

## 사각형 바지선의 횡동요 와류 감쇠에 대한 실험적 연구

정광호<sup>†\*</sup>, 서성부\*, 전호환<sup>\*\*</sup>

동의대학교 조선해양공학과\*  
부산대학교 조선해양공학과<sup>\*\*</sup>

### Experimental Study on the Eddy Making Damping Effect at the Roll Motion of a Rectangular Barge

Kwang Hyo Jung<sup>†\*</sup>, Sung Bu Suh\* and Ho Hwan Chun<sup>\*\*</sup>

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dong-Eui University\*  
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University<sup>\*\*</sup>

#### Abstract

This experimental study investigated on the eddy making effect on the roll motion of a rectangular barge in a two-dimensional wave tank. The structure was used to simulate a simplified rectangular barge in the beam sea condition. The structure with a draft one half of its height was hinged at the center of gravity and free to roll by waves. The rectangular barge was tested with regular waves with a range of wave periods that are shorter, equal to, and longer than its roll natural period. Particle image velocimetry (PIV) was employed to obtain the velocity field in the vicinity of the structure. The coupled interactions between the incident wave and the barge were demonstrated by examining the vortical flow fields to elucidate the eddy making effect during the roll motion. For incoming wave with a wave period same as the roll natural period, the barge roll motion was reduced by the eddy making damping effect. At the wave period shorter than the roll natural period, the structure roll motion was slightly reduced by the vertical flow around the barge. However, at the wave period longer than the roll natural period, the eddy making effect due to flow separation at structure corners indeed amplifies the roll motion. This indicates that not only can the eddy making effect damp out the roll motion, it can also increase the roll motion.

※Keywords: Rectangular barge(사각형 바지), Roll motion(횡동요 운동), Vortex(와), Eddy making damping effect(와류 감쇠 영향), PIV(입자 화상 속도측정법)

---

접수일: 2006년 9월 27일, 승인일: 2007년 5월 5일

†교신저자: khjung@deu.ac.kr, 051-890-2592

## 1. 서론

와류 감쇠 효과(Eddy making damping effect)는 해상에서 운항하는 선박의 횡동요 운동(Roll motion)에 큰 영향을 미친다. 선박의 운동해석에 널리 이용되어지는 포텐셜 이론은 상하 운동과 종동요 운동을 해석하는데 적합하지만, 횡동요 운동을 예측하기에는 제한이 있다. 이는 횡동요 운동이 다른 운동과는 다르게 포텐셜 이론에는 포함되지 않은 유체의 점성과 회전성에 의한 횡동요 감쇠 영향에 의한 비선형특성 때문이다. 포텐셜 이론에 인공점성계수(Artificial viscous damping coefficient)를 도입하여 점성효과를 계산에 포함하기도 한다. 하지만, 횡동요 운동의 강한 비선형성 때문에 적합한 인공점성계수를 찾는 것이 간단하지 않다. 그래서, 모형시험이나 실선으로부터 얻어진 실험식이나 경험식을 이용하여 횡동요 운동 예측을 한다.

점성효과를 포함한 횡동요 운동을 해석하기 위해서 지난 20여 년 동안 많은 연구가 이루어져 왔다. Bearman et al.(1985)은 유체 중에 있는 구조물에 작용하는 힘을 유체의 가속, 점성에 의한 경계층, 생성되어진 와류의 영향에 의한 힘들로 분리하였다. Lighthill(1986)은 해양구조물에 작용하는 유체동역학적 힘을 포텐셜 유동과 생성되어진 와류에 의한 힘들로 구분할 것을 제안하였다. Cozen(1987)은 수치계산을 이용하여 정수중에서 강제 횡동요 운동하는 선박주위에 발생하는 와류들을 시뮬레이션하였다. Yeung et al.(1998)은 횡동요 운동에 대한 감쇠를 조파감쇠와 흐름의 박리에 의한 점성감쇠로 분리하여 복합 횡동요 운동방정식을 제안하였다. 자유수면상에 파도를 고려하여 구조물의 횡동요 운동을 Roddier et al.(2000)이 실험과 이론적으로 연구하였다. Chakrabarti(2001)가 선박에 대한 횡동요 감쇠계수를 체표면의 마찰에 의한 감쇠, 와류 감쇠, 조파 감쇠, 부가물에 의한 감쇠로 분리하였다. 여러 가지의 횡동요 운동을 감소시키는 원인 중에서 유체의 점성에 의한 와류 감쇠는 구조물이 횡동요 고유 주기에서 운동할 때 가장 확연한 것으로 알려져 있다. Yeung and Liao(1999)는 횡동요 고유 주기에서의 운동은 점성 영향에 의해 약 반으로 감소한다

고 보고 하였다. Chen et al.(2002)은 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식을 영역 분리법과 연계하여 부유식 구조물 주위에 발생하는 흐름 박리와 와류 생성을 시뮬레이션 하였다.

최근에 입자 속도 측정법(Particle Image Velocimetry, PIV)을 이용하여 높은 공간 해상도와 정확성을 가지는 유체 속도장을 측정할 수 있게 되었다. PIV 방법을 이용하여 Dong et al.(1997)이 선박 모형의 선수파의 와류 구조를 측정하였다. Yeung et al.(1996)은 자유 수면상에서 강제 운동하는 구조물 주위 흐름을 PIV를 이용하여 측정하였고, 이후에 random vortex method으로 횡동요 운동하는 구조물 주위의 속도장을 계산하여 PIV 실험 결과와 비교하였다(Yeung et al. 1998).

선박의 횡동요 운동에 대한 많은 수치적 실험적 연구가 발표되었지만, 파도에 의해서 횡동요 운동하는 선박 주위의 유체 흐름에 대한 연구가 이루어 지지는 않았다. 횡동요 운동하는 구조물과 파도의 상대운동에 따라 주위의 유체 흐름이 변하는데, 현재까지 이루어진 연구는 정수면 또는 파도의 조건에서 강제 횡동요 운동하는 구조물 주위의 유체 흐름에 대한 연구가 이루어졌다. 본 연구에서는 횡파 조건에서 입사파에 의해서 횡동요 운동하는 바지 주변의 속도장을 PIV를 이용하여 측정하였다. 또한, 여러 주기의 파도에 의한 사각형 바지선의 횡동요 운동을 측정하여 선형 포텐셜 이론 결과와 비교하여 횡동요 운동의 점성 감쇠 효과를 검증하였다.

## 2. 실험 장치 및 조건

실험은 2 차원 수조에서 수행하였고, 수조의 크기는 길이 35m, 폭 0.9m, 깊이 1.2m 이다 (참조 Fig. 1).

