



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

PIV를 이용한 파랑 중 고정 구조물 주위의
유동해석

Flow analysis around the fixed body in waves
through PIV analysis

지도교수 조 효 제

The logo of Korea Maritime University is circular, featuring a stylized ship or structure in the center, with the text 'KOREA MARITIME UNIVERSITY' around the top and '1945 해양대학' around the bottom.

2009년 1월

한국해양대학교 대학원

해양시스템공학과

이 언 주

本 論 文 을 李 炳 成 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함

위 원 장

현 범 수 (인)

위 원

도 덕 희 (인)

위 원

조 효 제 (인)



2009년 1월 7일

한국해양대학교 대학원

Contents

Contents

Abstract

제 1 장. 서론.....	1
1.1. 연구 배경.....	1
1.2. 기존의 연구.....	2
1.3. 연구 내용.....	3
제 2 장. 이론 해석.....	5
2.1. 지배 방정식.....	5
2.2. 경계조건.....	5
2.3. Stock's 1차 근사식.....	6
2.4. Stock's 2차 근사식.....	7
2.5. Stock's 3차 근사식.....	9
제 3 장. PIV 실험개요.....	15
3.1. 실험 자원.....	15
3.2. PIV (Particle Image Velocity) 기법.....	19
제 4 장. PIV 기법을 이용한 쇄파현상 해석.....	24
4.1. 실험방법.....	24
4.2. 실험결과 및 해석.....	24

제 5 장. PIV기법을 이용한 실린더 주변유동 해석.....	28
5.1. 실험방법.....	28
5.2. 실험결과 및 해석.....	31
5.2.1. 구조물 전·후 파고 변화.....	31
5.2.2. 실린더 주변 유동 특성.....	37
 제 6 장. 결론.....	 89
 참고 문헌.....	 91



Flow analysis around the fixed body in waves through PIV analysis

Lee Eon-Ju

Department of MARINE SYSTEM
Graduate School, KOREA MARITIME University

Abstract

The purpose of this study is to provide a basic foundation to select a maximum wave force when the ocean structure is laid out, an experiment was conducted by using a cylinder model that was designed for a reduced scale.

First, the experiments were performed by changing maximum wave slopes in regular wave conditions. In addition, the further experiment by changing the cylinder's diameter was conducted.

Furthermore, the experiments were also conducted to select a maximum wave force directly after the wave breaking in irregular wave conditions. More importantly, the results of this experimental study were compared with the theoretical results from literature.

Further investigations will be needed to confirm the present results, regarding to the flow structure around the fixed body(cylinder) in breaking wave(irregular wave). For the future research, a comparative study will be recommended between results of the cylinder model and results of the regular wave model.

제 1 장. 서 론

1.1. 연구 배경

해양공학에서 실제 해양 구조물이 다수의 원주로 이루어져 있는 경우가 대부분이기 때문에 원형구조물 주위의 유동장 해석은 유체역학적으로 대단히 중요한 부분이다. 원형구조물 주위의 유동은 구조물의 거동과 주위 유체의 운동에 따른 유동의 박리로 상당한 복잡성을 띤다(Williamson 1996). 따라서 시간의 변화에 따른 유동특성을 파악할 필요가 있다. 특히, 유체역학적 문제에 있어 가장 기본적인 문제는 유동장의 흐름특성을 파악하는 일이며, 가시화 기법을 통해 정성적 유동 특성뿐만 아니라 정량적인 유동장의 특성을 파악하는 일이 상당히 중요하다.

최근 해양 개발의 영역이 심해로 확장되면서 해양개발 구조물의 안전성과 효율성을 지배하는 중요한 요소인 쇄파에 관한 문제가 대두되고 있다. 해양파의 에너지 집중에 의해 발생하는 쇄파는 다양한 해양현상의 원인으로 작용하기 때문에 쇄파의 특성에 관한 연구는 매우 중요하다.

근래에 유체역학 관련 연구자들이 PIV(Particle Image Velocity)를 이용하여 복잡한 유동장의 계측들을 하고 있으며, 조선해양공학의 여러 분야에도 응용이 이루어지고 있다. 특히 물체후류의 와동과 같은 복잡한 유동구조를 파악하기 위하여 PIV기법을 이용하고 있다(현범수 등 2000). PIV기법은 유동장의 3차원적 속도 성분을 전 영역에 걸쳐 연속적으로 계측 할 수 있으며, 운동에너지, 와도, 난류강도, 레이놀즈응력 등 다양한 정량적 측정이 이루어지고 있다.

본 논문에서 활용하고 있는 2차원 수조에서 규칙파나 불규칙파를 생성시키는 실험은 오래 전부터 많은 연구자들에 의하여 수행되어왔다. 특히 구조물 설계에서 최대파력산정을 위한 쇄파에 대한 연구가 활발해지면서, 쇄파의 동역학적 유동특성을 파악하기 위하여 수조실험을 수행하고 있다(이동연 등 1996, 이수룡 등 2007). 또한 Kolaini와 Tulin(1993)은 각수조를 이용하여 다방향파를 발생시켜 그중 쇄파의 발생기법에 대해서도 보고를 한바가 있다.

2차원 수조를 이용하여 규칙파의 쇄파를 생성시키는 방법으로서 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 위상 속도를 이용하여 과정을 한 점에 이르게 하는 방법도 있다.

본 논문에서는 쇄파 유동구조의 이론적인 계산결과와 실험결과를 비교하기 위하여 두개의 파를 합성시켜 쇄파를 발생시키는 방법을 사용하였으며, 각각 다른 주파수를 가지는 두 개의 규칙파를 합성하여 쇄파를 생성시켜 이러한 유동에 PIV기법을 적용하여 유동의 운동학적 구조를 해석하였다. 그리고 이들의 실험결과는 퍼텐셜 이론에 근거한 stock's wave이론결과와 비교하여 파면의 형상과 유체입자의 속도분포를 나타내었다.

또한 PIV기법을 이용하여 2차원 조파수조에서 규칙파와 불규칙파를 생성시켰을 때, 이로 인해 발생하는 고정된 원형구조물 주위의 유동특성을 파악하였다. 실험은 0.7~1.1주기에서 각각 규칙파와 불규칙파를 생성하였으며, 원형구조물의 직경을 달리한 실험도 수행하여 직경의 변화에 따른 주위유동변화도 파악하였다.

1.2. 기존의 연구



쇄파는 강한 비선형적 특성 때문에 현상의 이론적, 수치적 해석에 한계가 있으며, 이에 따라 실험적 연구가 활발히 수행되어 왔다. Ramberg & Griffin(1987)과 Chan & Melville(1988)는 바람과 바닥 효과를 무시한 이차원 파랑집중기법을 적용하여 단일 쇄파를 생성하였으며, 이들은 주파수 성분파의 위상을 조절함으로써 파랑을 변조하여 쇄파를 시뮬레이션 하였다. 또한 이동연 등(1996)은 2차원 수조의 임의 지점에서 쇄파를 만드는 실험방법을 수행하였으며, 조효제 등(2001)은 과도수파 생성법에 의한 쇄파현상 재현 및 비선형파의 3차원 수치해석법에 대한 연구를 하였고, 이수룡 등(2007)은 구조물이 없을 때의 쇄파상태의 파면 상승량과 유체입자의 속도를 측정하고, 쇄파중의 구조물에 작용하는 파력을 파악하였으며, 박중천 등(1996)은 2차원 진행규칙파열에서의 쇄파현상에 따른 비선형성 파의 특성에 관한 수치적 연구를 수행하였다. 또한 홍기용 등(2002)은 실험을 통하여 다방향 불규칙파의 집중에 의해 발생하는 쇄파의 파형 특성을 고찰함으로써 방향성을 고려한 실험역 쇄파의 운동학적 특성을 규명하였으며, 조규남 등(1996)은 해양구조물 설계를 위한 해상상태의 특성규명과 쇄파

모델의 원형 해양구조물 설계에의 적용문제에 대한 기본적인 연구를 수행하였다.

근래에는 최상현 & 류용욱 (2005)이 PIV기법과 BIV기법을 적용하여 구조물에 대한 충격 및 월파를 생성하는 쇄파의 운동장에 대한 측정을 수행하여, 파랑이 구조물에 충돌한 이후 생성되는 기포영역을 포괄한 쇄파의 운동장에 대한 실험적 연구 결과를 제시하였고, 정광효 등(2006)은 2차원 수조에서 사각형 단면을 가지는 구조물과 규칙파의 상호간섭에 의한 유체 흐름의 특성을 PIV를 이용하여 실험적 연구를 수행하였으며, 현범수 등(2000)은 PIV 기법을 사용하여 쇄파와 몰수체의 상호작용에 의한 점성유동장의변화를 가시와 함과 아울러 순간유동장을 해석하였다.

1.3. 연구 내용

본 논문은 해양구조물 설계 시 고려사항인 최대파력산정을 위한 기초 연구로써, 해양구조물을 간략화한 원형실린더모형을 이용하여 실험이 수행되었다.

먼저, 규칙파일 때 최대파경사각의 변화에 따라 고정 구조물 주위의 유동구조에 미치는 영향에 대한 실험을 수행하였으며, 실린더직경의 변화에 따른 실험도 수행하였다.

또한 최대파력산정을 위하여 불규칙파의 쇄파발생 직후의 유동구조특성을 파악하기 위한 실험과 이론전개를 병행하여 비교하였으며, 차후 고정 원형실린더 구조물에 이러한 쇄파를 발생시켰을 때 구조물 주위의 유동구조해석을 수행하여 규칙파일 때와 비교분석할 예정이다.

각 장의 내용을 요약하면 아래와 같다.

제 1 장에서는 연구 배경 및 기존 연구와 본 논문의 연구 내용을 기술하였다.

제 2 장에서는 두 개의 파를 합성하였을 경우 속도퍼텐셜, 파면의 형상, 유체 입자의 유속을 삼차 항까지 섭동법을 이용하여 수학적으로 표현하였다.

제 3 장에서는 PIV시스템의 재원 및 실험기법에 대하여 기술하였다.

제 4 장에서는 PIV기법을 이용하여 수행한 쇄파현상의 실험과 이론을 비교하여 나타내었다.

제 5장에서는 파랑 중 고정된 실린더 주변의 유동특성 파악을 위해 PIV기법을 이용하여 수행한 실험을 설명하고, 이를 속도장(Velocity Field), 속도분포(Contour), 와도(Vorticity)로 분석하여 기술하였다.

제 6장에서는 본 연구에서 얻은 주요한 결과를 총괄하여 결론을 맺는다.



제 2 장. 이론 해석

섭동법에 의해서 2성분 합성파에 대하여 3차 근사해 까지 계산하였다.

2.1. 지배 방정식

유체는 비점성 비압축성이라 가정하고, 유동은 비회전성으로 가정하였으며, 표면장력은 무시하였다. 속도 퍼텐셜은 유체영역 내부에서 라플라스 방정식과 베르누이 방정식을 만족한다.

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

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

(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 조건, 압력 일정 조건, 해저면 조건을 만족한다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (at \ z = \eta) \quad (2.3)$$

$$g\eta + \frac{1}{2}q^2 + \frac{\partial \phi}{\partial t} = 0 \quad (at \ z = \eta) \quad (2.4)$$

$$u \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (z = -h) \quad (2.5)$$

섭동법에 의한 파형 및 속도퍼텐셜은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\eta = \epsilon\eta_{(1)} + \epsilon^2\eta_{(2)} + \epsilon^3\eta_{(3)} + \epsilon^4\eta_{(4)} + \dots \quad (2.6)$$

$$\phi = \epsilon\phi_{(1)} + \epsilon^2\phi_{(2)} + \epsilon^3\phi_{(3)} + \epsilon^4\phi_{(4)} + \dots \quad (2.7)$$

$$u = \epsilon u_{(1)} + \epsilon^2 u_{(2)} + \epsilon^3 u_{(3)} + \epsilon^4 u_{(4)} + \dots \quad (2.8)$$

$$P = P_0 + \epsilon P_{(1)} + \epsilon^2 P_{(2)} + \epsilon^3 P_{(3)} + \epsilon^4 P_{(4)} + \dots \quad (2.9)$$

$$P_0 \equiv \rho g z \quad (2.10)$$

(2.3), (2.4) 식을 이용하여 $z=0$ 일 때, 테일러급수 전개로 비선형 자유표면 조건과 압력일정 조건을 전개한다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \left[u \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial \phi}{\partial z} \right]_{z=0} + \eta \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(u \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \right]_{z=0} + \frac{1}{2!} \eta^2 \left[\frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(u \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \right]_{z=0} + \dots = 0 \quad (2.11)$$

$$g\eta + \left[\frac{1}{2} q^2 + \frac{\partial \phi}{\partial t} \right]_{z=0} + \eta \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{2} q^2 + \frac{\partial \phi}{\partial t} \right) \right]_{z=0} + \frac{1}{2!} \eta^2 \left[\frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(\frac{1}{2} q^2 + \frac{\partial \phi}{\partial t} \right) \right]_{z=0} + \dots = 0 \quad (2.12)$$



2.3. Stoke's 1차 근사식

2성분 합성파에 대한 파형 및 속도퍼텐셜과 속도를 구하는 식을 다음과 같이 정의 하였다.

(a) 파형

$$\eta_{(1)} = a_1 \cos k_1(x - c_1 t) + a_2 \cos k_2(x - c_2 t) \quad (2.13)$$

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

(b) 속도퍼텐셜

$$\phi_{(1)} = a_1 c_1 \frac{\cosh k_1(h+z)}{\sinh k_1 h} \sin k_1(x - c_1 t) + a_2 c_2 \frac{\cosh k_2(h+z)}{\sinh k_2 h} \sin k_2(x - c_2 t) \quad (2.14)$$

(c) 속도

x방향의 속도 ; .

$$u = a_1 c_1 k_1 \frac{\cosh k_1 (h+z)}{\sinh k_1 h} \cos k_1 (x - c_1 t) + a_2 c_2 k_2 \frac{\cosh k_2 (h+z)}{\sinh k_2 h} \cos k_2 (x - c_2 t + \theta) \quad (2.15)$$

z방향의 속도 ;

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

2.4. Stoke's 2차 근사식

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} (qu)^2 + \frac{\partial^2 \phi_{(2)}}{\partial t^2} + \frac{\partial \eta_{(1)}}{\partial t} \frac{\partial^2 \phi_{(1)}}{\partial z \partial t} + \eta_{(1)} \frac{\partial^2 \phi_{(1)}}{\partial z \partial t \partial t} \\ & - \left[g \frac{\partial \phi_{(1)}}{\partial x} \frac{\partial \eta_{(1)}}{\partial x} - g \frac{\partial \phi_{(2)}}{\partial z} - g \eta_{(1)} \frac{\partial^2 \phi_{(1)}}{\partial z^2} \right] = 0 \quad (at \quad z=0) \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial^2 \phi_{(2)}}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi_{(2)}}{\partial z} \right)_{z=0} \\ & = \left[-\eta_{(1)} \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\partial^2 \phi_{(1)}}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi_{(1)}}{\partial z} \right] - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} (q_{(1)})^2 - \frac{\partial \eta_{(1)}}{\partial t} \frac{\partial^2 \phi_{(1)}}{\partial z \partial t} + g \frac{\partial \phi_{(1)}}{\partial x} \frac{\partial \eta_{(1)}}{\partial x} \right]_{z=0} \end{aligned} \quad (2.18)$$



(a) 파형

$$\begin{aligned} \eta_{(2)} = & A21 \cdot \cos 2k_1 (x - c_1 t) + A22 \cdot \cos 2k_2 (x - c_2 t) \\ & + A23 \cdot \cos [(k_1 + k_2)x - (c_1 k_1 + c_2 k_2)t] + A24 \cdot \cos [(k_1 - k_2)x - (c_1 k_1 - c_2 k_2)t] \end{aligned} \quad (2.19)$$

$$A21 = \frac{1}{g} [2c_1 k_1 \cdot B21 \cdot D3 + \frac{1}{2} a_1^2 c_1^2 k_1^2 - \frac{1}{4} a_1^2 c_1^2 k_1^2 (D1^2 - 1)]$$

$$A22 = \frac{1}{g} [2c_2 k_2 \cdot B22 \cdot D4 + \frac{1}{2} a_2^2 c_2^2 k_2^2 - \frac{1}{4} a_2^2 c_2^2 k_2^2 (D2^2 - 1)]$$

$$A23 = \frac{1}{g} [(c_1 k_1 + c_2 k_2) \cdot B23 \cdot D5 + \frac{1}{2} a_1 a_2 (c_1^2 k_1^2 + c_2^2 k_2^2) - \frac{1}{2} a_1 a_2 c_1 c_2 k_1 k_2 (D1 \cdot D2 - 1)]$$

$$A24 = \frac{1}{g} [(c_1 k_1 - c_2 k_2) \cdot B24 \cdot D6 + \frac{1}{2} a_1 a_2 (c_1^2 k_1^2 + c_2^2 k_2^2) - \frac{1}{2} a_1 a_2 c_1 c_2 k_1 k_2 (D1 \cdot D2 + 1)]$$

(b) 속도퍼텐셜

$$\begin{aligned} \phi_{(2)} = & B21 \cdot \frac{\cosh 2k_1(h+z)}{\sinh 2k_1 h} \sin 2k_1(x-c_1 t) + B22 \cdot \frac{\cosh 2k_2(h+z)}{\sinh 2k_2 h} \sin 2k_2(x-c_2 t) \quad (2.20) \\ & + B23 \cdot \frac{\cosh(k_1+k_2)(h+z)}{\sinh(k_1+k_2)h} \sin[(k_1+k_2)x - (c_1 k_1 + c_2 k_2)t] \\ & + B24 \cdot \frac{\cosh(k_1-k_2)(h+z)}{\sinh(k_1-k_2)h} \sin[(k_1-k_2)x - (c_1 k_1 - c_2 k_2)t] + \text{const.}t \end{aligned}$$

$$B21 = \frac{-\frac{3}{2}a_1^2 c_1^3 k_1^3 (D1^2 - 1)}{-4c_1^2 k_1^2 \cdot D3 + 2gk_1}, \quad B22 = \frac{-\frac{3}{2}a_2^2 c_2^3 k_2^3 (D2^2 - 1)}{-4c_2^2 k_2^2 \cdot D4 + 2gk_2}$$

$$B23 = \frac{a_1 a_2 c_1 c_2 k_1 k_2 (c_1 k_1 + c_2 k_2)(1 - D1 \cdot D2) - \frac{1}{2} a_1 a_2 c_1^3 k_1^3 (D1^2 - 1) - \frac{1}{2} a_1 a_2 c_2^3 k_2^3 (D2^2 - 1)}{-(c_1 k_1 + c_2 k_2)^2 \cdot D5 + g(k_1 + k_2)}$$

$$B24 = \frac{a_1 a_2 c_1 c_2 k_1 k_2 (c_1 k_1 - c_2 k_2)(1 + D1 \cdot D2) - \frac{1}{2} a_1 a_2 c_1^3 k_1^3 (D1^2 - 1) + \frac{1}{2} a_1 a_2 c_2^3 k_2^3 (D2^2 - 1)}{-(c_1 k_1 - c_2 k_2)^2 \cdot D6 + g(k_1 - k_2)}$$

$$\text{const.}t = -\frac{1}{4} a_1^2 c_1^2 k_1^2 (D1^2 - 1) - \frac{1}{4} a_2^2 c_2^2 k_2^2 (D2^2 - 1)$$

$$(D1 = \coth k_1 h, D2 = \coth k_2 h, D3 = \coth 2k_1 h, D4 = \coth 2k_2 h, D5 = \coth(k_1 + k_2)h, D6 = \coth(k_1 - k_2)h)$$

(c) 속도

x방향의 속도 ;

$$\begin{aligned} u = & a_1 c_1 k_1 \frac{\cosh k_1(h+z)}{\sinh k_1 h} \cos k_1(x-c_1 t) + a_2 c_2 k_2 \frac{\cosh k_2(h+z)}{\sinh k_2 h} \cos k_2(x-c_2 t + \theta) \\ & + 2k_1 B21 \cdot \frac{\cosh 2k_1(h+z)}{\sinh 2k_1 h} \cos 2k_1(x-c_1 t) + 2k_2 B22 \cdot \frac{\cosh 2k_2(h+z)}{\sinh 2k_2 h} \cos 2k_2(x-c_2 t + \theta) \\ & + (k_1 + k_2) B23 \cdot \frac{\cosh(k_1+k_2)(h+z)}{\sinh(k_1+k_2)h} \cos[(k_1+k_2)x - (c_1 k_1 + c_2 k_2)t + \theta] \quad (2.21) \\ & + (k_1 - k_2) B24 \cdot \frac{\cosh(k_1-k_2)(h+z)}{\sinh(k_1-k_2)h} \cos[(k_1-k_2)x - (c_1 k_1 - c_2 k_2)t - \theta] \end{aligned}$$

z방향의 속도 ;

$$\begin{aligned}
w &= a_1 c_1 k_1 \frac{\sinh k_1 (h+z)}{\sinh k_1 h} \sin k_1 (x - c_1 t) + a_2 c_2 k_2 \frac{\sinh k_2 (h+z)}{\sinh k_2 h} \sin k_2 (x - c_2 t + \theta) \\
&+ 2k_1 B21 \cdot \frac{\sinh 2k_1 (h+z)}{\sinh 2k_1 h} \sin 2k_1 (x - c_1 t) + 2k_2 B22 \cdot \frac{\sinh 2k_2 (h+z)}{\sinh 2k_2 h} \sin 2k_2 (x - c_2 t + \theta) \\
&+ (k_1 + k_2) B23 \cdot \frac{\sinh (k_1 + k_2)(h+z)}{\sinh (k_1 + k_2)h} \sin [(k_1 + k_2)x - (c_1 k_1 + c_2 k_2)t + \theta] \\
&+ (k_1 - k_2) B24 \cdot \frac{\sinh (k_1 - k_2)(h+z)}{\sinh (k_1 - k_2)h} \sin [(k_1 - k_2)x - (c_1 k_1 - c_2 k_2)t - \theta]
\end{aligned} \tag{2.22}$$

2.5. Stoke's 3차 근사식

$$\begin{aligned}
&\left(\frac{\partial^2 \phi_{(3)}}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi_{(3)}}{\partial z} \right)_{z=0} \\
&= g \left(\frac{\partial \phi_{(2)}}{\partial x} \frac{\partial \zeta_{(1)}}{\partial x} + \frac{\partial \phi_{(1)}}{\partial x} \frac{\partial \zeta_{(2)}}{\partial x} \right)_{z=0} + g \zeta_{(1)} \left\{ \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \phi_{(1)}}{\partial z} \frac{\partial \zeta_{(1)}}{\partial x} - \frac{\partial \phi_{(2)}}{\partial z} \right) \right\}_{z=0} \\
&+ g \zeta_{(2)} \left\{ \frac{\partial}{\partial z} \left(-\frac{\partial \phi_{(1)}}{\partial z} \right) \right\}_{z=0} + \frac{1}{2} g \zeta_{(1)}^2 \left\{ \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(-\frac{\partial \phi_{(1)}}{\partial z} \right) \right\}_{z=0} - \frac{\partial}{\partial t} (q_{(1)} q_{(2)})_{z=0} \\
&- \frac{\partial \zeta_{(1)}}{\partial t} \left\{ \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{2} g_{(1)}^2 + \frac{\partial \phi_{(2)}}{\partial t} \right) \right\}_{z=0} - \zeta_{(1)} \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{2} g_{(1)}^2 + \frac{\partial \phi_{(2)}}{\partial t} \right) \right\}_{z=0} \\
&- \frac{\partial \zeta_{(2)}}{\partial t} \left\{ \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial \phi_{(1)}}{\partial t} \right\}_{z=0} - \zeta_{(2)} \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \phi_{(1)}}{\partial t} \right) \right\}_{z=0} \\
&- \zeta_{(1)} \frac{\partial \zeta_{(1)}}{\partial t} \left\{ \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(\frac{\partial \phi_{(1)}}{\partial t} \right) \right\}_{z=0} - \frac{1}{2} \zeta_{(1)}^2 \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(\frac{\partial \phi_{(1)}}{\partial t} \right) \right\}_{z=0}
\end{aligned} \tag{2.23}$$

이는 섭동법을 적용하여 3차 항까지를 표현한 자유표면조건을 나타내고 있다.

(a) 파형

$$\begin{aligned}
\eta_{(3)} &= A31 \cos k_1 (x - c_1 t) + A32 \cos k_2 (x - c_2 t + \theta) + A33 \cos 3k_1 (x - c_1 t) \\
&+ A34 \cos 3k_2 (x - c_2 t + \theta) + A35 \cos ((k_1 + 2k_2)x - (c_1 k_1 + 2c_2 k_2)t + 2\theta) \\
&+ A36 \cos ((k_1 - 2k_2)x - (c_1 k_1 - 2c_2 k_2)t - 2\theta) + A37 \cos ((2k_1 + k_2)x - (2c_1 k_1 + c_2 k_2)t + \theta) \\
&+ A38 \cos ((2k_1 - 2k_2)x - (2c_1 k_1 - c_2 k_2)t - \theta)
\end{aligned} \tag{2.24}$$

$$\begin{aligned}
A31 = & \frac{1}{g} \left\{ -\frac{5}{8} a_1^3 c_1^2 D1 k_1^3 + \frac{1}{2} a_1 A21 c_1^2 k_1^2 - (D1 D3 - 1) a_1 B21 c_1 k_1^2 \right. \\
& - \frac{1}{2} a_1 a_2^2 c_1 c_2 (D2 k_1 + D1 k_2) k_2 k_1 + \frac{1}{2} a_2 A23 c_2^2 k_2^2 + \frac{1}{2} a_2 A24 c_2^2 k_2^2 \\
& + \frac{1}{4} a_1 a_2^2 (c_1^2 k_1^3 D1 - 2 c_2^2 k_2^3 D2) - \frac{1}{2} a_2 B24 (c_1 k_1 + (D2 D6 - 2) c_2 k_2) (k_1 - k_2) \\
& \left. - \frac{1}{2} a_2 B23 (c_2 k_2 D2 D5 - c_1 k_1) (k_1 + k_2) \right\}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A32 = & \frac{1}{g} \left\{ -\frac{5}{8} a_2^3 c_2^2 D2 k_2^3 + \frac{1}{2} a_2 A22 c_2^2 k_2^2 - (D2 D4 - 1) a_2 B22 c_2 k_2^2 \right. \\
& \left. - \frac{1}{2} a_2 a_1^2 c_1 c_2 (D2 k_1 + D1 k_2) k_2 k_1 + \frac{1}{2} a_1 A23 c_1^2 k_1^2 + \frac{1}{2} a_1 A24 c_1^2 k_1^2 \right\}
\end{aligned}$$

$$A33 = \frac{1}{g} \left\{ \frac{1}{8} a_1^3 c_1^2 D1 k_1^3 + \frac{1}{2} a_1 A21 c_1^2 k_1^2 - (D1 D3 - 3) a_1 B21 c_1 k_1^2 + 3 B33 c_1 D D1 k_1 \right\}$$

$$A34 = \frac{1}{g} \left\{ \frac{1}{8} a_2^3 c_2^2 D2 k_2^3 + \frac{1}{2} a_2 A22 c_2^2 k_2^2 - (D2 D4 - 3) a_2 B22 c_2 k_2^2 + 3 B34 c_2 D D2 k_2 \right\}$$

$$\begin{aligned}
A35 = & \frac{1}{g} \left\{ \frac{1}{8} a_1 (c_1^2 D1 k_1^3 + 2 c_2^2 D2 k_2^3) a_2^2 + \frac{1}{4} a_1 c_1 c_2 (D1 - D2) k_1 (k_1 - k_2) k_2 a_2^2 \right. \\
& \left. + \frac{1}{2} A23 c_2^2 k_2^2 a_2 - \frac{1}{2} B23 (c_2 k_2 (D2 D5 - 2) - c_1 k_1) (k_1 + k_2) a_2 \right. \\
& \left. + \frac{1}{2} a_1 A22 c_1^2 k_1^2 + 2 a_1 B22 c_2 k_2^2 - (D1 D4 - 1) a_1 B22 c_1 k_1 k_2 \right. \\
& \left. + B35 D D3 (c_1 k_1 + 2 c_2 k_2) \right\}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A36 = & \frac{1}{g} \left\{ \frac{1}{8} a_1 (c_1^2 D1 k_1^3 + 2 c_2^2 D2 k_2^3) a_2^2 - \frac{1}{4} a_1 c_1 c_2 (D1 + D2) k_1 k_2 (k_1 + k_2) a_2^2 \right. \\
& \left. + \frac{1}{2} A24 c_2^2 k_2^2 a_2 - \frac{1}{2} B24 (c_2 k_2 (D2 D6 + 2) - c_1 k_1) (k_1 - k_2) a_2 \right. \\
& \left. + \frac{1}{2} a_1 A22 c_1^2 k_1^2 + 2 a_1 B22 c_2 k_2^2 - (D1 D4 + 1) a_1 B22 c_1 k_1 k_2 \right. \\
& \left. + B36 D D4 (c_1 k_1 - 2 c_2 k_2) \right\}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A37 = & \frac{1}{g} \left\{ \frac{1}{8} a_2 (2 c_1^2 D1 k_1^3 + c_2^2 D2 k_2^3) a_1^2 + \frac{1}{4} a_2 c_1 c_2 (D1 - D2) k_1 (k_1 - k_2) k_2 a_1^2 \right. \\
& \left. + \frac{1}{2} A23 c_1^2 k_1^2 a_1 - \frac{1}{2} B23 (k_1 + k_2) (c_1 k_1 (D1 D5 - 2) - c_2 k_2) a_1 \right. \\
& \left. + 2 a_2 B21 c_1 k_1^2 + \frac{1}{2} a_2 A21 c_2^2 k_2^2 - (D2 D3 - 1) a_2 B21 c_2 k_1 k_2 \right. \\
& \left. + B37 D D5 (2 c_1 k_1 + c_2 k_2) \right\}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A38 = & \frac{1}{g} \left\{ \frac{1}{8} a_2 (2 c_1^2 D1 k_1^3 + c_2^2 D2 k_2^3) a_1^2 - \frac{1}{4} a_2 c_1 c_2 (D1 + D2) k_1 k_2 (k_1 + k_2) a_1^2 \right. \\
& \left. + \frac{1}{2} A24 c_1^2 k_1^2 a_1 - \frac{1}{2} B24 (k_1 - k_2) (c_1 k_1 (D1 D6 - 2) + c_2 k_2) a_1 \right. \\
& \left. + 2 a_2 B21 c_1 k_1^2 + \frac{1}{2} a_2 A21 c_2^2 k_2^2 - (D2 D3 + 1) a_2 B21 c_2 k_1 k_2 \right. \\
& \left. + B38 D D6 (2 c_1 k_1 - c_2 k_2) \right\}
\end{aligned}$$

(b) 속도퍼텐셜

$$\begin{aligned}
\phi_{(3)} = & B31 \frac{\cosh k_1(h+z)}{\sinh k_1 h} \sin k_1(x-c_1 t) + B32 \frac{\cosh k_2(h+z)}{\sinh k_2 h} \sin k_2(x-c_2 t) \\
& + B33 \frac{\cosh 3k_1(h+z)}{\sinh 3k_1 h} \sin 3k_1(x-c_1 t) + B34 \frac{\cosh 3k_2(h+z)}{\sinh 3k_2 h} \sin k_2(x-c_2 t) \\
& + B35 \frac{\cosh(k_1+2k_2)(h+z)}{\sinh(k_1+2k_2)h} \sin\{(k_1+2k_2)x-(c_1 k_1+2c_2 k_2)t\} \\
& + B36 \frac{\cosh(k_1-2k_2)(h+z)}{\sinh(k_1-2k_2)h} \sin\{(k_1-2k_2)x-(c_1 k_1-2c_2 k_2)t\} \\
& + B37 \frac{\cosh(2k_1+k_2)(h+z)}{\sinh(2k_1+k_2)h} \sin\{(2k_1+k_2)x-(2c_1 k_1+c_2 k_2)t\} \\
& + B38 \frac{\cosh(2k_1-k_2)(h+z)}{\sinh(2k_1-k_2)h} \sin\{(2k_1-k_2)x-(2c_1 k_1-c_2 k_2)t\}
\end{aligned} \tag{2.25}$$

$$B31 = 0$$

$$B32 = 0$$

$$B33 = [a_1 c_1^2 k_1^3 (3-2D1D3)B21 + \frac{1}{2} a_1 c_1^3 k_1^3 (1-D1^2)A21]/(gk_1-3c_1^2 k_1^2 DD1)$$

$$B34 = [a_2 c_2^2 k_2^3 (3-2D2D4)B22 + \frac{1}{2} a_2 c_2^3 k_2^3 (1-D2^2)A22]/(gk_2-3c_2^2 k_2^2 DD2)$$

$$\begin{aligned}
B35 = & \left[g \left\{ -\frac{1}{8} a_1 a_2^2 (c_1 k_1^2 + 2c_2 k_2^2)(k_1+2k_2) - a_1 k_2 (k_1+2k_2) D4 B22 \right. \right. \\
& - \frac{1}{2} a_2 (k_1+k_2)(k_1+2k_2) D5 B23 - \frac{1}{2} a_1 c_1 k_1 (k_1+2k_2) D1 A22 \\
& \left. \left. - \frac{1}{2} a_2 c_2 k_2 (k_1+2k_2) D2 A23 \right\} + \frac{1}{4} a_1 a_2^2 c_1 c_2 k_1 k_2 (c_1 k_1 + 2c_2 k_2)(k_1-k_2)(D1-D2) \right. \\
& + \frac{1}{8} a_1 a_2^2 (c_1 k_1 + 2c_2 k_2)(c_1^2 k_1^3 D1 + 2c_2^2 k_2^3 D2) - a_1 c_1 k_1 k_2 (c_1 k_1 + 2c_2 k_2)(D1 D4 - 1) B22 \\
& + 2a_1 c_2 k_2^2 (c_1 k_1 + 2c_2 k_2) B22 - \frac{1}{2} a_2 c_2 k_2 (k_1+k_2)(c_1 k_1 + 2c_2 k_2)(D2 D5 - 1) B23 \\
& + \frac{1}{2} a_2 (k_1+k_2)(c_1 k_1 + 2c_2 k_2)(c_1 k_1 + c_2 k_2) B23 + \frac{1}{2} a_1 c_1^2 k_1^2 (c_1 k_1 + 2c_2 k_2) A22 \\
& \left. + \frac{1}{2} a_2 c_2^2 k_2^2 (c_1 k_1 + 2c_2 k_2) A23 \right] / [g(k_1+2k_2) - (c_1 k_1 + 2c_2 k_2)^2 DD3]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B36 = & \left[g \left(-\frac{1}{8} a_1 a_2^2 (c_1 k_1^2 + 2c_2 k_2^2)(k_1-2k_2) - a_1 k_2 (k_1-2k_2) D4 B22 \right. \right. \\
& \left. \left. - \frac{1}{2} a_2 (k_1-k_2)(k_1-2k_2) D6 B24 - \frac{1}{2} a_1 c_1 k_1 (k_1-2k_2) D1 A22 \right) \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{1}{2}a_2c_2k_2(k_1-2k_2)D2A24) - \frac{1}{4}a_1a_2^2c_1c_2k_1k_2(c_1k_1-2c_2k_2)(k_1+k_2)(D1+D2) \\
& + \frac{1}{8}a_1a_2^2(c_1k_1-2c_2k_2)(c_1^2k_1^3D1+2c_2^2k_2^3D2) - a_1c_1k_1k_2(c_1k_1-2c_2k_2)(D1D4+1)B22 \\
& + 2a_1c_2k_2^2(c_1k_1-2c_2k_2)B22 - \frac{1}{2}a_2c_2k_2(k_1-k_2)(c_1k_1-2c_2k_2)(D2D6+1)B24 \\
& + \frac{1}{2}a_2(k_1-k_2)(c_1k_1-2c_2k_2)(c_1k_1-c_2k_2)B24 + \frac{1}{2}a_1c_1^2k_1^2(c_1k_1-2c_2k_2)A22 \\
& + \frac{1}{2}a_2c_2^2k_2^2(c_1k_1-2c_2k_2)A24]/[g(k_1-2k_2)-(c_1k_1-2c_2k_2)^2DD4] \\
B37 = & \left[g \left\{ -\frac{1}{8}a_1^2a_2(2c_1k_1^2+c_2k_2^2)(2k_1+k_2) - a_2k_1(2k_1+k_2)D3B21 \right. \right. \\
& \left. \left. - \frac{1}{2}a_1(k_1+k_2)(2k_1+k_2)D5B23 - \frac{1}{2}a_2c_2k_2(2k_1+k_2)D2A21 - \frac{1}{2}a_1c_1k_1(2k_1+k_2)D1A23 \right\} \right. \\
& + \frac{1}{4}a_1^2a_2c_1c_2k_1k_2(2c_1k_1+c_2k_2)(k_1-k_2)(D_1-D_2) + \frac{1}{8}a_1^2a_2(2c_1k_1+c_2k_2)(2c_1^2k_1^3D1+c_2^2k_2^3D2) \\
& - a_2c_2k_1k_2(2c_1k_1+c_2k_2)(D2D3-1)B21 + 2a_2c_1k_1^2(2c_1k_1+c_2k_2)B21 \\
& \left. - \frac{1}{2}a_1c_1k_1(k_1+k_2)(2c_1k_1+c_2k_2)(D1D5-1)B23 \right. \\
& + \frac{1}{2}a_1(k_1+k_2)(2c_1k_1+c_2k_2)(c_1k_1+c_2k_2)B23 + \frac{1}{2}a_2c_2^2k_2^2(2c_1k_1+c_2k_2)A21 \\
& \left. + \frac{1}{2}a_1c_1^2k_1^2(2c_1k_1+c_2k_2)A23 \right] / [g(2k_1+k_2)-(2c_1k_1+c_2k_2)^2DD5] \\
B38 = & \left[g \left\{ -\frac{1}{8}a_1^2a_2(2c_1k_1^2+c_2k_2^2)(2k_1-k_2) - a_2k_1(2k_1k_2)D3B21 \right. \right. \\
& \left. \left. - \frac{1}{2}a_1(k_1-k_2)(2k_1-k_2)D6B24 - \frac{1}{2}a_2c_2k_2(2k_1-k_2)D2A21 - \frac{1}{2}a_1c_1k_1(2k_1-k_2)D1A24 \right\} \right. \\
& \left. - \frac{1}{4}a_1^2a_2c_1c_2k_1k_2(2c_1k_1-c_2k_2)(k_1+k_2)(D1+D2) \right. \\
& + \frac{1}{8}a_1^2a_2(2c_1k_1-c_2k_2)(2c_1^2k_1^3D1+c_2^2k_2^3D2) - a_2c_2k_1k_2(2c_1k_1-c_2k_2)(D2D3+1)B21 \\
& + 2a_2c_1k_1^2(2c_1k_1-c_2k_2)B21 - \frac{1}{2}a_1c_1k_1(k_1-k_2)(2c_1k_1-c_2k_2)(D1D6-1)B24 \\
& + \frac{1}{2}a_1(k_1-k_2)(2c_1k_1-c_2k_2)(c_1k_1-c_2k_2)B24 + \frac{1}{2}a_2c_2^2k_2^2(2c_1k_1-c_2k_2)A21 \\
& \left. + \frac{1}{2}a_1c_1^2k_1^2(2c_1k_1-c_2k_2)A24 \right] / [g(2k_1-k_2)-(2c_1k_1-c_2k_2)^2DD6]]
\end{aligned}$$

$$B36 = \left\{ \begin{array}{l} k_1 > 2k_2 : \frac{a_1 a_2^2 c_1 k_1 (2k_2 - k_1)}{2} \\ 2k_2 > k_1 > k_2 : \frac{a_1 a_2^2 c_1 c_2 k_1 k_2 (3c_2 k_2 - 2c_1 k_1)(2k_2 - k_1)}{2(c_1 k_1 - c_2 k_2)^2} \\ 2k_2 > k_1 : \frac{a_1 a_2^2 c_1 c_2 k_1^2 k_2 (3c_2 k_2 - 2c_1 k_1)}{2(c_1 k_1 - c_2 k_2)^2} \end{array} \right\}$$

$$B38 = \left\{ \begin{array}{l} 2k_1 > k_2 : \frac{a_1^2 a_2 c_1 c_2 k_1 k_2^2 (3c_1 k_1 - 2c_2 k_2)}{2(c_1 k_1 - c_2 k_2)^2} \\ 2k_1 > k_2 > k_1 : \frac{a_1^2 a_2 c_1 c_2 k_1 k_2 (3c_1 k_1 - 2c_2 k_2)(2k_1 - k_2)}{2(c_1 k_1 - c_2 k_2)^2} \\ k_2 > 2k_1 : \frac{a_1^2 a_2 c_2 k_2 (2k_1 - k_2)}{2} \end{array} \right\}$$

