

## 진동하는 원형주상체 주위의 유동에 관한 PIV를 이용한 실험적 연구

송무석<sup>(1)</sup>, 이상대<sup>(2)</sup>

### Experimental Investigation of the Flow around an Oscillating Circular Cylinder by Using a PIV System

by

Museok Song<sup>(1)</sup> and Sang-Dae Lee<sup>(2)</sup>

#### 요 약

원형주상체가 진동하는 경우 Keulegan-Carpenter수를 10에서 30까지 변화시키며 이 때에 유기되는 유체력을 계측하고 전유동계측시스템을 (Particle Image Velocimetry) 개발하여 연관된 유동장을 분석하였다. 개발된 PIV 시스템은 고속 유동장 이미지를 홀수와 짝수의 주사선 이미지로 분리하는 방식을 시도하여 하나의 이미지로부터 속도추정이 가능하도록 하였다. KC수에 따른 실린더 주위의 유동을 "traverse street", "single pairing" 그리고 "double pairing"으로 관찰하였고 각 경우 박리되는 보오텍스의 형태에 따라 미세한 항력과 양력의 변화를 수반하는데 이들의 관계를 위상차와 보오텍스 박리의 형태 변화로 설명하였다.

#### Abstract

Flow around an oscillating circular cylinder was experimentally investigated. With varying Keulegan-Carpenter(KC) number from 10 to 30 the flow field with vortex sheddings and the related hydrodynamic forces exerting on the cylinder were measured. A newly developed PIV(paricle image velocimetry) successfully captured the complex vortical flows varying with the KC number and the flow patterns were "traverse street", "single pairing" and "double pairing" of vortices with increasing KC number. At a certain KC number range the lift force undergoes a transition showing little periodicity due to surrounding complicated shedded vortices.

#### 1. 서 론

원형주상체 주위의 유동은 단순한 듯 하면서도 주상체의 거동 혹은 주위 유체의 운동에 따른 유동의 박리로 상당한 복잡성을 띤다(Williamson [1996]). 균일 유동 중에서는 유속에 따라 정상

상태에서 비정상상태로, 층류 경계층에서 난류 경계층으로 그리고 주기적이고 층류인 후류에서 난류 후류로 다양한 변화를 보인다. 주상체가 주기적으로 진동하는 경우에는 균일 유동중과 달리 보오텍스의 생성이 주상체의 운동방향과 속력에 따라 자유롭지 못하게 되고 결과적으로 성

(1) 정회원, 홍익대학교 조선해양공학과, msong@hongik.ac.kr

(2) 삼성전기

장하여 발달된 형태로 유동장에 떨어져 나오게 되는 보오텍스의 크기와 운동방향 그리고 개수가 진동 양식 (혹은 KC수,  $UT/D$ ,  $U$ 는 대표속도,  $T$ 는 주기,  $D$ 는 실린더 직경)의 영향을 받게 된다(Sumer et al.[1997]). 주위의 유동에 지배를 받는 유체력도 특히 양력의 면에서 KC수의 영향을 받는데, 본 논문은 이러한 현상을 정량적으로 살펴보기 위한 기초작업의 보고이다.

원형수상체를 KC수 10에서 30까지 변화되도록 진동시키며 이때에 유기되는 유체력을 측정하고 전유동계측시스템을 (Particle Image Velocimetry) 개발하여 연관된 유동장을 분석하였다. 개발된 PIV 시스템은 고속 유동장 이미지를 홀수와 짝수의 주사선 이미지로 분리하는 방식을 시도하여 하나의 이미지로부터 속도추정이 가능하도록 하였다. KC수에 따른 실린더 주위의 유동을 “traverse street”, “single pairing” 그리고 “double pairing”으로 관찰하였고 각 경우 박리되는 보오텍스의 형태에 따라 미세한 항력과 양력의 변화를 수반하는데 이들의 관계를 위상차의 개념으로 설명하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치

