

PIV시스템을 이용한 규칙파중 2차원 사각형 부유식 구조물 주위의 유동특성 연구

정광효* · 전호환*
*부산대학교 조선해양공학과

Experimental Study on Flow Characteristics of Regular Wave Interacting with Rectangular Floating Structure Using PIV Technique

KWANG-HYO JUNG* AND HO-HWAN CHUN*

*Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Particle image velocimetry 입자영상유속계, Vortex 와류, Turbulence 난류, Regular wave 규칙파, Roll motion 횡요운동

ABSTRACT: This experimental study investigated the flow characteristics for regular waves passing a rectangular floating structure in a two-dimensional wave tank. The particle image velocimetry (PIV) was employed to obtain the velocity field in the vicinity of the structure. The phase average was used to extract the mean flow and turbulence property from repeated instantaneous PIV velocity profiles. The mean velocity field represented the vortex generation and evolution on both sides of the structure. The turbulence properties, including the turbulence length scale and the turbulent kinetic energy budget were investigated to characterize the flow interaction between the regular wave and the structure. The results show the vortex generated near the structure corners, which are known as the eddy-making damping or viscous damping. However, the vortex induced by the wave is longer than the roll natural period of the structure, which presents the phenomena opposing the roll damping effect; that is, the vortex may increase the roll motion under the wave condition longer than the roll natural period.

1. 서 론

해상의 부유식 구조물 또는 운항하는 선박과 파도의 상호 간섭에 대하여 해석적, 수치적 그리고 실험적으로 해양공학 및 조선공학에서 많은 연구가 이루어져 왔다. 이러한 연구들은 연근해안에서 파도의 에너지 감소를 위한 부유식 방파제 그리고 해상운항하는 선박의 운동 해석 등으로 활발한 연구가 진행되어져 왔다. Bruce and McCartney(1985)는 전형적인 부유식 방파제의 형태와 설계인자들을 분류하였다. Fugazza and Natale(1988)는 부유식 방파제의 기하학적 설계변수에 따른 파도 에너지의 감소를 실험적으로 연구하였다. 선형 포텐셜이론을 이용하여 Williams and Abul-Azm(1997)와 Williams et al.(2000)은 사각형 단면을 가진 부유식 방파제의 유체동역학적 특성들을 계산하였고, Mays et al.(1999)은 계류식과 잠수식 방파제에 의한 파도 감소 효과를 연구하였다. 해상을 운항하는 선박의 6자유도 운동중 횡동요 운동은 점성 감쇄영향으로 인하여 아주 강한 비선형적인 거동을 가진다. 선박 운동 해석기법으로 널리 이용되어지는 포텐셜유동이론으로 상하동요와 종동요 운동에 대해서는 좋은 결과를 얻을 수 있지만, 유체의 점성과 회전성의 영향을 많이 받는 횡동요 운동 연구에는 많은 어려움이 있다.

횡동요 점성 감쇄계수를 적용하여 포텐셜이론의 단점을 극복하려고 하지만, 선박주위의 점성영향을 정량화에 어려움이 있기 때문에 적당한 점성 감쇄계수를 결정하는 것은 쉬운 일이 아니다. Lighthill(1986)은 해양구조물에 작용하는 유체 동역학적 하중을 포텐셜유동에 의한 하중과 와류에 기인하는 하중으로 분리하는 가능성을 제기하였다. Cozen(1987)은 정수 중에서 강제 횡동요시 발생하는 와류생성을 수치적 기법으로 연구하였다. Yeung et al.(1998)은 운동감쇄효과를 조파감쇄(Wave damping)와 점성감쇄(Viscous damping)로 분리한 복합 횡동요 운동방정식(Composite roll motion equation)을 제안하였다. Chakrabarti(2001)는 횡동요 감쇄현상을 선체표면의 마찰감쇄(Skin friction damping), 와류감쇄(Eddy-making damping), 조파감쇄(Wave making damping), 부가물 부착으로 인한 감쇄(Bilge keel damping)로 세분화 하였다. 사각형 구조물의 모서리에서 유기되는 와류에 의한 점성감쇄현상은 구조물의 횡동요 고유 주기와 일치하는 횡동요 운동에서 가장 현저한 것으로 알려져 있다. Ikeda(1977)와 Yeung and Liao(1999)는 이론적 및 실험적 결과를 이용하여 횡동요 운동 진폭을 예상할 수 있는 근거를 제시하였다.

Particle image velocimetry(PIV)를 이용하여 파도와 구조물의 상호 간섭으로 인한 와류와 난류를 포함하는 속도장의 측정이 가능하게 되었다. Dong et al.(1997)은 PIV방법을 이용하여 선박

교신저자 전호환: 부산시 금정구 장전동 산30번지

051-510-2341 chunahh@pusan.ac.kr

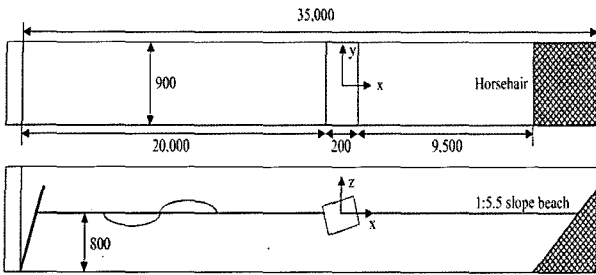


Fig. 1 Sketch of the wave tank (unit: mm).

모형의 선수파에 대한 속도장을 연구하였고, Yeung et al.(1996)은 자유수면상에서 횡동요 운동하는 판주위의 속도장을 측정하였다. 또한, 그는 복합 횡동요 운동방정식(Composite roll motion equation)에서 조파 감쇄와 자유수면에서 주기적인 횡요 운동을 하는 사각형 구조물에 의해 유기되어진 와류생성에 의한 Quadratic damping을 분리하여 적용하였다.

현재까지 자유수면 상에서 횡동요 운동하는 부유식 구조물이나 운항하는 선박의 점성 감쇄 영향은 이론 및 수치적 해석의 한계를 극복하기 위해서 실험적인 방법과 접근을 하였다. 하지만, 실험에서 구조물을 자유수면상에서 강제 횡요운동에 의한 점성 감쇄를 연구하였다. 실제 해상에서는 구조물의 운동은 파도에 기인하기 때문에 운동과 파도의 상대운동에 의한 영향이 중요하다고 생각되어진다. 본 연구에서 부유식 사각형 구조물은 횡동요 운동만이 허락되어 있고, 횡방향 규칙파(Beam sea condition)에 의해서 횡동요 운동이 발생한다. 즉, 구조물의 횡동요 운동과 파도의 상대운동에 의한 속도장을 측정하여 와류 및 난류의 특성을 파악하였다.

2. 실험 장치 및 조건

실험은 2차원 수조에서 수행하였고, 수조의 크기는 길이 35m, 폭 0.9m, 깊이 1.2m이다 (참조 Fig. 1). 수조 끝에서의 파도 반사를 최소화하기 위해서 1:5.5 경사에 소파망을 설치하였다. 조파기는 Flap Type으로 컴퓨터로 작동되어지며, 다른 실험방법들과 동기화되어있다(참조 Fig. 2).

나무로 제작되어진 사각형 단면의 구조물은 길이 0.9m, 폭 0.2m, 높이 0.064m이다. 구조물은 조파기로부터 20m 지점에 고정되었고, 무게중심을 정수면과 일치하게 하고 횡동요운동만 자유롭게 허락하였다. 홀수는 0.032m, 물깊이는 0.8m로 고정하여 횡방향 파도조건에 대하여 실험을 수행하였다. 정수 중에서 자유 횡동요 시험(Free decay test)을 통하여 구조물의 횡동요 운동에 대한 고유진동수(ω_N) 10.13rad/s(고유 주기(T_N)는 0.62s)를 결정하였다.

주기(T)는 1.0s 와 2.0s, 파도높이(H) 0.04m인 2가지의 규칙파를 이용하여 실험하였다. 조파기에 의해서 파도가 생성되고 약 15분이 경과한 후 수조내의 파도 상태가 준정상상태(Quasi-steady state)에 도달하였다. 레이놀즈수는 $U_{max}B/(2\nu)$ 로 정의하고, 2.8×10^4 ($T=1.0s$)와 2.5×10^4 ($T=2.0s$)이다. 단, U_{max} 는 유체입자의 최고속도, B 는 구조물의 폭, ν 는 유체 동점성계수이다.

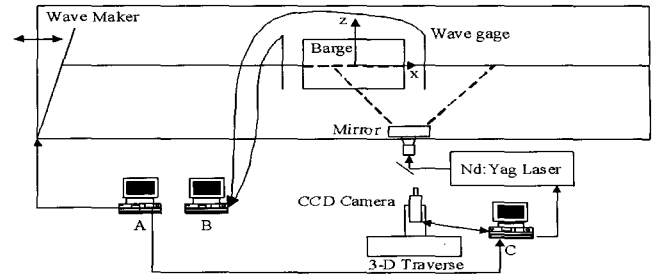


Fig. 2 Experimental setup.

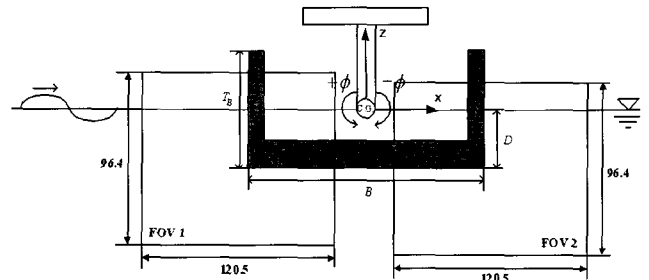


Fig. 3 Schematic of the experimental setup and PIV fields of view (unit: mm).