(c) 속도

x방향의 속도 ;

$$\begin{aligned}
u_{(3)} = & k_1 B31 \frac{\cosh k_1 (h+z)}{\sinh k_1 h} \cos k_1 (x - c_1 t) + k_2 B32 \frac{\cosh k_2 (h+z)}{\sinh k_2 h} \cos k_2 (x - c_2 t + \theta) \\
& + 3k_1 B33 \frac{\cosh 3k_1 (h+z)}{\sinh 3k_1 h} \cos 3k_1 (x - c_1 t) + 3k_2 B34 \frac{\cosh 3k_2 (h+z)}{\sinh 3k_2 h} \cos 3k_2 (x - c_2 t + \theta) \\
& + (k_1 + 2k_2) B35 \frac{\cosh (k_1 + 2k_2)(h+z)}{\sinh (k_1 + 2k_2)h} \cos [(k_1 + 2k_2)x - (c_1 k_1 + 2c_2 k_2)t + 2\theta] \quad (2.26) \\
& + (k_1 - k_2) B36 \frac{\cosh (k_1 - 2k_2)(h+z)}{\sinh (k_1 - 2k_2)h} \cos [(k_1 - 2k_2)x - (c_1 k_1 - 2c_2 k_2)t - 2\theta] \\
& + (2k_1 + k_2) B37 \frac{\cosh (2k_1 + k_2)(h+z)}{\sinh (2k_1 + k_2)h} \cos [(2k_1 + k_2)x - (2c_1 k_1 + c_2 k_2)t + \theta] \\
& + (2k_1 - k_2) B38 \frac{\cosh (2k_1 - k_2)(h+z)}{\sinh (2k_1 - k_2)h} \cos [(2k_1 - k_2)x - (2c_1 k_1 - c_2 k_2)t - \theta]
\end{aligned}$$

Z방향의 속도 ;

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

$$\begin{aligned}
& + (k_1 - k_2)B36 \frac{\sinh(k_1 - 2k_2)(h + z)}{\sinh(k_1 - 2k_2)h} \sin[(k_1 - 2k_2)x - (c_1k_1 - 2c_2k_2)t - 2\theta] \\
& + (2k_1 + k_2)B37 \frac{\sinh(2k_1 + k_2)(h + z)}{\sinh(2k_1 + k_2)h} \sin[(2k_1 + k_2)x - (2c_1k_1 + c_2k_2)t + \theta] \\
& + (2k_1 - k_2)B38 \frac{\sinh(2k_1 - k_2)(h + z)}{\sinh(2k_1 - k_2)h} \sin[(2k_1 - k_2)x - (2c_1k_1 - c_2k_2)t - \theta]
\end{aligned} \tag{2.27}$$

이상과 같이, 천수파 중에서 두개의 파를 합성하였을 경우 파면의 형상, 속도 퍼텐셜, 유체입자의 유속을 삼차 항까지 섭동법을 이용하여 수학적으로 표현하였다.



제 3 장. PIV 실험 개요

3.1. 실험 재원

본 논문에 사용된 실험 재원을 Table 3.1.에 나타내었으며, 각각의 상세한 이미지들은 Fig.3.1.~ 3.6.에 나타내었다.

Table 3.1. 실험 재원

실험 재원	실험 조건
Solo PIV ND-YAG Laser(Fig.3.1.)	Solo Laser Head : $\lambda=532\text{nm}$ Rate : 10Hz, dt : 0.001s, Trigger mode
CCD-camera (Red Lake Mega-Plus II ES 2001) (Fig.3.2.)	Pixel Size : $7.4\mu\text{m}$ (square format) Resolution : 1600 *1200 pixel (1.9Mpixel) Active Area : 11.8mm H * 8.9mm V Bit Depth : 8 bits per color CameraLink : 30 fps Firewire : 24 fps (8bit monochrome)
Nikon AF 60mm 1:2.8D (Fig.3.3.)	f 5.6
Vestosint 2157 (Polyamid 12)	57μm, 1.02g/cm³
Capacity Type Wave Height Meter -Main Body (CH-608) (Fig.3.4.)	Channel number : 8 channel Measuring mode : $\times 1$ Calibration voltage : 1
Capacity Type Wave Height Meter -Detector (CHT4-60) (Fig.3.4.)	Max. wave height measurement : 60cm Linearity error : $\pm 0.5\%$ F.S Response : 30Hz
SERVO TYPE WAVE HEIGHT METER -Main Body (SH-301) (Fig.3.5.)	Channel number : 1 channel Output voltage : ± 3 ($\pm 5\text{V Max}$) Calibration voltage : 0.50%, 100% ($\pm 0.1\%$ FS) Maximum measuring wave height: 300mm ($\pm 150\text{mm}$)
SERVO TYPE WAVE HEIGHT METER -Detector (SHT3-30) (Fig.3.5.)	Response(wave height) : $\pm 25\text{mm} \rightarrow 5.6\text{Hz}$, $\pm 50\text{mm} \rightarrow 3.8\text{Hz}$, $\pm 75\text{mm} \rightarrow 2.6\text{Hz}$, $\pm 100\text{mm} \rightarrow 1.9\text{Hz}$, $\pm 150\text{mm} \rightarrow 1.5\text{Hz}$. Linear velocity : 1.2 m/s
2-D Wave Tank (Fig.3.6.)	25m(L) \times 1m(W) \times 1.1(H), Water Depth : 0.8m
Wave Maker (Fig.3.6.)	파고생성 가능범위 (0.07m ~ 0.22m) Piston Type

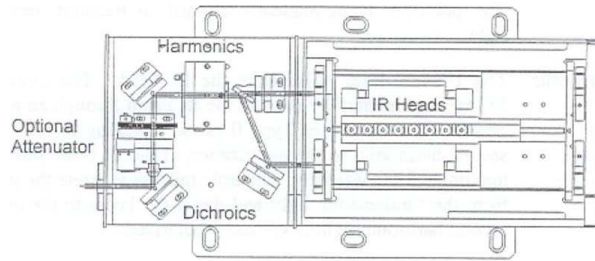


Fig.3.1. Solo PIV ND-YAG Laser Head

Fig.3.1.은 PIV실험에서 사용되는 고에너지 밀도를 갖는 ND-Yag Laser의 Head 부분을 나타낸 것으로써 유동계측을 위한 미소시간간격(dt) 확보가 용이하며, $532nm$ 파장에서 최대 출력 에너지는 $120mJ/pulse$, 펄스폭(pulse width)은 $3\sim 5ns$ 이다.



Fig.3.2. CCD-camera(Red Lake Mega-Plus II ES 2001)

Fig.3.2.은 본 논문에 사용된 고화질의 CCD 카메라로 1600×1200 pixel이며, pixel size는 $7.4\mu m \times 7.4\mu m$, 최대 프레임은 30Hz인 Red Lake Mega-Plus II ES 2001이다.



Fig.3.3. Nikon AF 60mm 1:2.8D

Fig.3.3.은 **Fig.3.2.**의 CCD 카메라에 사용된 D마운트, f -number가 2.8인 Auto-focus가 되는 Nikon의 60mm 단렌즈이다.



Fig.3.4. Capacity Type Wave Height Meter

Fig.3.4.은 본 논문의 4장에서 쇄파의 파고를 측정 할 때 사용된 KENEK의 용량식 파고계이다. 측정원리는 수중으로부터 해면상에 연직으로 설치되어 있는 전선과 해수 사이의 전기적 용량이 수위의 상하에 따라서 변화하는 것을 기초로 하며, 출력 값에 대한 선형성과 응답성이 좋다. 그러나 여러 대의 파고계를 근접하여 관측할 경우 상호간섭이 생겨 관측 값에 오차가 생길 수 있으며, 케이블의 길이의 한계가 있고, 해수에 대한 저항이 나쁘게 되면 출력 값이 달라질 수 있다는 단점이 있다.

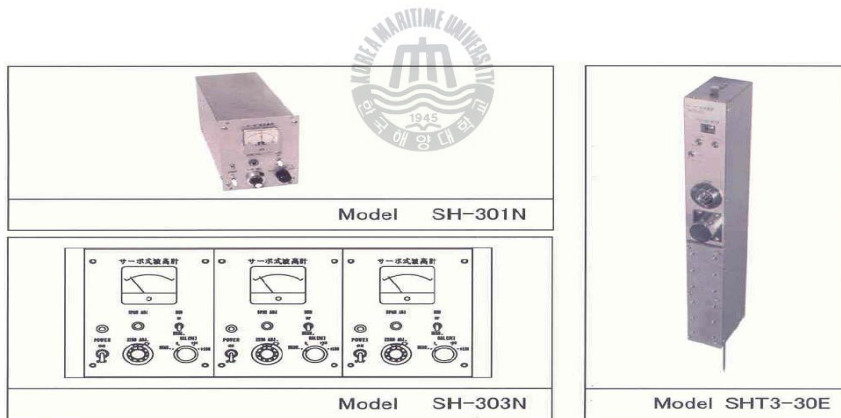


Fig.3.5. Servo Type Wave Height Meter

Fig.3.5.은 본 논문의 5장에서 구조물 전·후 파고측정을 할 때 사용된 KENEK의 서보식 파고계이다. 침 전극 끝부분이 수위 변화에 따라 Real Time으로 Servo motor에 의해 上,下로 움직이면서, Servo motor와 기계적으로 연동된 Potentiometer에 의해 파고출력을 하는 원리이다. 소형이며, 고성능인 파고계로 분해가능과 응답성이 뛰어나며, 안정성도 지극히 양호하다. 그러나 급격히 변하는 파형에서는 활용도가 떨어진다.

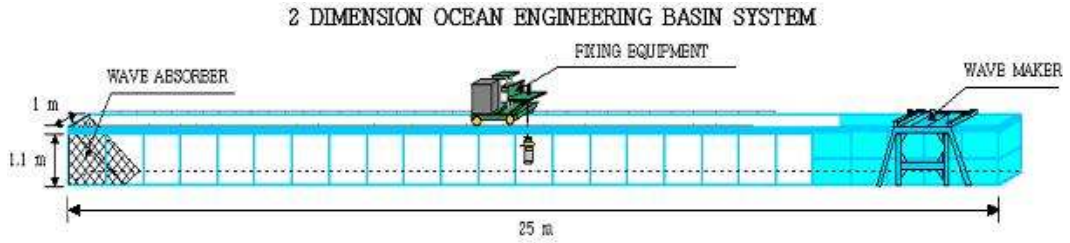


Fig.3.6. Schematic of 2 Dimensional Ocean Engineering Basin

Fig.3.6.은 본 논문에서 사용된 수조로 25m×1.0m×1.1m(L×W×H)의 2차원 조파수조로 조파기(wave maker)는 피스톤형식이며, 파형생성 가능범위는 0.07m ~ 0.22m 이고, 파형생성 가능한 주파수범위(frequency range)는 0.5/s~2.0/s이다. 또한 다종의 선형파 및 ISSC, ITTC, JONSWAP 등을 적용한 불규칙파형 생성이 가능하다. 본 논문에서는 흘수(water depth)를 0.8m로 두고 실험을 수행하였다.



3.2. PIV (Particle Image Velocity) 기법

PIV의 종류를 입자영상으로부터 입자변위를 구하는 방법에 따라 속도장 측정기법을 분류하면 PSV(Particle Streak Velocimetry), PIV(Particle Image Velocimetry), PTV(Particle Tracking velocimetry), LSV(Laser Speckle Velocimetry) 등으로 나누어진다.

PSV 방식은 카메라의 노출시간을 길게 함으로써 형성된 유맥선(streak)을 노출시간(Δt)으로 나누어줌으로써 속도를 구하는 방법으로 개념이 간단하고 초기에 개발된 속도장 측정법이다. 일반적으로 방향 모호성(directional ambiguity)의 문제가 있으므로 coding법이나 image shift 방법 등을 활용하여 해결되어야 하며, 입자수가 많거나 유동구조가 복잡한 난류유동에는 적용할 수 없다.

PTV 방식은 연속적으로 획득된 여러 장의 입자화상으로부터 각각의 입자위치들을 추출한 후, 그 입자 하나하나를 추적함으로써 입자변위를 결정하여 속도벡터를 구하는 방식이다. PTV 방식은 각각의 입자위치에서의 진정한 Lagrangian 속도벡터를 제공하며, 속도의 방향 모호성이 없다. 이와 같은 PTV방식은 유동영상에서 개별 입자 영상이 분별 가능할 정도로 낮은 입자밀도를 갖는 유동에 유용하며, 3차원 계측으로의 확장이 용이하다.

PIV기법에서는 다중 펄스광(multiple pulse)에 의해 산란된 입자영상을 카메라로 취득한 후, 하나의 유동화상을 여러 개의 미소 조사구간(interrogation window)으로 나누고, 미소 조사구간 내 입자들의 상관함수를 계산하여 가장 큰 상관계수를 갖는 위치를 구하고 이 변위를 시간간격 Δt 로 나누어 줌으로써 그 조사구간의 대표속도를 구하게 된다. 초기에는 조사구간 내 산란입자 영상이 계조치(gray level) 분포에 대한 Fourier 변환이나 광학적 방법으로 상관계수를 계산하였으나, 최근에는 순간 입자화상을 디지털화한 후, 자기상관(auto-correlation)방식 혹은 상호상관(cross-correlation)방식으로 상관계수를 직접 계산함으로써 속도장을 구하고 있다. 자기상관방식의 PIV기법은 하나의 frame에 입자영상을 다중 노출시키는 방식으로 속도벡터 산출 시 방향 모호성 문제가 발생하게 되므로 이 문제를 해결하여야 한다. 일반적으로 PIV 방식은 입자밀도가 큰 경우에 적용되며 유한한 크기의 조사구간을 대표하는 속도를 추출함으로써 제한된 공간분해능을 지닌다.

LSV방법은 입자영상의 밀도가 너무 높아 개개의 입자들을 구분할 수 없을 경

우에 이중 노출방식으로 조명 된 레이저 평면광에 의해 형성된 speckle 간섭무늬(interference pattern)를 화상처리 하여 속도장을 산출하는 방식이다. LSV는 PIV 범주에 포함되기도 하지만, 화상의 기록방법과 처리과정이 PIV와는 약간 차이가 난다. 이와 같은 화상처리를 이용한 여러 가지 속도장 측정기법 중에서 최근에는 PIV(Particle Image Velocimetry)와 PTV(Particle Tracking Velocimetry)의 2가지가 주로 사용되고 있다.

이중 본 논문에서 사용된 속도장 측정기법은 PIV기법이며, 이미지 취득을 위해 사용된 이미지 기록방법은 Fig.3.7.에서 볼 수 있듯이 double-frame / single-pulsed method 이다.

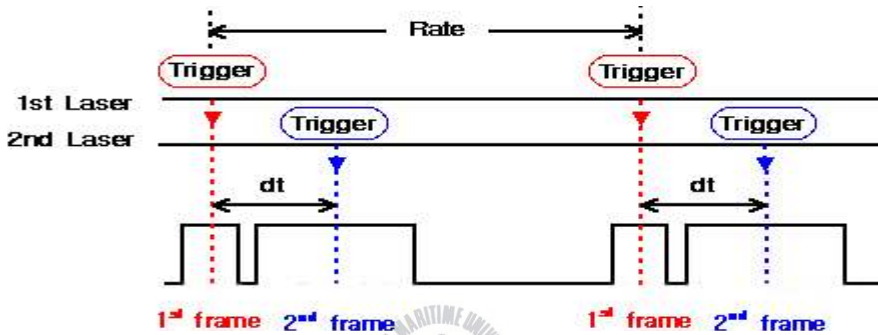


Fig.3.7. Imaging recording method: double-frame/single-pulsed method

이 시스템(Fig.3.7.)은 속도벡터를 얻기 위한 두 장의 이미지사이의 시간간격 (dt)을 임의로 조정할 수 있어, 짧은 시간동안 이동된 입자의 연속된 이미지를 취득할 수 있다. 본 논문에서 첫 번째 프레임과 두 번째 프레임의 시간차(dt)는 1ms, Rate는 10Hz로 설정하였으며, 취득된 PIV이미지는 Fig.3.8.와 같다.

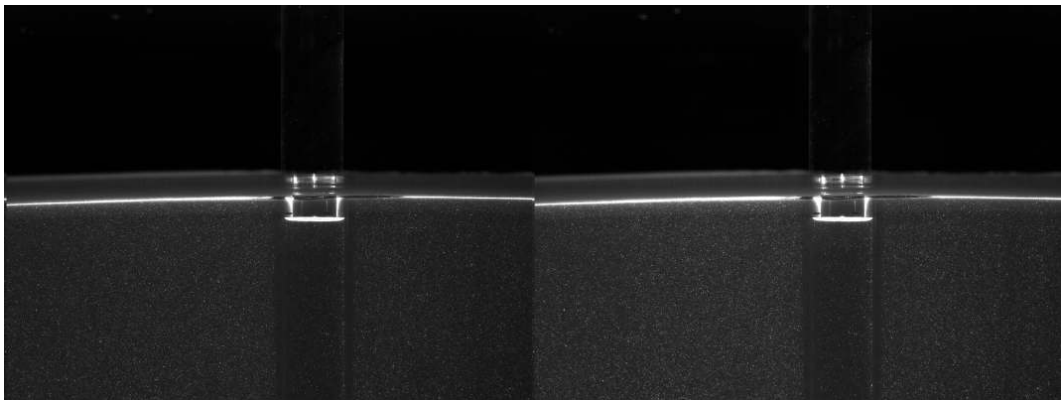


Fig.3.8. Pair of images taken by double-frame/single-pulsed

PIV로부터 유동을 측정할 때 측정의 정확도는 추적입자의 거동, 입자의 변위 장으로부터 속도장을 추출할 때의 필터링 효과, 영상을 얻는 광학계의 비선형적 효과 등에 의해 좌우되며 어느 특정한 위치에서 국소적인 영향이 커지기도 한다. 필터링 효과를 감소시키기 위해서는 탐색영역의 크기를 줄여야 하나, 추출 구간속의 입자수, 변위의 크기 등에 의해 또 다른 오차가 발생한다. 따라서 알맞은 탐색영역(interrogation size)의 결정이 중요하다.

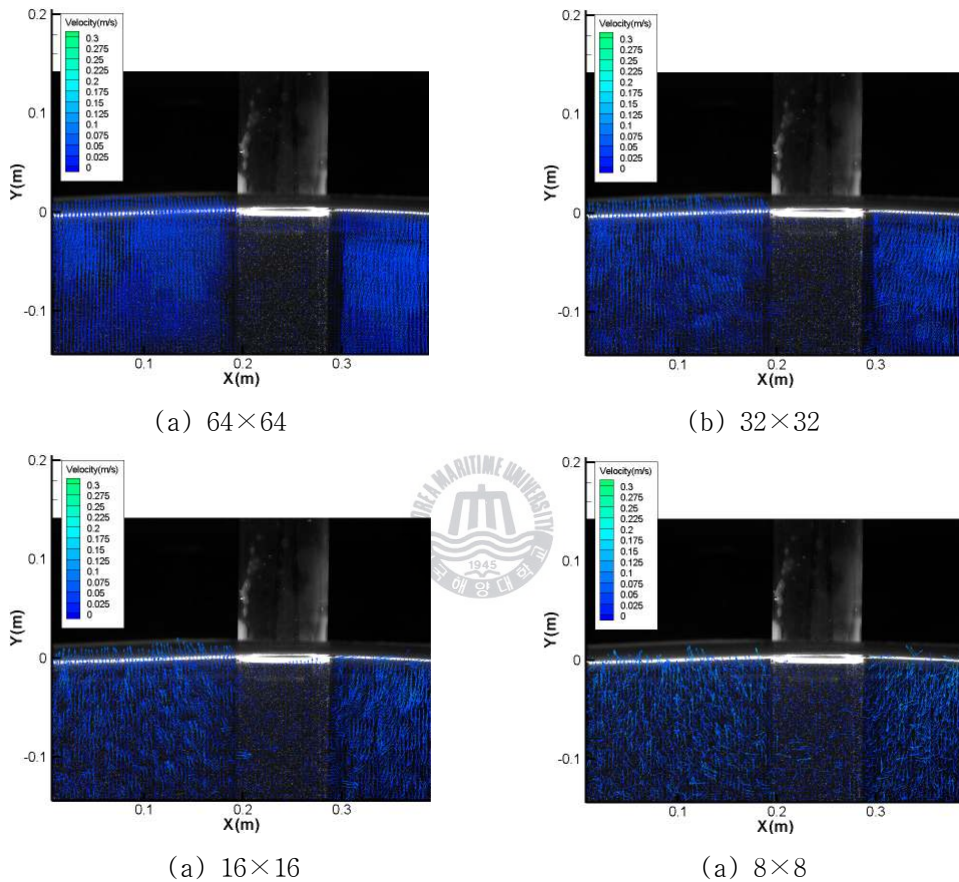


Fig.3.9. Variation of velocity field with respect to the interrogation window size

Fig.3.9.는 interrogation window size에 따른 variation of velocity field를 나타낸 것이다. 미소조사구간의 크기가 작아짐에 따라 공간 분해능이 강화되어 보다 상세한 유동구조와 와도분포를 보여주고 있다. 그러나 8×8 pixel의 경우 추출 구간속의 입자수가 적어짐에 따라 국소적으로 변위의 크기가 증가하여, 오차가 발생되고 있다.

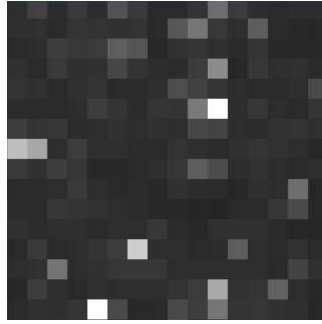


Fig.3.10. Particle image diameter

Fig.3.10.는 16×16 pixel의 조사구간을 나타내고 있으며, 입자직경(d_τ)이 약1~2 pixel에 걸쳐서 나타나고 있다. 이는 CCD카메라의 낮은 해상도와 레이저 광원에 의한 산란에 의해 입자가 뭉개져 보이는 것이다.

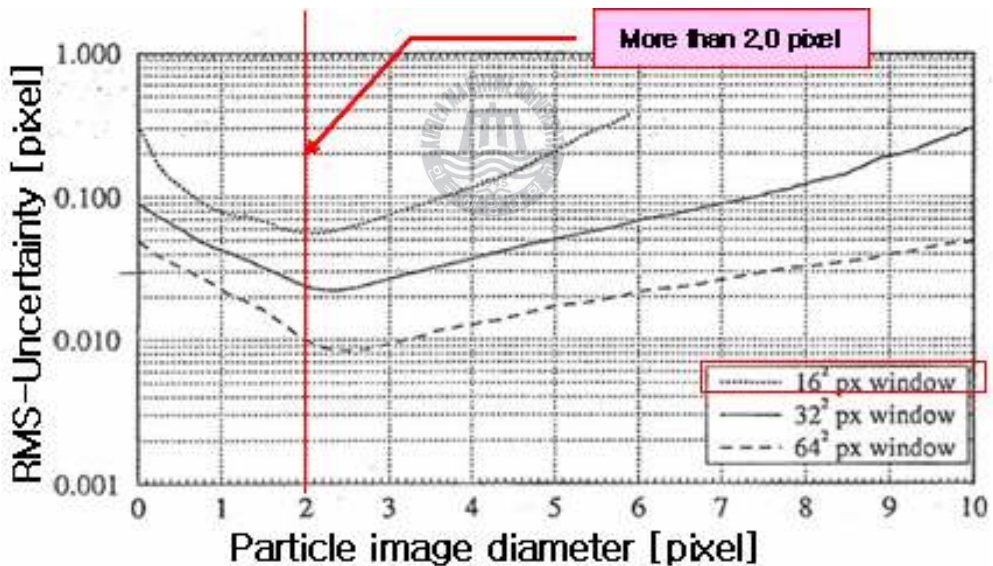


Fig.3.11. RMS random error vs. particle image diameter

Fig.3.11.는 digital PIV 속도장 추출과정에 나타나는 입자크기에 따른 RMS uncertainty를 보여주고 있다. 입자직경이 $d_\tau=2$ 픽셀 정도일 때, uncertainty가 최소가 되어 최적 직경(optical diameter)이 2 pixel 정도이며, 미소조사구간의 크기가 커질수록 최적 직경은 조금씩 증가하고 있다.

따라서 본 논문에서는 상세한 유동구조와 와도분포를 보기 위하여 조사구간을 최대한 작게 하면서도 오차가 적은 16×16 pixel로 미소조사구간을 설정하여 분석하였다.



Fig.3.12. Wave profile image by using PIV technique

Fig.3.12.은 본 논문에서 사용된 2차원수조에서의 PIV실험을 위한 실험장비와 데이터해석 시스템을 나타낸 것이다. 과고계와 조파기, CCD camera 간의 동기화를 시키기 위하여 레이저의 trigger mode를 사용하였으며, 동기화를 통하여 항상 일정하게 제어된 정보를 얻어 분석할 수 있다.

PIV실험을 위해서 입자의 크기는 $57 \mu\text{m}$, 밀도는 $1.02\text{g}/\text{cm}^3$ 인 Vestosint 2157(Polyamid12)을 사용하였다. 레이저 등 상세한 규격설명은 Table 3.1.을 참조하기 바란다.

제 4 장. PIV 기법을 이용한 쇄파현상 해석

4.1. 실험방법

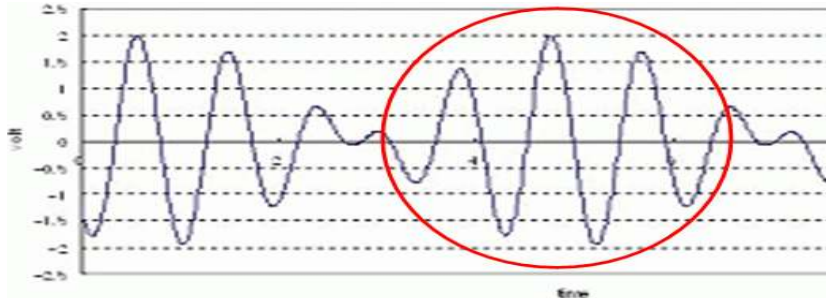


Fig.4.1. nonlinear wave[$w_1=6.98(H:6.77)+w_2=5.71(H:7.292)$]

두성분파의 주파수는 각각 $w_1 = 6.28$ 와 $w_2 = 5.71$ 으로 조파기에서 전송하는 신호를 미리 합성하여 합성파를 생성하였다. 생성된 파는 조파기에서 4m 떨어진 곳에서 쇄파가 일어나며, 이 지점에 용량식 파고계를 설치하여 파면의 상승량을 측정하였다.



4.2. 실험결과 및 해석

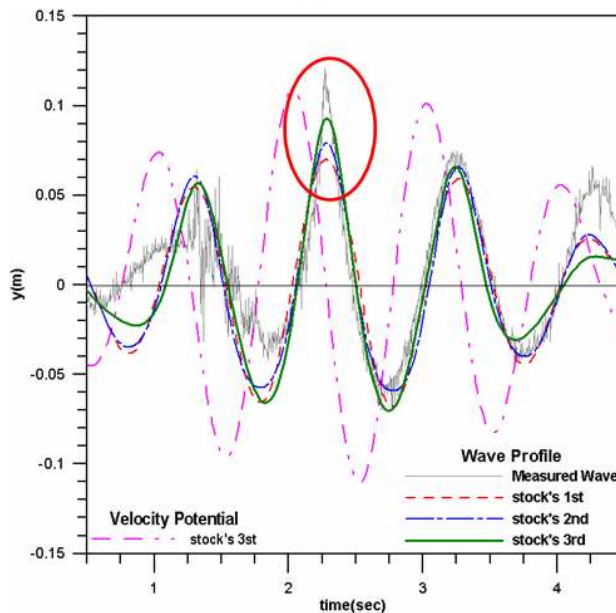


Fig.4.2. Wave profile of 2-component waves in breaking status.

Fig.4.2.는 2성분합성파에서 쇄파가 일어날 때 파고계로 측정한 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 3차근사값을 표시한 것이다. 원으로 표시한 부분은 시간축에 있어서 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 과정이 전진하는 파속에 비하여 유체입자의 속도가 더 크게 되어 포말을 일으키며 에너지를 소실하는 것을 말한다.

따라서 과정부분에서 파형의 실험치가 stock's 이론값 보다 더 크게 나타나는 것은 포말이 깨지면서 용량식파고계의 센서 위쪽까지 올라가는데 기인한 것으로 판단된다. 그러나 쇄파가 발생하는 것은 파고가 높아 비선형성이 크게 나타나는 현상으로 3차 근사값이 저차 근사값보다 실험치에 가깝게 나타나는 것을 알 수 있다.

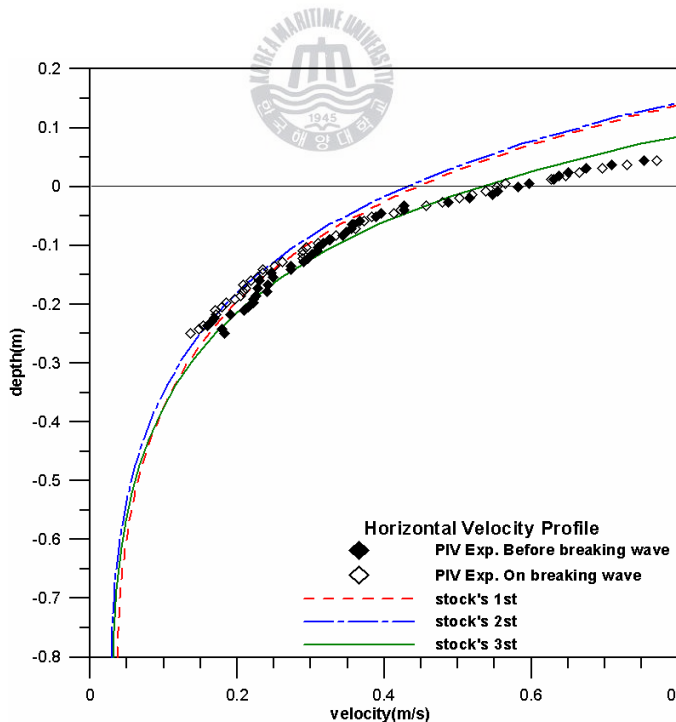


Fig.4.3. Horizontal velocity profile of particle in breaking wave of 2-component waves.

Fig.4.3.은 2성분합성파의 쇄파지점에서 수심방향으로 속도에 변화를 나타낸 것이다. ◆는 쇄파가 일어나기 직전 수평방향속도의 실험값이고, ◇는 쇄파가 일어나는 순간의 실험값을 나타내고, 점선, 1점쇄선 및 실선은 stock's 1차 근사값, 2차 근사값, 3차 근사값을 각각 나타내고 있다. 실험값이 정지수면 아랫부분에서는 비교적 이론값과 유사한 값을 가지나, 정지수면에 가까워지면서 비선형의 영향으로 속도가 이론치보다 크게 나타난다는 것을 알 수 있다. 특히 1, 2차계산값에 비하여 3차계산값이 비교적 실험에 잘 일치하고 있다는 것을 보여주고 있다.

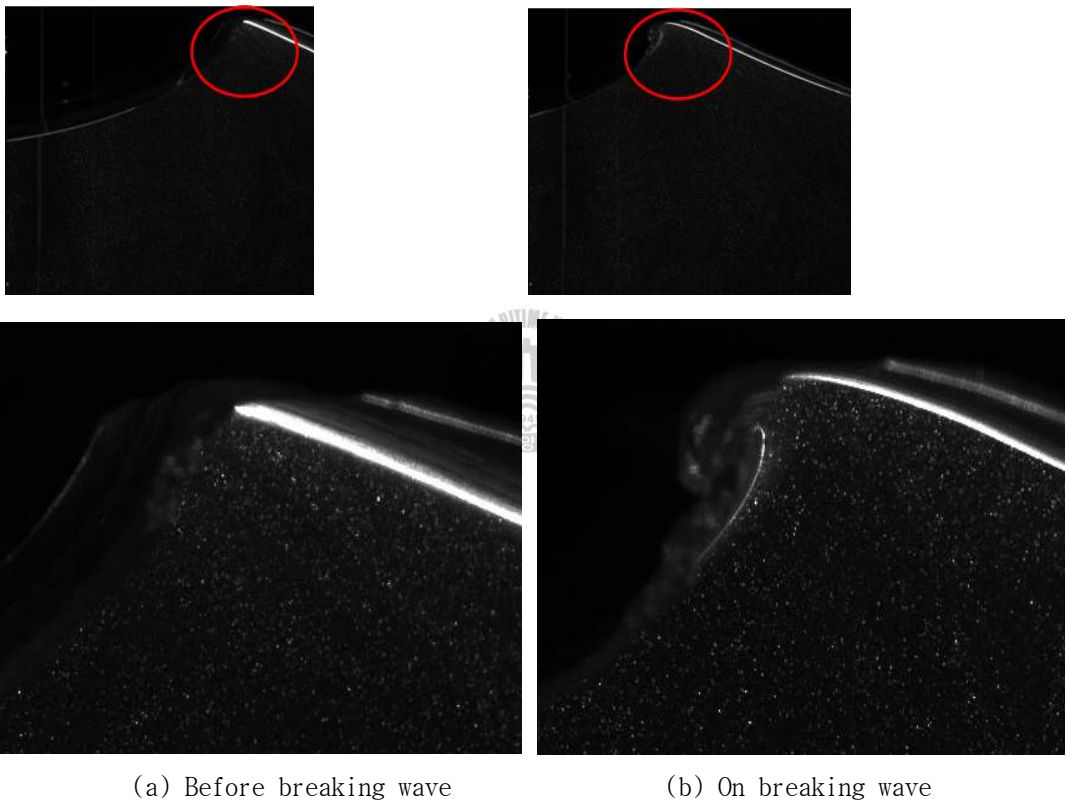


Fig.4.4. Wave profile image by using PIV technique.

Fig.4.4.는 PIV실험을 통하여 얻어진 이미지로 파면이 선명하게 나타나고 있다. (a)는 쇄파가 일어나기 직전의 이미지이고, (b)는 쇄파가 일어난 순간에 이 이미지이다. (b)의 파정부분에서는 파형이 부서져 와동이 일어나고 있는 것을 확인 할 수 있다.

