

공학석사 학위논문

PIV해석을 통한 bichromatic waves의
유동구조에 대한 고찰

A Study on flow structure of bichromatic waves
through PIV analysis

지도교수 조 효 제

2006년 2월

한국해양대학교 대학원

해양시스템공학과

최 제 은

本 論文을 崔暉恩의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

심 사 위 원 장 공학박사 박 명 규 (인)

심 사 위 원 공학박사 손 경 호 (인)

심 사 위 원 공학박사 조 효 제 (인)

2006년 2월

한국해양대학교 대학원

A Study on flow structure of bichromatic waves through PIV analysis

Choi Je Eun

Department of MARINE SYSTEM
Graduate School, KOREA MARITIME University

Abstract

An experimental study was carried out to understand the kinematics of bichromatic waves. The bichromatic waves are generated at the two dimensional wave tank and measured by the panorama PIV technique. The flow fields can be captured at the space by using PIV technique. We compared the profile and velocities of wave particles by the experiment with the theoretical results using Stock's 1st and 2nd waves. The wave crests and trough of the highest and lowest point of a bichromatic wave are focused in this study.

Contents

Abstract.....	I
Contents.....	II
Nomenclatures.....	IV
List of Figures.....	V
1. 서론.....	1
1.1 연구 배경.....	1
1.2 기존 연구.....	2
1.3 연구의 내용.....	3
2. 이론 해석.....	4
2.1 지배 방정식.....	4
2.2 경계 조건.....	4
2.3 Stoke 파 이론.....	7
2.3.1 Stoke's 1차 근사식.....	7
2.3.2 Stoke's 1차 근사식.....	8
3. 실험 방법.....	12
3.1 실험 기기.....	12
3.1.1 2차원 조파수조.....	12
3.1.2 용량식 파고계.....	12
3.1.3 Nd-Yag 레이저.....	13
3.1.4 CCD 카메라.....	15
3.1.5 Particle.....	15
3.2 실험방법.....	16
3.2.1 파형생성.....	16
3.2.2 유속측정.....	18

4. 파노라마-PIV 계측법의 성능 시험.....	22
4.1 linear wave.....	22
4.2 medium wave.....	24
4.3 nonlinear wave.....	26
5. 결과 및 고찰.....	28
5.1 파형 측정 결과.....	28
5.2 유속 측정 결과.....	35
6. 결론.....	45
참고문헌.....	46

Nomenclatures

ϕ	: 속도 포텐셜
$\phi_{(n)}$: n차 속도 포텐셜
u	: x축 방향의 유체입자 속도
$u_{(n)}$: n차 x축 방향의 유체입자 속도
w	: z축 방향의 유체입자 속도
P	: 유체 압력
$P_{(n)}$: n차 유체 압력
η	: 수면 변위
$\eta_{(n)}$: n차 수면 변위
ρ	: 유체 밀도
g	: 중력 가속도
h	: 수심
a_1	: 첫 번째 성분파의 파진폭
a_2	: 두 번째 성분파의 파진폭
c_1	: 첫 번째 성분파의 파속
c_2	: 두 번째 성분파의 파속
k_1	: 첫 번째 성분파의 파수
k_2	: 두 번째 성분파의 파수
θ	: 위상각
A_{2n}	: 파형이 2차 근사식 계수
B_{2n}	: 속도포텐셜의 2차 근사식 계수
H	: 파고
λ	: 파장

List of Figures

Fig.3.1.1 Schematic of 2 Dimensional Ocean Engineering Basin	12
Fig.3.1.2 Nd-yag laser 내부모습	14
Fig.3.1.3 CCD camera & image grabber board.	15
Fig.3.2.1 input signal for pure composition($w_1 = 7.5, w_2 = 6$)	16
Fig.3.2.2 input signal for forced composition ($w_1 + w_2$)	17
Fig.3.2.3 measurement point	17
Fig.3.2.4 Panorama-PIV Measuring System.	18
Fig.3.2.5 Calibration Image for Camera Characteristics-1	19
Fig.3.2.6 Calibration Image for Camera Characteristics-2	20
Fig.3.2.7 Calibration Image	20
Fig.4.1 linear wave	22
Fig.4.2 linear wave , crest	23
Fig.4.3 linear wave, trough	23
Fig.4.4 medium wave	24
Fig.4.5 medium wave, crest	25
Fig.4.6 medium wave, trough	25
Fig.4.7 nonlinear wave	26
Fig.4.8 nonlinear wave, creat	27
Fig.4.9 nonlinear wave, trough.	27
Fig.5.1 Measured Regular Wave-1($w_1 = 7.5, H = 0.044m$)	28
Fig.5.2 Measured Regular Wave-2($w_2 = 6, H = 0.048m$)	28
Fig.5.3 Wave Profile of a Bichromatic Wave using Pure Composition	29
Fig.5.4 Wave Profile of a Bichromatic Wave using Forced Composition	30
Fig.5.5 Wave Profile of a Bichromatic Wave	30
Fig.5.6 bichromatic wave의 비선형 성분	32
Fig.5.7 Coefficients of bichromatic wave($H = 0.05m$)	33

Fig.5.8 Coefficients of bichromatic wave($H=0.1m$)	33
Fig.5.9 Coefficients of bichromatic wave($H=0.15m$)	34
Fig.5.10 Coefficients of bichromatic wave($H=0.2m$)	34
Fig.5.11 Selected Point for Velocity Investigation	35
Fig.5.12 PIV image	36
Fig.5.13 Velocity Profile at 1st Crest of Pure Composition	37
Fig.5.14 Velocity Profile at 2nd Crest of Pure Composition	38
Fig.5.15 Velocity Profile at Trough of Pure Composition	38
Fig.5.16 Velocity Profile at 1st Crest of Forced Composition	39
Fig.5.17 Velocity Profile at 2nd Crest of Forced Composition	39
Fig.5.18 ($w = 7.5, w = 6$) $1volt - 1volt(4.5cm - 4.8cm)$ $H = 9.8cm$	40
Fig.5.19 ($w = 7.5, w = 6$) $1volt - 1.1volt(4.5cm - 5.6cm)$ $H = 10.3cm$	40
Fig.5.20 ($w = 7.5, w = 6$) $1.1volt - 1.1volt(5cm - 5.6cm)$ $H = 10.8cm$	41
Fig.5.21 ($w = 7.5, w = 6$) $1.1volt - 1.2volt(5cm - 6cm)$ $H = 11.2cm$	41
Fig.5.22 ($w = 7.5, w = 6$) $1.2volt - 1.2volt(5.8cm - 6cm)$ $H = 12cm$	41
Fig.5.23 ($w = 7.5, w = 6$) $1.2volt - 1.3volt(5.8cm - 6.4cm)$ $H = 13.9cm$	42
Fig.5.24 ($w = 7.5, w = 6$) $1.3volt - 1.3volt(6cm - 6.5cm)$ $H = 14.1cm$	42
Fig.5.25 ($w = 7.5, w = 6$) $1.3volt - 1.4volt(6cm - 7cm)$ $H = 13.3cm$	42
Fig.5.26 ($w = 7.5, w = 6$) $1.3volt - 1.3volt(6cm - 6.5cm)$ $H = 14.1cm$	43
Fig.5.27 Velocity Profile at Crest	44
Fig.5.28 Velocity Profile at Trough	44

1. 서 론

1.1 연구 배경

삼면이 바다로 둘러싸여 있는 우리나라는 해양선진국으로 발전하기 위해 현재 많은 곳에서 해양개발을 위한 연구와 실험을 하고 있다. 그 중 조파수조에서의 조파실험을 통한 연구에서는 각종 선형과와 비선형 불규칙과 등 많은 연구가 수행되어 왔으며 다양한 문제의 해석을 위하여 많은 방법들이 연구되었다. 그 중 실제 해역과는 다르지만 bichromatic waves에 대한 과형 및 유동구조에 대한 분석을 통하여 성분과의 간섭효과를 규명할 수가 있다. 그리하여 많은 곳에서 bichromatic waves에 대한 유동장연구와 실험을 수행하여 왔다.

유동장을 해석하는데 있어 세 가지 방법이 존재한다. 먼저 이론적인 방법으로 유동장을 해석하는 방법과 실험에 의해 유동장을 해석하는 방법, 마지막으로 전산기를 이용하여 유동장을 해석하는 방법이 있다.

이론적으로 유동장을 해석하는 방법에는 편미분방정식을 수학적으로 푸는 방법의 한계로 많은 제약이 따른다. 또한 그 결과를 검증해야 하는 과정을 거쳐야 신뢰를 가질 수 있을 것이다. 그리하여 실험에 의해 유동장을 해석하여 그 결과를 비교하는 방법이나 전산기를 이용하여 비교하여 검증한다.

본 연구에서는 실험에 의해 유동장을 해석하는 방법을 선택하였다. 입자영상 유속계(Particle Image Velocimetry - PIV)를 이용하여 유체유동장에 대하여 2차원의 속도장을 계측하여 이론적으로 해석한 결과와 비교하여 보았다.

입자영상유속계(PIV) 유동계측 기법은 정량적 가시화 기법으로서 주어진 순간에 전체 유동영역에서의 정량적 속도 데이터를 동시에 얻을 수 있다. 이러한 이유로 PIV 기술은 90년대 들어 컴퓨터와 광학이 발전하면서 급속히 성장하였으며, 현재에는 일반적인 유동계측 기법으로서 자리매김하고 있다. 최근 들어 그 기법도 다양하게 발전하고 있으며 통상적인 2차원 평면에서 2차원 속도장을

획득하는 conventional PIV에서부터 두 대의 카메라를 연결하여 넓은 영역을 측정할 수 있는 파노라마-PIV, 3차원 속도 성분을 얻을수 있는 Stereoscopic PIV 기법 등으로 나눌 수 있다. 최근 들어 PIV 기법이 보편적인 유동장 계측장비로 자리 잡아 가고 있으며 동시다점측정이라는 면에서 LDV(Laser Doppler Velocimetry), ADV(Acoustic Doppler Velocimetry) 와 차별성을 가지고 있다.

1.2 기존 연구

Hudspeth와 Sulisz(1991)는 stokes wave의 second-order을 고려한 monochromatic wave에 대한 조파실험을 하였고 Moubayed 와 Williams(1993), Schaffer(1996)에 의해 bichromatic waves 에 대한 조파실험을 하였다. 최근 비선형 슈레딩거 방정식을 이용하여 simulation하고 수조의 위치에 따라 bichromatic waves 의 파고를 측정하는 실험(Trulsen.K, Stansberg.C.T, 2001) 과 수치적으로 해석된 bichromatic wave에 대한 실험(J.Westhuis, 2001)이 수행되어 왔다.

실제 해석과는 다르지만 bichromatic waves에 대한 파형 및 유동구조에 대한 분석을 통하여 성분파의 간섭효과를 규명할 수 있다. 이런 성분파에 대한 규명을 위해 파의 유동장 측정을 위하여 레이저 도플러 유속 측정 장치(LDV)가 도입됨으로써 파랑 중 유체입자의 속도를 비교적 정확하게 측정하게 되었다 (Skjelbreia et al,1991). Kim et al.(1992)은 2차원 수조에서 생성시킨 과도 수파의 유속장 측정을 위하여 Laser Doppler anemometry(LDA)을 이용하였다. Longridge et al. (1996)역시 LDA결과를 사용하여 유체입자의 국부 및 확산가 속도를 계산하였다. 그러나 이들 측정기법들은 고정된 한 위치에서의 속도만을 얻을 수 있다는 단점이 있었다.

Swan, Bashir와 Gudmestad (2002)은 공간상의 속도장을 얻기 위하여 위치를 바꾸면서 수없이 많은 실험을 수행하였다. 하지만 시간뿐만 아니라 육체적으로 많은 노력을 해야 하는 방법이었다. 이런 방법을 해결하기 위하여 한 번의 실

힘으로 적은 에러를 가지는 공간상의 유동장을 얻을 수 있는 PIV(particle image velocimetry) 기법을 추천하고 있다.

Chang and Liu (1998)은 PIV기법을 이용하여 쇄파중의 속도와 가속도를 측정하여 보다 좋은 정도를 가져올 수 있다고 하였다. Jacobsen et al. (1997)은 이를 정상파(Standing wave)에 적용시켰고, 또한 Jensen et al. (2001)은 입자 속도의 시간 미분값을 얻기 위하여 두 개의 카메라를 사용하였다.

최근에 유동장 해석은 PIV를 이용하여 복잡한 유동장의 실시간 정량적 계측을 하고 있으며 특히 파의 비선형 유동구조를 해석하기 위해서는 PIV가 유망한 계측방법으로 여겨지고 있다.

1.3 연구의 내용

본 논문에서는 각각 다른 주파수를 가지는 두 개의 규칙파로 합성된 bichromatic wave를 2차원 수조에서 생성시켜 이들의 유동구조를 파악하기 위하여 파노라마-PIV기법을 적용하였다. 또한 포텐셜 이론에 근거한 stokes wave 이론을 bichromatic wave에 적용하여 이론계산 결과를 실험에 의한 계측결과와 비교하여 파형과 파정 및 파저에서의 속도분포를 나타내었다.

2. 이론 해석

Bichromatic wave의 유동장 해석에 있어서 이론적인 방법으로 유동장을 해석하는 방법과 실험에 의해 유동장을 해석하는 방법을 이용하여 두 개의 성분파에 대한 유동구조를 파악하기로 하였다.

먼저 이번 장에서는 이론적인 방법으로 유동장을 해석하는 방법은 Stokes 이론을 적용하여 bichromatic wave의 파형과 속도를 구하게 될 것이다. 거기에 따른 지배방정식과 경계조건 및 섭동법에 의해 2차 근사식까지 계산되는 과정을 다루었다.

2.1 지배 방정식

유체는 비점성 비압축성을 가정하고, 유동은 비회전성으로 가정하였다. 그리고 표면장력은 무시하였다. 속도 포텐셜은 유체영역 내부에서 라플라스 방정식과 베르누이 방정식을 만족해야 한다.

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} = u, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial z} = w \right) \quad (2.1)$$

$$\frac{p}{\rho} + gz + \frac{1}{2} q^2 + \frac{\partial \Phi}{\partial t} = 0 \quad (q^2 = u^2 + w^2) \quad (2.2)$$

(Φ : 속도포텐셜, x 수평방향거리, z 연직방향거리, u 수평방향유속, w 연직방향유속, p 압력, ρ : 밀도, t 시간, g 중력가속도)

2.2 경계조건

경계조건은 다음과 같이 자유표면 조건과, 압력 일정 조건, 그리고 해저면 조건을 만족하고 있다.

1) 자유표면 조건

운동학적 자유표면 경계조건(Kinematic Free Surface Boundary Condition)이라 하는데 이것은 수면변동 속도와 포텐셜에 의해 산정되는 수면의 속도 관계에 의해 규정되는데, 이것은 다음과 같이 전개 된다. 수면변동은 공간과 시간에 따라 변하기 때문에 2차원인 것을 가정하여 자유 수면을 나타내면 $F(x, z, t) = 0$ 이 되고, $F(x, z, t) = z - \eta(x, t)$ 가 되고, 즉 $z = \eta(x, t)$ 가 된다. 이때 F 의 실질미분 $dF/dt = 0$ 이 되므로 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dF}{dt} = \frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + w \frac{\partial F}{\partial z} = -\frac{\partial \eta}{\partial t} - u \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad (2.3)$$

위 식을 속도 포텐셜을 도입하여 나타내었다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad (\text{at } z = \eta) \quad (2.4)$$

2) 압력일정 조건

동역학적 자유표면 경계조건(Dynamic Free Surface Boundary Condition)이라고 하고 이는 수면의 압력과 수면과 접해있는 대기압과의 관계를 규정짓는 것으로서 베르누이 방정식으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$g\eta + \frac{1}{2} q^2 + \frac{\partial \Phi}{\partial t} = 0 \quad (\text{at } z = \eta) \quad (2.5)$$

3) 바닥 조건

자유 수면에 관한 운동학적 조건을 유도한 방법과 동일한 방법으로 해저면에 있어서 경계조건을 유도할 수 있다. $F(x, z) = z + \eta(x)$ 로서 해저면을 임의의 곡면형으로 고려하면, 이의 실질미분은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{dF}{dt} = \frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + w \frac{\partial F}{\partial z} = \frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad (2.6)$$

$\partial h / \partial t = 0$ 의 경우를 고려하고, u, w 를 속도 포텐셜로 나타내면, 다음과 같은 바닥에 관한 불투과 조건을 얻는다.

$$u \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad (z = -h) \quad (2.7)$$

위 식과같이 되고 수심의 변화가 없는 경우 $\partial h / \partial t = 0$ 이므로 위 식은 다음과 같이 간략화 된다.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad (\text{at } z = -h) \quad (2.8)$$

섭동법에 의해 속도 포텐셜 및 파형을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Phi = \varepsilon \Phi_{(1)} + \varepsilon^2 \Phi_{(2)} + \varepsilon^3 \Phi_{(3)} + \varepsilon^4 \Phi_{(4)} + \dots \quad (2.9)$$

$$\eta = \varepsilon \eta_{(1)} + \varepsilon^2 \eta_{(2)} + \varepsilon^3 \eta_{(3)} + \varepsilon^4 \eta_{(4)} + \dots \quad (2.10)$$

$$u = \varepsilon u_{(1)} + \varepsilon^2 u_{(2)} + \varepsilon^3 u_{(3)} + \varepsilon^4 u_{(4)} + \dots \quad (2.11)$$

$$P = P_0 + \varepsilon P_{(1)} + \varepsilon^2 P_{(2)} + \varepsilon^3 P_{(3)} + \varepsilon^4 P_{(4)} + \dots \quad (2.12)$$

$$P_0 = \rho g z \quad (2.13)$$

(2.4), (2.5) 식을 이용하여 $z=0$ 일 때, 테일러 급수 전개로 비선형 자유표면 조건과 압력일정 조건을 전개한다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \left[u \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right]_{z=0} + \eta \left[-\frac{\partial}{\partial z} \left(u \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) \right]_{z=0} + \frac{1}{2!} \eta^2 \left[-\frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(u \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) \right]_{z=0} + \dots = 0 \quad (2.14)$$

$$g + \left[\frac{1}{2} \varphi^2 + \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right]_{z=0} + n \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{2} \varphi^2 + \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right) \right]_{z=0} + \frac{1}{2!} n^2 \left[\frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(\frac{1}{2} \varphi^2 + \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right) \right]_{z=0} + \dots = 0 \quad (2.15)$$

2.3 Stoke파 이론

1847년에 Stokes는 보다 엄밀한, 비선형 경계조건을 이용하여 2차원 규칙파의 속도 포텐셜을 유도하고, 이로부터 파형의 식을 구하였다. 이론 전개 시에 섭동법(perturbation method)을 이용하고 있기 때문에, 원리적으로는 충분히 많은 수의 항들을 취함으로써 원하는 만큼 정밀하게 파형의 식을 표시할 수 있다. 그러나 실용적 면에서는 Stokes의 2차 근사식까지 사용하더라도 만족스러운 결과를 얻을 수 있다. 실제 Sin파에 비해서 파정 부분이 뽀족하며 실제 바다의 파도와 가깝다고 할 수 있다.

그리하여 본 논문에서는 무한 수심을 가정하였을 때, Stokes 2차 근사식까지 계산하여 bichromatic waves의 파형과 속도를 계산하였다.

