



#### 공학석사 학위논문

## 토모 PIV를 이용한 직배열 실린더 후류특성 연구

A study on the wake characteristics of the serial cylinders

지도교수 황 광 일

#### 2020년 2월

## 한국해양대학교 대학원

냉동공조공학과

엄 장 호

# 본 논문을 엄장호의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장	김 의 간	(인)
위 원	황 광 일	(인)
위 원	이 원 주	(인)

2019년 12월 20일

## 한국해양대학교 대학원



목차	i
List of Figures	۰iii
List of Tables	vi
Abstract	vii

목 차

제1장 서 론
1.1 연구배경
1.2 연구목적
제2장 Tomo-PIV 및 CFD 분석기법 4
2.1 Computer fluid dynamics 4
2.2 Tomographic particle image velocimetry7
제3장 실험 설계
3.1 CFD 해석 13
3.2 실험 설계 및 해석 조건 설정
3.2.1 PIV 실험 장치 설계
3.2.2 실험환경 설정 22
3.3 Tomo-PIV 계측 ····· 24
제4장 실험 결과

## Collection @ kmou

i

4.1 CFD 해석결과 2	:9
4.2.1 CFD 결과(벡터) 3	0
4.2.2 CFD 결과(전압력)	2
4.2.3 CFD 결과(Turbulent Kinetic Energy)	4
4.2 Tomo-PIV 벡터 및 와도 결과	6
4.1.1 초기 실험에 대한 결과	6
4.1.2 개선된 실험에 대한 결과 5	51
4.3 결과 분석	6
제5장 결론	57
참고 문헌	;9
감사의 글	'1



## List of Figures

Fig	1.1	Distort of off shore plant	1
Fig	2.1	Pinhole camera model Principle of Tomographic-PIV	8
Fig	2.2	Representation of the imaging model used for tomo reconstruction.	9
Fig	3.1	Flow field modeling	14
Fig	3.2	Flow field split for meshing	15
Fig	3.3	Mesh inflation near cylinder	15
Fig	3.4	Equipments composition (Water Tank)	17
Fig	3.5	Equipments composition (CCD Camera, Lens)	18
Fig	3.6	Equipments composition (8W 532nm Laser)	18
Fig	3.7	Equipments composition (Calibrator, Stage)	19
Fig	3.8	Arrange of cylinder (case 1)	20
Fig	3.9	Arrange of cylinder (case 2)	21
Fig	3.10	) Arrange of cylinder (case 3)	21
Fig	3.1	L Equipment composition of experiment (flow field)	22
Fig	3.12	2 Degree of particle per pixel(ppp)	23
Fig	3.13	B Experiment setting	24
Fig	3.14	4 Split of laser sheet ·····	25
Fig	3.1	5 Particle image of case 1	26
Fig	3.1	3 Particle image of case 2	26



iii

Fig 3.17 Particle image of case 3	27
Fig 3.18 Calibration image	28
Fig 4.1 Check point location of CFD	29
Fig 4.2 Vector result of CFD case 1	30
Fig 4.3 Vector result of CFD case 2	30
Fig 4.4 Vector result of CFD case 3	31
Fig 4.5 Total pressure result of CFD case 1	32
Fig 4.6 Total pressure result of CFD case 2	32
Fig 4.7 Total pressure result of CFD case 3	33
Fig 4.8 Turbulent kinetic energy result of CFD case 1	34
Fig 4.9 Turbulent kinetic energy result of CFD case 2	34
Fig 4.10 Turbulent kinetic energy result of CFD case 3	35
Fig 4.11 Vector result of Tomo-PIV experiment 1, case 1	36
Fig 4.12 Vector result of Tomo-PIV experiment 1, case 2	37
Fig 4.13 Vector result of Tomo-PIV experiment 1, case 3	38
Fig 4.14 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 1, case 1 (1)	39
Fig 4.15 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 1, case 1 (2)	40
Fig 4.16 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 1, case 1 (3)	41
Fig 4.17 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 1, case 1 (4)	42
Fig 4.18 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 1, case 2 (1)	43
Fig 4.19 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 1, case 2 (2)	44
Fig 4.20 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 1, case 2 (3)	45

iv



Fig 4.21 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 1, case 2 (4) ..... 46 Fig 4.22 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 1, case 3 (1) ..... 47 Fig 4.23 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 1, case 3 (2) ..... 48 Fig 4.24 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 1, case 3 (3) ..... 49 Fig 4.25 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 1, case 3 (4) ..... 50 Fig 4.26 Vector result of Tomo-PIV experiment 2, case 1 ..... 51 Fig 4.27 Vector result of Tomo-PIV experiment 2, case 2 ..... 52 Fig 4.28 Vector result of Tomo-PIV experiment 2, case 3 ..... 53 Fig 4.29 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 2, case 1 (1) ..... 54 Fig 4.30 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 2, case 1 (2) ..... 55 Fig 4.31 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 2, case 1 (3) ..... 56 Fig 4.32 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 2, case 1 (4) ..... 57 Fig 4.33 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 2, case 2 (1) ..... 58 Fig 4.34 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 2, case 2 (2) ..... 59 Fig 4.35 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 2, case 2 (3) ..... 60 Fig 4.36 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 2, case 2 (4) ..... 61 Fig 4.37 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 2, case 3 (1) ..... 62 Fig 4.38 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 2, case 3 (2) ..... 63 Fig 4.39 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 2, case 3 (3) ..... 64 Fig 4.40 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 2, case 3 (4) ..... 65



V

### List of Tables

Table	3.1	Specification of Charge-Coupled Device camera	16
Table	4.1	Check Point location of CFD result	29
Table	4.2	Velocity results around rear cylinder	31
Table	4.3	Total pressure results around rear cylinder	33
Table	4.4	Turbulent Kinetic Energy around rear cylinder	35





#### 토모 PIV를 이용한 직배열 실린더 후류특성 연구

엄장 호

한국해양대학교 대학원

냉동공조공학과

초록

본 논문에서는 연속된 2개의 실린더의 후류에 대한 특성을 연구하는 것을 주목적으로 삼았으며, 특히 연속된 실린더 사이의 간격에 따른 차이를 비교하였다.

