

PIV기법을 활용한 쇄파의 유동구조 해석

조효제* · 이연주** · 도덕희***

*한국해양대학교 조선해양시스템공학부
**한국해양대학교 대학원 해양시스템공학과
***한국해양대학교 기계·정보공학부

A Study on Flow Structure of Breaking Wave through PIV Analysis

Hyo-Jae Jo*, Eon-Ju Lee** and Deog-Hee Doh***

**Division of Naval Architecture & Ocean system Engineering, Korea Maritime Univ., Busan, Korea
**Dept. of Ocean system Engineering, Graduate School, Korea Maritime Univ., Busan, Korea
***Division of Mechanical and Information Engineering, Korea Maritime Univ., Busan, Korea*

KEY WORDS: PIV method PIV기법, Breaking wave 쇄파, Flow analysis 유동해석, Composition wave 합성파, Perturbation method 섭동법

ABSTRACT: This paper compares theoretical wave profile and particle kinematics with experimental results generated by a 2-D wave tank. Particle velocity fields of compound waves were acquired using a PIV technique. Synchronization was applied to acquire images of the wave fields, and the time gap between these images was controlled by the user. This technique was applied to investigate the wave breaking mechanism, and the wave profile and velocity distribution in a wave breaking field was obtained.

1. 서 론

본 논문에서 활용하고 있는 2차원 수조에서 규칙파나 불규칙파를 생성시키는 실험은 오래 전부터 많은 연구자들에 의하여 수행되어왔다(박중천과 Hideaki, 1996). 특히 구조물 설계에서 최대파력산정을 위한 쇄파에 대한 연구가 활발해지면서, 쇄파의 동역학적 유동특성을 파악하기 위하여 수조실험을 수행하고 있다(이동연 등, 1996; 이수룡 등, 2007). 또한 Kolaini and Tulin(1993)은 각수조를 이용하여 다방향파를 발생시켜 그중 쇄파의 발생기법에 대하여 보고한 바가 있다. 2차원 수조를 이용하여 규칙파의 쇄파를 생성시키는 방법으로는 일반적으로 해안선에서 쇄파가 일어나는 원리와 같이 경사각이 완만한 경사면을 수조바닥에 두고 규칙파가 진행함에 따라 점점 파고가 증가하여 쇄파를 발생시키는 방법이 있다. 또한 여러 개의 주파수를 가지는 규칙파를 발생시켜 각 성분파들의 위상속도를 이용하여 파정을 한 점에 집중시켜 쇄파에 이르게 하는 방법도 있다. 본 논문에서는 쇄파 유동구조의 이론적인 계산결과와 실험결과를 비교하기 위하여 두개의 파를 합성시켜 쇄파를 발생시키는 방법을 사용하였다.

근래에는 유체역학 관련 연구자들이 PIV(Particle image velocity)를 이용하여 복잡한 유동장의 계측들을 하고 있으며, 조선해양공학 등 여러 분야에도 응용이 이루어지고 있다(Lee et

al., 2005; 도덕희 등, 2007). 특히 물체후류의 와동과 같은 복잡한 유동구조를 파악하기 위하여 PIV기법을 이용하고 있다(현범수 등, 2000).

본 논문에서는 각각 다른 주파수를 가지는 두 개의 규칙파를 합성하여 쇄파를 생성시켜 이러한 유동에 PIV기법을 적용하여 유동의 운동학적 구조를 해석하였다. 그리고 이들의 실험결과를 퍼텐셜 이론에 근거한 Stock's wave이론결과와 비교하여 파면의 형상과 유체입자의 속도분포를 나타내었다.

2. 섭동법을 이용한 2성분 합성파의 근사해

유체는 비점성이라 가정하고, 유동은 비회전성으로 가정하였으며, 표면장력은 무시하였다. 속도퍼텐셜은 유체영역 내부에서 라플라스 방정식과 베르누이 방정식을 만족한다.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} = u, \quad \frac{\partial \phi}{\partial z} = w \right)$$
$$\frac{p}{\rho} + gz + \frac{1}{2}q^2 + \frac{\partial \phi}{\partial t} = 0 \quad (q^2 = u^2 + w^2)$$

여기서, ϕ : 속도퍼텐셜, x : 수평방향거리, z : 연직방향거리, u : 수평방향유속, w : 연직방향유속, p : 압력, ρ : 밀도, t : 시간, g : 중력가속도

속도퍼텐셜은 다음의 경계조건을 만족해야한다.

교신저자 도덕희: 부산광역시 영도구 동삼동, 051-408-5991, doh@hhu.ac.kr

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (\text{at } z = \eta)$$

$$g\eta + \frac{1}{2}q^2 + \frac{\partial \phi}{\partial t} = 0 \quad (\text{at } z = \eta)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (\text{at } z = -h)$$

1차 및 2차 퍼텐셜과 각종 물리량은 최재은 등(2005)의 논문을 참조하기 바란다.

3차경계조건을 만족하는 속도퍼텐셜과 파면형상 및 유체입자의 속도는 다음과 같다.