2.3.1 Stoke's 1차 근사식

두 개의 성분파를 합성시키므로써 bichromatic waves에 대한 속도 포텐셜 및 파형과 속도를 구할 수 있다. 다음은 stoke's 1차 근사식에 대한 속도 포텐셜과 파형, 속도를 구하는 식은 다음과 같다.

a) 속도 포텐셜

$$\Phi_{(1)} = a_1 c_1 \frac{\cosh k_1(l+z)}{\sinh k_1 h} = \sin k_1(x - c_1 t) + a_2 c_2 \frac{\cosh k_2(l+z)}{\sinh k_2 h} \sin k_2(x - c_2 t) \quad (2.16)$$

b) 파형

$$\eta_{(1)} = a_1 \cos k_1(x - c_1 t) + a_2 \cos k_2(x - c_2 t) \quad (2.17)$$

$$c_1^2 = \frac{g}{k_1} \tanh k_1 h, \quad c_2^2 = \frac{g}{k_2} \tanh k_2 h \quad (k_1, k_2 > 0)$$

c) 속도

x방향의 속도는 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$u = a_1 c_1 k_1 \frac{\cosh k_1(h+z)}{\sinh k_1 h} \cos k_1(x - c_1 t) + a_2 c_2 k_2 \frac{\cosh k_2(h+z)}{\sinh k_2 h} \cos k_2(x - c_2 t + \Theta) \quad (2.18)$$

z방향의 속도는 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$w = a_1 c_1 k_1 \frac{\sinh k_1(h+z)}{\sinh k_1 h} \sin k_1(x - c_1 t) + a_2 c_2 k_2 \frac{\sinh k_2(h+z)}{\sinh k_2 h} \sin k_2(x - c_2 t + \Theta) \quad (2.19)$$

2.3.2 Stoke's 2차 근사식

자유표면 조건과 압력일정 조건에 대하여 비선형성을 고려한 stoke's 2차 근사식은 다음과 같이 계산 되었다.

$$\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} (q\omega)^2 + \frac{\partial^2 \Phi_{(2)}}{\partial t^2} + \frac{\partial \eta_{(1)}}{\partial t} \frac{\partial^2 \Phi_{(1)}}{\partial x \partial t} + \quad (2.20)$$

$$\eta_{(1)} \frac{\partial^2 \Phi_{(1)}}{\partial x \partial t} - \left[g \frac{\partial \Phi_{(1)}}{\partial x} \frac{\partial \eta_{(1)}}{\partial x} - g \frac{\partial \Phi_{(2)}}{\partial z} - g \eta_{(1)} \frac{\partial^2 \Phi_{(1)}}{\partial z^2} \right] = 0 \quad (at \ z=0)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial^2 \Phi_{(2)}}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi_{(2)}}{\partial z} \right)_{z=0} = & \left[-n_{(1)} \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\partial^2 \Phi_{(1)}}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi_{(1)}}{\partial z} \right] \right. \\ & \left. - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} (g_{(1)})^2 - \frac{\partial n_{(1)}}{\partial t} \frac{\partial^2 \Phi_{(1)}}{\partial x \partial t} + g \frac{\partial \Phi_{(1)}}{\partial x} \frac{\partial n_{(1)}}{\partial x} \right]_{z=0} \end{aligned} \quad (2.21)$$

a) 속도포텐셜

$$\begin{aligned} \Phi_{(2)} = & \mathcal{B}1 \cdot \frac{\cosh 2k_1(h+z)}{\sinh 2k_1 h} \sin 2k_1(x-c_1 t) + \mathcal{B}2 \cdot \frac{\cosh 2k_2(h+z)}{\sinh 2k_2 h} \sin 2k_2(x-c_2 t) \quad (2.22) \\ & + \mathcal{B}3 \cdot \frac{\cosh(k_1+k_2)(h+z)}{\sinh(k_1+k_2)h} \sin[(k_1+k_2)x - (c_1 k_1 + c_2 k_2)t] \\ & + \mathcal{B}4 \cdot \frac{\cosh(k_1-k_2)(h+z)}{\sinh(k_1-k_2)h} \sin[(k_1-k_2)x - (c_1 k_1 - c_2 k_2)t] + const. t \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{B}1 = & \frac{-\frac{3}{2} a_1^2 c_1^3 k_1^3 (\mathcal{D}^2 - 1)}{-4c_1^2 k_1^2 \cdot \mathcal{B} + 2gk_1} & \mathcal{B}2 = & \frac{-\frac{3}{2} a_2^2 c_2^3 k_2^3 (\mathcal{D}^2 - 1)}{-4c_2^2 k_2^2 \cdot \mathcal{D} + 2gk_2} \\ \mathcal{B}3 = & \frac{a_1 a_2 c_1 c_2 k_1 k_2 (c_1 k_1 + c_2 k_2)(1 - \mathcal{D} \cdot \mathcal{D}) - \frac{1}{2} a_1 a_2 c_1^3 k_1^3 (\mathcal{D}^2 - 1) - \frac{1}{2} a_1 a_2 c_2^3 k_2^3 (\mathcal{D}^2 - 1)}{-(c_1 k_1 + c_2 k_2)^2 \cdot \mathcal{B} + g(k_1 + k_2)} \\ \mathcal{B}4 = & \frac{a_1 a_2 c_1 c_2 k_1 k_2 (c_1 k_1 - c_2 k_2)(1 + \mathcal{D} \cdot \mathcal{D}) - \frac{1}{2} a_1 a_2 c_1^3 k_1^3 (\mathcal{D}^2 - 1) + \frac{1}{2} a_1 a_2 c_2^3 k_2^3 (\mathcal{D}^2 - 1)}{-(c_1 k_1 - c_2 k_2)^2 \cdot \mathcal{B} + g(k_1 - k_2)} \\ const. t = & -\frac{1}{4} a_1^2 c_1^2 k_1^2 (\mathcal{D}^2 - 1) - \frac{1}{4} a_2^2 c_2^2 k_2^2 (\mathcal{D}^2 - 1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\mathcal{D} = \coth k_1 h, \mathcal{D} = \coth k_2 h, \mathcal{B} = \coth 2k_1 h, \mathcal{D} = \coth 2k_2 h, \\ \mathcal{B} = \coth(k_1 + k_2)h, \mathcal{B} = \coth(k_1 - k_2)h) \end{aligned}$$

b) 파형

$$\eta_{(2)} = \mathcal{A}1 \cdot \cos 2k_1(x - c_1 t) + \mathcal{A}2 \cdot \cos 2k_2(x - c_2 t) + \mathcal{A}3 \cdot \cos[(k_1 + k_2)x - (c_1 k_1 + c_2 k_2)t] + \mathcal{A}4 \cdot \cos[(k_1 - k_2)x - (c_1 k_1 - c_2 k_2)t] \quad (2.23)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{A}1 &= \frac{1}{g} [2c_1 k_1 \cdot \mathcal{B}1 \cdot \mathcal{B} + \frac{1}{2} a_1^2 c_1^2 k_1^2 - \frac{1}{4} a_1^2 c_1^2 k_1^2 (\mathcal{D}^2 - 1)] \\ \mathcal{A}2 &= \frac{1}{g} [2c_2 k_2 \cdot \mathcal{B}2 \cdot \mathcal{D} + \frac{1}{2} a_2^2 c_2^2 k_2^2 - \frac{1}{4} a_2^2 c_2^2 k_2^2 (\mathcal{D}^2 - 1)] \\ \mathcal{A}3 &= \frac{1}{g} [(c_1 k_1 + c_2 k_2) \cdot \mathcal{B}3 \cdot \mathcal{B} + \frac{1}{2} a_1 a_2 (c_1^2 k_1^2 + c_2^2 k_2^2) - \frac{1}{2} a_1 a_2 c_1 c_2 k_1 k_2 (\mathcal{D} \cdot \mathcal{D} - 1)] \\ \mathcal{A}4 &= \frac{1}{g} [(c_1 k_1 - c_2 k_2) \cdot \mathcal{B}4 \cdot \mathcal{B} + \frac{1}{2} a_1 a_2 (c_1^2 k_1^2 + c_2^2 k_2^2) - \frac{1}{2} a_1 a_2 c_1 c_2 k_1 k_2 (\mathcal{D} \cdot \mathcal{D} + 1)] \end{aligned}$$

c) 속도

x방향의 속도는 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} u = a_1 c_1 k_1 \frac{\cosh k_1(h+z)}{\sinh k_1 h} \cos k_1(x - c_1 t) + a_2 c_2 k_2 \frac{\cosh k_2(h+z)}{\sinh k_2 h} \cos k_2(x - c_2 t + \Theta) \quad (2.24) \\ + 2k_1 \mathcal{B}1 \cdot \frac{\cosh 2k_1(h+z)}{\sinh 2k_1 h} \cos 2k_1(x - c_1 t) \\ + 2k_2 \mathcal{B}2 \cdot \frac{\cosh 2k_2(h+z)}{\sinh 2k_2 h} \cos 2k_2(x - c_2 t + \Theta) \\ + (k_1 + k_2) \mathcal{B}3 \cdot \frac{\cosh(k_1 + k_2)(h+z)}{\sinh(k_1 + k_2)h} \cos[(k_1 + k_2)x - (c_1 k_1 + c_2 k_2)t + \Theta] \\ + (k_1 - k_2) \mathcal{B}4 \cdot \frac{\cosh(k_1 - k_2)(h+z)}{\sinh(k_1 - k_2)h} \cos[(k_1 - k_2)x - (c_1 k_1 - c_2 k_2)t - \Theta] \end{aligned}$$

z방향의 속도는 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
u = & a_1 c_1 k_1 \frac{\sinh k_1 (h+z)}{\sinh k_1 h} \sin k_1 (x - c_1 t) + a_2 c_2 k_2 \frac{\sinh k_2 (h+z)}{\sinh k_2 h} \sin k_2 (x - c_2 t + \Theta) \quad (2.25) \\
& + 2k_1 \mathcal{B}1 \cdot \frac{\sinh 2k_1 (h+z)}{\sinh 2k_1 h} \sin 2k_1 (x - c_1 t) \\
& + 2k_2 \mathcal{B}2 \cdot \frac{\sinh 2k_2 (h+z)}{\sinh 2k_2 h} \sin 2k_2 (x - c_2 t + \Theta) \\
& + (k_1 + k_2) \mathcal{B}3 \cdot \frac{\sinh (k_1 + k_2) (h+z)}{\sinh (k_1 + k_2) h} \sin [(k_1 + k_2)x - (c_1 k_1 + c_2 k_2)t + \Theta] \\
& + (k_1 - k_2) \mathcal{B}4 \cdot \frac{\sinh (k_1 - k_2) (h+z)}{\sinh (k_1 - k_2) h} \sin [(k_1 - k_2)x - (c_1 k_1 - c_2 k_2)t - \Theta]
\end{aligned}$$

이렇게 구한 stokes wave의 1차 근사식과 2차 근사식을 이용하여 wave의 비선형성까지 계산할 수 있고, 수심에 따른 유속도 계산할 수 있다.

3. 실험 방법

Bichromatic waves에 대한 유동장을 해석하는 실험적 방법은 2차원 조파수조에서 wave를 생성시켜 PIV를 통하여 공간적인 유동장을 촬영하여 속도를 구할 수 있다. 그리하여 실제적인 선형파와 비선형파에 대한 유동구조를 눈으로 직접 확인하고 규명할 수 있을 것이다.

3.1 실험기기

3.1.1 2차원 조파수조

본 실험에 사용된 수조는 Fig.3.1에 나타낸 바와 같이 $25\text{m} \times 1.0\text{m} \times 0.8\text{m}$ ($L \times B \times D$)의 조파수조로 조파기(wave maker)는 피스톤형식으로 파형생성가능한 주파수범위(frequency range)는 0.5/s에서 2.0/s , 파고생성가능 범위는 약 0.07m에서 0.22m 까지 생성가능하다. 그리고 다종의 선형파는 물론이고 ISSC, ITTC, JONSWAP 등을 적용한 불규칙파형이 생성가능하다.

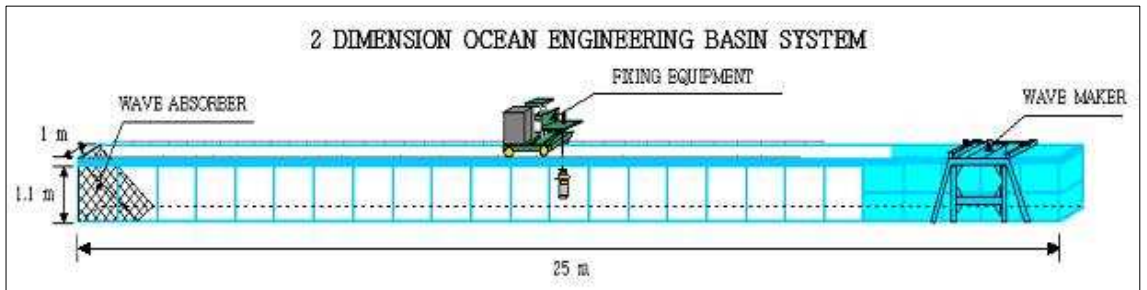


Fig.3.1.1 Schematic of 2 Dimensional Ocean Engineering Basin

3.1.2 용량식 파고계(capacity type wave height meter)

Bichromatic wave는 두 개의 성분파가 합성되는 위치에서 갑작스런 파고가 증가에도 정확하게 파형을 측정할 수 있는 용량식 파고계를 사용하여 파형을 측

정하였다. 용량식 파고계는 물의 전기를 띠는 성질을 이용하여 측정하는 장비이며, 측정원리는 수중으로 부터 해면상에 연직으로 설치되어 있는 전선과 유체 사이의 전기적 용량이 수위의 상하에 따라서 변화하는 것을 기초로 한다. 장점은 출력 값의 대한 선형성과 응답성이 좋다는 것이다. 단점으로는 여러 대의 파고계를 근접하여 관측할 경우 상호간섭이 생겨 관측 값에 오차가 생길 수 있으며 케이블의 길이에 한계가 있을 수 있으며 유체에 대한 저항이 나쁘게 되면 관측 값이 달라질 수 있다는 것이다. 본 실험에서는 한 대의 파고계를 설치하여 파고를 관측하였기 때문에 여러 대의 파고계에 대한 오차는 고려하지 않았다.

3.1.3 Nd-Yag 레이저 ($\lambda=532\text{nm}$)

레이저는 고에너지 밀도를 갖는 단색광을 방출시키는 능력이 있기 때문에 PIV에서 자주 사용된다. 또한 레이저광은 파장이나 색체의 일탈이 없이 추적 입자를 조사하거나 기록하기 위한 단면광을 쉽게 생성시킬 수 있다. 2차원의 경우에는 두께 1~3mm 전후의 시트라이트가 필요하다. 광원으로서 2차원의 시트라이트를 제공하기 위한 가시광 레이저(Ar-Ion 레이저, Nd-Yag 레이저 등)가 효과적이다. 따라서 본 실험에서는 유동계측의 경우 미소시간간격을 확보하기 위하여 조명의 펄스제어가 쉽게 조절 가능한 Nd-Yag 레이저를 사용하였다.

ND-Yag(Neodymium-Yttrium Aluminum Garnet) Laser는 빔이 Nd^{3+} 이온에 의하여 생성되는 고체상태의 레이저이며, PIV에 있어서 가장 중요한 레이저이다. Nd^{3+} 이온은 다양한 주 소재(host materials)에 병합될 수 있다. 레이저 응용을 위해서는 보통 YAG크리스탈(yttrium-aluminum-garnet)이 사용된다. Nd-YAG 레이저는 고증폭성을 가지고 있으며, 기계적인 성질과 온도속성이 훌륭하다. 여기는 얻은 에너지 밴드에 있어서 광학적인 펌핑과 상위 레이저 레벨로의 비방사전이(nonradiative transition)에 의하여 얻어진다.

Nd-YAG 레이저는 비교적 낮은 레이저 임계(low laser threshold)의 이점을 갖는 4-레벨 시스템이다. 일상적인 작동온도에서 Nd-YAG 레이저는 단지 가장 강한 파장, 1064nm를 방사한다. 완화모드에서 임계에 도달하자마자 레이저 캐비

티의 설계에 의존하는 임계치에 따라 집단(폭발적인) 반전이 일어나는 식으로 플래쉬 램프의 펌프 펄스 동안 수많은 연속적인 펄스를 얻을 수 있게 된다. 캐비티 안쪽에 양질의 스위치(Q-switch)를 포함시킴으로서 트리거모드에서 레이저를 작동시킬 수 있다. Q-스위치는 광학 캐비티의 공명특성을 바꾸는 효과를 가지고 있으며 플래쉬 램프 사이클 동안 캐비티가 최대 에너지 포인트에서 공명하도록 허용하면서 Q-스위치가 작동되면 강력한 레이저펄스, 소위 자이언트 펄스를 얻을 수 있다. Q-스위치 모드가 일반적으로 보다 흥미로우며 PIV에서 자주 사용된다. Q-스위치가 하나의 공명기로부터 하나 이상의 자이언트 펄스를 생성하기 위하여 사용될 수 있을 지라도 PIV용 레이저는 이중진동계(double-oscillator systems)로서 흔히 설계된다. 이것은 펄스강도에 상관없이 추적 입자의 두 개의 조명 사이의 분리시간을 사용자가 조정하는 것이 가능하게 한다. PIV와 다른 많은 응용을 위하여 1064nm의 기본적인 파장은 특수한 크리스탈을 사용하여 배가된 주파수(frequency-doubled)이다. 배가된 주파수 부분의 분리 후에 원래의 빛 에너지의 약 1/3을 532nm에서 이용가능하다. Nd-YAG 레이저는 대개 반복모드에서 구동된다. 레이저 공동의 광학적 성질은 온도변화에 따라서 바뀌기 때문에 품질이 좋으면서 균일한 빔의 성질은 단지 액면의 광학적 성질은 온도변화에 따라서 바뀌기 때문에 품질이 좋으면서 균일한 빔의 성질은 단지 액면의(nominal)의 반복율과 플래쉬 램프 전압에서 얻을 수 있다.

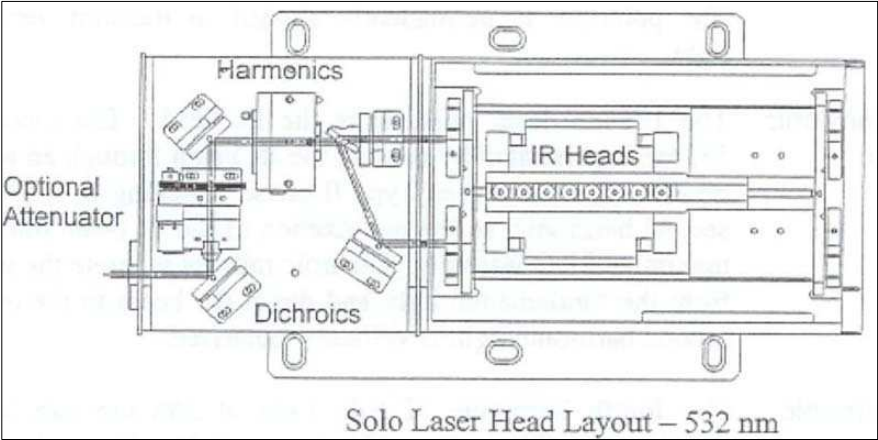


Fig.3.1.2 Nd-yag laser 내부모습

3.1.4 CCD 카메라

본 실험에서 사용한 카메라는 고화질의 CCD 카메라로 Red lake(mega plus II Es2001)제품으로 1600×1200 pixel 의 크기로 촬영된다. 촬영 시 사용한 렌즈는 Nikon, 52mm lens를 사용하였고 이미지보드를 통하여 컴퓨터로 저장되었다. 일반적으로 이미지보드라고 하며, CCD카메라를 통해 나타나는 영상신호(아날로그 신호)를 샘플당 정의된 비트로 디지털화 하여 PC가 처리할 수 있는 신호로 바꾸어 주는 영상장비로 PIV에서 사용하는 frame grabber는 공간해상도와 유동장의 해석에 초점을 두고 선택한다.