본 실험을 위하여 투명한 유리로 소형 수조를 제작하고 (1.5m × 0.6m × 0.3m) 사용 가능한 렌즈의 초점거리와 유동영역의 확보를 고려하여 Fig. 1과 같이 취부대에 설치하고 수심은 210 mm로 고정하였다. 진동을 유발하는 동요장치로는 Panasonic사의 서보모터와 슬라이딩 기어가 부착된 이송장치(traverse)를 제작하여 조합하였다. 진동의 변위는 50회전이 가능한 포텐셔미터(potentiometer)를 이용하여 계측하였고 진동의 주기와 크기는 Tektronix 함수발생기와 Tektronix Digital Data Acquisition System의 아날로그 출력을 조합하여 설정하였다. 모터와 이송장치의 특성상 진동의 폭이 입력전압과 선형적인 관계를 보이지 못하여 검증시험을 수행하고 얻어진 자료를 중심으로 원하는 진동을 발생하였다.

항력과 양력을 실시간으로 계측하기 위하여 작용점에 무관하게 힘의 계측이 이루어지는 스

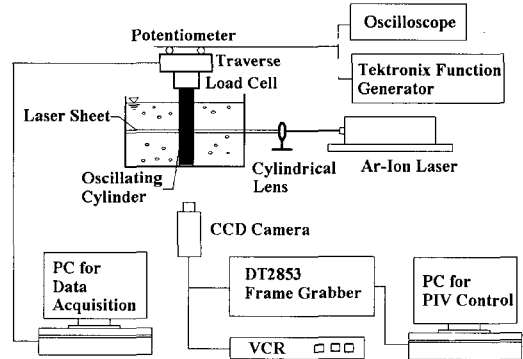


Fig. 1 Schematic Arrangement of the Experimental Setup.

트레인 게이지 타입의 동력계를 이용하였다(서정천 등[1996]). 검력계의 동적 특성은 공기 중에서 질량체를 매달고 진동하여 얻어지는 관성력을 이론값과의 비교를 통하여 파악하였는데, 우리의 실험 영역에서 5% 이내의 오차를 줄을 확인하였다. 실험에 사용한 실린더는 직경이 20 mm 와 100mm인 투명한 플라스틱이고 검력계에 수직으로 부착하여 실험한다.

이상과 같이 실험 장치를 마련하고 원하는 진폭과 주기로 실린더를 움직이며 변위, 항력 그리고 양력을 계측한다. 계측간격(sampling frequency)은 FFT를 수행할 경우를 고려하여 10주기 동안 총 4096개의 데이터가 얻어질 수 있도록 하였고 보통 200Hz 정도의 값을 사용하였다.

### 2.2 Particle Image Velocimetry

전유동장의 실시간 계측은 LDV나 열선 유속계와 비교할 때에 정확도면에서 아직 많은 문제점을 안고 있지만 비정상 유동을 정량적으로 파악할 수 있다는 면에서 강점을 가진다. 컴퓨터와 영상처리기술의 발달로 근래에 많이 시도되고 있는 Particle Image Velocimetry는 연구자에 따라 분류하는 방식도 다양하고 속도의 추적법 또한 다양하지만, 기본적으로 유동을 따라가는 입자의 연속 사진으로부터 유동장을 파악하는 방식이다(Adrian[1991], Buchhave[1992]). 일반적으로 발광 입자의 수가 매우 적어 입자간의 혼돈 없이 각각의 입자추적이 가능한 경우(low density

image, Particle Tracking Method)와 입자의 수가 너무 많아 입자의 분리 없이 입자군의 형태를 추적하는 방식(high density image, Image Speckle Velocimetry)의 중간 형태를 흔히 PIV라 하는데, 본 연구에서는 이러한 방식을 취하여 전유동장 계측 시스템을 개발하였다.

