

# PIV에 의한 선박 슬로싱 유동 측정해석

도덕희<sup>†</sup> · 조용범<sup>\*\*</sup> · 편용범<sup>\*\*</sup> · 백태실<sup>\*\*\*</sup> · 권순홍<sup>\*\*\*\*</sup>  
이정한<sup>\*\*\*\*\*</sup> · 황윤식<sup>\*\*\*\*\*</sup> · 류민철<sup>\*\*\*\*\*</sup>

## Measurements on a Ship's Sloshing Flows by PIV

Deog Hee Doh, Yong Beom Pyeon, Yong Beom Cho, Tae Sil Baek, Soon Hong Kwon,  
Jeong Han Lee, Yoon Sik Hwang, Min Cheol Ryu

### Abstract

The sloshing flows in the cargo tank model of a ship are measured by PIV and are analyzed with the results. The measurement system is consisted of a Nd-Yag laser(120mJ, 15Hz), two cameras(1k x 1k) and a host computer. Four experimental cases were tested for the tank model, in which swaying motions are made by 6 DOF-motion platform. The amplitudes of swaying are 9.76mm and 29.29mm, and the frequencies are 0.633Hz and 0.828Hz. The measurement regions are the vertical plane 50mm away from the front wall of the tank where a pump tower is installed. It was verified that the flow patterns of the sloshing are similar each other when the swaying amplitudes are similar.

**Key Words** : 슬로싱(Sloshing), 선박화물창(Ship' Cargo Tank), 입자영상유속계(PIV), 동요운동(Swaying Motion)

### 1. 서 론

선박 화물탱크 내의 액체화물은 슬로싱에 의하여 탱크내부에 설치된 펌프타워에 유체동하중을 주게 된다. 유체동하중분포는 펌프타워의 설계에 있어서 반드시 고려되어야 하지만 유체동하중분포를 측정할 수 있는 측정법은 아직 없다.

압력공에 의한 하중분포 측정은 점계측에 의한 것이기 때문에 전체에 걸친 하중분포 추정에는 한계를 지닐 뿐만 아니라, 실시간의 하중분포추정은 측정원리상 어려운 관계로 비정상유동(unsteady flows)에 의한 유체력의 비정상 하중분포 추정은 불가능하다. 또한, 슬로싱의 비정상 비선형성에 의하여 발생하는 불규칙 ejection 현상 등은 아직 그 발생메커니즘이 규명되지 않은 관계로 이에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 비정상 비선형 현상 규명에 강점을 지닌 PIV기술을 적용하여 슬로싱현상의 발생과정을 정량적으로 평가하고자 하는 것을 연구의 목적으로 삼고 있다.

---

<sup>†</sup> 한국해양대

E-mail : doh@hhu.ac.kr

<sup>\*\*</sup> 한국해양대 대학원

<sup>\*\*\*</sup> 포항제1대 자동차공학과

<sup>\*\*\*\*</sup> 부산대 조선해양공학부

<sup>\*\*\*\*\*</sup> 대우조선해양(주)