3.1.5 Particle

유체 및 계측속도의 범위에 따라서 입자를 선정하여야 하며, 입자와 유체의 밀도를 가능한 한 일치시켜 추종성(traceability)을 확보하여야 한다. 저속유체의 경우에는 주변의 온도변화에 따른 입자의 미소한 밀도차이가 추종성에 큰 영향을 미칠 수 있으며 입자의 주입에 따른 이상 유동특성 또는 초기 교란 상태를 억제하여야 한다.

본 실험에서 사용한 입자는 폴리스티렌 구형입자로 직경 $50\mu\text{m}$, 1.016 g/cm^3 인 아주 미소한 크기와 물과 비슷한 비중으로 된 입자를 사용하였다.



Fig.3.1.3 CCD camera & image grabber board

3.2 실험 방법

3.2.1 파형생성

본 논문에서는 bichromatic wave 생성을 위하여 두 가지 방법을 사용하였다. 각각 다른 주파수를 가지는 성분파를 합성시키는 방법으로 첫번째는 먼저 위상 속도가 느린 성분파를 생성시키고 이어서 위상속도가 빠른 성분파를 생성시켜 특정위치에서 두 성분파가 순수하게 합성되도록 하였다. 두번째로 조파기에 전송하는 신호자체를 미리 합성시킴으로써 수조 전역에 합성파를 생성시키는 것이다.

이와 같이 두 가지 생성법을 사용한 이유는 순수하게 자연 합성되는 경우와 강제합성을 할 경우를 비교하여 유동구조가 어떻게 달라지는지 규명하기 위한 것이다. Fig.3.2.1은 두 개의 주파수 ($w_1=7.5$, $w_2=6$)를 가지는 규칙 성분파를 첫 번째 방법을 이용한 bichromatic wave 생성을 위한 조파기 전송용 입력신호를 나타낸다.

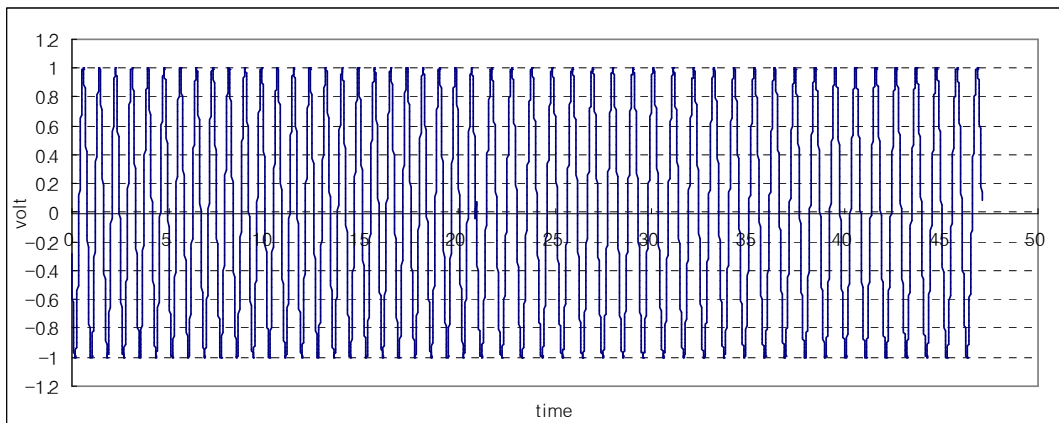


Fig.3.2.1 input signal for pure composition ($w_1=7.5, w_2=6$)

이와 같이 보낸 신호로 생성된 wave는 일정위치에서 두 개의 wave가 합성되어 bichromatic wave가 생성되면 파고계로 측정된 파형으로부터 두 개파의 위상차를 추정할 수 있다. 그리고 합성되는 위치에 두 대의 카메라를 설치하였고 넓은 범위의 유동장을 관측하기 위하여 파노라마-PIV기법을 이용하여 유동장 계

측을 수행하였다.

Fig.3.2.2는 두 번째 방법을 통한 bichromatic wave 생성을 위하여 조파기에 전달하는 신호자체에 두 가지 주파수성분 ($w_1=7.5$, $w_2=6$)을 합성한 입력신호를 나타내고 있다. 여기서는 조파기에서 15m 떨어진 곳에서 먼저 파고계로 수면변위를 측정하고, 측정된 파형 분석을 통해 첫 번째 방법과 동일한 위상을 가지는 파형을 찾는다. 찾아진 위상에서의 합성파에 대하여 첫 번째와 마찬가지로 파노라마-PIV 실험을 통하여 유동장을 측정한다.

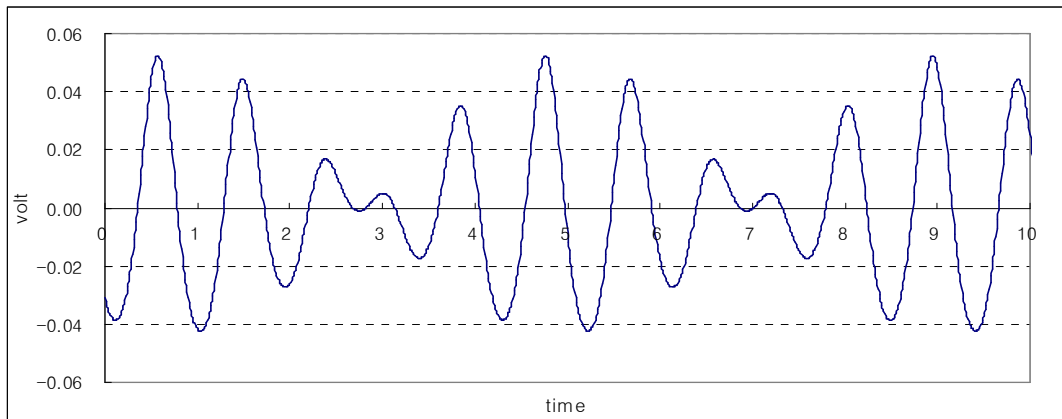


Fig.3.2.2 input signal for forced composition ($w_1 + w_2$)

본 실험은 Fig.3.2.3과 같이 조파기에서 15m 떨어진 곳에서 용량식 파고계를 이용하여 bichromatic wave의 파형을 측정하였다. 여기서 사용한 각주파수 ($w_1=7.5$, $w_2=6$)는 여러 주파수를 사용하여 조파수조의 길이와 위상속도와의 관계에서 가장 적절하게 bichromatic wave를 잘 표현할 수 있는 것을 선택

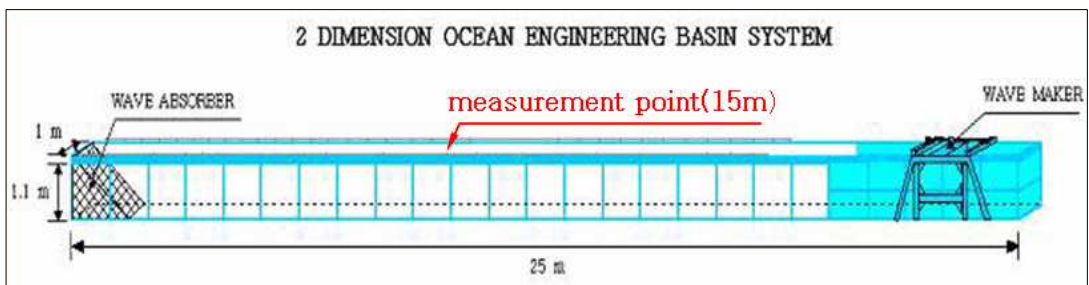


Fig.3.2.3 measurement point

한 것이다. 그 중 $\Delta w=1.5$ 일 경우 bichromatic wave가 15m 지점에서 적절하게 합성되는 것을 찾을 수 있었고, 첫 번째로 $w_1=8$, $w_2=6.5$ 일 경우와 두 번째로 $w_1=7.5$, $w_2=6$ 일 경우 두 가지로 줄일 수 있었다. 이때 $w_1=7.5$, $w_2=6$ 일 경우 이론치와 거의 유사한 wave가 생성되는 것을 확인할 수가 있었고 본 실험에서는 $w_1=7.5$, $w_2=6$ 를 사용하였다.

3.2.2 유속 측정

유속측정에 사용되는 PIV계측 시스템은 Fig.3.2.4처럼 나타난 바와 같이 구성하였다.

PIV기법을 이용한 유속측정을 위하여 사용된 입자는 폴리스티렌 구형입자로 $50\mu m$, $1,016 g/cm^3$ 이며 사용된 레이저는 ND-Yag Laser로 trigger mode로 출력되어 Laser sheet가 생성된 부분을 고화질CCD카메라(Nikon, 1K*1K, 52mm lens)로 촬영하고 촬영된 이미지는 PIV해석프로그램(Thinkers)을 통하여 속도장이

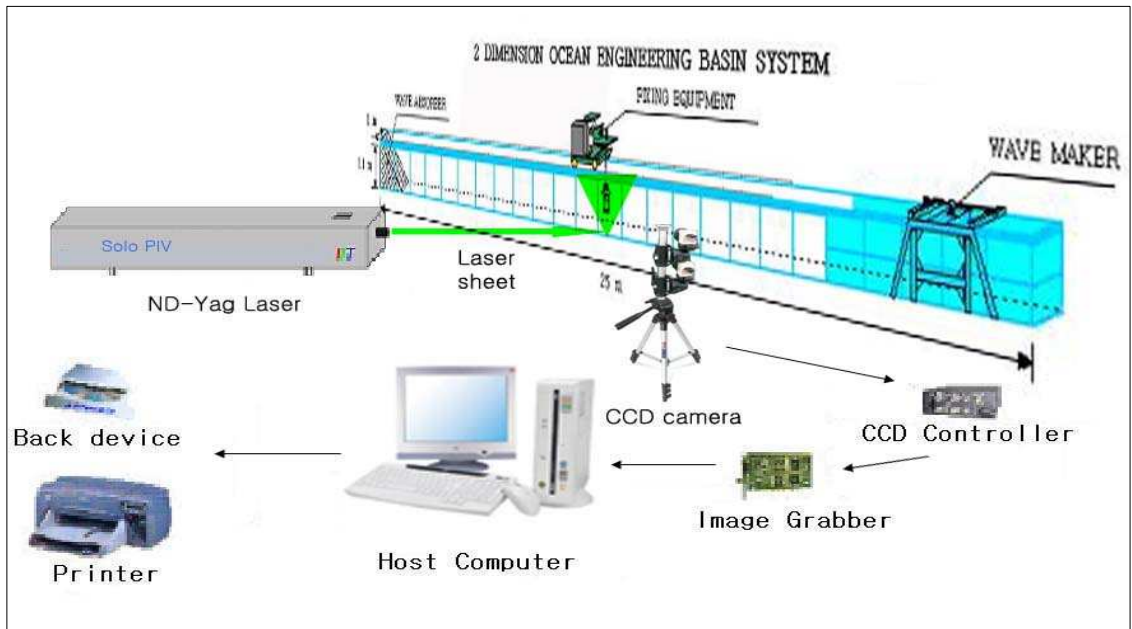
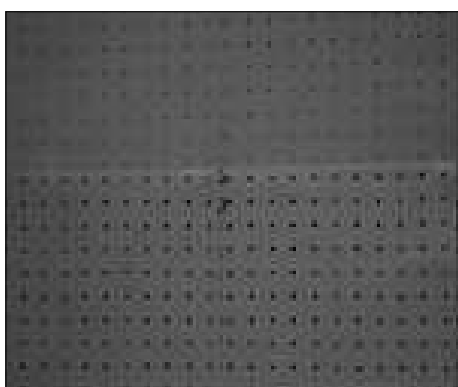


Fig.3.2.4 Panorama-PIV Measuring System

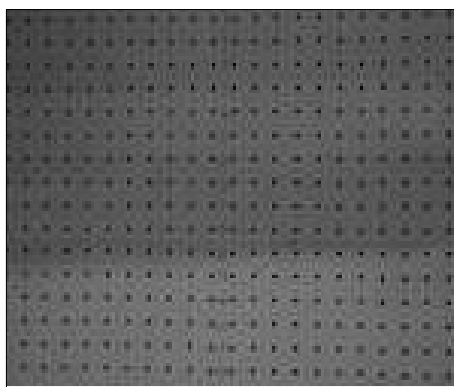
계산된다. 파노라마-PIV는 Fig.3.2.4에서 보는 것처럼 세로방향으로 두 카메라를 설치하여 촬영된 이미지를 연결하여 해석하는 방법이다.

본 실험에서 파노라마-PIV 기법을 선택한 이유는 비선형 파고와 수심에 따른 속도를 측정하기 위해서 넓은 영역에 대한 정보를 얻기 위해서이다. 정확한 해석결과를 주기 위해서는 먼저 각각의 카메라에 대한 정보가 필요하기 때문에 교정판을 사용하여 두 카메라 영상을 촬영하고, 이를 이용하여 카메라에 대한 상대적 위치와 카메라렌즈의 특성량을 산정한다.

다음 측정된 화상은 mapping function을 이용하여 영상변환을 하고 이로부터 하나의 image로 생성시키고 생성된 image로 상호상관 PIV기법을 이용하여 2차원 속도벡터를 구하게 된다. PIV 계측에 있어 속도장 측정 원리는 주어진 시간 간격에 대하여 유동장에 삽입된 입자의 변위를 측정함으로써 속도를 구하는 방법이다. 입자의 변위를 구하는 방법으로 상호상관(cross-correlation)계수에 의한 입자추적 기법을 사용한다. 이 과정에서 여러 가지 원인에 의해 속도벡터에 오차가 발생할 수 있는데 대표적으로 연속된 두 영상에서 입자정보의 부족할 경우 오차는 많이 난다. 따라서 충분한 입자를 넣어서 실험해야 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이다. Fig.3.2.5는 각 카메라에 대한 정보를 얻기 위해 calibration용 사진이다.

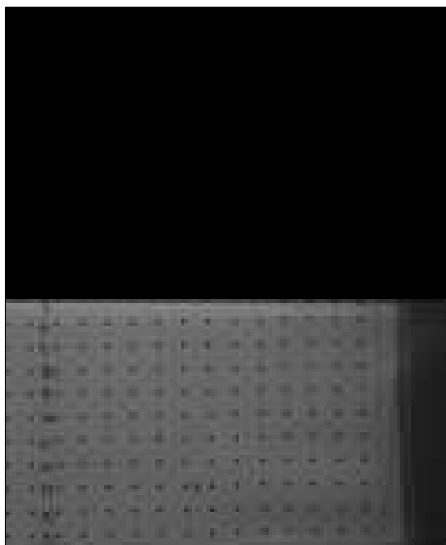


(a)camera 1

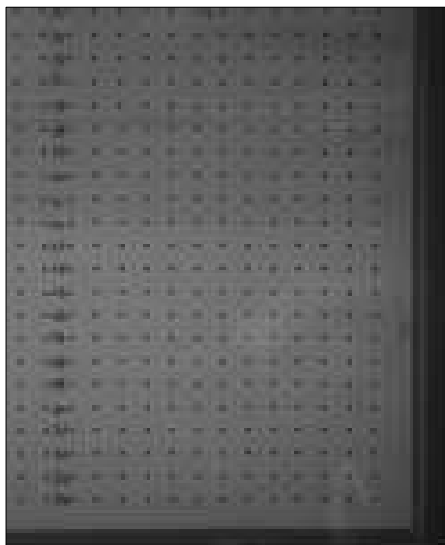


(b)camera 2

Fig.3.2.5 Calibration Image for Camera Characteristics-1



(a)camera 1



(b)camera 2

Fig.3.2.6 Calibration Image for Camera Characteristics-2

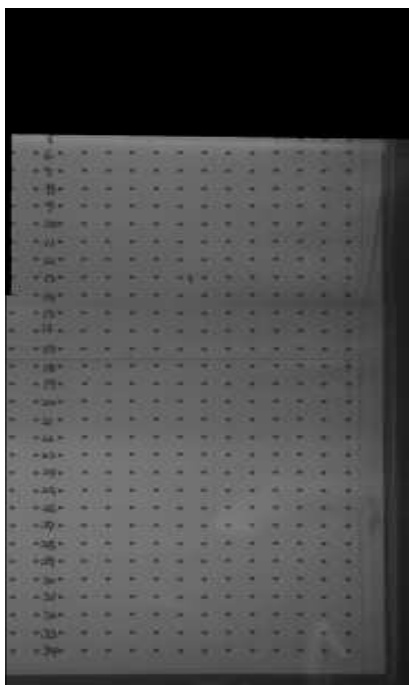


Fig.3.2.7 Calibration Image

본 실험에서는 측정영역을 확장시키기 위해 Fig.3.2.6처럼 카메라를 세로로 세워서 촬영을 하였다. 각각 촬영된 calibration 이미지를 mapping function을 이용하여 완성된 calibration 이미지는 Fig.3.2.7과 같다. 이렇게 하나의 이미지로 바뀐 영상을 통하여 2차원 속도벡터를 구한다.

4. 파노라마-PIV 계측법의 성능 시험

본 실험에 앞서 파노라마-PIV 계측법에 대한 성능 실험을 하여 보았다. 실제적으로 계산된 결과값과 측정된 결과값을 비교하여 과연 어느 정도의 정확성을 가지고 있는지 검증한 것이다.

규칙파에 대한 linear wave와 nonlinear wave에 대하여 각각의 이론계산과 파노라마-PIV 실험을 통해 구해진 속도값을 비교해 보았다.

4.1 linear wave

$w=6$, 파고는 0.048m인 규칙파에 대한 속도를 파노라마-PIV 기법을 이용하여 측정하였다. 파고 대 파장비는 0.028 로써 linear한 규칙파 이다.

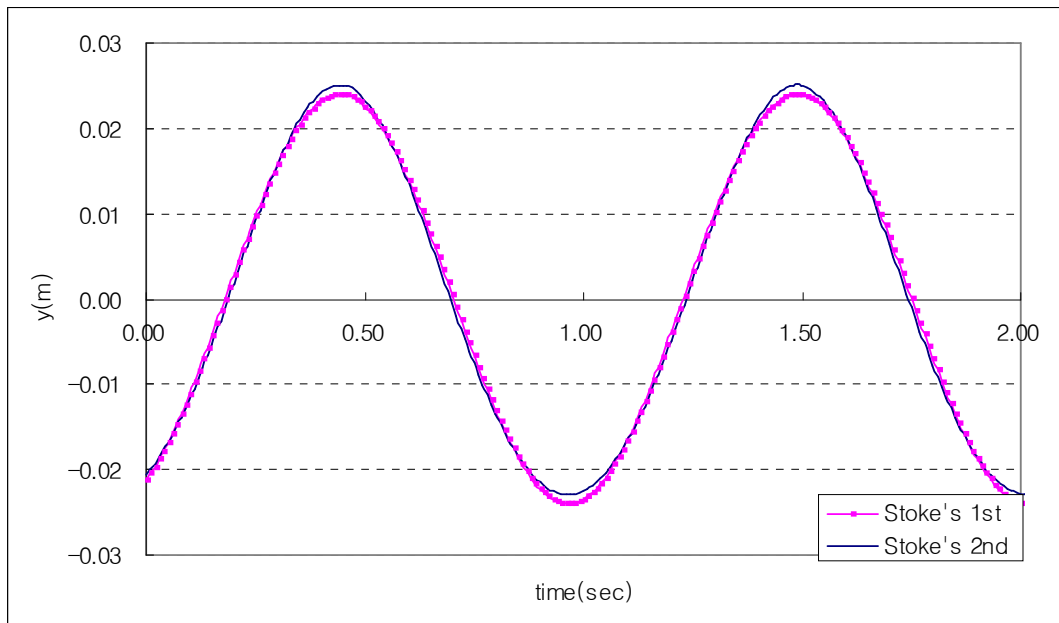


Fig.4.1 linear wave

파형을 그려보면 first order과 second order는 약 0.001m의 미소한 차이를 가지고 있었으며 거의 동일한 파형을 나타내고 있는 것을 확인 할 수가 있다.