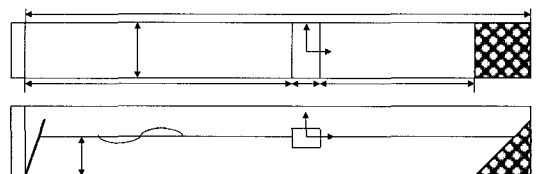


Fig. 1 Sketch of wave tank (unit: mm)

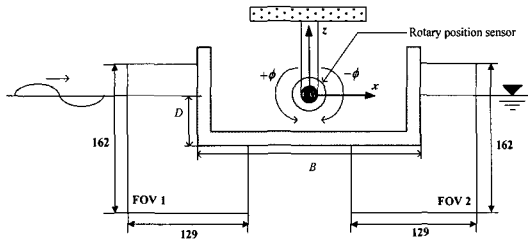


Fig. 2 Setup of free-rolling structure with coordinate system and fields of view (unit: mm)

아크릴로 제작되어진 사각형 단면의 바지 모형은 길이가 0.9m, 폭 0.3m, 높이 0.1m 이다(참조 Fig. 2). 파도는 왼쪽에서 오른쪽으로 진행하고, 바지 모형은 조파기로부터 20m 지점에 2 차원 수조의 폭방향으로 고정되어 횡파 조건에서 실험을 수행하였다(참조 Fig. 1). 바지 모형의 무게 중심을 정수면과 일치하고, 무게중심을 축으로 횡동요 운동을 할 수 있도록 2 군데에서 고정하였고, 양쪽 끝은 수조 벽으로부터 5mm 정도 떨어져 2 차원의 조건에서 실험을 하였다. 모형은 횡동요 운동만 할 수 있도록, 상하운동과 좌우동요 운동은 구속되어있다. 횡동요 운동은 모형의 무게 중심에 설치된 회전각 측정장치(rotary position sensor)를 이용하여 측정하였다. 출수( $D$ ) 0.05m, 수심( $h$ ) 0.9m 에서 전 실험을 수행하였다. 횡동요 각( $\phi$ )은 반시계 방향이 양의 방향으로 정의되었다.

정수중에서 자유감쇠시험(free decay test)을 통해서 얻어진 바지 모형의 횡동요 고유 진동수( $\omega_N$ )는 6.78rad/s 이고, 횡동요 고유 주기 ( $T_N$ )가 0.93s 이다.

Fig. 2 에서 보여주는 바지 모형 양쪽의 2 개 측정구간(field of view, FOV)에서 PIV 를 이용하여 속도장을 측정하였다. 모형 양쪽에서 발생하는 와류를 계측하기 위해서 FOV1 과 FOV2 의 크기 ( $162 \times 129 \text{mm}^2$ )를 결정하였다. PIV 장비는 Dual-head Nd:Yag 레이저와 디지털 CCD 카메라로 구성되었다. Nd:Yag 레이저의 최대출력 400mJ/pulse, wave length 532nm 이고, 각각의 레이저 헤더는 10Hz 로 레이저를 분사할 수 있다. 1 개의 실린더 렌즈와 2 개의 구형렌즈로 구성된 렌즈시스템

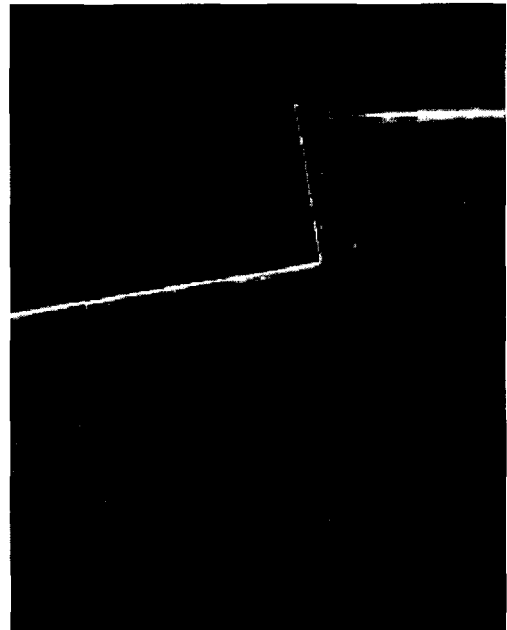


Fig. 3 Particle image velocimetry image sample

을 통과하여 만들어진 약 1mm 두께의 레이저 면은 수조 바닥에 부착되어진 거울에서 반사되어 모형의 중앙단면에 비추어지도록 하였다. 속도장 계산을 위한 PIV 화상을 얻기 위하여 크기가  $57\mu\text{m}$  인 입자를 구조물의 주위에 섞었다. 디지털 CCD 카메라로 얻어진 PIV 화상을 Fig. 3 에서 보여 준다.

디지털 CCD 카메라는  $1280 \times 1024$  pixels 의 해상도와 12bit 분해능(dynamic range)을 가지고 있다. CCD 카메라는 3 차원 이송장치에 장착되었고, Nikon 105mm 렌즈를 부착하여 f/4.0 의 조리개 값을 이용하여 PIV 화상을 획득하였다. CCD 카메라로 PIV 속도장 계산을 위한 이미지 페어(Image pair)를 얻기 위해서 두 개의 레이저 간의 시간 간격( $\Delta t$ )는 3~5ms 로 설정하였다.

PIV 속도장을 계산은 2 화상 상관기법(double-frame/single-pulsed cross-correlation method)을 이용하였다. 조사구간(interrogation window)은  $32 \times 32$ pixels ( $4.0 \times 4.0 \text{mm}^2$ )이고 주변 조사구간과 50%의 화상중복을 하여 속도장을 계산하였다. 즉, 주변 속도벡터간의 거리는 2.0mm 이다. CCD 카메라

라는 최고 초당 4 개의 PIV 이미지 짝을 얻을 수 밖에 없기 때문에 이미지를 얻는 시간을 적당하게 조절하여 3~4 회의 반복실험을 통하여 한 파도 주기 당 8~16 위상에서 속도장을 얻을 수 있었다. 모든 실험은 수조의 끝에서 반사되어 바지 모형으로 돌아 오기 전에 수행되었다. 평균 속도장은 8~12 개의 같은 위상에서의 순간 속도장들을 위상평균(phase average)을 취하여 얻어진 것이다. 와류 강도(vorticity)는 Raffel et al.(1998)에 의해 제안된 방법을 이용하여 계산하였다.

