



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](#)

碩士學位論文

PIV를 이용한 테일러 기포 주변의  
속도장 측정



濟州大學校 大學院

에너지공학

金 承 伸

2015 年 2月

# PIV를 이용한 테일러 기포 주변의 속도장 측정

指導教授 李 演 鍵

金 承 伸

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



2014 年 12 月

제주대학교 중앙도서관  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

金承伸의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長	<u>金 南 鎮</u>	Ⓢ
委 員	<u>李 演 鍵</u>	Ⓢ
委 員	<u>崔 秀 錫</u>	Ⓢ

濟州大學校 大學院

2014 年 12 月

# The measurement of velocity field around a Taylor bubble using PIV

Seung-Sin Kim  
(Supervised by professor Yeon-Gun Lee)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree  
of Master of Engineering

December 2014

This thesis has been examined and approved.



.....  
Thesis director, Yeon-Gun Lee, Prof. of Nuclear and Energy Engineering

.....  
.....  
.....

.....  
Date

Department of Nuclear & Energy Engineering

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

# 목 차

LIST OF FIGURES .....	iii
SUMMARY .....	vi
I. 서론 .....	1
II. PIV 배경지식 .....	3
1. PIV의 주요 특징 .....	3
2. PIV 필수 구성요소 .....	5
3. PIV를 이용한 데이터 획득 과정 .....	9
4. 레이저와 카메라 사이의 동기화 과정 .....	9
5. Interrogation area (IA) .....	10
6. PIV 오류 인자 .....	12
III. 슬러그류 유동장 측정 실험 .....	14
1. 실험 장치 .....	14
2. PIV 구성 .....	15
3. 실험절차 및 실험조건 .....	17
4. 이미지 처리 .....	17
IV. 결과 및 고찰 .....	21
1. Stagnant 상태에서의 속도장 분석 .....	21
2. Liquid superficial velocity가 속도장에 미치는 영향 .....	29
V. 결론 .....	37

REFERENCE .....	38
감사의 글 .....	40



## LIST OF FIGURES

Figure 1. Sketch of continuous slug flow .....	1
Figure 2. The three modes of particle image density: (a) low (PTV), (b) medium (PIV), and (c) high image density (LSV) .....	5
Figure 3. Basic requirements for a PIV system .....	6
Figure 4. Obtaining a pulsed laser sheet from continuous wave lasers .....	7
Figure 5. Staggered pulse trains from twin pulsed lasers for PIV .....	8
Figure 6. Time diagram of the synchronization between laser and camera .....	10
Figure 7. Interrogation area .....	11
Figure 8. Spatial cross-correlation between $I_1$ and $I_2$ . .....	12
Figure 9. Experimental apparatus for vertical two-phase flow .....	14
Figure 10. Lateral view of test section .....	15
Figure 11. Arrangement between PIV components .....	16
Figure 12. The procedure of first image processing .....	19
Figure 13. The procedure of second image processing .....	20

Figure 14. The flow pattern's change around nose in stagnant state .....	21
Figure 15. The axial velocity around nose in stagnant state .....	22
Figure 16. The radial velocity around nose in stagnant state .....	23
Figure 17. The flow pattern's change around body in stagnant state .....	24
Figure 18. The axial velocity around body in stagnant state .....	25
Figure 19. The radial velocity around body in stagnant state .....	26
Figure 20. The flow pattern's change around tail in stagnant state .....	27
Figure 21. Velocity profiles at the rear of the Taylor bubble with the bubble interface obtained from PST .....	28
Figure 22. PIV measurements of the velocity field in the wake of a Taylor bubble rising in a stagnant fluid .....	29
Figure 23. The flow pattern's change around nose according to liquid superficial velocity .....	30
Figure 24. The axial velocity around nose according to liquid superficial velocity .....	31
Figure 25. The radial velocity around nose according to liquid superficial velocity .....	32



Figure 26. The flow pattern's change around body according to liquid superficial velocity ..... 33

Figure 27. The axial velocity around body according to liquid superficial velocity ..... 34

Figure 28. The radial velocity around body according to liquid superficial velocity ..... 35

Figure 29. The flow pattern's change around tail according to liquid superficial velocity ..... 36



## SUMMARY

Slug flow is found in a lot of industrial situations. Taylor bubble is a component of slug flow, so this bubble was became theme of many researches for two-phase flow. But most research have used liquid that has different flow properties from liquid using real industrial situation. Therefore flow aspect is derived from those researches has a limitation of applicability for air-water or steam-water two phase flow that is happened on industrial situation. Present CFD code for two-phase flow is capable to simulate Taylor bubble and flow aspect around that bubble in limited situation.

For compensation of this limitation, this study deals with Taylor bubble rising in the vertical tube on air-water two-phase flow. This study is analysis of velocity and changing velocity for Taylor bubble and vicinity of rising Taylor bubble in stagnant liquid or co-current liquid.

Experiments had conducted on raising Taylor bubble in stagnant liquid or co-current liquid. In assumption of Taylor bubble is symmetry, velocity field for Taylor bubble and vicinity of bubble was analyzed using right part of the bubble. As a result of analysis, it is possible to confirm previous research's founding that raising bubble in stagnant water affects  $0.5 \sim 0.6 D$  from nose.

Liquid in liquid film is decelerated at the boundary between body and tail. because of flow continuity. In the case of co-current flowing, a stagnant section appear as bubble rise. And that section was descent as superficial velocity of liquid was increased. But if superficial velocity of liquid could be faster than the fastest velocity of this experiment, the stagnant section will be ascend.

At further work, PIV-PST(Pulsed Shadow Technique) system will be used for overcome PIV technique's limitation that was exposed in this experiment. And the development of processing algorithm will be conducted for post-processing of PIV analysis.

## I. 서론

슬러그류는 기체와 액체 유량의 변화에 따라 관 안에서 만들어지는 여러 유동 영역 중 하나이다. 이러한 슬러그류는 유전에서의 hydrocarbon의 생산 및 운송, emergency core cooling 시의 원자로, 발전소의 증기 보일러, 극저온 유체의 운송과 처리, 기체 흡수 유니트, 열교환기 등의 다양한 산업적 상황에서 볼 수 있기 때문에 이와 관련된 많은 연구들이 진행되고 있다 [1].

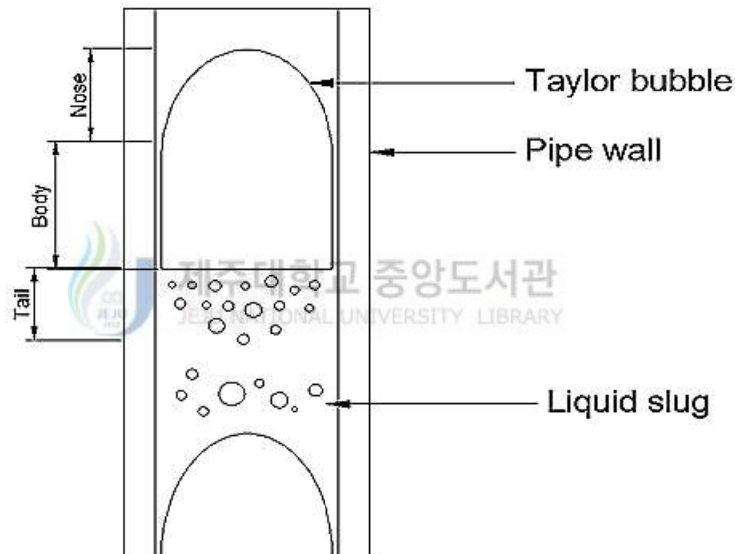


Figure 1. Sketch of continuous slug flow

Figure 1은 슬러그류의 형태를 개략적으로 그린 것이다. Wallis (1969)에 따르면 슬러그류는 여러 개의 “unit cell”로 구성된다 [2]. 이런 unit cell은 그 주변에 액막이 있는 긴 기포(Fig.1에서 테일러 기포 부분)와 기포 뒤에 액체 부분(Fig. 1에서 액체 슬러그 부분)으로 구성되어 있다.

슬러그류의 구성요소인 테일러 기포는 수직관의 단면적을 거의 차지하는 긴 총알 모양의 기포를 이르는 말이다 [3]. 이 기포는 nose, body, tail의 세 부분으로 크게 나눌 수 있는데, nose는 둥근 모자 형태를 가지는 것이, body는 기체 경계면과 관

벽 사이에 존재하는 얇은 액막이, tail은 후류가 존재하는 것이 특징적이다.

테일러 기포와 관련된 많은 연구들이 진행되었다. Z.-S. Mao는 테일러 기포의 상승 속도가 spherical nose를 생성하는 속도일 때 기포의 움직임을 수치적으로 시뮬레이션 하였다 [4]. A.M.F.R. Pinto et al (2001)는 수직관에서 같은 방향으로 흐르는 액체를 통해 상승하는 테일러 기포들 사이의 상호작용에 대해 실험적으로 연구하였다. 이를 통해서 기포 사이의 상호작용이 없는 최소거리를 제시하였고, 평균 기포 길이에 대한 Barnea의 이론적 모델을 실험적으로 검증하였다 [5]. F. Viana et al. (2003)은 문헌들에 나온 원형관에 담긴 Stagnant 유체에서 상승하는 테일러 기포에 대한 여러 상관식들을 제시하고, 그들 간의 관계를 분석하였다 [6]. S. Nogueira et al. (2006)는 뉴턴 유체가 있는 수직관을 통해 상승하는 테일러 기포의 후류에서의 유동 형태를 실험적으로 연구하였고, 무차원수  $N_f$  와  $Re_{VL}$  가 후류 유동양식을 결정하는 요소라는 것을 증명하였다. [1].

하지만 현재까지의 연구들에는 사용유체에 한계가 존재한다. 위에서 언급한 연구들에는 점성이 강한 글리세린이나 글리세린 혼합 용액을 유체로 사용하였는데, 이는 점성력이 강하면 뚜렷한 유동의 변화를 관찰할 수 있기 때문이다. 그러나 이런 점성이 강한 유체들은 각종 산업 상황에 쓰이는 유체들과는 특성이 다르고, 유동 특성이 물-공기 혹은 물-중기 이상유동과 상이하다. 뿐만 아니라 현재 이상 유동에 관한 CFD 코드는 대부분 기포류 정도만을 모사 할 수 있고, 테일러 기포와 그 주변의 유동장을 예상하는 데는 한계가 있다.

본 연구는 수직관에서의 물-공기 이상유동에 관한 것으로, 수직관에서 상승하는 테일러 기포를 nose, body, tail로 나누고, 기포의 상승에 따른 각 부분에서의 속도와 속도의 변화 양상을 파악하는 것을 목표로 연구를 진행하였다.

## II. PIV 배경지식

### 1. PIV의 주요 특징

M. Raffel et al. (2007)는 PIV의 주요한 특징을 다음과 같이 정리하였다 [7]:

#### 1) 비침습적 속도 측정

유동영역에 탐침을 삽입해서 유동 속도를 측정하는 광섬유나 열선과 달리, PIV는 유동영역 밖에서 레이저를 이용해 유동 속도를 측정하는 비침습적 방법이다. 이런 장점 때문에 PIV는 탐침 존재 시에 방해받을 수 있는 벽 근처 경계층의 속도 측정이나 탐침에 충격을 줄 수 있는 아주 빠른 유동에도 사용할 수 있다.

#### 2) 간접적 속도 측정

PIV는 유체에 들어있는 tracer 입자의 속도를 측정하고, 이를 통해 간접적으로 유동의 속도를 얻어낼 수 있다.

#### 3) 전체 영역에 대한 측정 기법

대부분의 유동 속도 측정 기법들은 유동의 특정 지점에 대한 측정만 가능하다. 하지만 PIV를 사용하면 넓은 범위의 기체-액체 이상유동에 대한 유동 영역 정보를 얻을 수 있다. 뿐만 아니라 PIV는 순간적인 이미지를 높은 공간 해상도로 기록할 수 있기 때문에 불안정한 유동 영역에도 사용이 가능하다.

#### 4) 속도 지연

속도 지연(Velocity lag)은 물질의 이동이나 신호가 한 지점에서 다른 지점으로 전파 될 때 시간이 필요하기 때문에 생기는 지연이다. 유동 속도 측정에 사용되는 PIV용 tracer 입자는 연구 목적을 충족시킬 수 있을 만큼 유체 요소들의 움직임을 최대한 지연 없이 따라갈 수 있어야 한다.

#### 5) 조명

PIV를 이용할 때, 유체의 종류에 상관없이 비슷한 수준의 입자 반사광을 얻으려

면, 유체마다 광원의 세기를 달리해야 한다. 왜냐하면 입자들의 크기가 클수록 산란 효율이 좋은데 액체가 기체보다 상대적으로 큰 입자를 사용할 수 있기 때문이다. 이는 액체의 유동 밀도가 기체보다 크기 때문에, 기체 유동에 쓰이는 입자들은 액체 유동에 쓰이는 것들보다 상대적으로 작아야 유동의 흐름을 안정적으로 따라 갈 수 있기 때문이다. 그러므로 기체 유동 측정에 쓰이는 광원은 액체 유동 측정에 쓰이는 것보다는 상대적으로 강한 빛을 내야한다.

#### 6) 조명 파동의 지속시간

조명 파동이 지속되는 시간은 이미지의 선명도에 영향을 미치므로, 지속시간은 파동 노출 동안의 입자들의 움직임을 “freeze” 할 수 있을 만큼 짧아야한다.

#### 7) 조명 파동 사이의 시간 지연

조명 파동 사이에서 지연되는 시간은 이미지 내의 입자 이동을 확실히 분별할 수 있을 만큼 길어야 하는 동시에, 지연되는 시간 사이에 광막을 벗어나는 입자들이 없을 만큼 짧아야 한다.

#### 8) 이미지 상의 tracer 입자 밀도

Figure 2에서 볼 수 있듯이, 이미지 상의 입자 밀도를 기준 삼아서 정성적으로 세 가지 형태로 구분할 수 있다 (Adrian, 1991). Fig. 2a와 같이 밀도가 낮으면, 개별적인 입자들의 위치를 시각적으로 판별 할 수 있으므로, 이 경우에는 시각적 구분만을 이용해서도 분석할 수 있다. 이런 분석을 “Particle Tracking Velocimetry”, 줄여서 “PTV”라고 말한다. Fig. 2b와 같이 밀도가 중간 정도에도 개별적인 입자의 위치를 육안으로도 식별이 가능하다. 그러나 입자의 위치를 시각적으로 분석하기에는 입자가 많기 때문에, 표준화된 PIV 분석 기법을 사용하는 것이 적합하다. Fig. 2c의 경우에는 밀도가 높는데, 이 경우에는 입자가 대부분 겹쳐져서 반점(Speckle)을 형성하기 때문에 개별적인 위치를 알 수 없다. 그래서 이 경우를 “Laser Speckle Velocimetry” (LSV)라 부른다.