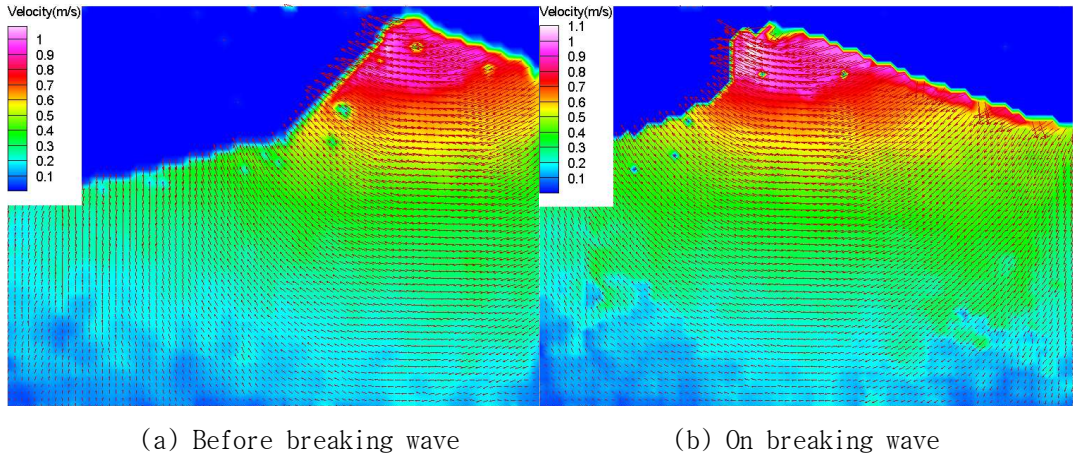
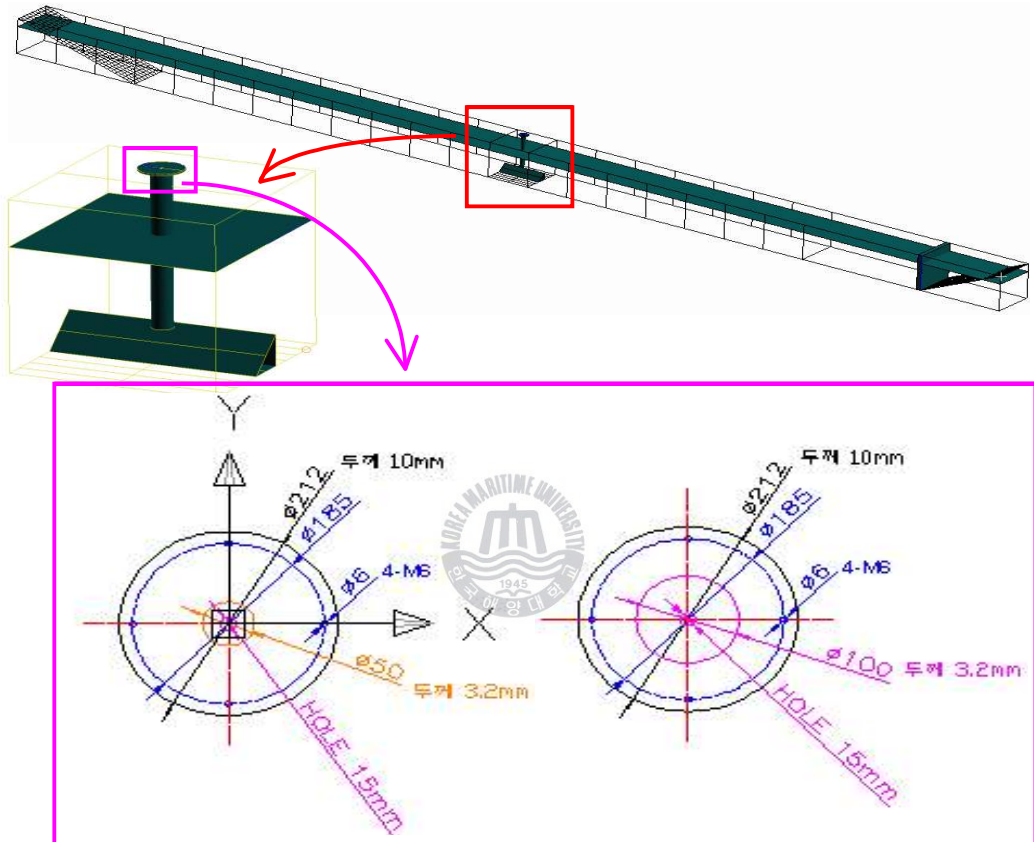


Fig.4.5. Particle velocity distribution.

Fig.4.5.는 **Fig.4.4.**의 이미지를 벡터해석 한 이미지로 속도벡터와 속도분포도를 나타내고 있다. (a)는 쇄파가 일어나기 직전의 속도분포이고, (b)는 쇄파가 일어나는 순간 속도분포를 표시하고 있다. 파정의 정점에서 연직하방향의 속도분포는 **Fig.4.3.**에 나타낸 바와 같이 비슷한 속도분포를 가지지만, 파정의 뒷부분은 쇄파가 일어나기 직전이 쇄파 일어난 직후 보다 속도가 더 빠른 경향을 보여준다. 그리고 쇄파가 일어나기 직전에는 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.

제 5 장. PIV 기법을 이용한 실린더 주변 유동해석

5.1. 실험방법



(a) 실린더길이:1m, 실린더외경:0.05m (b) 실린더길이:1m, 실린더외경:0.1m

Fig.5.1. 조파수조 내 실험위치 및 구조물 상세도

Fig.5.1.는 2차원 조파수조에서 PIV 실험을 위하여 구조물을 설치한 위치와 그에 따른 상세도를 나타낸 것이다. 본 논문에서는 실린더 길이는 같으나, 실린더 외경이 다른 2가지의 구조물을 가지고 실험을 수행하였으며, 각각의 실린더에는 실린더 내부 공기압을 고려하여, 실린더 내경 단면적의 1/100에 해당하는 면적의 구멍을 실린더 측면에 뚫었다. (a)는 실린더 길이가 1m이고 실린더 외경이0.1m, (b)은 실린더 길이가 1m이고 실린더 외경이 0.05m이다.

Table 5.1. Wave Condition.

주기(sec)	Stroke	파고(cm)	최대파경사각(degree)
0.7	7	1.3	3.059
0.7	30	5.4	12.705
0.8	10	2.2	3.963
0.8	35	5.7	10.268
0.9	12	2.4	3.416
0.9	50	8.4	11.956
1.0	15	2.5	2.882
1.0	60	10.2	11.759
1.1	20	3.3	3.144
1.1	75	12.3	11.719

본 논문에서는 파랑 중 고정 실린더 구조물의 주기와 최대파경사각에 따른 유동해석을 목적으로 하고 있기에 Table 5.1.와 같은 wave condition을 설정하였다. 0.7~1.1 사이의 주기이며, 각각의 주기별로 linear wave(4° 이하)와 nonlinear wave(10° 이상)으로 실험하였다.

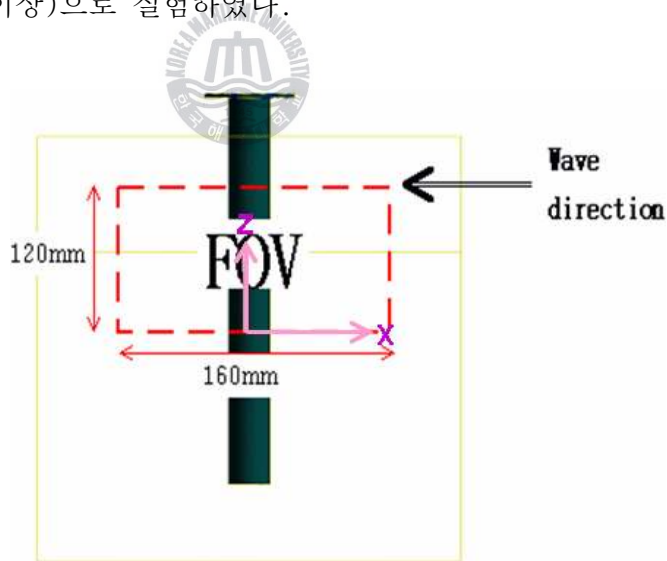


Fig.5.2. PIV측정 FOV(Field Of View).

본 실험에서의 최대단주기 0.7과 최대장주기 1.1까지의 주기별 실린더 주변의 유동장 해석 및 와의 거동 분석을 위해 FOV(Field Of View)을 Fig.5.2.와 같이 설정하고, 160 × 120 mm² 이미지를 취득하였다.

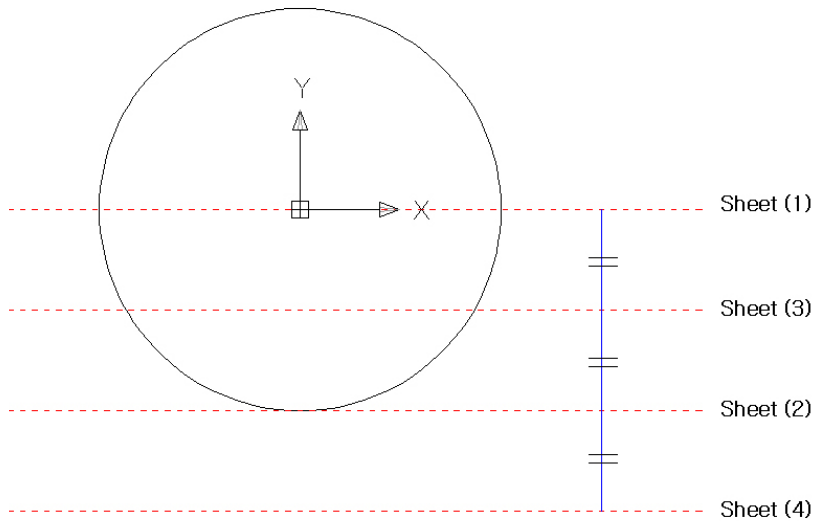


Fig.5.3. PIV Laser Sheet 촬영구간

PIV실험을 통해 획득한 이미지는 모든 case에 대해 10Hz로 취득하였으며, **Fig.5.3.**는 PIV Laser Sheet 촬영구간을 나타내고 있다. 우선 Sheet(1)은 실린더 직경과 2차원조파수조의 한가운데이며, Sheet(2)는 실린더 직경의 끝단 부분을 나타내고 있다. Sheet(3)은 Sheet(1)과 Sheet(2) 거리의 1/2 지점이며, Sheet(4)는 Sheet(1)과 Sheet(3)의 거리만큼 떨어진 지점이다. 본 논문에 현재 수행한 실험은 Laser Sheet(1)에 대한 실험이며, 차후 Sheet(2)~Sheet(4)까지 수행하여 3차원적인 PIV 이미지 구축을 할 예정이다.

모든 실험은 2차원조파수조의 흘수가 0.8m이고, 실린더의 흘수가 0.6m일 때 0.7~1.1 주기까지 각각 linear wave(4° 이하)와 nonlinear wave(10° 이상)으로 실험하였고, 조파수조내의 상태가 준정상상태(Quasi-steady state)가 되는 이후로부터 이미지를 취득하여 분석하였다.

또한 구조물 전·후면 0.17m에서 저항식 파고계를 이용하여 100Hz로 자유수면의 데이터를 취득하였다.

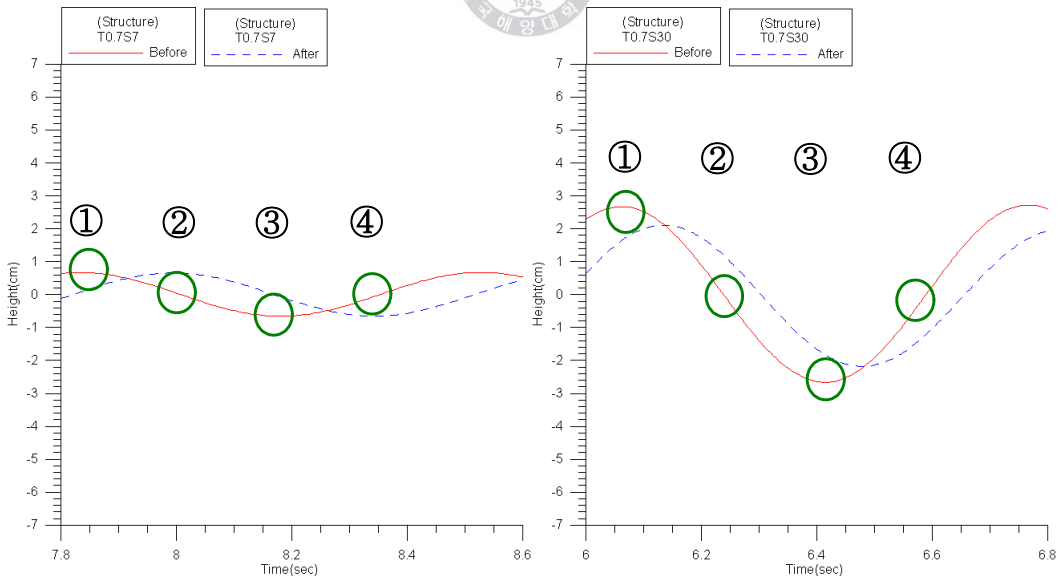
5.5. 실험결과 및 해석

5.5.1. 구조물 전·후 파고 변화

직경이 0.05m인 실린더와 직경이 0.1m인 실린더를 수조에 고정한 후 조파수조가 준정상상태(Quasi-steady state)가된 이후에 저항식 파고계를 이용하여 시간에 따른 파고를 측정하는 것을 나타내었다. 이 중 PIV 이미지를 취득하여 분석한 파의 한주기를 나타내었으며, 저항식 파고계는 구조물 전·후에 0.17m 떨어진 곳에 설치하였고, 100Hz로 자유수면의 데이터를 취득하였다.

Fig.5.4.~5.5.에서 좌측편(a,c,e,g,i)은 최대파경사각이 4° 이하의 linear wave이고, 우측편(b,d,f,h,j)은 최대파경사각이 10° 이상인 nonlinear wave이다. 또한 일직선은 구조물 앞 0.17m, 점선은 구조물 후 0.17m 떨어진 곳에서 측정된 값으로 구조물에 의하여 전·후의 파고의 값이 차이가 나는 것을 볼 수 있다.

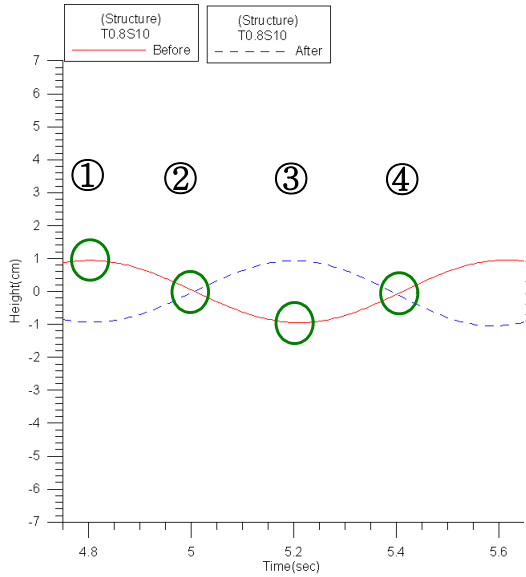
굵은 원으로 표시된 부분은 한주기내에서 파정(①)과 파저(③), 과도파면(②, ④)을 표시한 것으로 PIV로 해석한 부분을 나타낸 것이다.



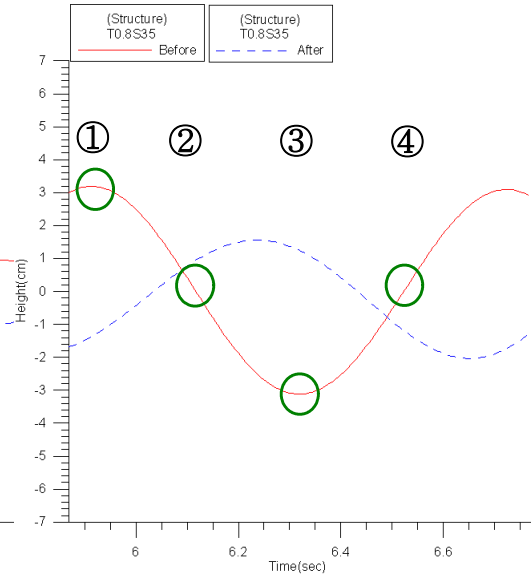
(a) $T=0.7$, $H=1.3\text{cm}$, $\alpha_0=3.059^\circ$

(b) $T=0.7$, $H=5.4\text{cm}$, $\alpha_0=12.705^\circ$

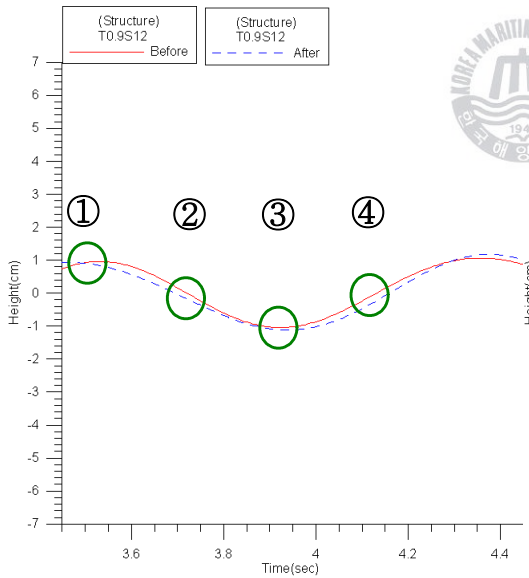
- Continued -



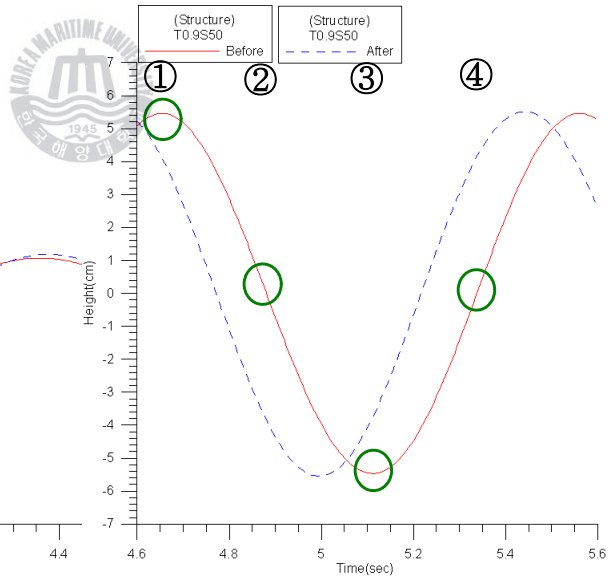
(c) $T=0.8$, $H=2.2\text{cm}$, $\alpha_0=3.963^\circ$



(d) $T=0.8$, $H=5.7\text{cm}$, $\alpha_0=10.268^\circ$

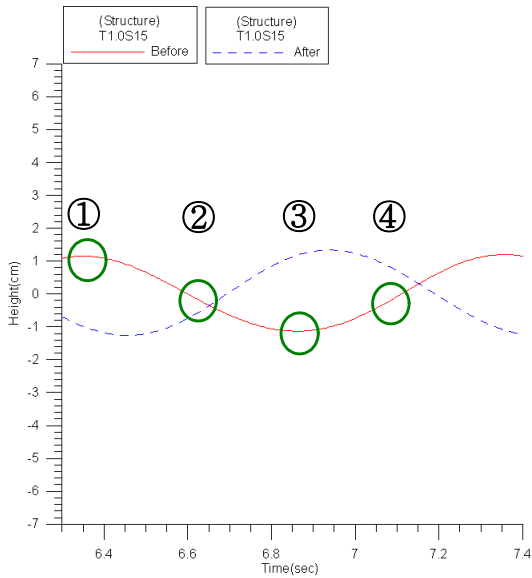


(e) $T=0.9$, $H=2.4\text{cm}$, $\alpha_0=3.416^\circ$

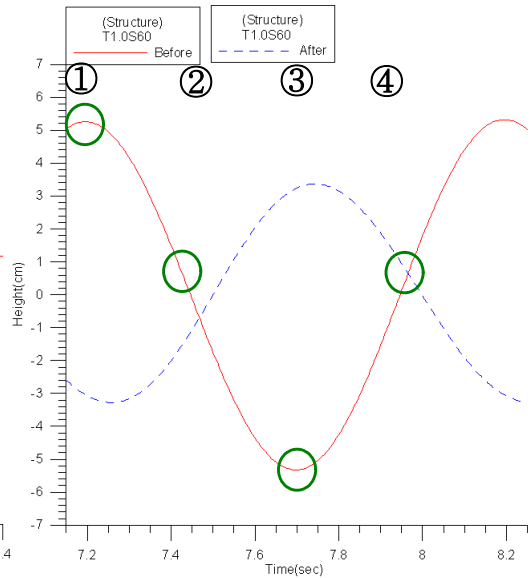


(f) $T=0.9$, $H=8.4\text{cm}$, $\alpha_0=11.956^\circ$

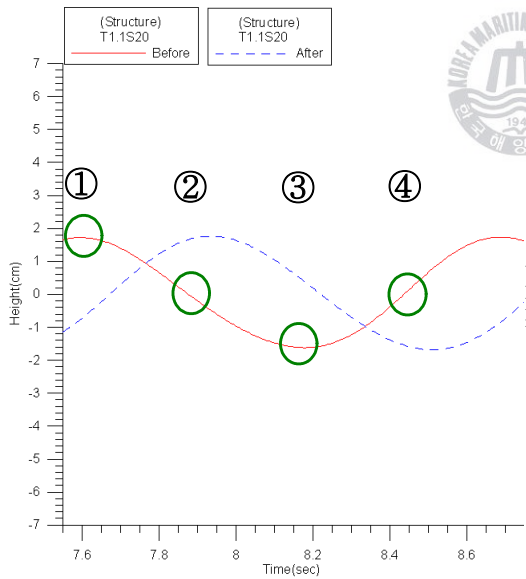
- Continued -



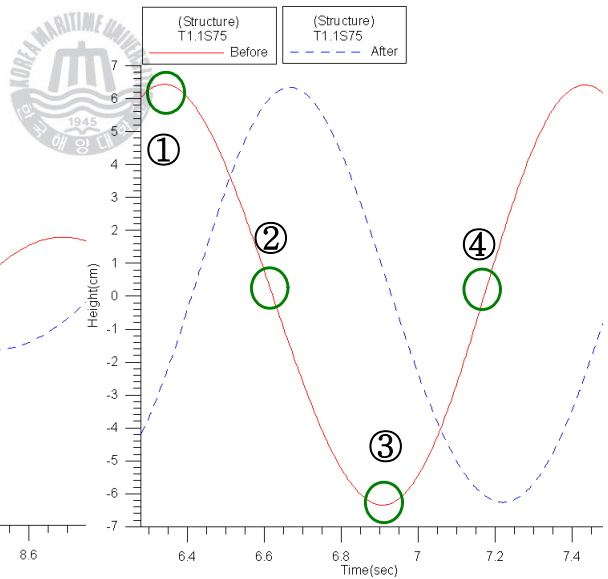
(g) $T=1.0$, $H=2.5\text{cm}$, $\alpha_0=2.882^\circ$



(h) $T=1.0$, $H=10.2\text{cm}$, $\alpha_0=11.759^\circ$

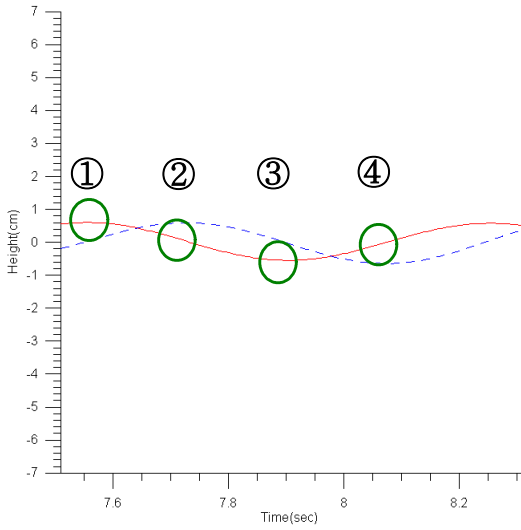
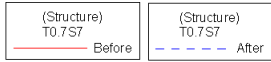


(i) $T=1.1$, $H=3.3\text{cm}$, $\alpha_0=3.144^\circ$

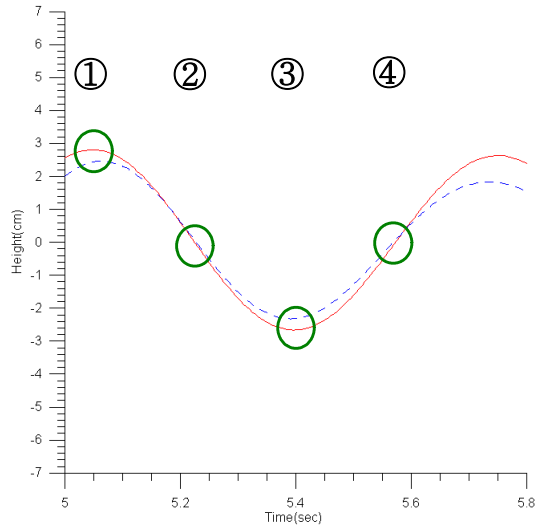


(j) $T=1.1$, $H=12.3\text{cm}$, $\alpha_0=11.719^\circ$

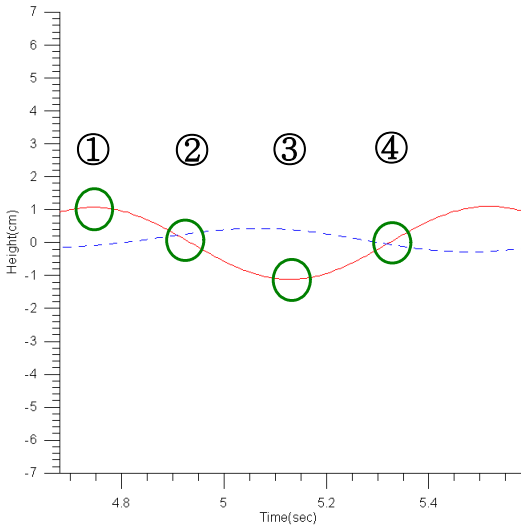
Fig.5.4. 주기와 최대파경사각에 따른 파고 측정값(실린더직경:0.05m)



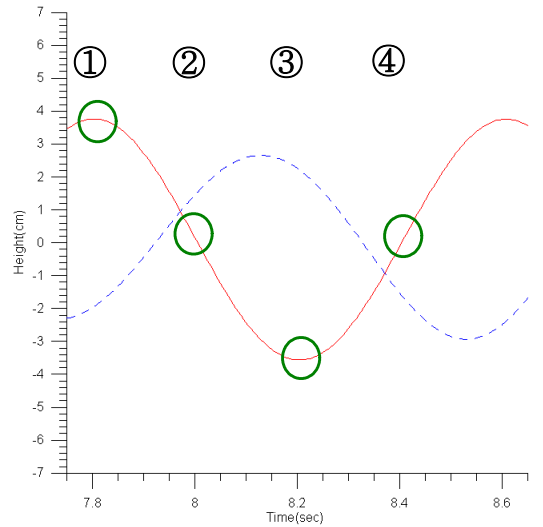
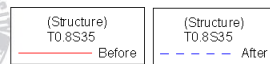
(a) $T=0.7$, $H=1.3\text{cm}$, $\alpha_0=3.059^\circ$



(b) $T=0.7$, $H=5.4\text{cm}$, $\alpha_0=12.705^\circ$

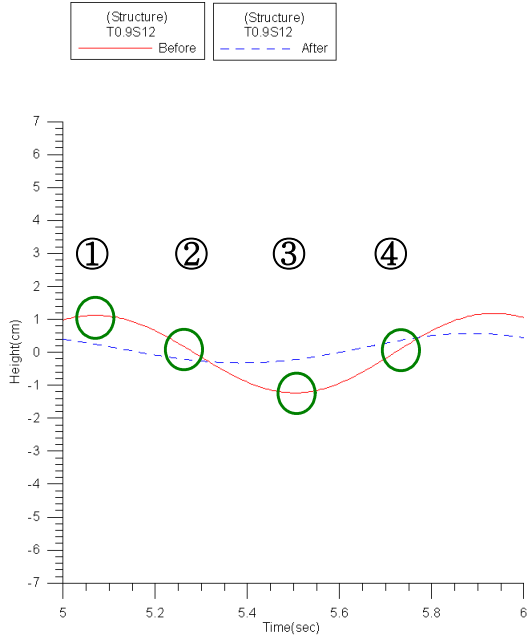


(c) $T=0.8$, $H=2.2\text{cm}$, $\alpha_0=3.963^\circ$

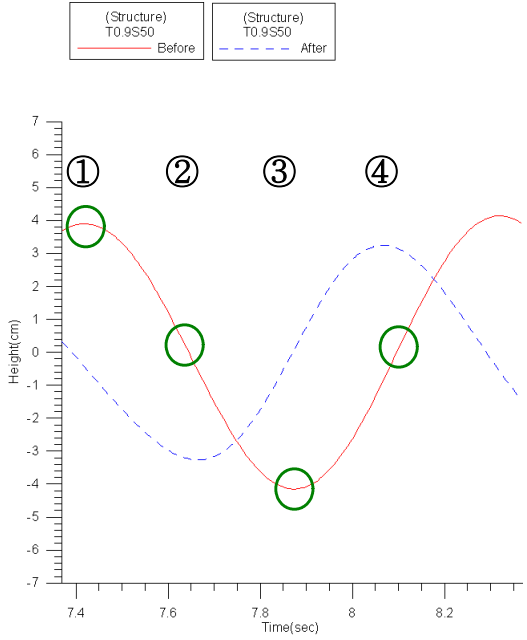


(d) $T=0.8$, $H=5.7\text{cm}$, $\alpha_0=10.268^\circ$

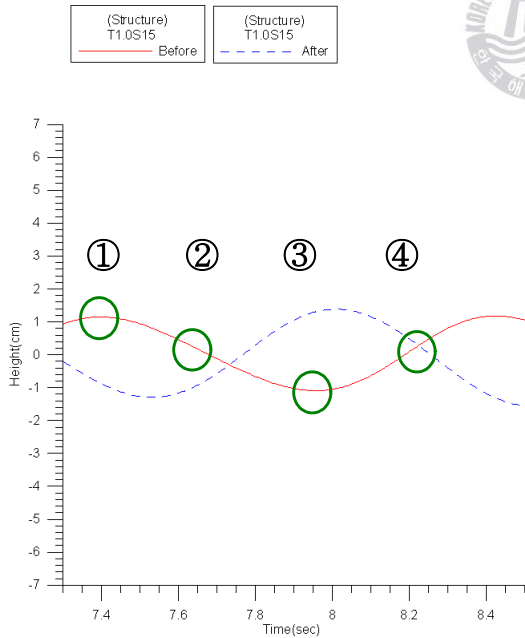
- Continued -



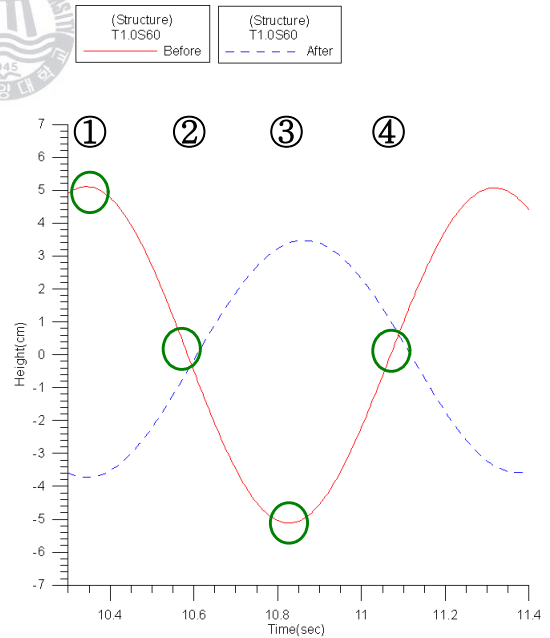
(e) $T=0.9$, $H=2.4\text{cm}$, $\alpha_0=3.416^\circ$



(f) $T=0.9$, $H=8.4\text{cm}$, $\alpha_0=11.956^\circ$



(g) $T=1.0$, $H=2.5\text{cm}$, $\alpha_0=2.882^\circ$



(h) $T=1.0$, $H=10.2\text{cm}$, $\alpha_0=11.759^\circ$

- Continued -

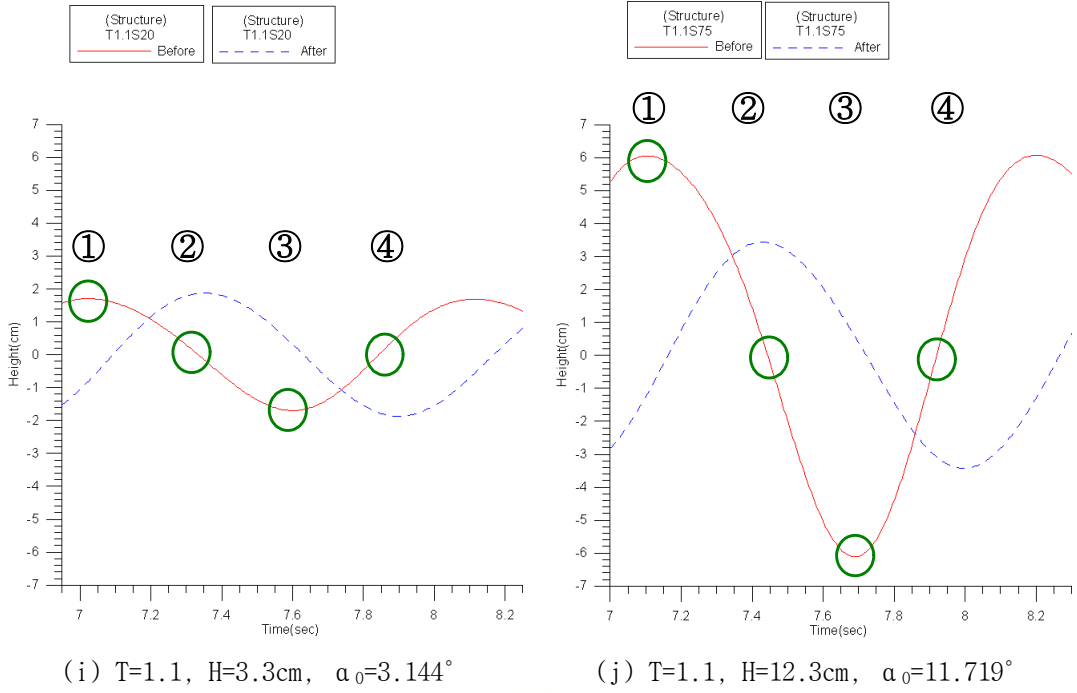


Fig.5.5. 주기와 최대파경사각에 따른 파고 측정값(실린더직경:0.1m)



5.5.2. 실린더 주변 유동 특성

(1) 주기변화에 따른 속도장(Velocity Field)과 속도분포(Contour)

Linear(최대파경사각:4° 내외)와 nonlinear(최대파경사각:10° 내외)일 때, 주기 변화에 따른 실린더구조물 주위의 유동특성을 분석한 것으로, Fig.5.7.~5.11.은 실린더구조물 직경이 0.05m, Fig.5.12.~5.16.은 실린더구조물 직경이 0.1m이다. 각 Fig.별로 (a)는 파정, (b)와 (d)는 과도파면, (c)은 파저를 PIV로 측정하여 분석하였다. 각각의 상세한 PIV 측정위치는 앞 절(5.5.1절)에 나타내었다.

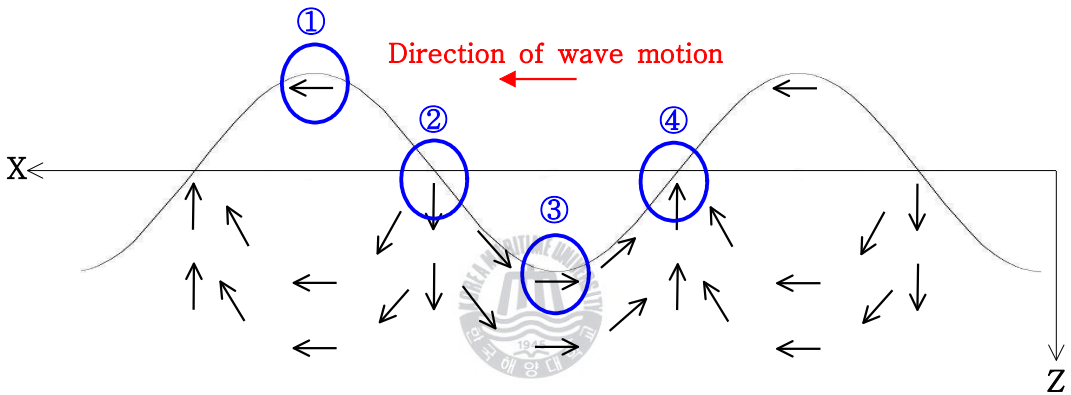


Fig.5.6. 특정 시각에서의 파입자의 속도장(Velocity Field).

Fig.5.6.은 특정 시각에서의 파입자의 속도장(Velocity Field)을 나타내고 있으며, 특정위치에서 진행파의 파동에 의해 파형이 시간적으로 변함에 따라 파입자의 속도 벡터는 원을 그리게 된다는 것을 알 수 있다.

