



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

OpenFOAM 을 이용한 원통식 및
중력식 근해 기초 주변의 유동에 대한
CFD 시뮬레이션

CFD Simulations of Flow around Monopile and
Gravity-based Offshore Foundations by OpenFOAM



2018 년 2 월

한국해양대학교 대학원

해양공학과

WANG HAIQING

본 논문을 WANG HAIQING의 공학석사
학위논문으로 인준함.



위원장 서 영 교 (인)

위 원 박 선 호 (인)

위 원 하 승 현 (인)

2018년 1월 2일

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	v
List of Figures	vi
Abstract.....	ix
초록.....	xi



제 1 장 서론.....	1
1.1 연구배경	1
1.1.1 해상 풍력	1
1.1.2 해상 풍력 터빈 기초 주위의 흐름	1
1.2 해상풍력터빈 기초 구조물 형식.....	2
1.2.1 모노파일 기초 (원통식 기초, monopole foundation)	2
1.2.2 중력식 기초	3
제 2 장 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics).....	5

2.1 기본 유체동역학 이론	5
2.1.1 레이놀즈 수 (Reynolds number).....	5
2.1.2 경계층(Boundary layer).....	5
2.1.3 경계층 박리 및 보텍스 방출	8
2.1.4 무차원수	10
2.2 말굽 보텍스 시스템(Horseshoe vortex system).....	11
2.3 세굴(Scour)	13
2.4 Navier-Stokes 방정식	14
2.5 난류 모델링(Turbulence Modeling)	14
2.5.1 난류(Turbulence).....	14
2.5.2 직접 수치 시뮬레이션(Direct Numerical Simulation, DNS)	15
2.5.3 큰 에디 모사법(Large eddy simulation, LES).....	15
2.5.4 레이놀즈 평균 나비에스톡스(Reynolds-Averaged Navier Stokes, RANS).....	16
2.5.5 Detached Eddy Simulation (DES).....	17
2.6 Spalart-Allmaras Delayed Detached Eddy Simulation (SADDES).....	18
2.6.1 Spalart-Allmaras 난류 모델	18
2.6.2 DDES.....	19
2.7 난류 속도 프로파일 및 벽 방정식(wall functions)	20
2.8 OpenFOAM	22
2.8.1 격자(meshing) 및 전처리(pre-processing)	23
2.8.2 수치계산(solving).....	23
2.8.3 후처리	24

제 3 장 전산 모델(Computational Model)	25
3.1 기하학 구조(Geometry).....	25
3.1.1 Lillgrund 풍력 터빈.....	25
3.1.2 CFD 모델의 기하학 형태(geometry).....	27
3.2 계산조건(Numerical Conditions)	30
3.2.1 레이놀즈 수	30
3.2.2 경계층(boundary layer)	30
3.3 메쉬(mesh)	34
3.4 수치방법	34
제 4 장 해석결과.....	35
4.1 속도	35
4.1.1 downflow.....	35
4.1.2 backflow.....	36
4.2 압력	37
4.2.1 등치선(contours).....	37
4.2.2 등가면(isosurfaces)	40
4.3 와도(vorticity)	41
4.3.1 와류 구조(vortical structures).....	42
4.3.2 와도(vorticity)의 강도 및 x, y, z 성분	45
4.4 해저면 전단 응력(bed shear stress)	46



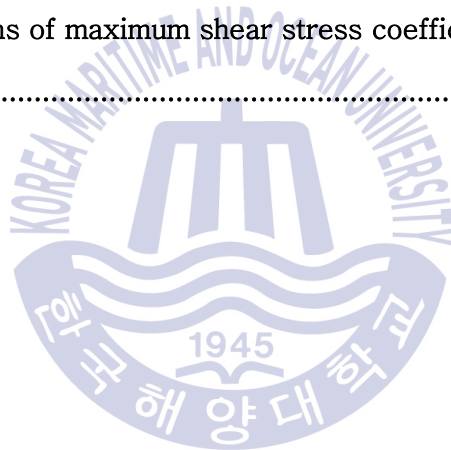
4.4.1 기초 표면 및 해저의 전단 응력	47
4.4.2 중앙 대칭선에서의 전단응력	49
제 5 장 결론	53
참고문헌	54



List of Tables

TABLE 4.1 Comparisons of maximum shear stress coefficients between different Reynolds numbers 50

TABLE 4.2 Comparisons of maximum shear stress coefficients between different foundations 52



