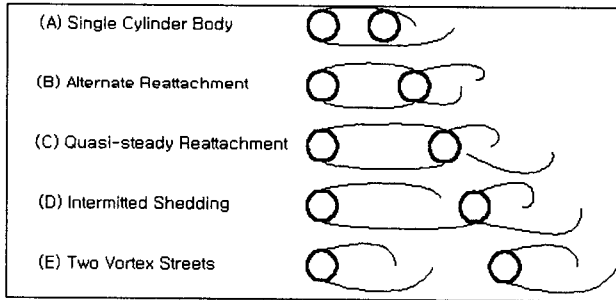


그림 1. 원주 배열에 따른 유동현상  
( M. M. Zdravkovich, 1985 )

## 2. 실험 방법

본 실험은 실제 해역에 설치된 해양구조물 원주 기둥간의 간섭효과에 대한 유동현상을 관찰하기 위하여 외력은 조력만이 작용하는 상태를 고려하였다. 이러한 외력 상태에 대하여 회류수조는 일정한 속도의 유체장 속에서 모형 주위의 유동현상을 장시간 관찰할 수 있으므로 본 실험에 적합한 수조이다. 본 실험은 인하공업전문대학에서 보유하고 있는 회류수조에서 진행되었다. 본 회류수조의 크기는 길이 8.5m, 폭 1.5m, 높이 4m이고, 관측부는 길이 3.5m, 폭 1.2m, 높이 0.9m이며 2개의 임펠러로 최대 1.5m/s까지 유속을 조절 할 수 있다.

본 실험은 자유표면 효과를 고려하지 않고 실시하였으며, 측벽효과를 제거하기 위하여 수조 중앙에 실험모형을 수직방향으로 설치하였다. 실험 모델은 길이 1m, 지름 0.1m이며, 지름에 대한 레이놀즈 수는 유속에 따라  $3.13 \times 10^4 \sim 7.3 \times 10^4$  범위 내에서 변한다. 압력계측을 위한 탭(tap)은 바닥으로부터 35cm 되는 위치에  $30^\circ$  간격으로 설치하였으며, 유속은 0.5m/s로 일정하게 고정시키고 원주간의 간격을 변화시키면서 진행하였다. 그림 2는 압력 탭(tap)의 계측 위치를 나타내고 있으며, 1번 탭(tap)이 유체흐름의 수평방향과 일치한다. 실험 모델을 고정하기 위한 밑판은 유체의 원활한 흐름을 위하여 날카로운 모서리로 제작하였으며, 제파판으로부터 1.2 m 떨어진 곳에 원주를 설치하였다. 그림 3은 실험장비의 개략도이다.

압력계측은 그림 3에서와 같이 12개의 압력 탭(tap)과 마노미터(manometer)를 연결하였다. 실험은 시간에 따른 유체의 유동현상 및 압력변화를 관찰하기 위하여 비디오카

메라로 마노미터(manometer)의 수위변화를 녹화하고 녹화된 테이프와 비디오 편집기를 이용하여 10초 단위로 9회에 걸쳐 각 탭(tap)마다 유동현상에 따른 압력의 변화를 관찰하였다.