Fig. 1에 함께 보인 바와 같이 PIV 시스템은 얇은 두께의 (1mm 정도) 발광면(laser sheet)을 만들어 주는 레이저 광원과 원통형 렌즈 그리고 빛나는 유동상 영상을 저장할 수 있는 카메라 장치로 구성된다. 본 연구에서 사용된 레이저는 300mW급의 아르곤 이온 레이저이고 초당 30프레임을 찍을 수 있는 CCD 카메라(pixel수, 512×480) Nikon 24-50mm 렌즈가 사용되었다. CCD 카메라의 영상은 DT2852 영상획득장치에(image grabber) 의해 원하는 순간에 저장되고 연속 이미지는 비디오 레코더에 함께 저장한다. 이미지 그래버의 성능은 단위시간당 저장할 수 있는 이미지 수로 평가되는데 우리의 경우 0.09초가 두 이미지 사이의 최소 시간 간격이다. 유속이 상대적으로 느릴 경우 이러한 정도의 성능이 문제되지는 않지만 일반적으로 보오텍스를 동반하는 유동은 국부적으로 매우 빠른 유속을 나타내는데 이때에 입자의 궤적이 이미지 상에 선으로 나타나게 되어 정확한 유속 추정이 어렵게 된다.

이에 본 연구에서는 CCD의 주사 방식이 1/60초의 시간 간격을 두고 홀수선과 짝수선을 번갈아 간다는 점을 이용하여 상대적으로 고속의 유동이 수반되는 경우 하나의 이미지를 1/60초 떨어진 두 개의 이미지로 분리하는 방식을 개발하여 사용하였다(Fig. 2).

기본적으로 유동 추적용 입자는 중립부력을 가져야 하지만, 약간의 대류속도가 있는 경우 부력에 의하여 주된 유동이 교란되지 않고 발광면이 중력과 수직인 방향이라 할지라도 연속되는 이미지에 같은 입자가 머물게 된다. 하지만 본 연구에서와 같이 정수중 실험의 경우는 입자의 중립부력 정도가 매우 중요하고도 어려운 문제이다. 여러 입자를 시도해본 결과 비중 1.02인(중합도 1020) 순수 PVC particle을 선택하고 다시 미세한 부력의 조절은 수조에 소금을 넣거나 더운 물을 섞어주는 방식으로 하였다.

Fig. 3은 본 연구에서 사용하는 PIV 시스템의 계통도를 나타낸다. 먼저 원하는 순간의 이미지

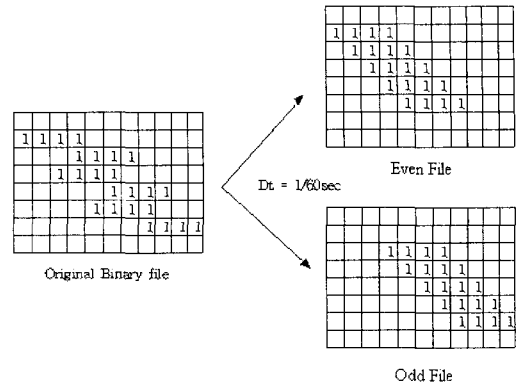


Fig. 2 Image decomposition into even and odd images.

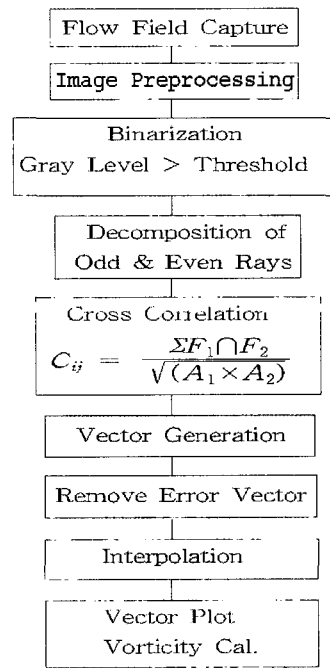


Fig. 3 Flow chart of the PIV system.