선박의 횡동요 운동의 고유 주기와 같은 주기를 가지는 파도조건에서 점성 감쇄영향이 가장 크다고 알려져 있다. 이 조건에서 구조물 운동이 너무 커져서 파고(H)를 0.02m로 줄이고, 파도가 수조의 끝에서 반사되어 구조물로 돌아오기 전에 실험하였다.

구조물 주위에서의 속도장은 Dual-head Nd:Yag 레이저와 디지털 CCD카메라로 구성된 PIV장비(참조 Fig. 2)를 이용하여 측정하였다. Nd:Yag 레이저는 최대출력 400mJ/pulse, Wave length 532nm이고, 디지털 CCD카메라는 1280×1024픽셀의 해상도와 12bit의 분해능(Dynamic range)을 가지고 있다. CCD카메라는 3차원 이송장치에 장착되었고, Nikon 105mm렌즈를 부착하여 f/2.8의 조리개 값을 이용하여 PIV 화상을 획득하였다. 속도장 계산을 위한 PIV 화상을 얻기 위하여 비중은 1.02, 크기는 57 μ m인 입자를 구조물의 주위에 섞었다.

CCD 카메라로 4Hz에서 90개의 PIV화상을 획득하여 난류해석을 하였다. PIV 속도장 계산을 위한 화상쌍(Image pair)을 얻기 위해서 두개의 레이저간의 시간 간격(Δt)은 3ms로 설정하고, 2화상 상관기법(Double-frame/Single-pulsed cross-correlation method)을 이용하여 PIV 속도장을 계산하였다. 구조물 양쪽 부분에서 2개의 측정영역(Field of view, FOV)에서 PIV 화상을 획득하고 속도장을 계산하였다. Fig. 3에서 측정영역의 위치와 크기를 보여주고 있다. FOV1과 FOV2는 구조물과 파도의 상호 간섭에 의해 생성된 와류와 난류의 영역을 포함한다. 조사구간(Interrogation window)은 32×32pixels (3.0×3.0mm²)이고 주변 조사구간과 50%의 화상중복(Overlap)을 하여 속도장을 계산하였다. 즉, 주변 속도벡터간의 거리는 1.5mm이다. 파고는 2개의 저항식 파고계를 사용하여 구조물 양쪽에서 100Hz의 측정율(Data acquisition rate)로 계속하였다. 2개의 파고계는 구조물의 앞뒤로 각각 4cm씩 떨어져서 고정되었다. 설치된 파고계로

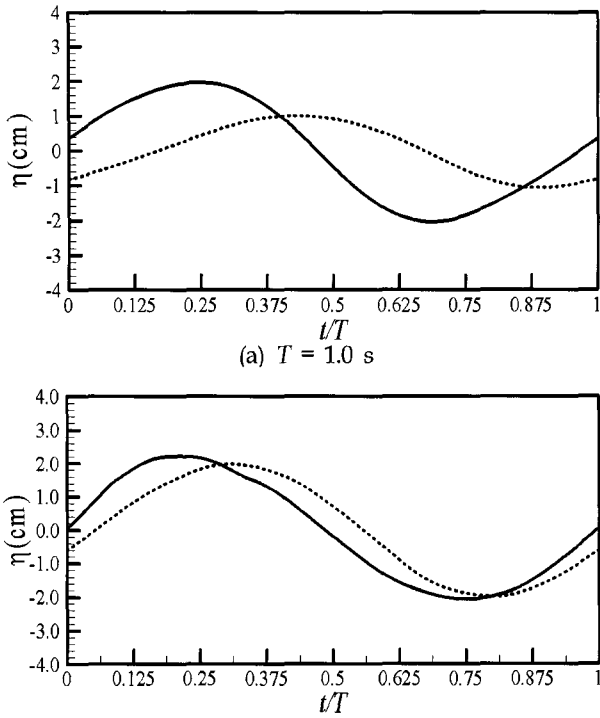


Fig. 4 Wave profiles at the distance of 4cm from each side of the rectangular structure. (Solid line: seaward side, dashed line: leeward side)

측정되어진 파고의 변화를 Fig. 4에서 나중에 보여질 PIV 속도장의 위상과 함께 보여주고 있다. 구조물의 횡동요 각(ϕ)은 Fig. 5에서 속도장의 위상과 함께 보여주고, PIV 화상에서에서 반시계방향 회전이 양, 시계방향 회전이 음으로 정의하였다.

구조물 주변에서 파도의 같은 위상에서 속도장을 얻기 위해서 조파기가 파도를 생성하기 위해서 움직인 후 30분 경과 뒤 준정적상태에서 PIV 화상 획득을 하였다. 이 방법은 위상평균법(Phase-average method)을 이용하여 속도의 평균과 난류 성분으로 나눌 수 있게 하였다. 얻어진 속도장의 시간차는 0.125s로 주기가 1.0s인 파도에 대해서는 8개의 위상, 주기가 2.0s인 파도에 대해서는 16개의 위상에서 속도장을 각 파도 주기에서 얻을

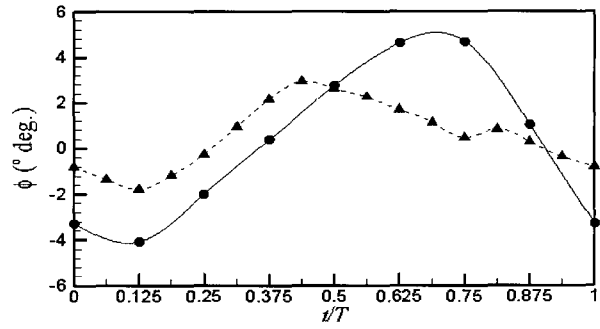


Fig. 5 Roll motion for $T=1.0$ s waves (solid line) and $T=2.0$ s waves (dotted line)

수 있었다. PIV 화상으로부터 속도장의 계산은 LaVision으로부터 제공되어진 상용프로그램을 이용하였다. 화상의 배경잡음을 먼저 제거하고, Fast fourier transform(FFT)을 이용하여 2개 화상 상관기법으로 계산하였다. 속도장의 정도를 높이기 위해서 64×64 픽셀의 큰 조사구간에서 속도벡터를 계산하고, 다시 32×32 픽셀의 조사구간에서 속도벡터를 결정하였다. 모든 속도벡터가 계산된 후, Median filter를 이용하여 잘못된 속도벡터들을 제거하고, 주변 속도벡터들을 이용하여 선형보간법으로 제거되어진 속도 벡터를 대신하게 하였다.

3. 평균 속도장(Mean flow field)과 난류 에너지 편성(Turbulent energy budget)

평균속도(Mean velocity), 난류변동속도(Turbulence intensity), 난류 운동 에너지(Turbulent kinetic energy)는 같은 위상에서 90개의 순간 속도장들로 부터 아래의 위상평균법(Phase-average method)을 이용하여 얻어진다.

$$\langle u_k \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_k^{(i)} = U_k \quad (1)$$

Table 1 Estimation of length scales and dissipation rate

Wave period T (s)	Location and phase	Taylor microscale λ_T (m)	Dissipation rate ϵ (m^2/s^3)	Integral scale Λ (m)	Kolmogorov microscale η_k (m)
1.0	Seaward side $Z=48mm, t/T=0.000s$	0.0071	0.0021	0.017	0.000148
	Leeward side $Z=48mm, t/T=0.875s$	0.0052	0.0008	0.007	0.000189
2.0	Seaward side $Z=43mm, t/T=0.438s$	0.0071	0.0012	0.023	0.000170
	Leeward side $Z=43mm, t/T=0.625s$	0.0063	0.0011	0.012	0.000174