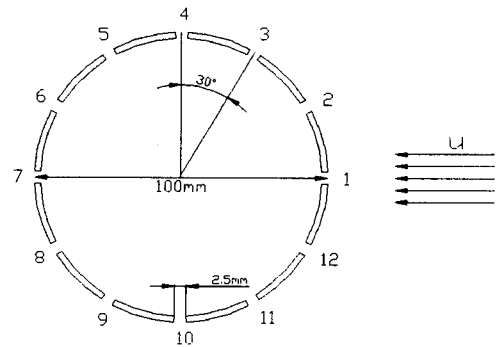


그림 2. 원주의 압력 탭

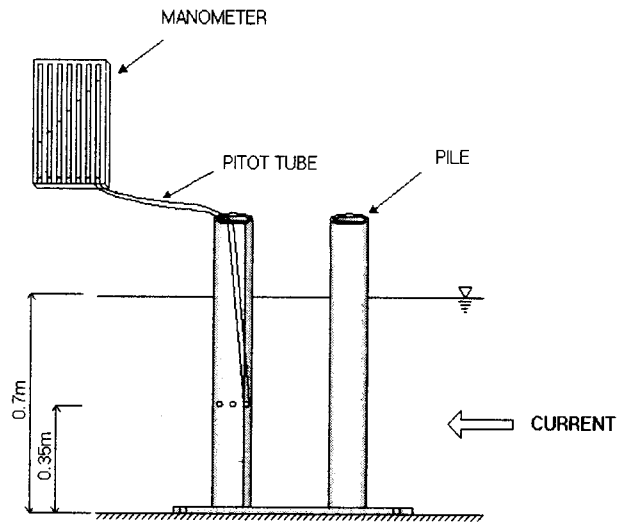


그림 3. 실험장비 개략도

그림 4와 같이 가시화실험을 위하여 본 실험에서는 유동장의 비중과 거의 동일한 입자를 유동장에 투입하여 이들의 운동을 가시화기술 및 디지털 화상처리기술 (imaging processing technique)로 나타내는 PIV (particle imaging velocimetry)를 이용하였다. 한편, 사진은 유리로 된 회류수조 바닥에서 10초 단위로 3회에 걸쳐 촬영하였다. 촬영 조건은 노출 2.8, 셔터스피드 1/8이며, ASA 3200 KODAK film을 사용하였다(송 외, 1997). 본 실험에서 사용한 PIV 장비의 세부 항목은 다음의 표 1과 같으며, PIV 시스템의

전체 구성도는 그림 5와 같다.

표 1 PIV 장비의 세부 제원

Devices	Specification
Ar-ion Laser	Omnichrome 社, 543-499MA, 454~514 nm, 9 lines, 500 mW
VTR	Panasonic 社, AG-7350
Monitor	Samsung 社, Line Monitor, SMP-150
CCD Camera	Sony 社, Model XC-77RR, 768×493, 1/3.6 sec.~1/2200 sec.
Adaptor	Sony 社, Model DC-77RR
Computer	Pentium 1.0GHz, 30GB Hard, 128M RAM

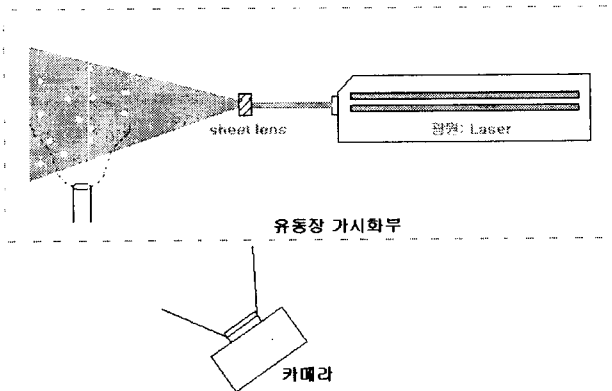


그림 4. PIV 시스템 기본 구성도

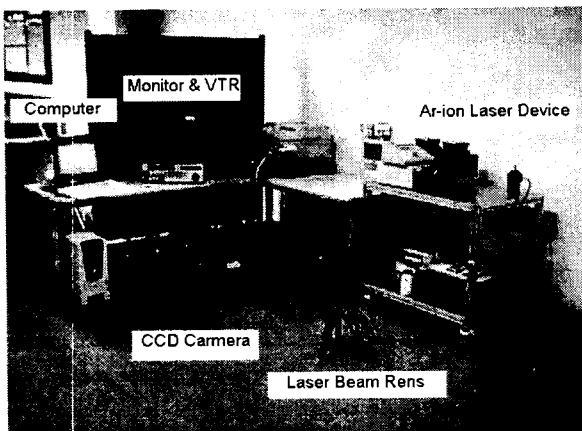


그림 5. PIV 장비의 구성도

### 3. 실험결과

#### 3.1 Single Cylinder

계측된 압력은 (1)식으로 무차원하였다.