를 포착하고 이를 영상처리 소프트웨어 상에서 밝기와 선명도를 조절하고 필터링을 통하여 화질을 개선한다. 이렇게 전처리된 이미지를 적절한 한계값(threshold value)을 이용하여 pixel당 0과 1이 주어지는 바이너리 파일로 변환한다. 바이너리 파일을 다시 이미지 파일로 읽어 들어

원래의 영상과 비교하면 이미지의 손실이나 불필요한 부분의 첨가가 없는지 파악할 수 있다. 이제 이 바이너리 이미지를 홀수선과 짝수선의 이미지로 분리하고 각 이미지의 빈 라인에는 주위의 데이터로부터 0과 1을 판별하여 할당하여 준다. 이때에 입자 가장자리의 형상이 어느 정도 손실될 수 있지만 뒤에 설명할 검증시험에서 심각한 문제를 발생시키지 않음이 판명되었다.

이렇게 구해진 두 개의 1/60초 간격의 바이너리 이미지는 cross-correlation 방식으로 격자점의 속도를 구하는데 사용된다. 속도벡터를 찾는데 중요한 인자는 search window(최소한 하나의 입자 이미지를 포함하는 크기)의 크기와 search window를 이동시키는 거리인데 이들은 검증시험을 통하여 조심스럽게 추정되어야 효과적인 작업이 가능하다. Cross-correlation 값의 threshold를 적절히 입력하면 다수의 속도벡터가 구해지는데 이들 벡터 중에는 오류벡터도 많이 포함되게 된다. 이들 오류 벡터는 비디오 녹화된 영상을 함께 관찰하며 삭제시키거나 수정하고 이러한 과정을 거치면 최종 보간과정을 거쳐 정규격자에서의 속도분포가 구해진다.

Fig. 4는 개발된 시스템의 검증시험의 결과를 보이고 있다. 반경이 약 20cm인 검은 원판에 임의의 흰색 점을 불규칙적으로 표시하고 이를 아는 속도로 (2Hz) 회전시켰을 때의 속도를 추정한 그림을 실제값과 함께 보였다. 회전의 중심은 화면에서 약간 좌측으로 편향되어 있는데, 가장 위의 그림이 주어진 속도를 그린 것이고 중앙의 그림은 CCD 카메라에 잡힌 이미지이다. 이 이미지를 개발된 시스템을 이용하여 속도를 추정한 결과가 가장 아래의 그림인데 전 영역에서 방향과 크기가 실제와 거의 유사한 유동을 보임을 확인할 수 있다.

### 3. 실험결과 및 고찰

Table 1에 실험을 실시한 경우에 대하여 각종 파라미터와 계측값을 정리하였다. 실린더는 직경이 2cm(case1~3)와 10cm(case4~6)인 두 종류를 이용하였고 KC가 10~20 영역에 놓일 수 있도록 진동주기와 진폭을 정하였다. 실린더의 직경(D)과 최대이송속도( $U_m$ )를 이용한 레이놀즈수 ( $Re=DU_m/\nu$ )는 작은 실린더의 경우(case1~3)