List of Figures

FIGURE 1.1: Monopile foundation	3
FIGURE 1.2: Gravity based foundation.....	4
FIGURE 2.1: Flow regimes	7
FIGURE 2.2: boundary layer.....	8
FIGURE 2.3: Separation	8
FIGURE 2.4: Vortex shedding	9
FIGURE 2.5: Cross flow and drag forces	10
FIGURE 2.6: Horseshoe vortex system	12
FIGURE 2.7: Sketch of a scour hole around a vertical pile	13
FIGURE 2.8: Velocity measurements in a turbulent jet	15
FIGURE 2.9: Comparison of CFD methods.....	17
FIGURE 2.10: Sublayers in a turbulent boundary layer	22
FIGURE 3.1: Section of the Lillgrund wind farm foundation.....	26
FIGURE 3.2: Bottom slab of the Lillgrund wind farm foundation	26
FIGURE 3.3: Geometry of the hexagonal GBF	28
FIGURE 3.4: Geometry of the circular GBF.....	29
FIGURE 3.5: Geometry of the monopile foundation.....	29
FIGURE 3.6: 3D view of the foundation meshes.....	30
FIGURE 3.7: Computational domain. up: Monopile Foundation, down: GBFs.....	31

FIGURE 4.1: Vertical velocity w in the $y = 0$ plane.....	36
FIGURE 4.2: Horizontal velocity u in the $y = 0$ plane.....	37
FIGURE 4.3: Pressure coefficient contours in the xz plane at $y/D = 0$ for the hexagonal GBF.....	38
FIGURE 4.4: Pressure coefficient contours in the xz plane at $y/D = 0$ for the octagonal GBF.....	38
FIGURE 4.5: Pressure coefficient contours in the xz plane at $y/D = 0$ for the circular GBF.....	39
FIGURE 4.6: Pressure coefficient contours in the xz plane at $y/D = 0$ for the monopile foundation.....	39
FIGURE 4.7: Pressure coefficient isosurfaces for the hexagonal GBF....	40
FIGURE 4.8: Pressure coefficient isosurfaces for the octagonal GBF.....	40
FIGURE 4.9: Pressure coefficient isosurfaces for the circular GBF.....	41
FIGURE 4.10: Pressure coefficient isosurfaces for the monopile foundation.....	41
FIGURE 4.11: 3D view of instantaneous vortical structures around the monopile foundation.....	42
FIGURE 4.12: 2D view of instantaneous vortical structures around the monopile foundation.....	42
FIGURE 4.13: 3D view of instantaneous vortical structures around the hexagonal GBF.....	43
FIGURE 4.14: 2D view of instantaneous vortical structures around the hexagonal GBF.....	43
FIGURE 4.15: 2D view of instantaneous vortical structures around the octagonal GBF.....	44

FIGURE 4.16: 2D view of instantaneous vortical structures around the octagonal GBF.....	44
FIGURE 4.17: 3D view of instantaneous vortical structures around the circular GBF	45
FIGURE 4.18: 2D view of instantaneous vortical structures around the circular GBF	45
FIGURE 4.19: X-component of vorticity at $z/D = 0.025$	46
FIGURE 4.20: Y-component of vorticity at $z/D = 0.025$	46
FIGURE 4.21: Z-component of vorticity at $z/D = 0.025$	46
FIGURE 4.22: The shear stress magnitudes at the seabed around 4 foundations	47
FIGURE 4.23: The shear stress coefficients of 4 foundations	48
FIGURE 4.24: Comparisons of shear stress coefficients along $y/D = 0, z/D = 0$	49
FIGURE 4.25: Comparisons of shear stress coefficients at different Reynolds number.....	50
FIGURE 4.26: Shear stress coefficients along the symmetry line, Hexagonal & Octagonal GBF	51
FIGURE 4.27: Shear stress amplification along the symmetry line, circular GBF.....	52

CFD Simulations of the Flow around Monopile and Gravity-based Offshore Foundations by OpenFOAM

WANG HAIQING

Department of Ocean Engineering

Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

Computational fluid dynamics (CFD) has been used to study the boundary layer flow around 4 different bottom-fixed offshore wind turbine foundation designs. A large region of down flow exists in front of the foundation, which causes the backflow. Pressure distributions around the foundations were studied. A positive vertical pressure gradient ($dp/dz > 0$) was found in front of the monopile foundation. A larger volume of increased pressure exists in front of the monopile foundation than in front of the gravity-based foundations due to the geometry. The horseshoe vortex was found in front (upstream side) of the 4 kinds of foundations. One horseshoe vortice was found in front of the monopile foundation, two were found in front of the other gravity-based foundations. The bed shear stress in the flow direction

along the upstream symmetry line($y/D = 0, z/D = 0, -10 < x/D < 10$) on the seabed was investigated. As a conclusion, the hexagonal Gravity-Based-Foundation was found to have a better behavior than monopile and 2 other gravity-based foundations.