후류에 대한 가시화 실험을 진행하기 위하여 50μm 크기의 실린더를 회류수조 내에 분포시키고, 8W, 532nm 레이저가 조사됨으로서 산란광을 형성시켜 각 입자의 위치를 4대의 CCD-카메라를 통해 촬영하였고, Tomo-PIV 기법을 통하여 유동장 내의 벡터, 와도를 계산하였다. 실린더의 직경은 8mm이며, 실린더 사이의 간격은 각 8mm, 16mm, 24mm 일 때를 각각 case 1, case 2, case 3으로 지정하였고, 촬영 영역 및 계산 영역은  $40mm \times 20mm \times 18mm$ 으로 설정하였다. 해당 영역의 mm/voxel은 0.1로  $401 \times 201 \times 181$  voxel의 데이터를 계산하였다. 벡터 및 와도를 계산한 후 CFD 결과와 종합하여 결론을 도출하였다.

vii



Tomo-PIV 결과에서는 case 1의 경우 실린더 후류에서 낮은 와도를 나타냈으며, case 2와 3에서는 비교적 큰 값을 나타내었다. CFD 결과는 후방 실린더의 전압력 차이를 비교하였으며, case 1의 전압력 차이는 실린더 전 후방에서 0.52 Pa, case 2에서는 0.83 Pa, case 3에서는 1.09 Pa 로 case 1 대비 case 2는 약 1.6배, case 3에서 약 2.1배의 차이를 보였으며, 위 결과를 토대로 실제 해양플랜트 구조물에 적용 시 구조물 붕괴 사고를 줄이는데 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.





viii

## A study on the wake characteristics of the serial cylinders

Eom, Jang Ho

Department of Air-conditioning and Energy System Engineering Graduate school of Korea Maritime & Ocean University

#### Abstract

This paper studied the characteristics of wake of serial cylinders. specially, the difference according to the spacing between successive cylinders is compared.

For particle image velocimetry experiments, it take  $50\mu m$  size of plastic particles, which spread in circulating water channel about 0.05 particle per pixel, use the 8W 532nm Nd Yag laser to illuminate the inside of the channel and 4 CCD camera used to take pictures of each location. the captured images are computed with vectors and vorticitys in the flow field through techniques

ix



such as Tomographic particle image velocimetry(Tomo-PIV). the diameter of the cylinders arranged in the experimint was 8mm, and the intervals of the continuous cylinders were arranged at 8mm, 16mm and 24mm. and this results are compared with CFD results.

At Tomo-PIV results, case 1 showed a low vorticity magnitude. case 2 and 3 show a high voricity field. CFD results compared the front and rear total pressure differences of the rear cylinder. as a result, it was 0.52 Pa in case 1, 0.83 Pa in case 2, 1.09 Pa in case 3. so, case 2 was 1.6 times higher than case 1 and 2.1 times higher in case 3. so, the pressure difference in case 1 was the lowest. Based on the above results, it is thought that the structural collapse accident can be reduced when applied to the offshore plant structure.



#### 제1장 서 론

#### 1.1 연구배경

Collection @ kmou

최근 세계에너지 수요가 상승하고 고유가가 지속함에 따라 해양에너지를 발굴·시추·생산하는 해양플랜트(off-shore plant) 시장이 급성장하고 있으며 우리나라도 전년도 해양플랜트 산업이 세계 1위의 해양플랜트 건조국으로 부상하고 있다.



#### Fig 1.1 Distort of off shore plant

해양플랜트의 구조는 일반적으로 여러 개의 기둥 위에 건축물이 건조(建造) 되는 형상을 취하고 있다. 해양플랜트의 하부구조는 해저 부분의 높은 압력과 해양 내부의 유동에 의한 응력을 고스란히 받게 되므로, Fig 1.1과 같이 2016년 아제르바이잔, 2018년 인도에 있는 해양플랜트 구조물이 강풍을 동반한 강한 해양 내부 유동 등의 요인으로 인해 해당 구조물이 붕괴한 것으로 사료된다. 이러한 이유로 해양 내부의 난류 유동에 대한 분석이 필요한 것으로 판단되어 본 연구를 진행하게 되었다.

난류 유동의 연구에는 전산해석(CFD, Computer Fluid Dynamics) 방법과 실험 방법을 통한 연구들이 적용 가능하며, 시간, 비용 등의 제약으로 인하여 전산해석 방법만을 이용하여 난류 유동을 분석하는 경우가 많다. 하지만 전산해석의 결과는 정확한 결과라고 보기는 어려우며, 실험이 동 반되어야 정확한 결과라 볼 수 있다. 유동장 실험을 위해서는 접촉식 기법과 비접촉식 실험기법이 사용되나, 접촉식 기법은 유동장 내부에 센서를 설치하는 방법으로 유동장에 영향을 줄 수 있다. 비접촉식 기법은 카메라 센서를 이용하여 연속된 이미지를 기록한 뒤 교정(calibration), 재 구성(reconstruction), 상호상관(cross-correlation) 등의 알고리듬을 통하여 벡터를 획득하는 입자 영상 유속계 (PIV, Particle Image Velocimetry) 기법을 사용한다.

특히, 연구 [1]~[3] 에서는 PIV와 함께 핵심적인 mode들에 대한 분해기법인 적합 직교 분해 (POD, Proper Orthogonal Decomposition)를 적용한 연구가 진행되었고, 해당 연구에서는 적합 직교 분해를 통해 PIV 해석을 위한 영상의 배경제거를 진행해서 계산 품질을 높이는데 이바지하였다. 3D 벡터장 추출을 위해서는 3차원에 대한 입자 영상 유속계 기술 중 가장 활발한 연구를 보이는 Tomographic-PIV(이하 Tomo-PIV) 기법을 적용하는



것이 바람직하며, 연구 [4]~[13] 에서 Tomo-PIV에 관한 연구들이 진행되었다. 연구 [14] 에서는 단일 실린더에 대한 Tomo-PIV 해석과 함께 POD 분석을 진행하였으나, 본 연구의 목적은 해양플랜트의 형상과 유사한 연속된 실린더의 후류를 분석하는 것으로 전방에 있는 실린더의 이격거리에 따른 후방 실린더에 영향을 주는 난류강도를 측정하여 실제 해양플랜트 구조물 설계에 반영할 수 있도록 한다.

#### 1.2 연구목적

본 연구는 해저 유동에 대한 속도데이터 측정실험을 위해 해양플랜트 구조물과 유사한 형상의 두 개의 실린더를 무차원화 하여 실린더 간의 거리에 대한 속도 벡터를 4대의 카메라를 이용하여 3차원에 대한 유속을 측정하는 Tomo-PIV를 이용하고자 한다. 전방에 있는 해양플랜트 구조물의 후류에 대한 난류 유동이 후방의 해양플랜트 구조물에 미치는 영향을 정량적으로 분석하는 것을 목적으로 하며, 이를 달성하기 위한 논문의 구성은 다음과 같다.

제1장에서는 연구의 배경과 목적에 관해 설명하고, 2장에서는 본 연구를 진행하기에 앞서 난류 유동에 대한 사항과 계측 및 분석기법에 대하여 설명한다. 제3장에서는 본 논문에서 진행될 실험에 사용된 장비와 실험 절차에 대하여 설명한다. 4장에서는 해당 연구에 관한 실험 결과를 설명 한다. 마지막으로 제5장에서는 결론과 함께 본 연구의 추후 발전 가능성에 관하여 기술하였다.