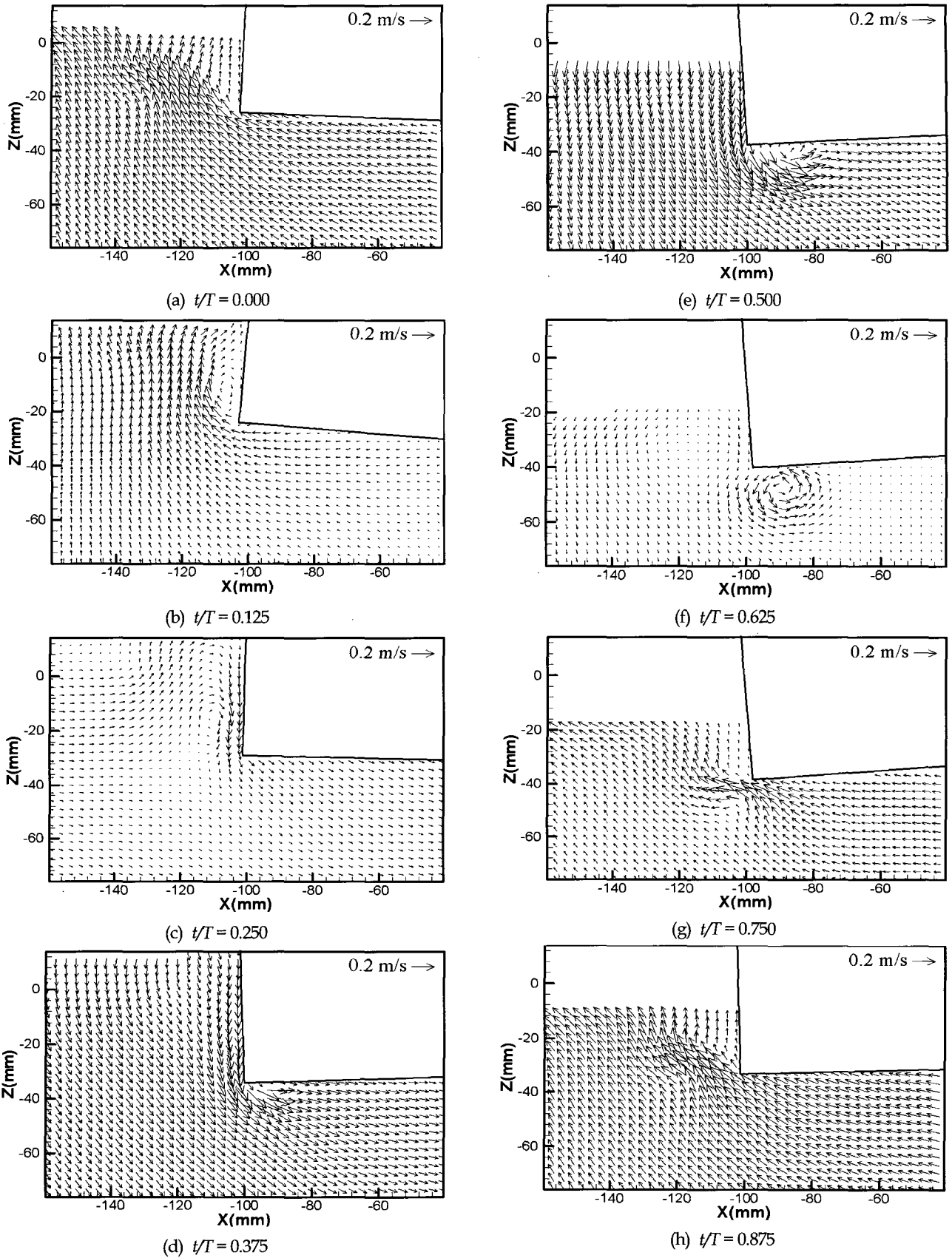


Fig. 6 Mean velocity over one wave period at the seaward side for the case of $T = 1.0$ s

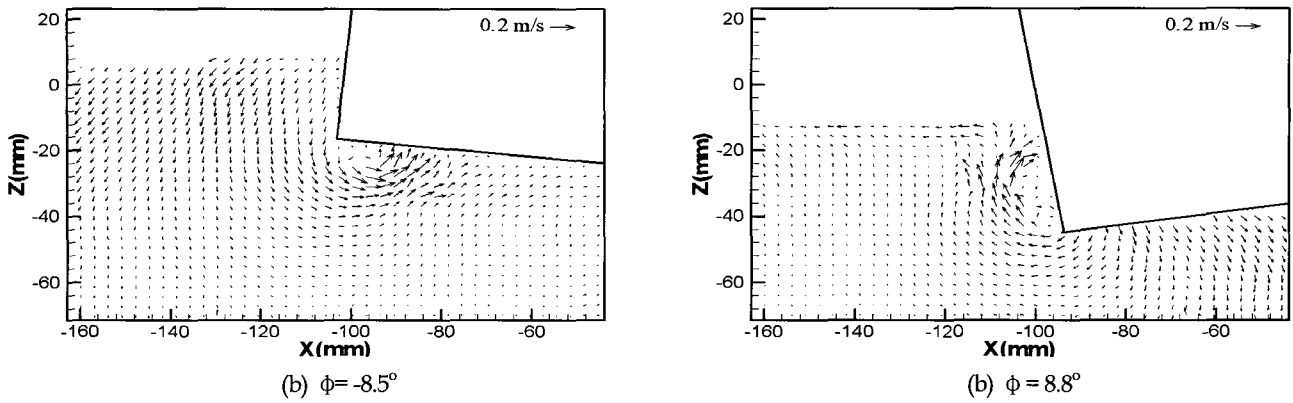


Fig. 7 Instantaneous velocity maps of the typical eddy making damping. The wave period is equal to the roll natural period ($T_N = 0.62$ s). The structure was rolling clockwise in the left panel and rolling counterclockwise in the right panel.

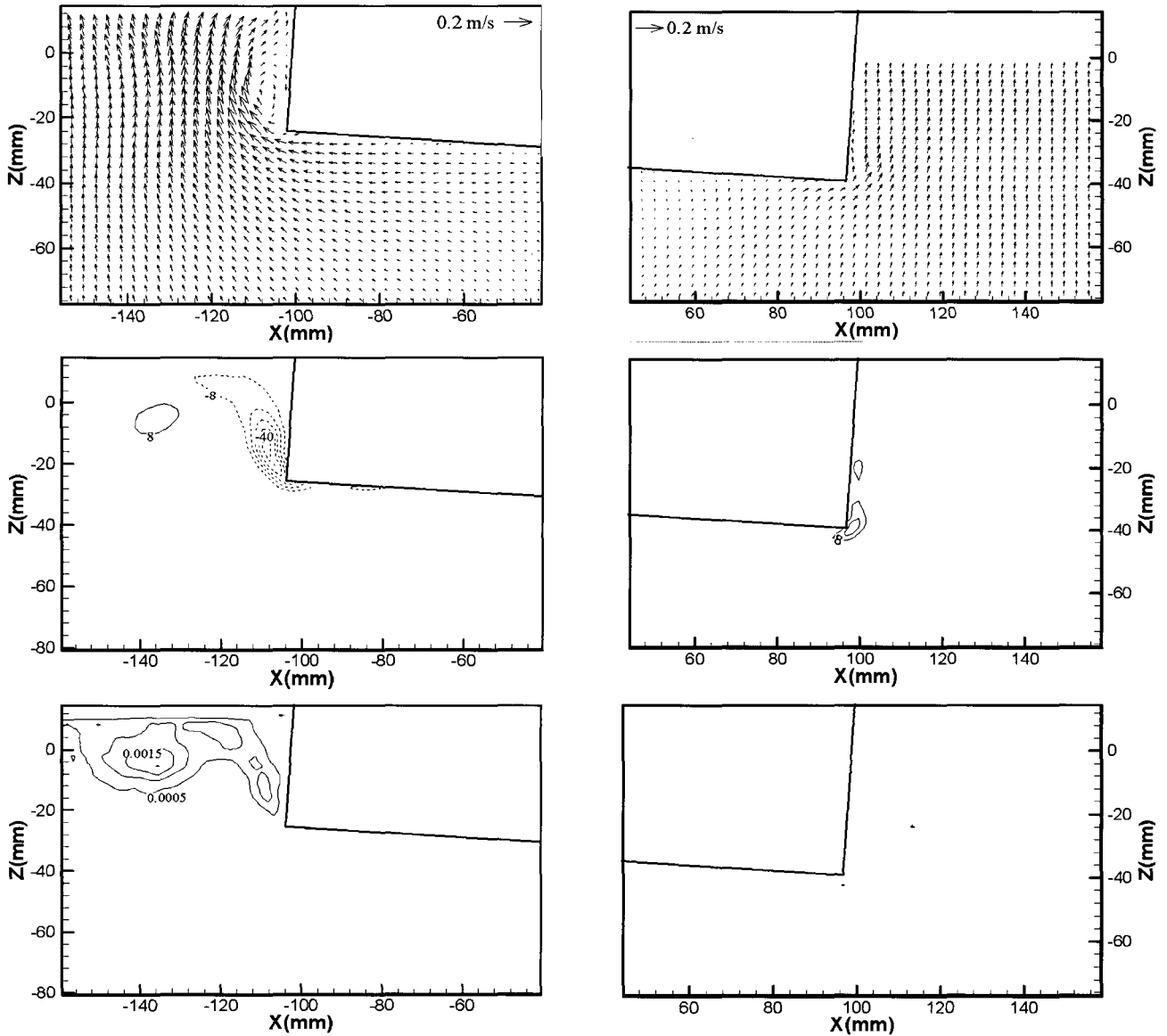


Fig. 8 (a) Mean velocity (first row), mean vorticity (second row), and turbulent kinetic energy (third row) for the case of $T = 1.0$ s. The increment of contours in vorticity is $\Delta \Omega = 8 \text{ s}^{-1}$ while the increment of contours in turbulent kinetic energy is $\Delta k_t = 0.0005 \text{ m}^2/\text{s}^2$. $t/T = 0.125$