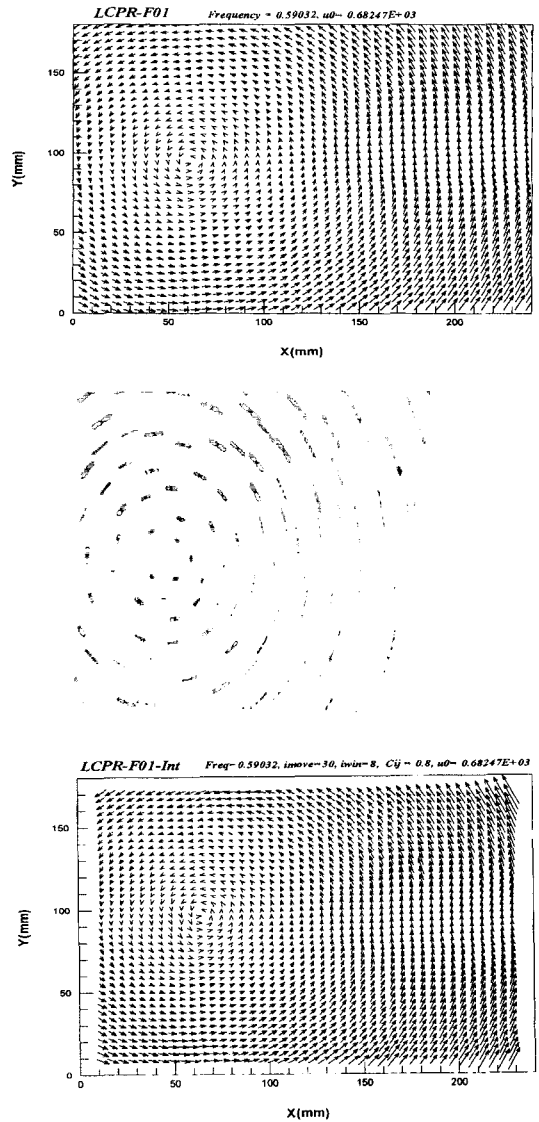


Fig. 4 Test Results with a Rotating Disk. Exact, Raw Image and Measured Velocity Vectors from the Top.

2000~3000 이고 큰 실린더의 경우(case4~6) 10000 ~ 20000까지의 값을 가진다. Frequency parameter는 ( $Re/Kc, D^2/\nu T$ ) 200에서 1000 정도의 값을 갖는다. 표에서  $F_x$ 와  $F_y$ 는 각각 항력과 양력을 나타내고 첨자 a 는 공기 중에서의 실험 결과이고  $F'_{xw}$ 는 수중에서의 결과를 공기 중에

Table 1 Summary of the Parameters and Coefficients Tested.

Cases	Kc	Re	D(m)	A(m)	f(hz)	Um(m/s)	Fxa(N)	Fxw(N)	Fyw(N)	F'xw(N)	Cx
1	12	2213	0.02	0.03839	0.5	0.1206	0.10811	0.12159	0.06395	0.01348	0.44176
2	14	2598	0.02	0.04507	0.5	0.1416	0.12493	0.14474	0.04546	0.01981	0.47071
3	18	3308	0.02	0.05739	0.5	0.1803	0.14797	0.19592	0.01650	0.04795	0.70291
4	12	14113	0.10	0.19586	0.125	0.1538	0.07016	0.36419	0.32085	0.29403	1.18412
5	14	15722	0.10	0.21820	0.125	0.1714	0.10428	0.48569	0.32791	0.38141	1.23760
6	18	20435	0.10	0.28361	0.125	0.2227	0.13797	0.66475	0.05962	0.52678	1.01176

서 해당 주파수 운동시 얻어지는 힘을 빼서 수정한 것이다. 여기서 항력의 크기는 진동 주기의 FFT를 수행한 크기이고 양력은 2배의 진동수에 해당하는 값이다. 힘의 계수( $C_x, C_y$ )들은 각각  $(0.5\rho U_m^2 DH)$ 로 무차원 하였고 여기서 H는 중심(21cm)이다.

우리의 실험영역에 해당하는 자료가 부족하여 정확하게 비교하기는 어렵지만 Sarpkaya[1981]의 결과(KC=10에서 양력계수가 2.0이고 KC의 증가와 함께 줄어드는)와 유사한 경향을 보인다. 양력의 관점에서 레이놀즈수의 영향은 본 연구의 영역에서는 발견하기 어렵고 항력의 관점에서는 오히려 낮은 레이놀즈수에서 작은 값을 보이는 점이 너무 직경이 작은 실린더를 사용한다 따른 문제, 즉 correlation length에 (2차원의 유동이 유지되는 축방향 길이) 비해 실린더의 길이가 너무 큼에 따른 문제로 생각된다.

KC 수에 ( $KC=2\pi A/D$ , A는 진폭, D는 실린더 직경) 따른 보오텍스 박리의 형태 변화는 실린더 주위에서 발생하는 보오텍스가 충분히 성장하여 스스로 박리될 수 있는 시간적 여유가 주어지지 않기에 달려있는데 Fig. 5에 이를 개념적으로 보이고 있다.