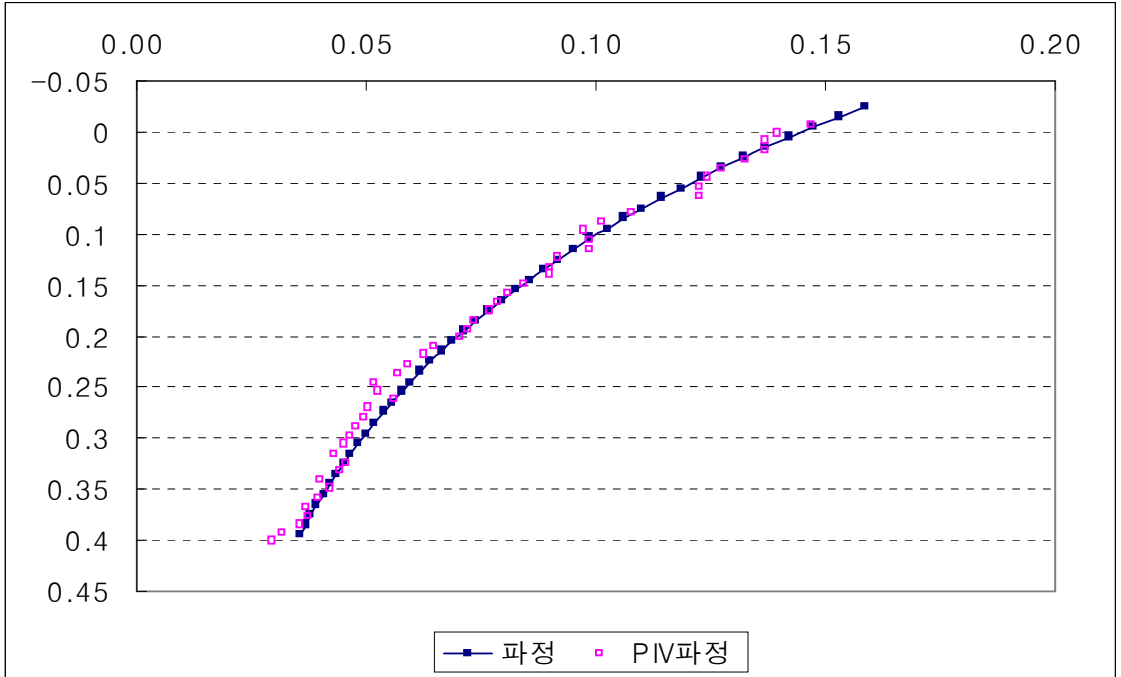


Fig.4.2 linear wave , crest

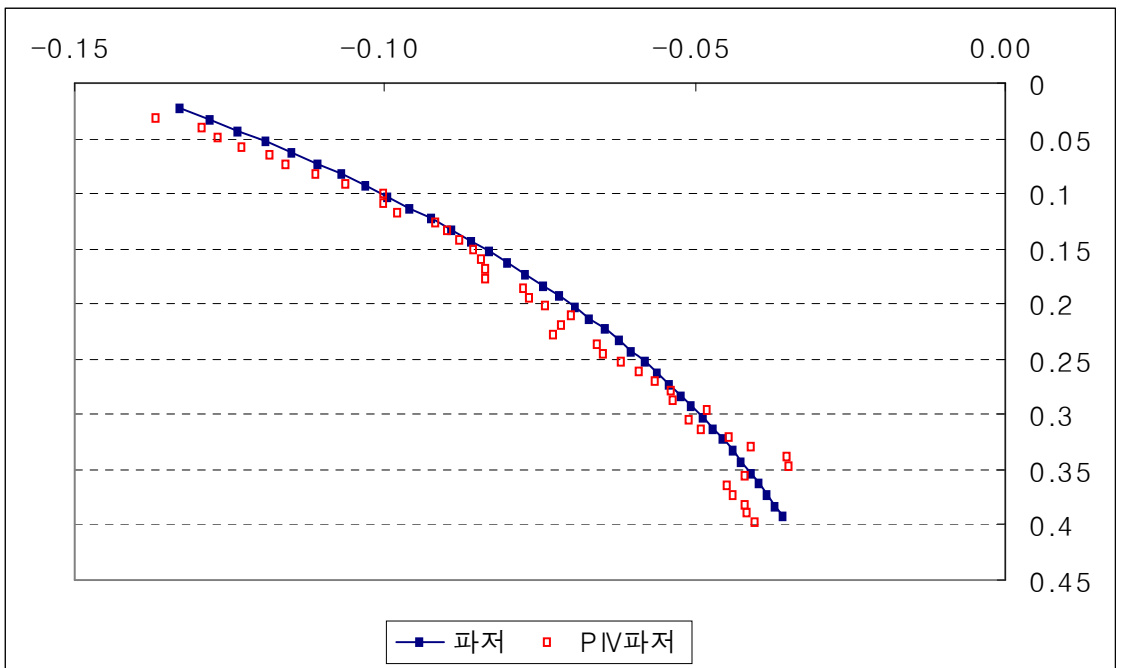


Fig.4.3 linear wave, trough

먼저 파정에 대한 속도 분포이다. Fig.4.2를 보면 검은색 점선은 stoke's wave에 대하여 이론적으로 계산한 결과 값이고 PIV 과정으로 표시된 점선은 실제 실험한 값이다. 다음으로 Fig.4.3을 보면 파저에 대한 속도분포를 나타내었다.

이와 같이 linear wave에서는 계산된 결과값과 파노라마-PIV기법을 이용하여 얻어진 결과값과 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

4.2 medium wave

$w=7.5$, 파고는 0.044m인 규칙파에 대한 속도를 파노라마-PIV 기법을 이용하여 측정하였다. 파고 대 파장 비는 0.04 로써 linear한 규칙파와 nonlinear한 규칙파 중간위치가 되는 meadium 영역에 대한 측정이다.

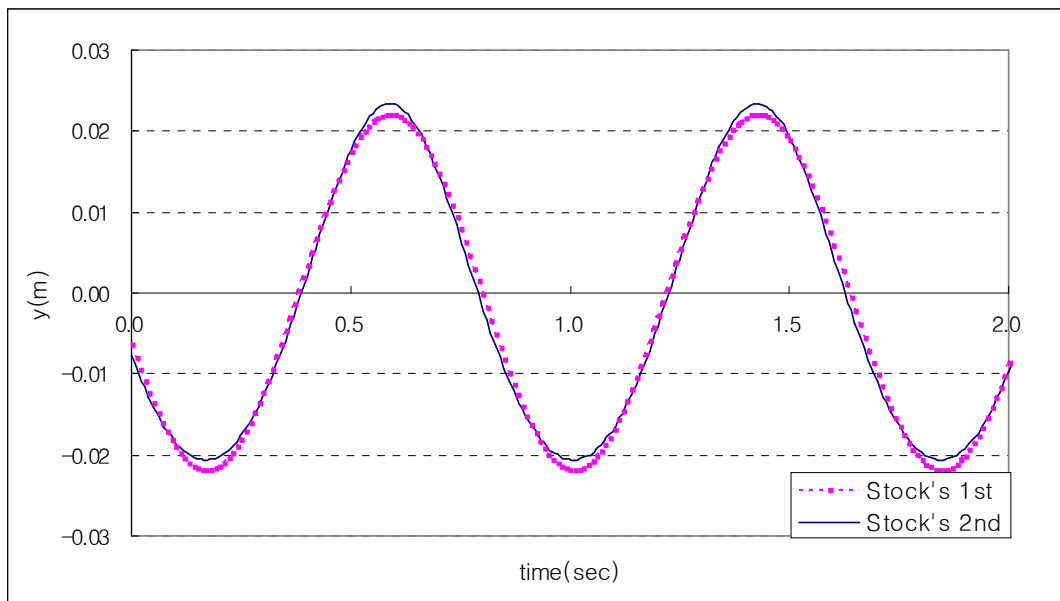


Fig.4.4 medium wave

linear 규칙파보다 second order영역에 대한 파형이 조금 차이가 나는 것을 눈으로 볼 수가 있다. 속도 분포 역시 second order을 고려하여 계산하였다.

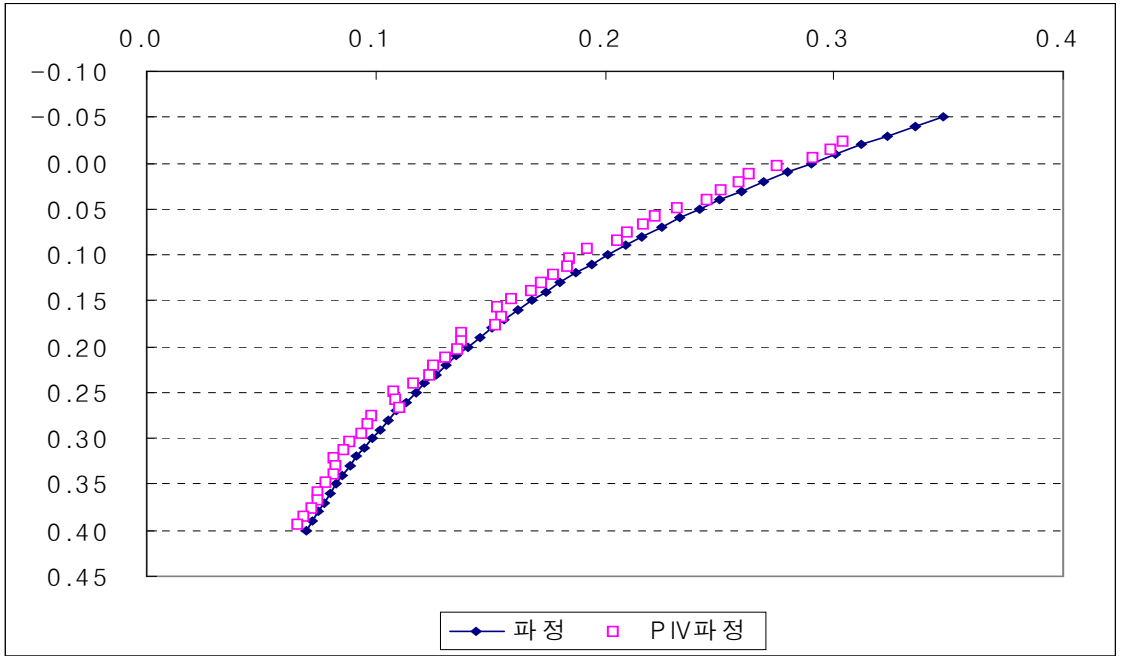


Fig.4.5 medium wave, crest

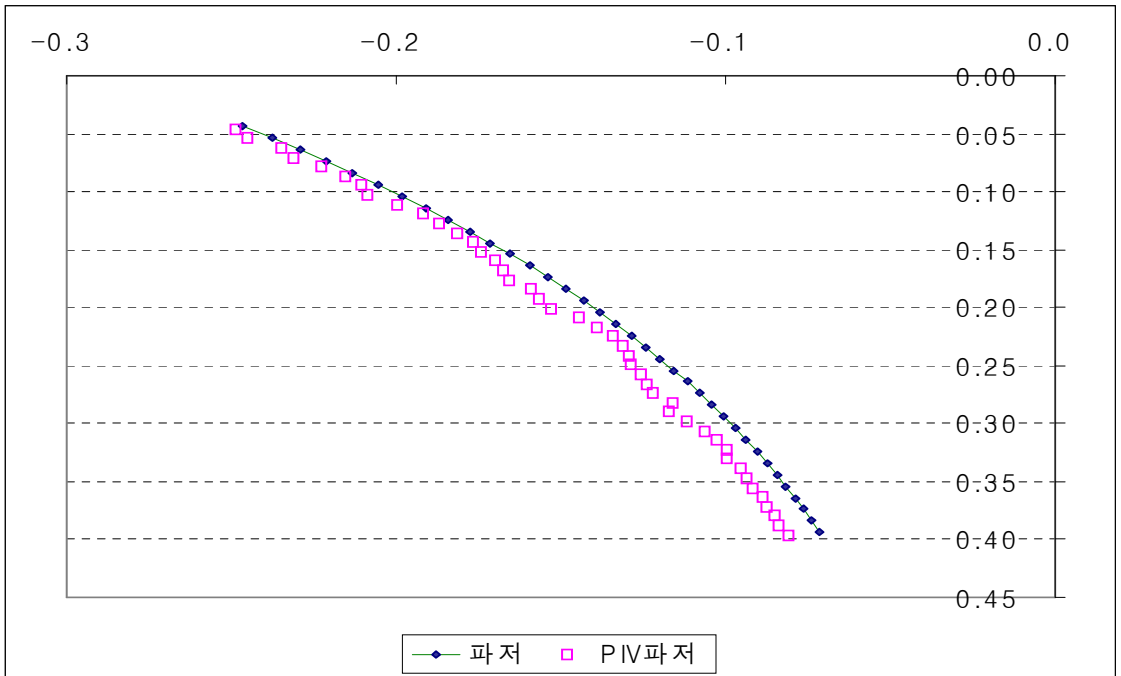


Fig.4.6 medium wave, trough

4.3 nonlinear wave

$w=7.5$, 파고는 0.075m 인 규칙파에 대한 속도를 파노라마-PIV 기법을 이용하여 측정하였다. 파고 대 파장 비는 0.075 로써 nonlinear한 규칙파에 대한 파형을 Fig.4.7과 같이 나타내었다. first order 파형과 second order 파형의 차이가 많이 나는 것을 눈으로 확인할 수가 있다.

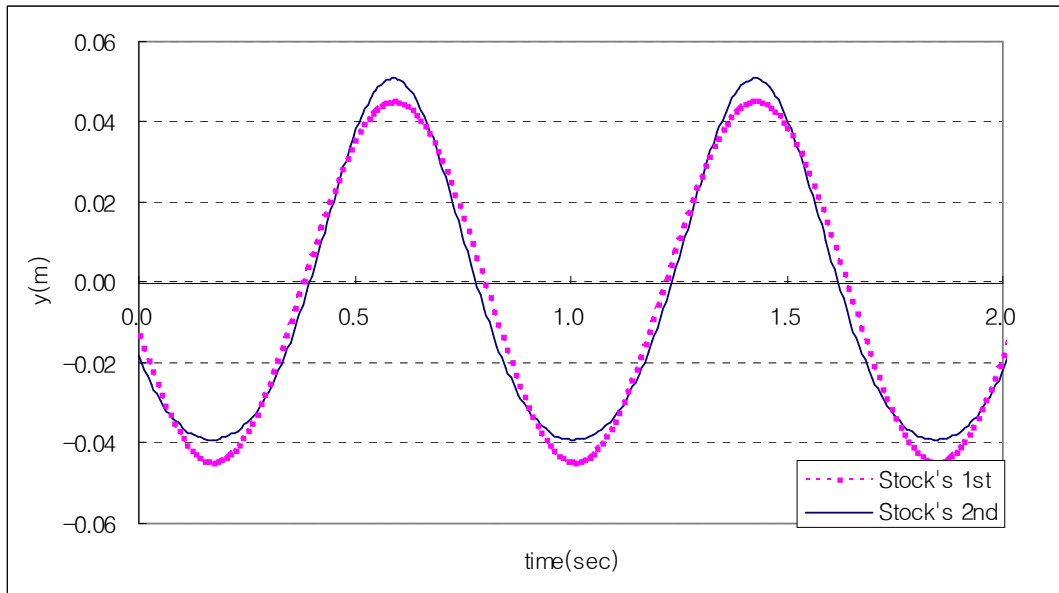


Fig.4.7 nonlinear wave

Fig.4.8과 Fig.4.9는 파정과 파저에 대한 속도분포를 나타낸 것이다. 이론속도값은 stoke's second order를 고려하여 계산하였고, 실제 측정된 속도값과 이론값은 잘 맞는 것을 확인 할 수가 있다. 이와 같이 파노라마-PIV는 이론값과 실제 측정값이 잘 일치하고 있는 것으로 설명할 수 있다. 다음 결과에서는 bichromatic wave에 대한 속도 분포결과를 보겠다.

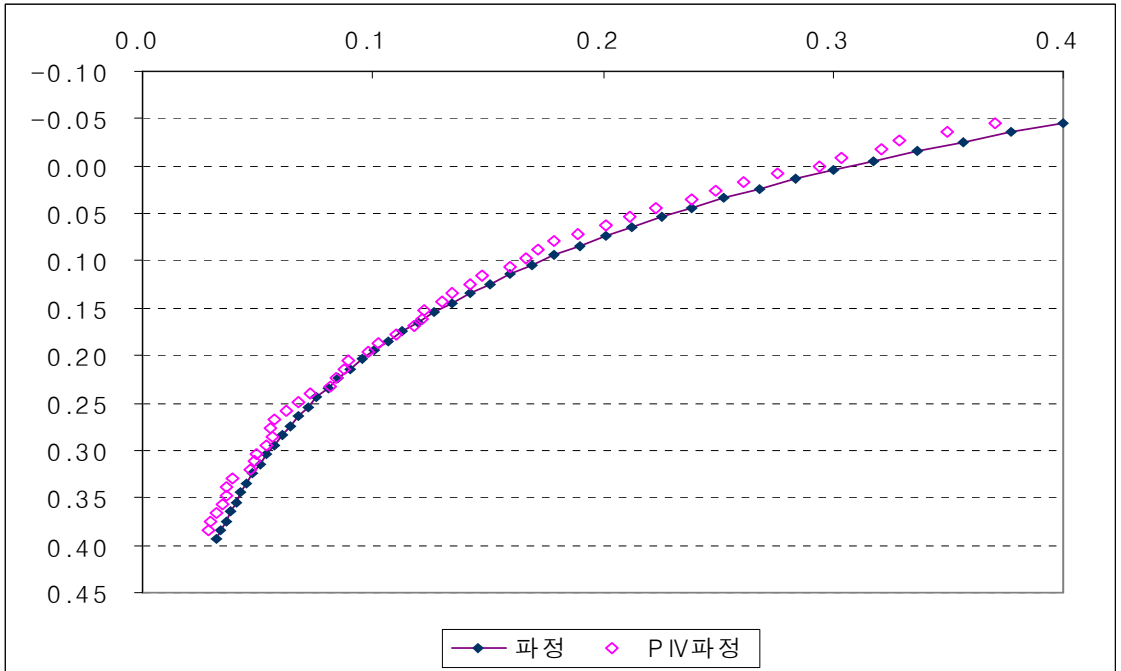


Fig.4.8 nonlinear wave, creat

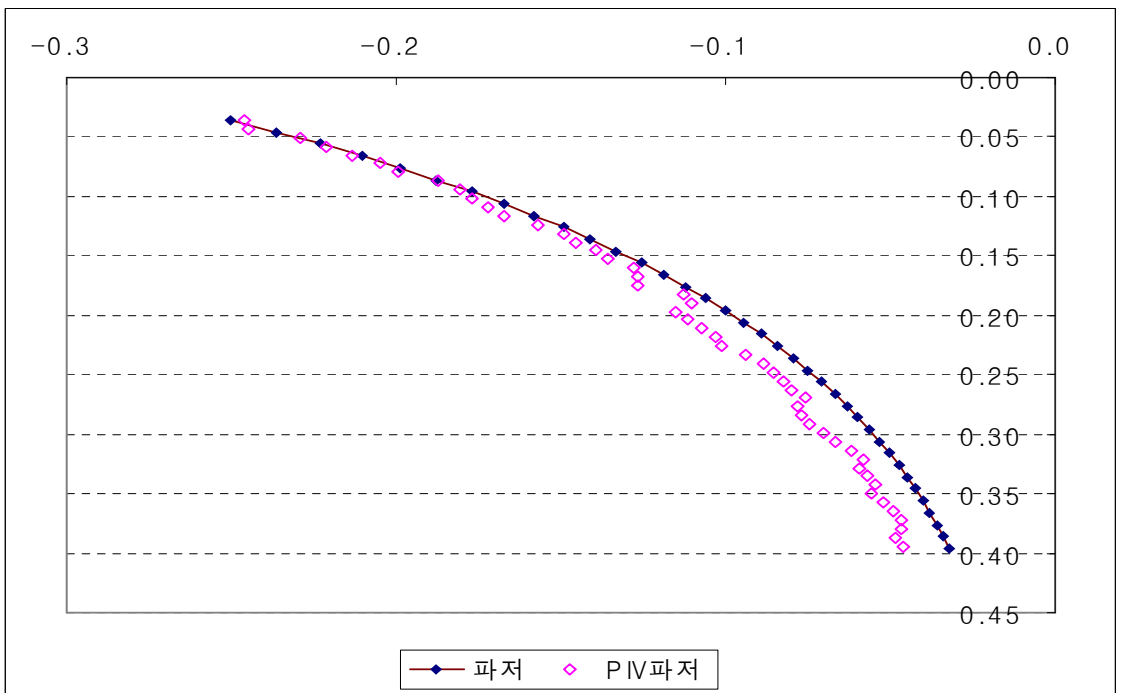


Fig.4.9 nonlinear wave, trough

5. 결과 및 고찰

5.1 파형 측정 결과

여기서는 앞에서 설명한 바와 같이 측정한 실험결과와 이론값을 비교하였다. Fig.5.1과 Fig.5.2은 첫 번째 방법에 의한 bichromatic wave 생성을 위한 두 개의 규칙파의 측정 파형을 나타낸다. $\omega_1=7.5$ 인 규칙파의 측정 파고는 0.044m 이고, $\omega_2=6$ 의 경우는 측정파고가 0.048m로 나타났다. 이에 의하면 본 조파수조에서 생성된 규칙파는 정상성을 잘 유지하고 있고, 파저에 비해 파정이 조금 높게 되는 약 비선형성을 보여주고 있다.