2.1 3차 경계조건

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial^2 \phi_{(3)}}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi_{(3)}}{\partial z} \right)_{z=0} \\ &= g \left(\frac{\partial \phi_{(2)}}{\partial x} \frac{\partial \zeta_{(1)}}{\partial x} + \frac{\partial \phi_{(1)}}{\partial x} \frac{\partial \zeta_{(2)}}{\partial x} \right)_{z=0} + g \zeta_{(1)} \left\{ \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \phi_{(1)}}{\partial z} \frac{\partial \zeta_{(1)}}{\partial x} - \frac{\partial \phi_{(2)}}{\partial z} \right) \right\}_{z=0} \\ &+ g \zeta_{(2)} \left\{ \frac{\partial}{\partial z} \left(-\frac{\partial \phi_{(1)}}{\partial z} \right) \right\}_{z=0} + \frac{1}{2} g \zeta_{(1)}^2 \left\{ \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(-\frac{\partial \phi_{(1)}}{\partial z} \right) \right\}_{z=0} - \frac{\partial}{\partial t} (q_1 q_2)_{z=0} \\ &- \frac{\partial \zeta_{(1)}}{\partial t} \left\{ \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{2} g_1^2 + \frac{\partial \phi_{(2)}}{\partial t} \right) \right\}_{z=0} - \zeta_{(1)} \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{2} g_1^2 + \frac{\partial \phi_{(2)}}{\partial t} \right) \right\}_{z=0} \\ &- \frac{\partial \zeta_{(2)}}{\partial t} \left\{ \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial \phi_{(1)}}{\partial t} \right\}_{z=0} - \zeta_{(2)} \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \phi_{(1)}}{\partial t} \right) \right\}_{z=0} \\ &- \zeta_{(1)} \frac{\partial \zeta_{(1)}}{\partial t} \left\{ \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(\frac{\partial \phi_{(1)}}{\partial t} \right) \right\}_{z=0} - \frac{1}{2} \zeta_{(1)}^2 \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(\frac{\partial \phi_{(1)}}{\partial t} \right) \right\}_{z=0} \end{aligned}$$

이는 섭동법을 적용하여 3차항까지를 표현한 자유표면조건을 나타내고 있다.

2.2 3차 속도퍼텐셜

$$\begin{aligned} \phi_{(3)} &= B31 \frac{\cosh k_1 (h+z)}{\sinh k_1 h} \sin k_1 (x-c_1 t) + B32 \frac{\cosh k_2 (h+z)}{\sinh k_2 h} \sin k_2 (x-c_2 t) \\ &+ B33 \frac{\cosh 3k_1 (h+z)}{\sinh 3k_1 h} \sin 3k_1 (x-c_1 t) + B34 \frac{\cosh 3k_2 (h+z)}{\sinh 3k_2 h} \sin 3k_2 (x-c_2 t) \\ &+ B35 \frac{\cosh (k_1+2k_2)(h+z)}{\sinh (k_1+2k_2)h} \sin \{(k_1+2k_2)x - (c_1 k_1 + 2c_2 k_2)t\} \\ &+ B36 \frac{\cosh (k_1-2k_2)(h+z)}{\sinh (k_1-2k_2)h} \sin \{(k_1-2k_2)x - (c_1 k_1 - 2c_2 k_2)t\} \\ &+ B37 \frac{\cosh (2k_1+k_2)(h+z)}{\sinh (2k_1+k_2)h} \sin \{(2k_1+k_2)x - (2c_1 k_1 + c_2 k_2)t\} \\ &+ B38 \frac{\cosh (2k_1-k_2)(h+z)}{\sinh (2k_1-k_2)h} \sin \{(2k_1-k_2)x - (2c_1 k_1 - c_2 k_2)t\} \end{aligned}$$

$$B31 = 0$$

$$B32 = 0$$

$$B33 = [a_1 c_1^2 k_1^3 (3-2D1D3)B21 + \frac{1}{2} a_1 c_1^3 k_1^3 (1-D1^2)A21] / (gk_1 - 3c_1^2 k_1^2 D1D1)$$

$$B34 = [a_2 c_2^2 k_2^3 (3-2D2D4)B22 + \frac{1}{2} a_2 c_2^3 k_2^3 (1-D2^2)A22] / (gk_2 - 3c_2^2 k_2^2 D2D2)$$