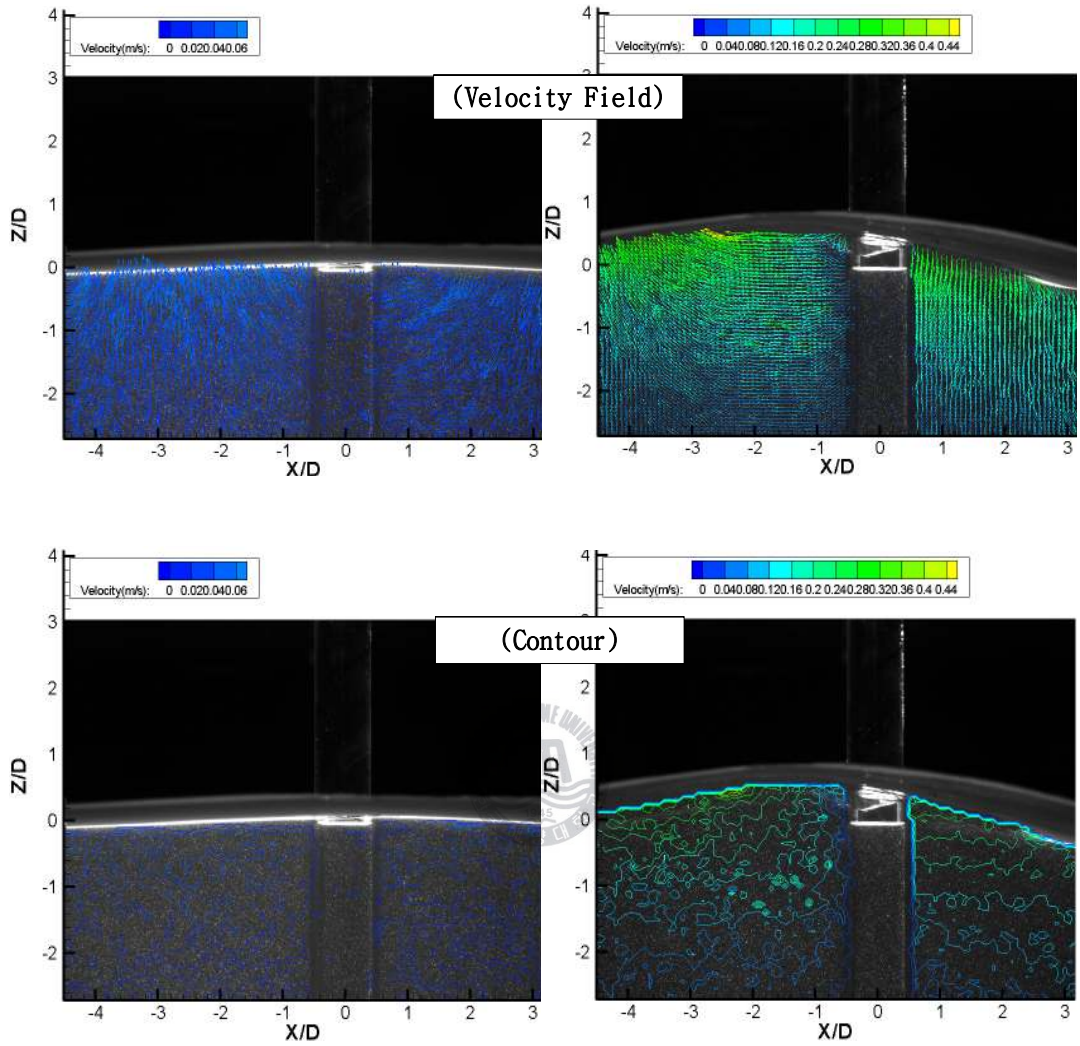
Fig.5.7.~5.16.와 같이 주기와 실린더 직경을 달리 하였을 경우 특정 시각에서의 파입자의 속도장은 Fig.5.6.와 같은 형태를 따르며, cosine함수일 경우 파정(①)과 파저(③)에서의 속도는 '0'이다. 또한 파정(①)아래에서는 $u>0$, $w=0$, 파저(③)아래에서는 $u<0$, $w=0$, 오르막파면(과도파면:②)아래에서는 $u=0$, $w>0$, 내리막파면(과도파면:④)아래에서는 $u=0$, $w<0$ 이다.

Fig.5.7.~5.16.에서 최대파경사각이 4° 내외(linear)인 경우와 최대파경사각이 10° 내외(nonlinear)인 경우에 각각 대체적으로 유사한 속도분포를 보이며, 최

대파경사각이 4° 내외(Fig.5.7.~5.16.(좌))일 때 보다 최대파경사각이 10° 내외(Fig.5.7.~5.16.(우))일 때에 속도장 값이 약3배 이상 크다. 이는 최대 파경사각의 증가분만큼 속도장 값이 증가하는 것을 보이고 있다.

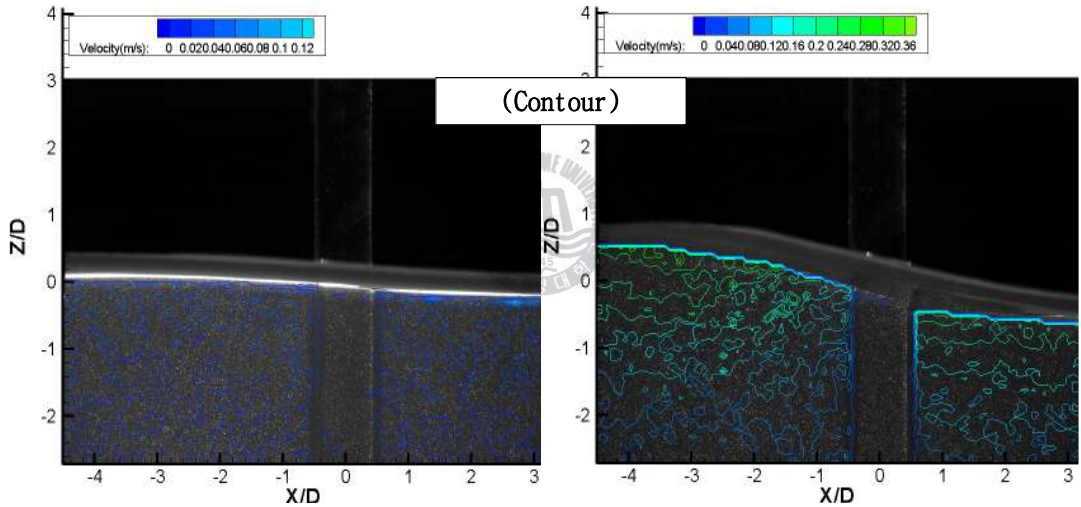
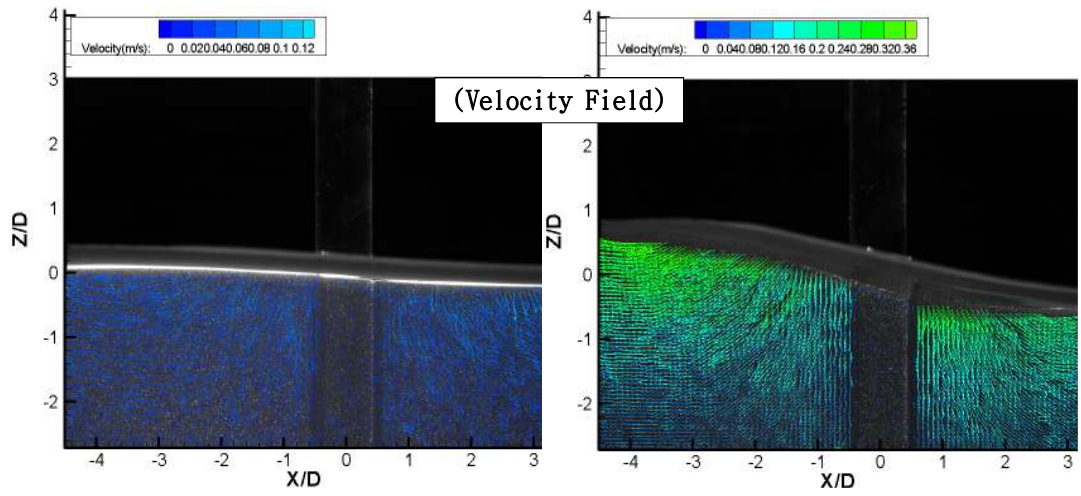
또한 최대파경사각이 4° 내외일 때는 실린더 직경이 0.05m에서 0.1m로 증가할 때 속도장 값이 다소 증가하나, 최대파경사각이 10° 내외일 때는 이와 반대로 속도장 값이 감소한다. 이는 파고 값에 관련된 것으로 파고값이 5cm이상 이며, 최대파경사각이 10° 내외인 nonlinear에서는 실린더 직경이 증가할 때, 조파감쇄율이 증가함에 따라 속도장 값이 다소 감소된다는 것을 알 수 있다.





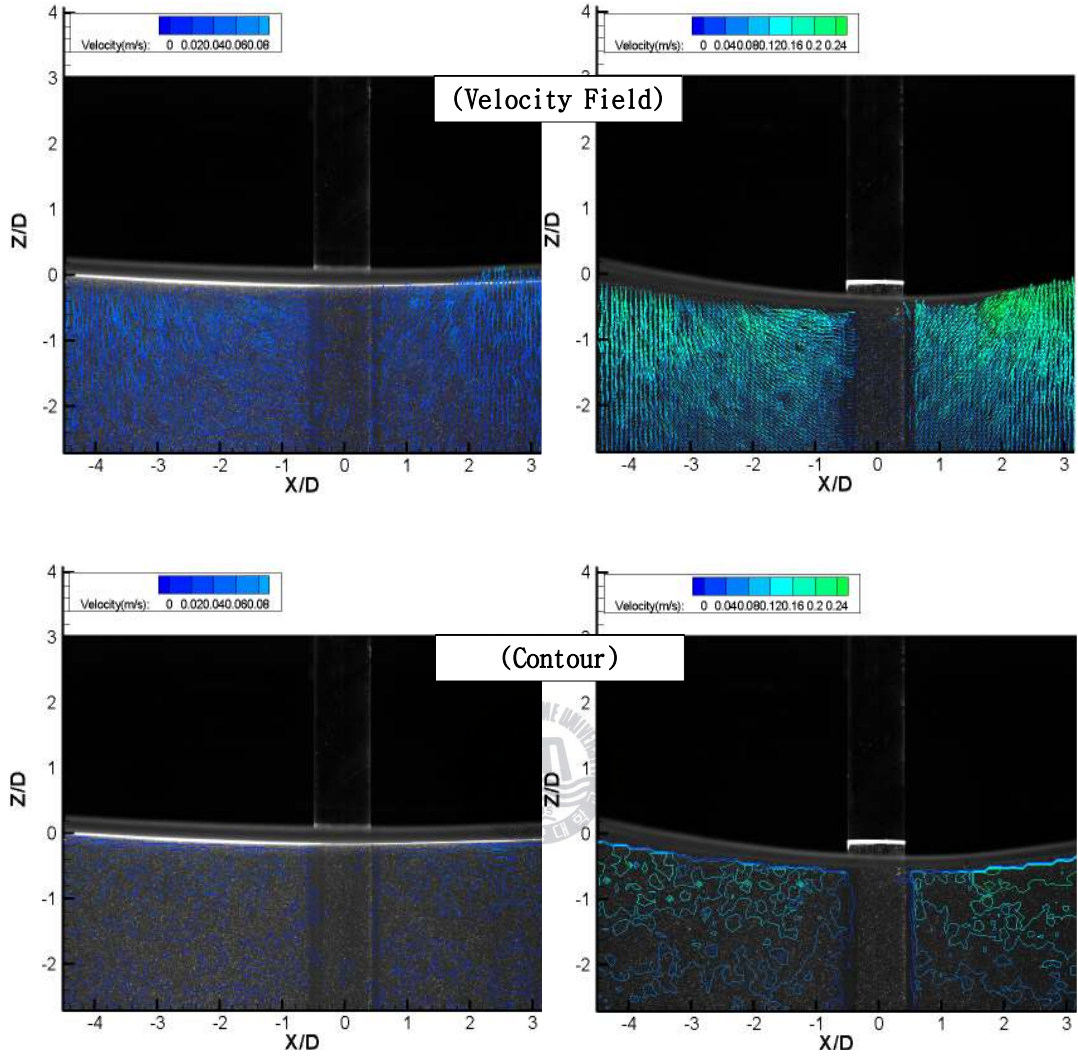
(a) 파경 ①

- Continued -



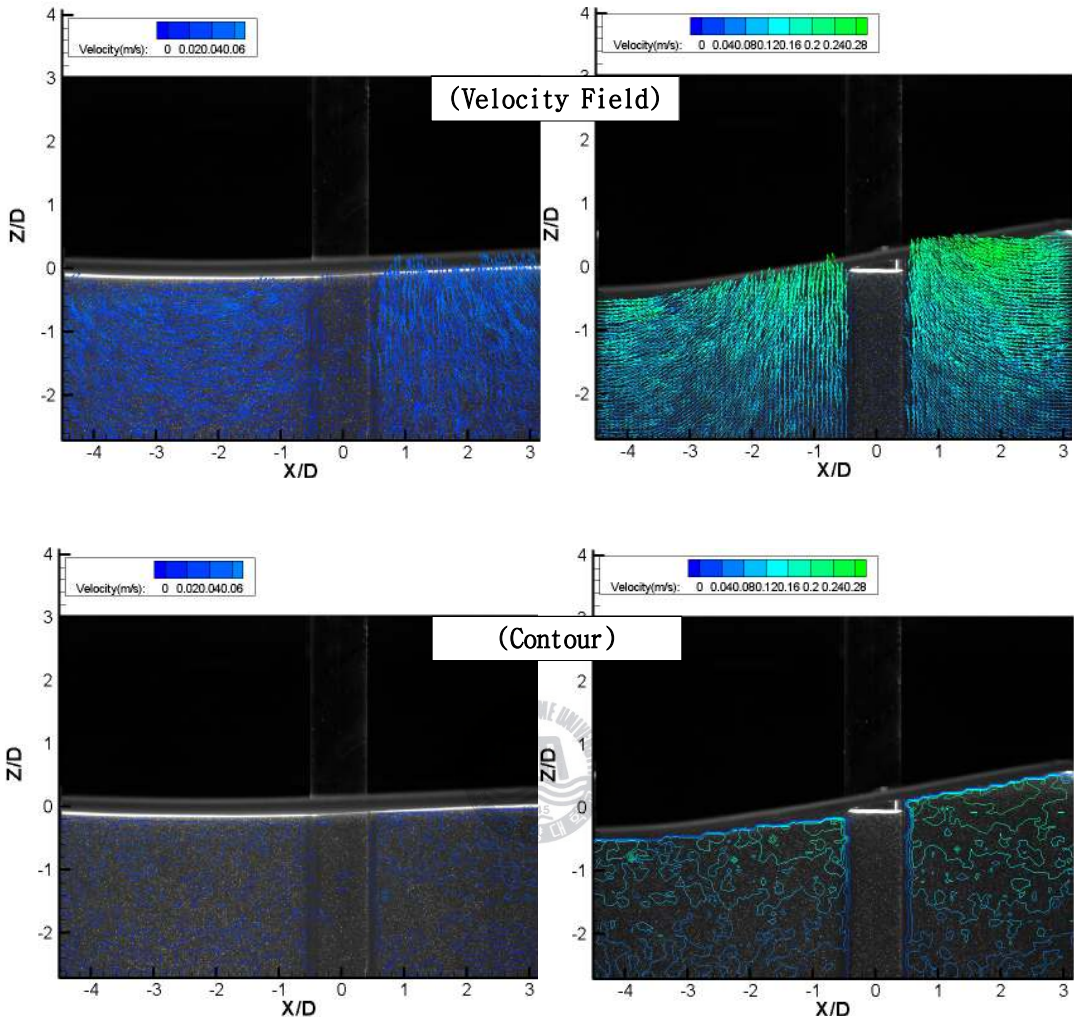
(b) 과도파면(②)

- Continued -



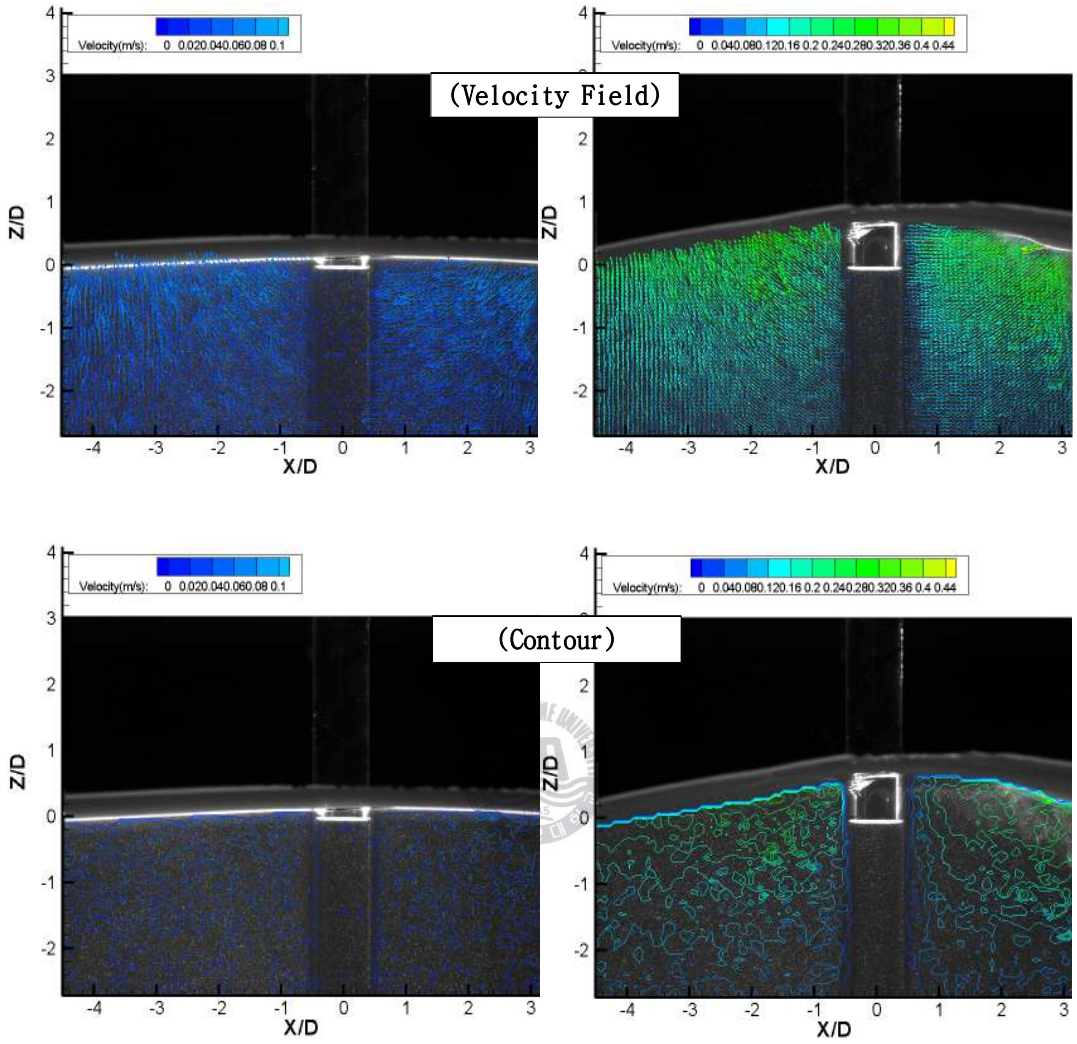
(c) 파저(③)

- Continued -



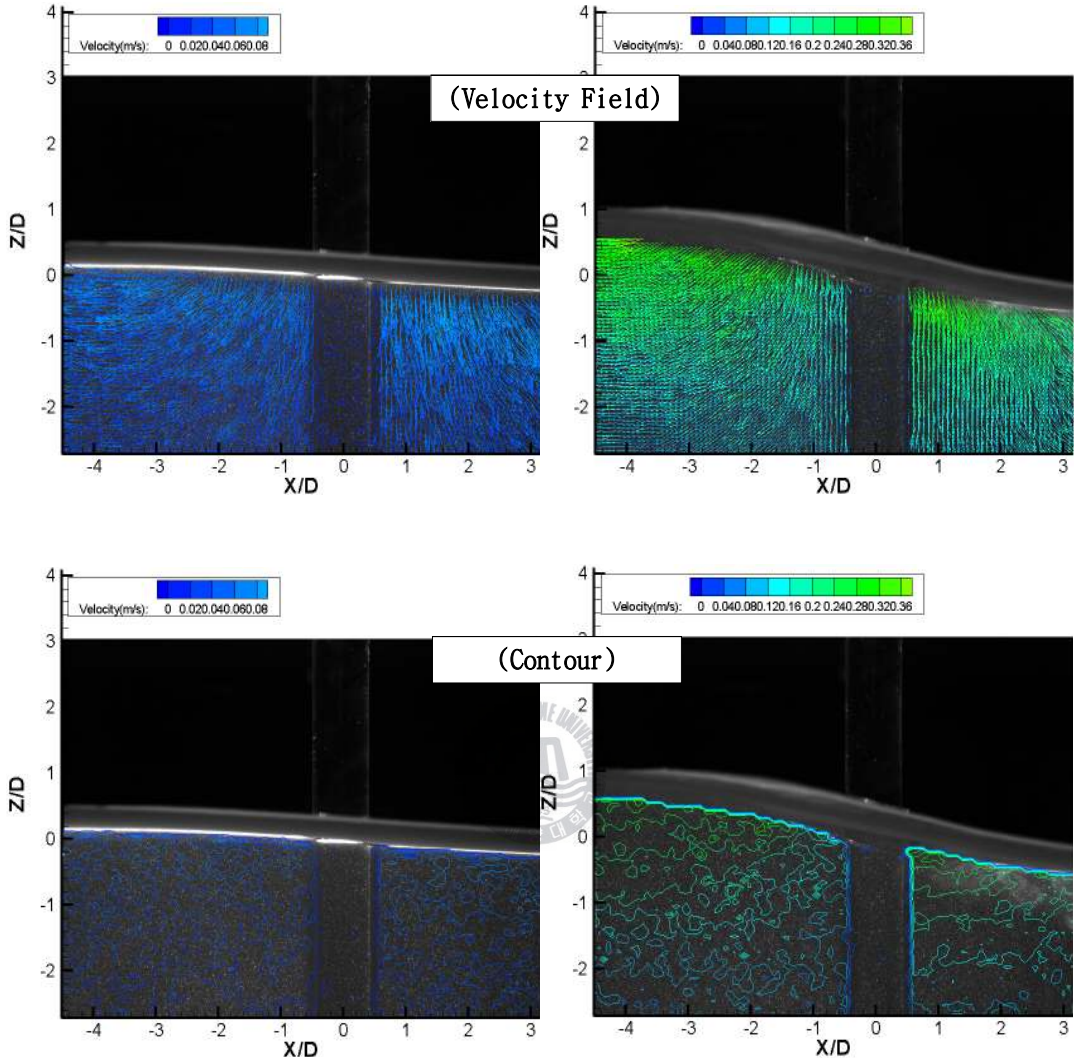
(d) 과도파면(④)

Fig.5.7. (좌) [T:0.7,H:1.3cm, $\alpha_0:3.059^\circ$], (우) [T:0.7,H:5.4cm, $\alpha_0:12.705^\circ$]



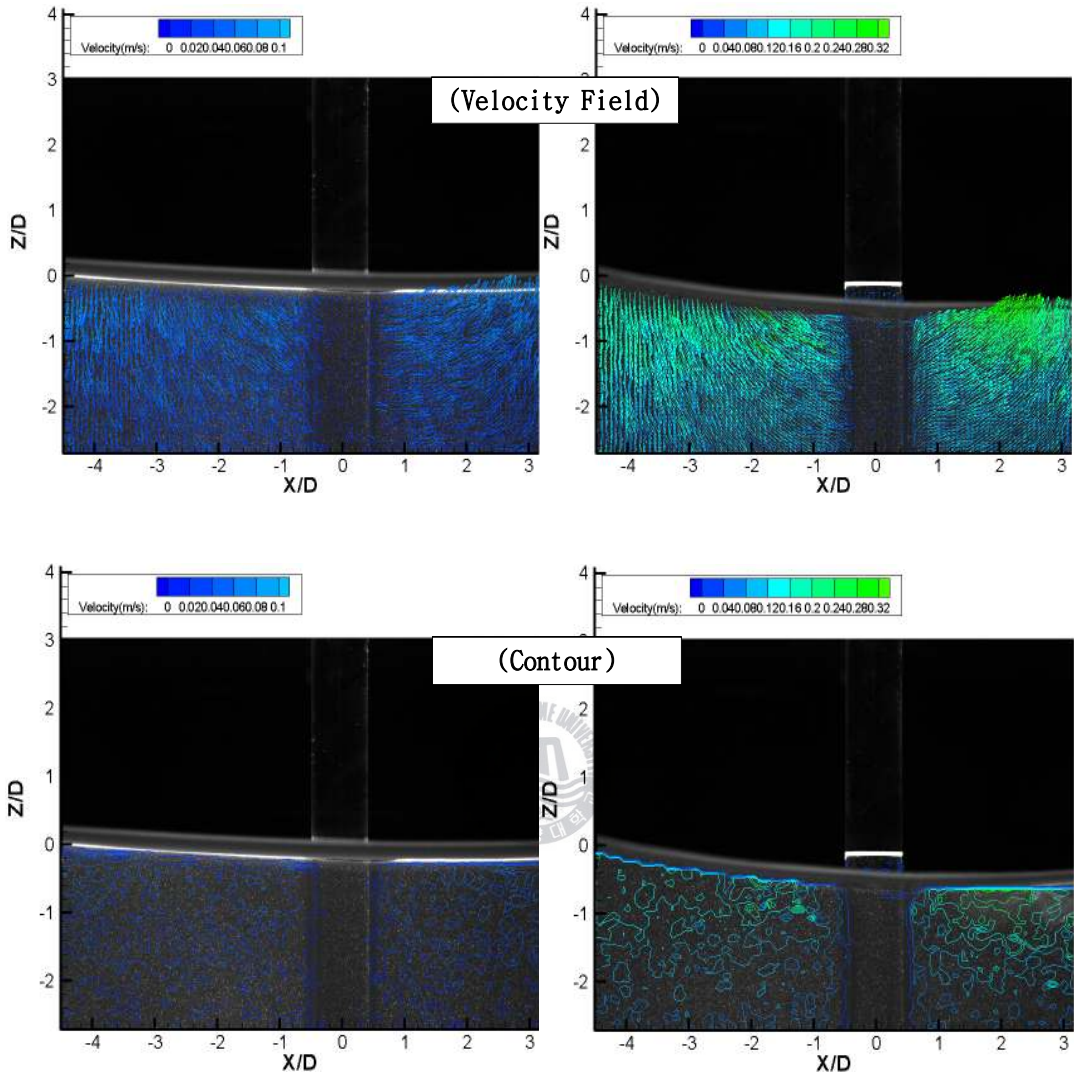
(a) 파경 (㉠)

- Continued -

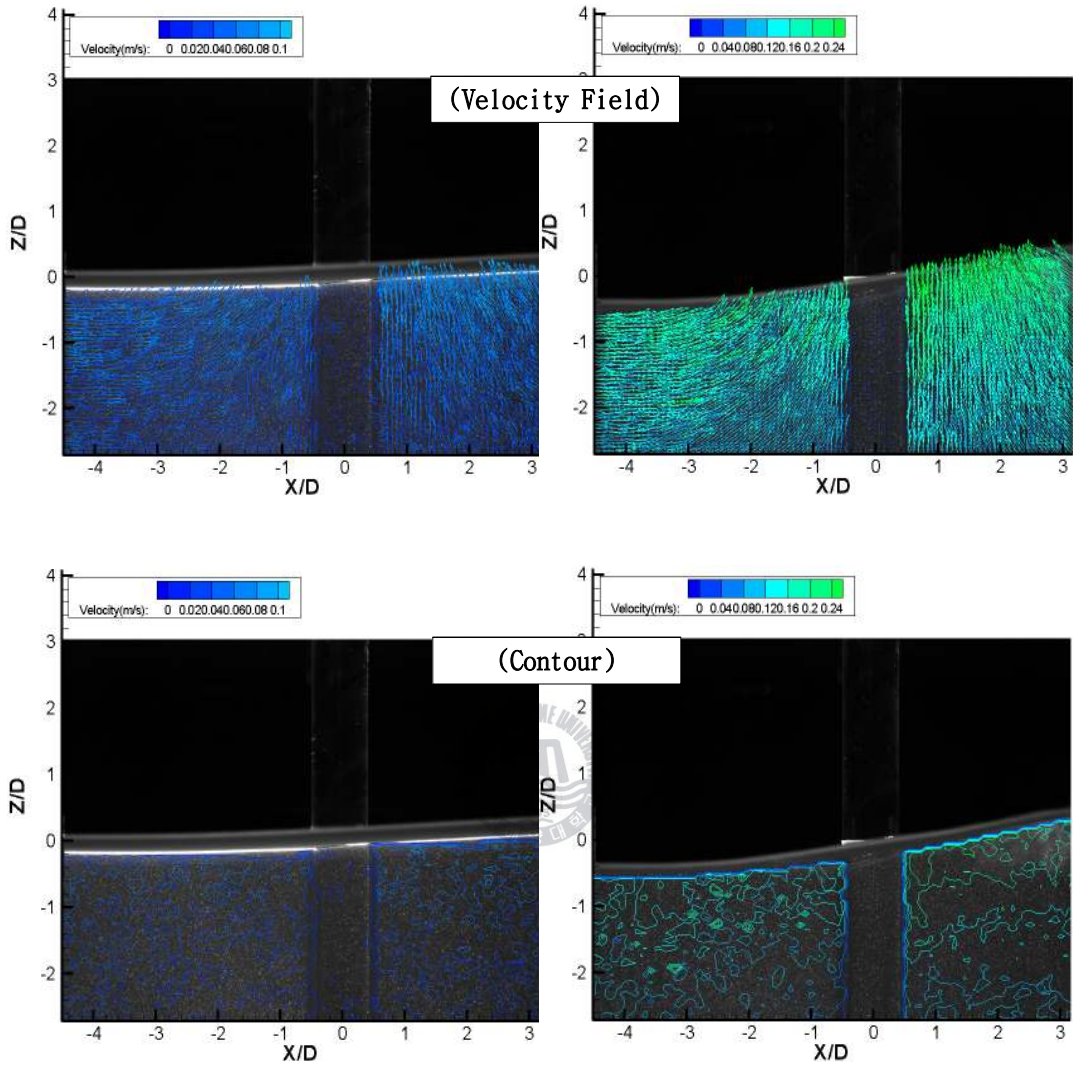


(b) 과도파면(②)

- Continued -

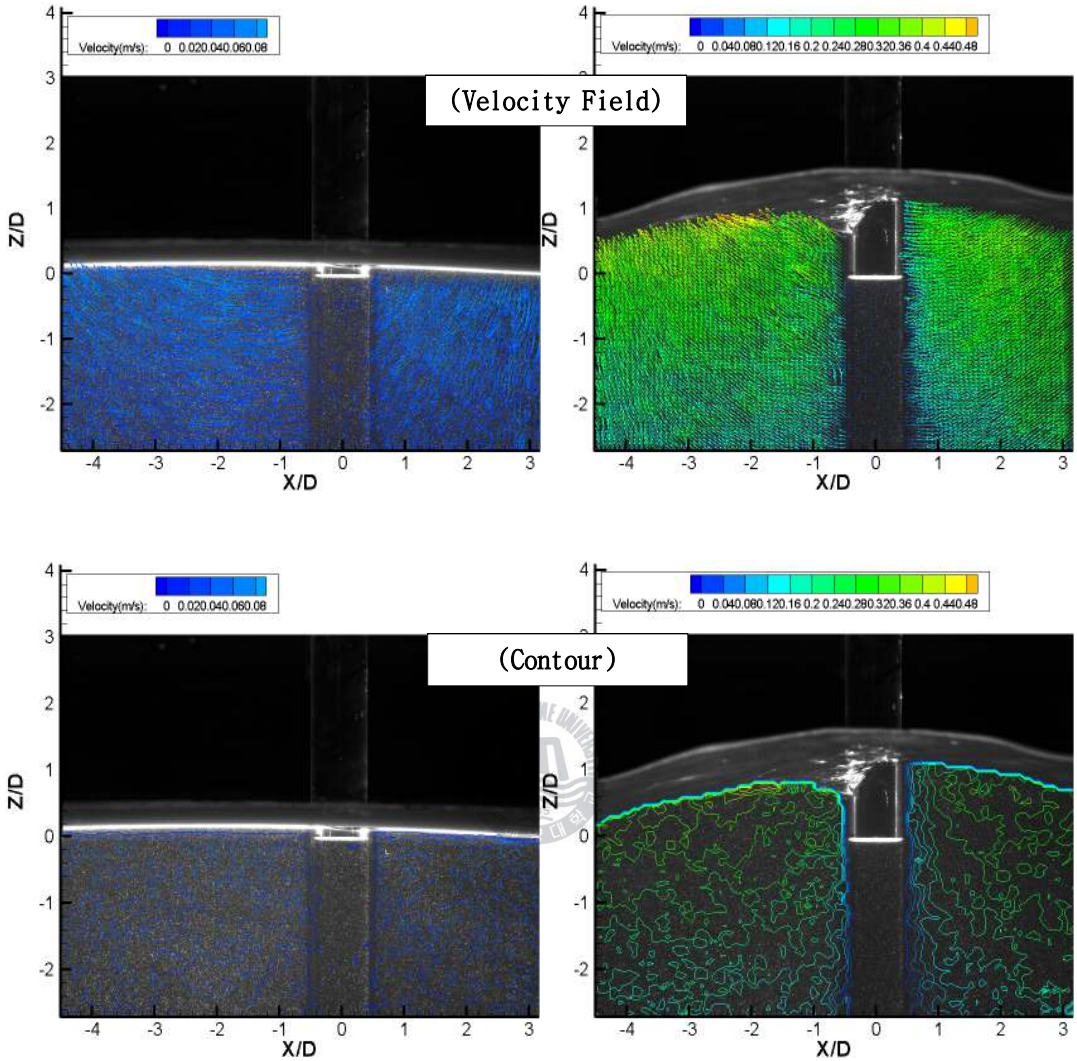


- Continued -



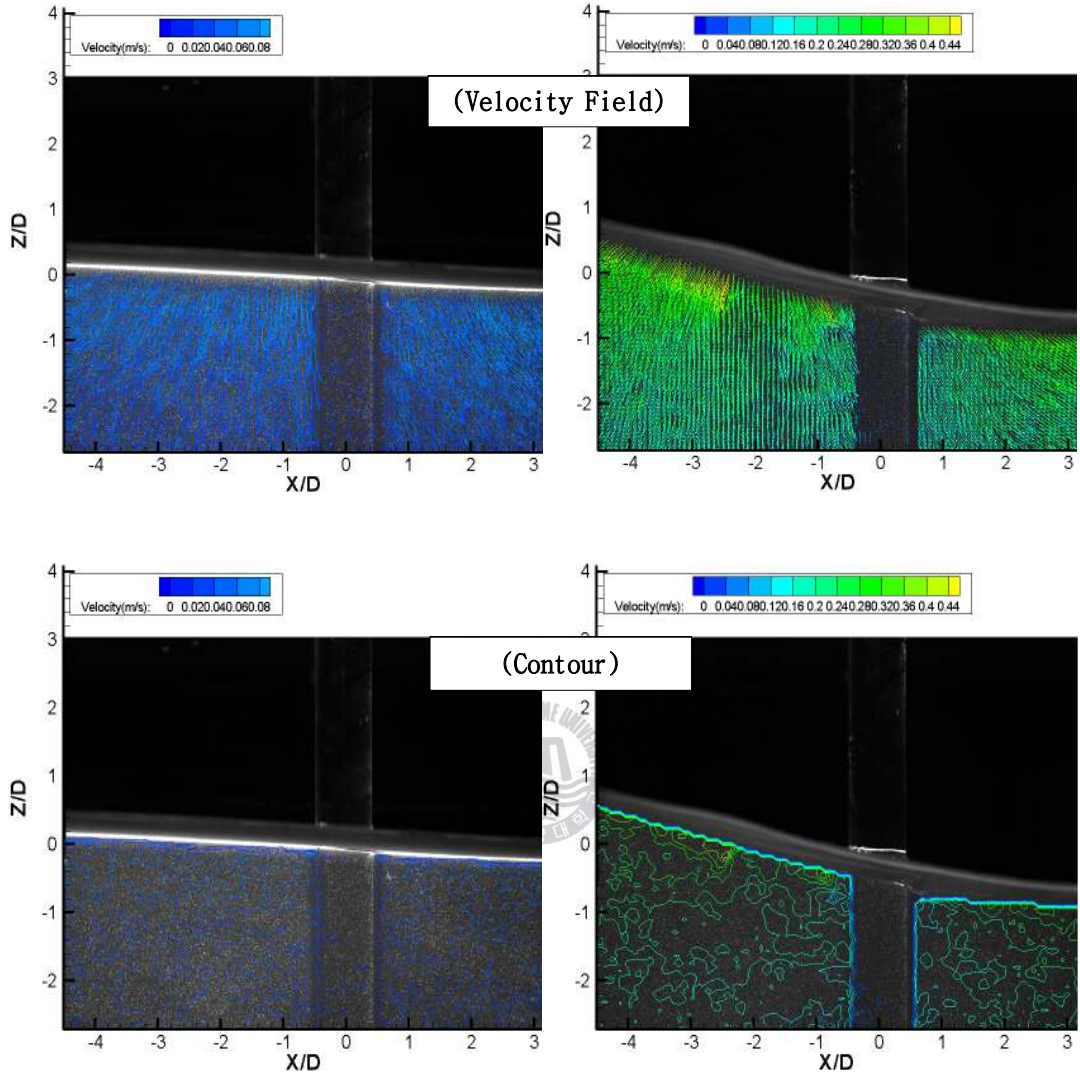
(d) 과도파면(④)

Fig.5.8. (좌) [T:0.8,H:2.2cm, $\alpha_0:3.963^\circ$], (우) [T:0.8,H:5.7cm, $\alpha_0:10.268^\circ$]