KEY WORDS: Computational fluid dynamics(CFD, 전산유체역학); Monopile(모노파일, 원통식 기초), Gravity-Based-Foundation(GBF, 중력식 기초); Downflow, backflow(하향류 w , 역류 u); Bed shear stress(해저 전단 응력); Horseshoe vortex(말굽 모양 와류, 말굽형 보텍스)



OpenFOAM 을 이용한 원통식 및 중력식 근해 기초 주변의 유동에 대한 CFD 시뮬레이션

WANG HAIQING

해양공학과

한국해양대학교 대학원



전산유체역학(CFD)은 4 가지 바다 고정식 근해 풍력발전기 주변의 유동에 대한 연구에 이용되었다. 기초 앞에서의 하향류, 역류 등 유동이 연구되었다. 하향류가 역류를 일으킬 것이 나타났다. 기초 주변의 압력 분포가 연구되었다. 기초 앞에 양(+)의 수직 압력 구배($dp/dz > 0$)가 존재하였다. 더 큰 부피를 갖는 원통식 기초는 다른 중력식 기초 보다 압력 구배가 더 큰 것으로 나타났다. 4 가지 기초 주변의 보텍스 구조, 특히 기초 주변의 해저 위에 생긴 말굽 모양의 보텍스는 구조를 계산을 통하여 연구하였다. 모노파일은 1 개, 다른 중력식 기초는 2 개의 말굽형 보텍스 구조가 주변에 생긴다. 해저면 대칭 선($y/D = 0, z/D = 0, -10 < x/D < 10$)을 따른 유동 방향의 전단 응력이 연구되었다. 6 각형 중력식 기초 주변의 유동상태가 원통식 기초와 다른 2 가지 중력식 기초보다

남은 결론이 밝힌다.

KEY WORDS: Computational fluid dynamics(CFD, 전산유체역학); Monopole(모노파일, 원통식 기초), Gravity-Based-Foundation(GBF, 중력식 기초); Downflow, backflow(하향류 w , 역류 u); Bed shear stress(해저 전단 응력); Horseshoe vortex(말굽 모양 와류, 말굽형 보텍스)



제 1 장 서론

1.1 연구배경

1.1.1 해상 풍력

풍력은 오늘날 세계에서 중요한 에너지원이며 2014 년 말까지 세계에서 370GW 의 용량이 설치되어 있다 (2015 년 글로벌 풍력 에너지 회의).

이것은 주로 육상이지만, 근년에 유럽을 중심으로 해상 풍력 발전에 상당한 노력을 기울여 왔다. 전 세계 용량의 2.2 % 인 8GW 는 현재 유럽의 해역에 설치되어 있으며 이 중 18 % 는 2014 년에만 설치되었다 (2015 년 풍력 에너지 협회). 풍력 에너지는 유럽의 전기 소비량의 10.2 % 를 차지하고 있으며 2014 년 10 월에 합의된 유럽의 2030 년 기후 및 에너지 정책 틀에서 중요한 역할을 할 것으로 보인다.

온실 가스 배출량은 1990 년 수준에 비하여 40 % 감소 될 것으로 예상되며 전력 소비의 최소 27 % 는 재생 가능 에너지원에서 나온 것이어야 하며 유럽의 2030 년까지 에너지 효율이 적어도 27 % 되어야 할 것이다 (유럽 집행위원회, 2015).

근해 바람은 두 가지 주된 이유, 즉 바다에서의 강한 바람과 대부분의 사람들이 해안 근처에 살고 있다는 사실에 대한 유망한 에너지 원이다. 그러나 석탄 발전에 비하여 해상 풍력 발전은 설치, 유지 보수 및 인프라 비용으로 인하여 지금까지 매우 비싸기 때문에 자금을 저렴하게 쓸 수 있는 방법을 찾아야 되며 보조금도 필요하는 시기다.