$$\begin{aligned} B35 &= \left[g \left\{ -\frac{1}{8} a_1 a_2^2 (c_1 k_1^2 + 2c_2 k_2^2) (k_1 + 2k_2) - a_1 k_2 (k_1 + 2k_2) \right\} DAB22 \right. \\ &- \frac{1}{2} a_2 (k_1 + k_2) (k_1 + 2k_2) D5B23 - \frac{1}{2} a_1 c_1 k_1 (k_1 + 2k_2) D1A22 \\ &- \left. \frac{1}{2} a_2 c_2 k_2 (k_1 + 2k_2) D2A23 \right] + \frac{1}{4} a_1 a_2^2 c_1 c_2 k_1 k_2 (c_1 k_1 + 2c_2 k_2) (k_1 - k_2) (D1 - D2) \\ &+ \frac{1}{8} a_1 a_2^2 (c_1 k_1 + 2c_2 k_2) (c_1^2 k_1^2 D1 + 2c_2^2 k_2^2 D2) - a_1 c_1 k_1 k_2 (c_1 k_1 + 2c_2 k_2) (D1D4 - 1) B22 \\ &+ 2a_1 c_1 k_2^2 (c_1 k_1 + 2c_2 k_2) B22 - \frac{1}{2} a_2 c_2 k_2 (k_1 + k_2) (c_1 k_1 + 2c_2 k_2) (D2D5 - 1) B23 \\ &+ \frac{1}{2} a_2 (k_1 + k_2) (c_1 k_1 + 2c_2 k_2) (c_1 k_1 + c_2 k_2) B23 + \frac{1}{2} a_1 c_1^2 k_1^2 (c_1 k_1 + 2c_2 k_2) A22 \\ &+ \frac{1}{2} a_2 c_2^2 k_2^2 (c_1 k_1 + 2c_2 k_2) A23 / [g(k_1 + 2k_2) - (c_1 k_1 + 2c_2 k_2)^2 DDB3] \\ B36 &= [g \left\{ -\frac{1}{8} a_1 a_2^2 (c_1 k_1^2 + 2c_2 k_2^2) (k_1 - 2k_2) - a_1 k_2 (k_1 - 2k_2) \right\} DAB22 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & - \frac{1}{2} a_2 (k_1 - k_2) (k_1 - 2k_2) D6B24 - \frac{1}{2} a_1 c_1 k_1 (k_1 - 2k_2) D1A22 \\ & - \frac{1}{2} a_2 c_2 k_2 (k_1 - 2k_2) D2A24 - \frac{1}{4} a_1 a_2^2 c_1 c_2 k_1 k_2 (c_1 k_1 - 2c_2 k_2) (k_1 + k_2) (D1 + D2) \\ & + \frac{1}{8} a_1 a_2^2 (c_1 k_1 - 2c_2 k_2) (c_1^2 k_1^2 D1 + 2c_2^2 k_2^2 D2) - a_1 c_1 k_1 k_2 (c_1 k_1 - 2c_2 k_2) (D1D4 + 1) B22 \\ & + 2a_1 c_1 k_2^2 (c_1 k_1 - 2c_2 k_2) B22 - \frac{1}{2} a_2 c_2 k_2 (k_1 - k_2) (c_1 k_1 - 2c_2 k_2) (D2D6 + 1) B24 \\ & + \frac{1}{2} a_2 (k_1 - k_2) (c_1 k_1 - 2c_2 k_2) (c_1 k_1 - c_2 k_2) B24 + \frac{1}{2} a_1 c_1^2 k_1^2 (c_1 k_1 - 2c_2 k_2) A22 \\ & + \frac{1}{2} a_2 c_2^2 k_2^2 (c_1 k_1 - 2c_2 k_2) A24 / [g(k_1 - 2k_2) - (c_1 k_1 - 2c_2 k_2)^2 DDA1] \\ B37 &= \left[g \left\{ -\frac{1}{8} a_1^2 a_2 (2c_1 k_1^2 + c_2 k_2^2) (2k_1 + k_2) - a_2 k_1 (2k_1 + k_2) \right\} D3B21 \right. \\ &- \frac{1}{2} a_1 (k_1 + k_2) (2k_1 + k_2) D5B23 \\ &- \frac{1}{2} a_2 c_2 k_2 (2k_1 + k_2) D2A21 - \frac{1}{2} a_1 c_1 k_1 (2k_1 + k_2) D1A23 \left. \right\} \\ &+ \frac{1}{4} a_1^2 a_2 c_1 c_2 k_1 k_2 (2c_1 k_1 + c_2 k_2) (k_1 - k_2) (D1 - D2) \\ &+ \frac{1}{8} a_1^2 a_2 (2c_1 k_1 + c_2 k_2) (2c_1^2 k_1^2 D1 + c_2^2 k_2^2 D2) \\ &- a_2 c_2 k_1 k_2 (2c_1 k_1 + c_2 k_2) (D2D3 - 1) B21 + 2a_2 c_1 k_1^2 (2c_1 k_1 + c_2 k_2) B21 \\ &- \frac{1}{2} a_1 c_1 k_1 (k_1 + k_2) (2c_1 k_1 + c_2 k_2) (D1D5 - 1) B23 \\ &+ \frac{1}{2} a_1 (k_1 + k_2) (2c_1 k_1 + c_2 k_2) (c_1 k_1 + c_2 k_2) B23 \\ &+ \frac{1}{2} a_2 c_2^2 k_2^2 (2c_1 k_1 + c_2 k_2) A21 + \frac{1}{2} a_1 c_1^2 k_1^2 (2c_1 k_1 + c_2 k_2) A23 \left. \right] \\ &/ [g(2k_1 + k_2) - (2c_1 k_1 + c_2 k_2)^2 DDD5] \\ B38 &= \left[g \left\{ -\frac{1}{8} a_1^2 a_2 (2c_1 k_1^2 + c_2 k_2^2) (2k_1 - k_2) - a_2 k_1 (2k_1 - k_2) \right\} D3B21 \right. \\ &- \frac{1}{2} a_1 (k_1 - k_2) (2k_1 - k_2) D6B24 - \frac{1}{2} a_2 c_2 k_2 (2k_1 - k_2) D2A21 \\ &- \left. \frac{1}{2} a_1 c_1 k_1 (2k_1 - k_2) D1A24 \right] - \frac{1}{4} a_1^2 a_2 c_1 c_2 k_1 k_2 (2c_1 k_1 - c_2 k_2) (k_1 + k_2) (D1 + D2) \\ &+ \frac{1}{8} a_1^2 a_2 (2c_1 k_1 - c_2 k_2) (2c_1^2 k_1^2 D1 + c_2^2 k_2^2 D2) - a_2 c_2 k_1 k_2 (2c_1 k_1 - c_2 k_2) (D2D3 + 1) B21 \\ &+ 2a_2 c_1 k_1^2 (2c_1 k_1 - c_2 k_2) B21 - \frac{1}{2} a_1 c_1 k_1 (k_1 - k_2) (2c_1 k_1 - c_2 k_2) (D1D6 - 1) B24 \\ &+ \frac{1}{2} a_1 (k_1 - k_2) (2c_1 k_1 - c_2 k_2) (c_1 k_1 - c_2 k_2) B24 \\ &+ \frac{1}{2} a_2 c_2^2 k_2^2 (2c_1 k_1 - c_2 k_2) A21 + \frac{1}{2} a_1 c_1^2 k_1^2 (2c_1 k_1 - c_2 k_2) A24 \left. \right] \\ &/ [g(2k_1 - k_2) - (2c_1 k_1 - c_2 k_2)^2 DDD6] \\ B36 &= \begin{cases} k_1 > 2k_2 : & \frac{a_1 a_2^2 c_1 k_1 (2k_2 - k_1)}{2} \\ 2k_2 > k_1 > k_2 : & \frac{a_1 a_2^2 c_1 c_2 k_1 k_2 (3c_2 k_2 - 2c_1 k_1) (2k_2 - k_1)}{2(c_1 k_1 - c_2 k_2)^2} \\ 2k_2 > k_1 : & \frac{a_1 a_2^2 c_1 c_2 k_1^2 k_2 (3c_2 k_2 - 2c_1 k_1)}{2(c_1 k_1 - c_2 k_2)^2} \end{cases} \\ B38 &= \begin{cases} 2k_1 > k_2 : & \frac{a_1^2 a_2 c_1 c_2 k_1 k_2^2 (3c_1 k_1 - 2c_2 k_2)}{2(c_1 k_1 - c_2 k_2)^2} \\ 2k_1 > k_2 > k_1 : & \frac{a_1^2 a_2 c_1 c_2 k_1 k_2 (3c_1 k_1 - 2c_2 k_2) (2k_1 - k_2)}{2(c_1 k_1 - c_2 k_2)^2} \\ k_2 > 2k_1 : & \frac{a_1^2 a_2 c_2 k_2 (2k_1 - k_2)}{2} \end{cases} \end{aligned}$$