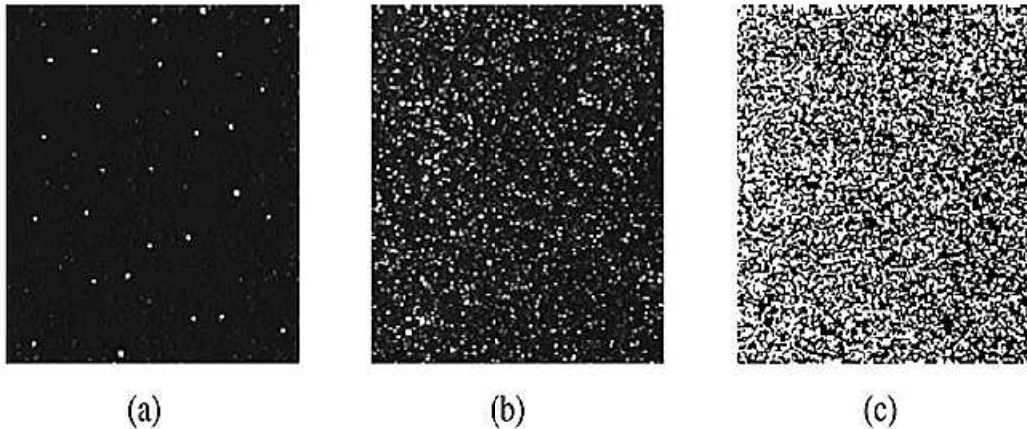


Figure 2. The three modes of particle image density: (a) low (PTV), (b) medium (PIV), and (c) high image density (LSV) (M. Raffel et al. (2007) [7])

#### 9) 해상도

PIV는 초기에는 시간 해상도가 낮았고, 공간 해상도가 높았었다. 하지만 최근에는 고속 레이저와 카메라의 발전으로 인해서 이러한 부분이 많이 개선되어서 대부분의 액체와 느린 속도의 공기역학적 흐름에 대해서는 시간 분해 측정이 가능하게 되었다.

#### 10) 측정의 반복성

PIV는 데이터가 감소하기 전에 유동 속도장에 대한 모든 정보를 저장한다. 그래서 PIV에서 얻은 데이터는 이후에 반복 실험을 없이 완전히 다른 방법으로도 분석이 가능하다는 장점이 있다. 그리고 PIV는 모든 속도 영역을 순간적으로 캡처 할 수 있기 때문에 불안정한 유동 분석 시에 특히 유용하다.

## 2. PIV 필수 구성요소

R.J. Adrian (1991) [8]와 A.K. Prasad (2000) [9]에 따르면, PIV를 구성하기 위해서는 Fig. 3에 표시된 시험부(seeding 입자들이 희석된 액체가 흐르는 투명 유로), 레이저, 카메라, 컴퓨터와 같은 구성요소들이 필요하다고 한다.

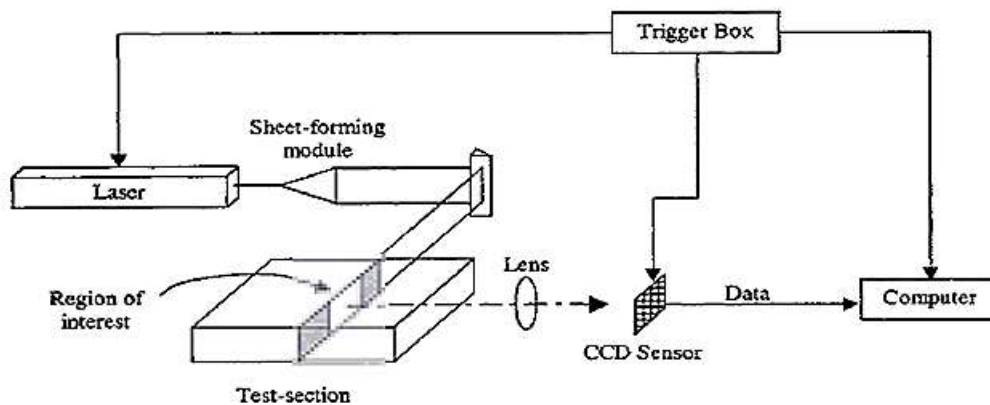


Figure 3. Basic requirements for a PIV system (A.K. Prasad, 2000 [9])

### 1) Seeding 입자의 필요 조건

PIV에 쓰이는 seeding 입자는 다음과 같은 조건을 만족해야 한다. 먼저 유동을 방해하지 않을 만큼 작아야 한다 [7]. 그리고 레이저 빛을 효과적으로 분산시킬 수 있어야 한다 [9]. 액체에 대해서는, 모든 종류의 중합체 분말 또는 특정 범위의 밀도를 가지는 플라스틱이 이런 조건들을 만족한다. 물에는 입자 크기가 5에서 200  $\mu\text{m}$  범위를 가지는 polystyrene, polythene, nylon, PVC 등이 주로 쓰인다.

### 2) PIV용 레이저의 종류

PIV 측정은 continuous wave (CW) 레이저나 파동 레이저를 사용해서 수행된다. [9]. 대표적인 CW 레이저인 argon-ion lasers는 몇 와트의 범위에서 만들어지고, 대표적인 파동 레이저인 frequency-doubled Nd : YAG (neodymium : yttrium aluminum garnet) laser는 0.1 ~ 0.3 joules/pulse를 내보내는 수 십 Hz의 반복률을 가진다.



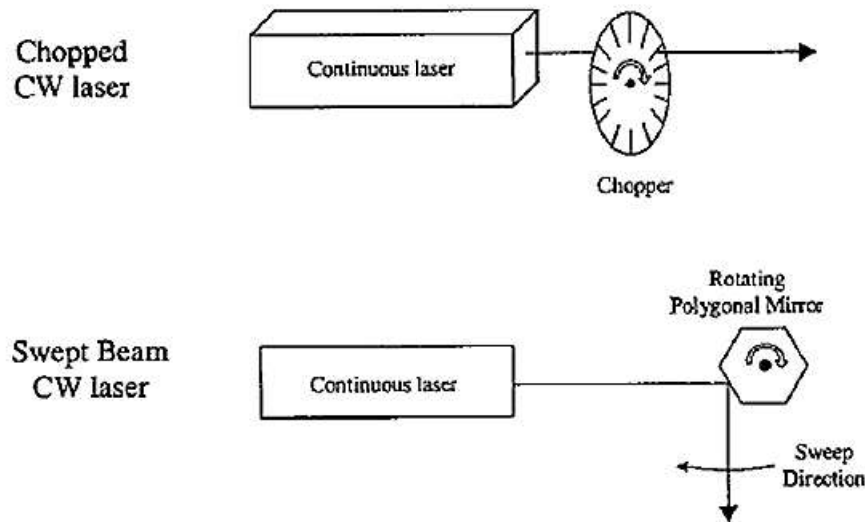


Figure 4. Obtaining a pulsed laser sheet from continuous wave lasers (A.K. Prasad, 2000 [9])

CW 레이저에서는 파동을 만들기 위해서 광속 단속기(Chopper)나 다면거울을 사용한다. 다면거울은 두 면을 제외하고는 모든 곳에 거울이 있는데, 이것은 시험부를 통과한 모든 레이저 빔을 반사해서 제거하는 식으로 빠르게 Sweeping하여 파동을 만든다 (Fig. 4 참조). 잘려진 빔의 경우, 막 형성 모듈을 사용해서 레이저 막을 얇게 만든다. Swept 빔의 경우, 빔의 sweeping action이 ‘얇은 막’을 만들 수 있기 때문에 막 형성 모듈이 필요 없다.

파동 레이저는 파동이 짧게 몇 ns 정도만 지속되는데, 이런 점 때문에 매우 빠른 속도로 움직이는 입자를 흐릿함을 최소화 하는 노출 동안에 기본적으로 ‘frozen’ 시킬 수 있는 장점이 있다. (예를 들어, 100 m/s로 움직이는 입자는 6 ns 파동 동안에 0.06  $\mu\text{m}$ 을 움직일 수 있다.) Discharging energy를 이용해 동작하는 파동 레이저는 discrete time intervals 동안에 콘덴서에 저장된다. 파동 레이저는 필요로 하는 순간에 레이저 출력의 전부를 저장하거나 움직일 수 있기 때문에 PIV에 이상적이다. PIV용 파동 레이저는 수 십 Hz의 일정한 반복률로 작동하므로, 임의의  $\Delta t$ 's를 얻기 위해서는 동시에 터지는 두 개의 동일한 레이저가 필요하다.

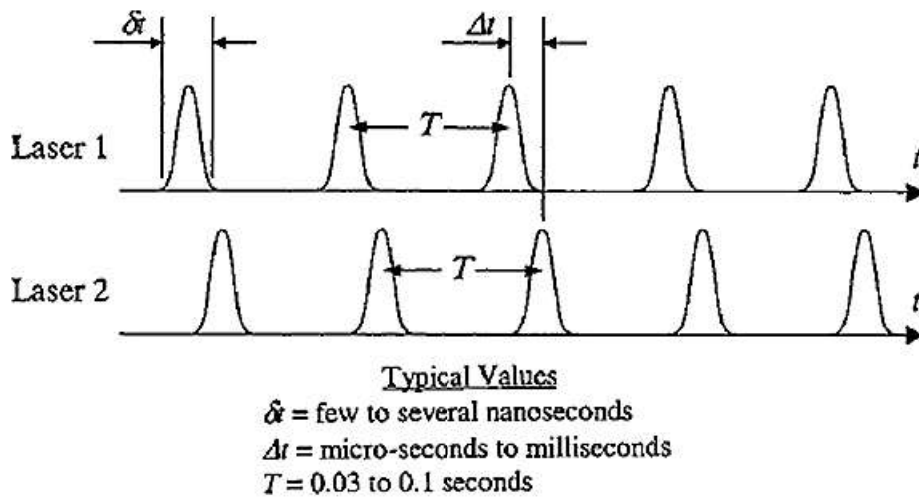


Figure 5. Staggered pulse trains from twin pulsed lasers for PIV (A.K. Prasad, 2000 [9])

Figure 5에서 볼 수 있듯이, 두 번째 레이저의 펄스열은 첫 번째 레이저가 만들어진 후  $\Delta t$ 's 정도 시차를 두고 시작된다. 이와 같은 트리거 신호들을 만들기 위해서 timer box가 쓰이고, 이것을 쓰면 레이저의 반복률과 일치하는 프레임 속도를 가진 cinematic PIV 정보를 얻을 수 있다.

대조적으로, CW 레이저는 계속적으로 레이저가 만들어지기 때문에, 빔의 chopping 또는 sweeping을 거쳐야 '파동'을 얻을 수 있다.

### 3) PIV용 카메라의 종류

PIV 이미지를 찍는 카메라로는 대부분 CCD 카메라를 사용한다. 그러나 아주 고 해상도를 요구하는 경우에는 photographic film도 하나의 선택이 될 수 있다.

CCD 카메라 사용은 여러 장점이 있다. 먼저 디지털 PIV 결과들을 거의 실시간으로 볼 수 있으며, 필름 사용 시보다 더욱 빛에 민감하게 반응하고, CCD는 빛의 강도에 대해 선형적으로 반응한다.

### 3. PIV를 이용한 데이터 취득 과정

PIV를 이용해서 유동의 정보를 얻기 위해서는 일단 seeding 입자가 포함된 유체가 투명한 시험부에 흐르고 있어야 한다. 이런 시험부 부분에 레이저 발생장치에서 나온 레이저가 막 형성 모듈을 거치면서 얇은 레이저 막을 형성한다. 다음으로 레이저를 받은 입자들에서 나오는 빛을 카메라의 CCD 센서가 받아들이고, 이 정보를 컴퓨터로 전송해서 분석하면 유동의 정보를 얻을 수 있다.

### 4. 레이저와 카메라 사이의 동기화 과정

카메라와 레이저의 동기화는 Fig. 6에 표시된 것과 같은 순서로 진행되고, 그 결과로 CCD 카메라의 프레임에 이미지가 기록된다. 먼저 timer box로부터 나온 flash 신호가 레이저 발생장치에 전달되고, 그 후 레이저가 발생장치로부터 나오게 된다. timer box는 flash 신호를 내보낸 후, 카메라로도 트리거 신호를 보낸다. 카메라에 트리거 신호가 도달하면, 일정시간의 'open to delay' 후에 카메라가 노출 되기 시작하고, 트리거 신호가 끝난 후에도 일정시간의 'close to delay'를 거쳐 노출이 종료된다. 영상의 기록은 레이저 발생 장치의 q-switch가 작동하는 시점부터 시작된다. 레이저는 q-switch 신호가 하강하는 시점부터 일정 시간 동안 발사 되고 이때 유동이 프레임에 기록된다.

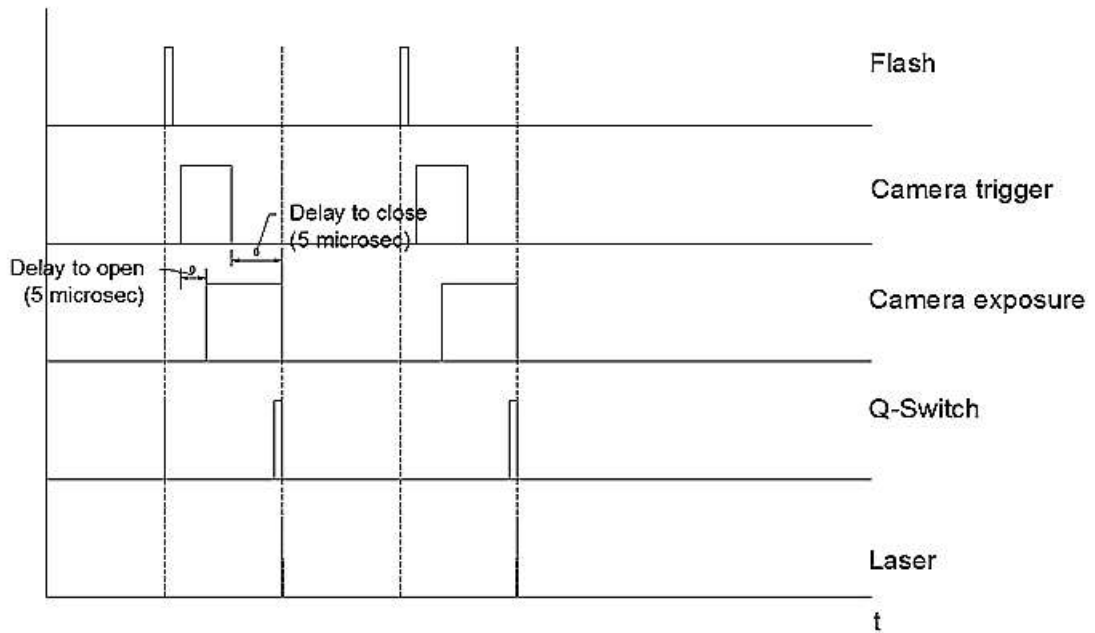


Figure 6. Time diagram of the synchronization between laser and camera

### 5. Interrogation areas(spots)

PIV는 'Interrogation area(IA)' 또는 'Interrogation spot'라고 불리는 영역 내에 포함된 입자들의 평균 움직임을 통해 전체 유동을 파악한다. Fig. 7에 나타낸 것과 같이, 전체 영역은 여러 개의 IA로 나뉘지고, area당 하나의 평균 벡터가 모든 IA에 대해 계산된다 (Fig. 7). IA 내에 입자 쌍의 평균 벡터는 PTV를 통해 얻은 개별 입자 벡터들보다 그 결과가 노이즈의 영향을 덜 받고 신뢰할 수 있다. 입자들의 평균 벡터는 공간 상호상관을 이용해 구할 수 있다.