1.1.2 해상 풍력 터빈 기초 주위의 흐름

오늘날 대부분의 해상 풍력 터빈은 바닥 고정식 기초로 지지된다. 이러한 기초에 대한 문제는 세굴이다. 세굴란 흐름의 국부적인 침식이 current 또는 wave 로 인한 기초 밑 부분 주변의 흐름때문에 해저 지반에 국부적인 침식이 발생한다는 것이다. 세굴은 교량 파괴의 일반적인 원인이며 바람에 의하여 발생하는 커다란 전도 모멘트를 견딜 수 있는 터빈 구조의 안정성을 약화시킬 수 있다. 터빈의 총 프로젝트 비용의 최대 6 % ~ 10 % 는 세굴 방지에 사용할 수 있다 (DHI 그룹, 2012).

이것은 해저에 의한 준비와 기초 근처의 해저를 암석으로 덮음으로써 이루어진다. 또한 세굴 문제때문에 모니터링과 때로는 수리의 필요가 생긴다. 이러한 흐름에 대한 이해가 높아져야 풍력 터빈 기초의 설계를 개선하여 훼손 방지, 감시 및 수리의 필요성을 줄여 해상 풍력 터빈 관련 비용을 줄일 수 있다.

교량 말뚝 주변의 흐름은 하천 수리학 분야에서 광범위하게 연구되어 왔는데, 세굴이 교량 파괴의 일반적인 원인이기 때문이다. 해안과 해양 환경에서 wave 나 wave 가 흐름과의 결합은 철저히 조사되지 않았다 (Sumer and Fredsøe, 2002, 1 장).

1.2 해상풍력터빈 기초 구조물 형식

해상풍력터빈 하부기초구조물 형식은 중력식(Gravity based foundation) 형식, 모노파일(monopole foundation) 형식, 트라이포드(Tripod foundation) 형식과 자켓식(Jacket foundation) 형식 등 4 가지로 포함 되어 있다. 본 논문은 많이 쓰이고 있는 중력식 기초(Gravity based foundation)과 모노파일 기초(monopole foundation)에 대하여 연구한다.

1.2.1 모노파일 기초 (원통식 기초, monopole foundation)

모노파일 형식은 유럽과 같은 수심이 얇은 해상구간에서 주로 이용 되는데 이는 북해나 흑해처럼 가설 지역이 대부분 사질토 지역으로 이루어져 있기 때문에 경제적으로 매우 유리하다.

모노파일 기초는 설계, 제작 및 설치가 간단합니다. 그들은 재킷 플랫폼에 사용되는 해양 산업에서도 잘 알려져 있습니다. 강철 및 콘크리트로 만들어져 구조물에 안정성을 부여하기 위하여 해저에 몰려 들게 된다. 근해 바람을 위한 전형적인 모노파일 기초는 지름 3 - 6 미터이고, 길이의 반은 지상에 있다. 모노파일 기초는 수심이 30m 이상인 경우에 문제가 된다. 깊이가 증가하면 필요한 지름이 빠르게 증가하기 때문이다. 그림 1.1 는 전형적인 모노파일 기초 구조물을 보여준다.

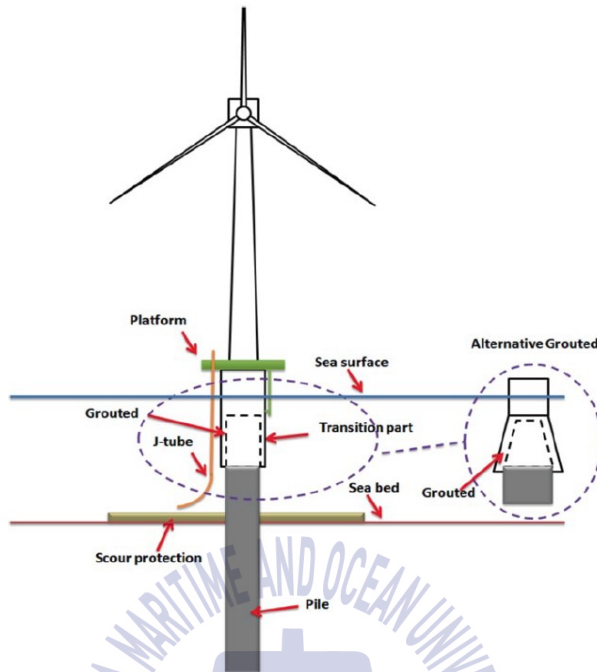


FIGURE 1.1: Monopile foundation (Karimirad, 2014)

1.2.2 중력식 기초

지반 조건에 따른 적응성이 가장 우수한 중력식 기초 구조물을 분석해보면 기초 하단이 해저 면에 거치되므로 기초의 활동, 침하, 연직도 관리가 필요하다. 환경적인 측면에서는 훌륭하여 민원상의 우려는 다소 적으며, 미관상의 불쾌함을 덜 주고있다.