$$Cp = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (1)$$

본 실험에 앞서 실험장비의 정확도를 검증하기 위하여 단일 원주에 대한 압력계측을 실시하여 기존에 선행되었던 연구결과와 비교하였다. 검증대상은 KTTC CWC분과에서 동일한 실린더의 시험편을 가지고 실린더 주위의 압력과 수조 계측부 단면에서의 유속분포를 계측하여 회원 시간의 결과를 분석한 것이다(신, 1994). 본 실험모델의 레이놀즈 수는  $5.2 \times 10^4$ 이고 비교대상으로 한 실험모델은 레이놀즈 수가  $5.3 \times 10^4$ 이다. 각 실험결과는 그림 6에 나타나 있듯이 서로 일치하는 것을 알 수 있다. 그림 7은 PIV를 이용하여 유동현상을 가시화한 것으로 단일 원주의 전형적인 유동현상을 나타내고 있다.

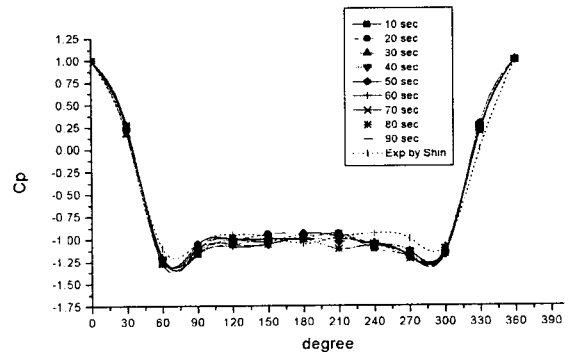


그림 6. Single Cylinder의 압력 분포

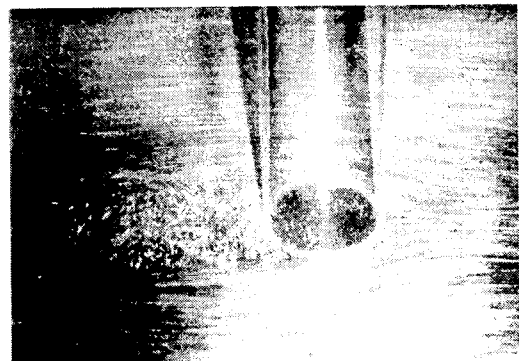


그림 7. Single Cylinder의 유동현상

### 3.2 Multi-Cylinder

그림 8~그림 12는 원주 간격 변화에 따른 하류방향 원주주의 압력 계측결과이며, 각각의 조건에 대한 유동현상은 그림 13~그림 17에 나타내었다. 그림 8에서와 같이 1D에서는 상류방향 원주의 영향에 의해 하류방향 원주의 압력변화는 단일 원주에 비하여 전체적으로 값이 줄어들고 있으며, 1번 탭(tap)에서 압력이 음(-)의 값으로 떨어지는 것으로 보아 간섭효과에 의한 영향이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 그림 1과 그림 13에 나타낸 것과 같이 상류방향 원주에 의한 와류(vortex) 영역이 하류방향 원주까지 포함하고 있으며, 두 원주사이의 유동현상이 활발하지 못하기 때문에 나타나는 현상으로 사료된다. 이러한 현상은 전 등(1996)의 실험에서도 나타나는 현상으로, 두 원주간의 거리가 가까울 경우 주위의 유동현상은 마치 하나의 타원체 주위의 유동현상과 유사한 특성을 나타내기 때문으로 판단된다. 2D의 경우(그림 9), 1번 탭(tap)에서의 압력이 1D인 경우에 비하여 25%정도 증가하고 있으며, 전 등(1996)과 그림 1에서 나타난 바와 같이 상류방향 원주의 영향으로 인하여 하류방향 원주에 와류(vortex)가 교대로 재접합(reattach)되기 때문에 박리점(separate point)에서의 압력은 비대칭적 경향을 보이고 있다. 2D이상부터는 두 원주사이의 거리가 증가함에 따라 1번 탭(tap)부터 원주방향 90°까지 압력이 급속히 감소하고 정체점(stagnation point)에서의 압력이 점차 증가하여 4D, 5D의 경우는 거의 동일한 값을 보이고 있다. 이러한 현상은 그림 14~그림 17에서 보는 바와 같이 두 원주 내부에 와류(vortex)가 발생하고 원주간 거리에 따라 간섭효과의 영향력이 감소하고 있기 때문이라고 판단된다. 3D이상부터는 1번 탭(tap)에서 양(+)의 값이 나타나고 전체적으로 일정한 형태의 압력 분포를 가지게 된다. 또한 그림 11과 그림 12에서 알 수 있듯이 4D와 5D의 경우 전반적인 압력분포와 최대, 최소값의 차이가 없는 것으로 보아 4D부터는 간섭의 영향을 벗어난 것으로 사료된다. 이러한 현상은 전 등(1996)과 그림 1에서 나타난 바와 같이 상류방향 원주의 간섭작용으로 인한 영향력을 벗어나 2개의 와류경로(vortex street)가 형성됨에 따라 나타나는 것으로 보인다. 이러한 사실은 최 등(2001)이 밝힌 바와 같이 원주간의 상호영향은 유체흐름에 직렬인 경우 직경의 4배까지 영향을 받고 있음을 설명하고 있다. 단일 원주에 의하여 발생하는 유동현상은 하류방향으로 10D이상까지 칼만와류(Karman-vortex)가 나타나고 있으나 두 원주사이의 거리가 4D 이상이 되면 하류방향 원주의 압력변화에는 영향을 주지 않는 것으로 사료된다.