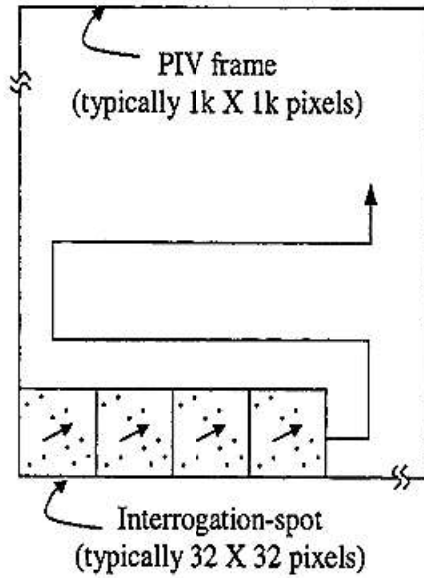


Figure 7. Interrogation area (A.K. Prasad, 2000)

IA 1과 2의 강도 패턴  $I_1(X)$ 와  $I_2(X)$ 의 상호상관 함수  $C(S)$ 는 다음과 같다.

$$C(S) = \int_{spot} I_1(X) I_2(X+S) dX \quad (1)$$

Fast Fourier Transform(FFT)를 사용하면, 식 1은 식 2와 같이 바뀌게 된다.

$$C(S) = F^{-1}[F I_1(X) \cdot F^* I_2(X)] \quad (2)$$

Figure 8a와 8b는 입자 이미지 영역이고, 입자들의 첫 이미지와 두 번째 이미지는 double-frame/single-pulse recording에 따라 다른 프레임에 들어있게 된다. Figure 8a와 8b에서의 화살표는 벡터의 이동을 나타낸다. 이-입자 영역의 공간 상호상관의 결과는 Fig. 8(c)로 나타냈는데, 여기에는 확연한 하나의 최대 신호가 보인다.

IA의 크기는 IA당 5 ~ 10 입자들이 포함되게 결정하는데, 32 \* 32 픽셀이 많이 사용되고 있다. (A.K. Prasad, 2000 [10])

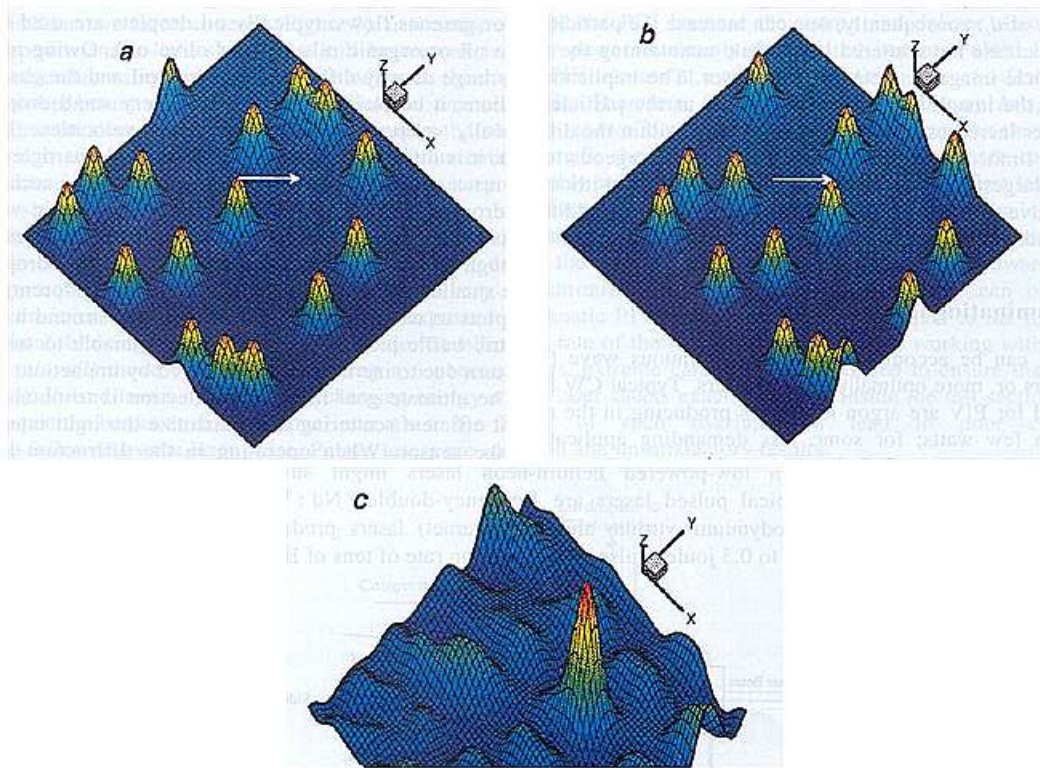


Figure 8. Spatial cross-correlation between  $I_1$  and  $I_2$ . a. particle image field 1; b. particle image field 2; c. cross-correlation field (A.K. Prasad, 2000)

## 8. PIV 오류 인자

PIV 측정은 오류를 유발할 수 있는 여러 가지 요소들을 포함하고 있다. Random error는 기록된 이미지의 노이즈로 인해 발생하고, bias error는 최대 신호 위치를 부분 픽셀 정확도로 계산하는 과정에서 발생하며, gradient error는 interrogation spot 내의 유동의 회전과 변형으로 인해서 발생한다. 뿐만 아니라 tracking error는 입자가 유동을 따를 때 미끄러지기 때문에 생기게 되고, acceleration error는 tracer 입자들의 lagrangian 움직임으로부터 국소 eulerian 속도를 추정하기 때문에 발생하게 된다.

Tracking error는 실험 조건의 선택에 따라 최소화 될 수 있지만, PIV에 쓰이는 상관식의 근본적 요소로 인해 발생하는 다른 오류들은 제거될 수 없다. 예를 들면,

이미지를 노이즈 없이 얻더라도, correlation peak의 위치는 같은 쌍에 속하지 않는 입자 이미지들 사이의 random correlation에 의해서 영향을 받을 수 있다.

게다가, pixel-locking<sup>1)</sup> 때문에 생기는 bias errors는 부분 픽셀 정확도를 가진 구분된 신호를 위치시키기 위해서 curve-fit 또는 centroiding schemes를 사용하면 발생 할 수 있다.

Gradient error는 유동에 변화가 심한 난류에서 일어날 수 있다. Acceleration error는 순간적인 eulerian 유동 속도를 추정하기 위해 입자들의 lagrangian 움직임을 사용하는 PIV의 원리 때문에 생기게 된다.

PIV에서의 random error는 입자의 이미지 직경을 다음과 같은 식에 넣어서 구할 수 있다.

$$\sigma_{random} = cd_e \quad (3)$$

$d_e$  : Effective particle image diameter

$c$  : Constant (0.05 ~ 0.10)



Bias errors는 입자 이동을 부분 픽셀 정확도로 계산하는 과정 중에 생긴다. 기본적으로, correlation field는 구분된 격자 (전형적으로 32 \* 32)에서 가능하다. Correlation field에서의 최대 수치의 위치 ( $S_x$ ,  $S_y$ )는 입자의 이동과 일치하겠지만, 이러한 이동은 정수 픽셀 값을 가져야만 한다. 측정 오류를 줄이기 위해서는, curve-fit method 또는 centroiding scheme을 사용하여 부분 픽셀 정확도를 가지는 peak를 위치를 정한다. 하지만 이런 scheme은 어느 것이나 random error와 bias error를 야기한다.

---

1) Pixel locking : curve-fit 또는 centroiding schemes를 사용하는 동안에 최대 신호 위치가 가장 가까운 픽셀 쪽으로 치우치는 경향

### III. 슬러그류 유동장 측정 실험

#### 1. 실험 장치

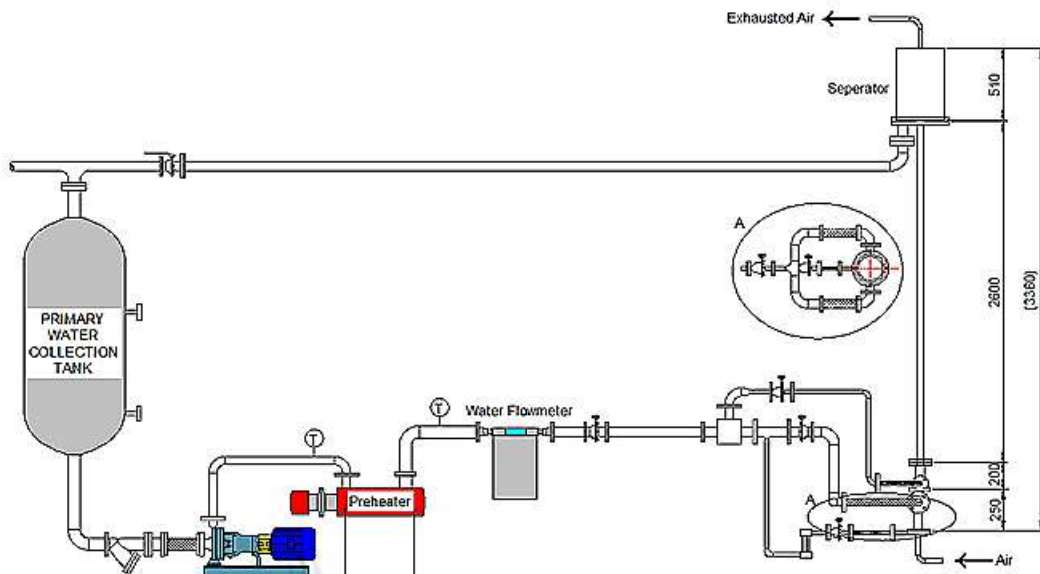


Figure 9. Experimental apparatus for vertical two-phase flow

본 연구에는 Fig. 9와 같은 실험루프를 사용하였다. 실험에 사용한 유체는 메인 탱크에 모아진 다음 실험루프로 주입되었다. 작동 유체를 루프에 주입 전에, 형광 입자를 유체가 모아진 물탱크에 넣어서 작동 유체에 희석시켰다. 그 다음에 5마력 펌프를 사용해서 작동유체를 시험부가 있는 수직관 쪽으로 이동시켰다. 작동 유체의 온도 변화가 유동에 줄 수 있는 영향을 줄이기 위해서, 작동유체가 시험부로 주입되기 전에 프리히터를 통과시켜서 일정한 온도(25℃)로 만들었다. 주입되는 작동 유체의 양은 코리올리스 유량계를 이용해서, 액체와 기체의 유량을 확인하면서 조절하였다.



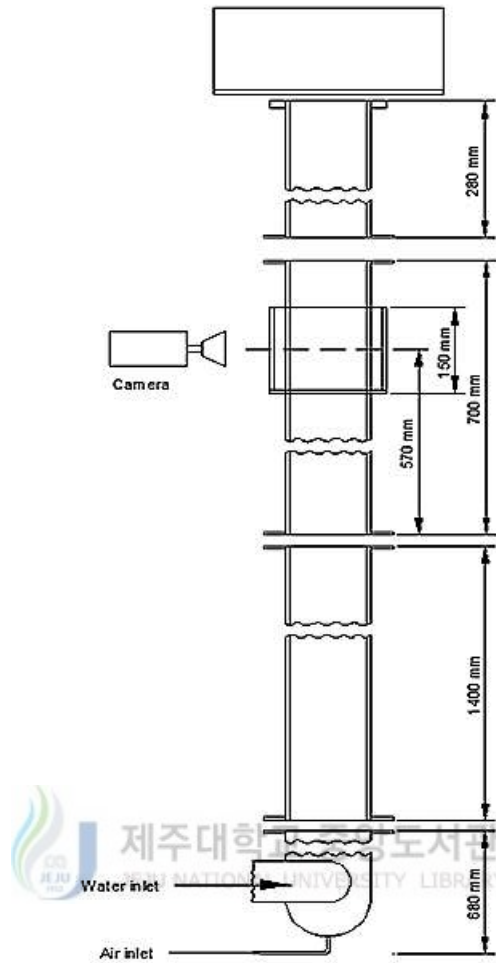


Figure 10. Lateral view of test section

실험에 사용한 시험부는 Fig. 10과 같이 총 길이가 3 m, 내경이 0.03 m이며, 투명 아크릴관으로 제작되었다. 촬영은 입구영역의 효과를 방지하기 위해 기체 주입구로부터 2.65 m에서 촬영하였다. 입구영역의 효과가 나타나는 길이는 Reynolds 수에만 의존하는데, 본 실험의 경우, 최대 Reynolds 수가 14,851이다. 이 수를 난류에 적용되는 입구영역 길이 계산식( $\frac{L_e}{d} \approx 4.4 Re_d^{1/6}$ )을 이용해 계산하면 입구영역 길이는 0.65 m 정도이므로, 2.65 m에서 실험을 수행하면 입구영역 효과를 배제할 수 있다. S. Polonsky (1999) [12]와 S. Nogueira (2006) [1]의 실험 장치를 참고하여, 시험부 주변에 투명한 사각 아크릴관 (0.15 m x 0.08 m x 0.08 m)을 덧붙였다. 그리고 그 내

부에 작동유체와 동일한 물을 채워서, 광학적 왜곡을 최소화하였다.