З



#### 제 2 장 Tomo-PIV 및 CFD 분석기법

#### 2.1 Computer Fluid dynamics

큰 규모의 유동해석은 비용, 시간 등의 이유로 인하여 실제 실험을 진행하는데 어려움이 있다. 따라서 전산유체해석 즉, Computer Fluid Dynamics(CFD) 기법을 통해 유동장 내부의 구조를 관찰 및 분석한다. 실제 실험을 하더라도 CFD를 통하여 실제 유동의 경향성을 분석하여 실험 case를 줄이는 용도로 사용된다. CFD 방법에는 Matlab을 통하여 유동해석을 위하여 프로그래밍을 하는 방법과 상용 프로그램을 사용하는 방법 등이 있으며, 본 논문에는 일반적으로 많이 사용되는 Ansys 社의 CFX 프로그램을 이용하여 전산해석을 진행하였다. 해당 프로그램에서 사용되는 난류 모델로는 RANS(Raynolds Average Navier-stokes)방정식을 사용하는  $k-\epsilon$ ,  $k-\omega$  등이 있다. 난류 모델 중 RANS 난류 모델의 분류에는 방정식에 따라 0차 방정식, 1차 방정식, 2차 방정식 모델이 존재하고, 대표적으로 V와 L에 관한 식으로 표현한 것이며, 여기서 V는 속도 스케일, L은 길이 스케일을 뜻한다.

0차 방정식 모델은 V와 L을 표현하는 가장 간단한 수준의 난류 모델링 방법으로, 간단한 유동 형상에 쉽게 적용할 수 있으나, 기하형상이 복잡하거나 난류의 형상이 연속적으로 이루어지는 경우에는 정확도가 떨어진다는 단점이 있고, 1차 방정식 모델은 0차 방정식 모델을 발전시킨 모델로서 난류점성(eddy viscosity)를 고려함으로써 0차 방정식 모델에 비해 연속적인



난류에 대해 더욱 정확한 결과를 나타내지만 1차 방정식 모델 역시 복잡한 기하형상이 복잡한 경우 정확한 값을 나타내기 어렵다는 단점이 있다. 이 두가지 방법을 보완하는 모델로서 2차 방정식 모델은 V와 L을 개별적으로 정의할 수 있는 두 개의 방정식을 이용하는 것으로, 기하 형상이나 유동 양식에 상관없이 광범위한 적용이 가능한 장점으로 인해 일반적으로 가장 널리 이용되는 방법이기도 하다. 이들 중 CFX 프로그램에서 가장 많이 사용되는 기법으로는  $k-\epsilon$ ,  $k-\omega$  SST 기법 등이 사용되며, 두 개의 스칼라 값에 대하여 수송 방정식을 풀이하게 되는데, k 방정식은 운동에너지 계산에 이용되며,  $k-\epsilon$  방정식을 통해 난류 운동 에너지의 소산율을 모델링하며, L은 아래 식 28)과 같이 구할 수 있으며, 여기서  $C_u$ 는 상수를 취한다.

k-ε모델은 자유 전단층의 낮은 압력구배를 가지는 유동에 대해 우수한 결과를 보이며, 벽과 벽 사이의 유동에서는 압력구배가 0일 때 또는 압력 구배가 낮은 유동에서는 정확한 결과를 보이며, 역압력구배를 보이는 유 동장에서는 낮은 정확도를 가진다. 또한 벽면 충돌 문제에 있어서는 과도한 난류 운동 에너지가 계산되어지며, 난류 영역 외에 층류 영역 혹은 천이 영역에 대한 정확도가 떨어지며, 이러한 점에서 우수한 결과를 보여주는 2차 방정식 난류 모델로는 k-ω 모델이 있다. 여기서 ω는 에너지의 비소산 값으로서 ω의 값을 구한 후 length scale L은 다음 식으로 계산한다.



$$L = \frac{k^{\frac{1}{2}}}{\omega}$$

일반적으로 벽면에 대한 적분이 적용된 저 레이놀즈수의 유동장에 사용되며 경계층 유동 중 벽면과 가까운 영역에서 효과적인 방정식이다. 특히,  $k-\epsilon$ 모델에서 낮은 정확도를 가지는 역 압력 구배 문제에 대해서 다른 모 델에 비해 우수한 결과를 나타내지만, 위 방정식에서 설정하는 ω 값에 민감하게 변화하는 점으로 free shear flow에서는 낮은 정확도를 나타낸다.

본 논문에서는 비교적 높은 레이놀즈수를 가지는 유동에 대한 해석이 필요한 관계로 *k*-ε 모델을 사용하였으며, 경계층 즉, 실린더 주변의 격자를 구성하는 단계에서 inflation 설정을 통해 mesh를 세밀하게 설정하여 더욱 정밀한 전산해석을 진행하였다.



#### 2.2 Tomographic particle image velocimetry (Tomo-PIV)

Tomo-PIV의 원리는 Fig 2.3 에 도식화되어있다. 유동장에 분포되어있는 추적 입자는 3차원 공간 내에서 Laser에 의해 조사(照射)된다. laser에 의해 산란된 광 패턴은 촬영에 사용되는 4대의 CCD 카메라를 사용하여 여러 각도에서 동시에 촬영되며, 3차원 개체 입자분포는 재구성(reconstruction) 과정을 거치며 각 입자들은 3차원 공간 내에 위치를 가지게 된다. 이 과정을 마치게 되면 재구성된 볼륨에 대한 상호상관(cross-correlation)을 통해 벡터장을 형성하게 된다. 광도분포 *E*(*X*,*Y*,*Z*)를 영상 픽셀 (*x*<sub>i</sub>,*y*<sub>i</sub>)에 투영하면 픽셀 강도 *I*(*x*<sub>i</sub>,*y*<sub>i</sub>)가 반환되며, 이 값은 식 30)과 같은 선형방정식으로 나타난다.

여기서 N<sub>i</sub>는 *i*번째 픽셀 (x<sub>i</sub>,y<sub>i</sub>)에 해당하는 Fig 2.4의 음영처리 된 시선 (line of sight) 근처에서의 절편복셀(intercept voxel)을 나타낸다. 가중치 계수  $\omega_{i,j}$ 는 화소 강도  $E(X_i, Y_i, Z_i)$ 에 대한 강도  $I(x_i, y_i)$ 의 *j*번째 복셀을 의미하며, 복셀 볼륨과 정규화된 복셀, 가시선 사이의 교차 볼륨으로 계산 된다. 해당 계수는 픽셀에 대한 복셀의 상대적 크기와 복셀 중심과 시선 사이의 거리 (Fig 2.4의 거리 d)에 따라 달라진다. 0 ≤  $\omega_{i,j}$  ≤ 1는 2D 배열 W의 모든 항목  $\omega_{i,j}$ 에 대해 매우 희박한데, 시선은 전체 볼륨의 작은 부분만 교차하기 때문이다. 카메라의 다른 민감도, 전방 또는 후방 산란

7

## Collection @ kmou

차이 또는 카메라 사이의 다른 광학적 차이를 설명하기 위해 가중 계수를 사용할 수 있다. 녹화된 영상은 이러한 효과를 보충하는 적절한 방법으로 전처리될 수 있다.