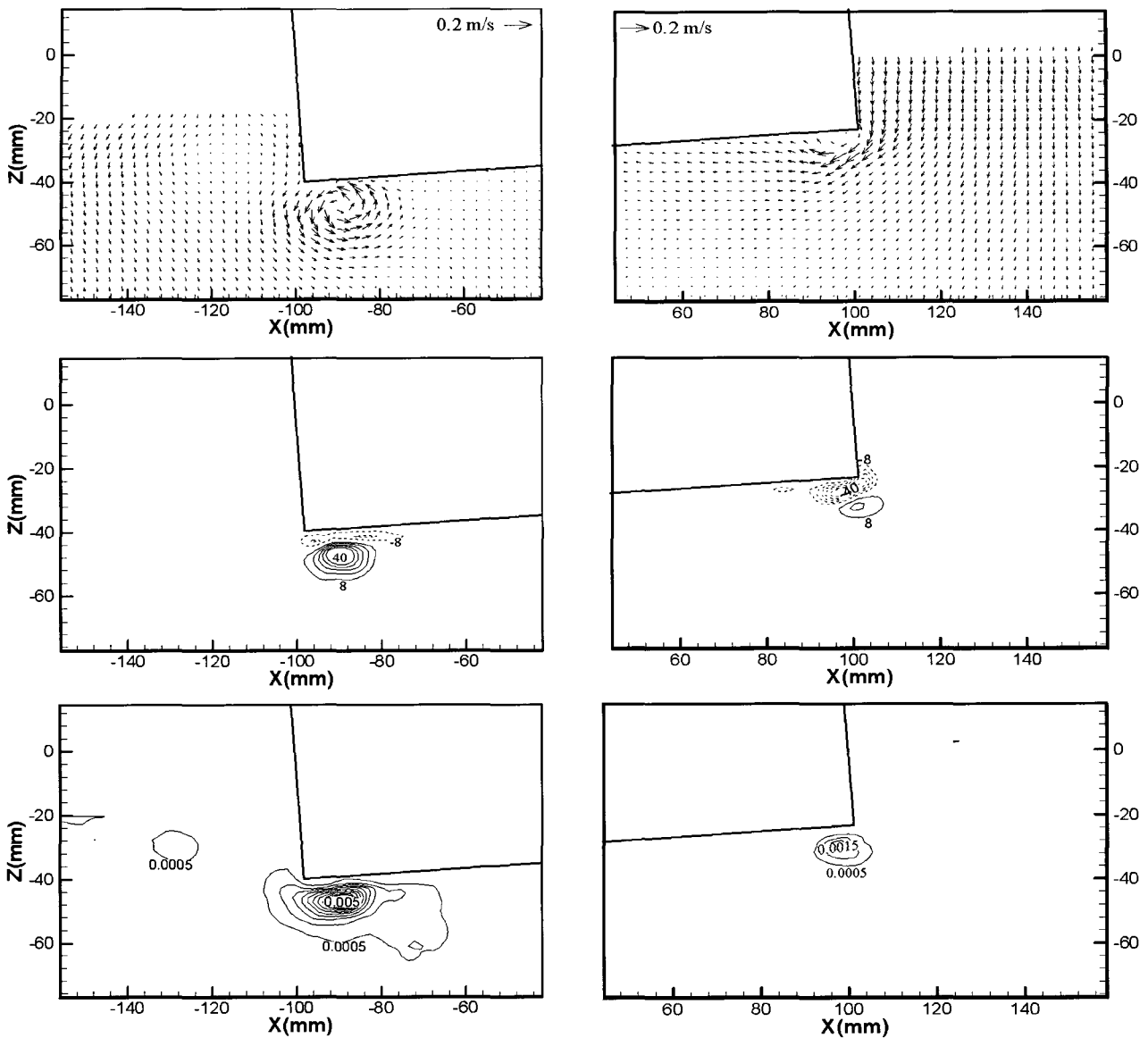


Fig. 8 (b) Mean velocity (first row), mean vorticity (second row), and turbulent kinetic energy (third row) for the case of $T=1.0$ s. The increment of contours in vorticity is $\Delta\Omega = 8 \text{ s}^{-1}$ while the increment of contours in turbulent kinetic energy is $\Delta k_t = 0.0005 \text{ m}^2/\text{s}^2$. $t/T = 0.625$

단, $\langle \rangle$ 부호는 위상평균, $u_k^{(l)}$ 는 l 번째 순간속도장의 k 성분 속도 벡터, N 은 한 위상에서 총 순간속도장의 수, U_k 는 위상평균법으로 얻어진 평균속도벡터이다. 점(i, j)에서의 와류강도(Vorticity)는 주변 8개의 속도벡터들을 이용하여 순환(Γ)을 계산하여 면적으로 나누어주는 Raffel et al.(1998)이 제안한 방법을 이용하였다. 시계방향과 반시계방향의 회전이 각각 음과 양의 와류로 정의되었다. 레이놀즈분리법(Reynolds decomposition)으로 각 점에서 순간 속도에서 평균속도와 난류 속도를 분리하였다.

$$u_i = \langle u_i \rangle + u'_i \quad (2)$$

기호 ($'$)은 난류속도 성분을 나타낸다. 이 실험에서는 2개의

속도성분만을 측정하였기 때문에, 난류변동속도(Turbulence intensity)는 식 (3)과 같이 정의 하였다.

$$I = \langle u'u' + w'w' \rangle^{1/2} \quad (3)$$

여기서, u' 과 w' 는 x 와 z 방향으로의 난류 속도 성분이다.

난류 운동 에너지 편성(Turbulent kinetic energy budget)을 조사하기 위해서, 난류 운동에너지의 수송방정식(Transport equation)의 각 항을 측정하거나 평가를 하여 그 크기를 결정하여야 한다. 방정식은 Tennekes and Lumley(1972)가 제안한 다음의 방정식을 이용하였다.

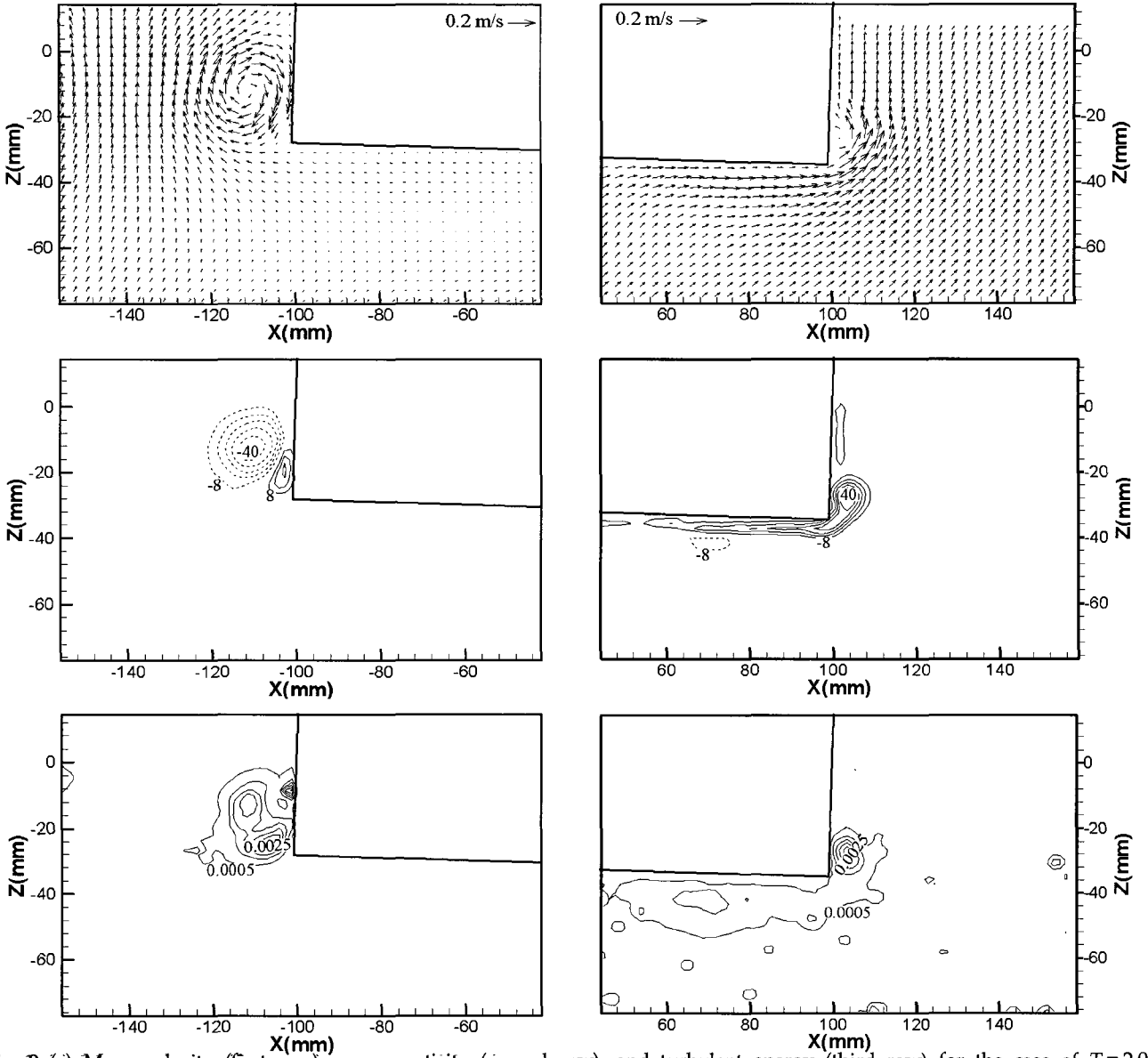


Fig. 9 (a) Mean velocity (first row), mean vorticity (second row), and turbulent energy (third row) for the case of $T=2.0$ s. The increment of contours in vorticity is $\Delta\Omega=8\text{ s}^{-1}$ while the increment of contours in turbulent kinetic energy is $\Delta k_t=0.0005\text{ m}^2/\text{s}^2$. $t/T=0.125$, $t/T=0.625$

$$\frac{\partial k_t}{\partial t} = \underbrace{-U_j \frac{\partial k_t}{\partial x_j}}_{\text{Advection}} - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \frac{1}{\rho} \langle u'_j p' \rangle}_{\text{Pressure Transport}} - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \langle u'_i u'_i u'_j \rangle}_{\text{Turbulent Transport}} - \underbrace{\langle u'_i u'_j \rangle S_{ij}}_{\text{Turbulent Production}} - \underbrace{2\nu \langle s_{ij} s_{ij} \rangle}_{\text{Turbulent Dissipation}}$$

$$k_t \approx \frac{1.33}{2} \langle u'u' + w'w' \rangle = \frac{1.33}{2} I^2 \quad (5)$$

단, 계수 1.33은 사각형 단면 구조 주위의 흐름이 평면 뒤의 후류와 비슷하다는 가정으로 Svensen(1987)의 실험결과를 따른 것이다. 이 식은 높은 레이놀즈수에서 다른 항에 비해서 비교적 적은 점성발산항(Viscous diffusion term)을 포함하지 않았다. 난류 운동의 평균 변형률 S_j 와 변동 변형률 s_j 는 식 (6)과 같이 정의되었다.