## 2. PIV 구성

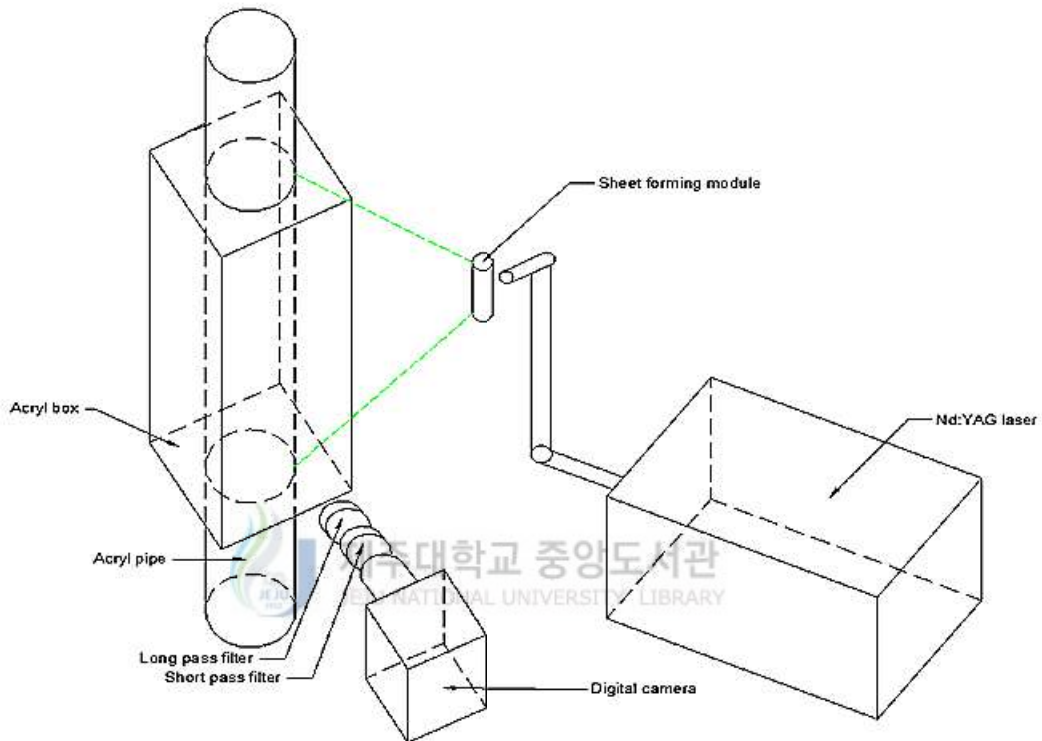


Figure 11. Arrangement between PIV components

시험부와 PIV 구성요소들 사이의 배치는 Fig. 11과 같이 하였다. Nd:YAG 레이저에서 나온 레이저와 광막 형성 모듈을 이용하여 시험부의 측면에서 상하로 넓게 레이저 막을 형성하였다. 그 이후에 레이저 막과 수직이 되는 위치에 카메라를 설치하여 막 안에 나타나는 입자의 움직임을 찍었다.

각 구성요소들은 다음과 같은 것들을 사용하였다.

### 1) Seeding 입자

Seeding 입자는 FPP(Fluorescent Polymer Particle)-RhB-10 (평균직경 10  $\mu\text{m}$ )을 사용하였으며, 1:10,000의 비율로 실험에 사용한 액체에 희석하였다. 이 입자의 특징

은 527 nm 파장의 레이저를 맞으면 570 nm 부근의 파장을 가진 붉은 빛을 내보낸다는 것이다.

## 2) 레이저

본 실험에서는 광원으로 파장이 527 nm이고, 파장 지속시간이 100 ns인 double-cavity pulsed Nd:YAG 레이저를 사용하였다. 그리고 여기서 나온 레이저 빔이 시험부에서 약 1 mm 두께의 얇은 레이저 막을 형성하도록 막 형성 모듈을 조작하였다.

## 3) 카메라

해상도가 1280 x 800 픽셀인 PHANTOM SpeedSense M310 CCD 카메라를 레이저 막에 수직하게 위치시켰다. 이때 카메라 렌즈 안으로 입자에서 나온 570 nm 파장대의 붉은 빛 뿐만 아니라 시험부에 반사되는 527 nm 파장대의 레이저 빛이 들어오게 된다. Seeding 입자에서 나온 빛만을 촬영하기 위해서 카메라 앞에 550 nm 파장의 high performance OD 4 long-pass filter 와 600 nm 파장의 OD 4 short-pass filter (Edmund Optics)를 달았고, 최종적으로 570 nm 부근 파장의 붉은 빛만 카메라의 CCD 센서에 도달하게 만들었다. 추후 다른 파장 영역의 빛에 대해 연구를 할 경우 570 nm 부근 파장 영역만을 받는 대역 통과 필터의 사용은 범용성이 떨어지기 때문에 본 연구에서는 두 개의 필터를 사용하였다.

## 4) 렌즈

초점거리가 105 mm인 AF-S VR Micro Nikkor ED 105mm f/2.8G 렌즈를 사용하여 시험부 중 0.05 m x 0.05 m 크기에 해당하는 내부의 유동 양상을 촬영하였다. 그리고 timer box를 이용해서 레이저와 카메라를 동기화 시켰다.

### 3. 실험절차 및 실험조건

Stagnant 상태와 upward co-current 상태의 물에서 상승하는 단일 테일러 기포 주변의 속도장에 대해서 실험을 진행하였다. 물이 stagnant 상태이거나 일정한 속도로 흐르는 시험부에 단일 테일러 기포를 주입하기 위해 공기 주입 밸브가 열리는

시간을 조절하였다. 실험은 액체 결보기 속도 (m/s)를 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5로 바꾸면서 수행하였다.

#### 4. 이미지 처리

이미지는 크게 두 과정으로 나누어 후처리하였다. 먼저 DANTEC 사의 'Dynamic studio'를 이용해서 1차 이미지 처리를 했고, 그 이후에 Matlab를 이용해서 2차 이미지 처리를 하였다.

##### 1) 1차 이미지 처리

Fig. 12은 1차 이미지 처리 과정을 보여준다. 먼저 PIV를 이용해서 Raw image (Fig. 12a)를 얻은 다음에, 'Dynamic studio' 내의 분석기법인 'adaptive PIV'를 사용해서 벡터 이미지(Fig. 12b)를 얻었다. 이때 'adaptive PIV'의 recipe 중에서 'grid step size' 값을  $16 * 16$ 으로 설정하였고, IA 크기는 최소 20에서 최대 50이 되도록 범위를 지정하였다. Figure 12c는 원본 이미지와 벡터 이미지를 합친 것이다. Figure 12c를 보면 크게 두 가지 문제점을 확인할 수 있다. 첫번째 문제는 기포의 왼쪽이 오른쪽보다 입자의 밀도가 떨어진다는 것이고, 두 번째 문제는 기포의 외곽과 벡터의 시작점이 일치하지 않고, 벡터가 기포 안에서 시작된 것 같이 보인다는 점이다. 그래서 Matlab을 이용한 추가적인 이미지 처리를 통해서 두 문제를 해결하려고 했다.

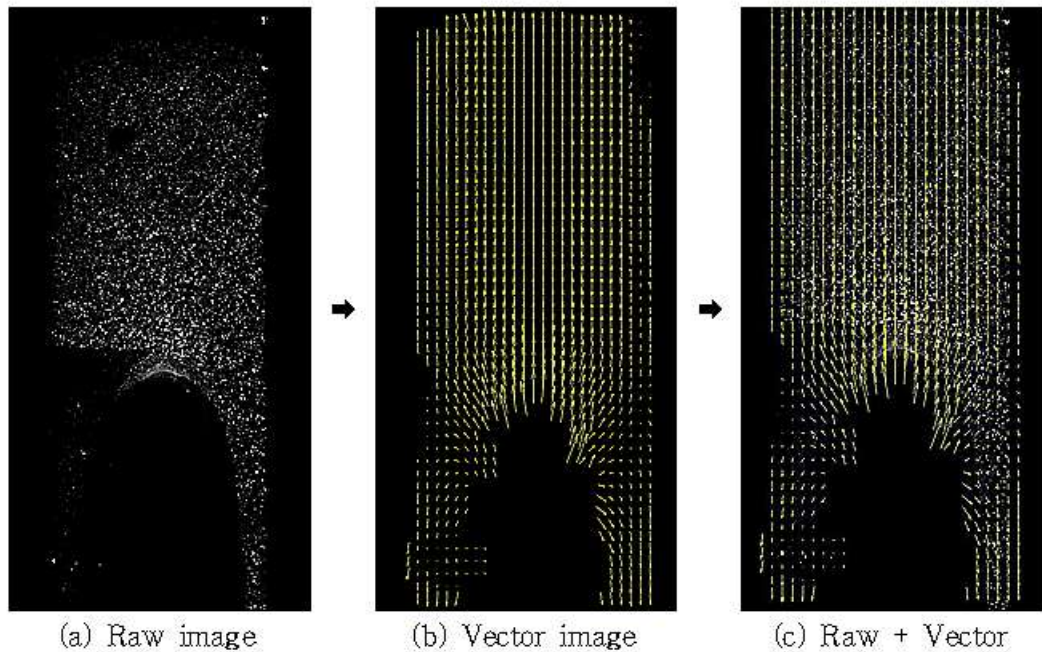


Figure 12. The procedure of first image processing

## 2) 2차 이미지 처리



Figure 13a와 같이 기포의 원본과 벡터가 동시에 있는 이미지에서는 기포의 외곽을 구분이 안 되기 때문에, Fig. 13b와 같이 벡터들을 제거하였다. 그 후에 기포 좌우가 대칭이라고 가정하고 입자 밀도가 높은 오른쪽만을 가지고 분석 했고, 기포의 외곽을 찾기 위해 다음과 같은 순서로 진행하도록 Matlab 코드를 작성하였다.

먼저 이미지를 가로방향으로 20등분, 세로방향으로는 픽셀 단위로 자르게 했다. 그 후에 가장 아래 있는 20개의 cell을 가장 왼쪽에 있는 cell부터 점차적으로 오른쪽으로 이동하면서 cell 안에 입자가 있는지 확인하였다. 입자가 있으면 그 cell을 경계로 생각했다. 그 이후 cell은 액체 영역으로 취급하였다.

이런 방식으로 경계를 찾다보면, 레이저막 상에 위치하는 것이 아닌 뒤쪽이나 앞쪽 액막에 들어있던 입자가 반사된 레이저로 인해 빛을 내는 경우도 경계로 잡힐 수 있다. 따라서 이를 방지하기 위해서 입자가 확인되면, 그 위와 아래 cell도 점검해서 두 곳 다 입자가 없으면 그 입자는 경계가 아닌 것으로 판단하였다.

마지막으로 경계로 판단한 입자가 있는 cell과 그 상하에 경계로 여겨지는 입자를

포함한 cell 사이의 기울기가 주변과 유사한 방향성을 가지지 않고, 주변과 다른 기울기 형태를 가지는 경우, 이 입자는 경계에서 제외하고 상하에 있는 cell 사이의 기울기를 이용해서 경계로 잡았다. 예를 들어 10, 50 (가로 cell 위치, 세로 cell 위치)에 경계로 판단된 입자 있다고 한다면, 이 입자와 9, 70에 위치한 입자 사이의 기울기는 음수인데, 이 입자와 11, 60에 위치한 입자 사이의 기울기는 양수가 되게 된다. 이렇게 되면 경계가 울퉁불퉁하게 나오게 되는데, 실제 기포는 둥근 경계면을 가지므로 이런 경우에는 9, 70에 위치한 입자와 11, 60에 위치한 입자 사이의 기울기 평균인 10, 65을 지나게 경계 위치를 설정하였다.

위와 같은 크게 3 단계의 과정을 계속적으로 반복하다보면 Fig. 13d에서 볼 수 있듯이 매끈한 기포의 경계를 얻을 수 있고, 그 후에 다시 벡터를 이미지에 붙여서 기포 안에 위치하는 벡터들은 제거하고 기포 밖에 있는 벡터만을 가지고 주변의 속도장을 판단할 수 있다.

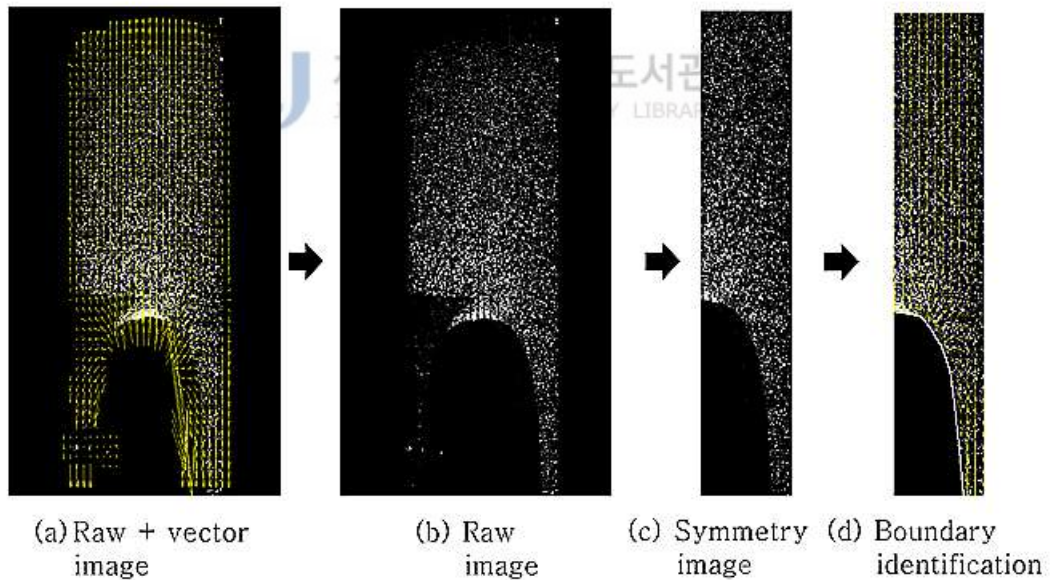


Figure 13. The procedure of second image processing

## VI. 결과 및 고찰

### 1. Stagnant 상태에서의 속도장 분석

#### 1) Nose

##### (1) 유동 양상

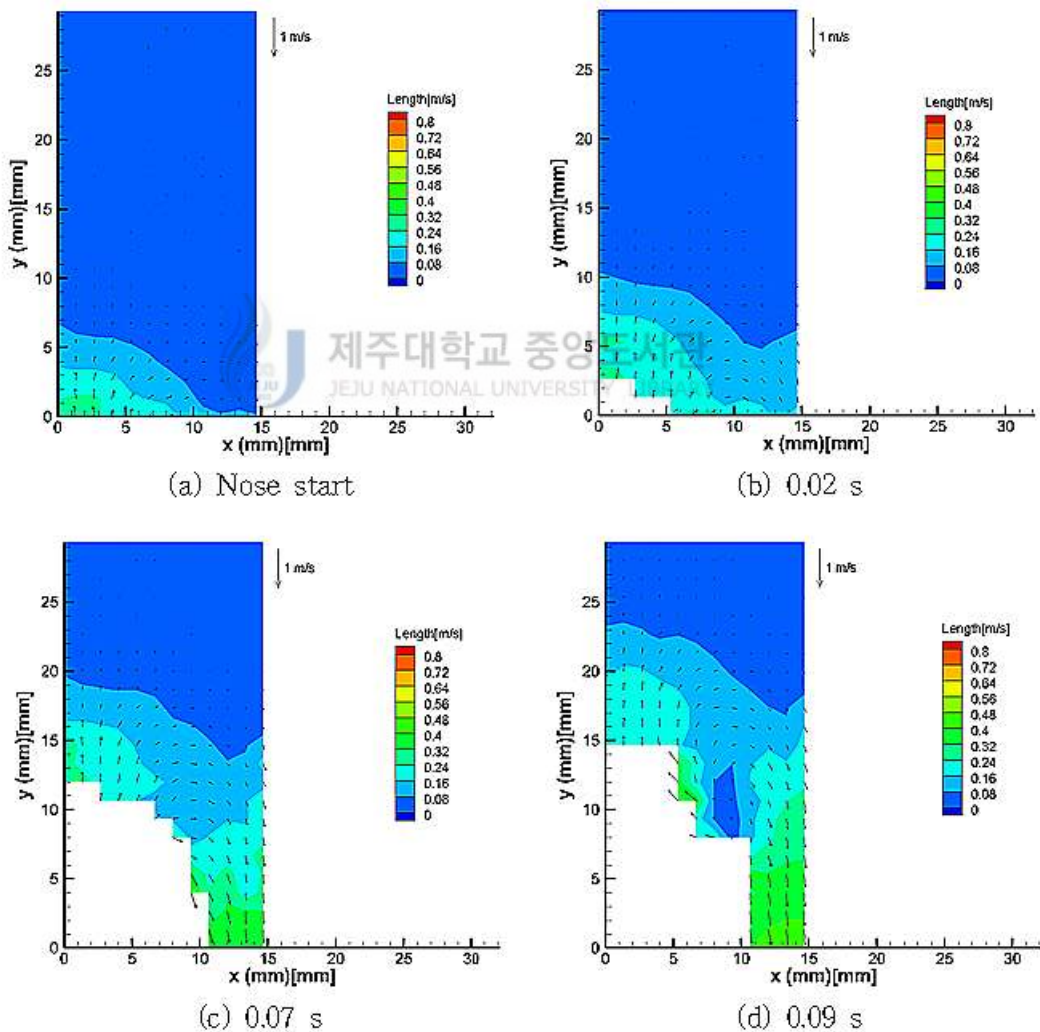


Figure 14. The flow pattern's change around nose in stagnant state

Figure 14는 stagnant 상태인 물을 통과해 상승하는 테일러 기포의 nose 부근에서의 유동을 시간에 따라 나타낸 이미지들이다. 분석에는 길이가 0.41 m인 테일러 기포가 사용되었다. Figure 14에서 볼 수 있듯이 테일러 기포가  $z$  좌표축을 따라 올라가면, stagnant 상태로 있던 물이 반경 방향으로 점차적으로 밀려나게 되고, 이런 물이 관 벽 부근에서는 기포방향과 반대인 중력방향으로 움직이는 것을 확인할 수 있다. 이와 관련해서, S. Nogueira et al. [10]는 기포 단면적의 반지름이 증가할수록, 유동의 연속성 유지를 위해서 액체 속도가 증가한다고 했는데, 이는 Fig. 14에서 시간이 지남에 따라 액막 쪽으로 이동한 물의 속도가 증가하는 것을 통해 확인할 수 있다.