---

## 2. 선박 모델 실험

### 2.1 실험장치 및 절차

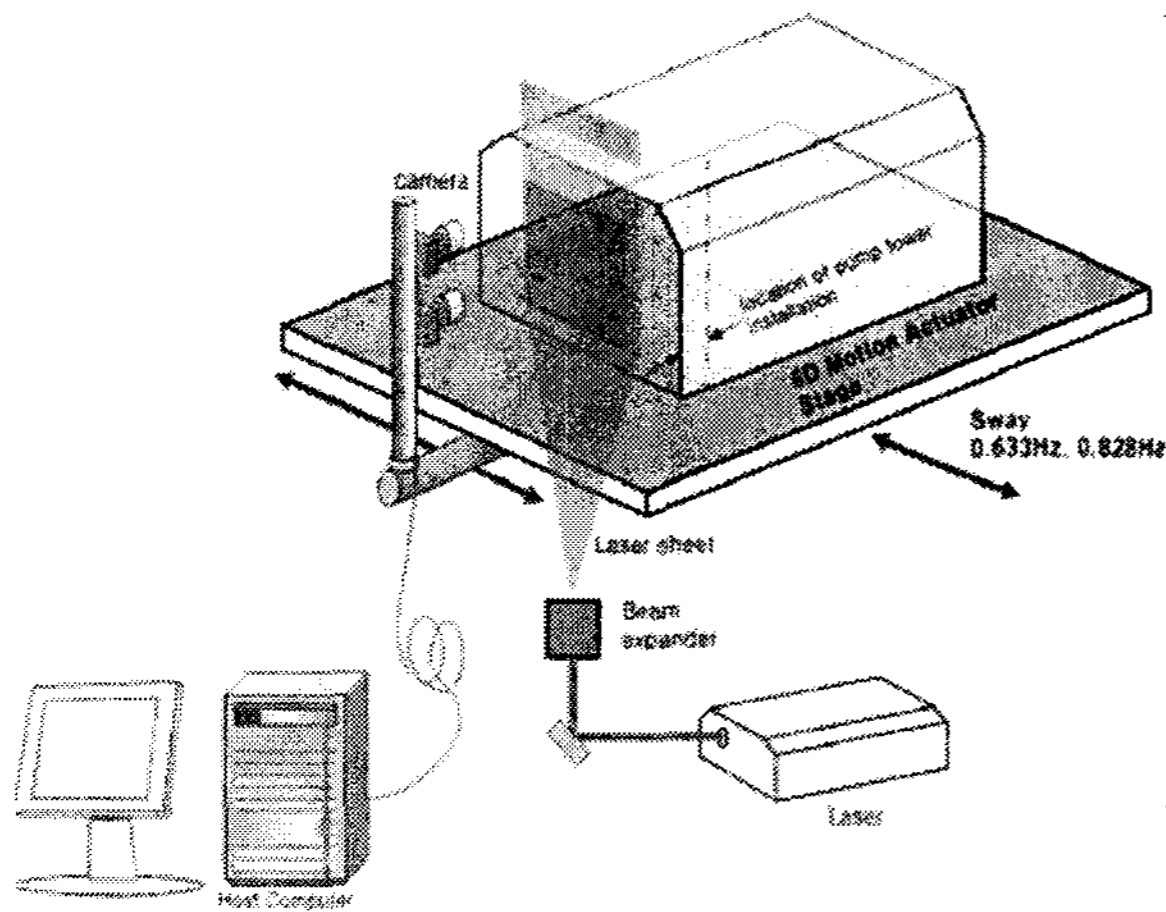
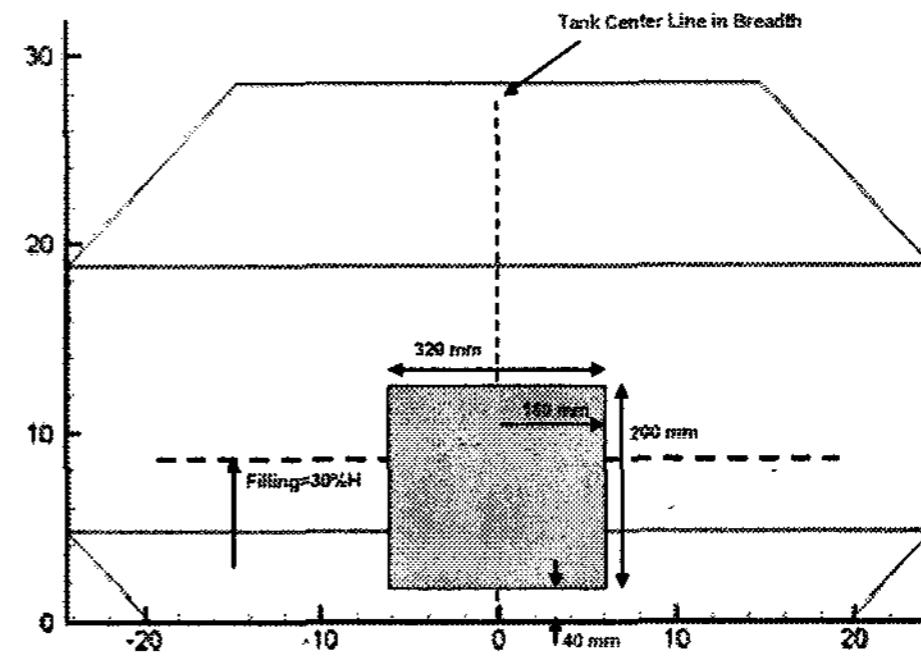