(4)

여기서, k_t 는 난류운동에너지, p' 는 압력변동, ρ 는 유체의 밀도, ν 는 유체의 동점성계수이다. k_t 는 아래와 같이 정의되어진다.

$$S_{ij} \equiv \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right), \quad s_{ij} \equiv \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

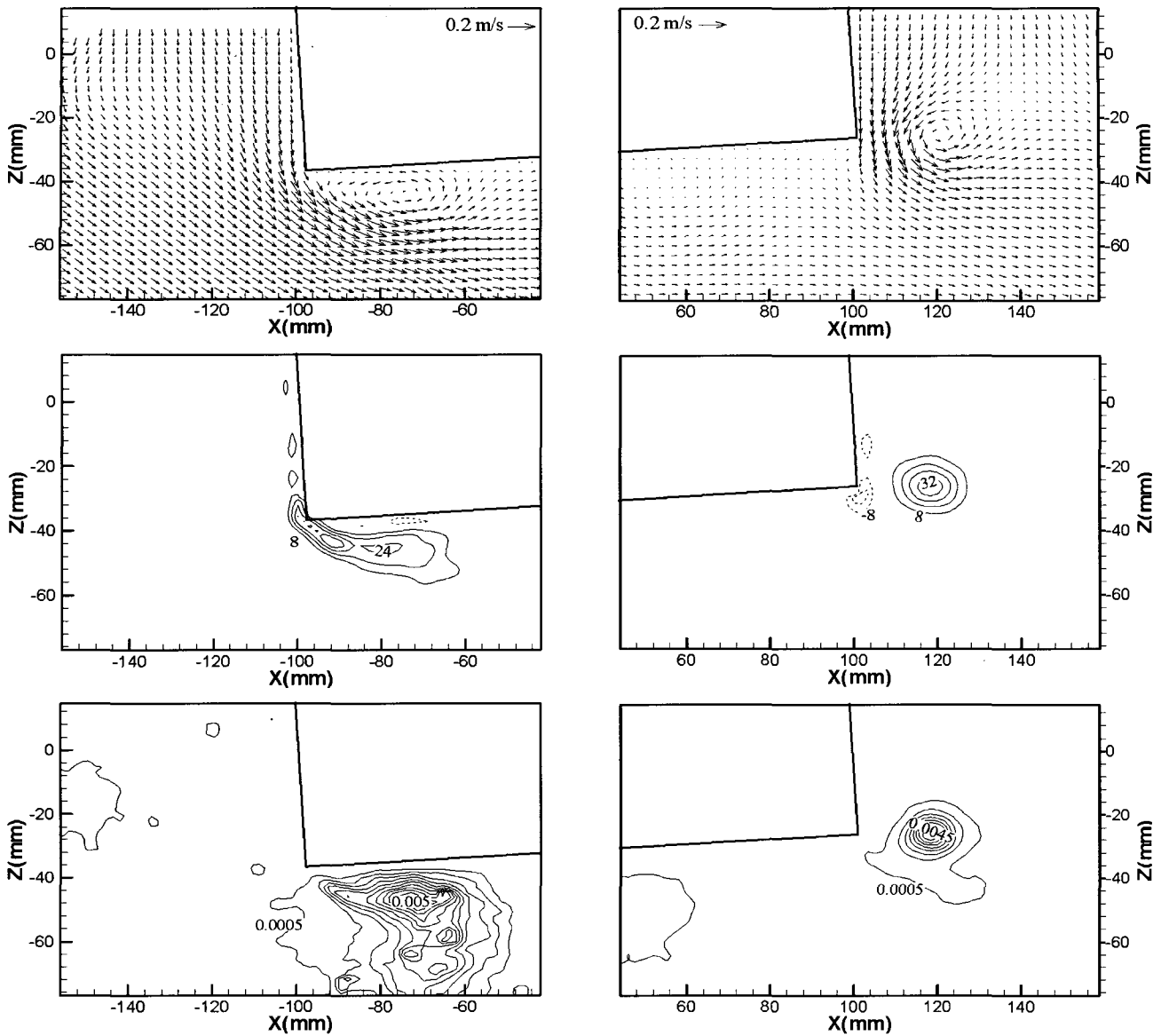


Fig. 9 (b) Mean velocity (first row), mean vorticity (second row), and turbulent energy (third row) for the case of $T=2.0s$. The increment of contours in vorticity is $\Delta\Omega = 8 s^{-1}$ while the increment of contours in turbulent kinetic energy is $\Delta k_t = 0.0005 m^2/s^2$. $t/T = 0.625$

식 (4)는 난류 운동 에너지의 시간에 대한 변화율이 이류 (Advection), 압력수송(Pressure transport), 난류수송(Turbulent transport), 난류생산(Turbulent production), 난류소산(Turbulent dissipation)에 의해서 균형이 이루어지는 것을 보여 준다. 압력 변동은 벽의 아주 가까이에서만 제외하면 난류 속도 성분과 상관관계가 아주 작고(Townsend, 1956) 유체 중의 압력을 측정할 수 없기 때문에, 이 연구에서는 변동압력수송항을 제외한다. 즉, 난류 운동 에너지의 수송방정식은

$$\frac{\partial k_t}{\partial t} = A + T + P - \epsilon \tag{7}$$

여기서 A 는 이류, T 는 난류수송, P 는 난류생산, ϵ 은 난류소산을 의미한다. 이 연구에서 등방성 난류(Isotropic Turbulence)의 가정 아래 난류소산은 식 (8)과 같이 정의된다.

$$\epsilon = 15\nu \left\langle \left(\frac{\partial u'}{\partial x} \right)^2 \right\rangle \tag{8}$$

횡동요 운동을 하는 사각형 단면을 가지는 구조물 주위의 난류 크기(Turbulent length scale)들과 난류 운동 에너지의 단위 질량당 소산량(Dissipation rate)을 Table 1에 나타내었다. 이 실험에서 난류가 공간적으로 일정하지 않기 때문에 Table 1에 표

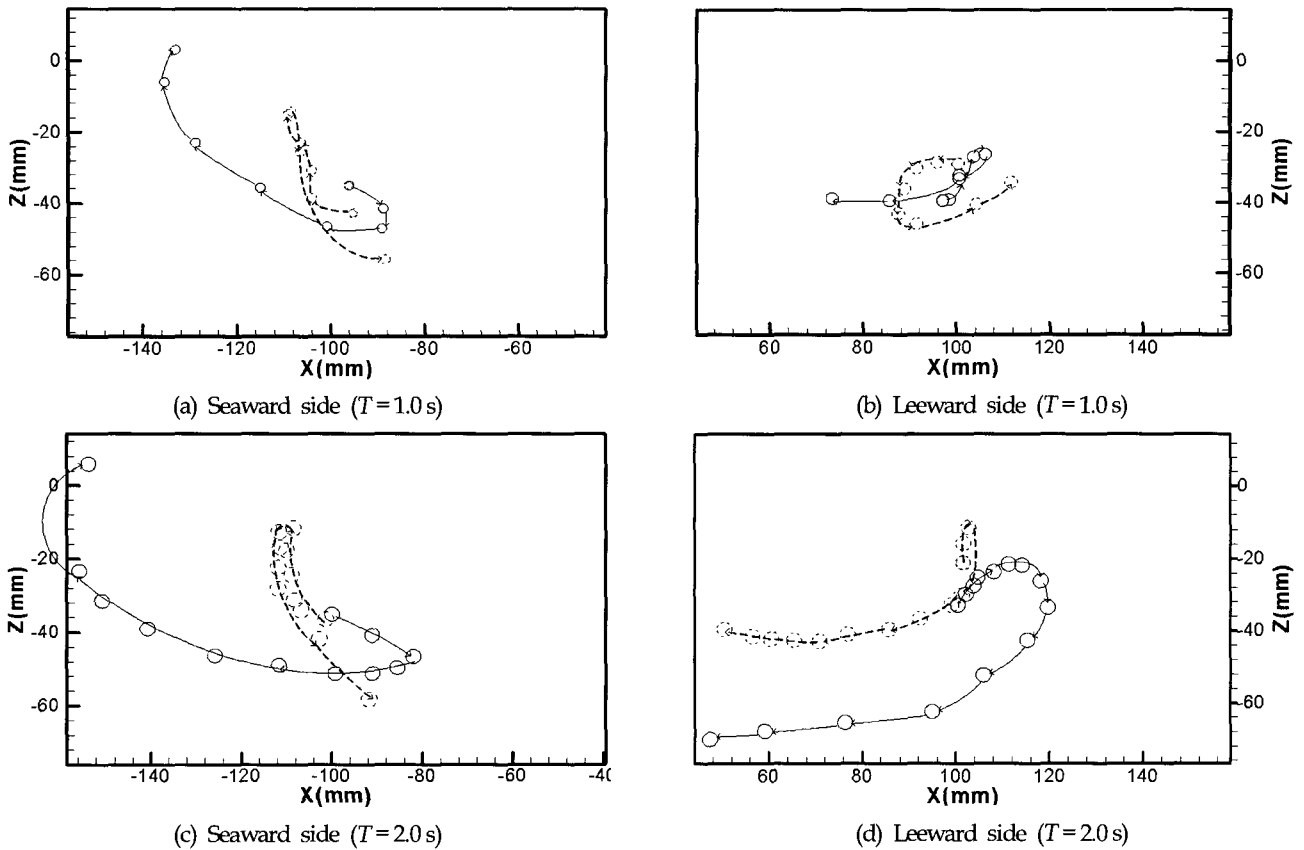


Fig. 10 Trajectories of the key vortices. Solid circles and lines, positive (counterclockwise) vortices; dashed circles and lines, negative (clockwise) vortices, The filled circle is the beginning location when the vortex was generated.

시된 위치와 위상에서 난류 크기들이 평가되었다. Taylor microscale(λ_T)은 대략적인 난류의 소산량을 평가하는데 이용되어진다. Taylor microscale의 정의에 의해서 정해진 위치에서의 난류 속도성분의 길이방향 상관관계를 이용해서 결정되었다. 이렇게 평가된 Taylor microscale을 이용해서 결정되어진 난류 소산량은 PIV를 이용해서 측정되어진 속도장으로부터 계산되어진 양과 같은 차수를 나타내었다. 난류의 통합스케일(Integral scale)은 대부분의 난류 에너지를 포함하는 유체 영역의 길이를 나타내고, Kolmogorov microscale(η_K)은 유동 중에서 가장 작은 스케일로서 소산이 일어나는 유체 영역의 길이를 나타내는 것이다.