## (2) 축 방향 속도 분포

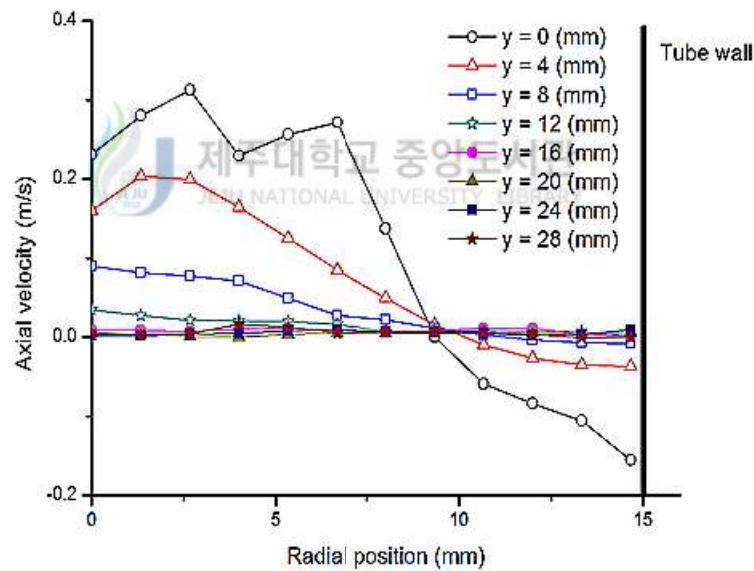


Figure 15. The axial velocity around nose in stagnant state

Figure 15는 stagnant 상태인 물을 통과해 상승하는 테일러 기포의 nose 부근에서의 축 방향 속도를 위치에 따라 나타낸 이미지이다. 여기서  $y = 0$ 인 지점은 촬영된 이미지의 가장 아랫부분이고, 이후에 제시된 모든 축 방향 속도 분포 그래프와 반경 방향 속도 분포 그래프에 동일하게 적용된다. Figure 15를 보면, nose로부터



16 mm ( $x/D = 0.52$ ) 정도 떨어지면 상승하는 기포의 영향을 무시할 수 있다는 것을 알 수 있다. 이는 S. Polonsky et al. [12]와 R. van Hout et al. [13]가 stagnant 상태의 물에서 상승하는 기포의 경우, 대략적으로 기포의 nose로부터 0.5 D와 0.66 D까지 영향을 준다고 한 부분과 일치한다. 또한 반경 방향 9 mm ( $r/D = 0.3$ ) 부근에서 축 방향 속도가 양에서 음으로 바뀌는데, 이 결과도 R. van Hout et al. [13]가 제시한  $0.25 < r/D < 0.3$  라고 한 부분에 부합한다.

### (3) 반경 방향 속도 분포

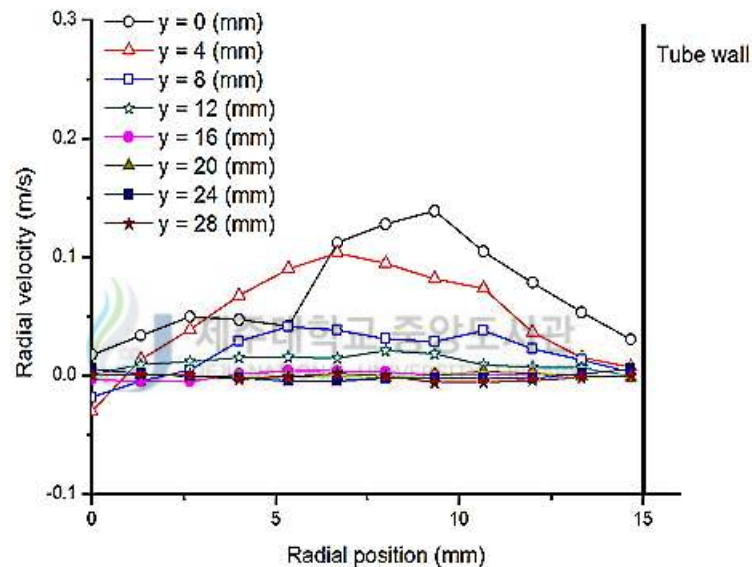


Figure 16. The radial velocity around nose in stagnant state

Figure 16은 stagnant 상태인 물을 통과해 상승하는 테일러 기포의 nose 부근에서의 반경 방향 속도를 위치에 따라 나타낸 이미지이다. Figure 16에서 볼 수 있듯이, 기포의 반경 방향 속도는 z축에서  $r/D$ 가 커지는 방향으로 가면서 증가하다가  $r/D = 0.25$  부근에서 최대값을 보이고 그 이후에 감소하여  $r/D = 0.5$ 가 관 벽에 도달하면 거의 0으로 수렴한다.

## 2) Body

### (1) 유동 양상

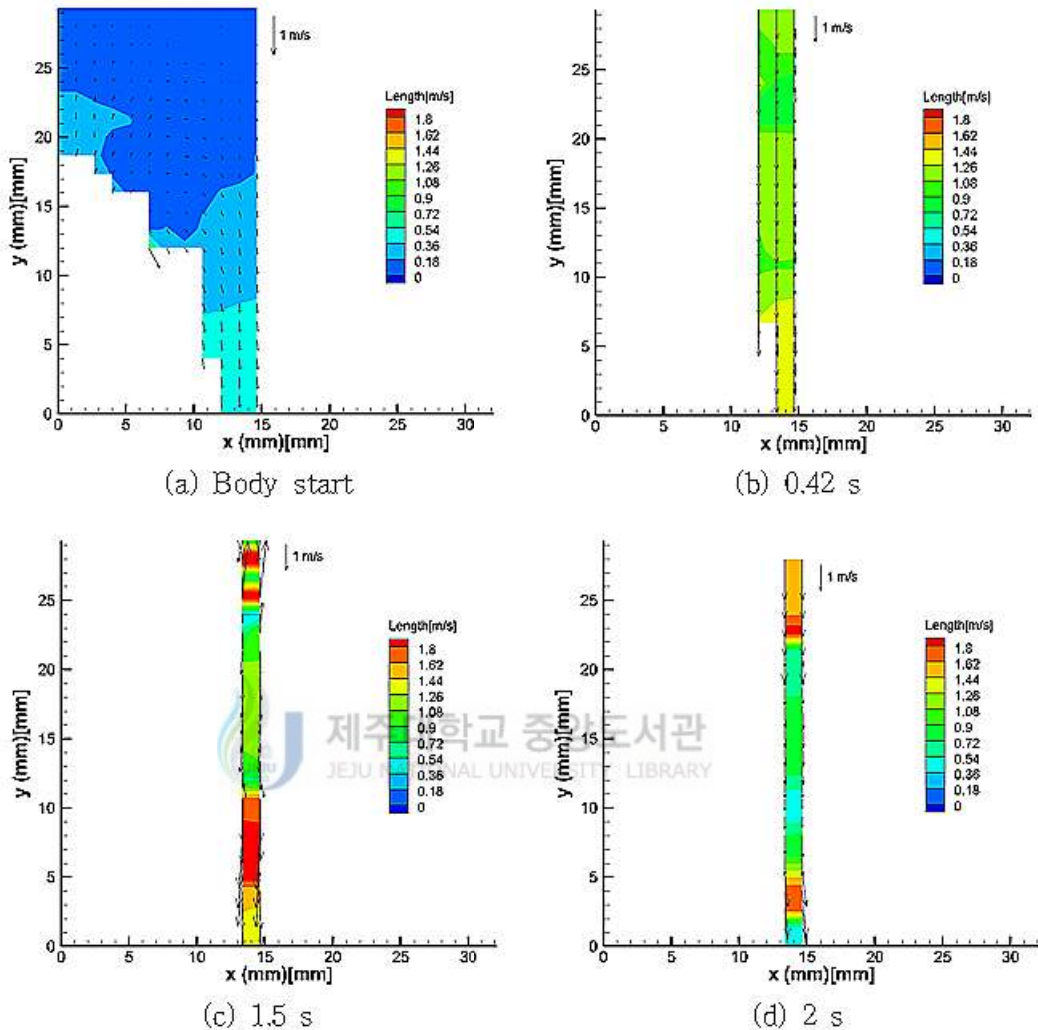


Figure 17. The flow pattern's change around body in stagnant state

Figure 17은 stagnant 상태인 물을 통과해 상승하는 데일러 기포의 body 부근에서의 유동을 시간에 따라 나타낸 이미지들이다. 액막에서 y 방향 속도의 크기와 이 y 방향 속도와 관련된 벡터 크기의 차이가  $0.5 \text{ mm/s}$  이하로 줄어든 경우, body가 시작되었다고 판단하였다. Figure 17을 보면, body가 시작되고 일정 시간이 지나면, 액막 두께가 일정해지는 것을 알 수 있다. 그리고 액막 안의 속도가 지속적으로 변하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 상승하는 데일러 기포의 진동으로 인해서 영향을

받기 때문일 것이다. 특징적인 현상은 tail 진입 직전 속도는 그 위의 액막 부분보다 감소하는 것이다. 이에 관해서 S. Nogueira et al는 액막으로부터의 유동이 기포의 tail에 도달하면, 관 전체로 퍼져야 하기 때문에 속도가 감소한다고 하였다 [10]. 그리고 이렇게 감속되기 위해서 필요한 길이는 안쪽으로 확산하려는 운동량과 아래쪽으로 진행하려는 운동량 간에 힘의 비에 좌우된다고 하였다.

(2) 축 방향 속도 분포

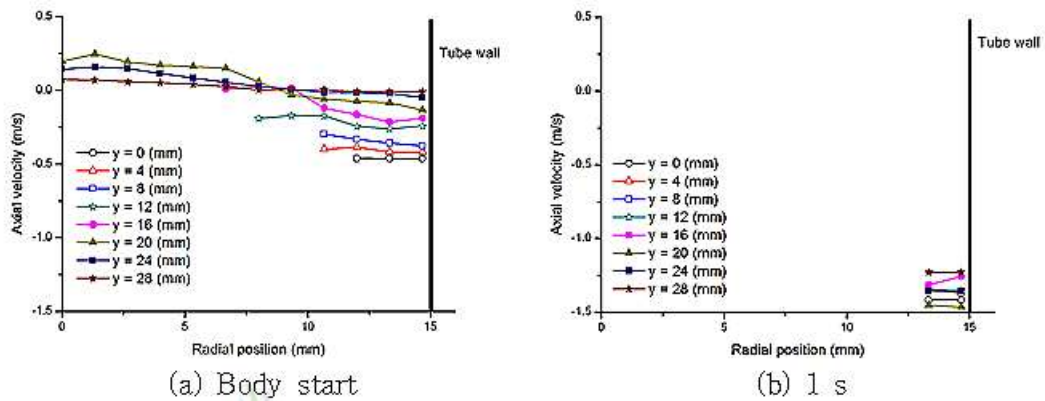


Figure 18. The axial velocity around body in stagnant state

Figure 18는 stagnant 상태인 물을 통과해 상승하는 테일러 기포의 body 부근에서의 축 방향 속도를 body 시작 시점과 body 시작 후 1 s 지난 시점에서의 위치에 따라 나타낸 이미지이다. Figure 18(a)을 보면, body가 시작될 때는 액막이 0.5 m/s의 속도로 하강하지만, Fig. 18(b)에서는 액막의 속도가 1.25 m/s 에서 1.5 m/s 사이의 값으로 일정해진다. 이런 액막 속도의 변화에 대해 J.D. Bugg et al. (2002)는 액막의 속도는 액막이 완전 발달될 시점까지 증가하고, 액막이 완전 발달된 시점은 액막의 두께가 얇아져 벽의 shear stress가 액막의 무게를 지탱할 수 있는 지점 이후부터이고, 또한 액막이 완전 발달되면 액막의 축 방향 속도는 변화가 없다고 주장했다 [14]. 본 실험에서는 완전 발달된 액막의 속도가  $-1.35 \pm 0.1$  m/s 로 확인되었다.