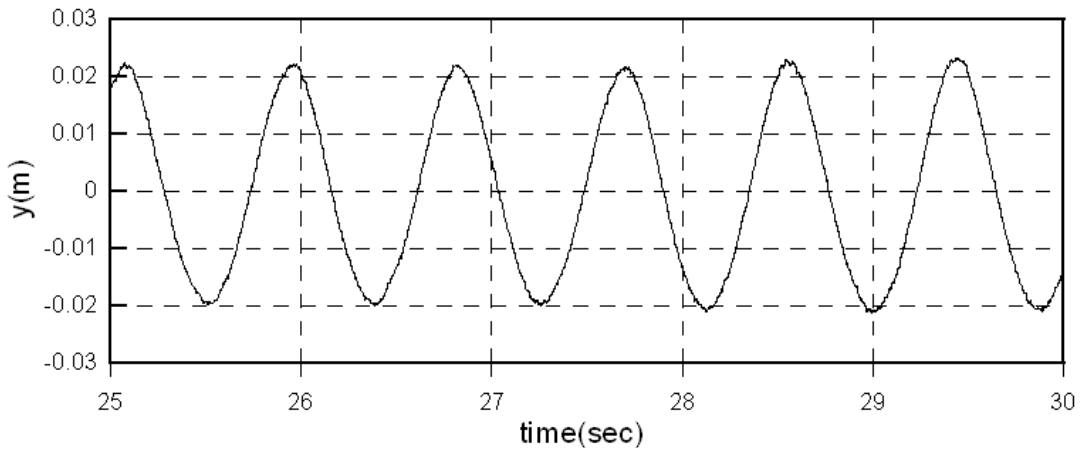


Fig.5.1 Measured Regular Wave-1($\omega_1=7.5$, $H=0.044m$)

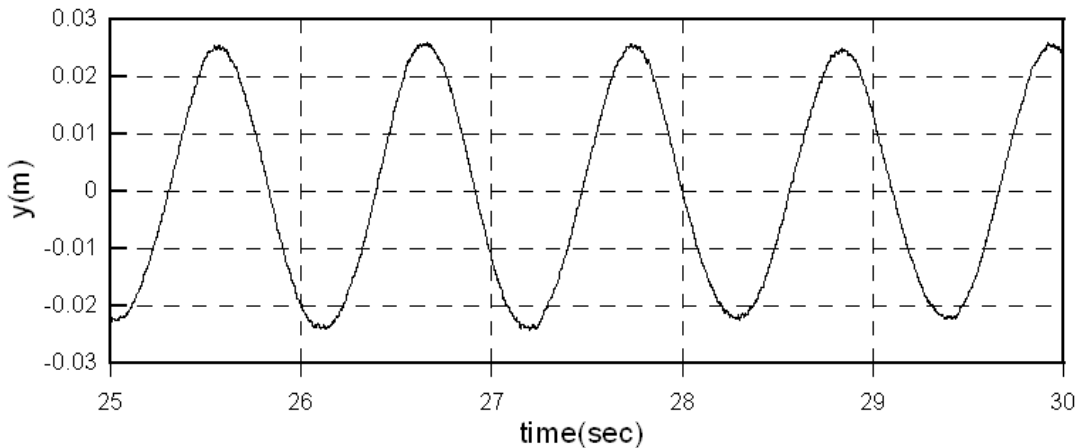


Fig.5.2 Measured Regular Wave-2($\omega_2=6$, $H=0.048m$)

Fig.5.3은 위 두 개의 규칙파의 위상속도를 이용하여 합성한 bichromatic waves의 측정 파형과 이론계산에 의한 파형을 비교한 것이다. 측정된 파형으로부터 추적한 두 개파의 위상차는 0.9π 가 되었고 이론계산에서는 이 위상값을 적용하였다. 굵은 실선은 측정파형이고, 점선은 이론값의 일차근사 값, 실선은 이차 근사값까지 고려한 것이다. 파형의 앞부분과 뒷부분에는 이론값과 측정된 파형이 차이가 있음을 확인할 수 있는데 서너개의 성분파가 합성되는 과정이기 때문에 전 영역에 걸쳐서 파형이 완전히 일치하는 파형을 시뮬레이션하는 데는 어려움이 따른다는 것을 알 수 있다. 선형성분만 가지고 있는 1차 근사값과 비선형 성분을 고려한 2차 근사값과의 차이는 최대파고가 0.1m에 이르지 않을 경우에는 비선형의 영향이 아주 미미하다고 볼 수 있다. 또한 실제 측정된 bichromatic wave의 파형 역시 이론값과 근사한 형태를 가지고 있는 것을 확인할 수 있다.

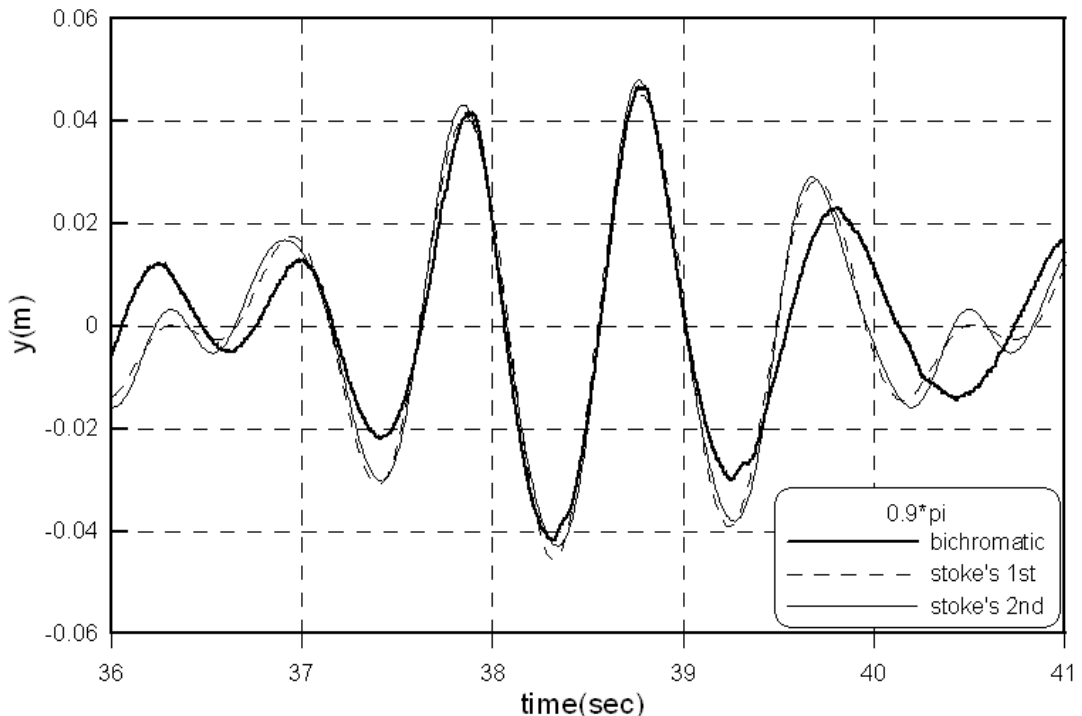


Fig.5.3 Wave Profile of a Bichromatic Wave using Pure Composition

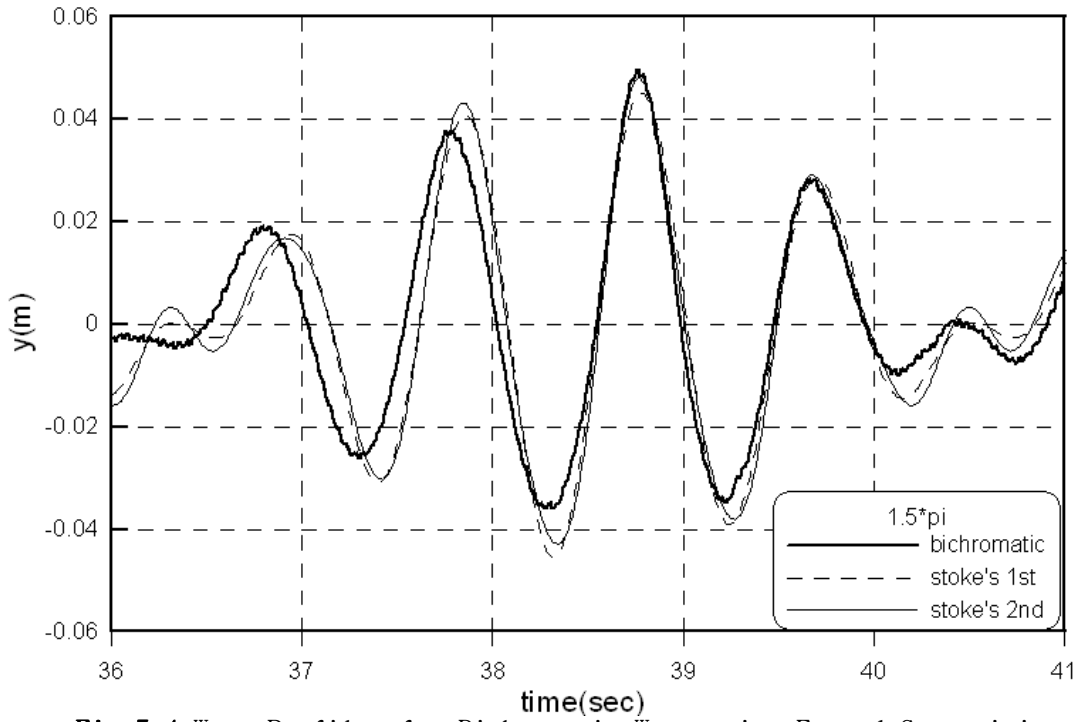


Fig.5.4 Wave Profile of a Bichromatic Wave using Forced Composition

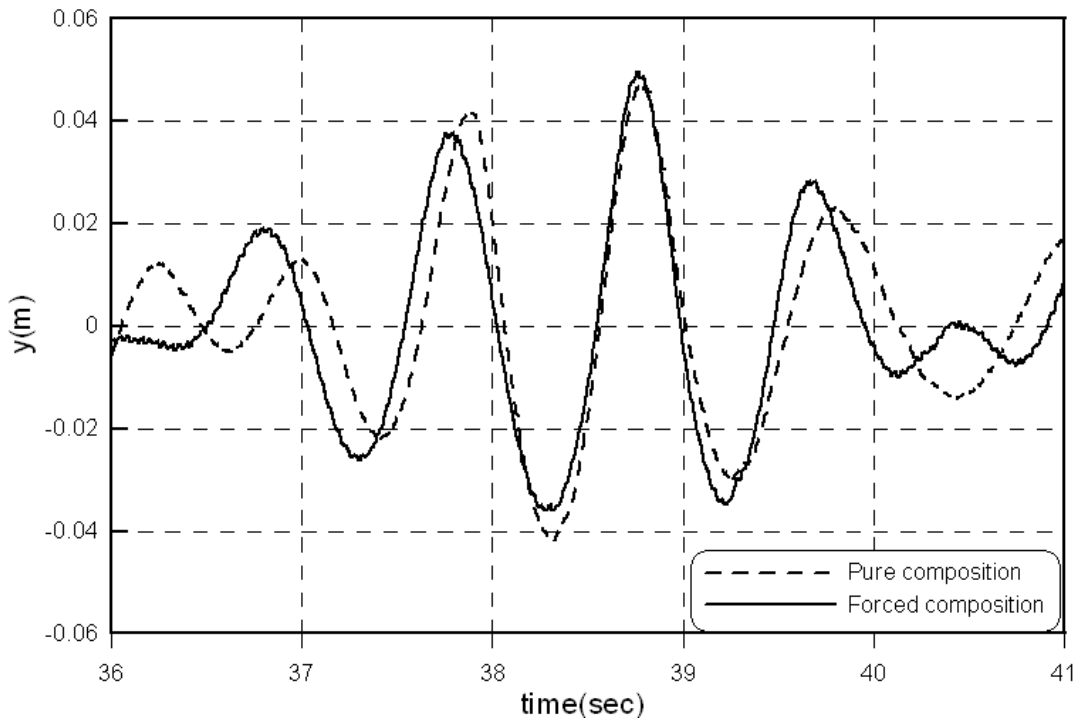


Fig.5.5 Wave Profile of a Bichromatic Wave

Fig.5.4는 두 번째 방법에 의한 입력신호에서 두 개의 규칙파를 합성한 bichromatic wave의 측정 파형과 이론계산에 의한 파형을 비교한 것이다. 측정된 파형으로부터 추적한 두 개파의 위상차는 1.5π 가 되었다. 여기서도 파형이 완전히 일치하는 파형을 시뮬레이션하는 데는 어려움이 있다. 다만 Fig.5.3과 Fig.5.4의 실험값을 비교해보면 순수합성에 비하여 강제합성의 경우 파정부가 보다 뾰족하게 나타나는 것을 알 수 있고 이는 두 개의 파가 위상속도차에 의해서 합성을 하게 될 경우 상호간섭효과에 의해서 파정부를 약간 둔화시키는 경향이 있는 것으로 추정할 수 있다. 그러나 본 실험에서와 같이 각 성분파의 파고가 비교적 낮은 경우에는 그 영향이 아주 미미한 것으로 판단된다.

Fig.5.5은 실제 측정된 위상속도 차이에 의한 bichromatic waves 와 강제로 합성된 bichromatic waves 를 비교하여 보았다. 순수합성된 wave의 파형을 기준으로 보면 강제로 합성된 wave의 첫 번째 파정 부분이 작게 측정되는 것을 볼 수 있고, 파저 부분도 작게 측정되는 경향을 보였다. 그리고 두 번째 파정 부분에서는 순수합성파보다 조금 높게 측정 되었다.

Fig.5.6 은 bichromatic wave의 각각의 비선형 성분들에 대한 그래프를 그려 각각에 성분의 영향에 대하여 알아보았다. 그림에서 보는 것과 같이 네 개의 성분들이 합쳐서 비선형성을 가지게 되는 것이다.

이와 같이 각 비선형 성분들에 대한 영향으로 stoke's wave의 first order와 second order의 차이가 생기는 것을 확인할 수 있었다.

이런 차이의 영향으로는 비선형 성분에 있는 계수들, 즉 A_{21} , A_{22} , A_{23} , A_{24} 값의 영향과 관련된 점을 감안하여 각 계수들에 대한 값을 Fig.5.7에서 Fig.5.10에 나타내어 알아보았다. 그리고 수심에 따라 그 영향이 어떻게 달라지는지 확인하였다. 같은 파고를 가진 wave에 대하여 0.2m~0.8m 사이의 수심에 대하여 계수들의 값을 비교해 본 결과 계수 A_{23} 의 값이 두드러지게 나타나는 것을 확일 할 수 있었고 수심이 얕아 질수록 그 영향은 더욱 커짐을 확인할 수 있었다. 이런 결과를 바탕으로 이론적으로 파고가 좀 더 큰 wave에 대한 영향은 좀 더 두드러질 것을 감안하여 비교하여 보았다.