Fig. 1 PIV experimental setup

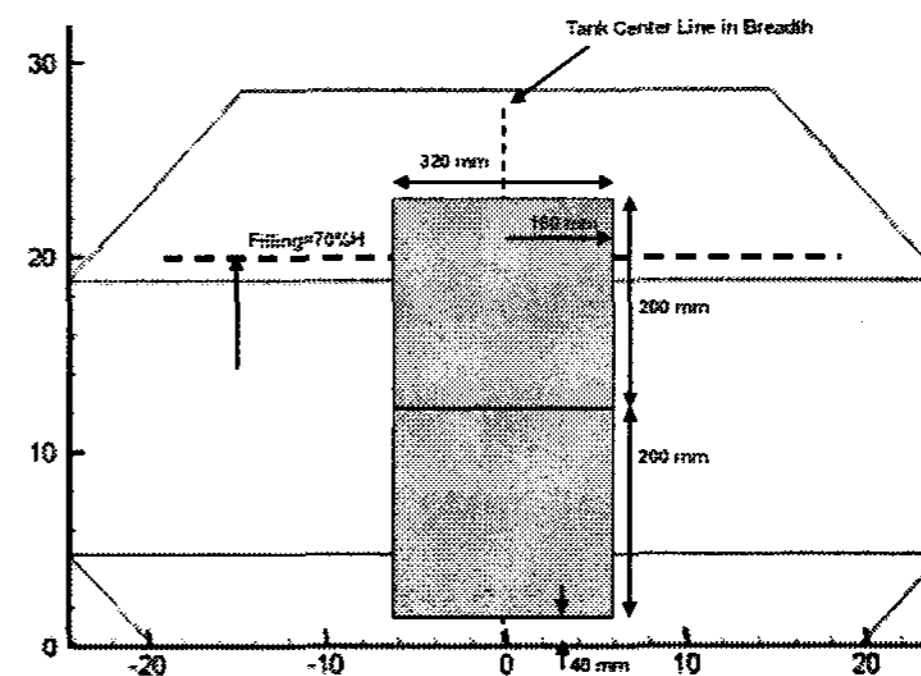
Fig. 1은 PIV실험장치<sup>(1)-(3)</sup>의 배치도를 나타낸다. PIV측정시스템은 두 대의 카메라(~15Hz), Nd-Yag 레이저, 호스트컴퓨터로 구성되어 있다. 화물창 탱크는 실제 크기의 1/50모델이다. 이 탱크는 슬로싱을 발생시키기 위하여 6자유도 운동발생장치에 설치되었다. 실험조건은 Table 1과 같다. 물을 탱크 높이의 30%와 70%로 채워, 요동운동(swaying)을 9.76mm와 29.29mm의 진폭으로 0.63Hz, 0.83Hz일 때 탱크모델에 발생하는 슬로싱 현상에 대하여 PIV실험을 수행하였다. 운동중의 탱크내부 유동을 측정하기 위하여 PIV측정<sup>(4)</sup>을 위한 카메라를 그림과 같이 6자유도 운동 발생장치의 상판부에 장착하였다. 측정영역은 Fig. 1과 같이 탱크측벽으로부터 5cm떨어진 단면의 중심선으로부터 좌우 160mm로 구성되는 수직단면에 설정되었다.

Table 1. Experimental conditions

case	water level	swaying amplitude[mm]	frequency[Hz]
A	30%	9.76	0.633
B	30%	29.29	0.633
C	70%	9.76	0.828
D	70%	29.29	0.828



(a) 30% level



(b) 70% level

Fig. 2 Measurement regions

물의 충전 높이가 30%일 때는 Fig. 2와 같이 하부 카메라로 측정하였기 때문에 측정영역은 가로 x 세로의 크기가 320mm x 200mm이며, 70%일 때는 상부와 하부카메라를 이용하여 동시에 PIV측정을 수행하였다.

### 2.2 실험 결과

Fig. 3 case A일 때의 하부측정 카메라의 4시각분의 실험영상과 그 시각들에 있어서의 속도벡터분포를 나타낸다. case A인 경우(가진 진폭 9.76mm, 가진 주파수 0.63Hz, 수위가 30%)에는 속도벡터의 분포들이 탱크내부의 자유표면유동(free surface flows)의 형상에 따라 분포되어 있음을 알 수 있다. 전반적으로 steady한 슬로싱 현상이 발생되고 있음을 알 수 있다. swaying 운동에 따라 속도가 빠른 부분(accelerated mass zone, AMZ)이 좌우로 요동하고 있음을 알 수 있다. 이 AMZ은 진폭이 커지게 됨에 따라 나중에는 unsteadiness현상을 유발