(3) 반경 방향 속도 분포

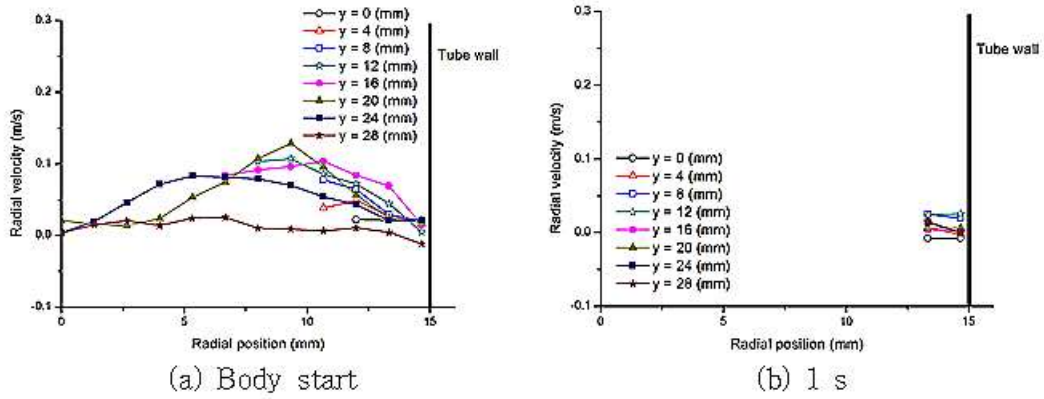


Figure 19. The radial velocity around body in stagnant state

Figure 19는 stagnant 상태인 물을 통과해 상승하는 테일러 기포의 body 부근에서의 반경 방향 속도를 body 시작 시점과 body 시작 후 1 s 지난 시점에서의 위치에 따라 나타낸 이미지이다. Body 시작 후 1 s 정도가 지나면, 액막이 안정되어 반경 방향 속도가 0 부근에 머무는 것을 확인할 수 있다. J.D. Bugg et al. (2002)는 액막이 완전 발달되면 반경 방향 속도가 0이 된다고 주장했는데 [14], 본 실험에서는 완전히 0이 되지는 않고,  $0 \pm 0.03$  m/s로 확인 되었다.

### 3) Tail

#### (1) 유동 양상

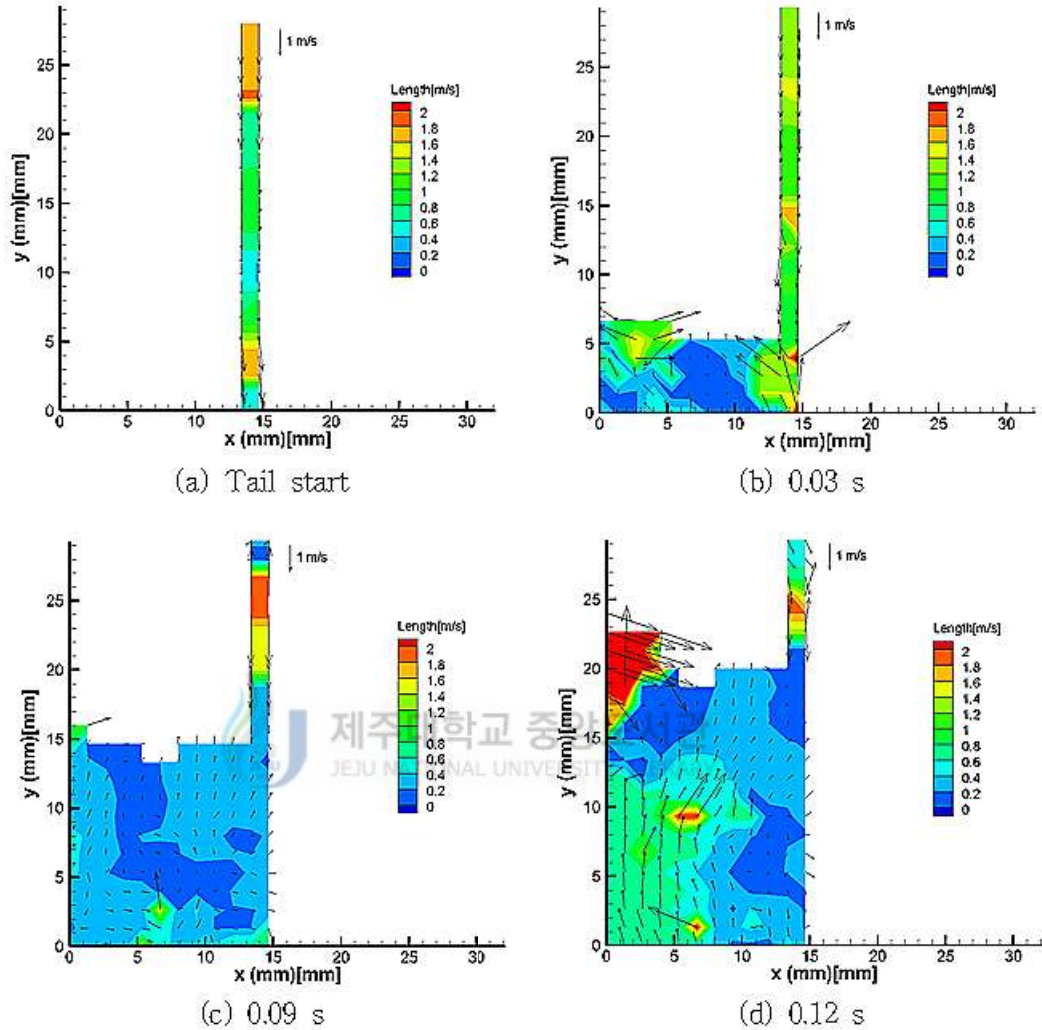


Figure 20. The flow pattern's change around tail in stagnant state

Figure 20은 stagnant 상태인 물을 통과해 상승하는 테일러 기포의 tail 부분에서의 유동을 시간에 따라 나타낸 이미지들이다. Figure 20에서 알 수 있듯이 물을 사용하는 경우, turbulent의 영향으로 tail 부분의 유동 양상이 일정한 형태를 가지지 않는다. 그래서 이 부분은 작동유체로 물이 아닌 다른 액체를 사용한 기존 연구들을 통해 액체가 달라진 경우 tail 부분에서의 유동장에 어떤 영향을 주는지를 살펴보고 한다.

먼저 액체로 글리세린을 이용한 S. Nogueira et al. [10]의 연구를 살펴보겠다. S. Nogueira et al.는 tail 부분에서는 안쪽으로 확산하려는 운동량과 아래쪽으로 진행하려는 운동량 사이의 관계에 따라 유동의 형태가 결정된다고 하였다. 그리고 안쪽으로 확산하려는 힘이 아주 강할지라도, 기포 뒷부분에서는 laminar bubble wake라 불리는 소용돌이 재순환이 항상 생긴다고 했으며, 후류 안에 있는 액체는 기포 속도와 같은 평균 속도로 강력한 재순환을 한다고 하였다. Figure 21은 S. Nogueira가 제시한 기포의 후류 영역에 대한 그림이다. 여기서 보면, 액체는 액막으로부터 나와 관의 z축을 향하는 동시에 아래 방향으로 빠르게 움직이고, 관의 z축 부근에 있는 액체는 기포보다 빠르게 상승한다는 것을 알 수 있다.

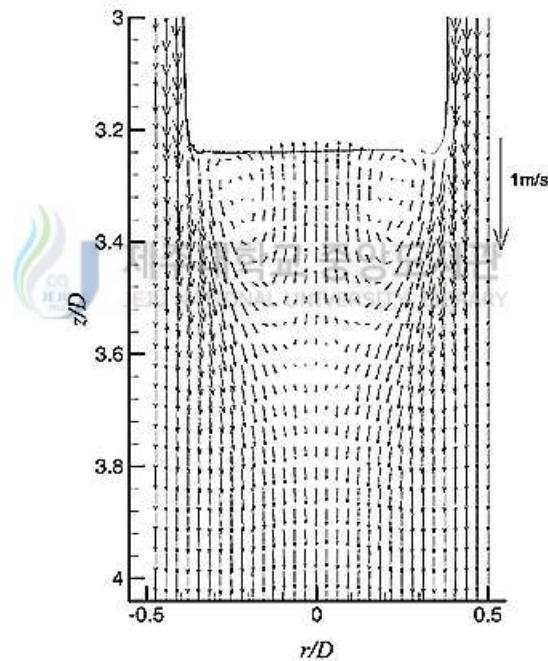


Figure 21. Velocity profiles at the rear of the Taylor bubble with the bubble interface obtained from PST (S. Nogueira et al.[10])

다음으로는 올리브 오일을 액체로 사용해 테일러 기포의 tail 부분을 관찰한 J.D. Bugg et al. [14]의 연구를 살펴보겠다. J.D. Bugg et al.는 PIV로 측정된 테일러 기포의 후류 부분 속도장을 Fig. 22와 같이 제시하였다. 그림에서 축의 왼쪽은 모든

측정 벡터를 나타낸 것이고, 오른쪽은 20번째 축 위치마다의 벡터를 나타낸 것이다. 또한, Fig. 22는 테일러 기포의 바닥은 안으로 오목하다는 것을 확인 시켜준다. 마지막으로 Fig. 22의 오른쪽에는 후류 영역에서의 유동 양상이 명확하게 제시되어 있는데, 이를 통해  $z$  축에서는 유동이 위쪽으로 빠르게 흐르고, 액막에서 나온 액체는  $z$  축을 향해 사선 방향으로 움직인다는 것을 알 수 있다. 이는 S. Nogueira et al.[10]의 연구 결과와 동일한 결과를 보이는 것이다. 두 연구들을 통해 점성이 있는 액체를 사용하는 경우 물과 달리 뚜렷한 tail 후류 부분의 유동 양상이 나타나므로, 물을 액체로 사용한 경우에 직접적으로 적용할 수는 없지만 벡터의 방향성 등은 참고가 될 것이다.

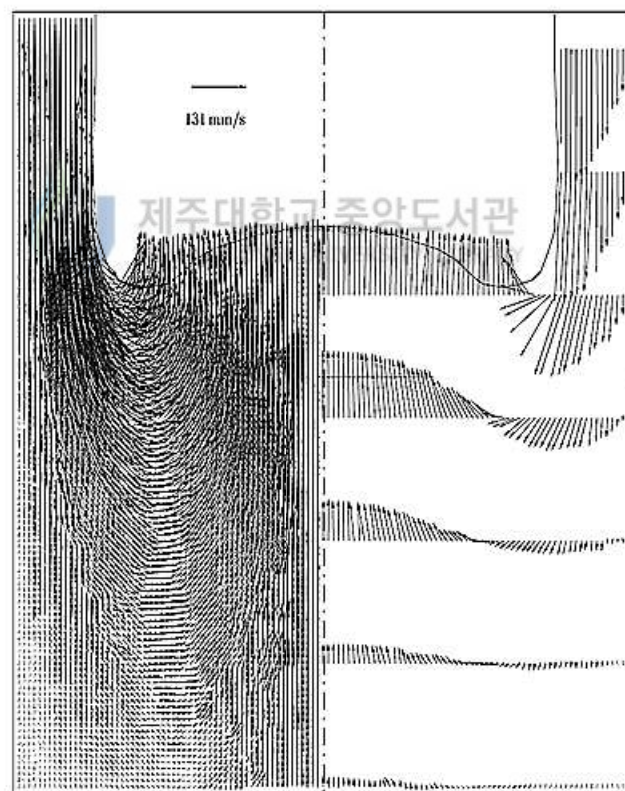


Figure 22. PIV measurements of the velocity field in the wake of a Taylor bubble rising in a stagnant fluid (J.D. Bugg et al. [14])

## 2. Liquid superficial velocity가 속도장에 미치는 영향

### 1) Nose

#### (1) 유동 양상

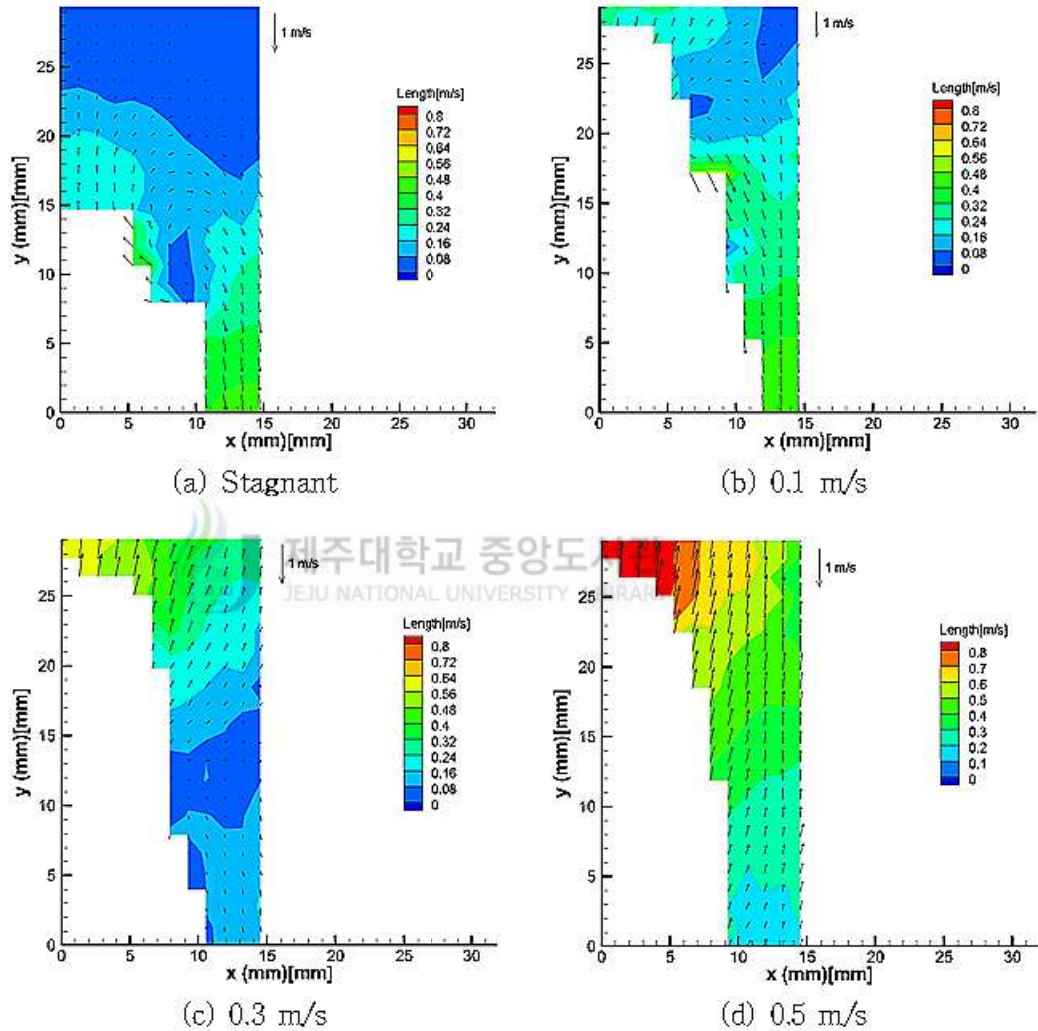


Figure 23. The flow pattern's change around nose according to liquid superficial velocity

Figure 23은 관찰영역 내에서의 테일러 기포의 속도를 보기 위한 것으로, stagnant와 0.1 m/s는 nose와 body의 경계지점을 나타낸 것이고, 0.3 m/s와 0.5 m/s는 nose의 끝이 관찰영역 가장 위에 도달한 경우를 나타낸다. 분석에 사용된 테일러



기포의 길이는 stagnant의 경우 0.41 m, 1 m/s의 경우 0.53 m, 0.3 m/s의 경우 0.67 m, 0.5 m/s의 경우 0.82 m 이다. Figure 23을 통해 액체의 걸보기 속도가 증가함에 따라 액체가 정체되는 구간이 점차적으로 하강하는 것을 확인 할 수 있다. 이는 액체가 빨리 흐를 때는 기포가 상승하면서 주변 액체를 밀어내는 힘과 상승하는 주변 액체가 가지는 힘이 균형을 이루기 위해서는 액막 내의 액체량이 줄어야 하기 때문이다.