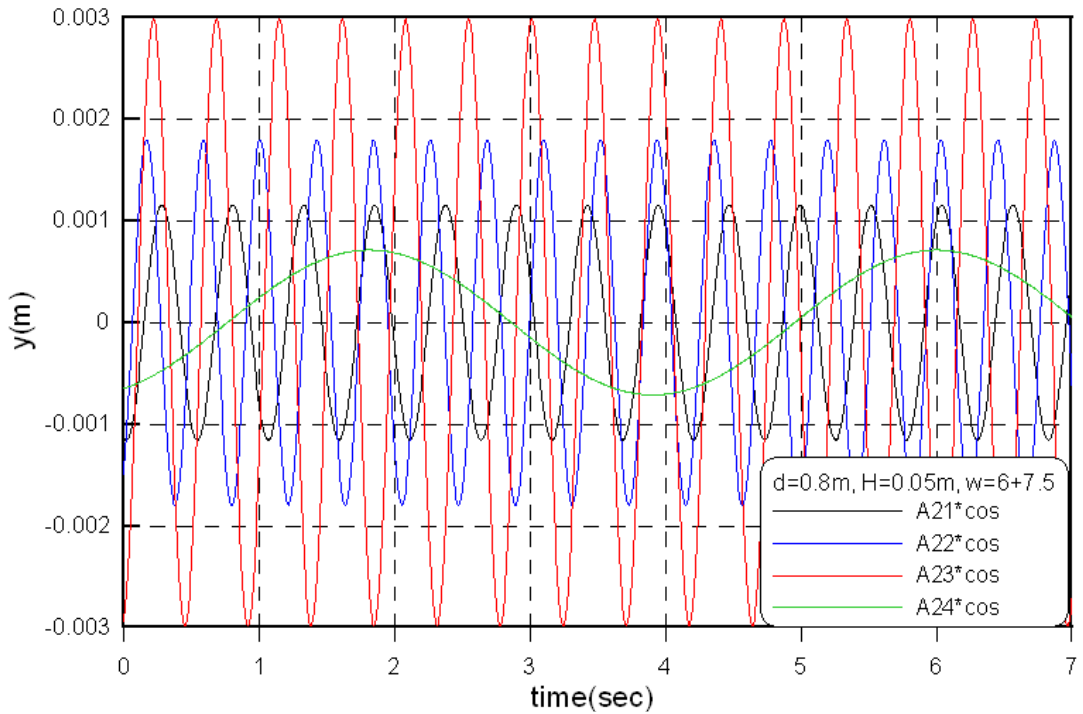


Fig.5.6 bichromatic wave의 비선형 성분

실제 실험했던 wave에 대한 파고의 비선형성분들과 실제 실험으로 측정하기 어려운 0.2m의 파고를 가진 wave에 대한 비선형성분들을 비교해 본 결과 각 계수들의 크기에 대한 차이만 있을 뿐 거의 동일한 경향을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 그러므로 wave의 비선형 성분은 계수A23과 큰 관련이 있음을 알 수 있고, 수심이 얕을수록 그 영향이 두드러지게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

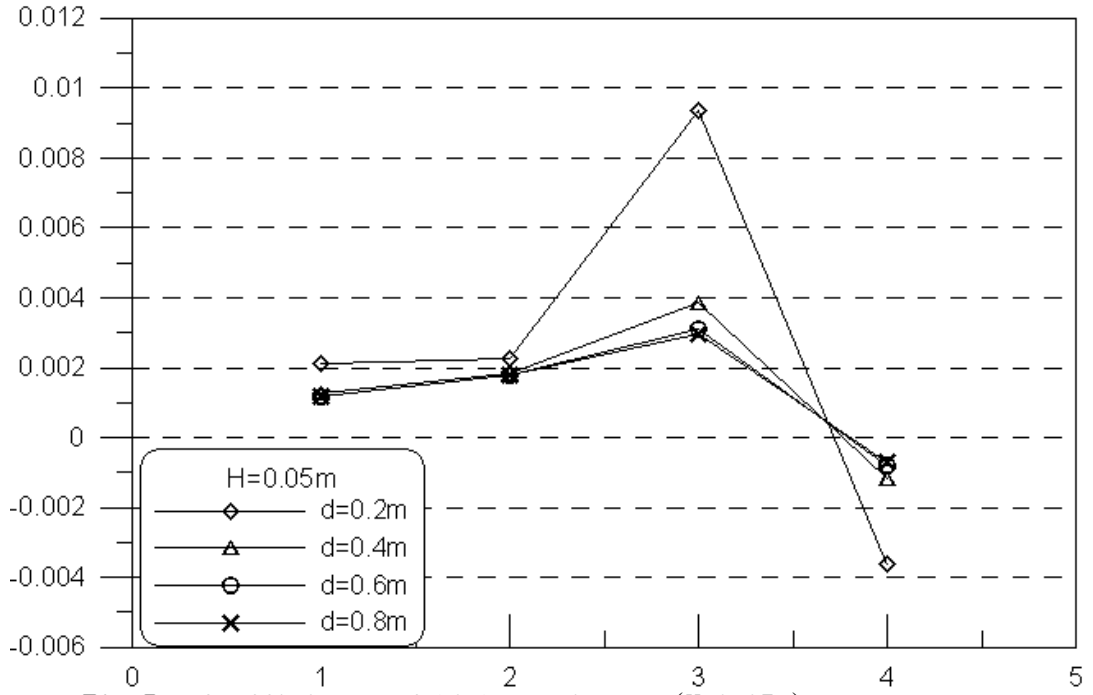


Fig.5.7 Coefficients of bichromatic wave(H=0.05m)

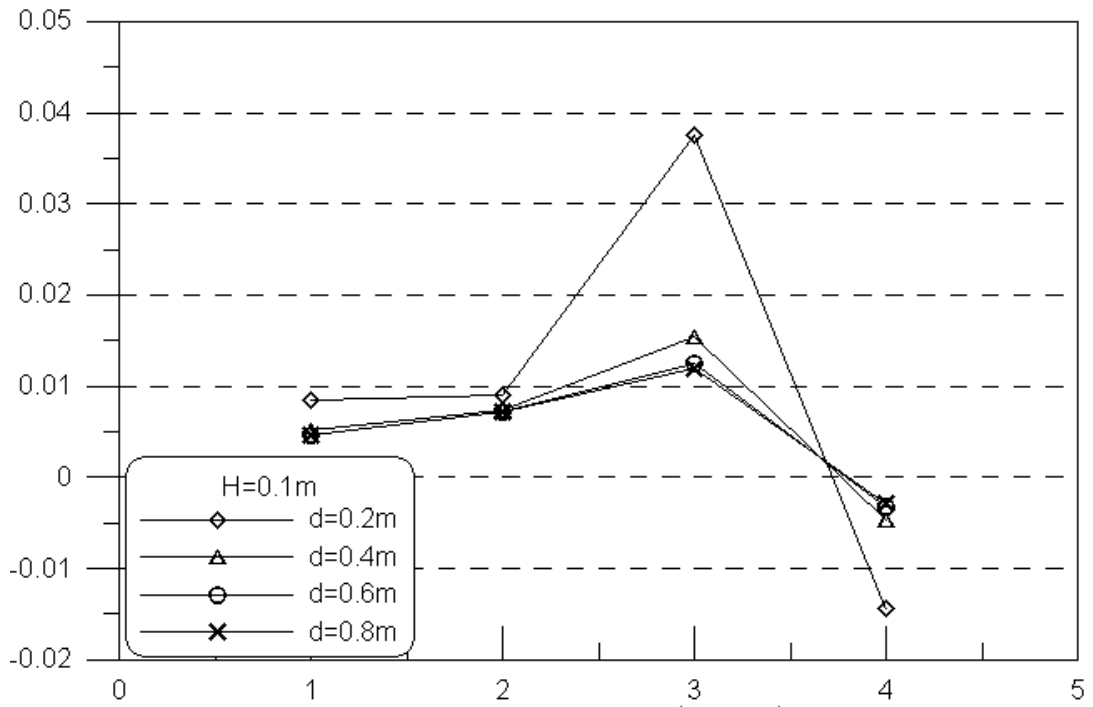


Fig.5.8 Coefficients of bichromatic wave(H=0.1m)

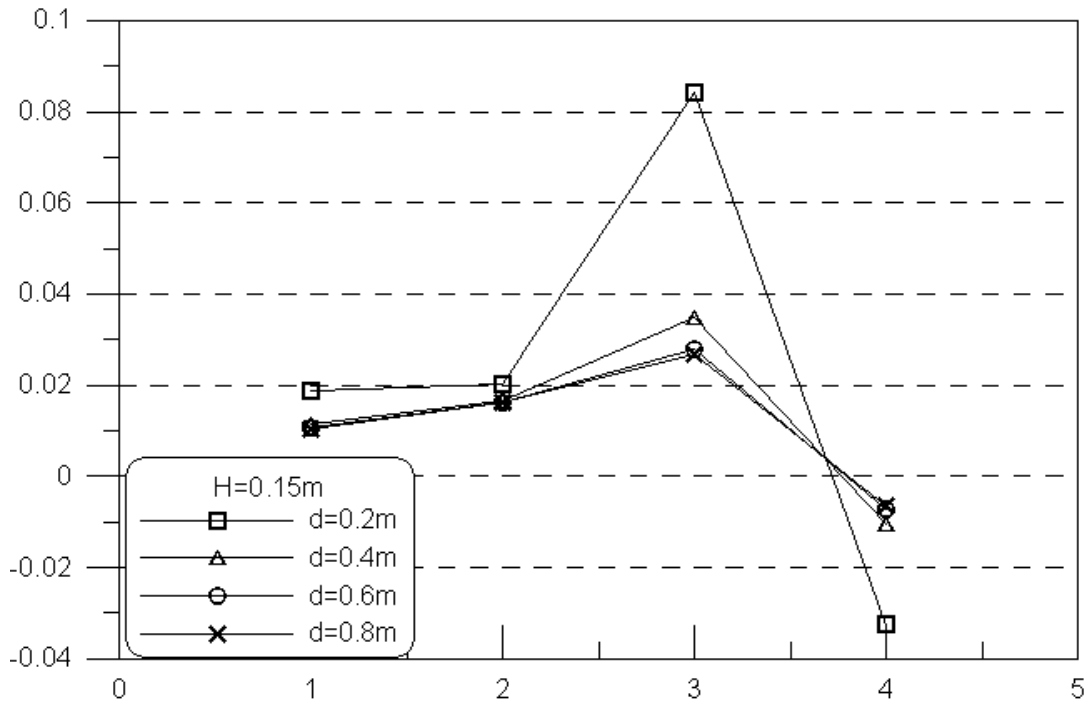


Fig.5.9 Coefficients of bichromatic wave(H=0.15m)

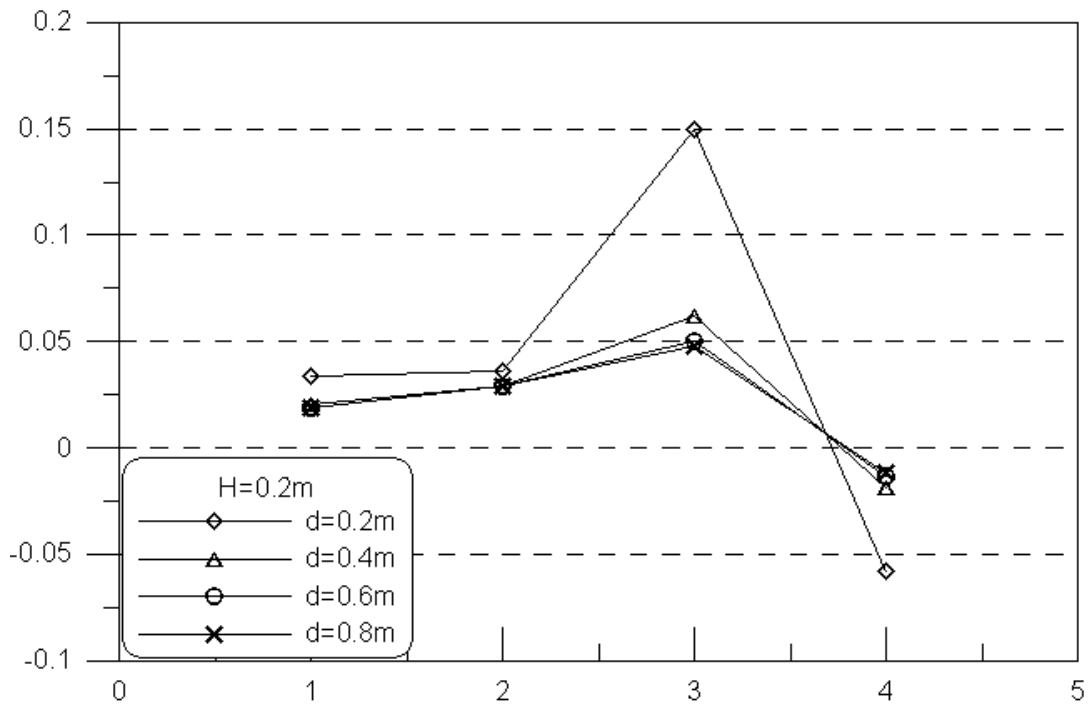


Fig.5.10 Coefficients of bichromatic wave(H=0.2m)

5.2. 유속 측정 결과

다음은 생성된 bicromatic waves의 파형에서 가장 두드러지게 나타나는 파정부 2곳과 파저부 한곳에 대하여, PIV해석결과로부터 수심에 따른 속도분포를 조사하였다. Fig.5.11은 측정된 파형에서 속도분포를 조사하고자 하는 지점을 나타내고 있다.

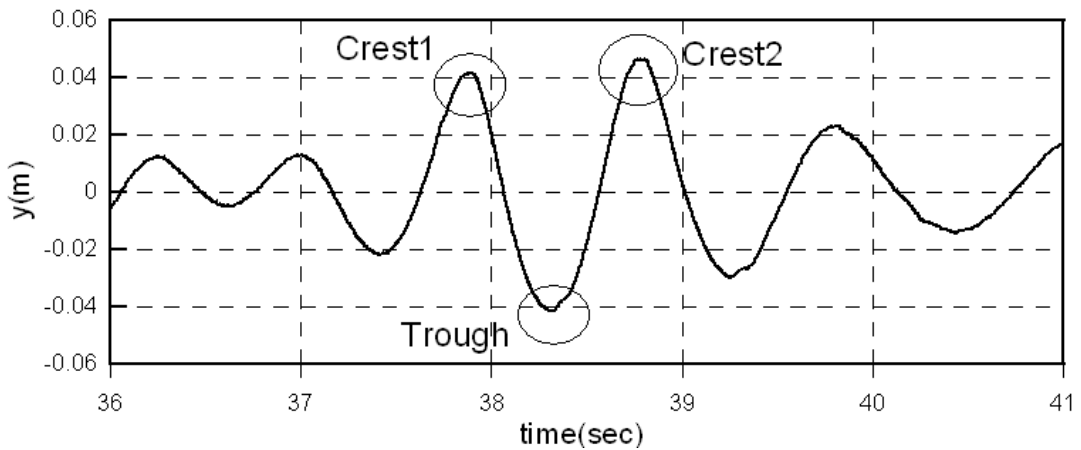


Fig.5.11 Selected Point for Velocity Investigation

Fig.5.12은 실제 측정된 파정부분과 파저 부분에 대한 PIV 이미지이다. 촬영된 이미지를 PIV해석 프로그램을 통하여서 2차원 속도벡터를 구한 것이 아래그림과 같이 나타내었다. Fig.5.12의 벡터이미지는 실제 속도 벡터에 대한 에러에서 더 정확한 결과값을 얻기 위해 보간 처리를 한 이미지이다.

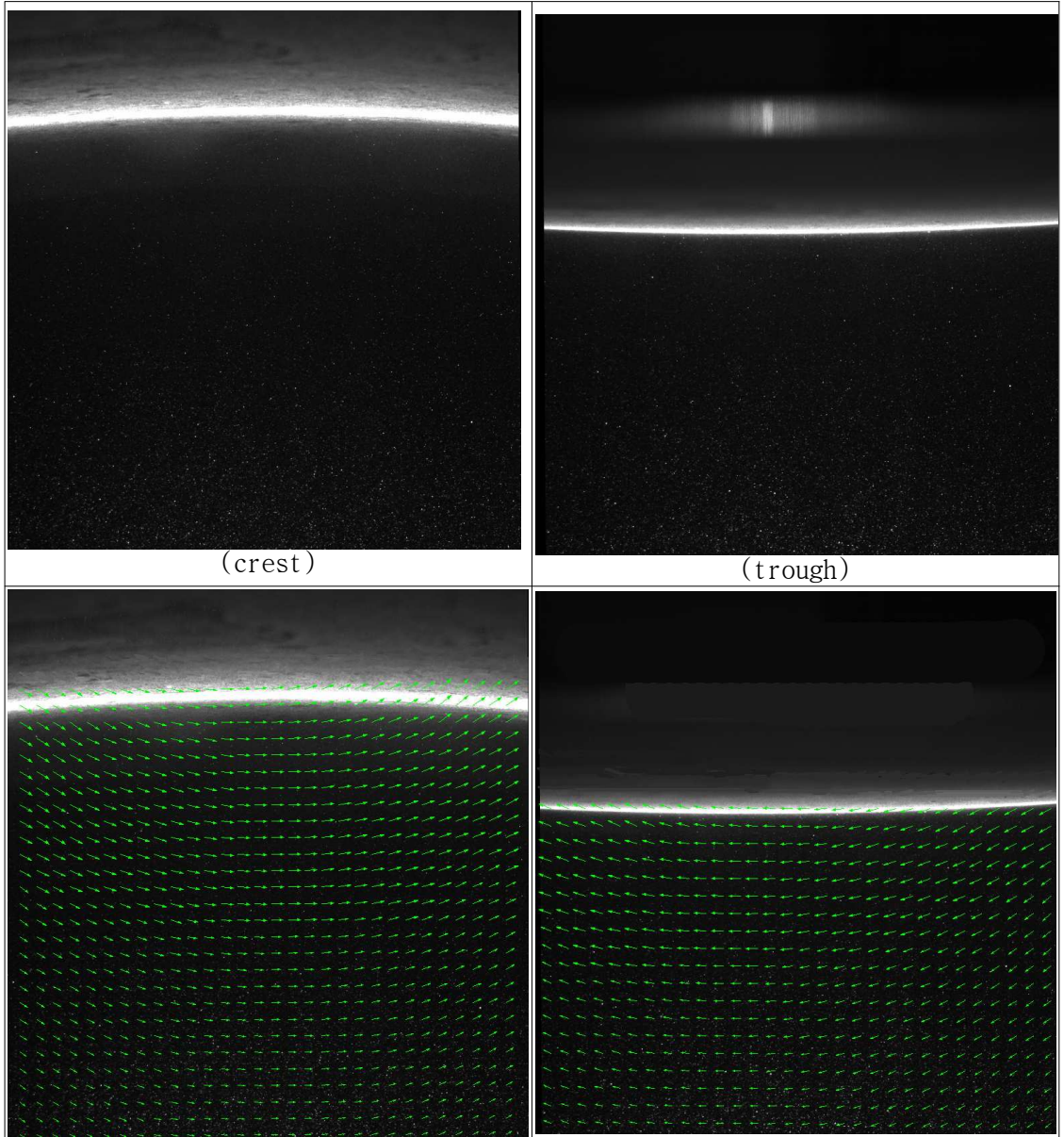


Fig.5.12 PIV image

Fig.5.13과 Fig.5.14는 순수합성에 의한 합성파의 첫 번째와 두 번째 과정에서 수심별 속도 분포를 각각 나타낸 것이다. 여기서 Δ 는 PIV 측정값, \blacklozenge 는 1차 이론계산이고 $+$ 는 2차 이론계산에 의한 속도를 나타내고 있다. 이에 따르면 PIV측측에 의한 것과 이론계산은 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 첫 번째 과정의 하측에서는 측정값이 조금 작게 나타나지만 상층부로 가면서 구배가 급하게 되는 경향을 보여주고 있다. 그리고 두 번째 과정에서 stock's 1차 근사해보다 stock's 2차 근사해에 속도가 일치함을 알 수 있다.

그리고 과정 꼭대기부분에서와 수심 아래 부분에서는 속도기울기의 차이가 있는 것을 확인할 수가 있다. 수심 아래 부분에서는 실제 이론값보다 적게 측정되는 경향이 있었지만 과정 꼭대기부분으로 갈수록 속도기울기가 커지는 것을 확인할 수가 있었다.