본 연구에서의 PIV 속도장의 공간해상도는 난류 영역에서 Komogorov length scale의 약 20배정도이고, Taylor microscale의 약 3분의 1정도이다. 총 난류 소산량을 측정하기 위해서는 공간해상도가 Komogorov length scale보다 작아야 한다. 하지만, $20\eta_K$ 의 공간해상도에서 약 총 난류소산량의 50%정도는 얻어질 수 있다(Pope, 2000). y방향의 속도성분이 측정되어지지 않았기 때문에 등방성 난류의 가정 아래 식 (8)을 이용하여 난류 소산량을 계산하여 그 양이 약 반 정도로 평가되기는 하지만 적어도 소산량의 차원은 알 수 있다(Browne et al., 1987).

PIV를 이용한 속도장 측정의 오차는 Random오차와 Bias오차

로 나눌 수 있다. 이러한 오차는 d_r/d_{pix} 의 함수로 나타낼 수 있다(Prasad et al, 1992). 단, d_r 는 속도를 측정하기 위해 유체에 첨가된 입자의 화상에서 직경이고, d_{pix} 는 CCD카메라의 Pixel크기이다. 본 연구에서는 d_r/d_{pix} 는 0.97이고 측정 오차는 약 0.1 Pixel 정도이다. 즉, 3.5mm/s정도의 속도 오차를 가지고, 국부적인 최대속도의 약 2%미만이다. 또한, 와류강도(Vorticity)의 오차($\Omega = U_z/\Delta z + W_y/\Delta z$)는 약 $5s^{-1}$ 로 평가되어진다. 이 결과는 연속방정식($\partial U/\partial x + \partial W/\partial z$)을 이용한 와류강도의 오차는 약 $10s^{-1}$ 정도로 평가되어 두 방법 오차의 크기가 비슷하다. 이 와류강도의 오차는 국부적인 최대 와류강도의 20%미만으로 평가되어진다.

4. 실험 결과 및 토론

주기가 1.0s인 파도에서는 8개의 위상, 주기가 2.0s 파도에서는 16개의 위상에서 평균 속도, 와류 강도, 난류 운동에너지를 PIV를 이용해서 측정하였다. 이 장에서는 보여주는 속도장은 그림에서 속도벡터의 중복을 피하기 위해서 벡터를 하나씩 걸러서 나타내었다. 즉, 각 파도의 위상에서 속도장을 보여주는 그림은 총 속도벡터수의 4분의 1만이 나타내어졌다. 각 속도장과 일치하는 파도와 횡동요 운동의 위상은 Fig. 4와 Fig. 5와 일치한다.

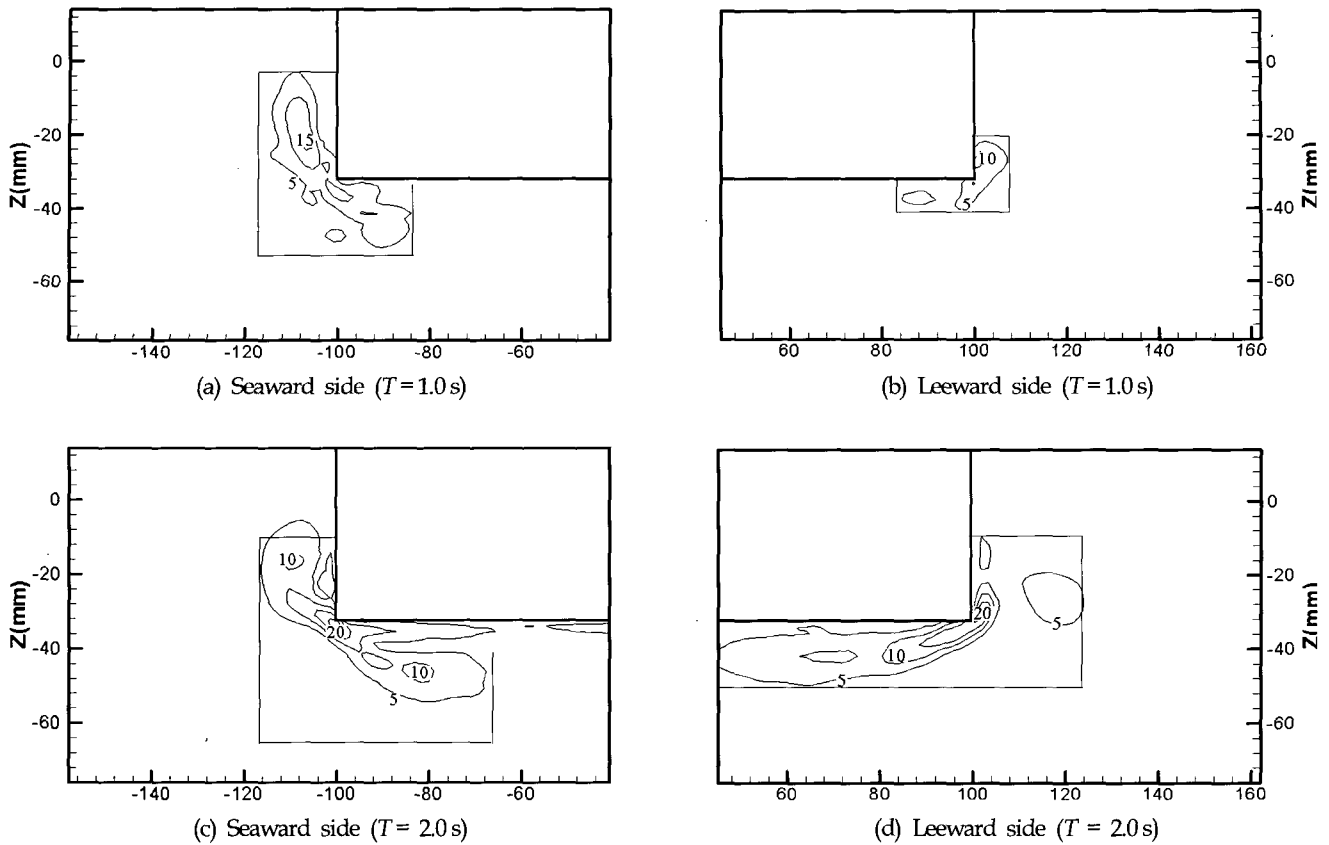


Fig. 11 Time-averaged (over one period) absolute vorticity with the increment of $\Delta\Omega = 5s^{-1}$ between contour lines.

4.1 평균 속도장

Fig. 6는 주기 1.0s 파도조건에서 구조물의 앞쪽에서 한 파도 주기동안 측정되어진 속도장을 보여준다. Fig. 6(a)와 6(b)는 구조물이 음의 방향(시계방향)으로 운동하고, 자유 수면과 구조물이 위쪽으로 움직이는 동안 시계방향의 와류가 모서리에서 분리되고 구조물 앞쪽에서 형성되었다. Fig. 6(c)는 파정에서 구조물이 반시계방향으로 운동을 시작했고, 음의 와류강도는 감소하기 시작했다. Fig. 6(d)로부터 유체 흐름의 방향이 바뀌고 모서리에서 양의 와류가 분리되기 시작했다. 이 양의 와류는 모서리에서 분리되어 구조물 아래쪽으로 이동하고, Fig. 6(e)와 6(g)의 사이에 파정에서 최대 양의 횡동요 운동 위상에서 원형태의 양의 와류가 구조물 아래에서 형성된다. 그리고, Fig. 6(g)부터 자유수면의 상승과 함께 유체 흐름의 방향이 바뀌면서 Fig. 6(h)와 6(a)에 서처럼 양의 와류가 사라지고 음의 와류가 생성되기 시작한다.

일반적으로 잘 알려진 횡동요 운동의 점성 감쇄 또는 와류 감쇄는 구조물의 주변에서 생성된 와류로 인하여 횡동요 운동이 감소하고, 그 영향은 고유주기로 운동할 때 아주 지배적이며 고유 주기에서 벗어난 운동에서는 그 영향이 적다고 알려져 있다. Fig. 7은 구조물의 고유 주기(0.62s)와 같은 파도에 의해서 운동하는 구조물 앞쪽에서의 순간 속도장을 보여준다. 이 그림은 구조물의 횡동요 운동시 전형적인 점성감쇄(Viscous 또는 Eddy-making damping)의 와류 형상을 보여준다. Fig. 7(a)는 시계방향의 횡동요 운동에서 정점이고, Fig. 7(b)는 반시계방향의

운동의 정점에서 순간 속도장을 보여준다. 와류는 구조물의 운동에 의해서 구조물 뒤쪽에서 생성되어짐을 알 수 있다. 이 속도장으로 부터 와류는 형상저항의 원인이 되고 횡동요 운동을 감소시킴을 알 수 있다. 구조물 횡동요 운동의 고유 주기(0.62s)보다 긴 주기 1.0s와 2.0s의 파도에 대한 평균 속도장에서 보면 구조물의 운동보다는 유체 흐름에 의해서 와류가 생성됨을 보여준다. 즉, 파도의 주기가 구조물의 고유주기보다 길면 유체 속도가 구조물의 운동 속도보다 빠르기 때문이다. 실제로 와류는 파도와 구조물의 상대운동에 의해서 서로 간섭하여 발생하여 구조물 횡동요 운동의 고유 주기와 같은 파도에 의해서 가진되어질 때 점성 감쇄로 인해 횡동요 운동이 감쇄함을 보여준다. 하지만, 여기서 보여준 구조물의 고유 주기보다 긴 파도에 의해 와류가 발생한 면의 압력이 낮아져 횡동요 운동이 증가할 수 있는 가능성을 보여준다.