KC 수가 아주 작을 경우에는 보오텍스가 거의 생성되지 않거나 대칭으로 생성된 보오텍스가 미처 자라나 박리되기 전에 반대 방향의 실린더 거동으로 보오텍스가 반대편으로 밀려나고 이들은 다시 반대편에서 생성되는 보오텍스와의 상호작용으로 소산되어 버린다. 한편 KC 수가 10 정도 되면 한쪽편에서 비대칭으로 발달한 보오텍스가 충분히 자라 거의 박리 전 단계에 이르고, 이때에 실린더가 방향을 바꾸면 발달된 보

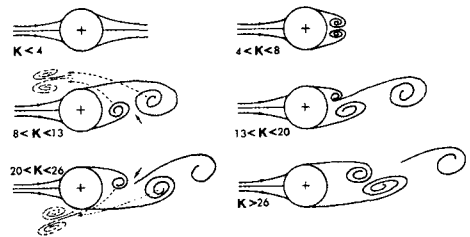


Fig. 5 Kinematics of the Vortices with KC Variation(Sarpkaya[1981]).

오텍스는 실린더 운동과 수직인 방향으로 떨어져 나간다. 이러한 보오텍스의 박리는 반주기 동안에 한번씩 일어나며 초기의 조건에 따라 항상 위로 떨어지거나 아래로 떨어진다. 이러한 보오텍스 유동을 traverse street이라고 하는데 (Sheldon[1995]) 우리의 경우 KC 수 12에 해당하는 Fig. 6의 가장 위의 그림에서 잘 보여주고 있다. 그림에서 실린더는 좌우로 움직이고 현재 실린더가 가장 왼쪽에 놓여있는 순간이다. 중앙의 그림은 KC 수 14일 경우 single pairing의 유동을 보여주는데, 실린더가 왼쪽으로 이동하며 발생된 한 쌍의 보오텍스가 실린더가 우측으로 이동하며 상부로 떨어져 나간다. 우측 끝에서 떨어진 보오텍스는 이미 유동장 밖으로 흘러나가 그림에 나타나지 않고 있지만 이러한 쌍보오텍스는 쌍보오텍스의 유기속도에 의하여 실린더 진행 방향과 45°정도의 각도를 유지하며 위아래로 움직인다. 아래의 그림은 KC 수 18의 경우로 거의 두 쌍의 보오텍스가 반주기당 떨어져 나가는 상황이다.

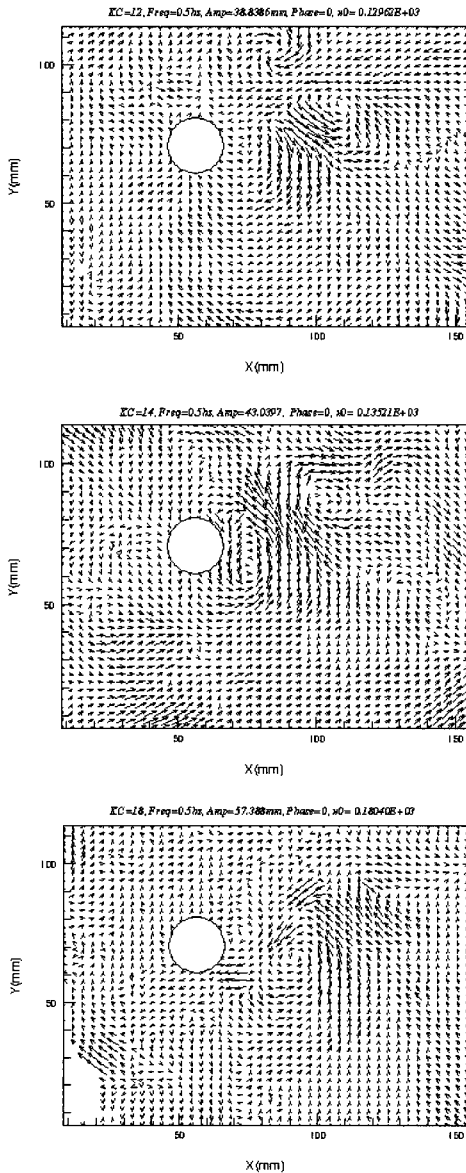


Fig. 6 Velocity Vectors for KC=12, 14 and 18 from the Top.