2.3 3차 파형

$$\begin{aligned} \eta_{(3)} &= A31 \cos k_1 (x - c_1 t) + A32 \cos k_2 (x - c_2 t + \theta) + A33 \cos 3k_1 (x - c_1 t) \\ &+ A34 \cos 3k_2 (x - c_2 t + \theta) + A35 \cos \{(k_1 + 2k_2)x - (c_1 k_1 + 2c_2 k_2)t + \theta\} \\ &+ A36 \cos \{(k_1 - 2k_2)x - (c_1 k_1 - 2c_2 k_2)t - \theta\} \\ &+ A37 \cos \{(2k_1 + k_2)x - (2c_1 k_1 + c_2 k_2)t + \theta\} \\ &+ A38 \cos \{(2k_1 - 2k_2)x - (2c_1 k_1 - c_2 k_2)t - \theta\} \\ A31 &= \frac{1}{g} \left\{ -\frac{5}{8} a_1^3 c_1^2 D1k_1^3 + \frac{1}{2} a_1 A21 c_1^2 k_1^2 - (D1D3 - 1) a_1 B21 c_1 k_1^2 \right. \\ &- \frac{1}{2} a_1 a_2^2 c_2 (D2k_1 + D1k_2) k_2 k_1 + \frac{1}{2} a_2 A23 c_2^2 k_2^2 + \frac{1}{2} a_2 A24 c_2^2 k_2^2 \\ &+ \frac{1}{4} a_1 a_2^2 (c_1^2 k_1^3 D1 - 2c_2^2 k_2^3 D2) - \frac{1}{2} a_2 B24 (c_1 k_1 + (D2D6 - 2) c_2 k_2) (k_1 - k_2) \\ &- \left. \frac{1}{2} a_2 B23 (c_2 k_2 D2D5 - c_1 k_1) (k_1 + k_2) \right\} \end{aligned}$$

$$A32 = \frac{1}{g} \left\{ -\frac{5}{8} a_3^2 c_2^2 D2k_2^3 + \frac{1}{2} a_2 A22 c_2^2 k_2^2 - (D2D4 - 1) a_2 B22 c_2 k_2^2 - \frac{1}{2} a_2 a_1^2 c_1 c_2 (D2k_1 + D1k_2) k_2 k_1 + \frac{1}{2} a_1 A23 c_1^2 k_1^2 + \frac{1}{2} a_1 A24 c_1^2 k_2^2 \right\}$$

$$A33 = \frac{1}{g} \left\{ \frac{1}{8} a_1^2 c_1^2 D1k_1^3 + \frac{1}{2} a_1 A21 c_1^2 k_1^2 - (D1D3 - 3) a_1 B21 c_1 k_1^2 + 3B33 c_1 D D1 k_1 \right\}$$

$$A34 = \frac{1}{g} \left\{ \frac{1}{8} a_2^2 c_2^2 D2k_2^3 + \frac{1}{2} a_2 A22 c_2^2 k_2^2 - (D2D4 - 3) a_2 B22 c_2 k_2^2 + 3B34 c_2 D D2 k_2 \right\}$$

$$A35 = \frac{1}{g} \left\{ \frac{1}{8} a_1 (c_1^2 D1k_1^3 + 2c_2^2 D2k_2^3) a_2^2 + \frac{1}{4} a_1 c_1 c_2 (D1 - D2) k_1 (k_1 - k_2) k_2 a_2^2 + \frac{1}{2} A23 c_2^2 k_2^2 a_2 - \frac{1}{2} B23 (c_2 k_2 (D2D5 - 2) - c_1 k_1) (k_1 + k_2) a_2 + \frac{1}{2} a_1 A22 c_1^2 k_1^2 + 2a_1 B22 c_2 k_2^2 - (D1D4 - 1) a_1 B22 c_1 k_1 k_2 + B35 D D3 (c_1 k_1 + 2c_2 k_2) \right\}$$