하게 된다. Fig. 4의 case C인 경우(가진 진폭 9.76mm, 가진 주파수 0.82Hz, 수위가 70%)에는 속도벡터의 분포가 자유표면 유동의 형상과는 다른 양상을 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 자유표면 유동 외에도 유체가 점핑(jumping) 혹은 ejection 등에 의하여 쇄파(breaking wave)에 의하여 속도벡터분포가 형성되었기 때문이다. case A에서와 마찬가지로 AMZ가 좌우로 이동하지만, 자유표면에서는 breaking되는 현상을 알 수 있다. AMZ는 탱크내에서 자유로이 이동하고 있다가 또 다른

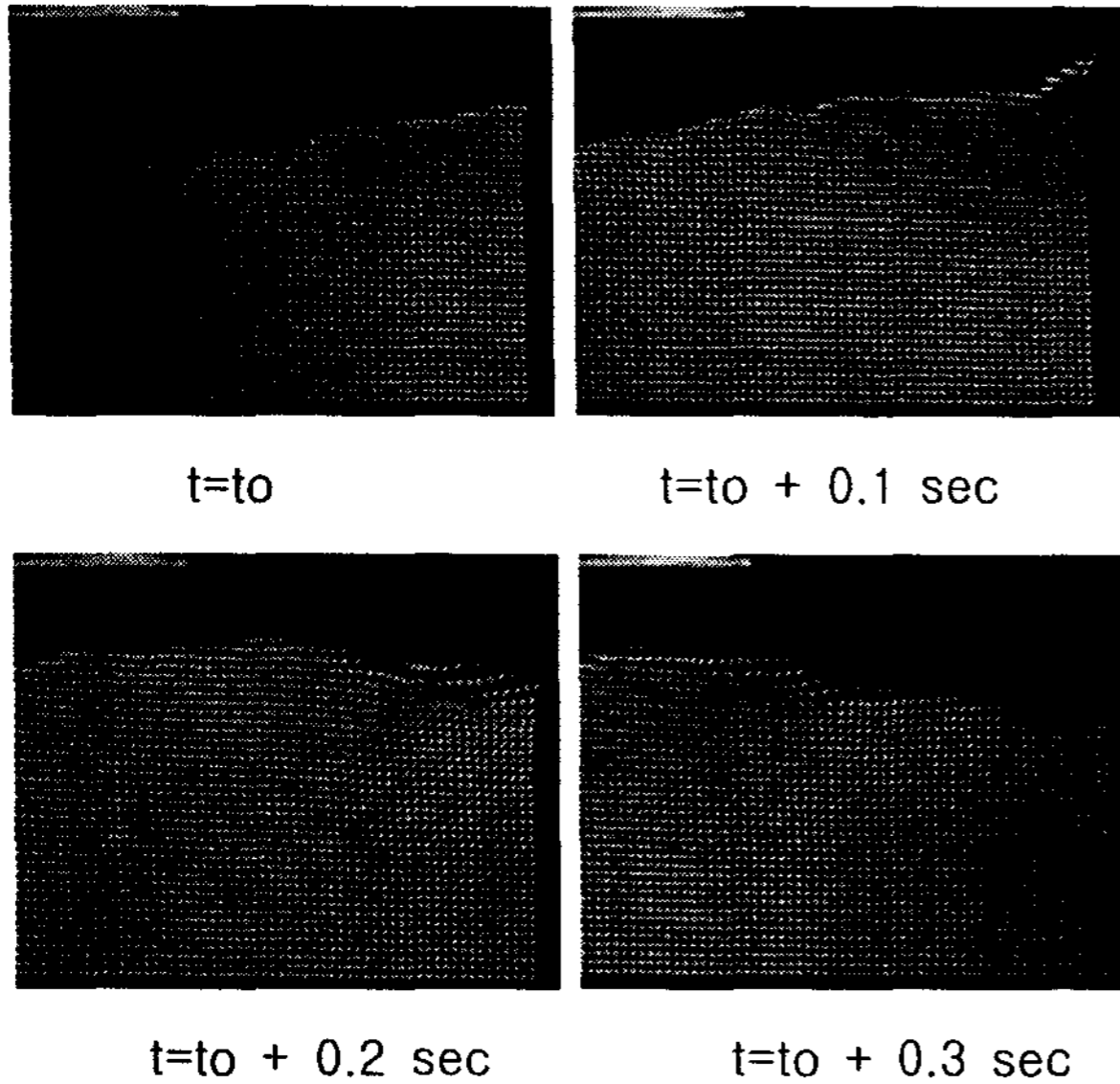


Fig. 3 Velocity vector distribution(case A)