Fig 2.1 Pinhole camera model Principle of Tomographic-PIV





Fig 2.2 Representation of the imaging model used for tomographic reconstruction. (G E. Elsinga, 2008)

위의 모델에서 기하학적 광학 기법을 적용하면 기록된 픽셀 강도는 해당 시선(line of sight)을 따라 적분 된 객체 강도  $E(X_i, Y_i, Z_i)$  로 나타낼 수 있다. 이 경우 재구성된 입자는 3D Gaussian-type 블롭으로 표현되며, 이 블롭은 모든 방향에서 투영되는 것이 회절점이다.

Tomographic-PIV의 재구성은 MLOS(multiplicative line of sight) 기법을





통하여 복셀 강도의 초기 값을 설정한 후 MART(multiplicative algebraic reconstruction technique) 기법, 혹은 SMART (simultaneous multiplicative algebraic reconstruction technique) 기법을 통하여 재구성의 정밀성을 높인다. 아래 식 31)은 MART법의 계산식을 나타낸다.

여기서 μ는 스칼라 이완 매개변수로, 계산의 수렴속도를 빠르게 하기위해 사용된다. 식 32)는 SMART 법의 계산식을 나타낸다.

2개 이상의 카메라에 의해 촬영된 영상을 이용하여 유동장 측정을 위해 서는 카메라 영상 좌표계와 물리 좌표계 사이의 관계를 정확히 파악해야 한다. 이러한 과정을 위하여 교정(calibration) 단계가 추가되게 된다. 10-parameter 법은 6개의 외부 변수(dis, α, β, γ, m<sub>x</sub>, m<sub>y</sub>)와 4개의 내부 변수(c<sub>x</sub>, c<sub>y</sub>, k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub>)를 얻기 위해 사용되었다. 변수 (α, β, γ)는 절대좌표계에 대한 사진 좌표의 기울기 각도를 나타낸다. 두 좌표 사이의 모든 점에



대한 공선식은 식 33)과 같다.

$$\begin{split} x &= c_x \frac{X_m - m_x}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2} - Z_m} + \Delta x \\ y &= c_y \frac{Y_m - m_y}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2} - Z_m} + \Delta y \end{split}$$

 $c_x$ 와  $c_y$ 는 각각 좌표의 x성분과 y성분에 대한 초점거리이고, △x와 △y는 렌즈 왜곡이며 식 34), 35)와 같이 구할 수 있다.

$$\Delta x = \frac{x}{r} \times (\mathbf{k}_1 r^2 + \mathbf{k}_2 r^4)$$
  
$$\Delta y = \frac{y}{r} \times (\mathbf{k}_1 r^2 + \mathbf{k}_2 r^4) \qquad \dots 34)$$

 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 

식 34)는 식 35)와 같이 변환될 수 있다.



 $F = c_x \frac{X_m - m_x}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2} - Z_m} - (x - \Delta x) = 0$ 

$$G = c_{y} \frac{Y_{m} - m_{y}}{\sqrt{dis^{2} - m_{x}^{2} - m_{y}^{2}} - Z_{m}} - (y - \Delta y)$$

식 35)에서 △*x*, △*y*는 렌즈 왜곡에 관한 식이며, 이는 최신 카메라의 경우 0에 근사한 값으로 무시할 수 있는 수준이다.

이와 같은 재구성, 상호상관, 교정 과정을 통하여 3차원에 대한 유동장 분포를 계산할 수 있다.





#### 제 3 장 실험 설계

본 장에서는 실린더 후류에 대한 Tomo-PIV 계산과 함께 CFD해석을 진행하였으며, 두 계산에서의 실험 초기조건은 동일하게 설정하였다. 또한 Tomo-PIV 및 CFD에서 일차적으로 얻어내는 물리량은 3차원 벡터이며, 이 데이터의 후처리를 통하여 Tomo-PIV에서는 와도(vorticity magnitude)를, CFX에서는 전압력(total pressure), 난류 운동 에너지(turbulent kinetic energy)를 얻는 것을 목적으로 한다.

#### 3.1 CFD 해석 조건

전산해석은 상용 프로그램인 ANSYS 19.2 CFX tool을 이용하였고, 해석 조건으로는 실린더 전방의 500mm가량은 해석결과에 영향을 미치지 않는 것으로 확인하여 해석영역은 Fig 3.1과 같은 600×300×100mm<sup>3</sup> 크기로 모델링 하여 해석하였고, 벡터는 2차 실험에 사용된 계산 영역과 같은 50×30×10mm<sup>3</sup> 영역의 벡터를 결과로 사용하였다.





Fig 3.1 Flow field modeling

적자 품질은 orthogonal quality 기준으로 최소 0.6 이상, 평균 0.97의 격자품질로 구성하였다. 계산 격자 개수는 case마다 상이하며 약 32,000개 가량의 격자로 구성되어있다. 격자는 Fig 3.2과 같이 유동장을 나누어 실린더 부분은 격자 크기를 0.0025m 크기로 상세한 벡터를 계산할 수 있도록 구성하였고, 출구와 side 부분은 0.02m의 비교적 큰 격자 구성으로 계산 경제성을 높였으며, 실린더 부분은 인플레이션 조건으로 설정은 Fig 3.3과 같이 first layer thickness를 0.0001m만큼 분할하여 실린더 부근에서의 벡터를 더욱 상세하게 해석할 수 있도록 설정하였다. 입구 평균 유속은 60mm/s, 유동장영역의 온도는 18℃, 옆쪽 벽면은 논슬립 상태를 적용하였으며, 상하 유동은 벡터의 분포가 큰 차이가 없는 것을 확인하여 실제 실험영역에 비하여 낮은 높이의 해석영역과 함께 대칭(symmetry)



조건을 부여하여 해석 경제성을 높였다.



Fig 3.3 mesh inflation near cylinder



#### 3.2 실험 설계 및 해석 조건 설정

#### 3.2.1 PIV 실험 장치 설계

실험 장치는 Fig. 3.4과 같은 300×300×1,200 mm<sup>3</sup> 의 회류수조에서 유동장을 생성하고, Fig 3.5의 CCD 카메라(charge-coupled device camera) 4대를 사용하여 촬영하였으며, 사양은 아래 Table 3.1과 같다. 또한, 입체적인 유동장 조사를 위하여 Fig 3.6 와 같은 8W 출력을 가진 532nm 파장 레이저 및 슬레이트, 광학 거울 및 렌즈로 구성된 volume optic을 사용하였다. 또한, 카메라에 사용되는 렌즈는 Nikon 社 의 105mm F1.4 DC 모델을 사용하였다. 교정을 위한 판과 스테이지는 Fig 3.7과 같다.