$$A36 = \frac{1}{g} \left\{ \frac{1}{8} a_1 (c_1^2 D1k_1^3 + 2c_2^2 D2k_2^3) a_2^2 - \frac{1}{4} a_1 c_1 c_2 (D1 + D2) k_1 k_2 (k_1 + k_2) a_2^2 + \frac{1}{2} A24 c_2^2 k_2^2 a_2 - \frac{1}{2} B24 (c_2 k_2 (D2D6 + 2) - c_1 k_1) (k_1 - k_2) a_2 + \frac{1}{2} a_1 A22 c_1^2 k_1^2 + 2a_1 B22 c_2 k_2^2 - (D1D4 + 1) a_1 B22 c_1 k_1 k_2 + B36 D D4 (c_1 k_1 - 2c_2 k_2) \right\}$$

$$A37 = \frac{1}{g} \left\{ \frac{1}{8} a_2 (2c_1^2 D1k_1^3 + c_2^2 D2k_2^3) a_1^2 + \frac{1}{4} a_2 c_1 c_2 (D1 - D2) k_1 (k_1 - k_2) k_2 a_1^2 + \frac{1}{2} A23 c_1^2 k_1^2 a_1 - \frac{1}{2} B23 (k_1 + k_2) (c_1 k_1 (D1D5 - 2) - c_2 k_2) a_1 + 2a_2 B21 c_1 k_1^2 + \frac{1}{2} a_2 A21 c_2^2 k_2^2 - (D2D3 - 1) a_2 B21 c_2 k_1 k_2 + B37 D D5 (2c_1 k_1 + c_2 k_2) \right\}$$

$$A38 = \frac{1}{g} \left\{ \frac{1}{8} a_2 (2c_1^2 D1k_1^3 + c_2^2 D2k_2^3) a_1^2 - \frac{1}{4} a_2 c_1 c_2 (D1 + D2) k_1 k_2 (k_1 + k_2) a_1^2 + \frac{1}{2} A24 c_1^2 k_1^2 a_1 - \frac{1}{2} B24 (k_1 - k_2) (c_1 k_1 (D1D6 - 2) + c_2 k_2) a_1 + 2a_2 B21 c_1 k_1^2 + \frac{1}{2} a_2 A21 c_2^2 k_2^2 - (D2D3 + 1) a_2 B21 c_2 k_1 k_2 + B38 D D6 (2c_1 k_1 - c_2 k_2) \right\}$$

2.4 3차 속도

$$u_{(3)} = k_1 B31 \frac{\cosh k_1 (h+z)}{\sinh k_1 h} \cos k_1 (x - c_1 t) + k_2 B32 \frac{\cosh k_2 (h+z)}{\sinh k_2 h} \cos k_2 (x - c_2 t + \theta) + 3k_1 B33 \frac{\cosh 3k_1 (h+z)}{\sinh 3k_1 h} \cos 3k_1 (x - c_1 t) + 3k_2 B34 \frac{\cosh 3k_2 (h+z)}{\sinh 3k_2 h} \cos 3k_2 (x - c_2 t + \theta) + (k_1 + 2k_2) B35 \frac{\cosh (k_1 + 2k_2) (h+z)}{\sinh (k_1 + 2k_2) h} \cos [(k_1 + 2k_2) x - (c_1 k_1 + 2c_2 k_2) t + 2\theta] + (k_1 - k_2) B36 \frac{\cosh (k_1 - 2k_2) (h+z)}{\sinh (k_1 - 2k_2) h} \cos [(k_1 - 2k_2) x - (c_1 k_1 - 2c_2 k_2) t - 2\theta] + (2k_1 + k_2) B37 \frac{\cosh (2k_1 + k_2) (h+z)}{\sinh (2k_1 + k_2) h} \cos [(2k_1 + k_2) x - (2c_1 k_1 + c_2 k_2) t + \theta] + (2k_1 - k_2) B38 \frac{\cosh (2k_1 - k_2) (h+z)}{\sinh (2k_1 - k_2) h} \cos [(2k_1 - k_2) x - (2c_1 k_1 - c_2 k_2) t - \theta]$$

$$w_{(3)} = k_1 B31 \frac{\sinh k_1 (h+z)}{\sinh k_1 h} \sin k_1 (x - c_1 t) + k_2 B32 \frac{\sinh k_2 (h+z)}{\sinh k_2 h} \sin k_2 (x - c_2 t + \theta) + 3k_1 B33 \frac{\sinh 3k_1 (h+z)}{\sinh 3k_1 h} \sin 3k_1 (x - c_1 t) + 3k_2 B34 \frac{\sinh 3k_2 (h+z)}{\sinh 3k_2 h} \sin 3k_2 (x - c_2 t + \theta) + (k_1 + 2k_2) B35 \frac{\sinh (k_1 + 2k_2) (h+z)}{\sinh (k_1 + 2k_2) h} \sin [(k_1 + 2k_2) x - (c_1 k_1 + 2c_2 k_2) t + 2\theta] + (k_1 - k_2) B36 \frac{\sinh (k_1 - 2k_2) (h+z)}{\sinh (k_1 - 2k_2) h} \sin [(k_1 - 2k_2) x - (c_1 k_1 - 2c_2 k_2) t - 2\theta] + (2k_1 + k_2) B37 \frac{\sinh (2k_1 + k_2) (h+z)}{\sinh (2k_1 + k_2) h} \sin [(2k_1 + k_2) x - (2c_1 k_1 + c_2 k_2) t + \theta] + (2k_1 - k_2) B38 \frac{\sinh (2k_1 - k_2) (h+z)}{\sinh (2k_1 - k_2) h} \sin [(2k_1 - k_2) x - (2c_1 k_1 - c_2 k_2) t - \theta]$$

이상과 같이, 천수와 중에서 두개의 파가 합성하였을 경우 속도퍼텐셜, 파면의 형상, 유체입자의 유속을 삼차항까지 섭동법을 이용하여 수학적으로 표현하였다.