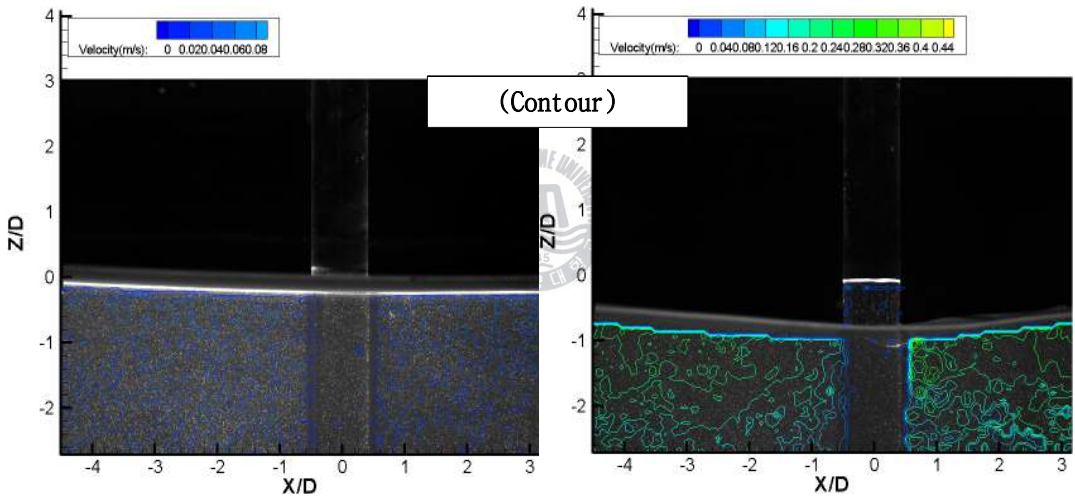
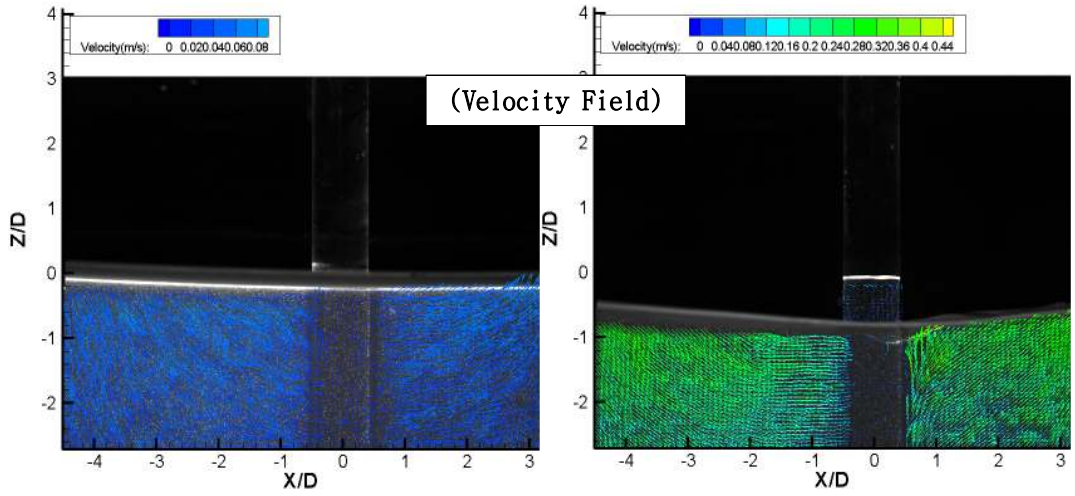
(a) 과정 ①

- Continued -



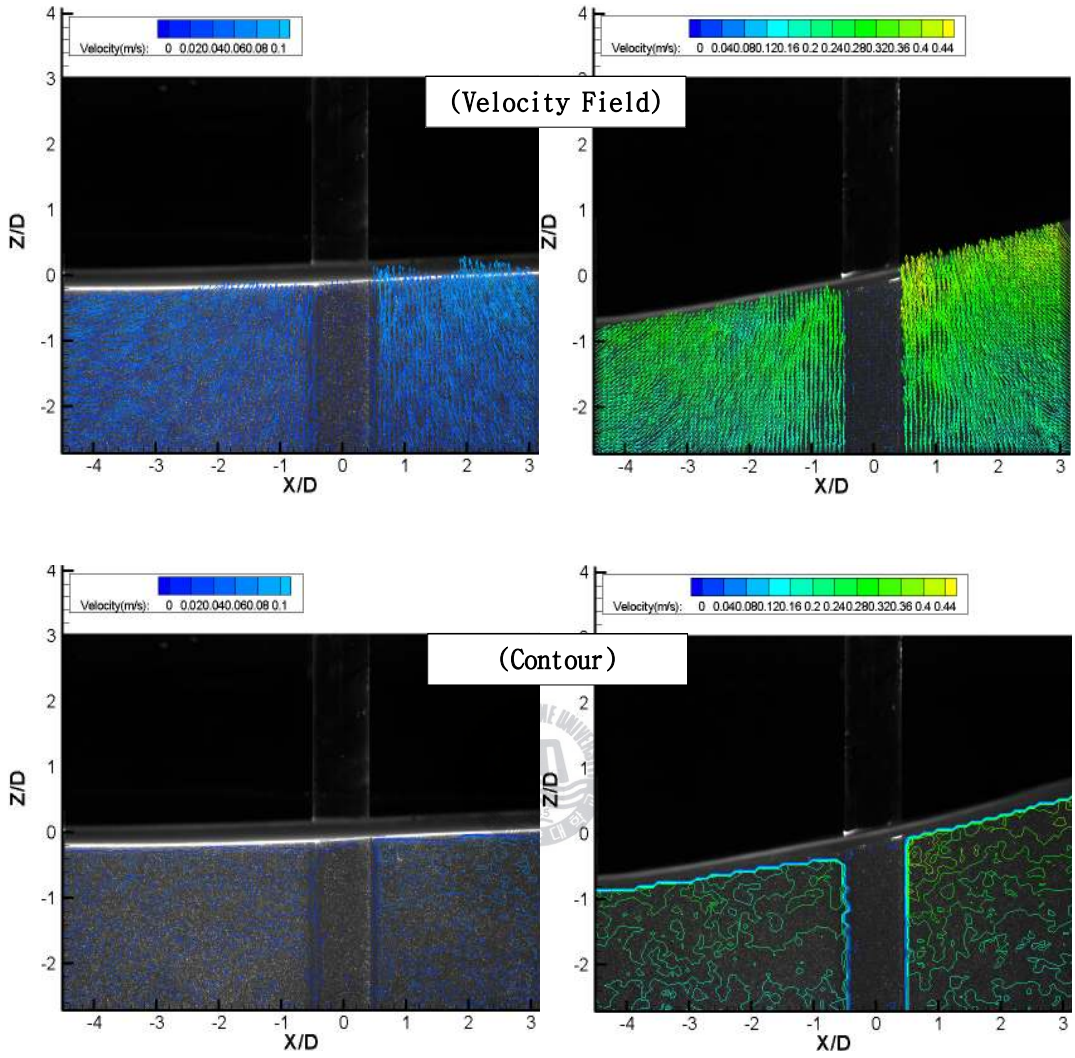
(b) 과도파면(②)

- Continued -



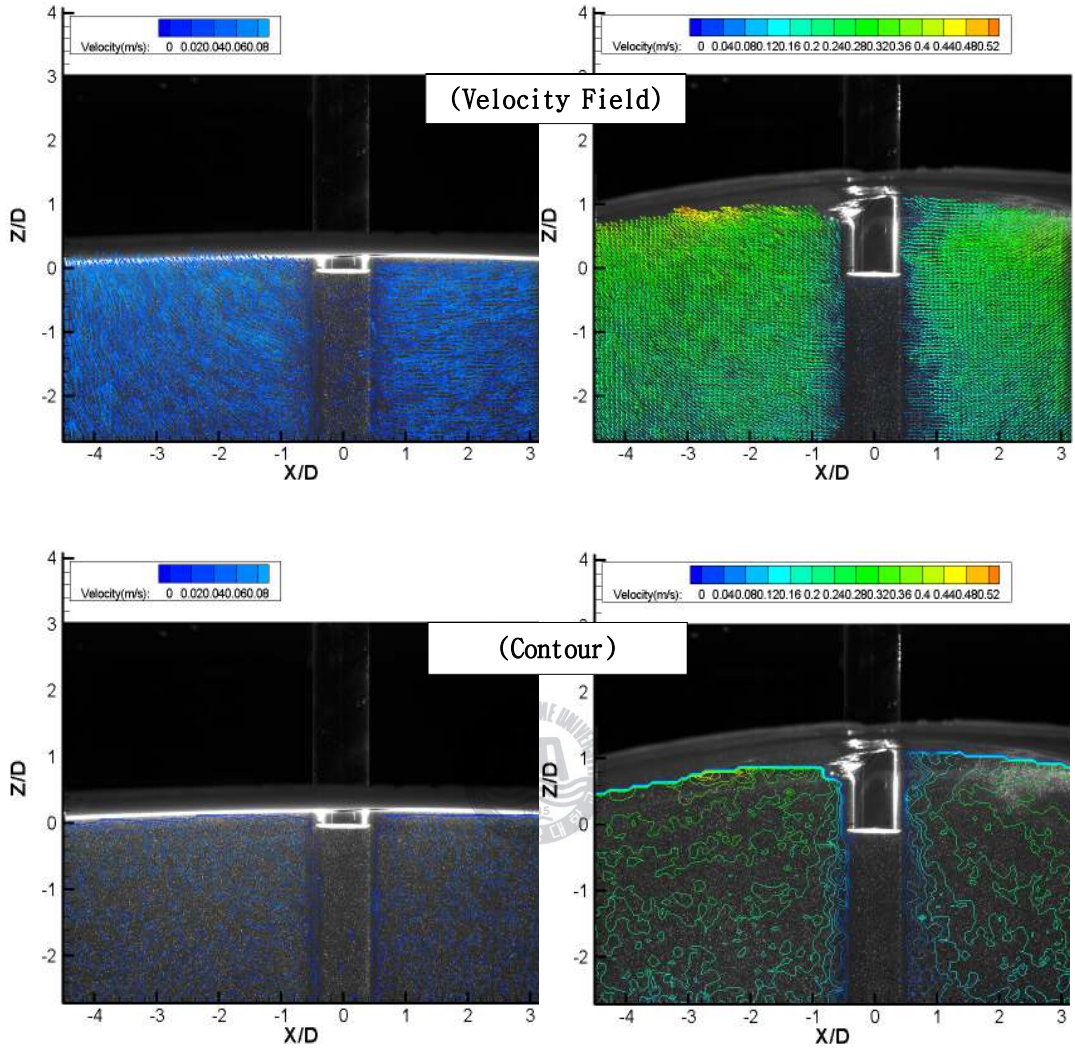
(c) 파저(③)

- Continued -



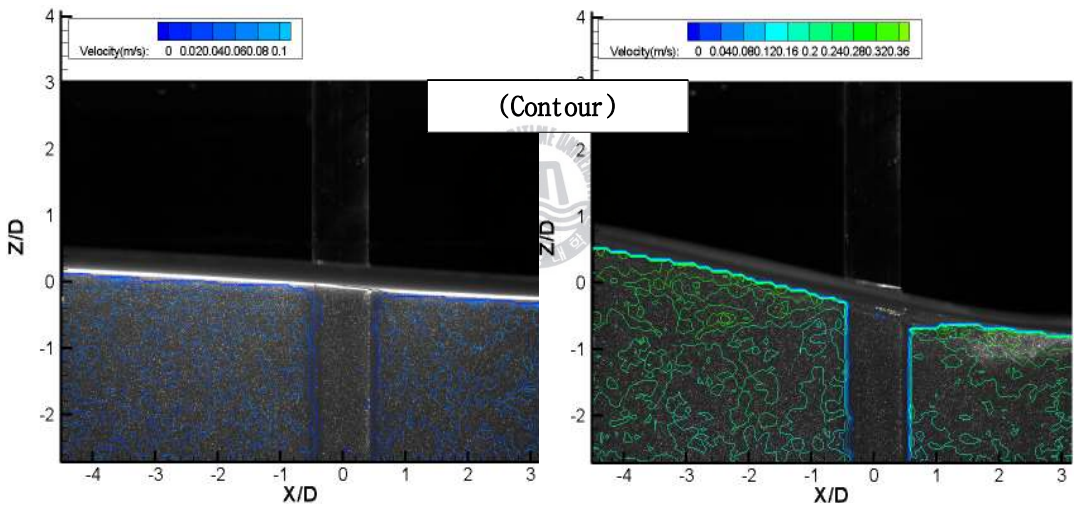
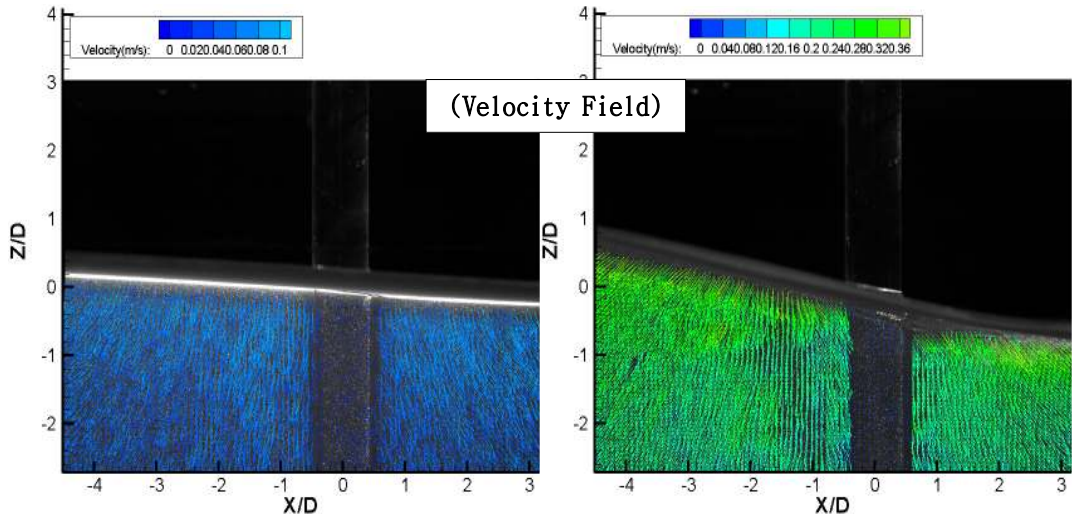
(d) 과도파면(④)

Fig.5.9. (좌) [T:0.9,H:2.4cm, $\alpha_0:3.416^\circ$], (우) [T:0.9,H:8.4cm, $\alpha_0:11.956^\circ$]



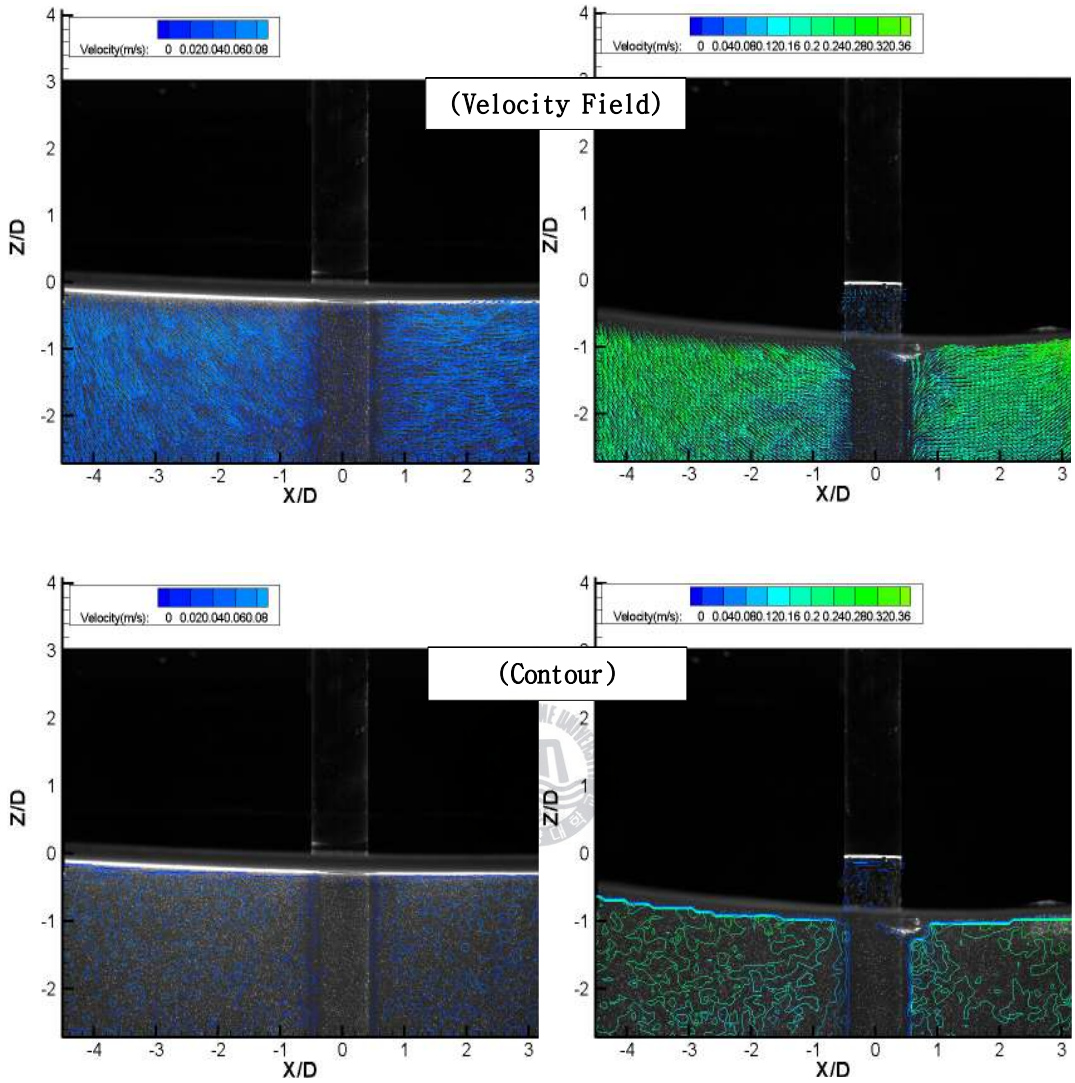
(a) 과정(①)

- Continued -



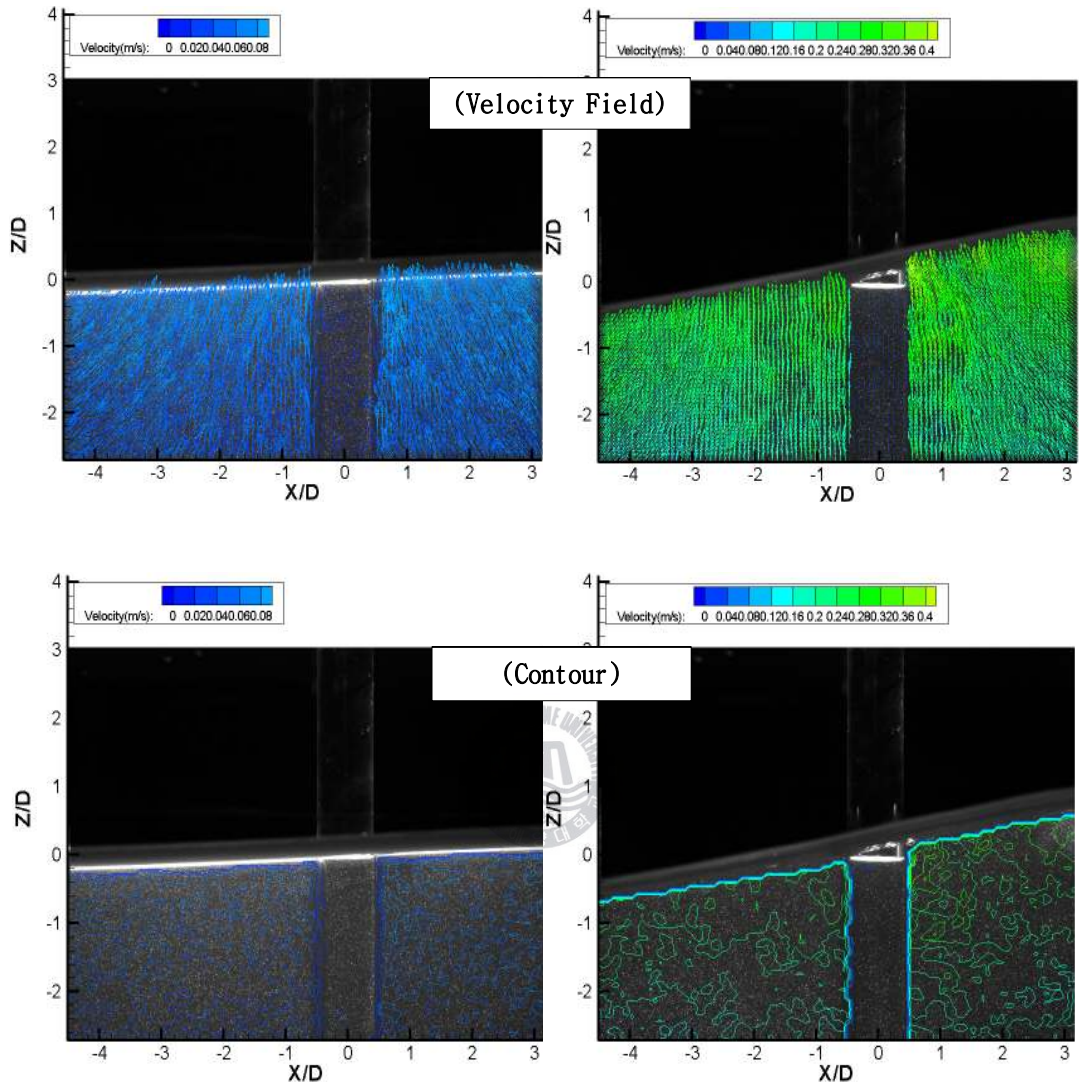
(b) 과도과면(②)

- Continued -



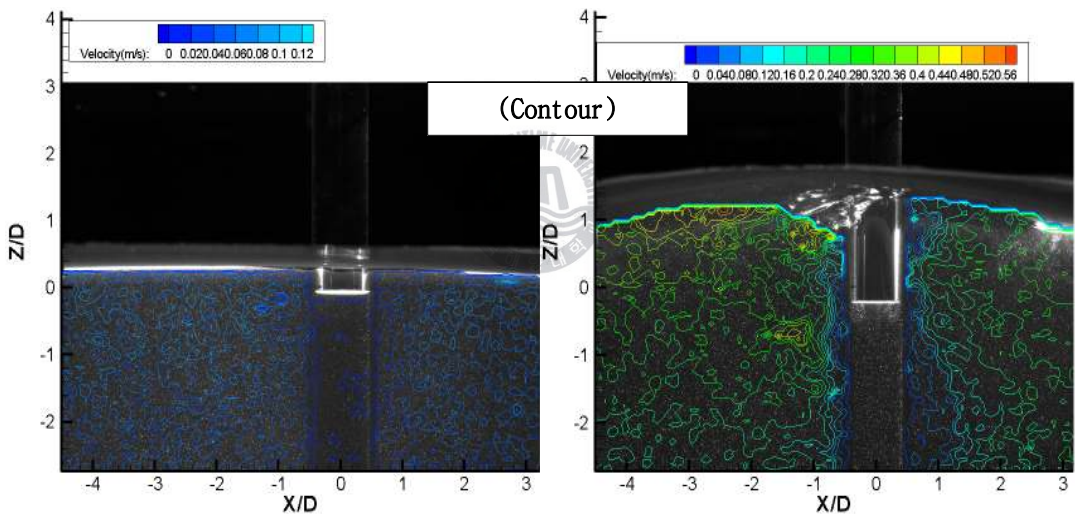
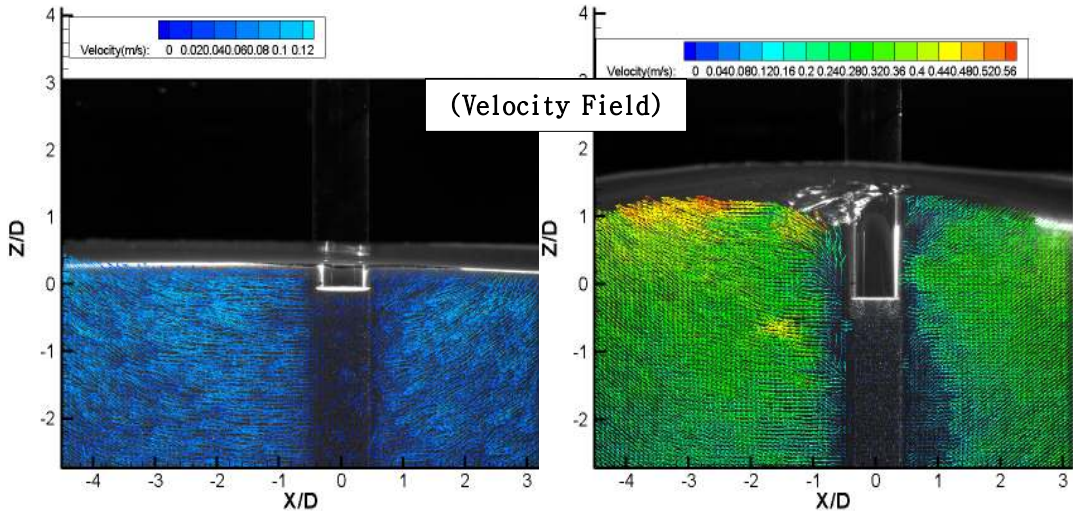
(c) 파저(③)

- Continued -



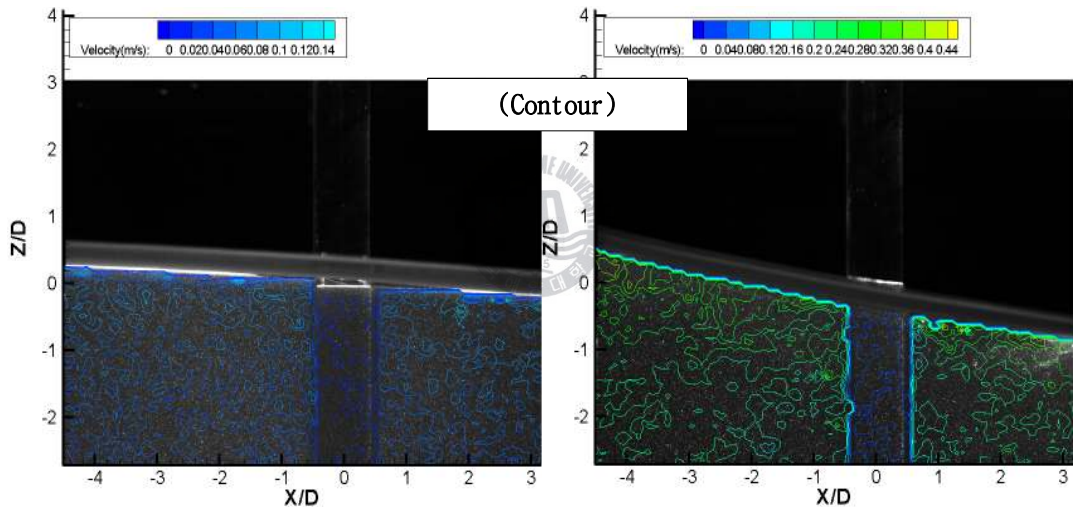
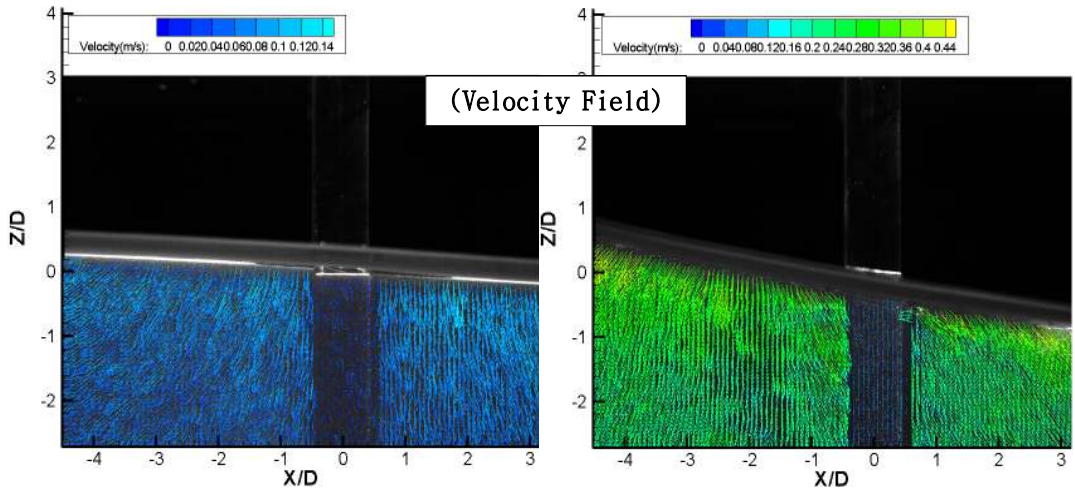
(d) 과도파면(④)

Fig.5.10. (좌) [T:1.0,H:2.5cm, $\alpha_0:2.882^\circ$], (우) [T:1.0,H:10.2cm, $\alpha_0:11.759^\circ$]



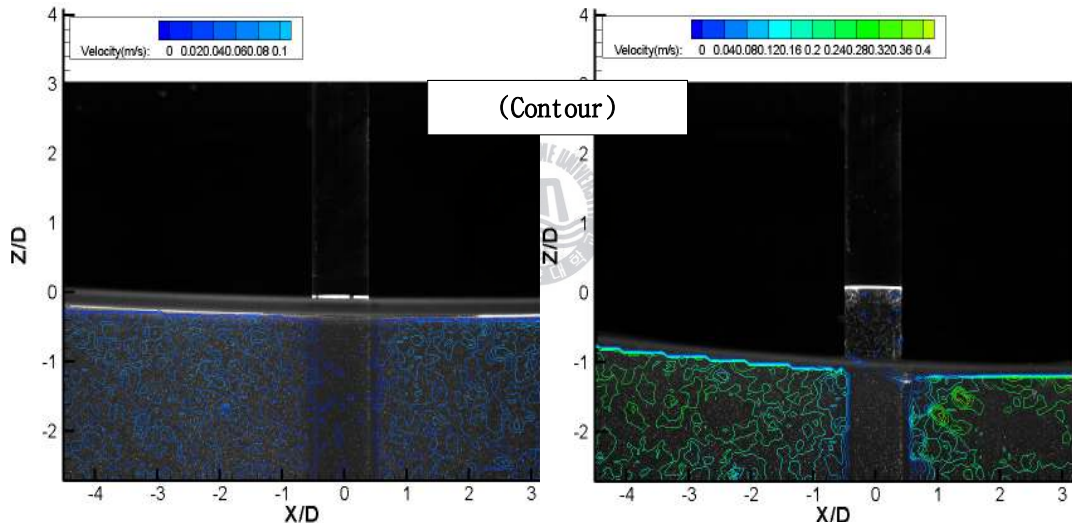
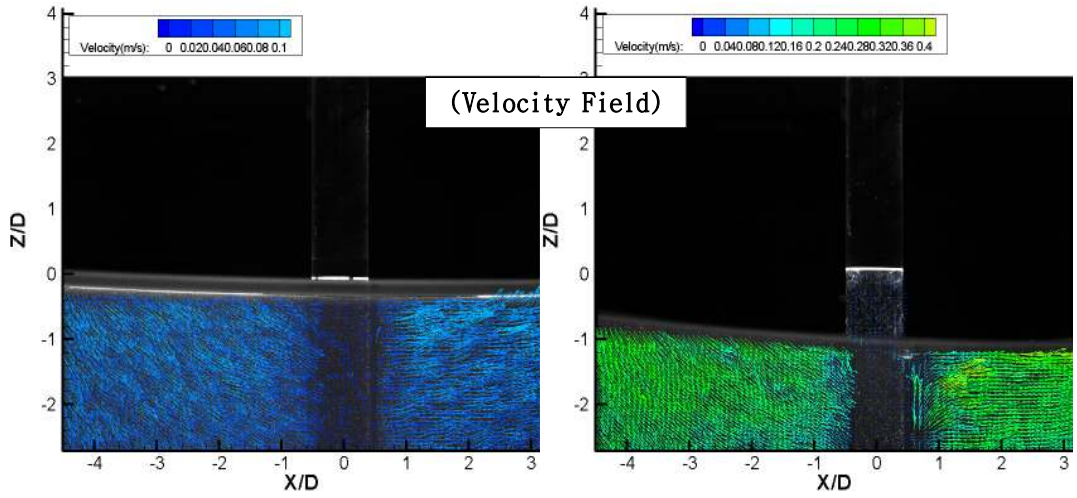
(a) 파정 ①

- Continued -



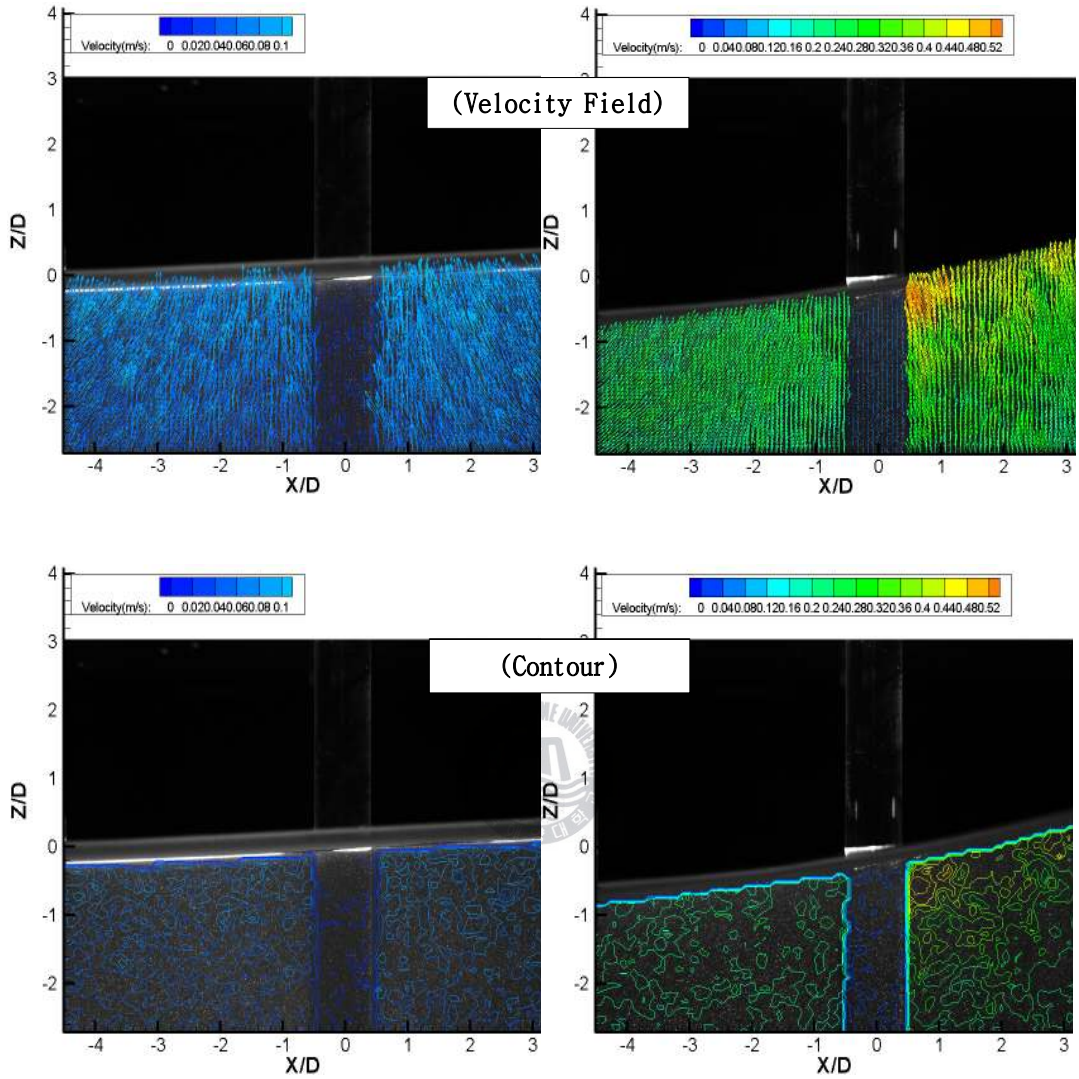
(b) 과도파면(②)

- Continued -



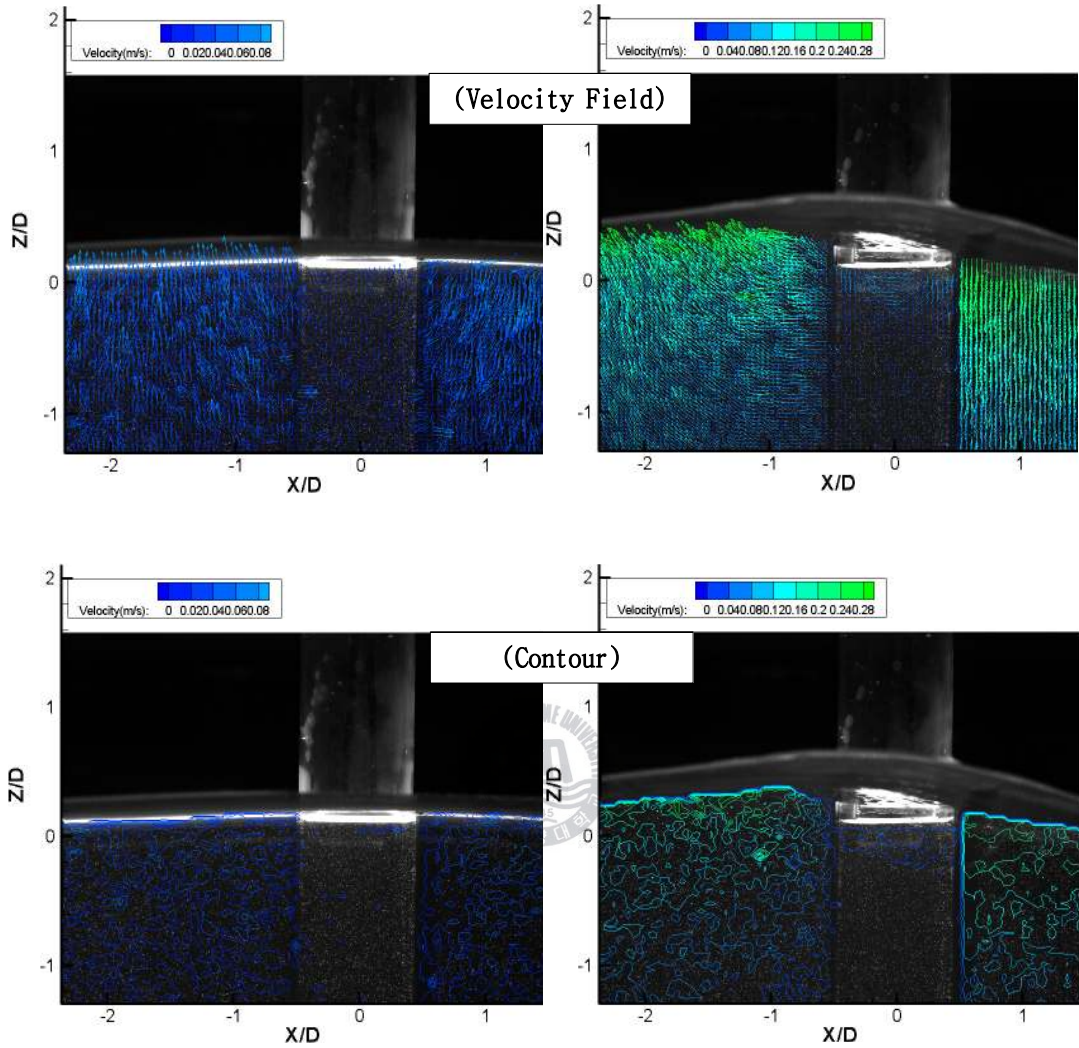
(c) 파저(③)