PIV 를 이용하여 얻어진 속도장의 불확실성은 Bias error 와 Random error 의 합으로 추정할 수 있다. Bias error 는 particle image diameter( $d_p$ )와 pixel 크기( $d_{pix}$ )의 비의 함수이다(Raffel et al. 1998). 이 실험에서는  $d_p/d_{pix} \approx 1.0$  이고, 이에 해당하는 Bias error 는 약 0.1 pixel 정도이다. 이는 2.5mm/s 의 속도에 해당하고, 국부적인 최대속도의 2%미만으로 평가된다. random error 는 속도장의 난류 성분으로 평가될 수 있는데, Jung et al. (2005)의 비슷한 실험 결과에 의하면 난류 속도는 평균 속도의 약 25%미만으로 보고 되었다. 평균 속도장의 불확실성은 (bias error + random error)/ $\sqrt{N}$  로 평가될 수 있다.  $N$  은 속도장의 평균을 얻기 위해 사용된 순간 속도장의 수이다. 이 연구에서  $N$  은 8~12 이므로 평균 속도장의 총 불확실성은 평균 속도의 약 10%미만으로 추정된다.

저항식 파고계를 이용하여 100Hz 의 측정율로 파고를 계측하였다. 바지 모형을 설치하기 전에 조파기로부터 20m 지점에서 입사파의 파고를 측정하였고, PIV 화상획득과 함께 모형의 앞뒤 4cm 지점에서 파고를 계측하였다. 회전각 측정장치를 이용하여 바지 모형의 회전각을 100Hz 의 측정율로 계측하였다. 회전각 측정장치는 최대  $\pm 60^\circ$  까지 측정할 수 있으며, 오차는 최대 측정범위의 0.2% 이내이다. 모든 실험 측정은 PIV 화상획득과 동기화 되어있어 계측된 파고와 회전각은 PIV 화상과 일치함을 확인하였다.

바지 모형과 파도 사이의 상호관계를 연구하기 위해서 모형의 횡동요 고유 주기를 포함하여 주기( $T$ ) 0.5~2.0s 의 규칙파를 실험하였다. 실험에 이

Table 1 Experimental conditions

$T$ (s)	$\omega$ (rad/s)	$\lambda$ (m)	$H$ (m)	$kA$
0.5	12.57	0.39	0.010	0.0805
0.6	10.47	0.56	0.017	0.0950
			0.015	0.0616
0.7	8.98	0.77	0.023	0.0944
			0.029	0.1191
0.8	7.85	1.00	0.029	0.0912
0.85	7.39	1.13	0.033	0.0919
			0.016	0.0372
0.93	6.76	1.35	0.027	0.0628
			0.032	0.0745
			0.040	0.0931
1.0	6.28	1.56	0.044	0.0887
1.1	5.71	1.88	0.057	0.0953
			0.032	0.0453
1.2	5.24	2.22	0.060	0.0849
			0.067	0.0948
1.3	4.83	2.57	0.060	0.0732
1.4	4.49	2.93	0.061	0.0653
1.5	4.19	3.29	0.062	0.0591
1.6	3.93	3.65	0.060	0.0516
1.8	3.49	4.36	0.061	0.0440
			0.026	0.0162
2.0	3.14	5.05	0.059	0.0367

Note: Bold numbers indicate the cases with PIV velocity measurements.

파도의 주기( $T$ ), 길이( $\lambda$ ), 파고( $H$ )를 Table 1 에 정리하였다

실험에서 규칙파의 파기율기( $kA$ )를  $T=0.5\sim 1.2s$  의 파도에 대해서 일정하게 유지 하였지만, 조파기의 한계 때문에  $T=1.2s$  보다 긴 파도에서는 파고를 일정하게 하였다. 또한, 파고의 변화에 의한 바지 횡동요 운동의 비선형 특성을 조사하기 위해서 파도 주기  $T=0.7s, 0.93s, 1.2s, 2.0s$  에서 여러 파고에 대한 실험을 수행하였다. Table 1 에 정리되어진

모든 실험조건은 수조의 끝에서 반사된 파도가 돌아오기 전에 실험을 수행하였고, 파도 주기 T=0.8s, 0.93s, 1.2s, 2.0s 에 대해서 PIV 를 이용하여 속도장을 측정하였다.

### 3. 바지 모형의 횡동요 운동역학적 특성

파도 조건에서 횡동요 운동 실험을 하기 이전에 바지 모형의 횡동요 운동역학적 특성을 조사하였다. 횡동요 운동 방정식은

$$I' \frac{d^2 \phi}{dt^2} + b \frac{d\phi}{dt} + c\phi = M_0 \cos \omega_e t \quad (1)$$

단,  $I'$ 는 바지의 관성모멘트( $I$ )에 부가관성모멘트( $\delta I$ )를 더한 값이다. 감쇠계수( $b$ )는 조파감쇠, 와류감쇠, 마찰감쇠 등 모든 감쇠효과를 포함하는 것이다. 바지 모형의 횡동요 복원력은  $c\phi = \Delta \overline{GZ}$  로 표현될 수 있다. 여기서,  $c$ 는 복원모멘트 계수,  $\Delta$ 는 배수중량,  $\overline{GZ}$ 는 Righting moment arm 이다. 식 (1)의 우변항은 가진모멘트이고,  $\omega_e$ 는 조우진동수이다.

바지 모형의 감쇠계수와 고유진동수를 얻기 위해서, 자유감쇠시험이 가장 널리 이용된다. 자유감쇠시험을 해석하기 위해서 식 (1)의 우변항이 0 되면, 식 (1)은

$$\frac{d^2 \phi}{dt^2} + 2\zeta \omega_N \frac{d\phi}{dt} + \omega_N^2 \phi = 0 \quad (2)$$

여기서,  $\zeta$ 는 감쇠비(damping ratio),  $2\zeta \omega_N = b/I'$ ,  $\omega_N^2 = \Delta \overline{GM}/I'$  이다. Free decay test 는 정수중에서 바지 모형을 15°경사를 주어 경사각의 변화를 측정하였다. 감쇠효과에 의해서 모형의 횡경사는 점차 감소하는데, 스펙트럼 분석을 통하여 고유진동수( $\omega_N=6.78\text{rad/s}$ )를 구하였다. 이 결과에 일치하는 고유주기( $T_N$ )는 0.93s 이다.

Fig. 4가 보여주는 각 주기에서 평균 횡경사각 감소의 기울기에서 감쇠계수( $b=0.519$ )가 구해진다 (Bhattachryya 1978). 관성모멘트와 부가관성모멘트를 얻기 위해서 공기 중에서 자유감쇠시험을 수행하였다. 공기 중에서 고유진동수( $\omega_{N-air}$ )는

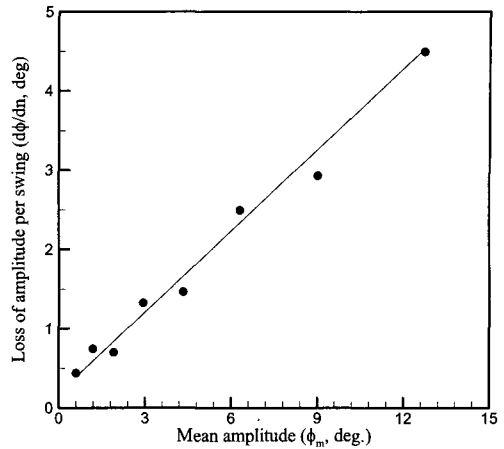


Fig. 4 Curve of extinction

1.25rad/s, 모형관성모멘트( $I$ ) 0.236kg·m<sup>2</sup>, 부가관성모멘트( $\Delta I$ ) 0.124kg·m<sup>2</sup>이다. 즉, 총관성모멘트( $I'$ )는 0.36kg·m<sup>2</sup>이고, 감쇠비는 0.106 이다.