(2) 축 방향 속도 분포

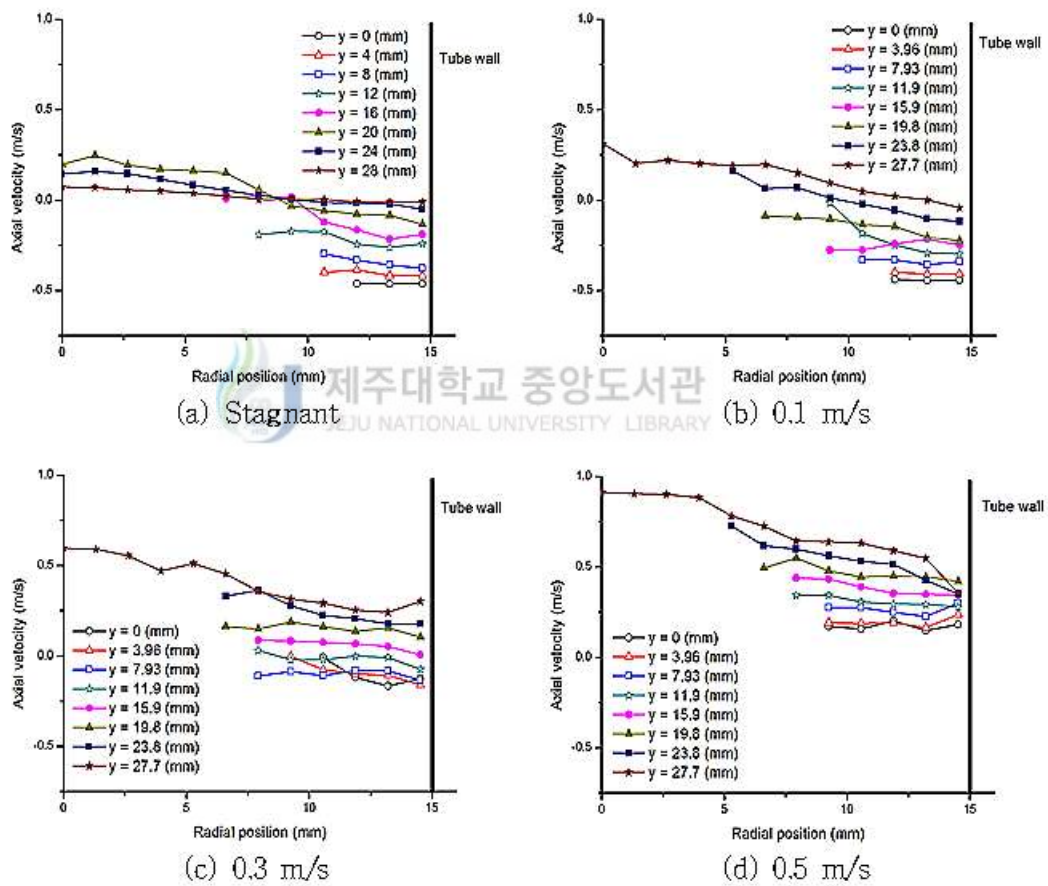


Figure 24. The axial velocity around nose according to liquid superficial velocity

Figure 24는 관찰영역 내에서의 테일러 기포의 축 방향 속도를 보기 위한 이미지들이다. Figure 24를 보면, y 축에 있는 기포의 nose에서의 속도는 액체의 걸보기속도가 빨라질수록 빨라지는 것을 확인할 수 있다. 이는 기포의 기존 상승 속도에 액

체의 결보기 속도가 더해지기 때문이다. 그리고 액체의 결보기 속도가 빨라질수록, 액막의 하강 속도가 느려지는 것을 확인할 수 있다. 위의 그림에 제시되지는 않았지만, 액체의 결보기 속도가 0.5 m/s인 경우에는 body가 시작되는 지점에서의 속도가 0에 가까워져 액체가 정체되는 현상을 볼 수 있다. 이를 통해 액체의 결보기 속도가 0.5 m/s보다 빠르면, 속도 정체 구간이 body 진입 전에 생길 것이라고 예상된다.

### (3) 반경 방향 속도 분포

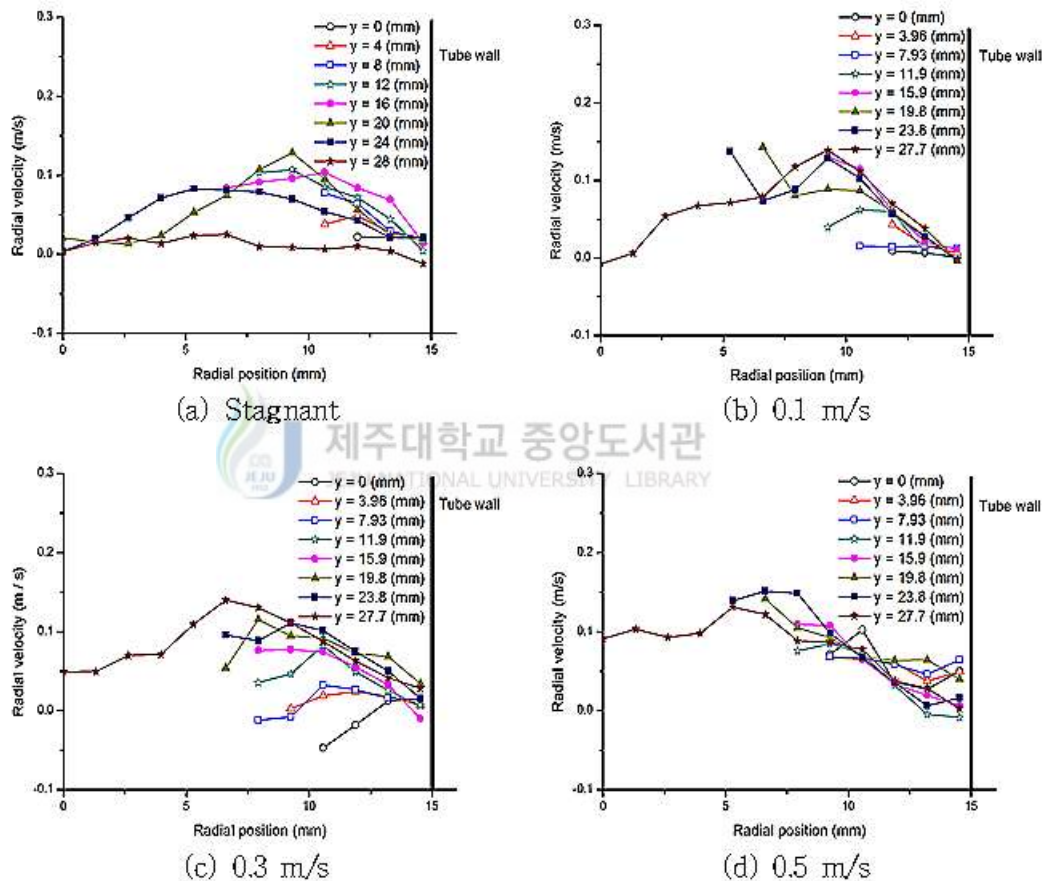


Figure 25. The radial velocity around nose according to liquid superficial velocity

Figure 25는 관찰영역 내에서의 테일러 기포의 반경 방향 속도를 보기 위한 이미지들이다. Figure 25를 보면, nose에서의 반경 속도는 대체적으로 0 ~ 0.15 m/s 사이고, 관 벽 부근에서는  $0 \pm 0.05$  m/s 값을 가진다.

## 2) Body

### (1) 유동 양상

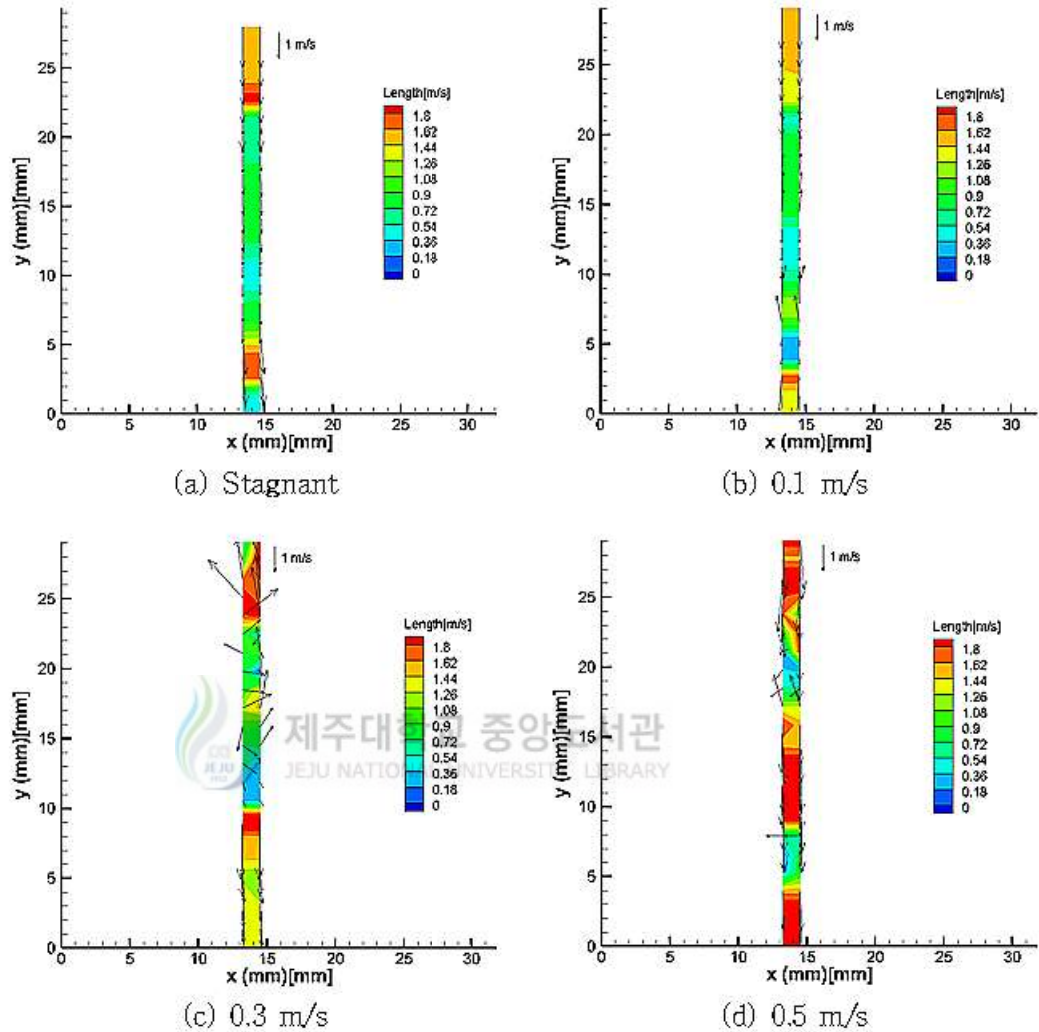


Figure 26. The flow pattern's change around body according to liquid superficial velocity

Figure 26은 결보기 속도에 따른 액막 안의 유동 양상의 변화를 살펴보기 위한 이미지들로, tail 진입 직전의 유동 양상을 나타낸다. 이미지들을 통해 결보기 속도가 증가할수록 tail로 나가는 액막의 속도가 빨라지는 것을 확인할 수 있다. 그러나 tail 진입 속도가 이전보다 느려지는 현상은 공통적으로 관찰되었는데, 그 이유는 Fig. 17에 대한 부분에서 언급했듯이, 액체가 관 전체로 퍼져야 하기 때문이다.

(2) 축 방향 속도 분포

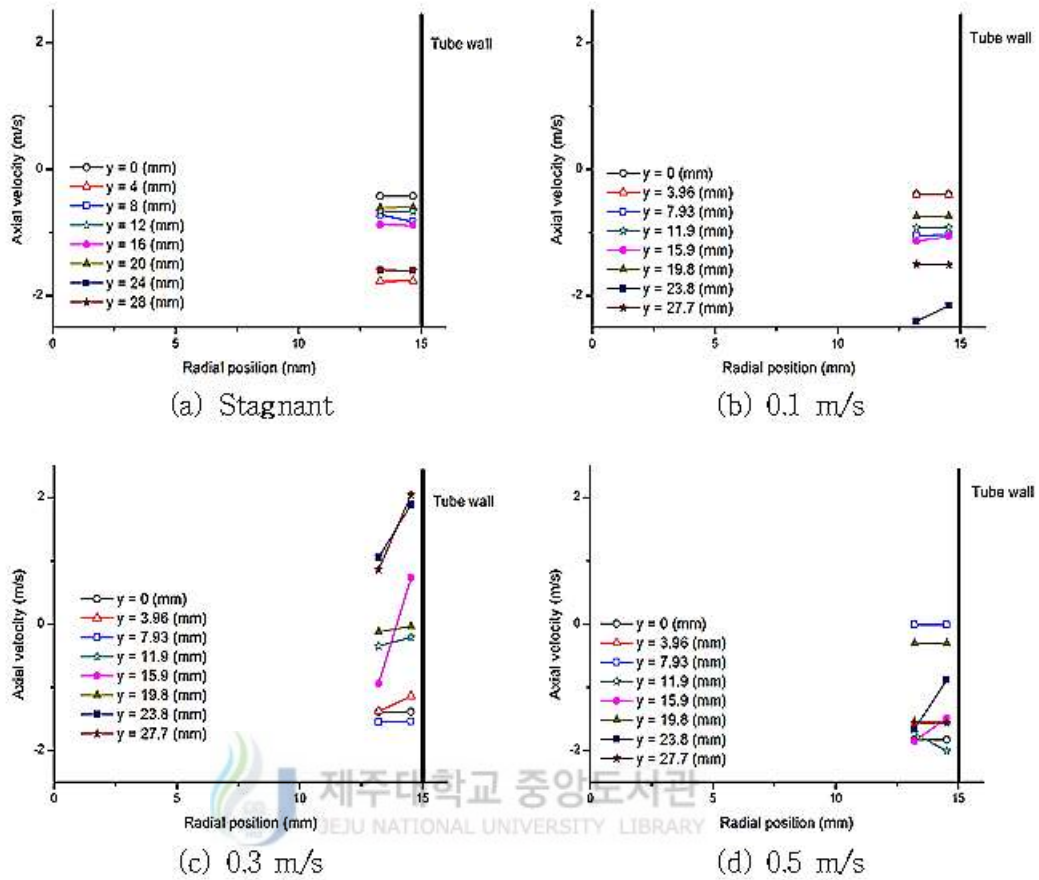


Figure 27. The axial velocity around body according to liquid superficial velocity

Figure 27은 결보기 속도에 따른 액막에서의 축 방향 속도 변화를 나타낸 이미지들이다. Stagnant와 0.1 m/s인 경우에는 tail로 진입하기 전에 액막의 속도가 느려지는 것을 명확하게 볼 수 있지만, 0.3 m/s와 0.5 m/s의 경우에는 그런 경향이 불명확해진다.