- Continued -

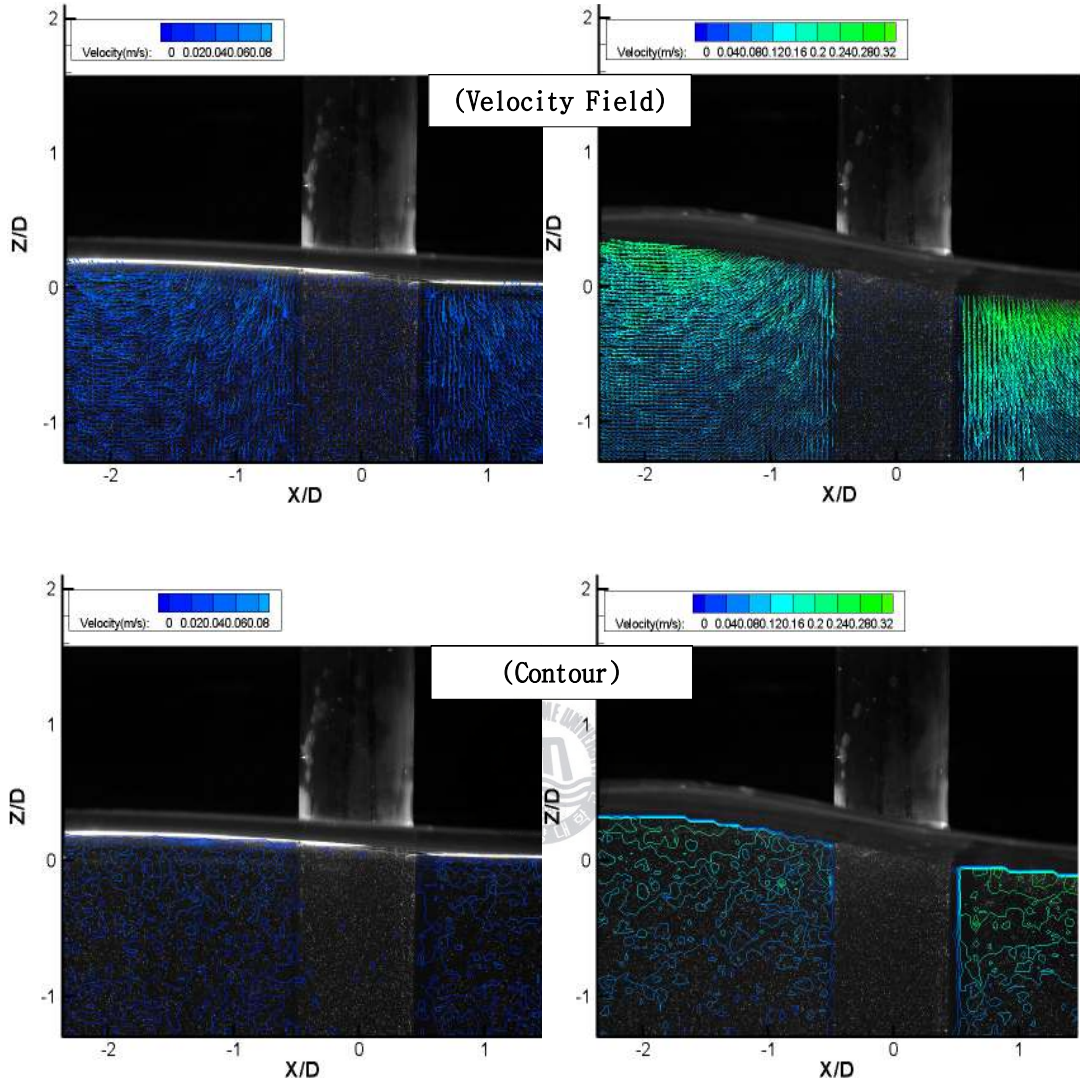


(d) 과도파면(④)

Fig.5.11. (좌) [T:1.1,H:3.3cm, $\alpha_0:3.144^\circ$], (우) [T:1.1,H:12.3cm, $\alpha_0:11.719^\circ$]

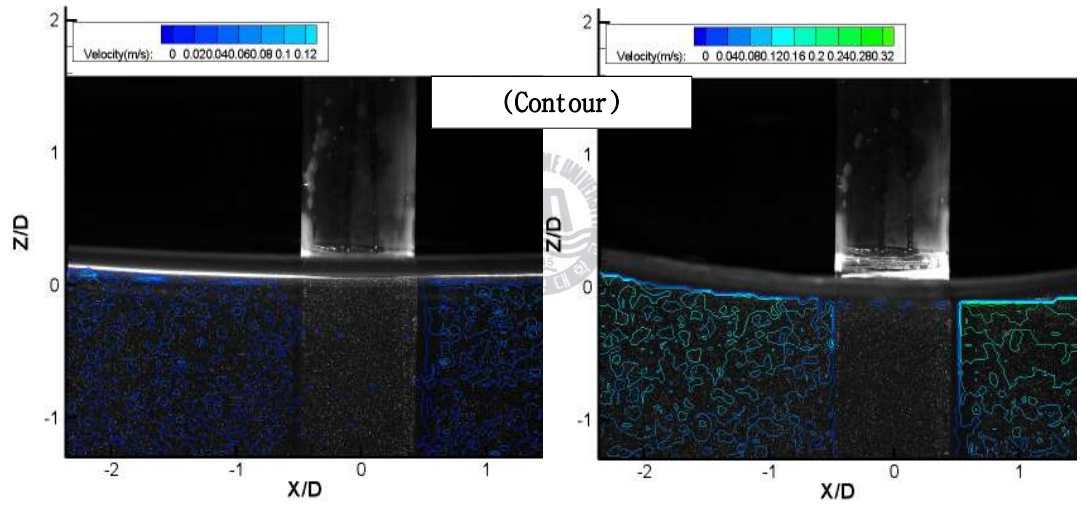
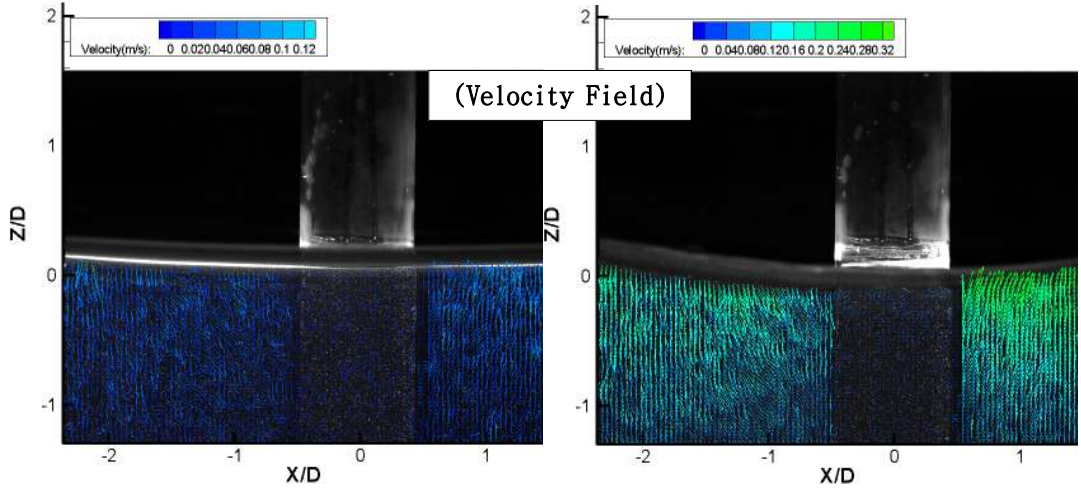


- Continued -



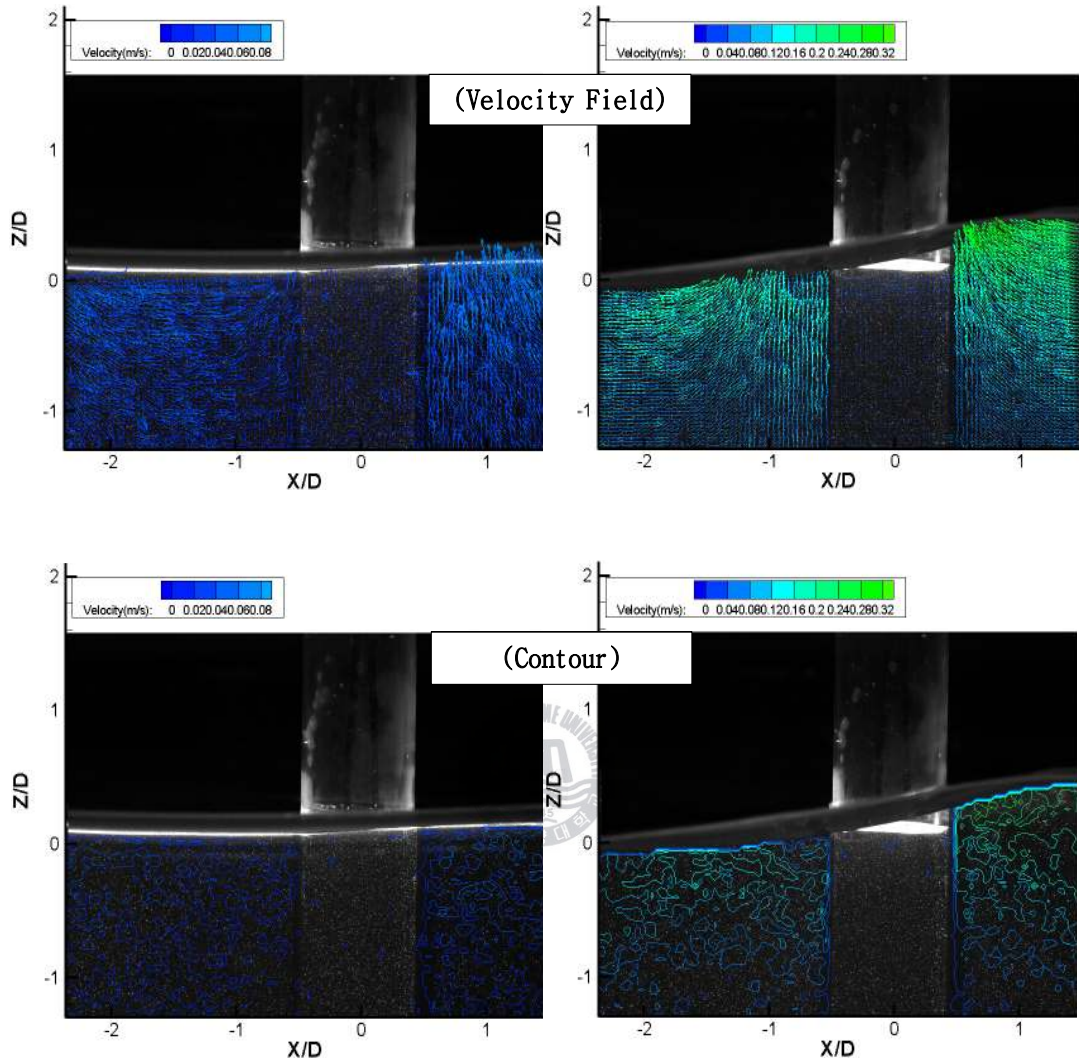
(b) 과도파면(②)

- Continued -



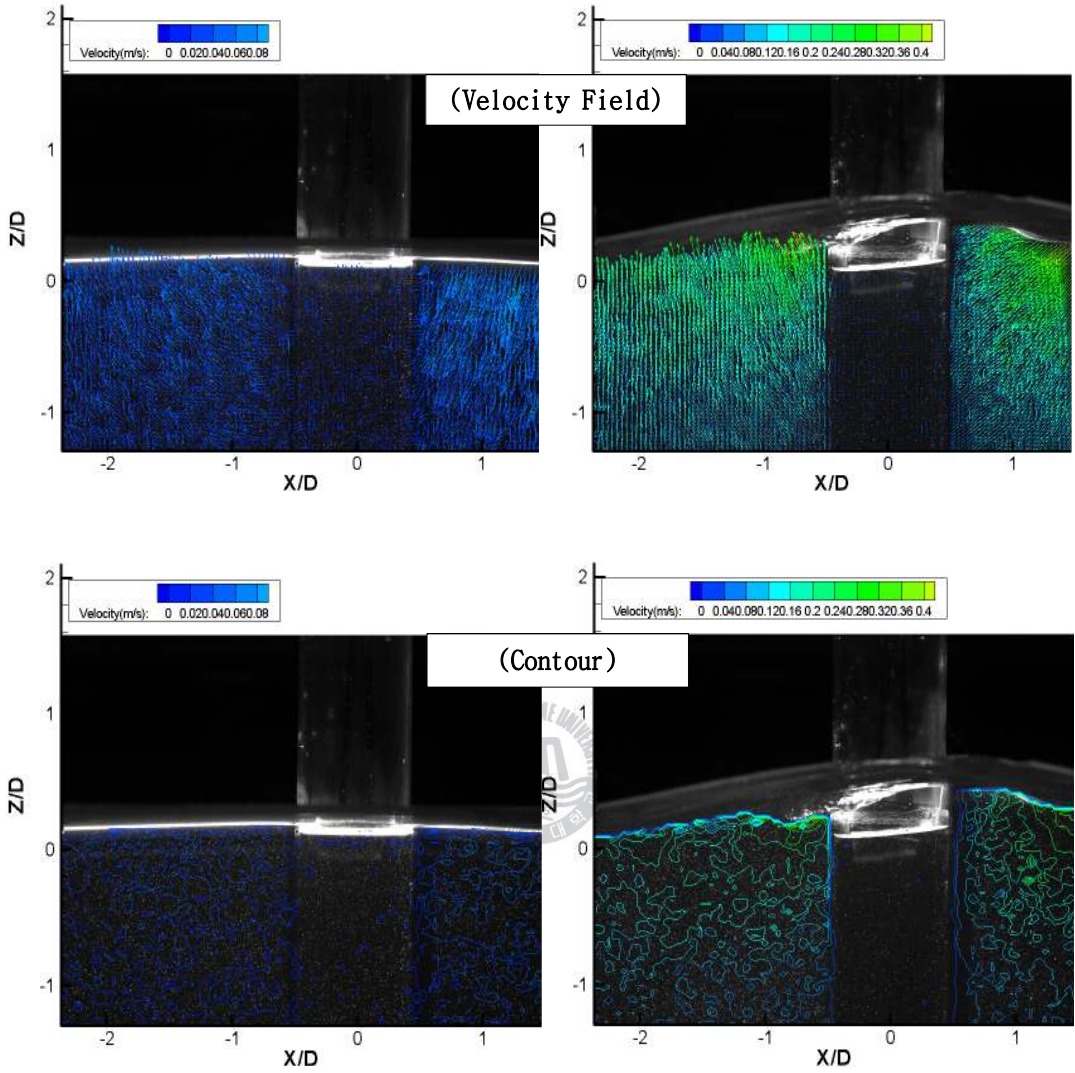
(c) 파저(③)

- Continued -

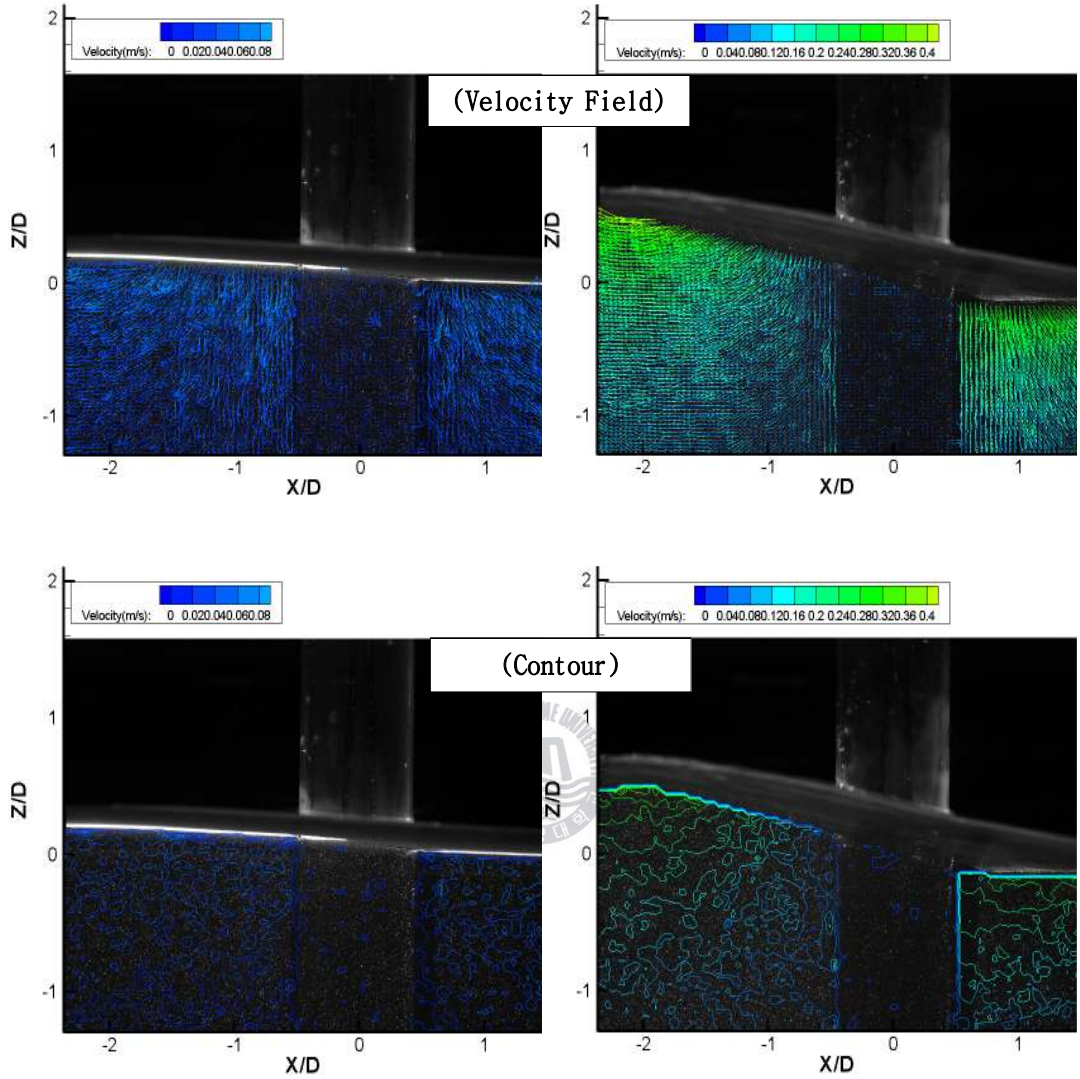


(d) 과도파면(④)

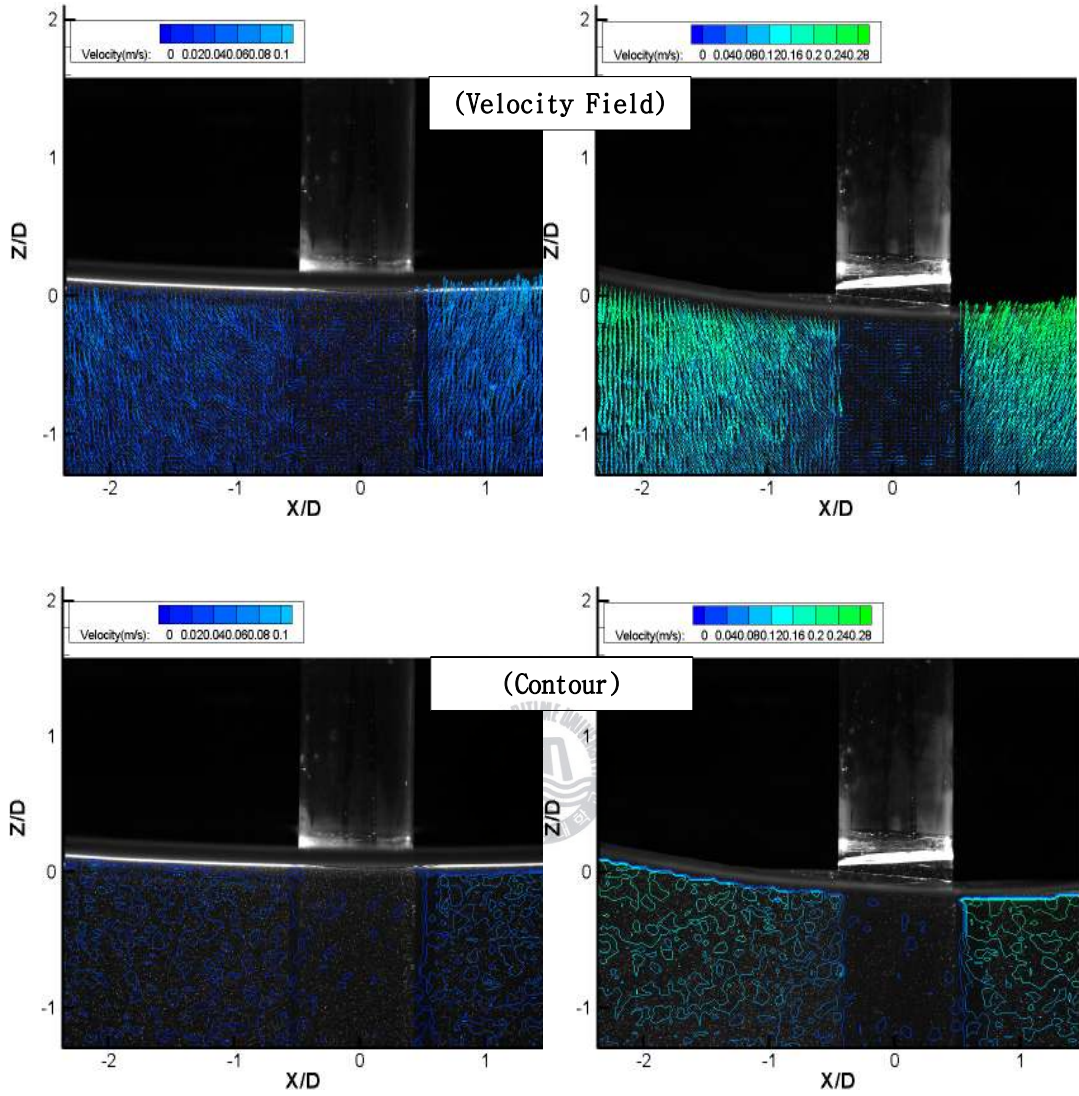
Fig.5.12. (좌) [T:0.7,H:1.3cm, α_0 :3.059°], (우) [T:0.7,H:5.4cm, α_0 :12.705°]



- Continued -

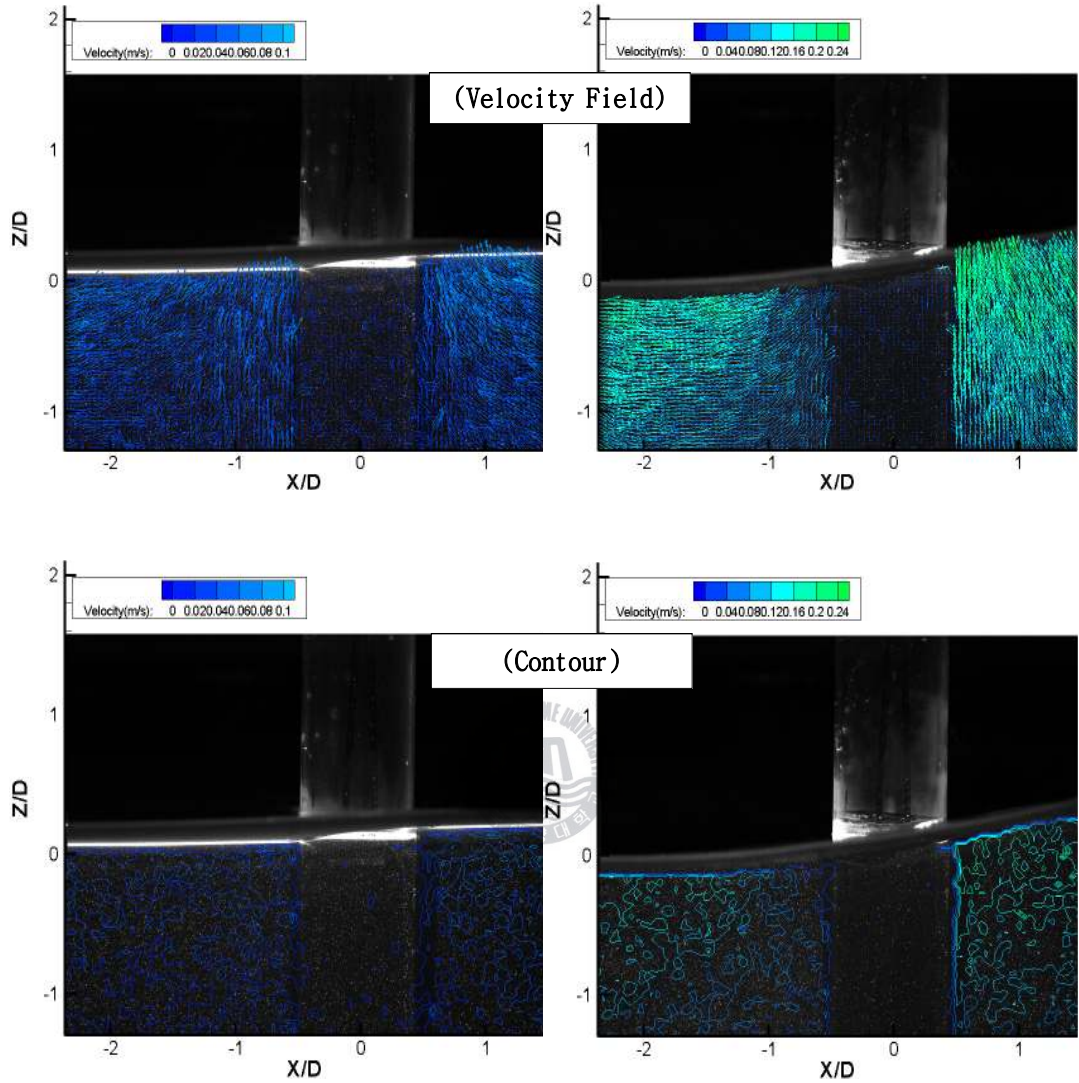


- Continued -



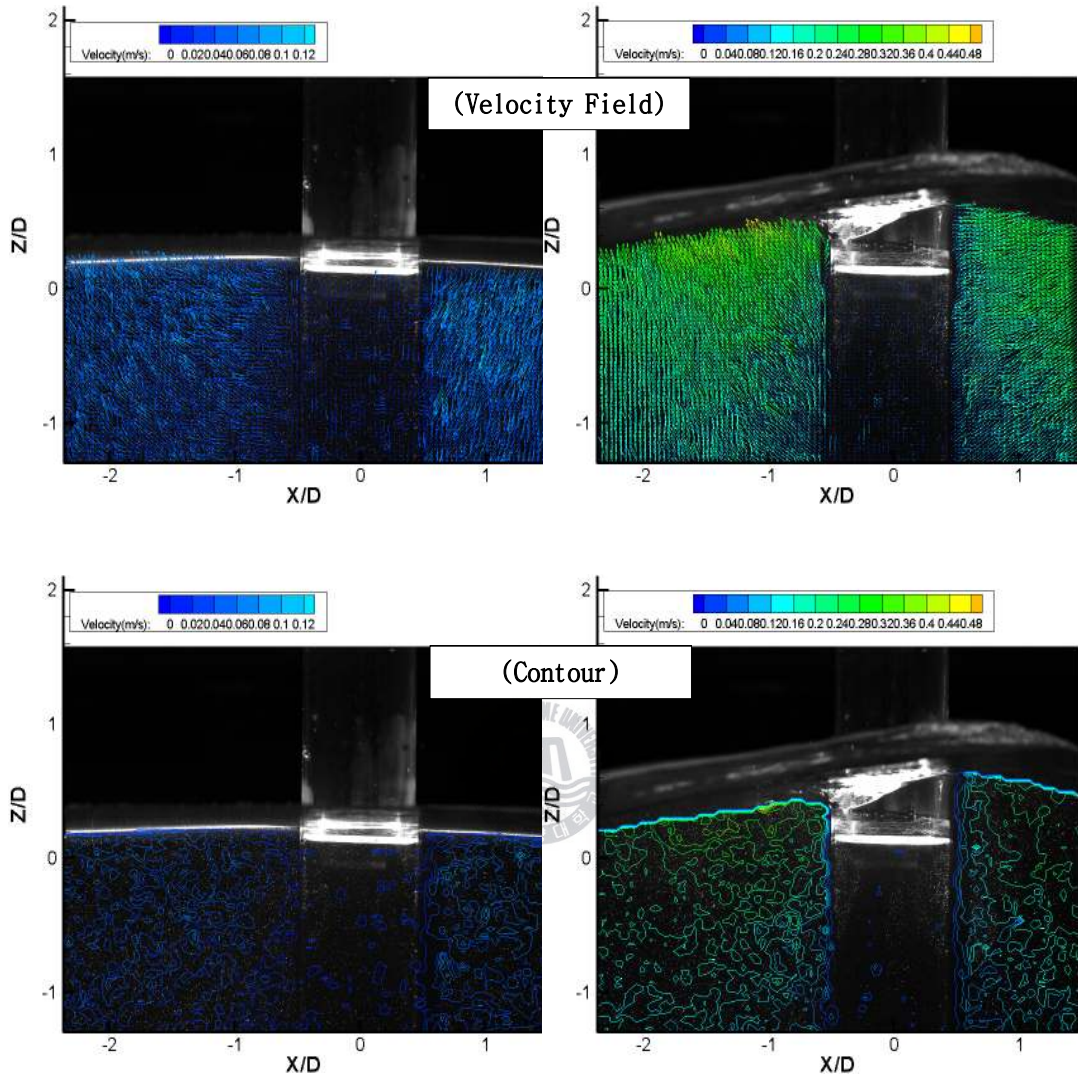
(c) 파저(㉓)

- Continued -



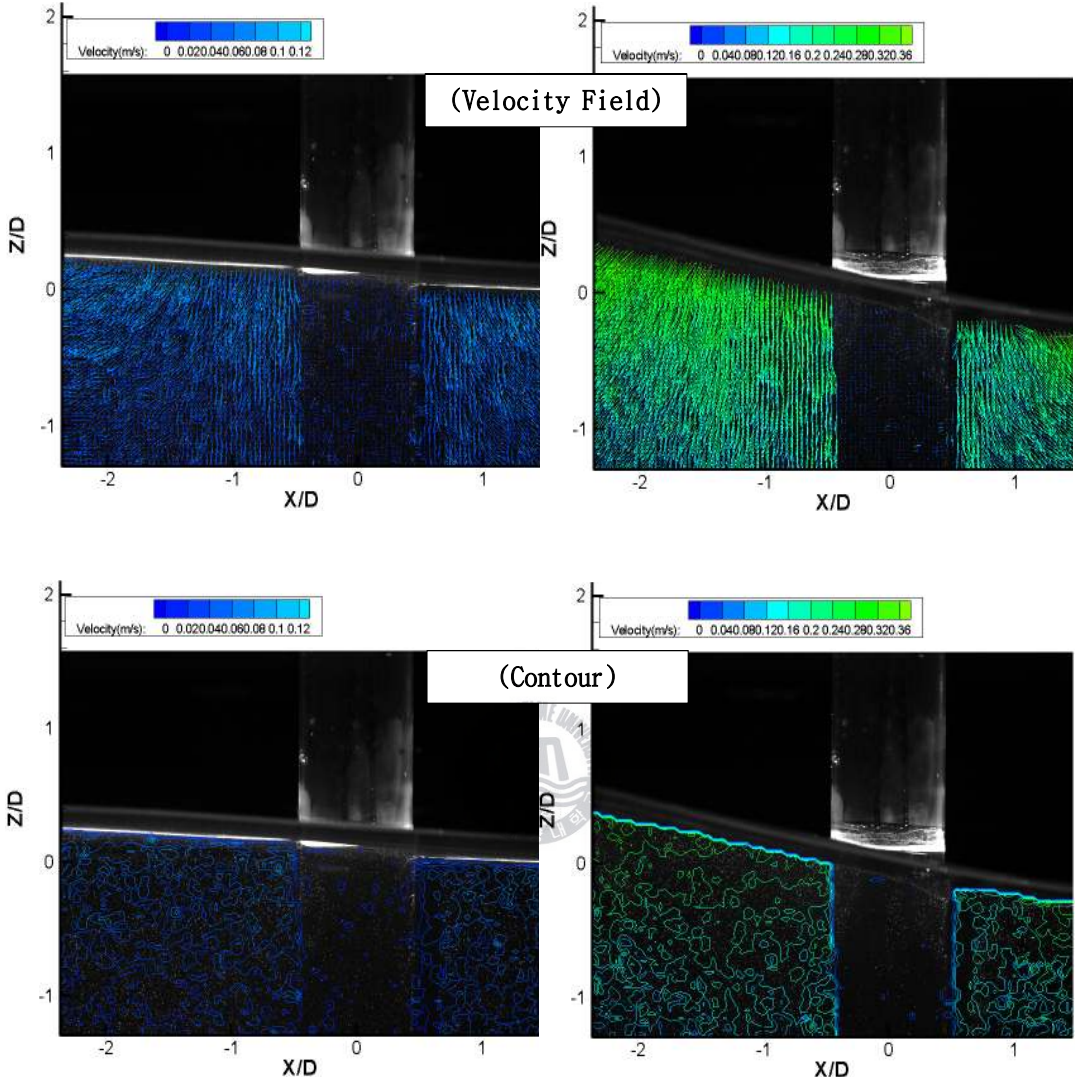
(d) 과도과면(④)

Fig.5.13. (좌) [T:0.8,H:2.2cm, $\alpha_0:3.963^\circ$], (우) [T:0.8,H:5.7cm, $\alpha_0:10.268^\circ$]