Table 3.1 Specification of Charge-Coupled Device camera

Phantom Mi	ro LAB 340	Phantom VEO 410			
최대 촬영 속도	311,000 fps	최대 촬영 속도	600,000 fps		
최대 해상도	$2,560 \times 1,600$	최대 해상도	1,280×800		
최소 노출 시간	$1\mu s$	최소 노출 시간	$1 \mu s$		





Fig 3.4 Equipments composition (Water Tank)





Fig 3.5 Equipments composition (CCD Camera, Lens)



Fig 3.6 Equipments composition (8W 532nm Laser)





Fig 3.7 Equipments composition (Calibrator, Stage)



실험 모델은 300×300×1,200mm<sup>3</sup> 의 회류수조 중앙에 Fig 3.8, 3.9, 3.10과 같이 8mm 직경인 스테인레스 실린더 2개를 위치시킨다. 2개의 각 실린더 사이를 실린더의 직경 8mm 에 대한 1배수, 2배수, 3배수만큼 이격시켜 각 위치에 대한 난류 유동의 영향을 관찰하며, 이를 각각 case 1, case 2, case 3 으로 설정하였다. 또한, 실험 모델의 하부에 실린더를 고정하기 위한 아크릴 판을 위치시키며, 실린더와 아크릴은 광원의 산란 및 굴절을 줄이기 위하여 흑 무광 도료를 사용하여 코팅하였다. 회류수조에서 발생한 유동이 와류형태로 계측영역을 통과할 수 있으므로 허니콤 형상의 구조물을 토출구에 위치시켜 유동을 직선화할 수 있도록 한다. 실험을 위한 광학 장치의 배치는 아래 Fig 3.11과 같다.



Fig 3.8 Arrange of cylinder (case 1)





Fig 3.10 Arrange of cylinder (case 3)





Fig 3.11 Equipment composition of experiment (flow field)

#### 3.2.2 실험환경 설정

실험은 총 2회 진행되었으며, 초기 실험은 50×30×8mm<sup>3</sup> 영역을 10mm 두께의 레이저를 조사하여 실험을 진행하였으며, 해석을 진행한 영역의 크기는 1001×601×161개의 복셀로 구성되어있으며, mm/voxel은 0.05이다. 첫 번째 실험에서는 더 넓은 영역을 0.015m/s의 느린 유속을 흘러보낸 것을 촬영 후 계산하여 전체적인 분포를 보고자 하였으나, 넓은 영역을 봄으로써 상세한 유동분포를 보기 어려운 상황이 발생하였다. 해당 부분에 대한 4.2에 기재하였으며, 실험 영역, 유속 외에는 모두 동일한 조건으로 실험을 진행하였다.



개선된 실험 방법을 통해 해석을 진행한 영역의 크기는  $401 \times 201 \times 181$  개의 복셀로 구성되어있으며, mm/voxel은 0.1이다. 따라서 실제 영역의 크기는  $40 \times 20 \times 18 mm^3$ 이다. 작동 유체는 약  $18^{\circ}$ C 의 수돗물을 사용하였다. 본 실험에서는 회류수조는 4Hz의 주기로 회전하고, 실험 이전에 회류수조 내의 유속에 대한 교정 실험을 통하여 유속을 계산하였으며, 60mm/s, 즉 0.06m/s의 속도로 흐르는 것으로 계측되었다. 또한,  $18^{\circ}$ C 물의 동점성계수는  $\nu = 1.138 \times 10^{-6}m^2/s$ 이며, 대표길이는 0.3386m로 레이놀즈 수는  $Re = \frac{0.06m/s \times 0.3386m}{1.138 \times 10^{-6}m^2/s} = 17,852$ 이다. 이는 난류 영역에 속한다. Tomo-PIV 실험을 위한 입자는  $50\mu m$  크기의 실리콘 입자를 8W 레이저의 최대 광량에서 0.055ppp(particle per pixel) 만큼 촬영이 되도록 투입하였으며, 이는 Fig 3.12에서의 그림과 같이 CCD camera에 촬영되도록 입자들이 분포되어있다.



Fig 3.12 Degree of particle per pixel(ppp)


## 3.3 Tomo-PIV 실험

본 연구에서 진행한 실험의 절차로는 촬영(recording), 배경제거(remove background), Tomo-PIV 계산, 결과 분석으로 진행되었고, Fig 3.13은 촬영을 위해 실험 세팅을 하여 촬영을 앞둔 상태이다.



Fig 3.13 Experiment setting





Fig 3.14 Split of laser sheet

Fig 3.14은 실제 실험에 사용되는 영역을 CCD 카메라가 아닌 일반 카메라를 이용하여 촬영한 것으로, 실제 촬영 영역은 100mm×50mm×20mm로 설 정하였고, Tomo-PIV 계산 영역은 40mm×20mm×20mm 로 설정하였다.

아래 Fig 3.15, 3.16, 3.17는 각각 case 1, case 2, case 3을 초고속 카메라를 이용하여 촬영한 사진에 대하여 배경제거 처리를 진행한 사진이다.





Fig 3.16 Particle image of case 2







Fig 3.17 Particle image of case 3

위와 같이 촬영된 사진과 함께 Tomo-PIV 계산을 위해서는 교정을 위한 촬영이 필요하며, Fig 3.18은 교정판으로써 각 점 사이의 간격은 5mm이고, 중앙의 위치를 식별하기 위하여 중앙 부분에 하단부 점 사이에 삼각형의 표식을, 상단부에 사각형 표식을 하였다.

교정 촬영은 20mm가 모두 포함될 수 있도록 20mm의 범위 안에서 5번 진행하였고, 시작 지점은 원점으로부터 -10mm이며, 5mm씩 앞으로 이동 시켜 촬영하여 중앙으로부터 -10mm, -5mm, 0mm, 5mm, 10mm 위치에서 교정 촬영을 하였다.





Fig 3.18 Calibration image



# 제 4 장 실험 결과

### 4.1 CFD 해석결과

CFD 해석은 벡터, 전압력, 난류 운동 에너지(Turbulent Kinetic Energy) 값을 통하여 해석영역에서 후방에 있는 실린더가 받는 응력을 각각 비교하였으며, 각 Table에 CFD 해석을 통하여 출력 된 값들을 정리하였다. 아래 Table 4.1은 CFD 데이터를 추출한 지점의 좌표를 정리하였으며, 이는 Fig 4.1와 같다.