Fig. 7에 KC 수 18의 경우 보오티시티 분포를 보였는데, 이 경우에 불완전하게 발달한 보오텍스의 박리로 유동의 대칭성은 거의 찾아보기 힘들고 이에 따른 양력의 심한 변화를 예상할 수 있다.

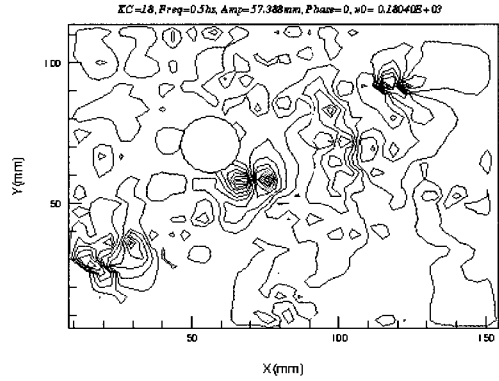


Fig. 7 Vorticity Contour for KC=18.

Fig. 8은 KC 수 변화에 따라 얻어지는 양력과 항력을 실린더의 변위와 함께 3주기 동안 시간의 함수로 보이고 있다. 여기서 항력은 공기 중에서의 관성력을 수정하지 않은 값이므로 상당히 과장된 면이 있지만 위상의 차이는 거의 없다. 또한 그림의 결과는 실린더 직경이 10cm인 경우를 정리한 것이고 실린더 직경이 2cm인 경우에는 계측되는 값이 상대적으로 작고 앞에 언급한 correlation length의 이유로 힘을 논하기에 문제가 있다. 우리의 실험 영역에서 박리의 형태에 미치는 레이놀즈수의 영향은 작은 것으로 알려져 있으므로 그림의 결과를 앞에서 보인 보오텍스 유동과 연관지어 생각할 수 있다. 우선 항력은 실린더가 중앙부에 위치할 때에 최대 혹은 최소가 됨을 알 수 있는데 이는 우리의 실험 영역이 관성력보다는 점성력이 중요하게 작용하는 영역임에 기인한다(레이놀즈수가 20000 이하). 양력은 KC 수가 14까지는 눈에 띄는 최대와 최소를 보이지만 KC 수 18의 경우는 거의 0 근처의 값을 가짐을 볼 수 있다. 이는 앞의 유동장 그림에서 확인한 바와 같이 KC 수가 12일 경우 잘 발달된 비대칭 보오텍스의 생성과 박리가 1주기 동안 두 번씩 생기고 이들 보오텍스가 실린더 운동의 방향과 관계없이 초기조건에 따라 위나 아래로 떨어지므로 양력의 비대칭성을 동반하며 뚜렷한 피크를 보이는 것으로 이해할 수 있고, 반면 18의 경우는 double pairing으로 유동이 상대적으로 복잡했던 점에 기인한다. Sarpkaya [1981]의 결과도 KC 수 15 전후에서 실험적 양력계수가 상당히 변화무쌍함을 보이고 있다.