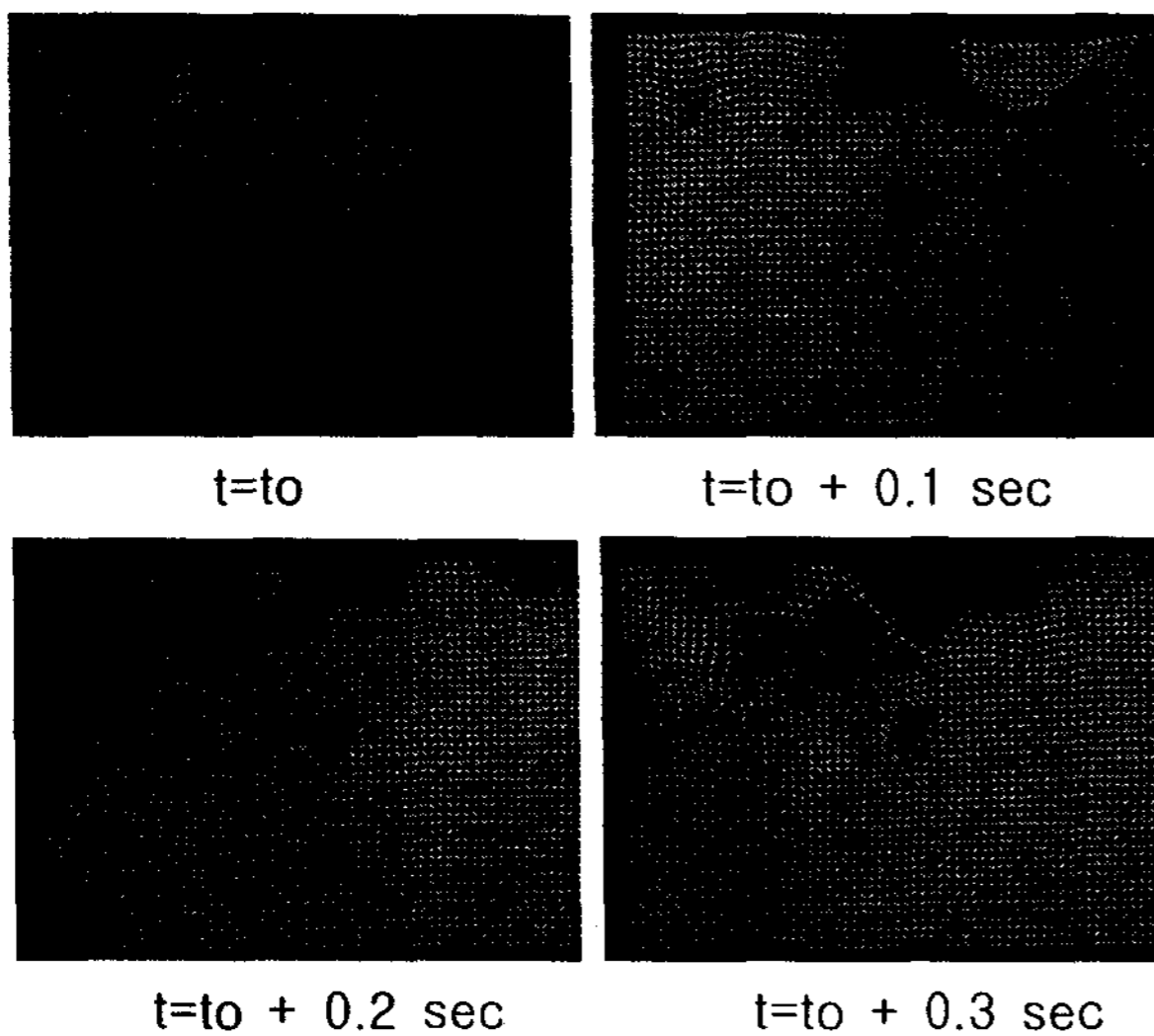


Fig. 4 Velocity vector distribution(case C)