3. 실험방법

3.1 실험장치 및 실험조건

Fig. 1은 2차원수조에서의 PIV실험을 위한 실험장치와 데이터해석 시스템을 나타낸 것이다. 파고계와 조파기, CCD camera 간의 동기화를 시키기 위하여 레이저의 Trigger mode를 사용하

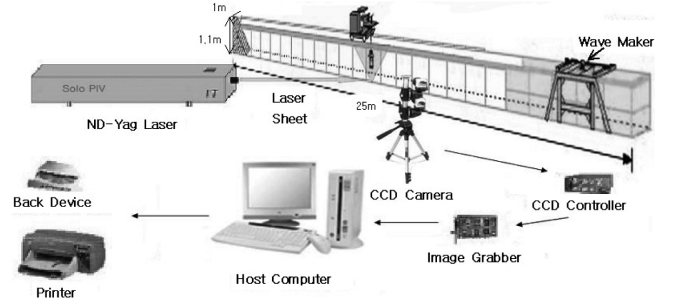


Fig. 1 PIV measuring system for the estimating the velocity field

Table 1 Experimental equipments & specification

Experimental equipments	Experimental specification
Solo PIV Nd-Yag laser	Solo laser head layout : $\lambda = 532 \text{ nm}$ Rate: 10 Hz dt: 0.001 sec
CCD-camera (Red lake mega-plusII ES2001)	Pixel size: 7.4 mm (square format) Resolution: 1600×1200 pixels (1.9 Mpixel) Active area: 11.8 mm H \times 8.9 mm V Spectral: Monochrome Bit Depth: 8 bits per color CameraLink: 30 fps Fireware: 24 fps (8 Bit monochrome)
Nikon AF 60mm 1:2.80	f 5.6
Vestosint 2157 (Polyamid12)	$57 \mu\text{m}$ 1.02 g/cm ³
Capacity type Wave height meter -Amp. (CH-608)	Channel number: 8 channel Measuring mode: $\times 1$ Calibration voltage: 1 Max. wave height measurement: 60cm
Capacity type Wave height meter -Detector (CHT4-60)	Linearity error: $\pm 0.5 \%$ /F.S Response: 30 Hz Mutual intervention : less than $\pm 0.5 \%$ (Interval of capacity line more than 5 cm)
2-D Wave tank	25 m (L) \times 1 m (W) \times 1.2 m (H) Water depth: 0.8 m
Wave maker	Piston type

였으며, 동기화를 통하여 항상 일정하게 제어된 정보를 얻어 분석하였다. 합성파를 형성하기 위한 성분파의 주파수는 각각 $\omega_1 = 6.28\text{rad/sec}$ 와 $\omega_2 = 5.71\text{rad/sec}$ 으로 이를 합성하여 생성된 파는 조파기에서 4m 떨어진 위치에서 쇄파가 발생하도록 구성하였다. 쇄파발생 위치에 용량식 파고계를 설치하여 파면의 상승량을 측정하였다.

PIV실험을 위해서 입자의 크기는 57mm, 밀도는 1.02g/cm^3 인 Vestosint 2157(Polyamid12)을 사용하였다. PIV실험을 위한 장비의 구체적인 설명은 Table 1에 나타난다. 특히, 본 실험에 사용한 시스템에서는 두 장의 이미지사이의 시간간격을 임의로 조절 가능하여 최적의 속도장을 얻을 수 있다.

4. 결과 및 해석

Fig. 2는 2성분 합성파에서 쇄파가 일어날 때 파고계로 측정된 파면상승량과 Stock's 이론계산에 의한 1차, 2차, 3차의 파형을 비교하여 나타낸 것이다. 가는 실선은 실험값, 점선은 Stock's 1차 근사값, 일점쇄선은 Stock's 2차근사값, 굵은 실선은 Stock's 3차 근사값을 나타내고, 이점쇄선은 속도퍼텐셜의 3차 근사값을 표시한 것이다. 원으로 표시한 부분은 쇄파가 일어나는 영역을 나타내고 있다.

쇄파현상은 유체흐름의 박리현상이라고 할 수 있다. 파면이 비선형적으로 상승하면서 생기는 파형의 특이형상으로 인해 파가 부서지는 것이다. 이러한 순간에는 대량의 와동이 형성되어 소멸됨으로서 에너지를 소실하게 된다. 즉 쇄파는 파정이 전진하는 파속에 비하여 유체입자의 속도가 더 크게 되어 포말을 일으키며 에너지를 소실하는 것을 말한다.

따라서 파정부분에서 파형의 실험치가 Stock's 이론값 보다 더 크게 나타나는 것은 포말이 깨지면서 용량식파고계의 센서 위쪽까지 올라가는데 기인한 것으로 판단된다.