### 4. 바지 모형의 횡동요 운동역학적 응답

파도에 대한 바지 모형의 횡동요 운동 RAO(Response amplitude operator)는  $\phi/kA$ 로 정의 하였다. Table 1에 정리된 파도 조건에 대해서 RAO를 실험을 통해서 얻고, 선형 포텐셜 이론을 이용하여 계산한 결과를 Fig. 7에서 비교하였다.

선형 포텐셜 이론 계산은 조파감쇠만을 고려했기 때문에 점성영향은 포함되지 않았다. 그래서, 고유진동수에서의 횡동요 운동 RAO는 아주 과장 되어있다. 그리고,  $\omega/\omega_N=0.78, 1.0, 1.33$ 에서는 파고를 다르게 하여 파고에 대한 RAO의 비선형 특성을 조사하였다.  $\omega/\omega_N=0.78$ 과 1.33에서 다른 파고에 대한 RAO는 비슷한 결과를 Fig. 5에서 보여준다. 하지만, 모형의 고유진동수와 같은 주기( $\omega/\omega_N=1.0$ )의 파도에 대한 RAO는 파고의 변화에 따른 변화가 크다. 파고가 증가할수록 RAO가 감소하는데, 이 결과는 Downie et al.(1988)에 의한 결과와도 일치한다. 즉, 모형의 고유주기보다 길거나 짧은 주기에서는 점성감쇠로 인한 비선형성은 아주 작고, 고유주기와 같은 파도조건에서 비선형성이 아주 강한 것을 알 수

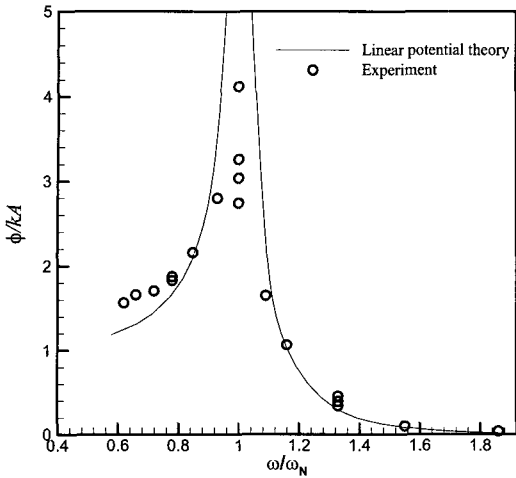


Fig. 5 Response amplitude operator (RAO) for roll motion

있다. Fig. 5 에서 보여지듯이 고유 진동수 보다 큰 영역( $\omega/\omega_N > 1.0$ )에서는 실험결과와 선형 포텐셜 이론 결과가 잘 일치하지만, 진동수가 낮은 영역( $\omega/\omega_N < 0.8$ )에서는 선형 포텐셜 이론 결과가 실험결과 보다 작은 경향은 Salvensen et al. (1970)과 Downie et al.(1988)의 연구결과에서도 보이지만, 그 이유에 대해서는 설명되지 않았다. 저주파수 영역에서 RAO 가 실험결과가 선형 포텐셜 이론 결과 보다 큰 이유는 PIV 장비를 이용하여 얻어진 속도장과 함께 설명될 것이다.

5. 바지 모형 주변의 유체 속도장

4 가지의 파도 주기( $T=0.8s, 0.93s, 1.2s, 2.0s$ )에서 PIV 장비를 이용하여 바지 모형의 양쪽 모서리 부근의 속도장을 측정하였다. 평균 속도장은 8~12 개의 순간 속도장으로부터 위상평균법 (Phase-average method)을 이용하여 얻어진 것이다. 3 가지 종류의 파도 주기에 대한 속도장의 위상이 바지 모형이 없는 상태에서의 파도에 의한 자유수면의 변화와 PIV 화상 획득 시 모형의 횡동요 운동을 속도장의 위상과 함께 Fig. 6 에서 나타내었다. 속도장의 위상은 Fig. 7~Fig. 9 에 소제목으로 붙여진 알 파벳과 일치한다. Fig. 6 의 x 축의 시간은

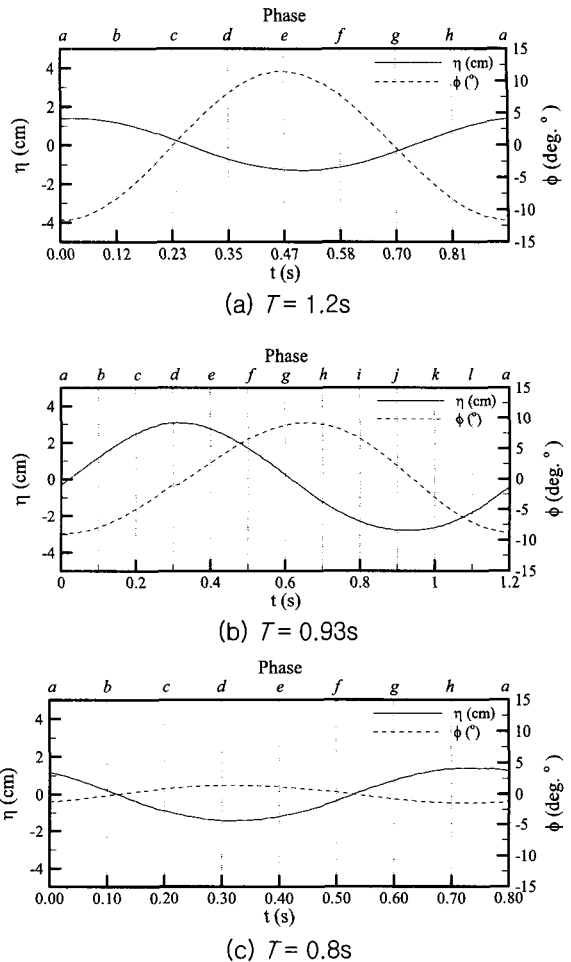


Fig. 6 Wave and roll motion profiles with phases of velocity field

PIV 로 얻어진 첫번째 속도장을 기준점으로 하였다. 와류강도가 뒤쪽보다는 세기 때문에 앞쪽 와류의 변화를 중점적으로 설명할 것이다.