Table 4.1 Check I only location of CID result					
No	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		
P1	75	96	25		
P2	75	104	25		

Table 4.1 Check Point location of CFD result



Fig 4.1 Check point location of CFD result



## 4.1.1 CFD 결과 (벡터)





Fig 4.3 Vector result of CFD case 2





Fig 4.4 Vector result of CFD case 3

Table 4.2 Velocity results around rear cylinder

[m/s]	case 1	case 2	case 3
P1	0.00013394	0.00006067	0.00003369
P2	0.00007050	0.00007131	0.00006862

벡터의 분포는 전방에 위치한 실린더에 입구의 유동이 충돌하여 실린더 측면부에서 큰 벡터가 나타나는 것을 볼 수 있으며, 모든 case에서 입구 평균 유속에 비해 현저히 낮은 값을 보이며, 이는 P1 지점의 낮은 유속은 전방 실린더의 후류의 영향으로 보이며, 실린더 사이의 간격이 멀어질수록 P1에서의 유속이 줄어드는 것을 확인 할 수 있다. P2 지점의 벡터는 case 별로 아주 낮은 차이를 보이며, 무시해도 될 만큼의 차이를 보였다.









Fig 4.6 Total pressure result of CFD case 2





Fig 4.7 Total pressure result of CFD case 3

Tuble ne rotar pressure resulte around rour cymaer				
[Pa]	case 1	case 2	case 3	
P1	-0.2946009	-0.2986105	-0.3129599	
P2	0.2263675	0.5356956	0.7845517	
P1-P2	0.5209684	0.8343061	1.0975116	

Table 4.3 Total pressure results around rear cylinder

Table 4.3은 후방 실린더 접점에 대한 압력분포와 함께 전압력의 차이를 정리하였다. 그 결과 case 1 에서의 압력 차가 가장 낮은 것으로 측정되었고, case 2와 case 3에서는 각각 case 1에 비해 약 1.6배, 2.1배의 차이를 보였고 후방의 실린더에 작용하는 압력 차가 크게 나타나며, 실제 해저 유동에서도 큰 값을 나타낼 것으로 보인다.





## 4.1.3 CFD 결과 (Turbulent Kinetic Energy)

Fig 4.8 Turbulent Kinetic Energy result of CFD case 1



Fig 4.9 Turbulent Kinetic Energy result of CFD case 2





Fig 4.10 Turbulent Kinetic Energy result of CFD case 3

Table 4.4 Turbulent Kinetic Energy around rear cylinder

	case 1	case 2	case 3
P1	0.00013514	0.00013778	0.00013934
P2	0.00016003	0.00020225	0.00023365

Table 4.5는 실린더 후방의 Turbulent Kinetic Energy 즉, 난류 운동 에너지를 정리한 것으로, Turbulent Kinetic Energy P1 ~ P6까지 case 1에서 약소한 차이를 보였으며, 0.00002 ~ 0.00003의 값을 가지는 것으로 나타났다. 해당 값 역시 case 1이 가장 낮은 차이를 보였으며, case 2와 case 3은 각각 case 1에 비해 2.6배, 3.8배 만큼의 차이를 보여주었다.



#### 4.2 Tomo-PIV 벡터 및 와도 결과

#### 4.2.1 초기 실험에 대한 결과

초기 실험은 회류수조의 회전수가 2hz로 기존에 진행하였던 수조 유속 측정 실험을 통하여 15mm/s의 유속을 나타내는 것을 확인하였고, 유속, 해석영역을 제외한 다른 조건들은 동일한 상태에서 실험을 진행하였다.



Fig 4.11 Vector result of Tomo-PIV experiment 1, case 1





Fig 4.12 Vector result of Tomo-PIV experiment 1, case 2





Fig 4.13 Vector result of Tomo-PIV experiment 1, case 3

case 1, 2, 3의 유속을 tomo-PIV를 통해 측정하였을 때 case 1에서는 실린더 후류 영역에서는 낮은 유속과 함께 실린더 좌우로 낮은 분포의 유동을 나타내었으며, case 2와 3에서는 case 1에 비해 높은 유속과 함께 실린더 좌우로 벡터의 회전구조가 나타나는 것을 확인하였다. 이를 통해 와류가 발생할 것이라 예상하였으며, 아래와 같이 와도(vorticity magnitude)를 계산하여 유동장 내부의 와류를 관찰하였다.





Fig 4.14 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 1, case 1 (1)





Fig 4.15 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 1, case 1 (2)





Fig 4.16 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 1, case 1 (3)





Fig 4.17 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 1, case 1 (4)

위 영상들과 같이 case 1에서는 Fig 4.17 의 중앙부분을 제외하고는 특별한 와류 형태가 관찰되지 않았다. 또한 특징적인 유동구조가 나타나지 않았으며, 해당 결과를 토대로 재실험이 필요하다고 판단되었다.





Fig 4.18 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 1, case 2 (1)





Fig 4.19 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 1, case 2 (2)





Fig 4.20 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 1, case 2 (3)





Fig 4.21 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 1, case 2 (4)

Fig 4.19에서는 case 1에서 나타나지 않았던 와류구조가 생성 되었으며, 유속이 느려 case 1의 후류가 비교적 약한 것이 문제가 되는 것으로 예상 된다. Fig 4.20 에서는 Fig 4.19 의 와류 구조가 커진 것을 볼 수 있으며, 전반적인 흐름 또한 후방으로 이동한 것으로 보인다. Fig 4.21 에서는 와류가 번져나가며 확장된 것을 볼 수 있다. Fig 4.22 에서는 이전 영상에서 확장 되었던 와류 구조가 측면부로 이동한 것을 볼 수 있다.





Fig 4.22 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 1, case 3 (1)





Fig 4.23 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 1, case 3 (2)





Fig 4.24 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 1, case 3 (3)





Fig 4.25 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 1, case 3 (4)

case 3에서는 촬영 영역 하단부분에 와류구조가 나타났으며, case 2와 비슷한 수준의 와류구조를 나타냈다. 또한 해당 영역 중 후반부에서는 특징적인 와류구조가 나타나지 않았으며, 해당 영역의 1/2 지점까지도 유동 특징을 찾기 어려워 보인다.



#### 4.2.2 개선된 실험에 대한 결과

실험 방법이 개선된 실험 2에서는 회류 수조의 회전수를 4hz로 변경하였고, 유속 측정을 통하여 0.06m/s의 유속으로 수조 내부를 이동하는 것으로 계산되었다. 기존 진행하였던 실험 영역의 후방 1/2 지점에서 특징적인 유동구조가 발견되지 않았던 점을 고려하여 실험 영역을 실린더의 직경 d의 4배 즉, 4d 만큼의 영역을 계산하였으며, 와류 구조가 계산 영역 측면으로 이동할 수 있는 점을 고려하여 계산 영역을 8mm에서 20mm로 2.5d 만큼 확장하였다.



Fig 4.26 Vector result of Tomo-PIV experiment 2, case 1





Fig 4.27 Vector result of Tomo-PIV experiment 2, case 2





Fig 4.28 Vector result of Tomo-PIV experiment 2, case 3

Tomo-PIV로 측정된 평균 벡터 값은 모든 케이스에서 CFD 해석 결과와 마찬가지로 후방에 위치한 실린더에서는 각 case 별 큰 차이를 보여주지 못하였다.