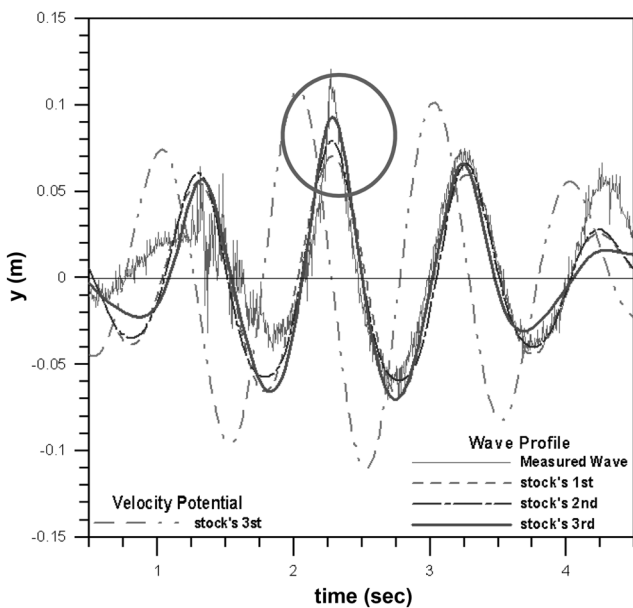


Fig. 2 Wave profile of 2-component waves in breaking status

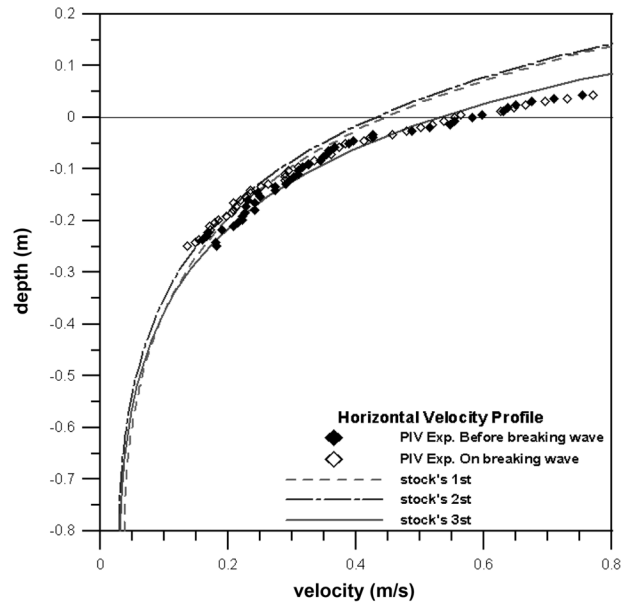
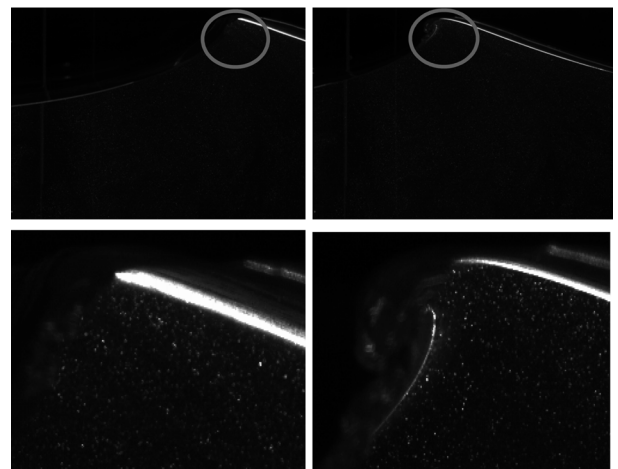


Fig. 3 Horizontal velocity profile of particle in breaking wave of 2-component waves

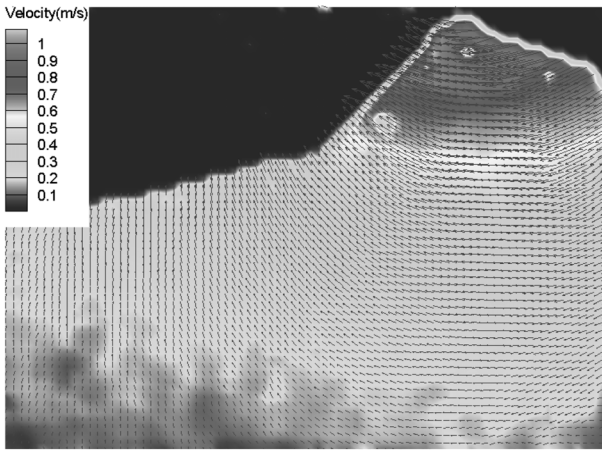
쇄파는 파장에 비하여 파고가 높게 되어 발생하므로 비선형 영향이 크게 나타나 3차 근사값이 저차 근사값보다 실험치에 가깝게 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 2성분합성파의 쇄파지점에서 수평방향 속도의 수심방향 변화를 나타낸 것이다. ◆는 쇄파가 일어나기 직전 수평방향속도의 실험값이고, ◇는 쇄파가 일어나는 순간의 실험값을 나타내고 있다. 이때 각 순간의 시간 차이는 0.1sec이다. 그리고 점선, 1점쇄선 및 실선은 Stock's 1차 근사값, 2차 근사값, 3차 근사값을 각각 나타내고 있다. 실험값이 정수면 아래부분에서는 비교적 이론값과 유사한 값을 가지나, 정수면에 가까워지면 비선형의 영향으로 속도가 이론치보다 크게 나타난다는 것을 알 수 있다. 1, 2차 계산값에 비하여 3차 계산값이 비교적 실험에 잘 일치하고 있다는 것을 보여주고 있다.