Fig. 7(a)는 모형이 시계방향으로 최대의 경사각을 가진 위상이고, 반시계 방향으로 운동이 시작하는 시점이다. 강한 음(시계방향회전)의 와류가 모형의 왼쪽에서 발생했고 모형이 반시계 방향으로 와류강도가 약해지면서 소멸하고, 양(반시계방향 회전)의 와류가 위상 (d)에서 생성되기 시작한다. 이 양의 와류는 위상(g)까지 모형의 왼쪽 모서리 아래에 강도가 증가하면서 발달한다. 모형이 위상(h)부터

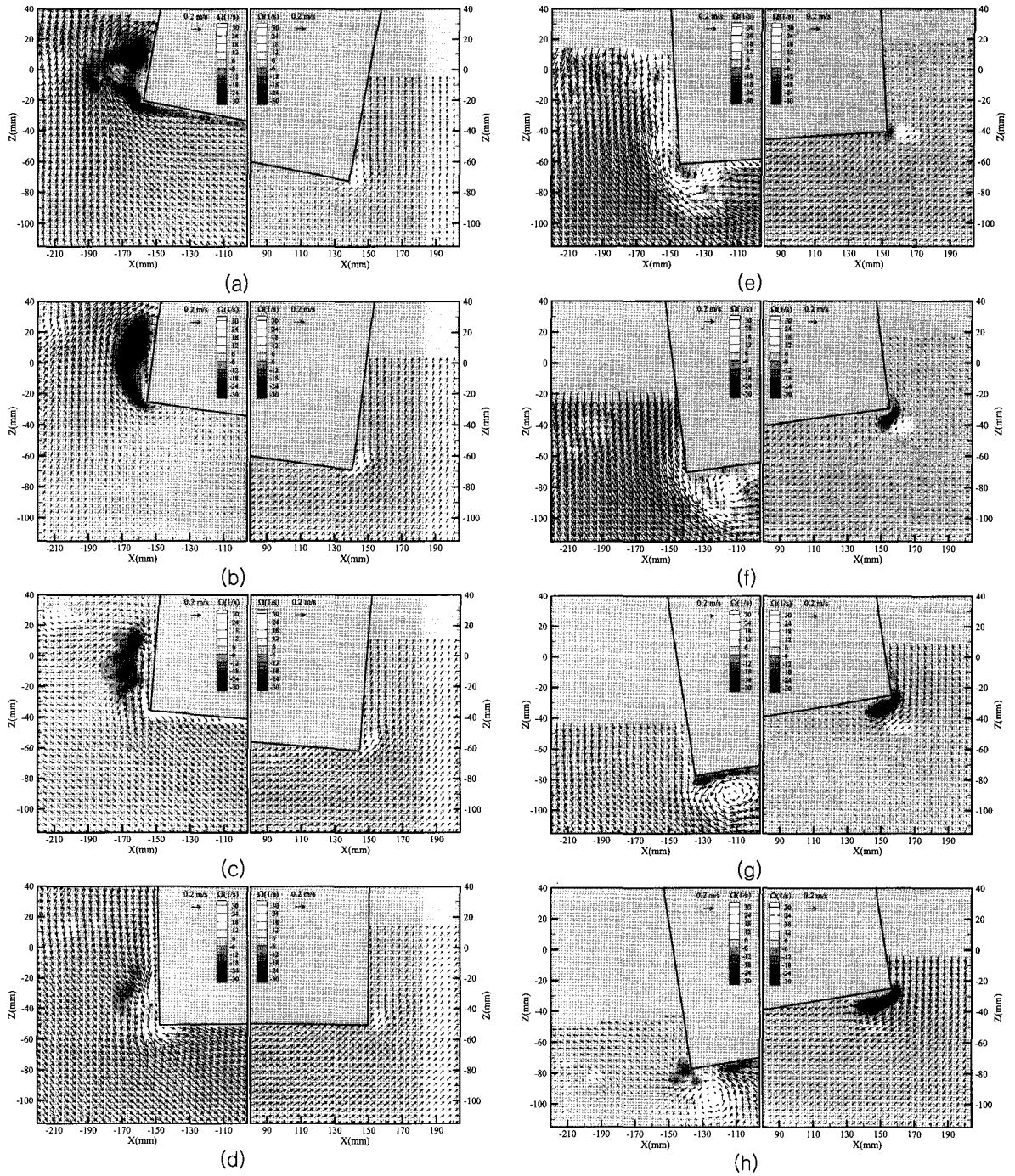


Fig. 7 Velocity field of T=1.2s wave: alphabet of each subtitle matches to the phase in Fig. 6

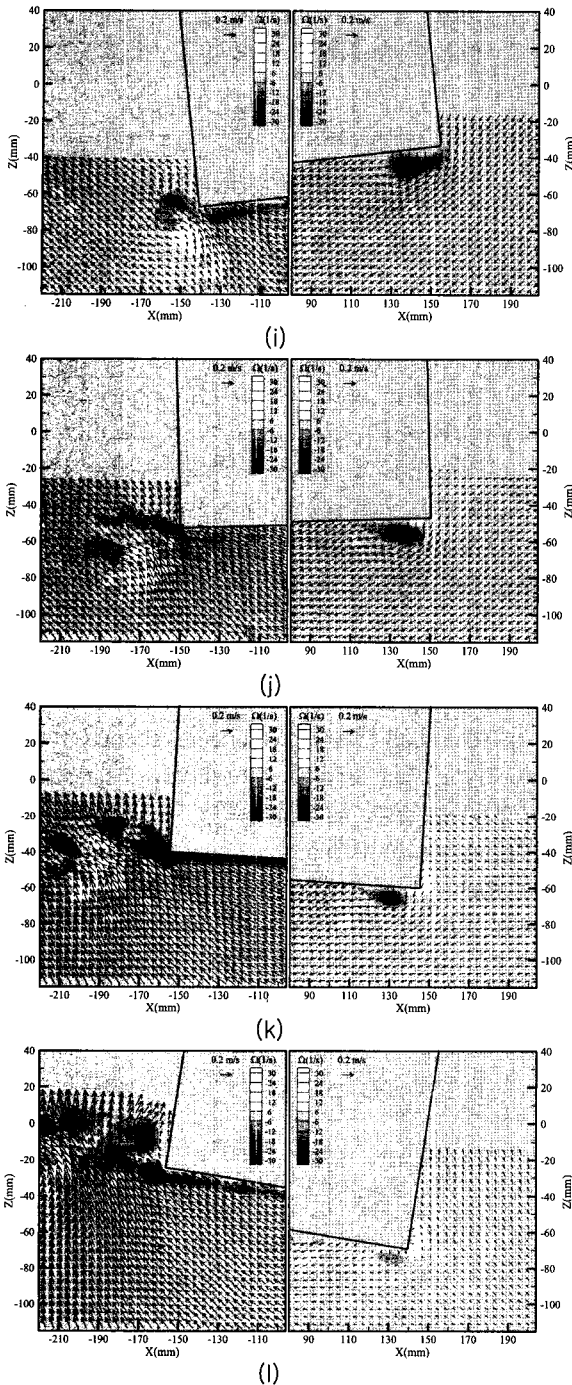


Fig. 7 (Continued)

시계방향 횡동요 운동을 시작하여 위상(a)에서 최대 경사각에 이르게 된다.