Tomo-PIV의 결과를 속도 성분을 분석하여 아래 Fig 4.31와 같이 와도 (vorticity magnitude)를 나타내었다.



Fig 4.29 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 2, case 1 (1)

Fig 4.29 에서는 실린더 직 후방에서는 비교적 낮은 와도를 보여주었고, 2번 영역 하단에 위치한 와류는 실린더에 의해 발생된 것으로 보이며, 해당 영상에서는 약 0.22의 값을 가지는 것을 알 수 있다.







Fig 4.30 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 2, case 1 (2)

Fig 4.30에서는 1번 영역 상단부에서 큰 값을 가지는 와도가 중앙으로 이동한 것을 알 수 있으며, 이에 따라 Fig 4.29에서 약 0.04의 값을 가지던 실린더 후방 부분이 0.14 의 값을 가지게 되는 것을 볼 수있다. 또한 4번 영역에서는 와류의 정도는 낮아졌지만, Fig 4.29 2번 영역에 위치하고 있던 와류의 형태가 유동의 흐름으로 인해 이동한 것을 볼 수 있다.





Fig 4.31 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 2, case 1 (3)

Fig 4.31 에서는 이전 영상에서 1번 영역의 강한 정도를 가지던 와류가 중앙으로 이동하며 약해진 것을 볼 수 있으며, 2번 영역 상단에 강한 강도를 가지던 와류가 4번 영역으로 이동하면서 강도가 강해진 것으로 나타났다.





Fig 4.32 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 2, case 1 (4)

Fig 4.32 에서는 이전 영상에서 약해졌던 중앙부분의 와류의 형태가 측면으로 이동하였으며, 강도가 강해진 것을 볼 수 있다.

Case 1의 경우 측면에 분포하던 와류가 실린더 부근에서는 지속적으로 왕복하며 실린더에 부하가 발생할 것으로 보인다.





Fig 4.33 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 2, case 2 (1)

Case 2의 Fig 4.33의 경우 범위는 좁지만 2번 영역의 실린더 후방에 직접적인 와류들이 발생하였으며, 평균적으로 0.06~0.12 가량을 값을 가지던 case 1의 와도에 비해 큰 와류가 발생한 것을 알 수 있다.





Fig 4.34 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 2, case 2 (2)

Fig 4.34 에서는 이전영상의 중앙에 분포하던 와류가 우측통행 2번 영역으로 강도가 강해지며 이동한 것을 알 수 있으며, 중앙에 위치한 유동은 회전 강도가 약해지며 퍼지는 것을 알 수 있다.




Fig 4.35 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 2, case 2 (3)

Fig 4.35 에서는 전반적인 와류가 감소한 것으로 나타났으며, 이는 지속적으로 수조 내부의 유동이 흐르게 되어 이동한 것으로 보인다.





Fig 4.36 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 2, case 2 (4)

Fig 4.36 에서는 전반적인 와도 형상은 유지하며 와도가 낮아진 것을 보여주며, case 1에 비하여 뚜렷한 형상의 와류가 발생하는 것을 알 수 있다.

Case 2의 경우 작은 범위 내에서 case 1에 비해 높은 강도와 함께 뚜렷한 난류형상을 보이는 것으로 나타났다.





Fig 4.37 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 2, case 3 (1)

Case 3의 경우 실험 영역 전반적인 와도가 타 case에 비해 높은 분포를 보이며, 최대치 0.3에 근사한 값이 다른 case보다 많이 분포하는 것을 알 수 있다. 1번 좌측과 2번 우측 상단에서 비교적 강한 세기의 와류가 발생 하였으며, 와류의 형상은 뚜렷하게 나타나지 않았으나, 전반적인 와도가 높은 것을 알 수 있다.





Fig 4.38 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 2, case 3 (2)

Fig 4.38 에서는 측면부분의 와도가 강해지는 분포를 보이며, 1번 하단 부분에서 높은 정도의 와도가 발생하는 것을 알 수 있다.





Fig 4.39 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 2, case 3 (3)

Fig 4.39 에서는 2,4번 영역 측면에 위치하고 있던 와도가 사라진 것을 알 수 있으며, 이는 기존에 존재하던 유동 분포가 실험영역 밖으로 이탈한 것으로 보인다.





Fig 4.40 Vorticity result of Tomo-PIV experiment 2, case 3 (4)

Fig 4.40 에서는 실린더 중앙 상단에서 큰 와도가 발생하였으며, 실린더의 형상과 유사한 형태의 와류가 발생한 것을 알 수 있다.

Case 3의 경우 실린더 후방에서 발생하는 난류로 인해 유동의 변화가 빠른 것으로 예상되며, 전반적인 와도 또한 높은 값을 가지는 것으로 나타났다.

Case 1의 경우 타 케이스에 비해 낮은 정도의 와도를 가지며, case 2는 전체적인 분포는 case 1에 비해 낮은 분포를 보이나, 부분적으로 강한 와도를, case 3 에서는 전반적으로 높은 정도의 와류를 발생시키는 것을 알 수 있다.



## 4.3 결과 분석

CFD로 해석된 벡터는 후방 실린더 후류에서보다 전방에 배치된 실린더에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 실린더 후류의 전압력의 차이가 case 1에서 가장 낮은 값을 보였으며, case 2와 case 3은 case 1에 비해 각각 1.6배, 2.1배의 전압력 차이가 나타났다.

Tomo-PIV 실험의 계산 결과는 두 번의 실험을 통하여 실험 방법의 개선을 도모하였으며, 실험 결과는 Tecplot을 통해 벡터를 시각화하였으며, 벡터는 평균장을 계산하였고, 단위는 m/s로 표기하였다. 와도의 iso-surfaces는 3개의 value로 표현하였으며, 단위는 무차원화 하였다.

초기 개선 전 실험에서는 case 1에서 특징적인 와류구조를 발견하지 못하였으며, case 2와 case 3에서는 와류구조가 발견 되었으나, 잉여 계산 영역이 1/2 이상인 점을 고려하여 실험 결과 개선을 위하여 더 좁은 영역을 해석함으로써 정확한 실험결과 도출을 목표로 추가실험을 진행하였다.

추가로 진행된 tomo-PIV 실험으로 측정된 벡터는 CFD에서와 마찬가지로 실린더 후방에서의 큰 차이를 보이지는 않았고, 와도는 case 1에서 전체 적으로 낮은 정도를 나타내었고, case 2의 경우 전반적인 와도는 낮은 분포를 보였으나, 실린더 근방에서는 case 1에 비해 큰 와류를 발생시키는 것을 확인하였다. case 3의 경우 후방 실린더의 후류 중앙부분 뿐만 아니라 측면 부분에서도 다른 case 들에 비해 전반적으로 높은 값을 나타났으며, 이는 첫 번째 위치한 실린더의 후류에 의한 영향이라 판단된다.