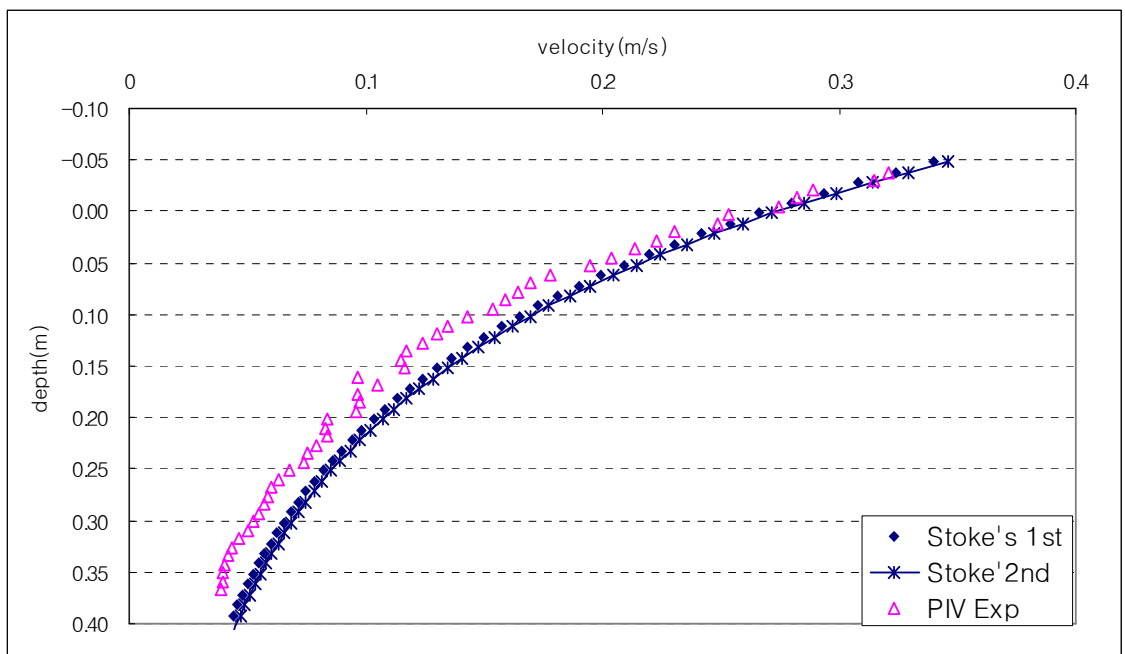


Fig.5.13 Velocity Profile at 1st Crest of Pure Composition

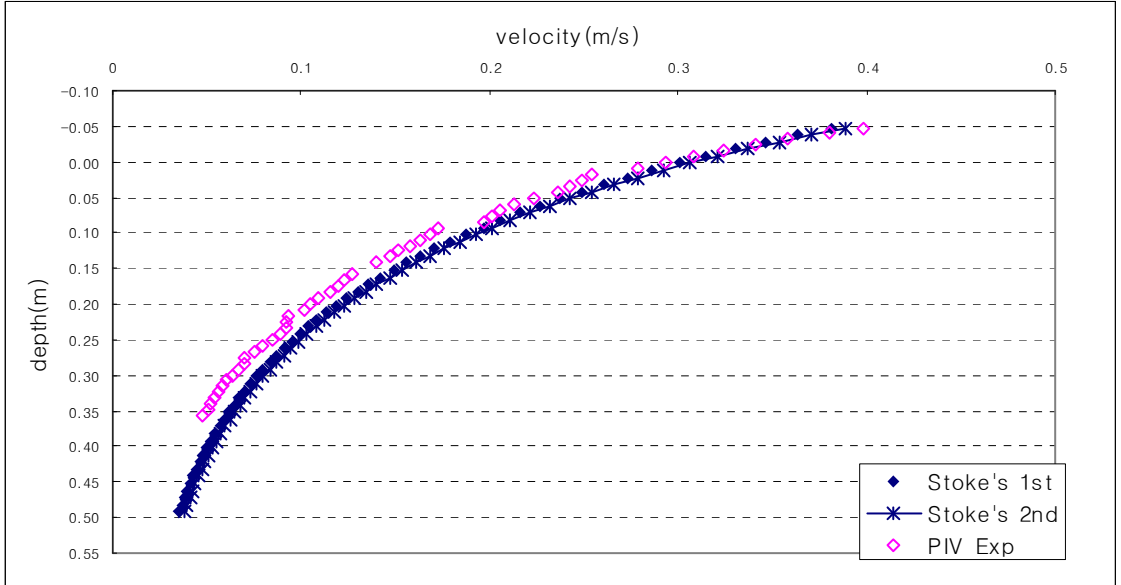


Fig.5.14 Velocity Profile at 2nd Crest of Pure Composition

Fig.5.15은 순수합성과 강제합성에서의 파저에서 수심별 속도 분포를 각각 나타낸 것으로 이론값과 아주 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 파정과는 달리 수심으로 내려갈수록 이론값과 잘 맞는 것을 확인할 수가 있다.

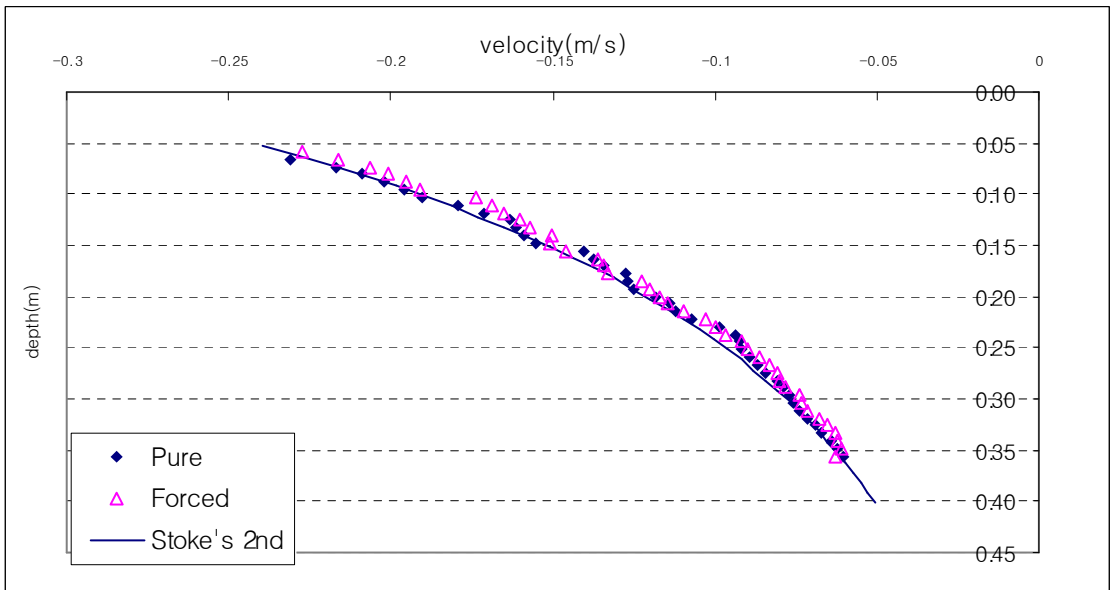


Fig.5.15 Velocity Profile at Trough of Pure Composition

Fig.5.16과 Fig.5.17는 입력신호에서 사전 합성에 의한 합성파의 첫 번째와 두 번째 과정에서의 수심별 속도 분포를 각각 나타낸 것이다. 여기에서도 순수합성의 경우와 거의 유사하게 파정 꼭대기부분에서는 급한 경사를 보이다가 바닥부분으로 갈수록 이론값보다 작게 측정되는 것을 보여주고 있다. 즉, 순수합성이나 사전합성의 속도장 특성은 그다지 바뀌지는 않는다는 것을 알 수 있다.

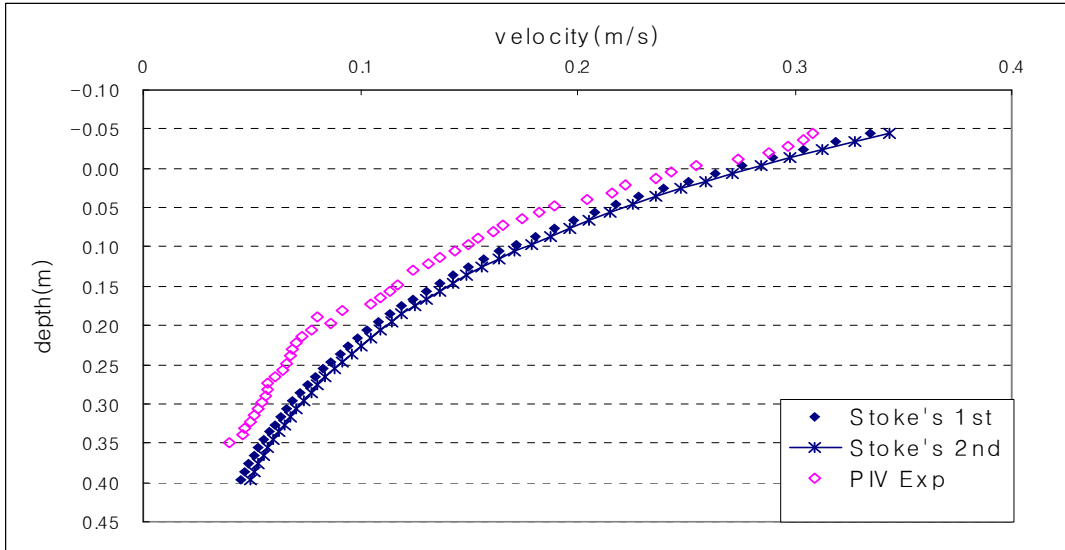


Fig.5.16 Velocity Profile at 1st Crest of Forced Composition

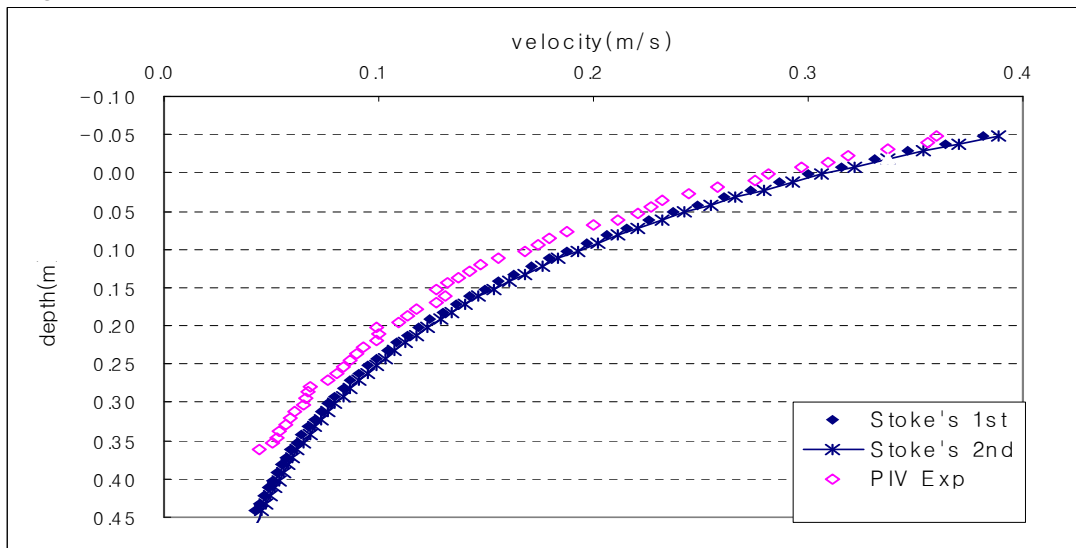


Fig.5.17 Velocity Profile at 2nd Crest of Forced Composition

이론을 통해 얻은 속도계산 결과와 실험을 통해 얻어진 속도계산 결과를 비교한 후 한 가지 경우에 대한 비교가 아닌 파고를 점점 높여가면서 파형의 변화와 속도의 비선형성에 대하여 어떠한 차이가 있는지에 대하여 알아보았다. wave의 파형은 유지하면서 쇄파가 되지 않는 부분까지 점점 파고를 높여서 실험하였다.

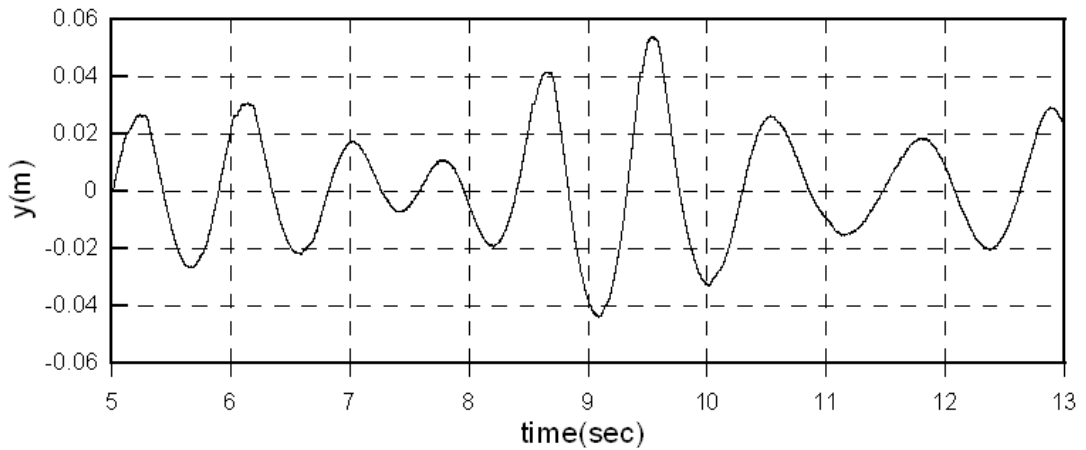


Fig.5.18 ($w=7.5$, $w=6$) 1volt-1volt(4.5cm-4.8cm) $H=9.8cm$

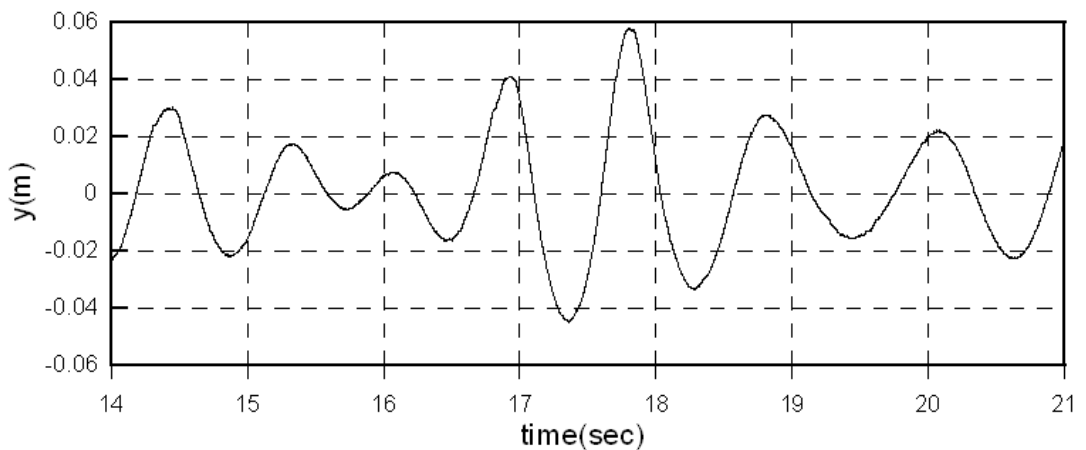


Fig.5.19 ($w=7.5$, $w=6$) 1volt-1.1volt(4.5cm-5.6cm) $H=10.3cm$

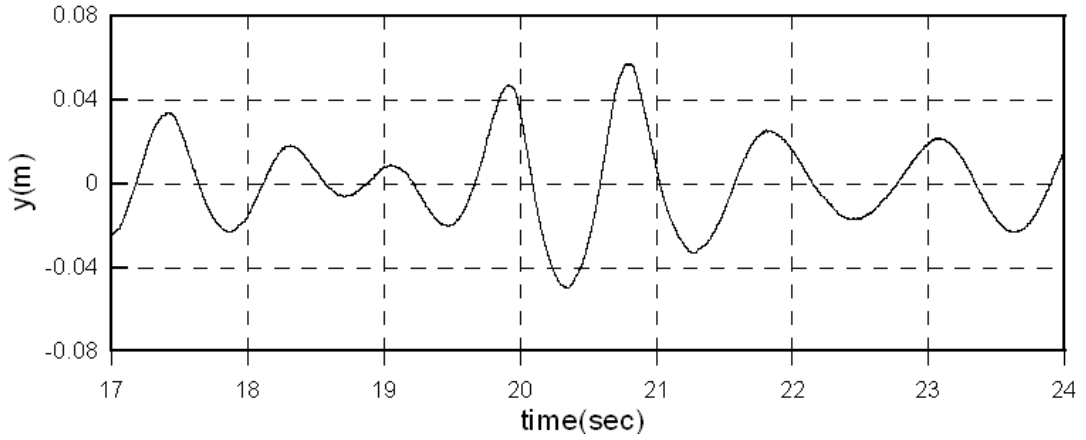


Fig.5.20 ($w=7.5, w=6$) 1.1volt-1.1volt(5cm-5.6cm) $H=10.8cm$

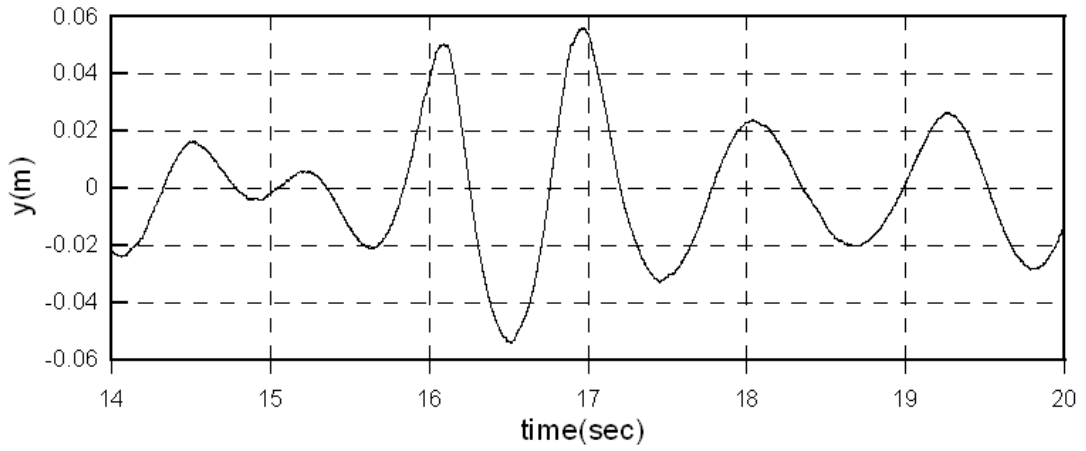


Fig.5.21 ($w=7.5, w=6$) 1.1volt-1.2volt(5cm-6cm) $H=11.2cm$

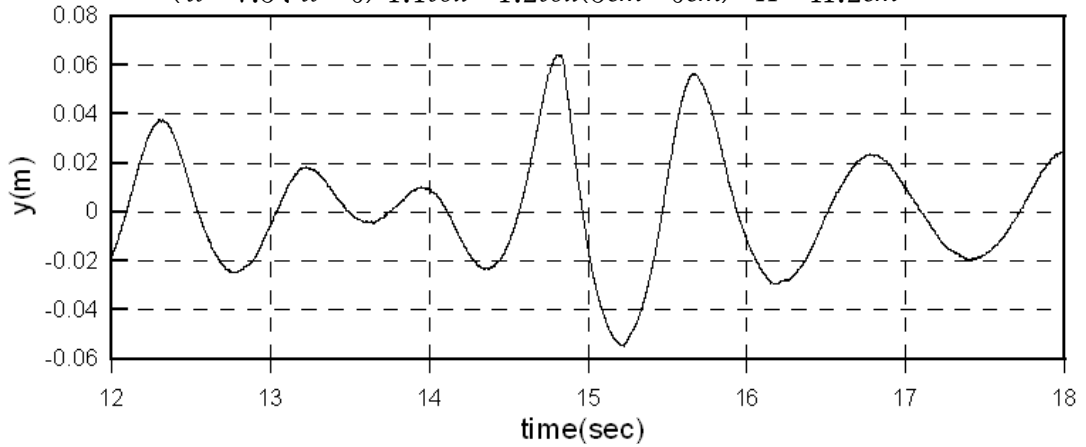


Fig.5.22 ($w=7.5, w=6$) 1.2volt-1.2volt(5.8cm-6cm) $H=12cm$

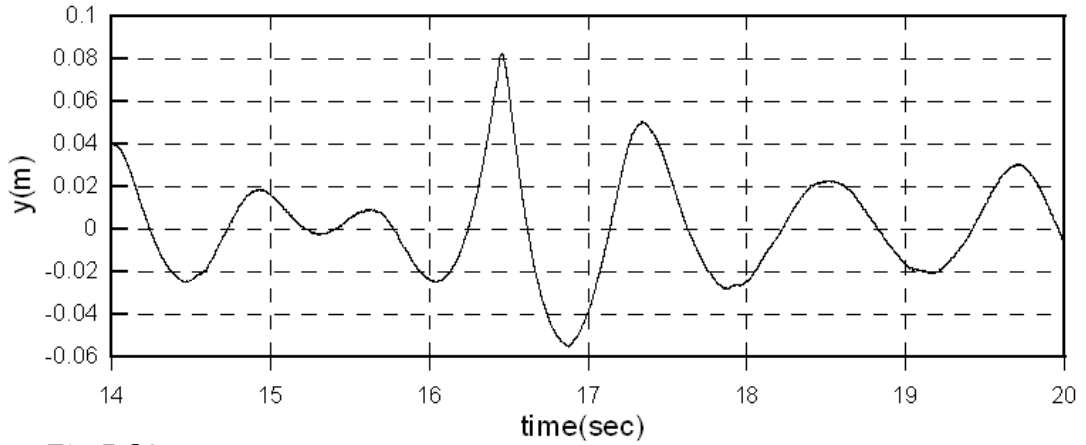


Fig.5.23 ($w=7.5, w=6$) $1.2\omega t - 1.3\omega t (5.8\text{cm} - 6.4\text{cm})$ $H=13.9\text{cm}$