5.1 횡동요 운동의 고유 주기보다 긴 주기의 파도 ( $T=1.2s > T_N$ )

바지 모형의 횡동요 운동 고유 주기보다 긴 주기 ( $T=1.2s$ )를 가지는 파도와 모형의 상호 간섭에 의한 속도장을 12 개의 위상에서 측정하였다. Fig. 7은 모형 양쪽에서의 평균 속도와 와류 강도를 같이 보여준다. 구조물의 앞쪽(각 그림에서 왼쪽)의 반시계방향 횡동요 운동과 비슷하게 양의 와류는 시계방향의 운동과 함께 소멸되기 시작하면서, 음의 와류가 위상(i)부터 발생하기 시작한다. 이 때, 발생한 음의 와류도 모형의 횡동요 운동보다 앞서서 모형의 왼쪽에서 발달하고 있다. 양과 음의 와류들이 모형의 횡동요 운동보다 앞서서 모형의 모서리 아래나 옆에서 발생하기 때문에 모형의 운동에 의해서 생성된 와류가 아니라 운동과 같은 방향의 유체 흐름에 의해서 발생한 와류라고 생각할 수 있다. 이는 일반적으로 알려진 와류에 의해 횡동요 운동을 감소시키는 감쇠영향이 아니라 오히려 운동을 증가시키는 효과라고 할 수 있겠다.

이와 비슷한 와류 발생 구조가  $T=2.0s$  에서도 관찰되었다. 구조물의 고유 주기보다 긴 주기를 가지는 파도 조건에서 점성효과에 의해 운동 감소가 아닌 운동이 증가한다고 할 수 있다. 이는 구조물 운동과 같은 방향으로 유체 입자 속도가 구조물의 회전 속도보다 빠르기 때문에 와류가 구조물의 운동보다 앞서서 생성된다고 생각한다. 이러한 와류의 발생 구조로부터 낮은 진동수 영역의 RAO의 실험 결과가 계산결과보다 큰 것을 설명할 수 있다. 기존에 이루어진 강제 횡동요 실험에서는 이러한 와류의 발생과정을 관찰할 수 없었을 것이다.

5.2 횡동요 운동의 고유 주기와 같은 주기의 파도 ( $T=0.93s = T_N$ )

바지 모형의 횡동요 운동 고유 주기와 같은 주기를 가지는 파도조건에서 8 개의 위상에서 속도장을 측정한 결과인 평균 속도와 와류 강도를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8(a)는 위상(a)에서 음의 최대 경사각에서의 평균 속도와 와류강도의 분포를 보여주는데 Fig. 7(a)와는 반대로 양의 와류가 바지 모형 앞쪽 모서리 아래에 발달해있다. 또한, 뒤쪽 모



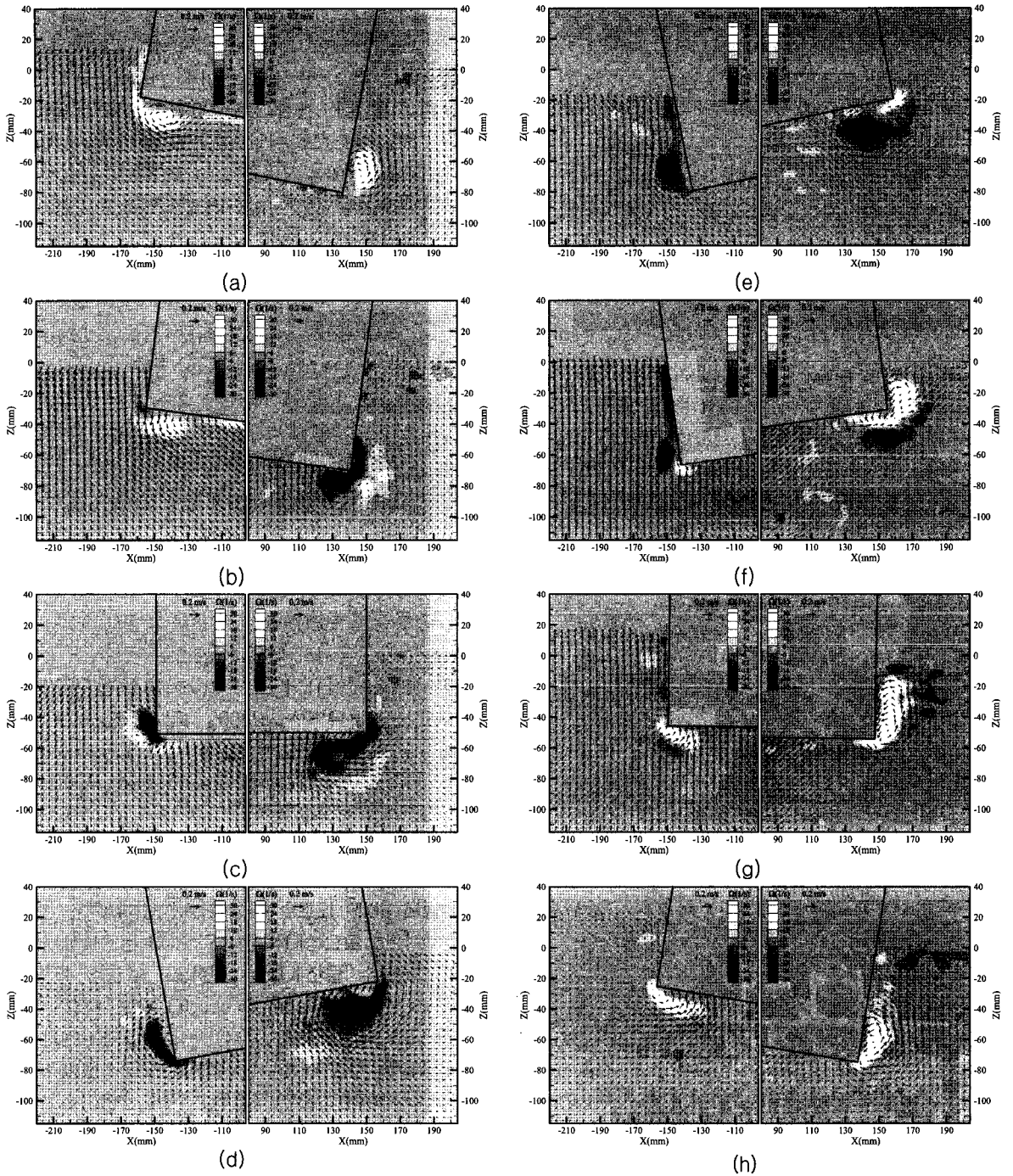


Fig. 8 Velocity field of  $T=0.93s$  wave: alphabet of each subtitle matches to the phase in Fig. 6