(3) 반경 방향 속도 분포

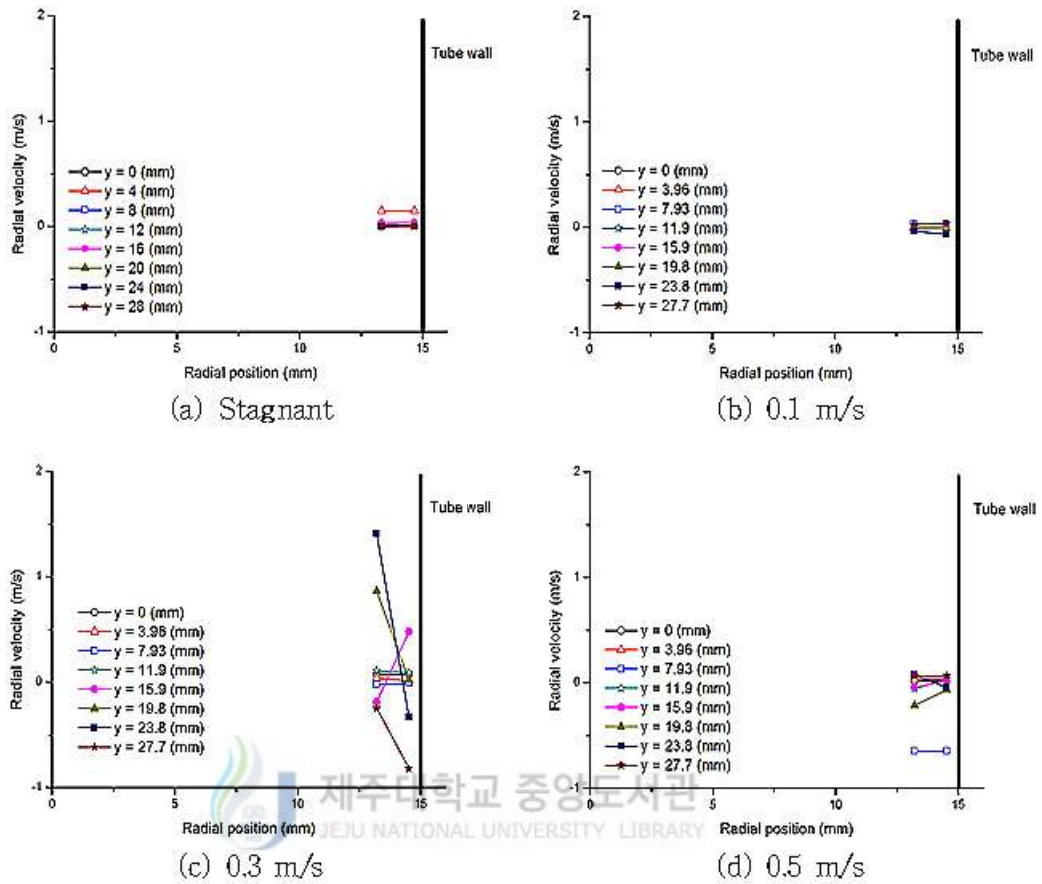


Figure 28. The radial velocity around body according to liquid superficial velocity

Figure 28은 결보기 속도에 따른 액막에서의 반경 방향 속도 변화를 나타낸 이미지들이다. Stagnant와 0.1 m/s인 경우, 액막에서의 반경 방향 속도가 대부분 0으로 확인되었는데, 이는 액막이 완전 발달되었음을 의미한다. 하지만, 0.3 m/s와 0.5 m/s의 경우, 그런 경향이 불명확해진다.

### 3) Tail

#### (1) 유동 양상

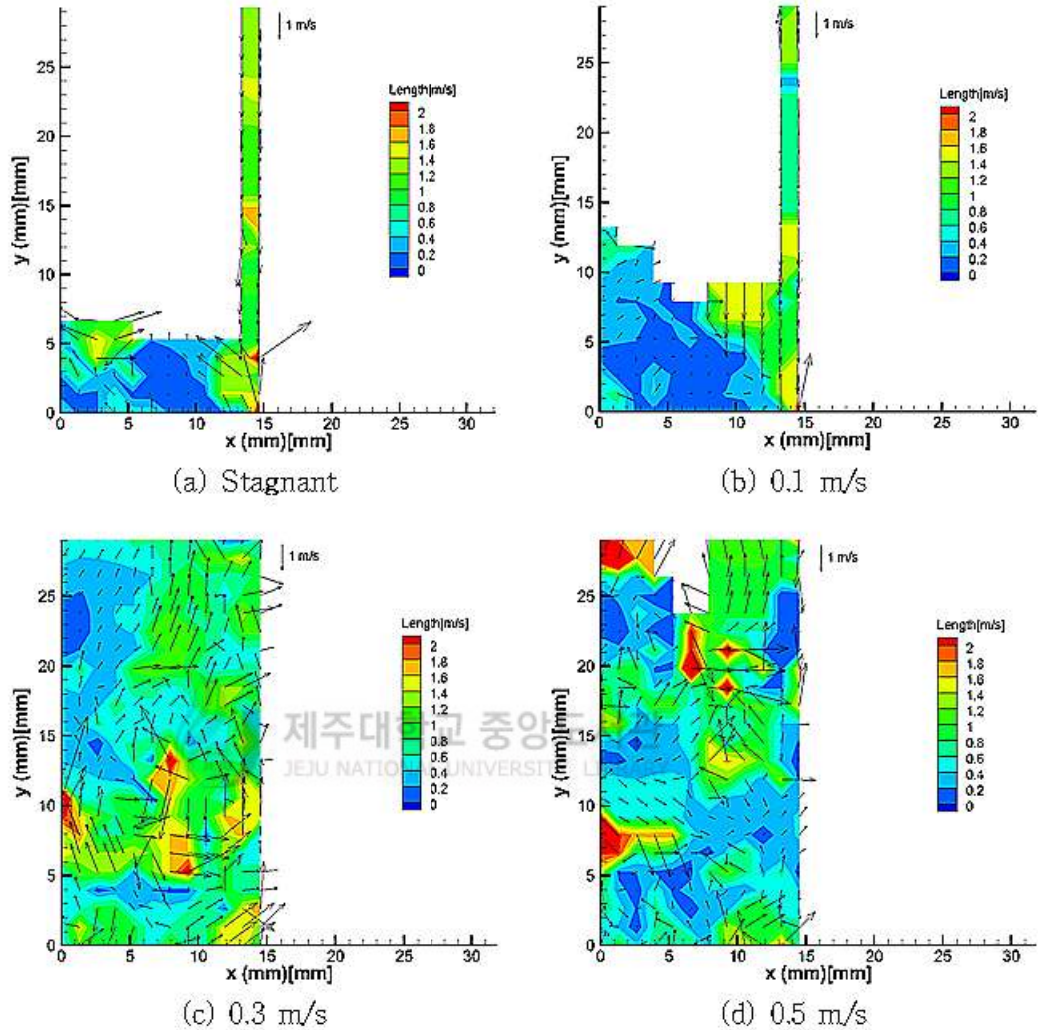


Figure 29. The flow pattern's change around tail according to liquid superficial velocity

Figure 29는 걸보기 속도에 따른 tail에서의 유동 양상의 변화를 나타낸 이미지들이다. Figure 29를 통해 액체의 속도와 상관없이 테일러 기포의 tail 부분 유동은 일정한 양상을 가지지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 그리고 Stagnant와 0.1 m/s의 이미지를 보면, 기포의 바닥이 평평하지 않고, 기포 내부를 향해 오목하다는 것을 알 수 있다.

## V. 결론

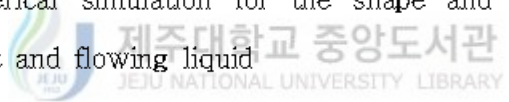
본 연구는 물-공기 이상유동 현상 중 수직관에서 상승하는 테일러 기포에 대해서 수행되었고, PIV를 이용해 stagnant 상태와 co-current 상태의 액체에서 상승하는 테일러 기포 주변의 속도와 속도의 변화 양상을 파악하는 것을 목표로 하였다.

실험은 stagnant 상태의 물과 co-current 상태의 물에서 상승하는 테일러 기포에 대해 수행이 되었다. 사용한 PIV 촬영 기법의 한계를 보완하고자, 테일러 기포는 좌우 대칭이라고 가정 하고, 테일러 기포 주변 속도장을 분석하였다.

분석 결과, stagnant 상태의 물에서 상승하는 테일러 기포는 그것의 nose에서  $0.5 \sim 0.6 D$  까지 영향을 준다는 기존 연구 결과들을 재확인할 수 있었다. 그리고 액체의 진행 상태와 상관없이 테일러 기포의 body와 tail의 경계지점 부근의 속도는 이전보다 떨어지는 현상을 관찰할 수 있었는데, 이는 유동의 질량 보존을 위해 나타나는 현상이다. Co-current 상황에서는 기포가 상승함에 따라 유체가 정체되는 구간이 발생하게 된다. 이와 같은 현상은 액체의 걸보기 속도가 빠를수록 액막 쪽으로 내려오는 경향을 보였다. 전체적인 축방향 속도의 변화 양상을 고려해 볼 때 액체의 걸보기 속도가 실험 범위보다 빨라지면 유체의 정체 구간이 nose 쪽으로 다시 상승할 거라 예상이 된다.

추후 연구는 크게 두 가지 점에 주안점을 두고 진행할 예정이다. 첫째, 본 연구에서 촬영한 PIV 이미지들의 기포의 경계선이 불명확했던 단점을 보완하고자 PIV-PST(pulsed shadow graphy)를 이용할 예정이다. 이는 기존 PIV 측정법에 그림자를 이용해 명확한 기포의 윤곽을 얻는 PST 방법을 추가함으로써, 본 연구의 단점을 보완할 수 있기 때문이다. 둘째, 후처리 과정에 필요한 처리 알고리즘의 개발도 진행할 계획이다. PIV 관련 논문들을 살펴본 결과, PIV 이미지를 이용해 속도장을 분석하는 경우, 기포 내부에 가짜 입자들의 존재 유무나 후처리에 적용한 분석 방법에 따라 속도장 분석의 결과가 달라진다는 것을 알 수 있었다. 그래서 적절한 후처리 알고리즘을 개발함으로써 이런 문제를 해결하고자 한다.

## REFERENCE

- [1] S. Nogueira, M.L. Riethmuller, J.B.L.M. Campos, A.M.F.R. Pinto, "Flow patterns in the wake of a Taylor bubble rising through vertical columns of stagnant and flowing Newtonian liquids: An experimental study," *Chemical Engineering Science*, Volume. 61, pp. 7199-7212, 2006
- [2] G.B. Wallis, "One-Dimensional Two-phase Flow," McGraw-Hill, New York, 1969
- [3] R.M. Davies and G.I. Taylor, "The mechanics of large bubbles rising through extended liquids and through liquids in tubes," *Proceedings of the Royal Society of London, Series. A*, Vol. 200, pp. 375-390, 1950.
- [4] Z.-S. Mao and A.E. Dukler, "The motion of Taylor bubbles in vertical tubes I. A numerical simulation for the shape and rise velocity of Taylor bubbles in stagnant and flowing liquid" 
- [5] A.M.F.R. Pinto, M.N.C. Pinheiro, J.B.L. Campos, "On the interaction of Taylor bubbles rising in two-phase co-current slug flow in vertical columns: turbulent wakes," *Experiments in Fluids*, Vol. 31, pp. 643-652, 2001
- [6] F. Viana, R.P.R. Yaznez, J.L. Trallero, D.D. Joseph, "Universal correlation for the rise velocity of long gas bubbles in round pipes," *Journal of Fluid mechanics*, Vol. 494, pp. 379-398, 2003
- [7] M. Raffel, C.E. Willert, S.T. Wereley, J. Kompenhans, 'Particle Image Velocimetry-A Practical Guide.' Springer-Verlag, Berlin, 2007
- [8] R.J. Adrian, "Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics," *Annual Reviews of Fluid Mechanics*, Vol. 23, pp. 261-304, 1991
- [9] A.K. Prasad, "Particle image velocimetry," *Current Science*, Vol. 79, No. 1, pp. 51-60, 2000
- [10] S. Nogueira, R.G. Sousa, A.M.F.R. Pinto, M.L. Riethmuller, J.B.L.M.



Campos, "Simultaneous PIV and pulsed shadow technique in slug flow: a solution for optical problems," *Experiments in Fluids*, Vol. 35, pp. 598-609, 2003

[11] R. Moïssis and P. Griffith, "Entrance effects in a two-phase slug flow," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 84, pp. 29-39, 1962

[12] S. Polonsky, L. Shemer, D. Barnea, "The relation between the Taylor bubble motion and the velocity field ahead of it," *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 25, pp. 957-975, 1999

[13] R. van Hout, A. Gulitsky, D. Barnea, L. Shemer, "Experimental investigation of the velocity field induced by a Taylor bubble rising in stagnant water," *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 29, pp. 579 - 596, 2002

[14] J.D. Bugg, G.A. Saad, "The velocity field around a Taylor bubble rising in a stagnant viscous fluid: numerical and experimental results," *International Journal of Multiphase flow*, Vol. 28, pp. 791-803, 2002

[15] R.G. Sousa, S. Nogueira, A.M.F.R. Pinto, M.L. Riethmuller, J.B.L.M. Campos, "Flow in the negative wake of a Taylor bubble rising in viscoelastic carboxymethylcellulose solutions: particle image velocimetry measurements," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 511, pp. 217-236, 2004

## 감사의 글

대학원 석사 과정을 마치면서, 학문적 성과 뿐만 아니라 삶의 자세에 대해서 많이 배워 갈 수 있게 도와주신 분들에게 감사의 인사를 드리고자 합니다.

먼저, 갈 곳이 없게 되었던 저를 받아주시고 지도편달해주신 김신 교수님께 감사드립니다. 그리고 부담스러운 저를 맡아서 격려와 조언을 아끼지 않으셨던 이연건 교수님께도 감사드립니다. 또, 조용히 학생들을 위해 힘써주시는 김남진 교수님, 항상 웃는 모습으로 맞아주시는 최수석 교수님께도 심심한 감사의 말씀을 드립니다.

실험실의 중심을 잡아주시고 계시는 보안이형, 항상 도와주려고 노력하시는 영준이형, 긍정 에너지가 넘치는 바로, 프로그래밍에 능한 우연이, 마냥 착한 동재에게도 실험실 생활에 도움을 준 것에 대해 고맙다는 말을 전합니다.

마지막으로 어떤 상황에서도 저를 믿어주시고 지원해주신 부모님, 중요한 시점에서 조언을 해준 형, 세심하게 신경 써주시는 형수, 그리고 여기에 언급하지 못했지만 저에게 도움을 주셨던 많은 분들께 감사드립니다.