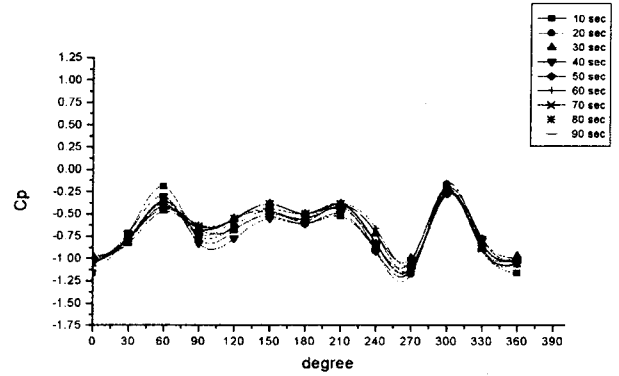


그림 8. Multi-Cylinder의 압력분포, 1D

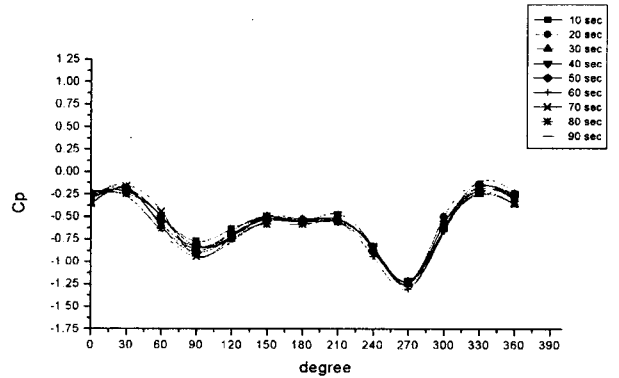


그림 9. Multi-Cylinder의 압력분포, 2D

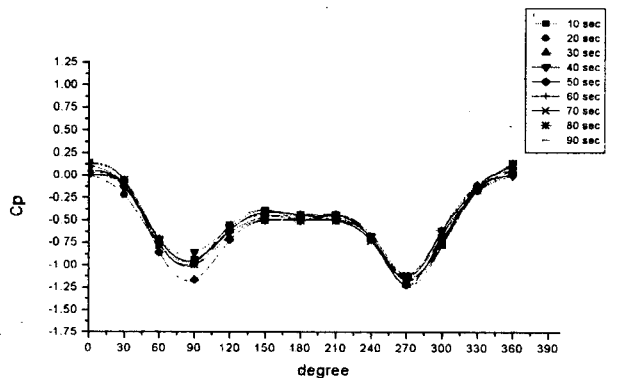


그림 10. Multi-Cylinder의 압력분포, 3D

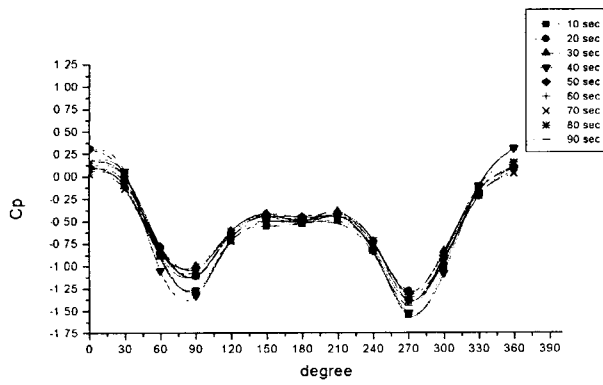


그림 11. Multi-Cylinder의 압력분포, 4D

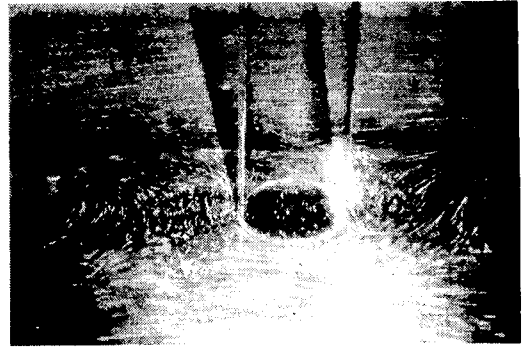


그림 14. Multi-Cylinder의 유동현상, 2D

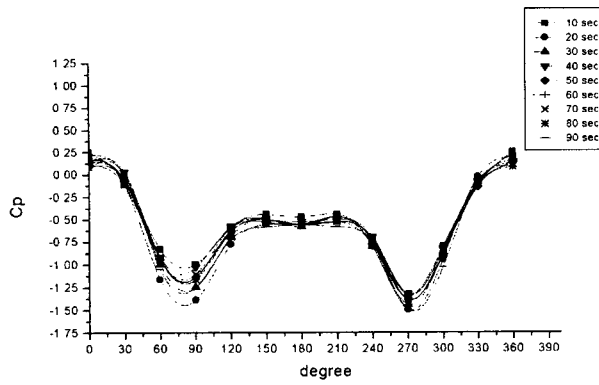


그림 12. Multi-Cylinder의 압력분포, 5D

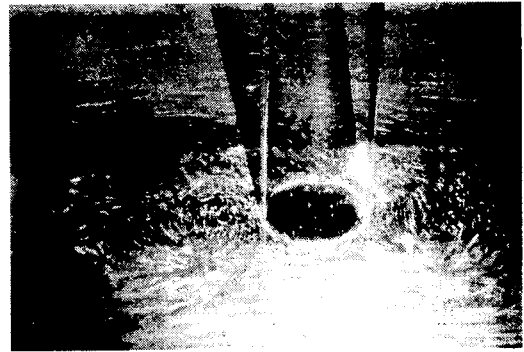


그림 15. Multi-Cylinder의 유동현상, 3D

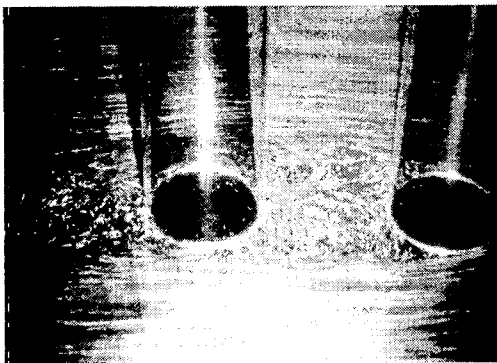


그림 13. Multi-Cylinder의 유동현상, 1D

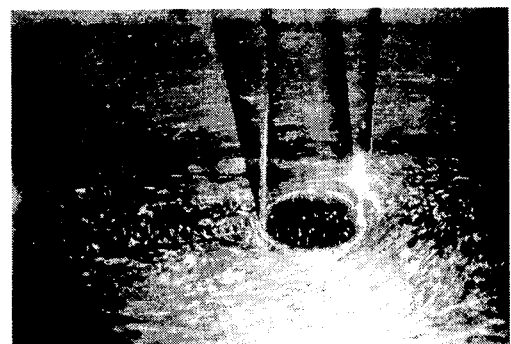


그림 16. Multi-Cylinder의 유동현상, 4D

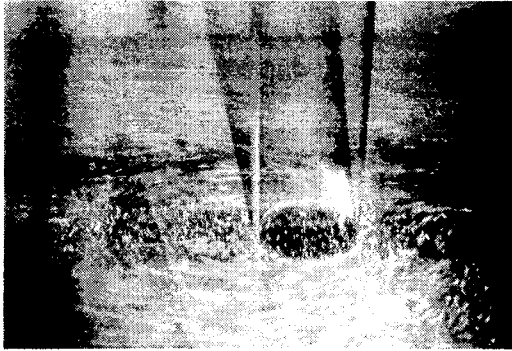


그림 17. Multi-Cylinder의 유동현상, 5D