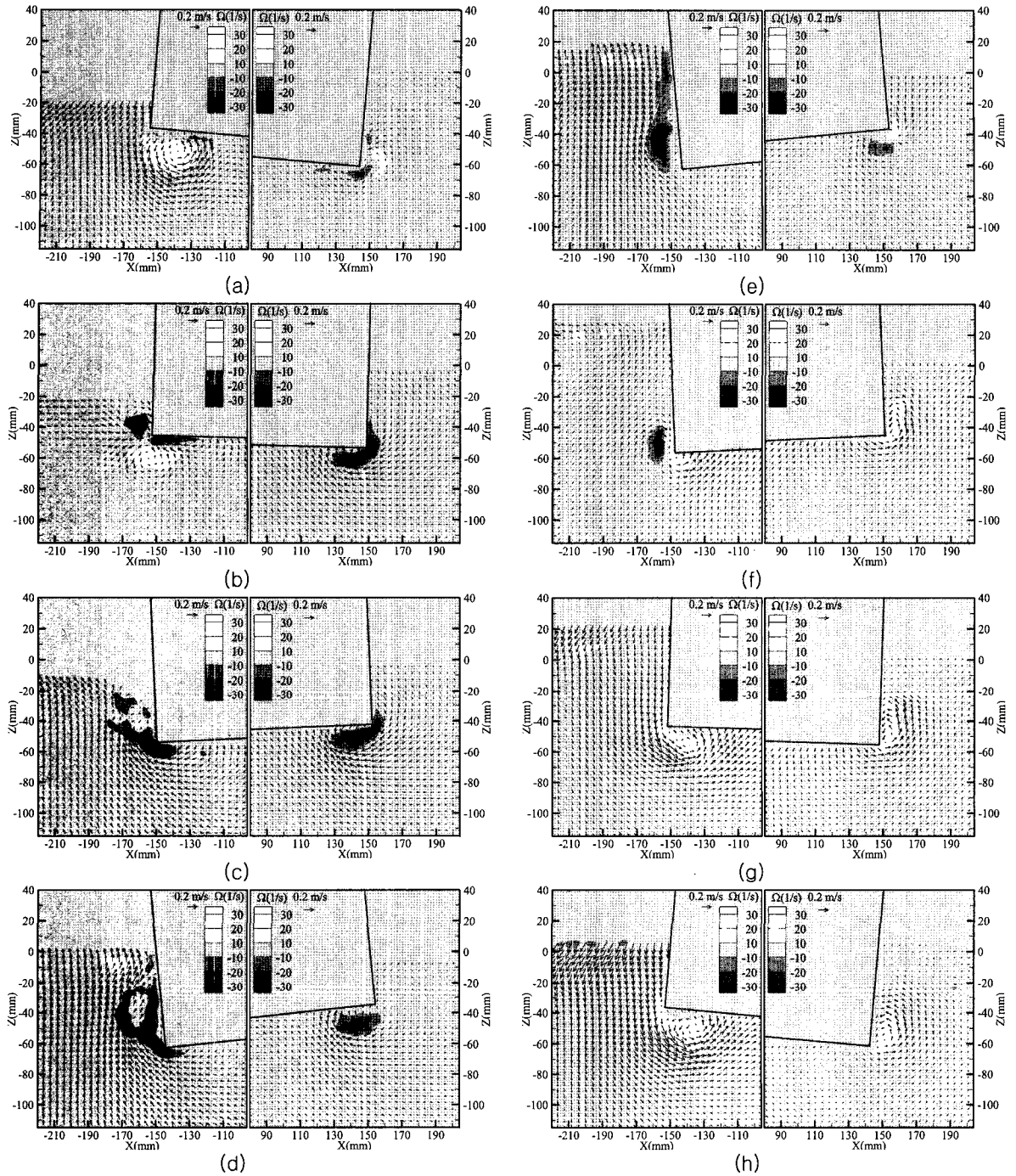


Fig. 9 Velocity field of  $T=0.8s$  wave: alphabet of each subtitle matches to the phase in Fig. 6

서리의 오른쪽에서도 양의 와류가 생성되어있다. 위상(a)부터 반시계 방향의 횡동요 운동이 시작되면서 양의 와류가 소멸하고 양쪽에서 음의 와류가 생성되기 시작한다. 위상(e)에서 반시계 방향 운동의 정점이 되는데, 모형의 앞쪽 옆면과 뒤쪽 아랫면에서 음의 와류가 생성되었다.

위상(e)부터 시계방향의 운동이 시작되면서 양쪽에 발생한 음의 와류가 소멸하고 양쪽에서 양의 와류가 발생하기 시작하여 시계방향 운동 정점인 위상(a)까지 진행된다. 여기서 주목할 것은 와류의 생성이 바지 모형 운동으로 인한 후류의 형태라는 것이다. 이는 모형의 고유 주기보다 긴 파도에서의 결과와는 반대의 와류 생성 과정이다. 또한, 모형 뒤쪽의 파도는 앞쪽에 비해서 파고가 낮음에도 불구하고 모형의 앞쪽과 뒤쪽에서 비슷한 강도와 크기의 와류가 발생한다. 즉, 와류가 바지 모형의 횡동요 운동의 후류로 발생되면서 운동을 방해하여 운동을 감소시키는 효과로써 이는 널리 알려진 횡동요 운동의 점성감쇠효과 또는 와류감쇠효과이다. 이 주기에서 다른 파고에 대한 속도장을 측정하지는 않았지만, 파고가 증가함에 따라 와류 강도 및 크기의 증가에 따른 강한 와류감쇠효과가 횡동요 운동을 감소시켜 고유 주기에서 강한 비선형 특성을 가지는 것으로 생각된다

### 5.3 횡동요 운동의 고유 주기보다 짧은 주기의 파도( $T=0.8s < T_M$ )

고유 주기보다 짧은 주기를 가지는 파도 조건에서 8 개의 위상에 대하여 속도장을 측정하였다. Fig. 9는 평균 속도장과 와류강도를 보여주는데 전체적인 경향은 고유 주기에서의 실험결과인 Fig. 8과 비슷하다. 하지만, 모형 뒤쪽에서의 와류강도는 Fig. 8에서 보다 약하다. 또한, Fig. 8에서의 파도 경사보다 약 50%정도 더 큰 것을 고려하면 와류 강도가 고유 주기 운동에 의한 와류감쇠보다 훨씬 작다는 것을 예상할 수 있다. 이러한 발생한 와류의 강도와 경로는 구조물과 주변 유체의 상대적인 운동으로 인하여 발생하는 것이기 때문에 정확한 상호 간섭을 연구하기 위해서는 좀 더 많은 위상에서의 속도장과 모형 표면에서의 압력을 측정하여야

정확한 분석이 가능할 것이라고 생각한다.