4.2 와류 강도(Vorticity) 와 난류 운동 에너지(Turbulent kinetic energy)

Fig. 8(a)와 (b) 및 Figs. 9(a)과 (b)는 각각 파도 주기 1.0s와 2.0s의 조건에서 시계방향과 반시계방향의 와류들이 가장 발달된 위상에서의 평균속도, 와류강도, 난류 운동에너지를 보여주고 있다. 난류 운동 에너지의 생성은 구조물의 횡동요 운동시 발생한 와류의 위상과 위치가 일치한다. 이는 고정된 사각형 단면을 가

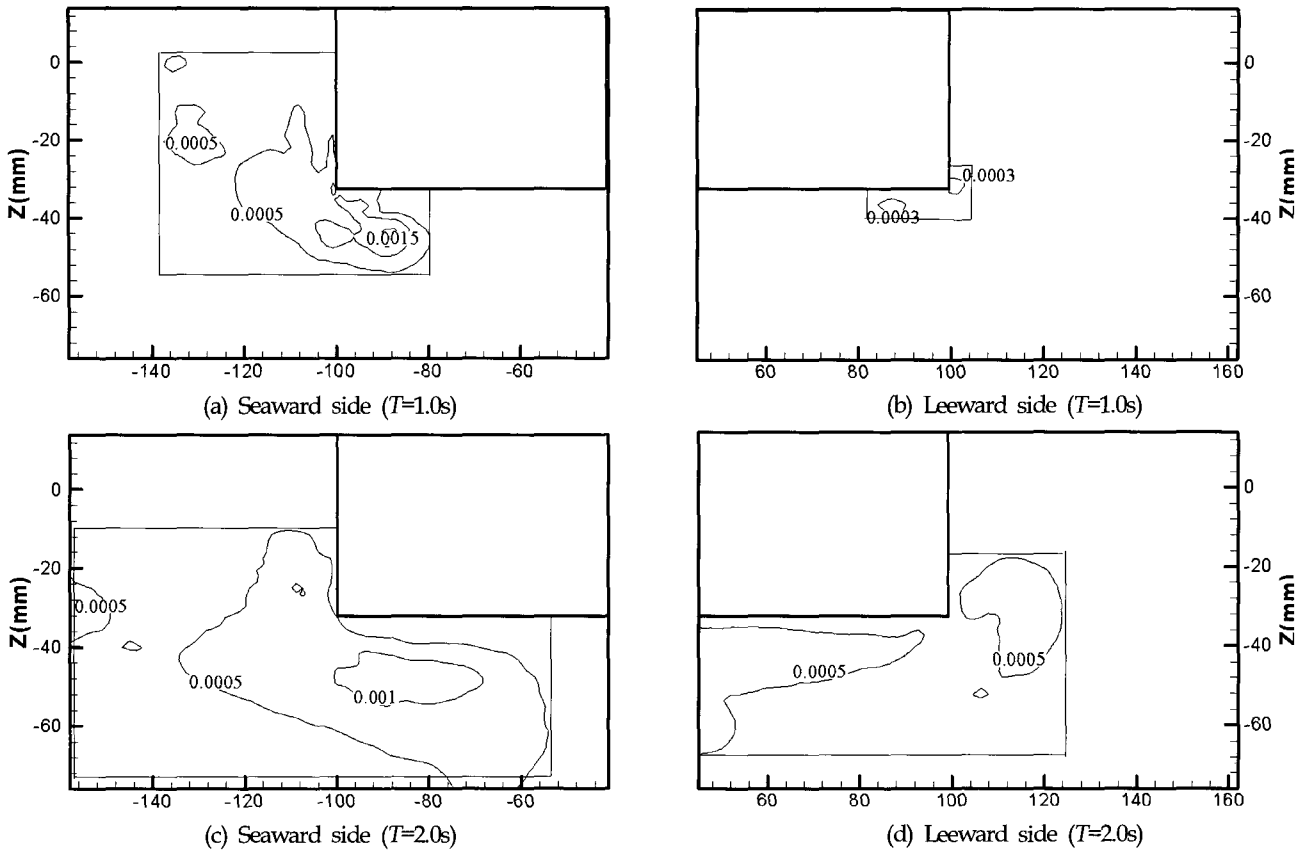


Fig. 12 Time-averaged (over one period) turbulent kinematic energy with the increment of $\Delta k_t = 0.0005 \text{ m}^2/\text{s}^2$ between contour lines.

진 구조물의 주변 유동장 연구에서도 확인된 바 있다(Jung et al, 2004). Fig. 8(a)에서는 $t/T=0.125$ (Fig. 5 참조)의 위상에서 횡동요 운동이 시계방향으로 최대인 순간에 구조물의 앞쪽에서 음의 와류가 발달되고, 양의 와류는 거의 소멸하고 있다. 양의 와류의 강도가 쇠퇴하고 있지만, 난류 운동 에너지는 자유수면 아래로 그 강도 좀 더 유지되어지고 있다. 이 이유는 양과 음의 와류가 서로 간섭으로 인하여 그 와류의 강도는 감소하고, 방향이 다른 와류의 간섭으로 인하여 난류 운동 에너지의 강도를 유지하는 것으로 보여진다. Fig. 8(b)에서는 $t/T=0.625$ 의 위상에서 양의 횡동요 운동이 정점에 달하고, 구조물의 앞쪽 바닥아래에 원모양으로 생성된 반시계방향의 와류를 보여준다. 이 위상에서 난류 운동 에너지는 생성된 와류의 위치와 일치하고 있다. 구조물을 지나서 주기 1.0s인 파도의 전달 계수(Transmission coefficient, K_T)는 0.75로 측정되었다. 따라서 구조물의 뒤쪽에서의 와류의 강도와 난류 운동 에너지가 앞쪽에 비해서 작은 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 $T=2.0\text{s}$ 인 파도의 실험결과를 보여준다. 음의 최대 횡동요 운동 위상($t/T=0.125$)에서 구조물의 앞쪽 옆면에 시계방향의 와류가 형성되었는데, $T=1.0\text{s}$ 의 와류보다는 와류의 형상이 명확하다(Fig. 9(a)). Fig. 9(b)는 최대의 반시계방향 운동시 구조물의 앞쪽 바닥 아래에서 생성된 와류를 보여주고, 뒤쪽 옆에서 완전하게 형성되어진 와류를 볼 수 있다. 이는 $T=2.0\text{s}$ 의 파도가

$T=1.0\text{s}$ 의 파도보다 높은 전달계수(0.91)를 가지기 때문에 구조물의 뒤쪽에서 명확한 형상의 와류가 생성된다.

Fig. 8과 Fig. 9에서 주목할 것은 파도와 상호 간섭에 의해서 구조물 주변에서 생성되어진 와류들이 구조물 운동의 뒤에 생성되어진 후류가 아니라, 와류생성이 구조물의 운동을 앞서기 때문에 운동을 방해하는 감쇄효과와는 반대의 영향으로 보여진다. 이러한 현상은 구조물의 횡동요 운동의 고유 주기보다 긴 파도에 의한 운동에서는 와류에 의한 점성 감쇄현상이 관찰되지 않았다는 것이다. 난류 강도는 부분적 최고속도의 약 25%정도였다. 이는 같은 조건의 고정된 사각형단면 구조물의 주변에서 난류강도의 약 반 정도이고(Jung et al, 2004), 원형 실린더 후류의 약 반 정도의 난류 강도이다(Townsend, 1956). 비교적 난류강도가 낮은 이유는 구조물이 유체 흐름과 같은 방향으로 운동하기 때문에 유체 흐름에 대한 구조물의 상대속도가 낮기 때문으로 생각되어진다.

주기 $T=1.0\text{s}$ 와 2.0s 의 파도에 대한 와(Vortex)의 궤적(Trajectory)을 Fig. 10에 나타내고 있다. 구조물 바닥의 양쪽 모서리 좌표는 각각 $(x, z) = (-100, -32)\text{mm}$ 와 $(100, -32)$ 이다. 각 Vortex의 위치는 와류강도(Vorticity)의 절대값이 최대인 점으로 정의하였다. 두 파도 주기에서 구조물 앞쪽에서 생성되는 반시계방향의 Vortex는 구조물의 바닥아래에서 생성되고, 모서리를