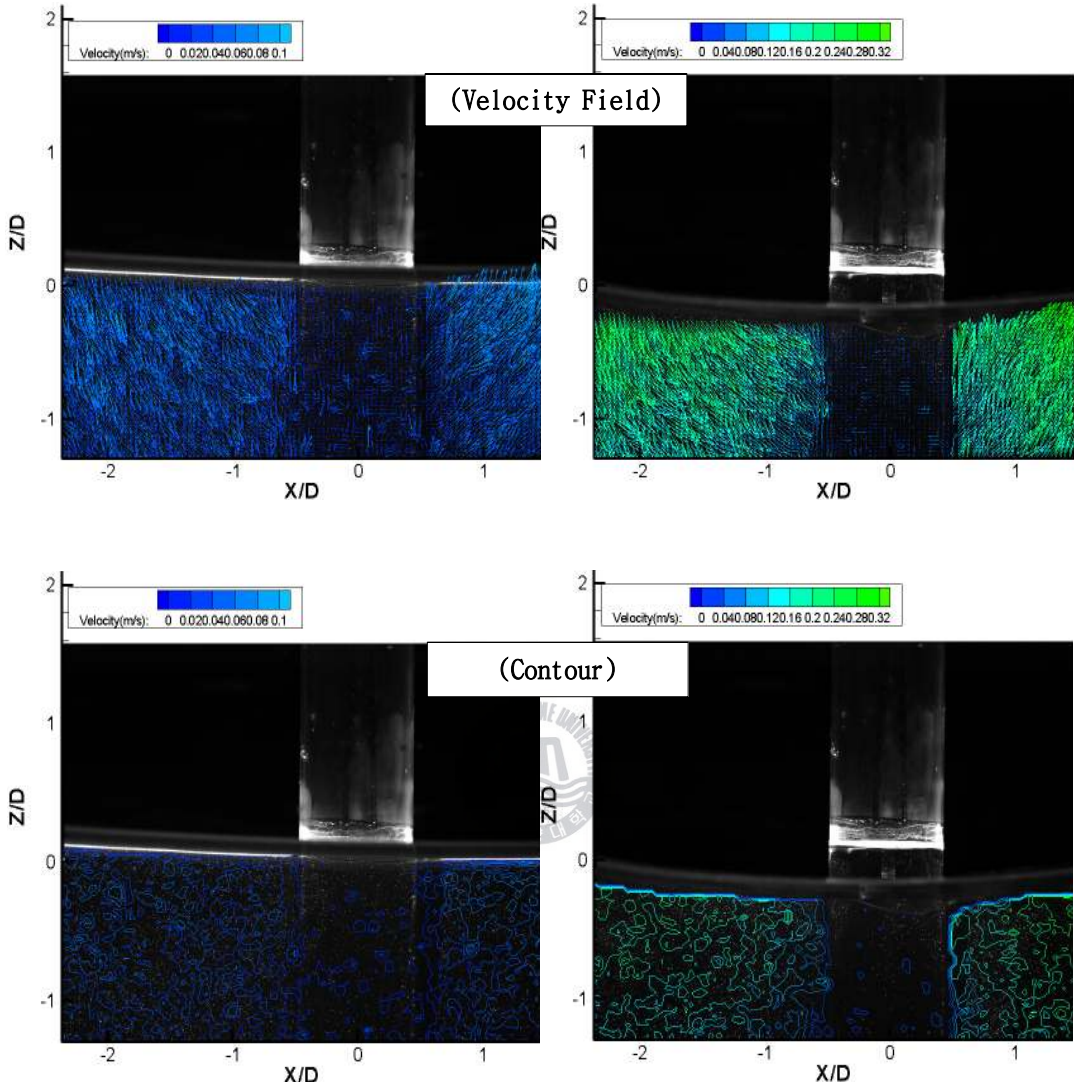
(a) 과정 ①

- Continued -



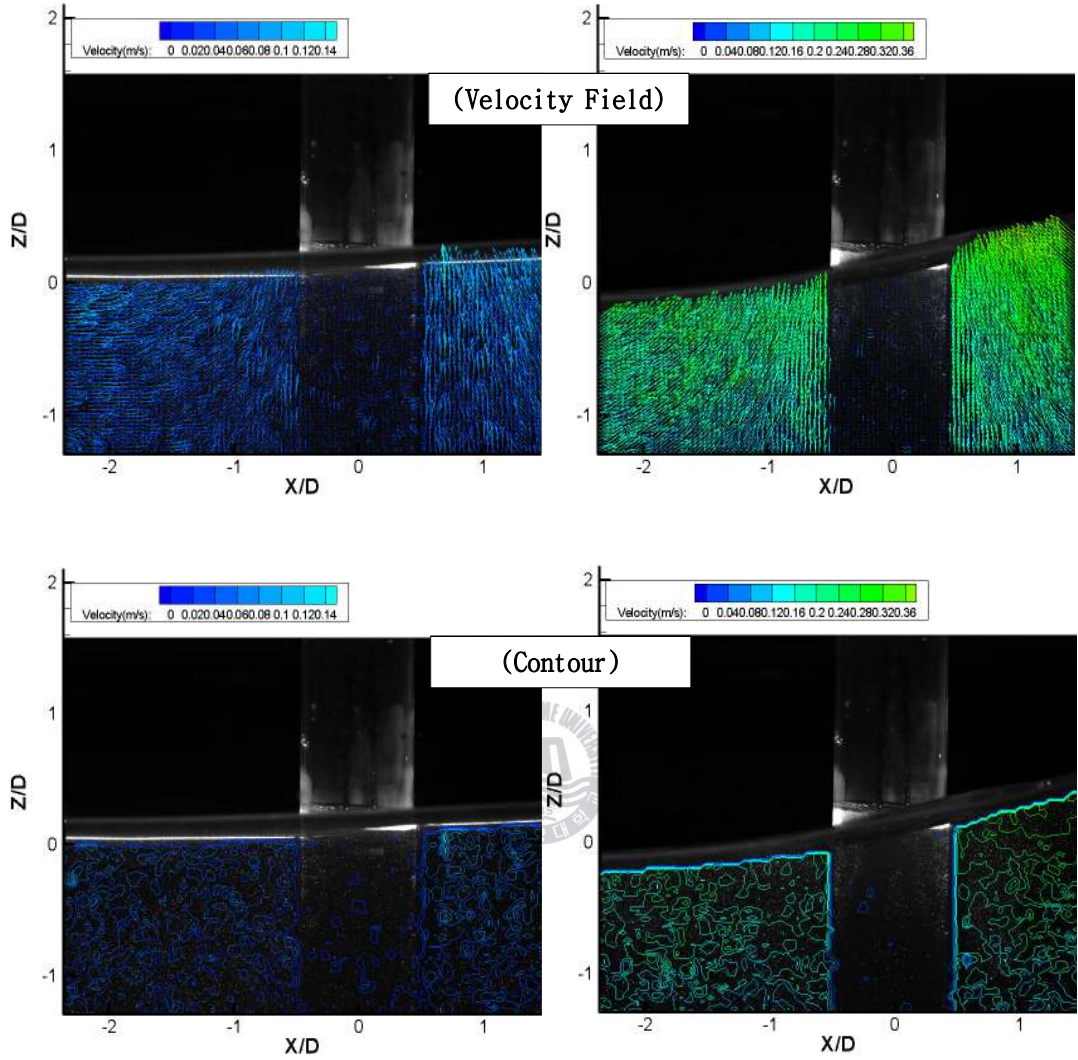
(b) 과도파면(②)

- Continued -



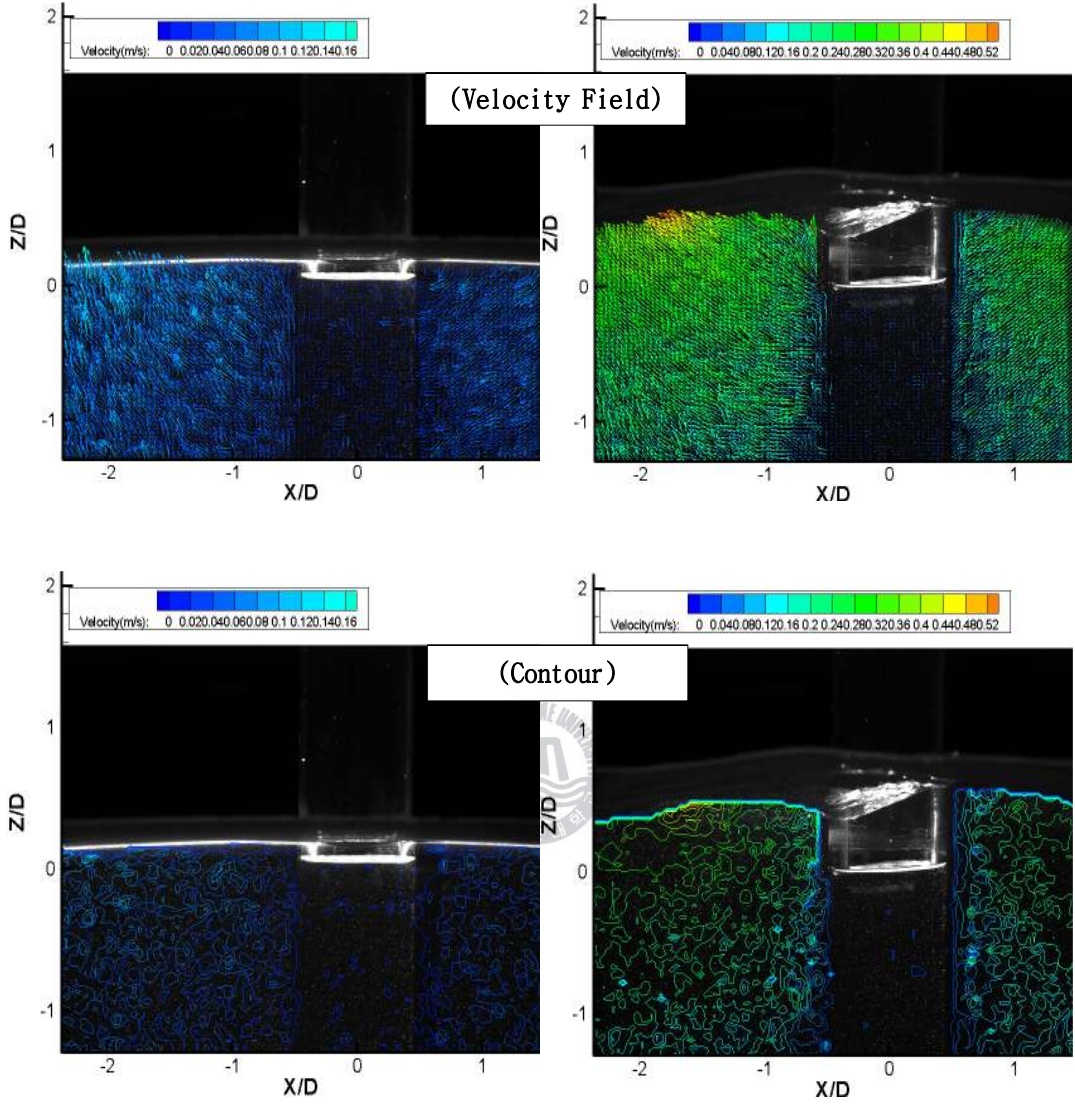
(c) 파저(③)

- Continued -

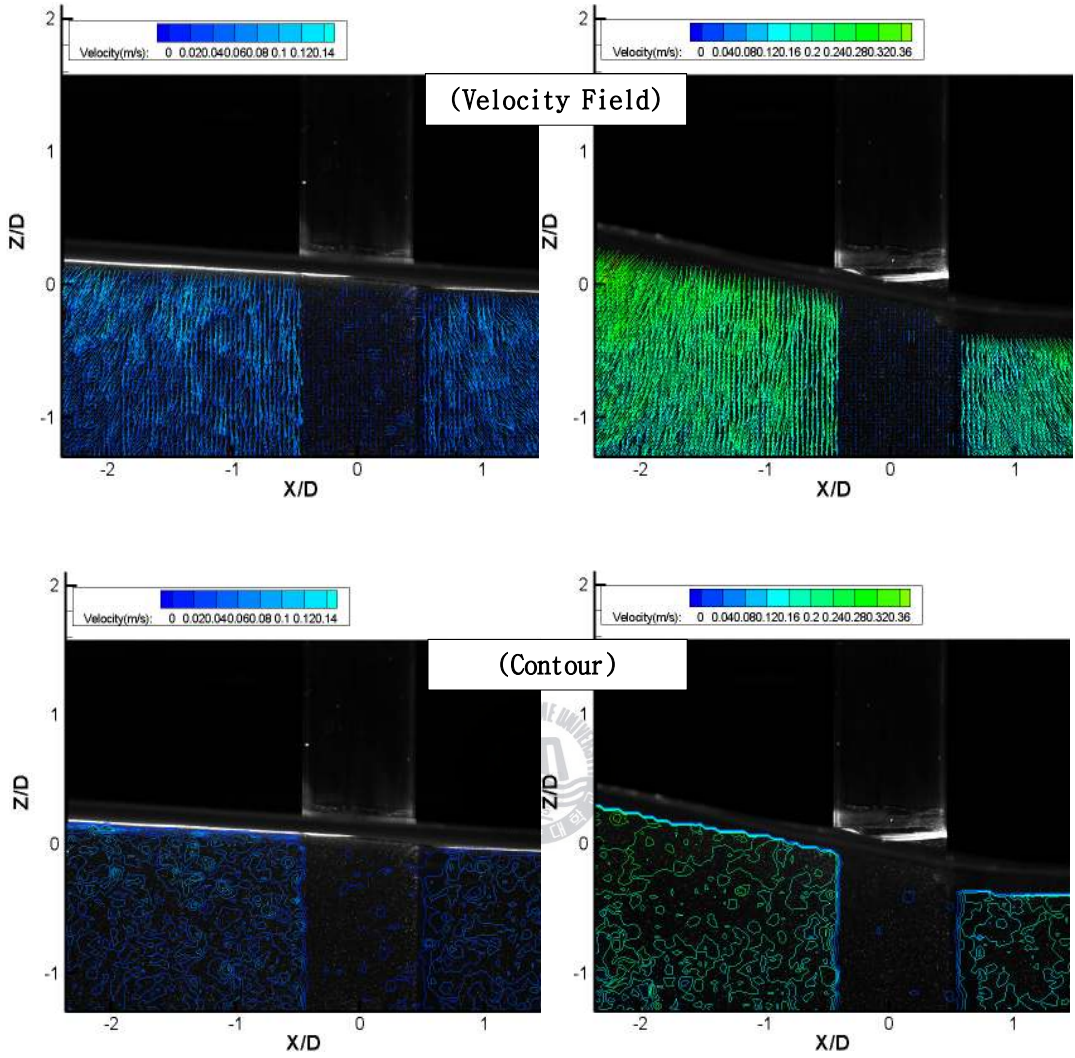


(d) 과도파면(④)

Fig.5.14. (좌) [T:0.9,H:2.4cm, α_0 :3.416°], (우) [T:0.9,H:8.4cm, α_0 :11.956°]

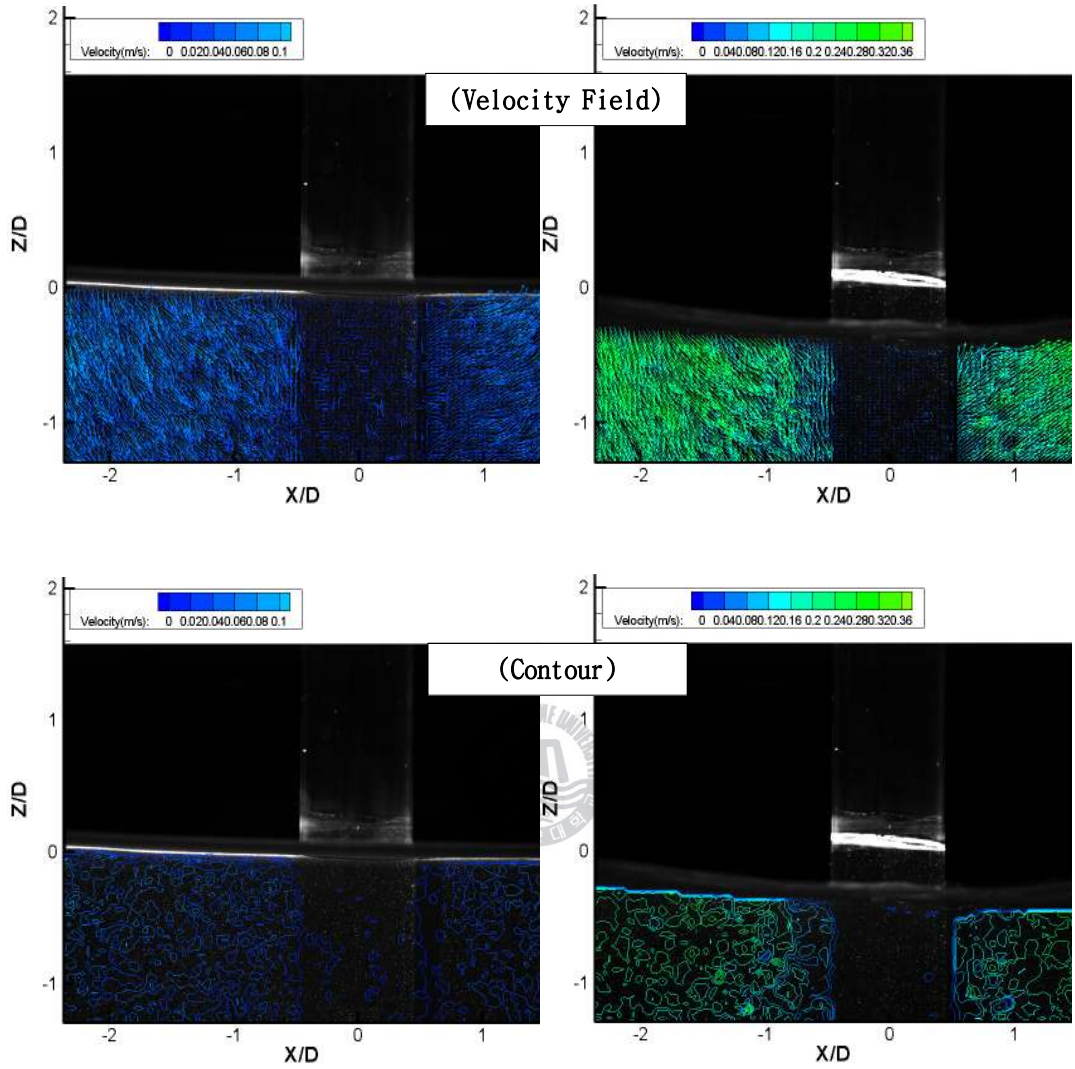


- Continued -



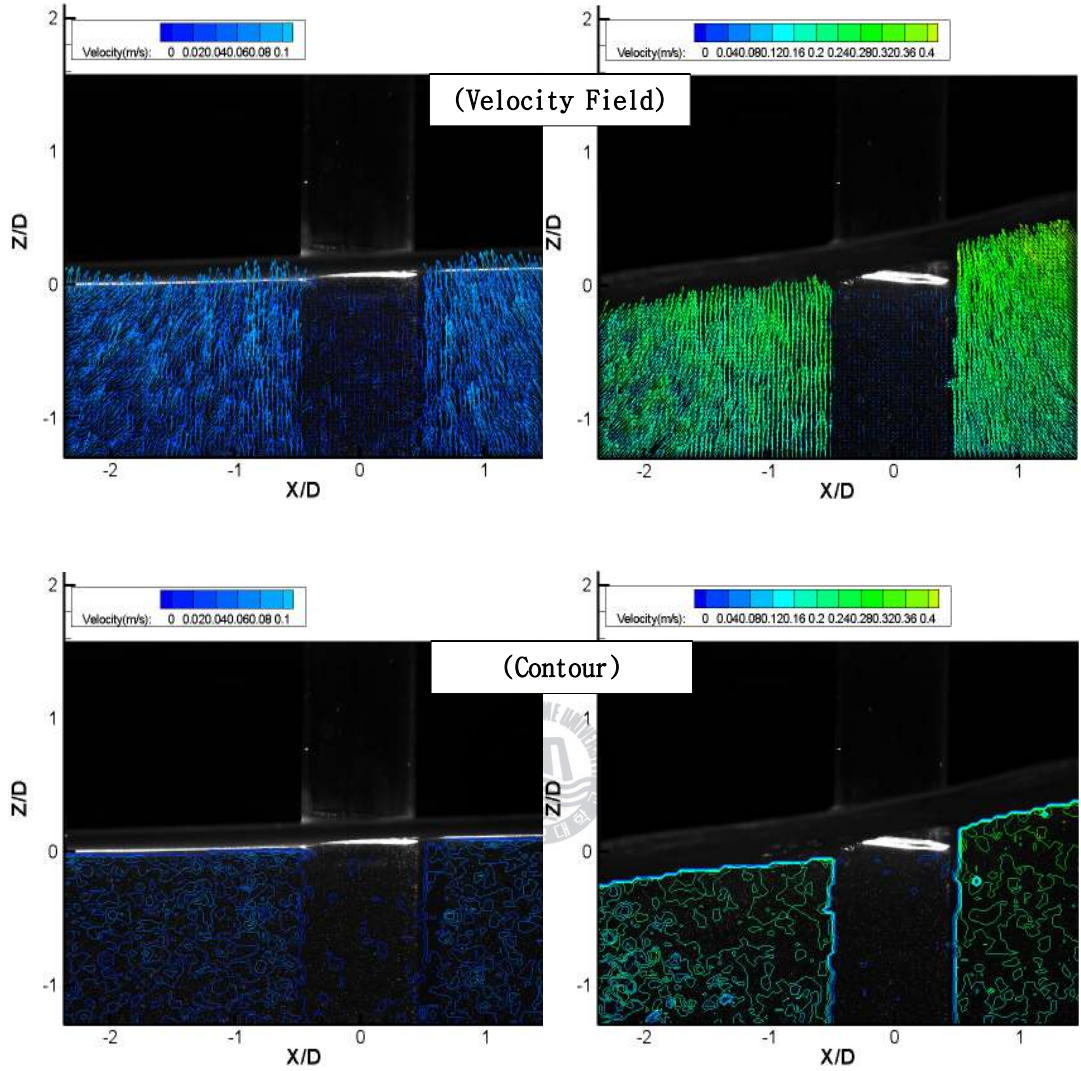
(b) 과도파면(②)

- Continued -



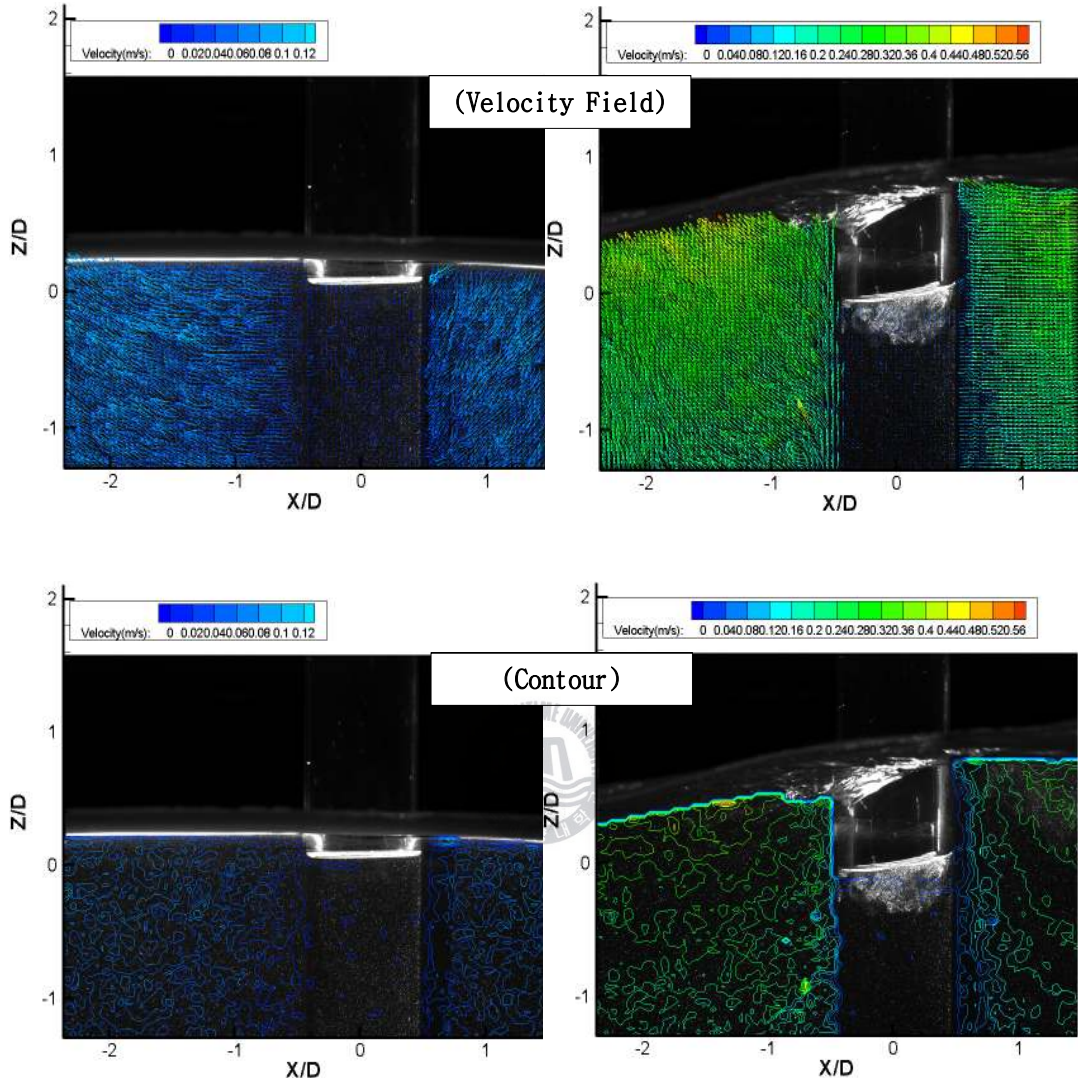
(c) 파저(③)

- Continued -



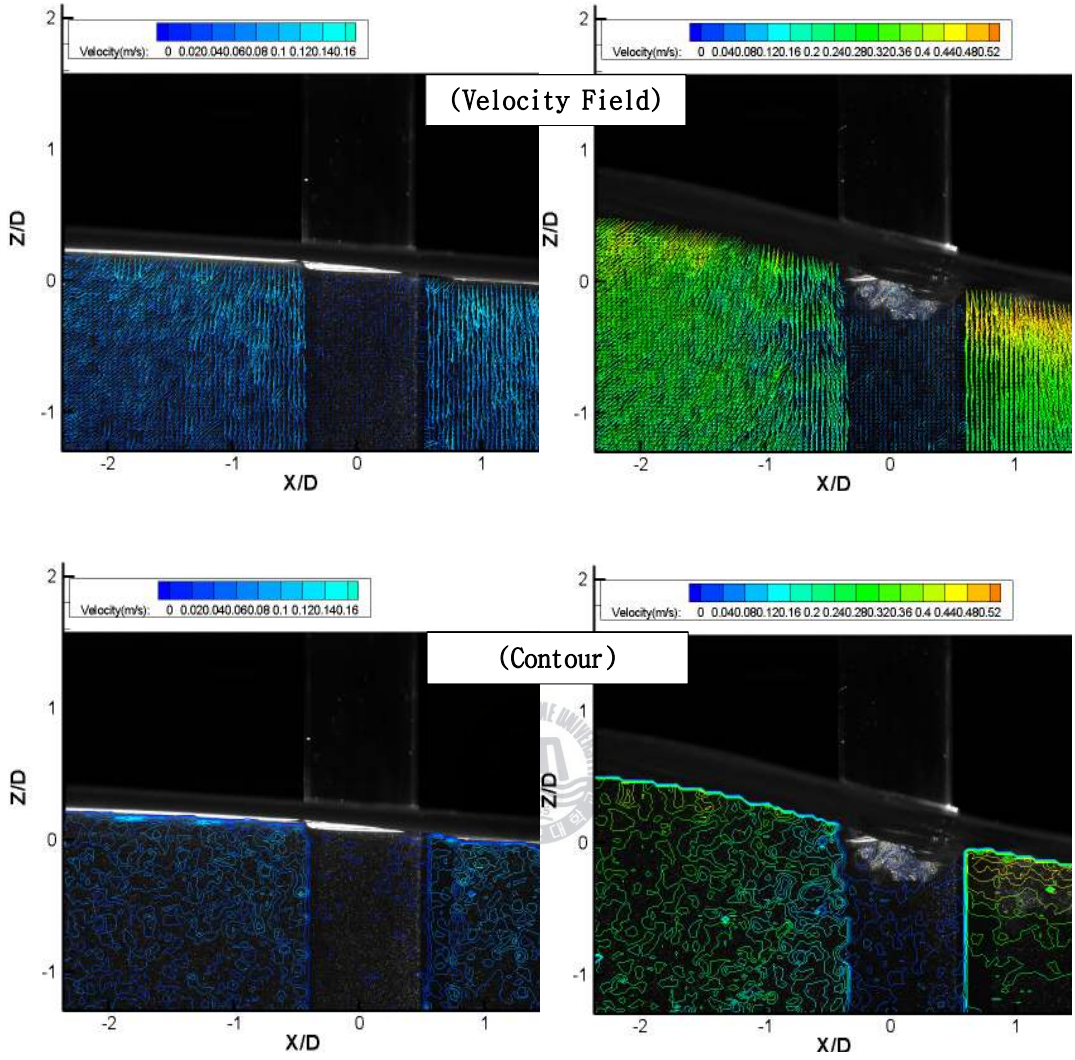
(d) 과도파면(④)

Fig.5.15. (좌) [T:1.0,H:2.5cm, $\alpha_0:2.882^\circ$], (우) [T:1.0,H:10.2cm, $\alpha_0:11.759^\circ$]



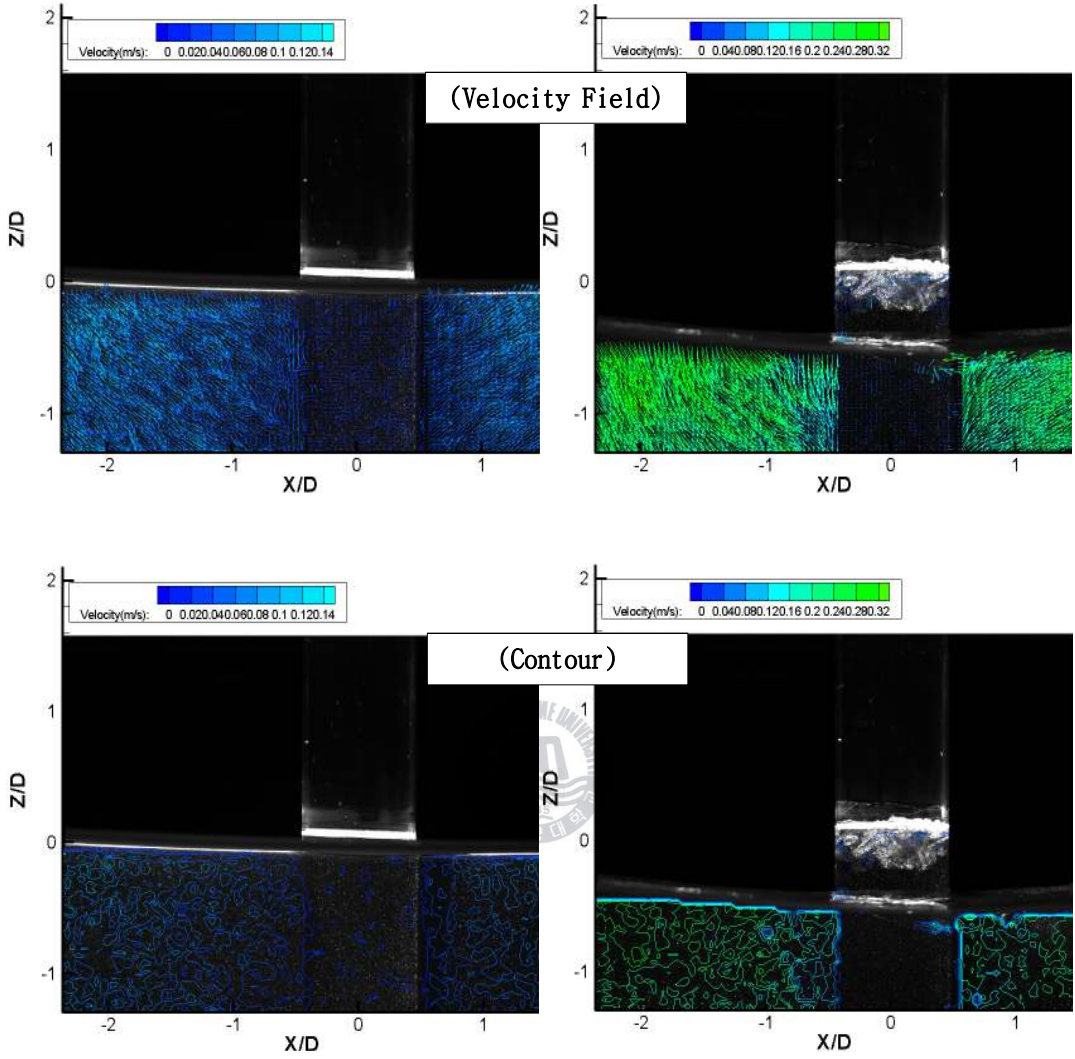
(a) 과정(①)

- Continued -



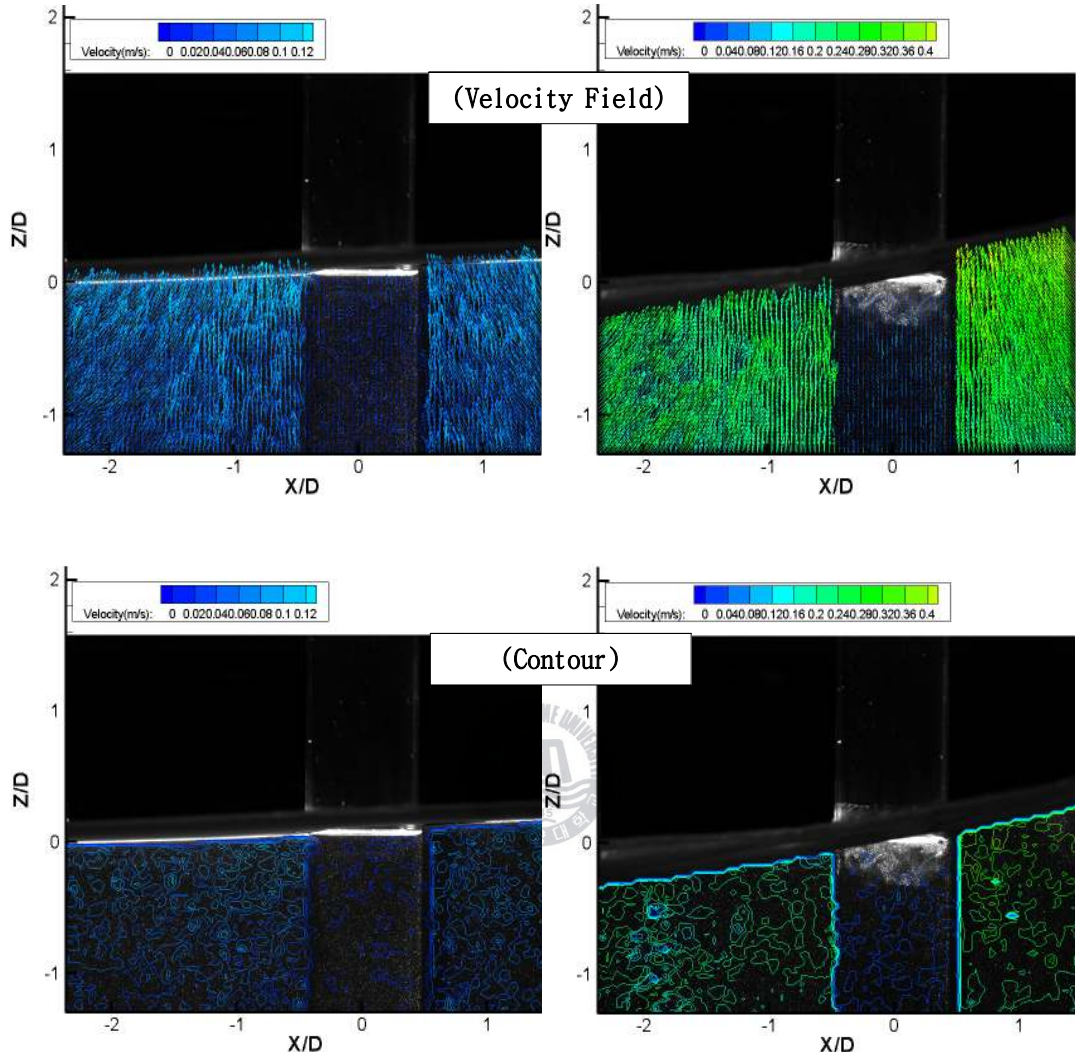
(b) 과도파면(②)

- Continued -



(c) 파저(③)

- Continued -



(d) 파도파면(④)

Fig.5.16. (좌) [T:1.1,H:3.3cm, $\alpha_0:3.144^\circ$], (우) [T:1.1,H:12.3cm, $\alpha_0:11.719^\circ$]

(2) 주기 변화에 따른 와도(Vorticity)

Linear(최대과경사각:4° 내외)와 nonlinear(최대과경사각:10° 내외)일 때, 단주기(T=0.7)와 장주기(T1.1)에서 실린더구조물 주변의 와도(Vorticity) 변화를 나타낸 것이다. Fig.5.17., 5.18.은 실린더구조물 직경이 0.05m, Fig.5.19., 5.20.은 실린더구조물 직경이 0.1m이다. 각 Fig.별로 (a)는 과정, (b)와 (d)는 과도과면, (c)은 과정을 PIV로 측정하여 분석하였다. 각각의 상세한 PIV 측정 위치는 앞 절(5.5.1절)에 나타내었다.

PIV실험을 실시한 결과를 토대로 와류강도(Vorticity)를 나타내었으며, 와류강도의 계산은 PIV속도 데이터를 이용하여 아래의 식↓에 적용하여 구하였다(Raffel & Willert, 1998).

$$\Gamma_{i,j} = \frac{1}{2}dx(u_{i-1,j-1} + 2u_{i,j-1} + u_{i+1,j-1}) + \frac{1}{2}dz(w_{i+1,j-1} + 2w_{i+1,j} + w_{i+1,j+1}) - \frac{1}{2}dx(u_{i+1,j+1} + 2u_{i,j+1} + u_{i-1,j+1}) - \frac{1}{2}dz(w_{i-1,j+1} + 2w_{i-1,j} + w_{i-1,j-1})$$

$$(\Omega_y)_{i,j} \triangleq \frac{\Gamma_{i,j}}{4dx dz}$$

여기서,

$$\Gamma = \oint U \cdot dl = \int (\nabla \times U) \cdot dS = \int \Omega \cdot dS \quad (\Omega: \text{Vorticity}, \Gamma: \text{Circulation})$$

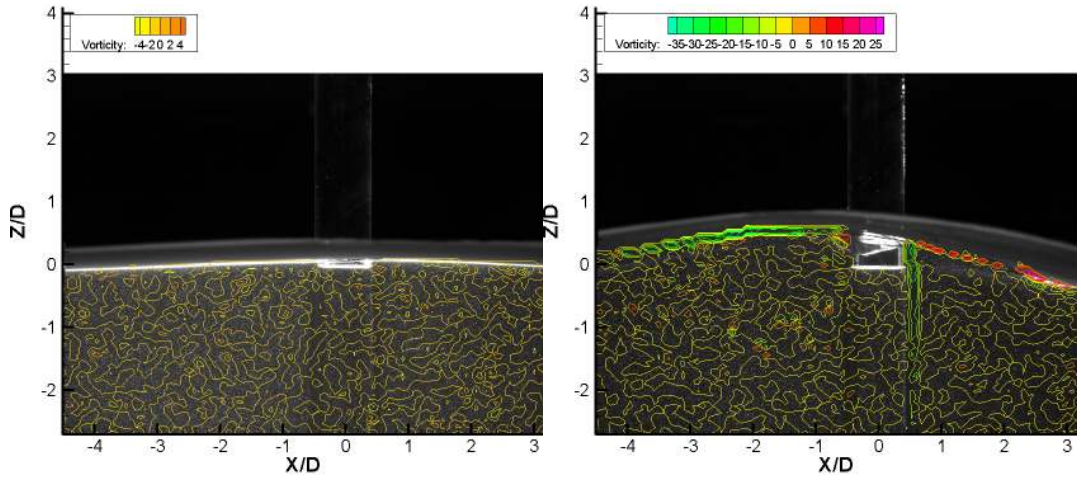
으로 2차원 Stokes 정리에 의해 폐윤곽선(Contour)주위의 순환은 그 폐곡선 안에 둘러싸여진 와도의 합과 동일하다. 또한 부호규약인 오른손 법칙에 따라, 반시계방향의 회전이 양(+), 시계방향의 회전이 음(-)이다.