## 6. 결론

2 차원 수조에서 바지 모형을 이용하여 횡파 조건에서 횡동요 운동에 대한 동역학적 특성을 조사하였다. 바지 모형은 파도에 의한 횡동요 운동만을 고려하였다. 횡동요 운동의 고유 주기를 포함한 여러 주기의 규칙파를 이용하여 실험을 수행하였다. 자유 수면의 변화와 횡동요 운동을 모형 주변 속도장과 동기화하여 측정하였으며, 모형의 동역학적 특성과 횡동요 운동에 대한 RAO를 측정하였다. 횡동요 운동의 고유 주기와 같은 주기를 가지는 규칙파에서 바지 모형의 모서리에서 박리된 와류는 점성감쇠 또는 와류감쇠로 작용한다. 이 주기에서 발생한 와류는 주변 유체의 흐름보다는 모형의 운동에 의해서 발생하여 운동하는 모형의 뒤쪽에서 발생한다. 즉, 이러한 형태는 이미 알려진 바와 같이 와류의 생성으로 인해 횡동요 운동이 감소하는 와류감쇠의 형태이다.

이 주기보다 길거나 짧은 규칙파에서는 다른 파고에서 비슷한 RAO를 얻을 수 있지만, 고유 주기와 일치하는 주기의 파도에서는 파고가 커짐에 따라 RAO가 감소하는 비선형적인 특성을 볼 수 있다. 이는 파고가 증가함에 따라 구조물 주변에서 발생하는 와류의 강도가 강해지기 때문이라고 생각한다. 고유주기보다 짧은 주기의 파도에서는 구조물의 앞쪽에서는 고유주기와 같은 파도에서와 비슷한 와류의 형성 과정을 볼 수 있지만, 뒤쪽에서는 강도와 크기가 작은 와류가 생성된다. 또한, 파도의 기울기를 고려하면, 고유주기에서 생성된 와류보다는 강도나 크기가 작기 때문에 와류에 의한 감쇠효과가 작고, 파고의 변화에 따른 비선형성도 약한 것으로 생각된다.

횡동요 운동의 고유 주기보다 긴 주기의 규칙파에 의한 와류 형성이 구조물의 운동보다 앞서는데 이는 구조물의 운동보다는 유체의 흐름에 의해서 와류가 생성되기 때문이다. 이러한 와류의 생성과정은 이미 알려진 유체의 점성에 의한 와류 감쇠와는 반대의 현상이다. 즉, 구조물과 파도의 상대적인

운동에 의해 생성된 와류로 인해 구조물의 횡동요 운동이 증가하는 와류 가진 효과(eddy exciting effect 또는 viscous exciting effect)라고 할 수 있다. 이러한 결과는 저 주파수 영역에서 실험결과가 선형 포텐셜 이론의 결과보다 RAO 가 큰 이유를 설명하는 것이다.

#### 후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

#### 참 고 문 헌

- Bearman, P.W., Downie, M.J., Graham, J.M.R. and Obasaju, F.D., 1985, "Forces on Cylinders in Viscous Oscillatory Flow at Low Keulegan-Carpenter Numbers," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 154, pp. 337-356.
- Bhattacharyya, R., 1978, *Dynamics of Marine Vehicles*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Chakrabarti, S., 2001, "Empirical Calculation of Roll Damping of Ships and Barges," *Ocean Engineering*, Vol. 28, No. 7, pp. 915-932.
- Chen, H.C., Liu, T, Chang, K.A. and Huang, E.T., 2002, "Time-domain Simulation of Barge Capsizing by a Chimera Domain Decomposition Approach," 12th International Offshore and Polar Engineering Conference, *KitaKyushu, Japan*, May 26-31, pp. 314-321.
- Cozen, P.D., 1987, *Numerical Modeling of the Roll Damping of Ships Due to Vortex Shedding*, Ph.D dissertation. London University, U.K.
- Dong, R.R., Katz, J. and Huang, T.T., 1997, "On the Structure of Bow Waves on a Ship Model," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 346, pp. 77-115.
- Downie, M.J., Bearman, P.W. and Graham, J.M.R., 1988, "Effect of Vortex Shedding on the Coupled Roll Response of Bodies in Waves," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 189, pp. 243-261.
- Jung, K.H., Chang, K.A., and Huang, E.T., 2005, "Two-dimensional Flow Characteristics of Wave Interactions with a Free-rolling Rectangular Structure," *Ocean Engineering*, Vol. 32, pp. 1-20.
- Lighthill, J., 1986, "Fundamentals Concerning Wave Loading on Offshore Structures," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 173, pp. 667-681.
- Raffel, M., Willert, C.E. and Kompenhans, J., 1998, *Particle Image Velocimetry*, Springer-Verlag, Berlin.
- Roddier, D., Liao, S.-W. and Yeung, R.W., 2000, "On Freely-floating Cylinders Fitted with Bilge Keels," 10th International Offshore and Polar Engineering Conference, Seattle, USA, May 28-June 2, pp. 377-384.
- Salvesen, N., Tuck, E.O. and Faltinsen, O.M., 1970, "Ship Motions and Sea Loads," *Trans. SNAME*, Vol. 78, pp. 250-287.
- Yeung, R.W., Cermelli C. and Liao, S.-W., 1996, "Vorticity Fields Due to Rolling Bodies in a Free Surface - Experiment and Theory," 21st Symposium on Naval Hydrodynamics, Trondheim, Norway, pp. 359-376.
- Yeung, R.W. and Liao, S.-W. 1999, "Time-Domain Solution of Freely Floating Cylinders in a Viscous Fluid," 9th International Offshore and Polar Engineering Conference, Brest, France, May 30-June 4, pp. 454-462.
- Yeung, R.W., Liao, S.-W. and Roddier, D., 1998, "Hydrodynamic Coefficients of Rolling Rectangular Cylinders," 8th International Journal of Offshore and Polar Engineers, Vol. 8, pp. 242-250.



< 정 광 호 >



< 서 성 부 >



< 전 호 환 >