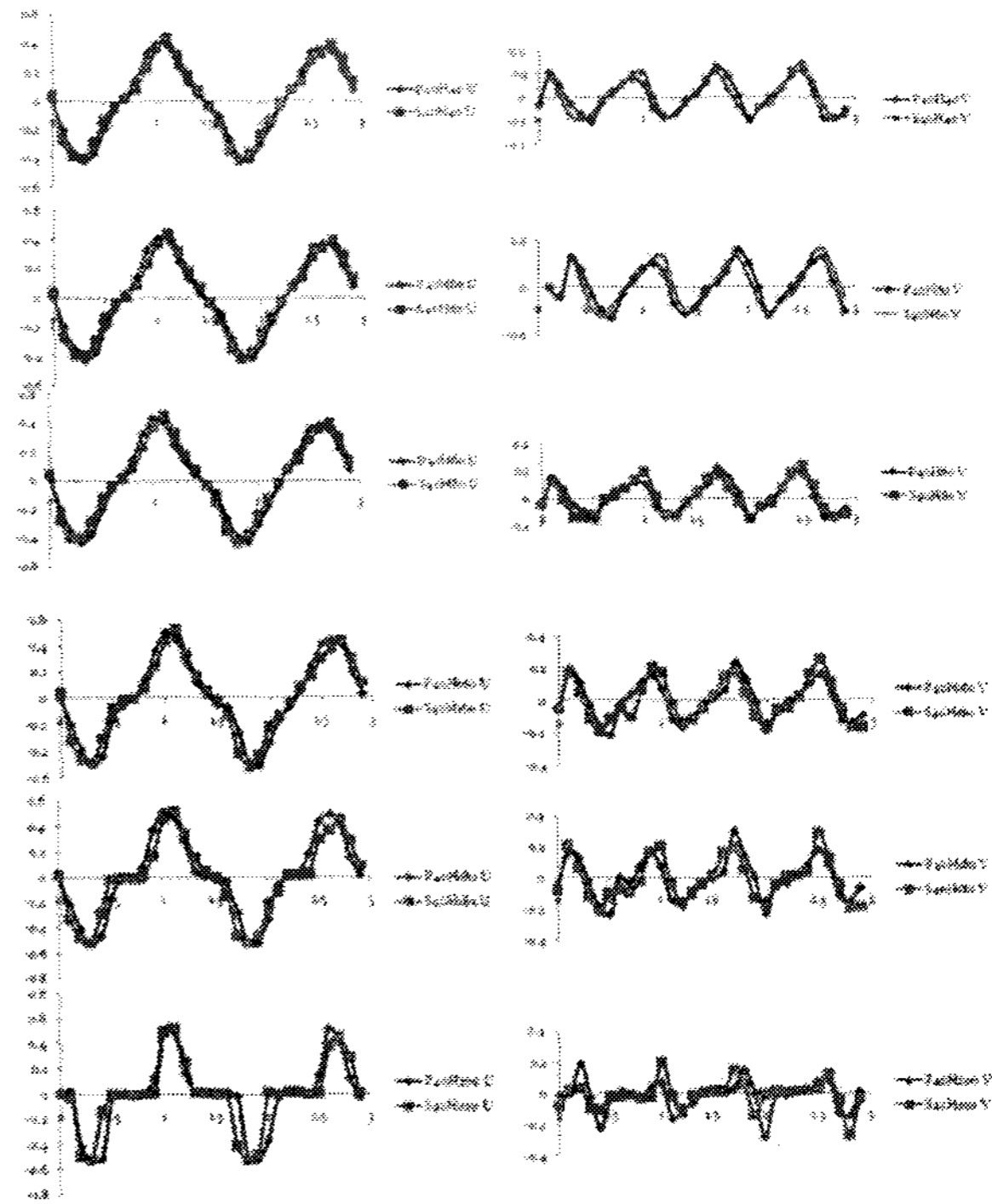


Fig. 5 Velocity profiles for U, V(case A)