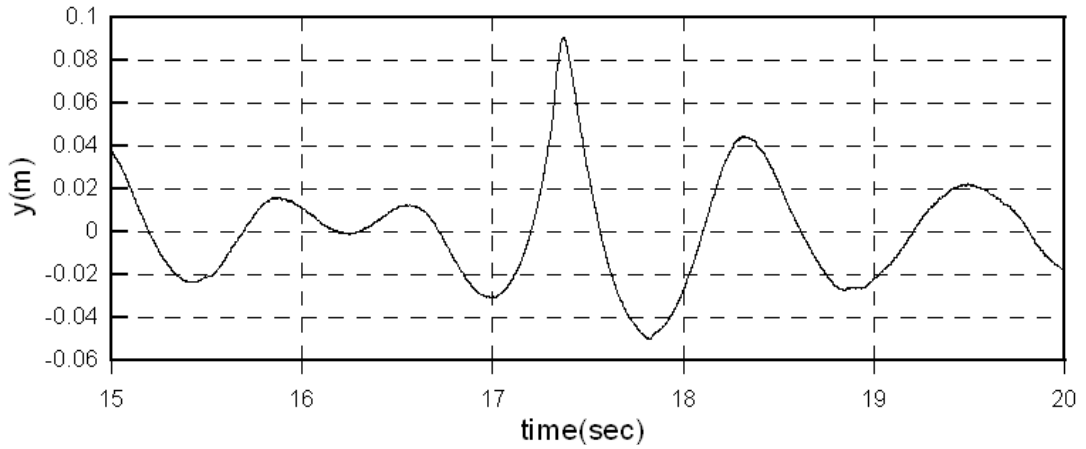


Fig.5.24 ($w=7.5, w=6$) $1.3\omega t - 1.3\omega t (6\text{cm} - 6.5\text{cm})$ $H=14.1\text{cm}$

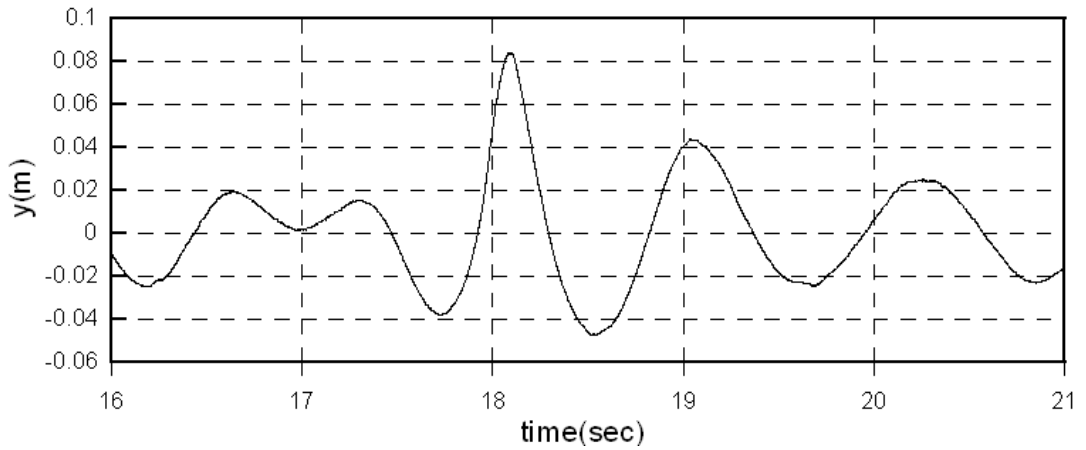


Fig.5.25 ($w=7.5, w=6$) $1.3\omega t - 1.4\omega t (6\text{cm} - 7\text{cm})$ $H=13.3\text{cm}$

조파수조의 input(volt)값을 점점 높여가면서 실험한 결과 파고가 0.14m 초과할 경우 쇄파가 되기 시작하였다. 0.14m 이전의 파형을 살펴보면 파고가 0.12m 이상일 경우부터 파형의 변화가 생기는 것을 확인 할 수 있다.

흥미 있는 결과는 순수하게 합성시킨 파형이 이론값과 다른 형상을 나타내고 있는 것이다. 이론계산에서는 파고가 낮을 경우와 높을 경우 모두 같은 파형을 유지하면서 파고만 바뀌었지만 실제 실험결과에서 파고가 높아질수록 첫 번째 파정부가 뾰족하면서 크게 발달하고 두 번째 파정부에서는 작게 발달되는 형상을 가지고 있었다. 그리고 첫 번째 파정부 앞부분에 합성되는 부분에서는 급격히 작은 형상을 가지고 있었다. 이러한 형상은 Fig.5.22에서 나타나기 시작하였고, Fig.5.24 에 나타난 파형이 쇄파가 되지 않으면서 가장 크게 발달하는 파형이었다. Fig.5.26과 같이 이 파형에 대한 파정과 파저 부분에 대한 PIV 실험을 하여 보았다.

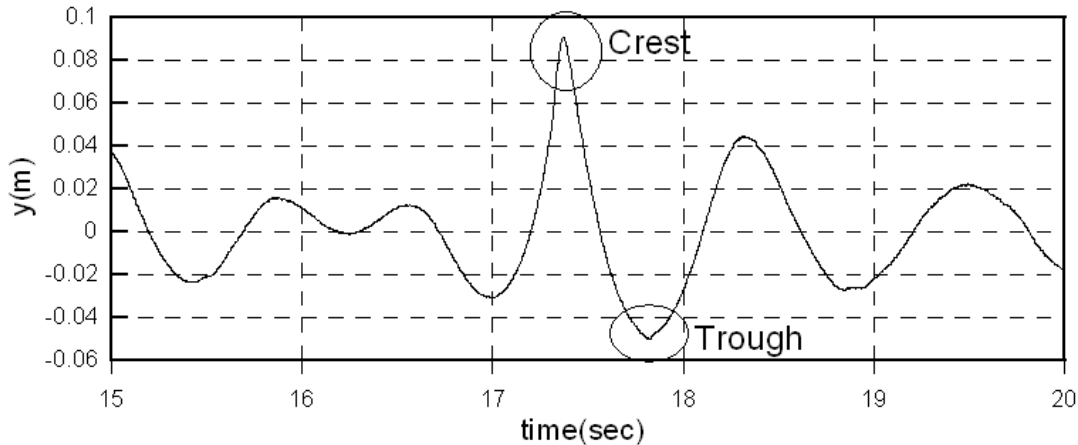


Fig.5.26 ($w=7.5$, $w=6$) $1.3\text{volt}-1.3\text{volt}(6\text{cm}-6.5\text{cm})$ $H=14.1\text{cm}$

Fig.5.27과 Fig.5.28에서 보는 것과 같이 파정과 파저 부분에 대한 속도분포 결과는 앞서 수행했던 이론값과 실험값에서 많은 차이가 있는 것을 확인 할 수 있다. 파정 부분에서는 파정 꼭대기 부분으로 갈수록 급격히 속도가 커지는 형상을 확인함으로써 이론값과 많은 차이가 있었고, 파저 역시 이론값보다 큰 속

도가 측정되었다. 이것은 파형은 유지되면서 큰 파고의 합성파를 생성시킬 경우 stoke's wave 이론을 적용한 속도는 정확하지 않을 것이다. 이와 같은 경우엔 CFD와 같이 전산유체역학을 이용하여 계산하여 비교해야 할 것이다.

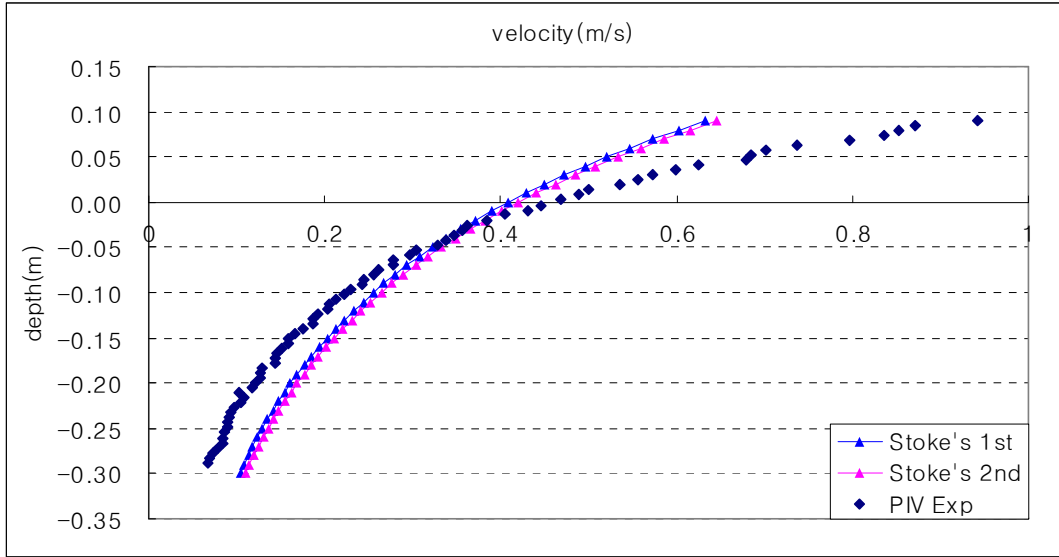


Fig.5.27 Velocity Profile at Crest

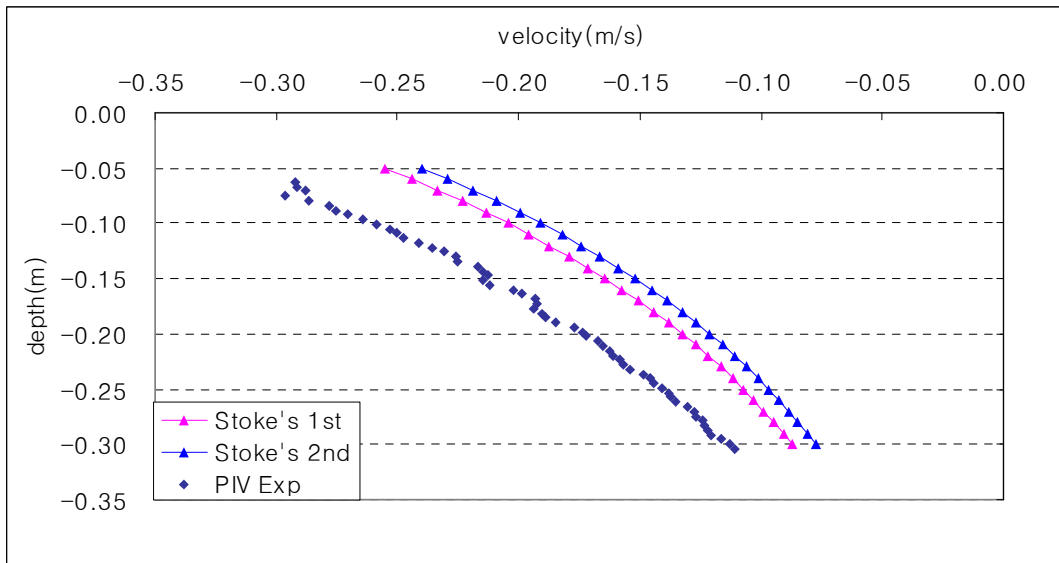


Fig.5.28 Velocity Profile at Trough

6. 결론

기존의 bichromatic wave와 같은 합성파를 생성할 경우 조파기 입력신호에 미리 주파수 성분을 합성시켜 측정하는 방법과는 달리 두 성분파의 위상속도에 의해 순수하게 합성시키는 방법을 구현시켰고, PIV 실험을 통하여 실제유동의 움직임에 대한 영상을 확인 할 수가 있었다. 실제 장비를 이용한 유속측정의 경우 수면부위에 대한 측정영역의 제한과 한 평면에 대한 유속측정을 할 경우 많은 시간이 소모되는 단점이 있었지만 PIV 실험을 통하여 그러한 제한과 단점을 보완할 수 있는 유속측정 장비임을 확인 할 수가 있었다.

이상의 연구에서 두 개의 주파수를 가지는 성분파의 합성으로 인해 생성된 bichromatic wave의 파형을 파노라마-PIV기법을 이용하여 관측하고 이를 이론적으로 계산한 결과는 다음과 같다.

- 1) Bichromatic wave는 두 성분파의 순수합성과 초기 조파기 입력에 합성신호를 이용하는 두 가지 방법으로 생성가능하다.
- 2) 본 실험에서 사용한 파노라마-PIV 실험기법은 파랑 중 유동장 특성을 관찰하는데 유효하게 적용할 수 있다.
- 3) Stoke's 이론을 적용한 bichromatic wave의 이론값과 실험값은 파저에서는 잘 일치하나 과정에서는 속도기울기가 큰 것을 확인할 수 있다. 그리고 파고가 커짐에 따라 수심에 따른 속도분포의 기울기가 이론값에 비해 급격히 커지는 것을 확인할 수가 있었다.
- 4) Linear wave에 대한 합성파를 생성할 경우 입력신호에서 미리 합성을 하여 합성파를 생성시켜도 유체입자의 속도장에는 그다지 영향을 미치지 않는 것으로 생각할 수 있다.
- 5) Nonlinear wave에 대한 합성파를 생성할 경우 진행되는 과정에서 왜곡되는 형상이 많으므로 위상속도의 차이에 의해 순수 합성시키는 방법이 있으나, 유체입자의 속도장은 이론값과 큰 차이가 있었다.

이상과 같이 파노라마-PIV실험기법은 복잡한 유동장을 공간측정함으로써 유동 특성을 잘 표현할 수 있을 것으로 사료된다. 향후 본 연구를 통해서 얻어진 결과와 CFD와 비교하여 유동장 해석의 보다 엄밀한 분석을 수행할 필요가 있다.

참 고 문 헌

- (1)Sumihisa KATAOKA, "Study on Breaking Limit of 2-Component Composite Wave"
- (2)성재용, 도덕희,(2004) "PIV 속도장 추출 알고리즘에서의 오차 해석" .
Workshop on PIV Techniques and Standards, 5p
- (3)Trulsen.K, Stansberg.C.T, (2001) "Spatial evolution of water surface waves: Numerical simulation and experiment of bichromatic waves." .71~77p
- (4)Skjelbreia, J., Berek, E., Bolen, Z., Gudmestad, O.T., Heideman, J., Ohmart, R.D., Spidsoe, N., and Tørum, A. (1991) " Wave kinematics in irregular waves" , Proceedings of OMAE, vol. 1A, pp. 223-228.
- (5)Kim,C.H.,Randall,R.E.,Boo,S.Y.,and Krafft,M.J., (1992).Kinematics of 2-D transient water waves using laser Doppleranemometry." Journal of Waterway, Port, Coastal and Engineering, vol.18, vol2,pp 147-165..
- (6)Longridge, J.K., Randall, R.E., and Zhang, J.,(1996). "Comparison of experimental irregular water wave elevation and kinematic data with new hybrid wave model predictions. Journal of Ocean Engineering, vol.23, no.4,pp.277-307.
- (7)Swan, C.,Bashir, T.,and Gudmestad, O.T.,(2002). "Nonlinear inertial loading. Part 1: Accelerations in steep 2-D water waves. Journal of Fluids and Structures", vol. 16, no. 3, pp. 391-416.
- (8)Chang, K-A.,and Liu, PL-F.,(1998) "Velocity, acceleration and vorticity under breaking waves. Physics of Fluid",vol.10, pp.327-329.
- (9)Jakobsen, M.L.,Dewhirst, T.P., and Greated, C.A., (1997). "Particle image velocimetry for predictions of acceleration fields and force within fluid flow."Measurement Science and Technology, vol.8, pp.1502-1516.
- (10)Jensen, A.,Sveen, J.K., Grue, J.,Richon, J.-B., and Gray, C.,(2001) "Accelerations in water waves by extended particle imagine velocimetry. Journal of Experiments in Fluids", vol.30, no.5, pp.

500-510.

- (11)W.Sulisz (1991), "Stokes Drift in 2-D Wave Flumes," Journal of Fluid Mechanics, Vol.203, pp.209-229
- (12)Moubayed,W.L,and Williams,A.N.(1994) "Second-Order Bichromatic Wave Produced by a Generic Planar Wavemaker in a Two-Dimensional Wave Flume," Fluids and Structure, 8, pp. 73-92.
- (13)Schaffer .H.A.(1996) "Second-Order Wave-Maker Theory for Irregular Waves," Ocean Eng, 23, pp. 47-88

논문을 마감하여,,

정신없이 보낸 2년이라는 시간을 이 책 한권으로 묶으려고 하니 많이 부족한 모습에 부끄러운 마음으로 준비하였습니다.

먼저 2년 동안 새로운 학문과 좋은 사람들과의 인연을 맺게 허락해 주신 조호제 교수님께 깊은 감사의 말을 올립니다. 그리고 바쁘신 와중에 논문 심사해 주신 박명규 교수님과 손겨호 교수님께도 감사의 마음을 전합니다.

해양시스템 실험실 가족이란 테두리 안에서 갑자기 나타난 낯선 여학생에게 하나하나 가르쳐 준다고 고생 많았던 병성이 오빠와 동기라는 이유만으로 나이 차이를 극복하게 해준 영목이 오빠. 저 때문에 정말 정말 고생 많이 하셨어요. 그래도 오빠들 덕분에 즐겁하게 되는 것 같아요.^^ 그리고 우리 실험실 가족들도 실험 도와준다고 너무 고생 많았습니다.

그리고 PIV라는 실험을 가르쳐 주러 오셨던 티엔텍의 편과장님. 1년 동안 정말 수고 많이 하셨다는 말 밖에 없습니다. 처음부터 하나하나 가르쳐 주고 까탈스러운 주문사항과 요구사항에도 웃으면서 대해주신 점 정말 고맙습니다.

이렇게 하나하나 나열해 보니 부족한 논문이지만 많은 사람들의 정성과 노력으로 이루어 졌다는 걸 깨닫게 되었습니다. 항상 감사하는 마음 잊지 않을게요.

마지막으로 학업의 길을 도와주시고 뒷바라지 해주신다고 고생하셨던 아버지, 어머니 정말 고맙고 사랑합니다. 그리고 2년 동안 같은 학교에서 동생 쟁긴다고 힘들었을 우리오빠두 너무 고마워.

모두들 사랑합니다. 그리고 고맙습니다.

2006년 1월 제은이가.