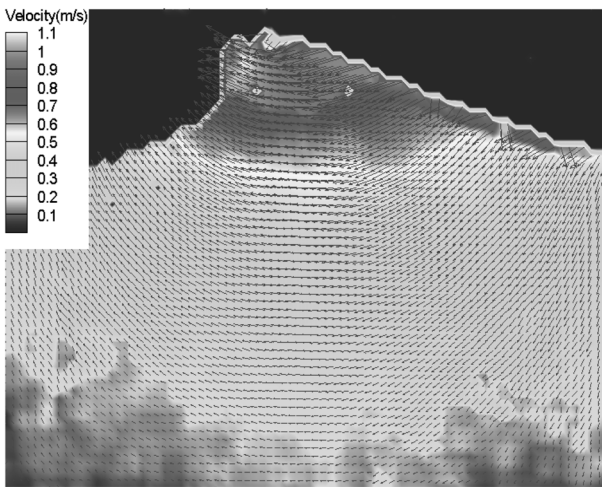


(a) Before breaking wave (b) On breaking wave

Fig. 4 Wave profile image by using PIV technique



(a) Before breaking wave



(b) On breaking wave

Fig. 5 Particle velocity distribution

Fig. 4는 PIV실험을 통하여 얻어진 이미지로 파면이 선명하게 나타나고 있다. (a)는 쇄파가 일어나기 직전의 이미지이고, (b)는 쇄파가 일어난 순간에 이미지이다. (b)의 파정부분에서는 파형이 부서져 와동이 일어나고 있는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 5는 Fig. 4의 이미지를 벡터해석 한 이미지로 속도벡터와 속도분포도를 나타내고 있다. (a)는 쇄파가 일어나기 직전의 속도분포이고, (b)는 쇄파가 일어나는 순간 속도분포를 표시하고 있다. 파정의 정점에서 수심방향의 수평속도는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 비슷한 속도분포를 가지지만, 파정의 뒷부분은 쇄파가 일어나기 직전이 쇄파 일어난 직후 보다 속도가 더 빠른 경향을 보여준다. 그리고 쇄파가 일어나기 직전 파정의 뒷부분의 속도가 빠르던 것이, 쇄파가 일어난 직후에는 파정의 앞부분의 속도가 더 빨라지는 것을 알 수 있다. 또한 파면의 상승량은 쇄파가 일어나기 직전이 쇄파가 일어난 직후에 비하여 높다. 이는 쇄파발생시 파정앞부분에서의 급격한 속도변화에 따른 와류의 생성으로 부분적인 속도장의 증가를 가져오나, 와도증가에 따른 에너지의 손실로 인하여 쇄파가 일어난 직후에 파고의 감소가 일어난다는 것을 나타낸다.

5. 결 론

본 논문에서는 2성분 합성파를 이용하여 쇄파를 생성하고 이를 PIV기법을 적용하여 쇄파현상의 유동구조를 해석할 수 있다는 것을 규명하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 이론을 적용할 경우 3차 근사값까지 고려함으로써 비교적 쇄파유동구조에 가까운 속도분포를 얻을 수 있으나, 실제 수평방향속도는 이론으로 추정하는 값보다 크게 나타난다.
- (2) 파정의 파면 상승량은 쇄파직전이 가장 높으나, 유체입자의 수평방향속도는 쇄파직후가 더 크게 된다.
- (3) 쇄파중의 구조물에 작용하는 파력을 산정할 경우 이론에 의한 값보다 실측값은 더 클 것으로 추정된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 국가지정연구실사업(R0A-2008-000-20069-0)과 Sea Grant사업(국토해양부)의 지원으로 수행된 연구 결과임.

참 고 문 헌

도덕희, 황태규, 이상준 (2007). "스테레오PIV와 스테레오PTV에 의한 선박프로펠러 후류측정", 한국가시화정보학회지, Vol 5, No 2, pp 26-32.

박종천, Hideaki, M. (1996). "2차원 진행규칙파열에서의 쇄파현상에 따른 비선형성 파의 특성에 관한 수치적 연구", 한국해양공학회지, 제10권, 제2호, pp 31-41.

이동연, 주성문, 최항순 (1996). "쇄파발생에 관한 실험적 연구", 한국해양공학회지, 제8권, 제1호, pp 37-43.

이수룡, 이병성, 강병윤 (2007). "쇄파의 유동구조 및 쇄파력에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제21권, 제1호, pp 18-24.

최제은, 조효제, 윤종성, 유명목 (2005). "PIV해석을 통한 Bichromatic Waves의 유동구조에 대한고찰", 2005년도 한국해양공학회 추계학술대회 논문집, pp 255-260.

현범수, 최경신, 도덕희 (2000). "PIV를 이용한 수중익 주위 복잡유동장의 정량적 계측", 대한조선학회지, 제37권, 제3호, pp 37-44.

Kolaini, A.R. and Tulin, M.P. (1993). "Laboratory Measurements Breaking Inception and Post-braking Dynamics of Steep Short Crested Waves", Proc. of the third ISOPE, Singapore, Vol 3, pp 45-51.

Lee, S.J., Baek, B.G. and Lee, C.M. (2005). "Phase-Averaged PTV Measurements of Propeller Wake", Journal of Ship Research, Vol 49, No 1, pp 43-54.

2009년 1월 16일 원고 접수

2009년 2월 3일 최종 수정본 채택