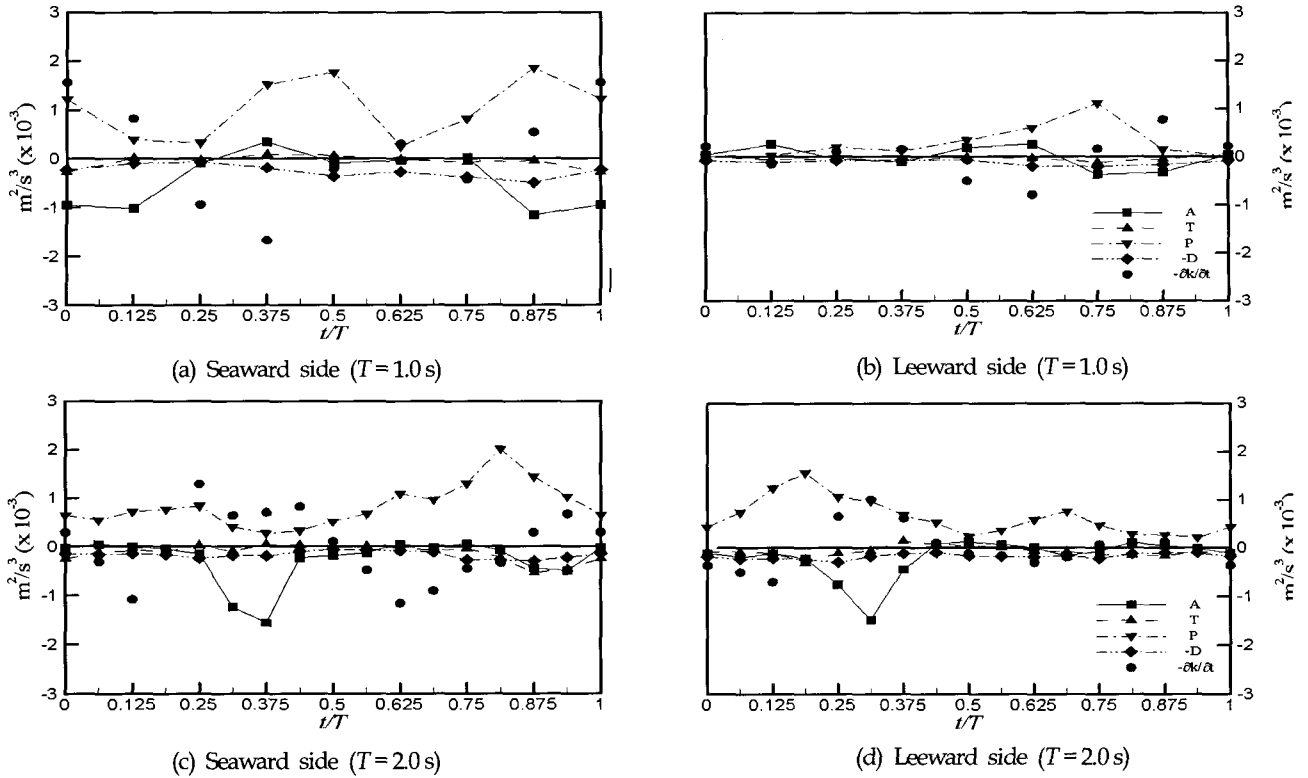


Fig. 13 Turbulent kinetic energy budget. A, turbulent advection; T, turbulent transport; P, turbulent production; ϵ , turbulent dissipation.

지나 구조물의 앞쪽으로 이동한 후 자유수면 아래에서 소멸한다. 시계방향의 Vortex는 모서리에서 분리된 후 구조물의 앞쪽에서 형성되어 모서리 아래쪽으로 이동하면서 소멸한다. 구조물 앞쪽에서의 Vortex의 궤적이 뒤쪽 Vortex의 궤적보다 긴 것은 파도 에너지 일부만이 구조물의 뒤쪽으로 전달되기 때문이라고 보여진다. 구조물의 뒤쪽으로 전달되어지는 파도 에너지는 $T=1.0s$ 는 약 56%($K_T=0.75$)이고, $T=2.0s$ 는 약 83%($K_T=0.91$)이다. 주목할 만한 것은 각 Vortex들은 열린 궤적(Open trajectory)을 가지고 생성되고 소멸한다는 것이다.

구조물 주위에서 유체 회전영역(Rotational area)과 난류영역(Turbulent area)을 정의하기 위해 와류강도의 절댓값($|\Omega|$)과 난류 운동에너지를 한 파도주기에 대해서 평균을 취하였다. 그 결과를 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다. 이 그림들은 회전영역과 난류영역이 강한 상관관계를 가지고 있으며, 난류가 더 넓은 영역으로 확산되면서 소멸하는 것을 보여준다. 이러한 결과로 볼 때 포텐셜 이론이 파도와 상호 간섭에 의한 구조물 주변에서 유동장을 해석하는 것에 제한이 있을 것으로 생각되어진다.

Fig. 13는 구조물 양쪽에서의 난류 운동에너지 편성에 대해서 보여준다. 그림에 보여진 식 (4)의 각 항들은 난류영역(참조 Fig. 12)내에서의 평균값들을 이용한 것이다. 난류 소산항(ϵ)은 등방성 난류 가정을 이용한 식 (8)에 의하여 결정되어진 값이다. 난류 운동에너지는 구조물의 뒤쪽보다는 앞쪽에서 난류의 생산(Production)과 소산(Dissipation)이 활발함을 알 수 있다. Fig.13로부터 대부분의 난류 운동에너지가 난류 생산에 의해서 얻어지

고, 난류 이류(Advection)에 의해서 대부분의 난류 운동에너지가 영역으로부터 벗어나는 것을 알 수 있다. 난류 소산은 생산에 비해서 양이 적은데 이는 난류 운동에너지는 난류 영역을 벗어나서도 난류 소산이 이루어지기 때문이라고 생각한다.

5. 결 론

2차원 수조에서 사각형 단면을 가지는 구조물과 규칙파의 상호 간섭에 의한 유체 흐름의 특성을 PIV를 이용하여 실험적 연구를 수행하였다. 구조물은 파도에 의한 횡동요 운동만이 허락되었다. 세 가지 주기의 규칙파가 실험에 이용되었는데, 구조물 횡동요 고유 주기와 일치하는 규칙파와 이보다 긴 규칙파 2개에 대해서 실험하였다. 파도의 주기와 구조물의 상대적인 운동에 따라서 구조물 주변의 유체 흐름은 변화하였다.

본 연구에서의 결과는 기존에 이루어진 정수 중에서 구조물을 강제적으로 운동시켜 얻어진 결과와는 구별되어진다. 전형적인 횡동요 점성 감쇄(와류 감쇄)는 구조물의 횡동요 고유 주기와 같은 주기를 가지는 파도에서 관찰되어졌다. 하지만, 고유 주기보다 긴 규칙파에서는 와류의 생성이 구조물의 운동보다 앞서는 것이 관찰되어졌다. 이는 알려져 있는 횡동요 점성 감쇄와 다른 형태이며 구조물의 횡동요 운동을 감소시키는게 아니라 구조물의 운동보다 앞서서 생성되는 와류에 의해서 횡동요 운동이 증가할 수 있다.

반시계방향(양)과 시계방향(음)의 와류들이 구조물에서 분리되어지고 주변에서 발달하면서 주변 유체에 회전성과 난류가 발생한다. 유체의 회전 영역은 구조물로부터 파도 유체 입자 궤적

의 1~2배 이내의 거리에 제한되며, 이 영역에서는 포텐셜이론의 적용에 한계가 있을 것으로 생각되어진다. 난류 영역은 회전영역보다는 비교적 넓은 것으로 관찰된 것은 난류 운동 에너지가 이류를 통하여 소멸되기 때문인 것으로 생각되어진다. 구조물 앞과 뒤의 흐름 특성 차이는 구조물을 지나가는 파도 전달(Wave transmission)에 의해서 결정되어 지는 것으로 보여진다. 구조물 횡동요 운동 고유 주기보다 긴 주기의 파도의 조건에서 난류 강도는 국부적인 최대 평균속도의 약 25%이고, 고정된 사각형 구조물의 결과보다 약 50%정도이다. 이는 횡동요 운동하는 구조물과 파도에 의한 유체 흐름의 상대 속도가 고정된 구조물 주변의 유체 속도보다 늦기 때문이라고 판단되어진다.

후 기

본 연구는 한국과학기술원의 첨단조선공학연구센터(ASERC)의 지원으로 수행되었다.

참 고 문 헌

- Browne, L.W.B., Antonia, A. and Shah, D.A. (1987). "Turbulent energy dissipation in a wake", *Journal of Fluid Mechanics* 179, pp 307-326.
- Bruce, L. and McCartney, M., (1985). "Floating breakwater design", *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol 111, No 2, pp 304-318.
- Chakrabarti, S. (2001). "Empirical calculation of roll damping of ships and barges", *Ocean Engineering* 28, pp 915-932.
- 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* 346, pp 77-115.
- Fugazza, M. and Natale, L. (1988). "Energy losses and floating breakwater response", *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol 114, No 2, pp 191-205.
- Ikeda, Y., Hemeno, Y. and Tanaka, N. (1977). "On eddy making damping component of roll damping force on naked hull", *Journal of the Society of Naval Architects of Japan* 142, pp 54-64 (in Japanese).
- Jung, K.H., Chang, K.-A. and Huang, E.T. (2004). "Two dimensional flow characteristics of wave interactions with a fixed rectangular structure", *Ocean Engineering* 31, pp 975-998.
- Lighthill, J. (1986). "Fundamentals concerning wave loading on offshore structures", *Journal of Fluid Mechanics* 173, pp 667-681.
- Mays, T.W., Plaut, R.H. and Liapis, S.I. (1999). "Three-dimensional analysis of submerged, moored, horizontal, rigid cylinders used as breakwaters", *Ocean Engineering* 26, pp 1311-1333.
- Pope, S.B. (2000). *Turbulent Flows*, Cambridge University Press.
- Prasad, A.K., Adrian, R.J., Landreth, C.C. and Offutt, P.W. (1992). "Effect of Resolution on the Speed and Accuracy of Particle Image Velocimetry Interrogations", *Experiments in Fluids* 13, pp 105-116.
- Raffel, M., Willert, C.E. and Kompenhans, J. (1998). *Particle Image Velocimetry*, Springer-Verlag.
- 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.
- Svendsen, I.A. (1987). "Analysis of surf zone turbulence", *Journal of Geophysical Research* 92C, pp 5115-5124.
- Tennekes, H. and Lumley, J.L. (1972). *A First Course in Turbulence*, MIT Press
- Townsend, A.A. (1956). *The structure of turbulent shear flow*, Cambridge University Press, London
- Williams, A.N. and Abul-Azm, A.G. (1997). "Dual pontoon floating breakwater", *Ocean Engineering* 24, pp 465-478.
- Williams, A.N., Lee, H.S., and Huang, Z. (2000). "Floating pontoon breakwaters", *Ocean Engineering* 27, pp 221-240.
- 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.
- 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.
- Yeung, R.W., Liao, S.-W. and Roddier, D. (1998). "Hydrodynamic Coefficients of Rolling Rectangular Cylinders", 8th International Journal of Offshore and Polar Engineers 8, pp 242-250.

2006년 10월 25일 원고 접수

2006년 11월 13일 최종 수정본 채택