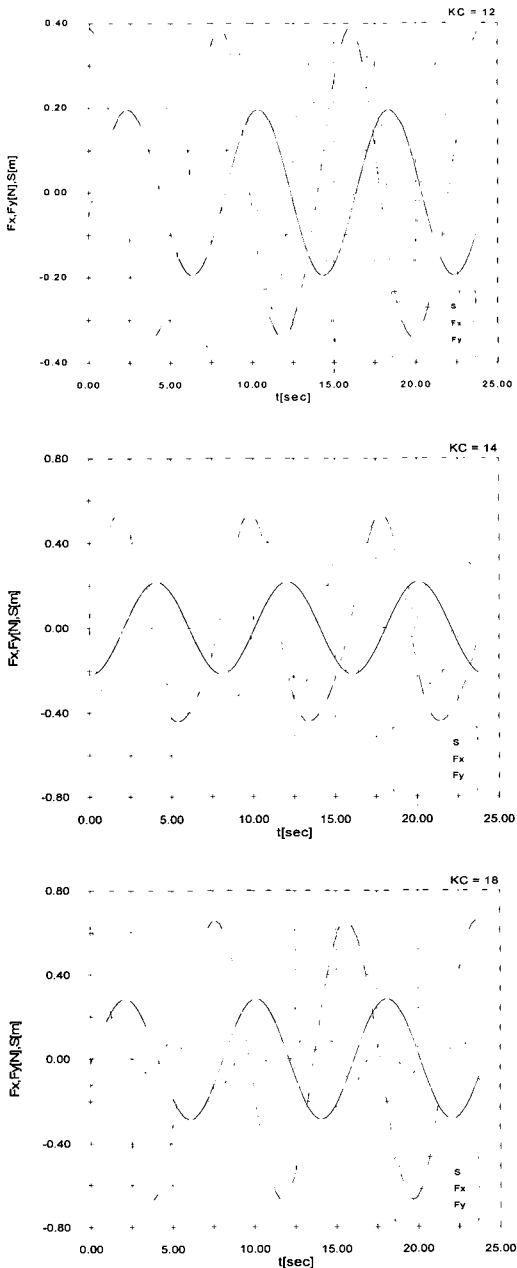


Fig. 8 Displacement(Solid), Lift(Dotted) and Drag(Dashed) as Function of Time. KC= 12, 14 and 18 from the Top.

#### 4. 결 론

원형주상체가 진동하는 경우 Keulegan-Carpenter수를 10에서 30까지 변화시키며 이때에 유기되는 유체력을 계측하고 진유동계측시스템을 (Particle Image Velocimetry) 개발하여 연관된 유동장을 분석하였다. 개발된 PIV 시스템은 고속의 유동 이미지를 홀수 및 짝수 주사선 이미지로 분리함으로써 하나의 이미지로부터 효과적으로 유동 추적이 가능하다. KC수에 따른 실린더 주위의 유동을 traverse street, single pairing 그리고 double pairing으로 관찰하였고 각 경우 박리되는 보오텍스의 형태에 따라 미세한 항력과 양력의 변화를 수반한다. KC 수가 14에서 18로 증가하며 양력의 주기는 감소하고 크기는 한 오더(order) 정도 떨어진다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단 지역대학우수과학자지원연구(R05-2001-000-01168-0) 지원으로 이루어졌습니다. 또한 PIV 개발에 많은 도움을 주신 건국대학교 김성균 교수님과 해양대학교 이영호 교수님께 감사를 포함합니다.

#### 참고문헌

- [1] 서정천·김영하, 1996, "파력계측 로드셀 개발", 서울대학교 해양시스템공학연구소.
- [2] Adrian, R., 1991, "Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics", Annu. Rev. Fluid Mech.
- [3] Buchhave, P., 1992, "Particle image velocimetry- tatus and trends", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 5.
- [4] Bruce, T., Easson, W. J. and Greated, C. A., 1993, "The kinematics of oscillatory flows past cylindrical structures", Proc. 3rd ISOPE, Singapore.
- [5] Sarpkaya, T. and Isaacson, M., 1981, Mechanics of wave forces on offshore structures, Van Nostrand, NY.
- [6] Sheldon, G., 1995, Fluid vortices, Kluwer Academic Publisher.
- [7] Sibetheros, I. A. and Miksad, R. W., 1993, "An experimental investigation of the near

flow around a cylinder in reversing planar flow", Proc. 3rd ISOPE, Singapore.

[8] Summer, B. M. & J. Fredsoe, 1997, Hydrodynamics around cylindrical structures, World Scientific.

[9] White, F. M., 1994, Fluid Mechanics, McGraw-Hill, NY.

[10] Williamson, C. H. K., 1996, "Vortex dynamics in the cylinder wake", Ann. Rev. Fluid Mech.