#### 4. 결론

본 연구는 2개 원주의 상호 간섭작용으로 발생하는 유동 특성을 유동가시화와 원주주위의 압력계측을 통하여 실험적으로 연구하였다. 본 연구의 결과를 간단히 정리하면 다음과 같다.

- (1) 1D에서의 유동현상은 단일 타원체 주위에서 발생하는 유동현상과 유사한 특성을 보인다.
- (2) 두 원주 사이의 간격이 증가함에 따라 상호간섭으로 인한 영향력은 감소한다.
- (3) 두 원주간의 거리가 4D이상부터는 하류방향 원주의 압력변화에는 영향을 주지 못한다.

다 원주간의 상호간섭작용에 의한 영향은 일정 범위내에서 해양구조물 설계에 중요한 설계인자가 될 것으로 사료되며, 향후 수치해석 및 PIV해석을 통한 세밀한 분석을 실시할 예정이다.

#### 참고문헌

吳世旭, 閔丙亨, 韓建模, 李承揮 (1987), “海洋圓柱 構造物에 作用하는 波力에 관한 研究”, 한국해양공학회지, 제1권, 2호, pp 204~214.

이상준, 정용삼 (1996), “자유단이 있는 원주의 후류 유동 특성에 관한 실험적 연구”, 대한기계학회논문집, 제20권, 6호, pp 2014~2022.

송무석, 임근태, 김우전 (1997), “실험 및 중첩격자를 이용한 수치해석에 의한 원형단면체 주위의 유동고찰”, 한국해양공학회지, 제11권, 4호, pp 130~140.

신수철(1994), “회류수조에서 원주주위의 압력측정”, 삼성중공업 대덕중앙 연구소.

전완수, 박준수, 권순홍, 하동대, 최장운, 이만형 (1996),

“PIV를 이용한 다수원주 주위 유동장 해석”, 한국해양공학회지, 제10권, 3호, pp 89~95.

전완수, 박준수, 권순홍, 하동대, 이영호, 이만형 (1996), “PIV를 이용한 두 원주 주위의 유동장에 관한 실험적 연구”, 한국해양공학회지, 제10권, 3호, pp 83~88.

최향순, 박노식, 조철희 공역 (2001), “초대형부유식구조물”, 대선출판사.

B. Mutlu Sumer (1997), “Hydrodynamic Around Cylindrical Structures”, World Scientific.

M. Yuhi, H. Ishida, and S. Umeda (1999), “A Numerical Study of Three-Dimensional Flow Fields Around a Vertical Cylinder Mounted on Bed”, Coastal Structure'99, Losada(ed), pp 783~792.

Rong Zhao, Odd M. Faltinsen (1988), “Interaction between Wave and Current on Two-Dimension Body in the Free Surface”, Applied Ocean Research, Vol. 10, No. 2, pp 87~99.

Victor L. Streeter, E. Benjamin Wylie (1958), “Fluid Mechanics”, Eighth Edition, McGraw-Hill.