국소가속된(locally accelerated) 질량계와 합일치하게(merging) 되면 보다 가속된 질량계의 발생을 의미한다고 볼 수 있다. 이는 탱크내부의 안전설계와도 관련된다고 볼 수 있다. Fig. 5는 case A의 경우, PIV 결과로부터 얻어진 속도벡터의 Tank중심선에서 좌(port:P)측으로 40mm 떨어져 있는 수직선상과 우(starboard:S)측으로 40mm 떨어져 있는 수직선상에서의 속도성분(U, V)의 측정결과를 보이고 있다. Y축은 속도의 크기를 나타내고 X축은 시간을 나타낸다. P40H220의 의미는 탱크중심선으로부터 왼쪽으로 40mm의 수직선과 탱크바닥으로부터 높이 방향으로 220mm의 위치에 있는 수평선이 만나는 교점의 위치를 의미한다. 전반적으로 V성분의 주파수가 U성분의 주파수보다 2배 이상으로 높은 것으로 나타났으며 V성분의 뚜렷한 주기적 변동양상도 수면 바로 아래 부분에서 나타났다. 특히, Case C의 경우는 수면상부로 갈수록 V성분의 진폭이 증가하는 양상을 보이고 있으며 시간에 따라서도 증가하는 양상을 보였다. 각 case별 특징을 살펴보면 다음과 같다. case A인 경우, 진폭이 작고 주파수가 느림으로 하단부의 U성분은 상단부에 비해서 비교적 입력값과 비슷한 톱니파 패턴의 움직임을 볼 수 있으나 수면상단으로 갈수록 U성분

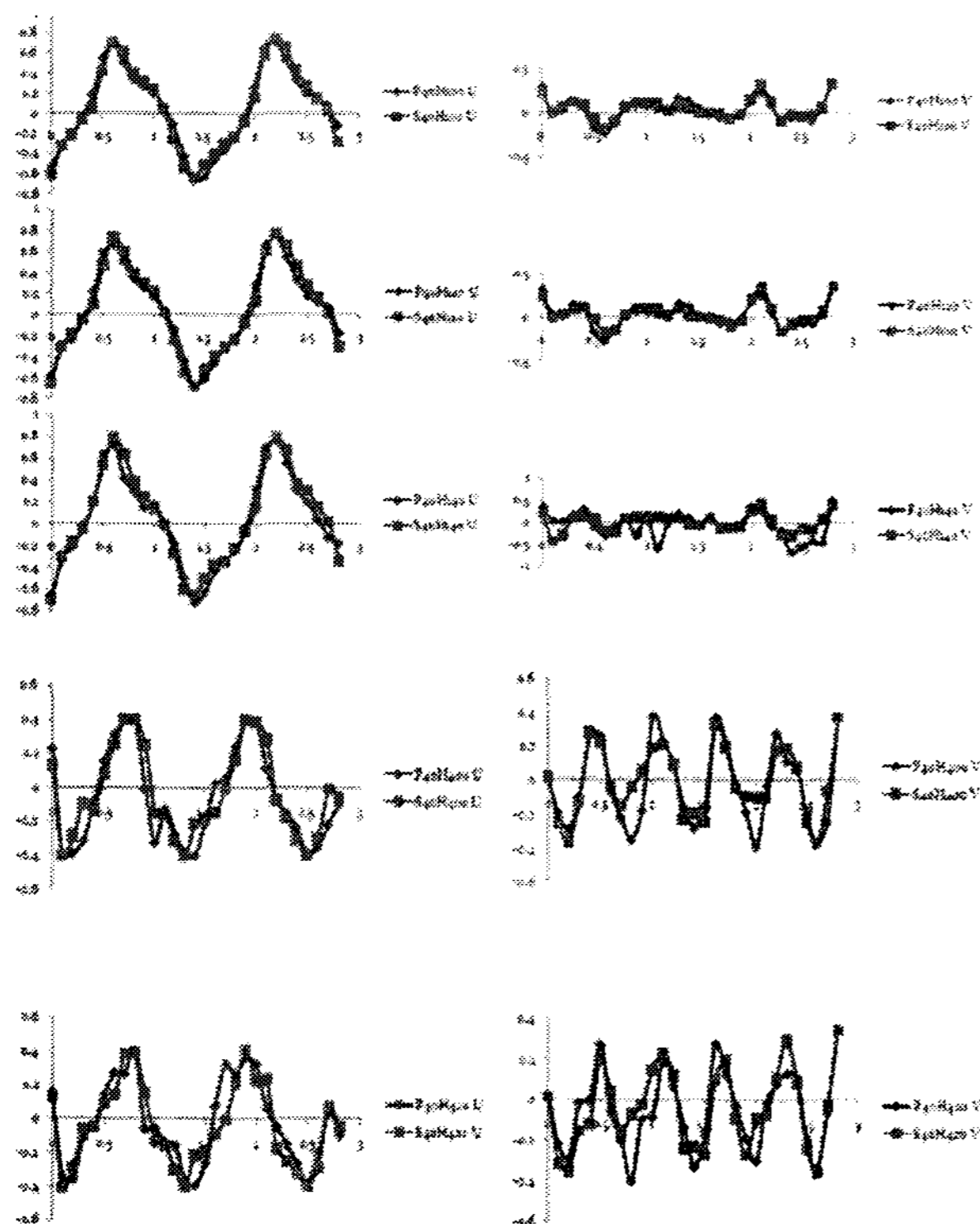


Fig. 6 Velocity profiles for U, V(case C)