Fig.5.17.~5.20.에서 과정(①)의 와도(vorticity) 값은 음(-), 파저(③)는 양(+), 과도과면(②,④)은 실린더를 중심으로 음(-)과 양(+의 값으로 나누어진 다. 또한 입사파와 실린더의 충돌로 인한 급격한 과력감쇄로 인하여 와도가 증가되어 실린더 전·후로 쇄파와 함께 bubble이 발생하였으며, 실린더 전·후에

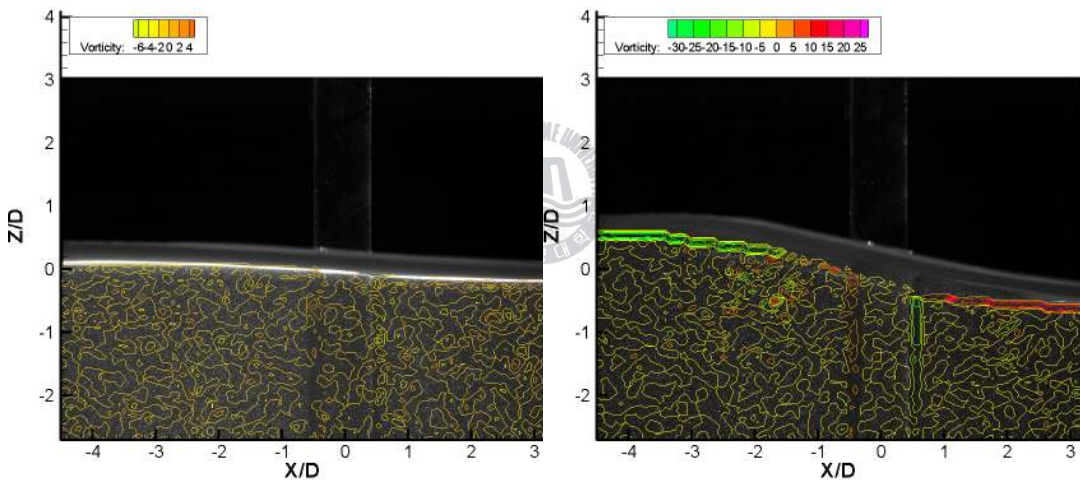
서는 파면의 와도방향과 반대인 와도방향이 형성되었다. 이는 입사파와 실린더의 충돌에 의한 반사파의 생성에 기인한 것으로 국부적인 와도증가와 함께 와도방향의 변화를 가져왔음을 알 수 있다.

또한 실린더 직경이 0.05m에서 0.1m로 증가함에 따라 파력의 감쇄가 증가되어 와도 값이 증가 하였으며, 최대파경사각이 4° 내외(linear)일 때 보다 최대파경사각이 10° 내외(nonlinear)일 때 경사각의 증가량만큼 와도 값도 증가하였다.



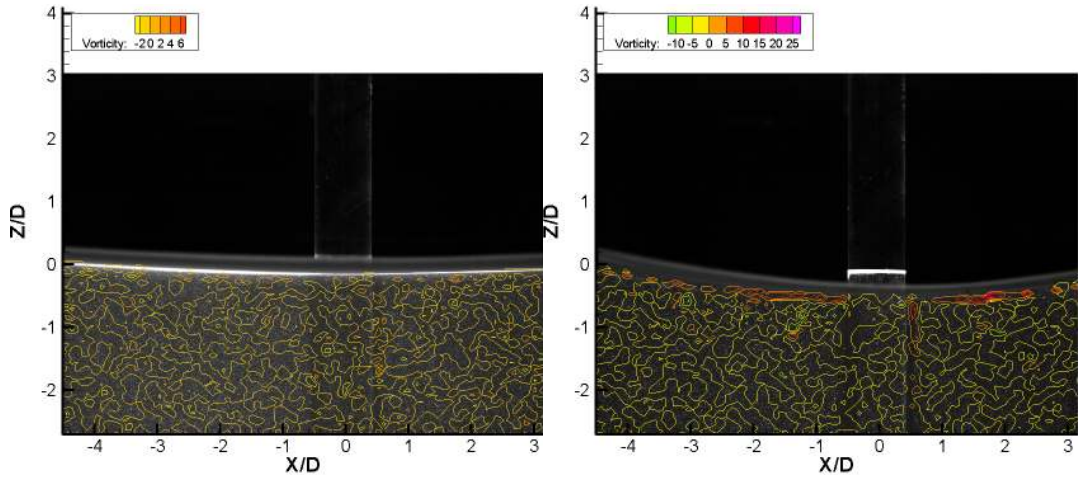


(a) 파정(①)

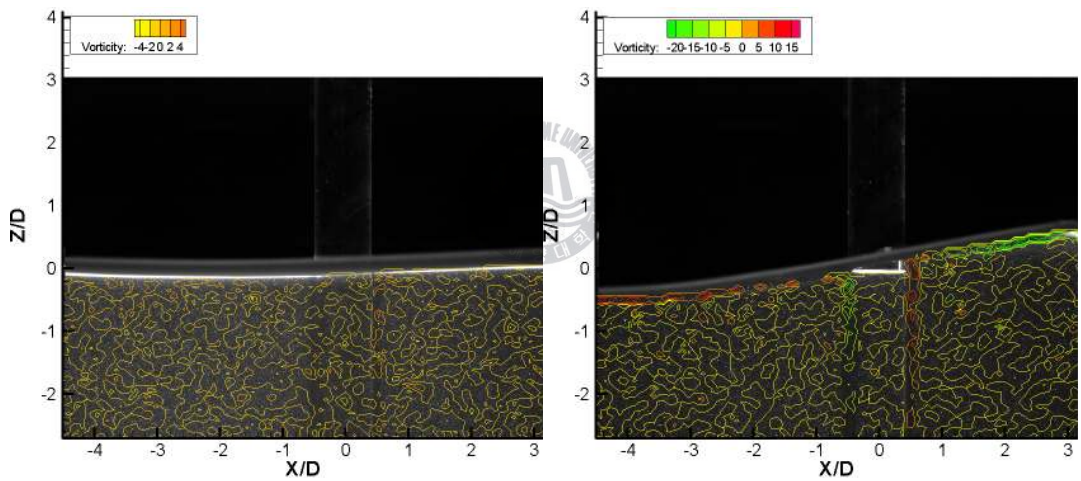


(b) 과도파면(②)

- Continued -

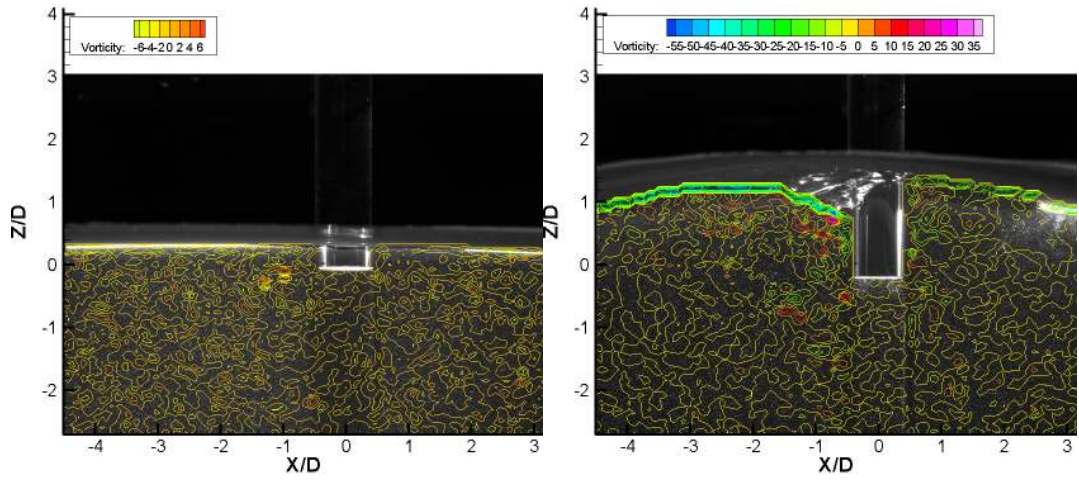


(c) 파저(③)

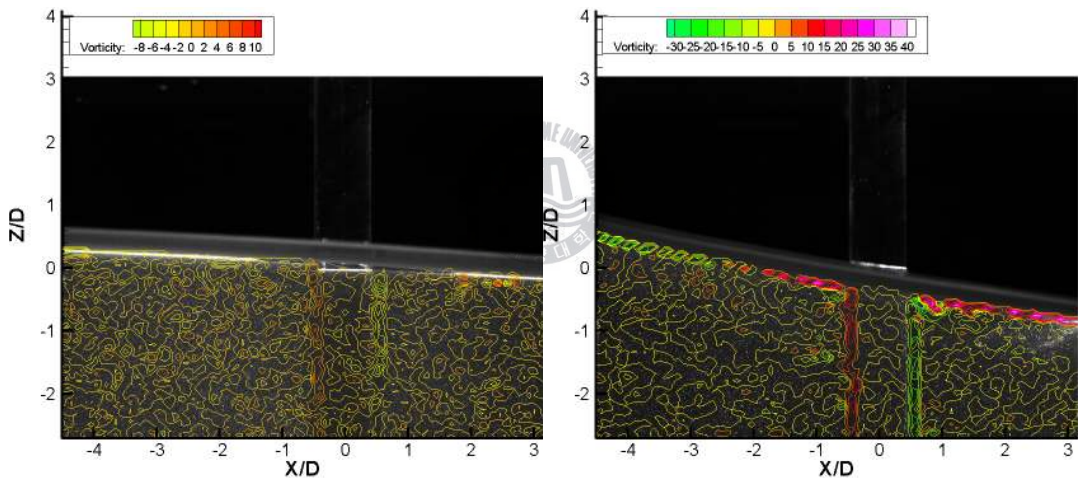


(d) 과도파면(④)

Fig.5.17. (좌) [T:0.7,H:1.3cm, $\alpha_0:3.059^\circ$], (우) [T:0.7,H:5.4cm, $\alpha_0:12.705^\circ$]

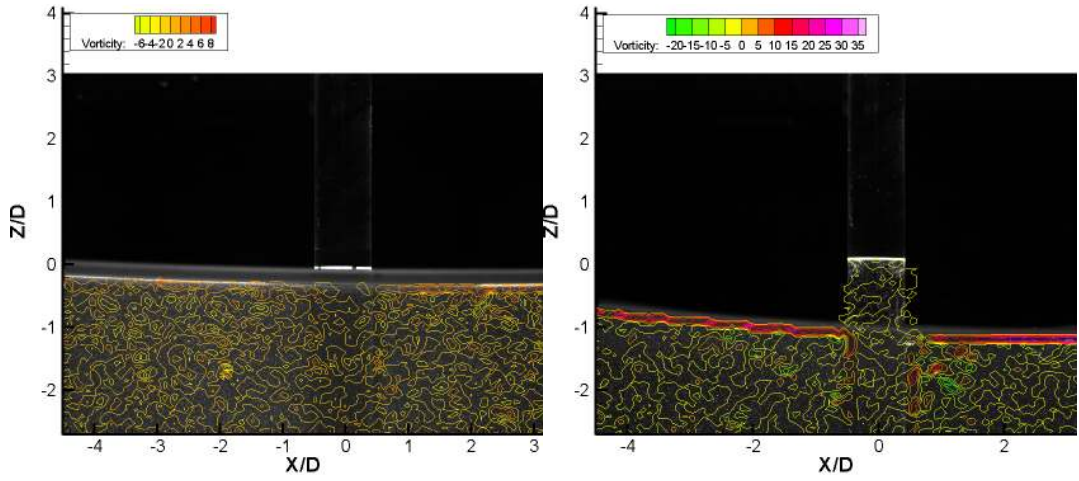


(a) 파정(①)

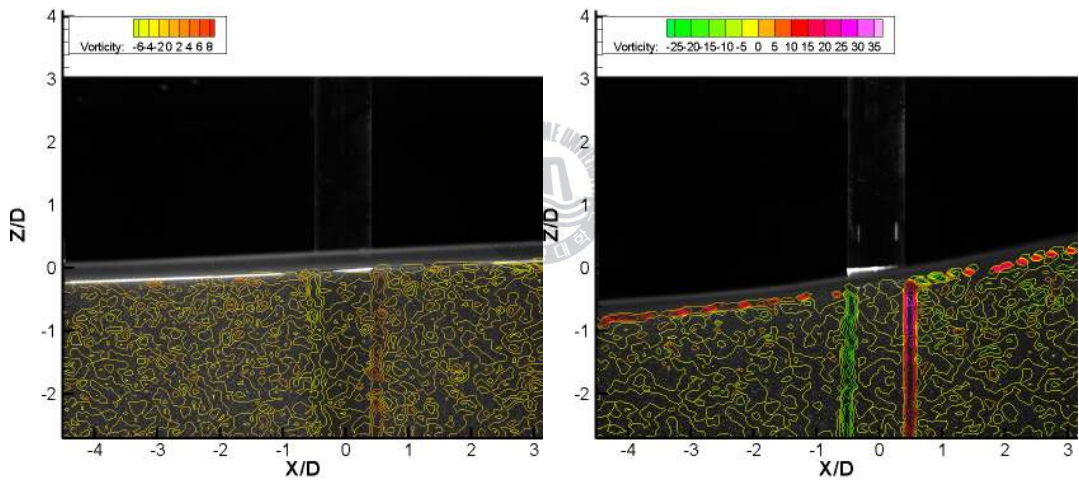


(b) 과도파면(②)

- Continued -

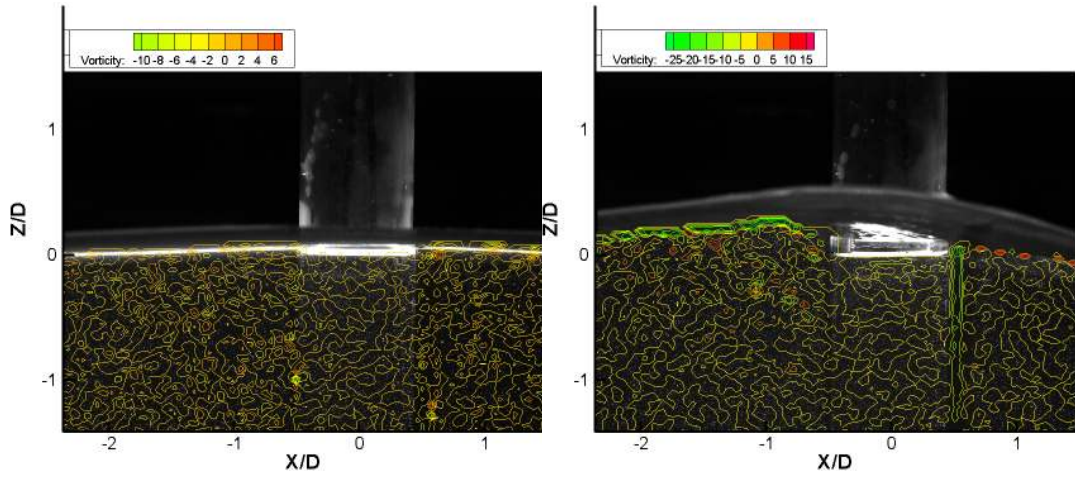


(c) 파저(③)

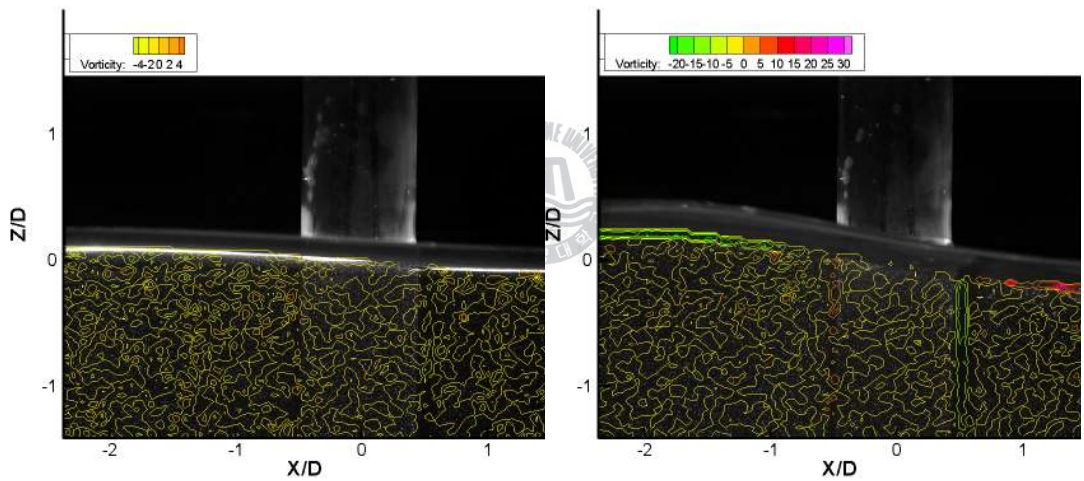


(d) 과도파면(④)

Fig.5.18. (좌) [T:1.1,H:3.3cm, $\alpha_0:3.144^\circ$], (우) [T:1.1,H:12.3cm, $\alpha_0:11.719^\circ$]

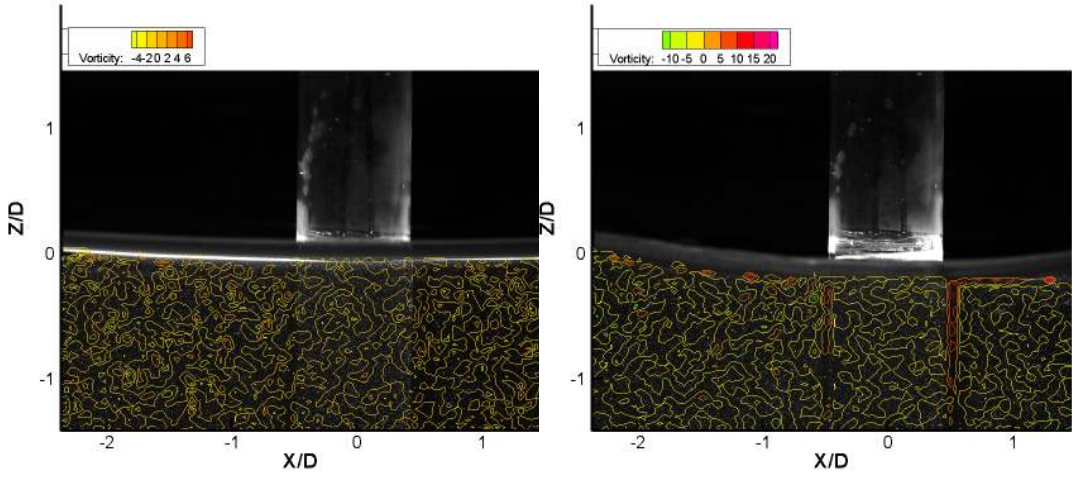


(a) 파정(①)

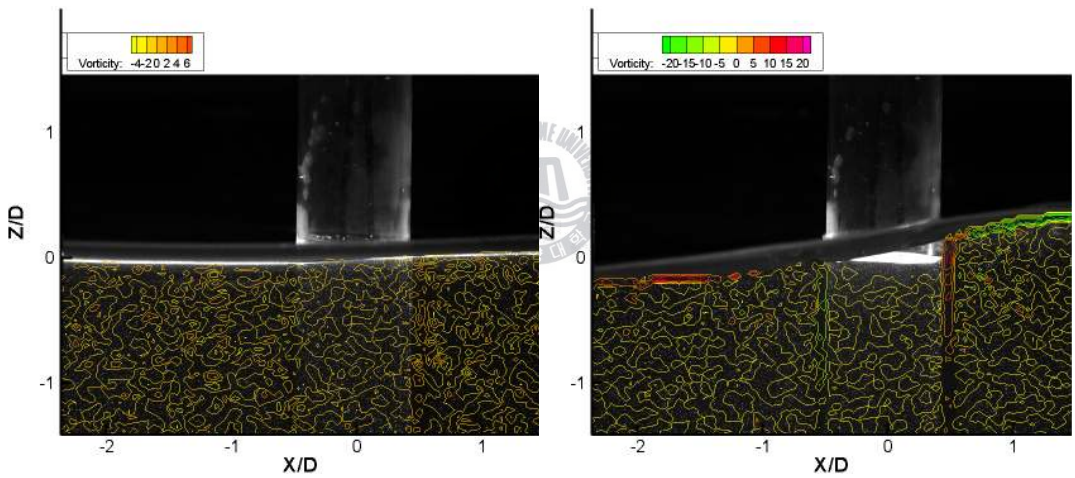


(b) 과도파면(②)

- Continued -

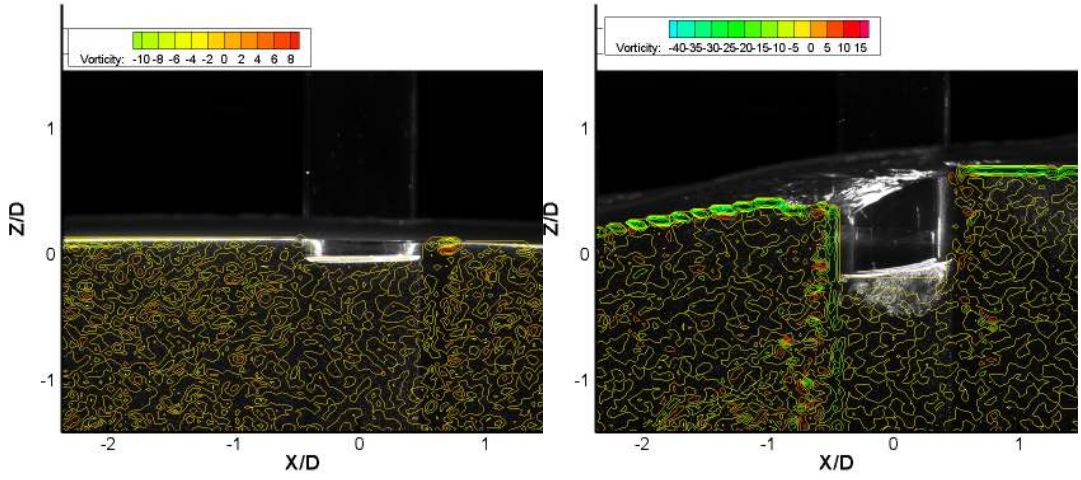


(c) 파저(③)

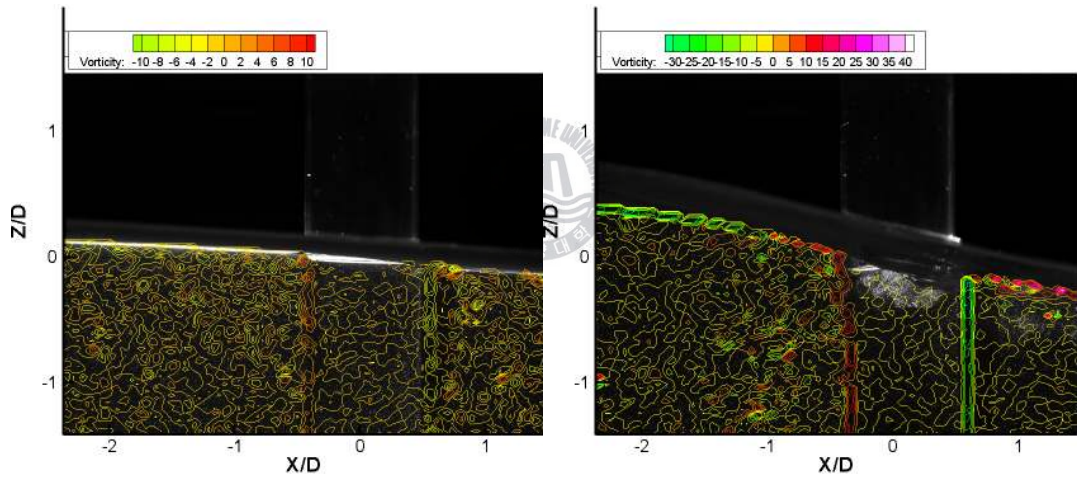


(d) 과도파면(④)

Fig.5.19. (좌) [T:0.7,H:1.3cm, $\alpha_0:3.059^\circ$], (우) [T:0.7,H:5.4cm, $\alpha_0:12.705^\circ$]

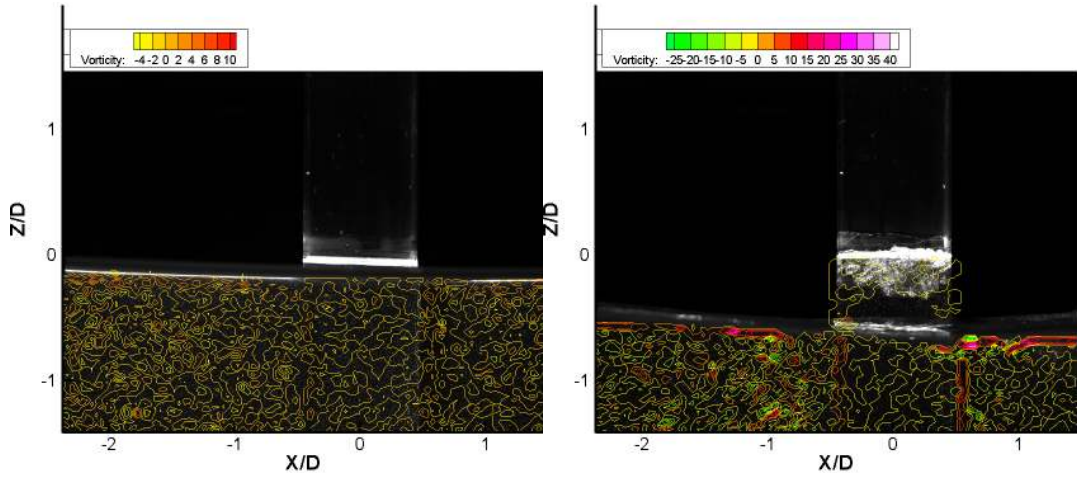


(a) 과정(①)

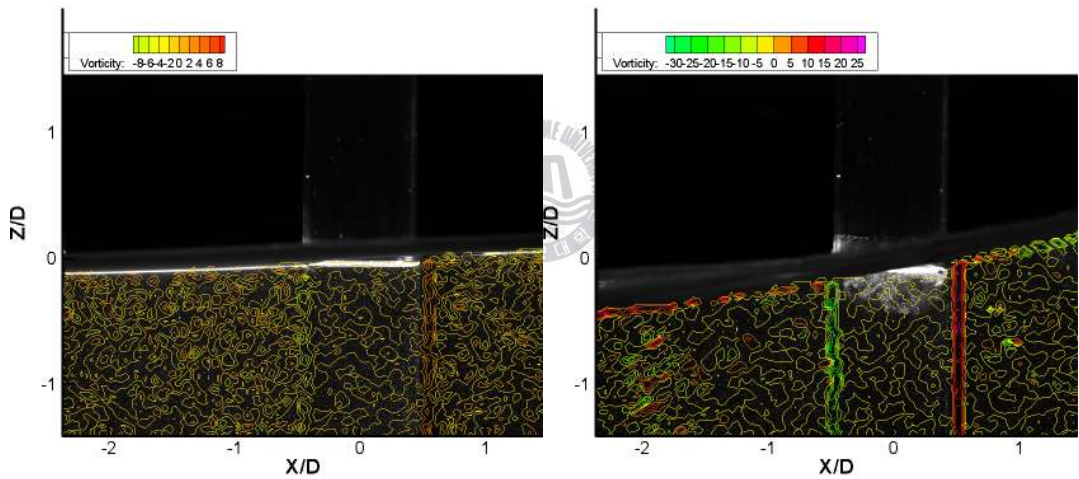


(b) 과도파면(②)

- Continued -



(c) 파저(③)



(d) 과도파면(④)

Fig.5.20. (좌) [T:1.1,H:3.3cm, $\alpha_0:3.144^\circ$], (우) [T:1.1,H:12.3cm, $\alpha_0:11.719^\circ$]

제 6 장. 결론

본 논문에서는 2성분 합성파를 이용하여 쇄파를 생성하고 이를 PIV기법을 적용하여 쇄파현상의 유동구조를 해석할 수 있다는 것을 규명하였으며, 파랑 중 고정식 구조물 주위의 유동해석 시 적용 가능한 PIV기법을 모색하였다.

그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 이론을 적용할 경우 3차 근사값까지 고려함으로서 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 크다.

(3) 쇄파가 일어날 경우 와동에 의해, 정확한 파면 상승량을 계측하기에는 한계가 있다.

(4) 쇄파중의 구조물에 작용하는 파력을 산정할 경우 이론에 의한 값보다 실측값은 더 클 것으로 추정된다.

(5) 파랑 중 고정 구조물 주위 유동해석 시, 대체적으로 유사한 속도분포를 보이나, 최대파경사각(α_0)의 증가분만큼 속도장 값이 증가하였다.

(6) $\alpha_0=4^\circ$ 내외일 때는 실린더 직경이 0.05m에서 0.1m로 증가할 때 속도장 값이 다소 증가하나, $\alpha_0=10^\circ$ 내외일 때는 반대로 속도장 값이 감소하였다. 이는 파고 값에 관련된 것으로 파고값이 5cm이상이며, $\alpha_0=10^\circ$ 내외(nonlinear)에서는 실린더 직경이 증가할 때, 조파감쇄량이 증가함에 따라 속도장 값이 다소 감소된다는 것을 나타낸다.

(7) 실린더 전·후에서는 입사파와 실린더의 충돌에 의한 반사파의 생성에 의하여 국부적인 와도증가와 함께 와도방향이 변화함에 따라, 파면의 와도방향과 반대인 와도방향이 형성된다.

따라서, 향후에는 쇄파 발생 시 발생하는 Bubble에 의해 정확한 Vector해석의 어려움이 있으므로, 이를 보완하기 위해 부분 BIV기법을 이용한 실험의 수행이 요구된다. 또한 수심방향 PIV실험은 파랑 중 고정식 구조물 주위의 주기와 최대

과경사각에 따른 유동장의 해석에는 적합하나, Vortex와 Wake의 관측을 위해서는 수평방향 PIV실험을 통한 보완이 필요하다.



참고 문헌

- (1) Doh, D.H., and Sung, J.Y. (2004). "Workshop on PIV Technique and Standards", Marine Simulator & Training Center, Korea Maritime Univ..
- (2) 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.
- (3) Kwang Hyo Jung, Kuang-An Chang. "Experimental Study on Rectangular Barge in Beam Sea".
- (4) Lee, S.J. (2002). Lecture Note on PIV Velocity Field Measurement Techniques and Applications, National Research Laboratory(Flow Visualization), Pohang Univ. of Science and Technology.
- (5) Markus Raffel, Christian E. Eillert, Jrgen, Kompenhans. "Particle image velocimetry(A Practical guide)".
- (6) Myoung-Kyu Kim(2008). "A Study on flow and creation, dissipation of vorticity for rectangular floating breakwater".
- (7) Sang Joon Lee(2002). "Lecture note on PIV Velocity Field measurement techniques and applications".
- (8) Sumihisa KATAOKA. "Study on Breaking Limit of 2-Component Composite Wave"
- (9) 손경호 저. "Ocean Waves Mechanics" .
- (10) 유상신, 서상호, 배신철 공역. "Introduction to Fluid Mechanics" .
- (11) 박광동, 조효제, 구자삼(2001). "실린더에 작용하는 파력 및 조류력에 관한 연구" , 한국해양공학회지, 제15권, 제4호, pp 14-19.
- (12) 박중천, Hideaki Miyata (1996). "2차원 진행규칙파열에서의 쇄파현상에 따른 비선형성 파의 특성에 관한 수치적 연구" , 한국해양공학회지, 제10권, 제2호, pp 31-41.
- (13) 오상호, 서경덕, Natsuki Mizutani (2007), "심해 풍파 아래에서의 응집 구조", 한국해양·해양공학회지, 제19권, 제1호, pp 16-28.
- (14) 이동연, 주성문, 최항순 (1996). "쇄파발생에 관한 실험적 연구" , 한국해양공학회지, 제8권, 제1호, pp 37-43.

- (15) 이만복, 김경천 (2001), “PIV기법을 이용한 정사각 실린더의 근접후류에 관한연구”, 대한기계학회논문집 B권, 제 25권, 제10호, pp 1408-1416.
- (16) 이수룡, 이병성, 강병윤 (2007). “쇄파의 유동구조 및 쇄파력에 관한 연구”, 한국해양공학회지, 제21권, 제1호, pp 18-24.
- (17) 정광효, 정호환 (2006), “PIV시스템을 이용한 규칙파중 2차원 사각형 부유식 구조물 주위의 유동특성연구”, 한국해양공학회지, 제20권, 제6호, pp 41-53.
- (18) 조규남, 윤재준 (1996), “해양구조물 설계에 있어서 쇄파파력의 영향분석”, 한국해양공학회지 제10권, 제1호, pp 75-80.
- (19) 조효제, 구자삼, 이상길 (2001). “과도 수파중의 복합실린더에 작용하는 쇄파력에 관한 연구”, 한국해양공학회지, 제15권, 제4호, pp3-8.
- (20) 최상현, 류용욱 (2005), “구조물에 작용하는 쇄파의 속도장 측정”, 대한조선학회논문집, 제42권, 제6호, pp 559-565
- (21) 최제은, 조효제, 윤중성, 유영목 (2005). “PIV해석을 통한 Bichromatic Waves의 유동구조에 대한고찰”, 2005년도 한국해양공학회 추계학술대회 논문집, pp 255-260.
- (22) 현범수, 최경신, 도덕희 (2000). “PIV를 이용한 수중익 주위 복잡유동장의 정량적 계측”, 대한조선학회지, 제37권, 제3호, pp 37-44.
- (23) 홍기용, 최학선 (2002). “다방향 파랑집중에 의한 쇄파의 파형특성 연구”, 한국해양공학회지, 제5권, 제1호, pp 11-18.

논문을 마치며...

석사졸업논문을 쓰기까지 여러 가지 우여곡절들이 있었지만, 개개의 상황들이 다...과거사가 되고 보니, 이제 추억 아닌 추억들이 되었습니다.

먼저, 졸업하기까지 중요한 순간들마다 가장 힘이 되어주시고, 스승의 의미가 무엇인지를...연구자가 무엇인지를...알게 해주신 나에 지도교수이시자, 나에 인간적인 소소한 고민들까지 들어주시는 부모님 같으신 조효제 교수님께 가장 감사를 드립니다. 또한 지금은 일본대에서 박사과정 중인 친구이자, PIV가 무엇인지를 알게 해준 공부선배면서, 실험실 멤버였던 제은아...너무 고맙다.

졸업논문을 위해서 실험을 하던 중 PIV실험에서 가장 중요하다고 할 수 있는 레이저의 고장과 조파기의 고장으로, 계획된 실험스케줄대로 진행이 안 되면서, 개인적으로 스트레스를 받기도 했지만, “연구자는 꾸준히 공부하고, 연구하고, 끊임없이 노력해야 된다.” 며 많은 충고를 해주신 교수님. 공부에 온 신경을 쏟을 수 있게 도와주시고 진심으로 걱정해주는 고마움...절대...어딜 가더라도 잊지 못할 겁니다. 그밖에도 PIV에 관해 도움을 주시는 정광효 교수님, 도덕희 교수님...그리고 명규오빠 고맙습니다. 또한 뒤늦은 학교생활에 많은 의지가 되어주고 있는 동생이면서도 친구 같은 정현이와 윤희...고마워^^

늦은 나이에 공부하는 나와 큰언니를 항상 걱정하시면서도... “늦었다고 생각할 때가 가장 빠른 순간이다. 진짜 원하는 걸해라. 후회하는 인생을 살지 마라.” ...항상 응원해주는 부모님과 가족들...항상 감사하고 미안합니다.

그리고 내가 태어나고 15시간 후, 나에 오른쪽 손금과 같은 왼쪽 손금을 가지고 태어나...내 곁에 20살적부터 머물러준...나에 가장 친한 친구이자 동기면서, 세상에서 가장 사랑하는 사람인 화니...정말정말 내가 힘들 때 마다 정신적 보석이 되어주어서...너무너무 고마워^^

언주는 미흡한 졸업논문을 쓰면서...여러가지 복잡한 생각들도 많았고, 힘든 순간들과 속상한 일들도 많았지만...지나고 보니...다...한 사람의 연구자로 성장하고, 인격성숙을 하는 과정들이었습니다. 앞으로 남은 공부와 연구, 실험들을 해나가면서, 세상에 유용한 쓰임이 되는 그릇이 되도록 노력하겠습니다.

제 인생좌우명인 “행복하게 살자.” 처럼, 제 곁에 모든 사람들이 항상 행복하게 살 수 있는 2009년이 되었으면 좋겠습니다.

2009년을 시작하는 1월에...꿈 많은...언주가.