## 제 5 장 결론

CFD 결과를 통하여 연속된 실린더에서 후방 실린더 후류에 대한 데이터를 얻었으며, 이를 토대로 3차원 비접촉식 속도장 측정 기술인 Tomo-PIV 기법을 이용하여 두 개의 연속된 실린더 후류의 벡터와 와도를 계측하였고, 이들을 분석하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

CFD의 결과로는 후방 실린더에 2개의 점에서 전압력, 난류 운동 에너지를 획득하였으며, 해당 지점에서 압력 차이가 case 1이 가장 낮은 값을 나타내었고, case 2와 case 3은 각각 case 1의 1.6배, 2.1배가량의 압력 차이를 나타내었다. 이는 전방에 위치한 실린더의 후류의 영향으로 인하여 후방 실린더에 미치는 영향이 case별로 다르게 나타났다.

Tomo-PIV 실험은 두 번에 걸쳐 진행되었으며, 초기 진행하였던 실험에서는 느린 유속과 함께 직경 d의 10배인 약 80mm의 넒은 영역으로 실험을 진행하였다. 그 결과, case 1에서는 특징적인 와류구조가 발견되지 않았으며, case 2와 case 3에서는 80mm 중 후방 40mm 가량에서 특징적인 와류 구조가 나타나지 않아 추가적인 실험을 진행하게 되었다. 개선 방법으로는 레이저 시트의 두께를 8mm에서 20mm로 2.5d 만큼 확장시켰으며, 잉여 계산영역이 발생한 점으로 인해 계산 영역을 80mm에서 40mm로 5d만큼 축소하여 계산하였다. 계산 결과로는 case 1의 후방 실린더 후류의 와류 분포가 낮은 분포를 보였으며, case 2에서는 실린더 후방에서 직접적인 와류가, case 3에서는 후방의 측면부에서 비교적 큰 와류가 발생하였다. 일반적인 해양플랜트 구조물이 실린더와 같이 원형인 것을 고려하였을 때,



기둥 사이의 간격이 직경의 1배수인 경우가 기둥에 작용하는 응력이 적게 작용할 것으로 예상되며, 해양플랜트 구조물의 면적 활용 범위를 고려하여 1배수와 2배수 사이에서 후방 구조물의 부하가 적게 작용하는 적절한 거리를 적용하는 것이 중요할 것으로 보이고, 이를 실제 해양플랜트 설계 적용 시 해양플랜트 구조물의 내구성 증대에 도움이 될 것으로 사료된다. 본 논문에 사용된 방법은 2개의 기둥을 한 방향으로 흐르는 유동장 내에서 측정하였기 때문에 실제 해양에서의 유동과 동일하다고 보기 어렵다. 따라서 더 넓은 범위에서 다수의 실린더를 배치한 구조물의 유동해석과 함께 다양한 방향에서의 실험과 분석이 더해진다면 해양플랜트 구조물 설계적용에 큰 도움이 될 것으로 사료된다.





## 참고 문헌

- Wataru Yamazaki, Hidenori Yamada "PIV Data Analysis around a Flapping Wing via Proper Orthogonal Decomposition" Fluid Dynamics and Co-located Conference (2013)
- [2] Wataru Yamazaki, Rei Akimoto, Hidenori Yamada "PIV data reconstruction via proper orthogonal decomposition with a cross validation approach" Journal of Fluid Science and Technology (2014)
- [3] Philippe Druault, Philippe Guibert, Frank Alizon "Use of proper orthogonal decomposition for time interpolation from PIV", Experiments in Fluids (2005)
- [4] Gerrit E. Elsinga, "Tomographic particle image velocimetry and its application to turbulent boundary layers", Delft University of Technology
- [5] L.Eshbal et al. "Tomo-PIV measurements in the wake of a tethered sphere", Journal of Fluids and Structures (2019)
- [6] Gerrit E. Elsinga, Bernhard Wieneke, Fulvio Scarano, A.Schröder "Tomographic 3D-PIV and Applications", Particle Image Velocimetry (2008) p. 103-125
- [7] Julio Soria "Effect of velocity gradients on 3D cross-correlation PIV analysis",14th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics(2008)
- [8] Deog Hee Doh, Chang Jae Lee, Gyeong Rae Cho, Kyeong Rok Moon, "Performances of Volume-PTV and Tomo-PIV", Journal of Fluid Dynamics(2012)
- [9] Gerrit E. Elsinga, F.Scarano, B.Wieneke, B.W.van Oudheusden "Tomographic particle image velocimetry", Exp Fluids (2006)



- [10] G. E. Elsinga, J. Westerweel, "Tomographic-PIV measurement of the flow around a zigzag", Experiments in Fluids(2012)
- [11] Matthias Kühn, Klaus Ehrenfried, Johannes Bosbach, Claus Wagner "Large-scale tomographic PIV in forced and mixed convection using a parallel SMART version" Experiments in Fluids(2012)
- [12] Giancarlo Pavia, Max Varney, Martin Passmore, Mathew Almond "Three dimensional structure of the unsteady wake of an axisymmetric body", Physics of Fluid(2019)
- [13] Rainer Hain, Christian J. Kähler, Dirk Michaelis, "Tomographic and time resolved PIV measurements on a finite wake mounted on a flat plate" Experiment of Fluid(2008)
- [14] Hang-Yu Zhu, Cheng-Yue Wang, Hong-Ping Wang, Jin-Jun Wang "Tomographic PIV investigation on 3D wake structures for flow over a wall-mounted short cylinder" Journal of Fluid Mechanics(2017)
- [15] D.C. Wilcox "Turbulence modeling for CFD" DCW industries (2002)



## 감사의 글

2년이 넘는 기간동안 저를 지도해주신 도덕희 총장님께 감사인사 올리며, 이 논문을 쓰는 과정에 있어서 지속적으로 큰 도움을 주었던 대경이와 조경래 박사님, 전민규박사님께 감사를 드립니다. 또한 논문의 심사를 통해 저의 부족한 부분을 채워주신 김의간 교수님, 황광일 교수님, 이원주 교수님께도 감사를 드립니다.

실험실 생활을 하며 의욕을 돋워준 90년생, 91년생 형님들과 실험실 운영을 순조롭게 이어갈 수 있게 도와준 학부생들에게 감사 인사를 전하며, 그리고 현재 실험실에서 고생하고 있는 정응이형, 지환이형, 산이, 성민이, 홍엽이는 앞으로 남은 기간 동안 큰 일 없이 졸업하여 사회로 진출할 수 있길 바랍니다.

마지막으로 항상 저에게 전폭적인 지지와 사랑을 아끼지 않고 베풀어주시는 가족들에게 감사 인사를 마지막으로 감사의 글 마무리하겠습니다.