의 패턴이 step양상을 보이는 것은 수면의 움직임이 상하로 운동함에 따라 속도가 측정될 수 없었기 때문이다. 이는 탱크내 유동은 Static하면서 상하유동에 지배되고 있음을 의미한다. case B인 경우, U 성분은 빠른 가속과 느린 감속을 보임으로 텀피파와 쇄기파의 중간 형태를 가지고 있다. Case A와 마찬가지로 수면상단으로 갈수록 U성분의 패턴이 step양상을 보였다. 빠른 가속과 느린 감속이 결합된 형태를 보이고 있음을 알 수 있었다. case C의 경우, U성분의 전반적인 양상은 Case A와 유사하지만 상부로 갈수록 V성분이 커짐을 알 수 있었다. 이는 유량이 증가함에 따라 수면상부에 생성된 국소적 vortex core가 깨어지지 않은 채 좌우로 운동하는 것에 기인하는 것으로 보인다. 또한, 탱크내 유량이 증가됨에 따라 Case A의 경우(수면의 상하부 운동이 지배되는 경향)와 달리 수면상부에 존재하는 vortex에 의하여 지배되는 것으로 풀이된다. case D의 경우, U성분은 대체적으로 Case B와 유사한 형태를 가지지만 V 성분의 패턴을 찾기 힘들 정도로 자유로운 패턴을 가졌는데, Case A와는 달리 속도의 방향전환이 급격하게 나타났으며 상단 하단의 속도의 약 2배의 속도로 이동하였다.

### 3. 결론

해상에서의 실제 운동 상황을 모사한 운동중의 선박탱크 모델내의 속도벡터분포를 측정할 수 있는 측정기술을 확보하였다. 탱크벽면으로부터 5cm떨어진 단면의 중심선 근방의 유속을 측정하여 데이터베이스를 확보하였다. 전반적으로 V성분의 주파수가 U성분의 주파수보다 2배 이상으로 높은 것으로 나타났으며 V성분의 뚜렷한 주기적 변동양상도 수면 바로 아래 부분에서 나타났다. 탱크의 운동과 함께 형성되는 좌우 travelling wave의 상부(upper part)에는 국소적으로 가속되는 영역(locally accelerated region)이 존재함이 확인되었다. 이 영역이 탱크 내에서 자유로이 이동하고 있다가, 또 다른 가속된 질량계와 합일치 되는(merging) 경우가 발생하면 보다 가속된 질량계의 생성하게 되고 이는 탱크내벽(wall) 혹은 펌프타워(pump tower)에 충격 유체력으로 작용하게 되어 내벽의 손상 및 타워의 파손에도 이어질 수 있음을 암시한다. 탱크내부의 유동이 어떤 조건에서 탱크가 어떤 운동의 조건에서 순간적으로 매우 가속된 질량계가 발생하는지에 대한 메커니즘 규명을 위해서는 조건부(conditional)PIV측정이 필요하게 됨을 알게 되었다.

### 후기

본 실험은 부산대학교첨단조선공학연구센터의 권순홍 교수와 박진수박사의 도움으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

- 1) 木村, 高森, 井上, 1986, “相關を利用した流れの画像計測”, 流れの可視化, Vol.6, No.22, pp.105-108.
- 2) Utami, T., Blackwelder, R., 1991, A cross correlation technique for velocity field extraction from particulate visualization, Exp. in Fluids, Vol.10, pp.213-223.
- 3) 北條, 高島, 1995, PIVにおける異常ベクトルの検出, 可視化情報, Vol.15, Suppl. No.2, pp.177-180.
- 4) 도덕희, 황태규, 표준영상을 이용한 2차원 PIV와 3차원 PIV 성능시험, 대한기계학회지, Vol.28(11), pp.1315-1321.