중력식 기초 는 하단 슬래브(bottom slab)라고하는 바닥 부분으로 구성되어 있으며 그 위에 수직 원통형 축(cylinder)이 있다. 수면 근처의 지역에서 어떤 형태의 얼음 보호가 때때로 사용된다. 구조와 밸러스트(ballast)의 결합된 무게는 필요한 안정성을 제공하며 드릴링(drilling) 또는 해머링(hammering)이 필요하지 않으므로 모노파일 구조물 설치에 비하여 설치가 용이하다. 해상 풍력 터빈에 대한 중력식 구조물의 기초는 밸러스트 처리와 구조의 무게가 심층에서 문제가 되며 모노파일 기초와 같은 수심에 대한 한계를 갖는다. 그림 1.2 은 중력식 기초 구조물의 간단한 그림을 보여준다.

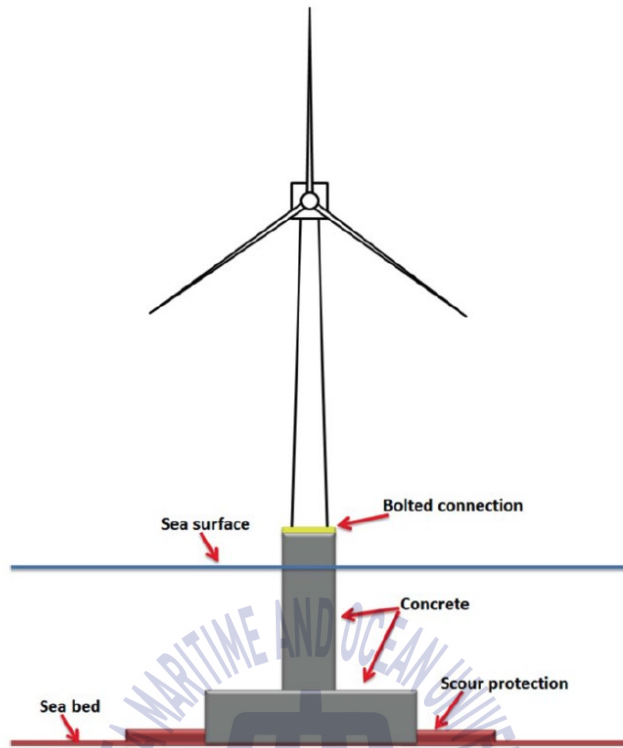
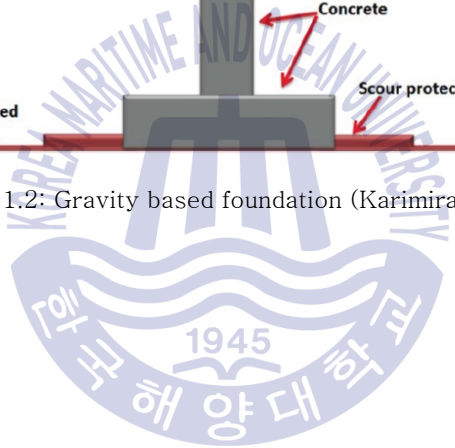


FIGURE 1.2: Gravity based foundation (Karimirad, 2014)



제 2 장 전산유체역학 (Computational Fluid Dynamics)

2.1 기본 유체동역학 이론

2.1.1 레이놀즈 수 (Reynolds number)

레이놀즈 수는 관성력(inertial force)에 대한 점성력(viscous force)의 비율로 나타나는 무차원 파라미터다. 다음과 같이 정의된다.

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad (2.1)$$

여기서 U 는 지정된 속도, D 는 형 특성 길이, ν 는 유체의 동점도(kinematic viscosity)를 나타낸다. 레이놀즈 수는 흐름이 층류인지 난류인지를 결정하는 데 유용하다. 어떤 레이놀즈 수에서 유동이 난류가 될지는 경우에 따라 다르다. 그림 2.1 은 레이놀즈 수가 증가함에 따라 정상류에서 매끄러운 원형 실린더 둘레의 흐름이 어떻게 변하는지를 보여준다.

흐름은 $Re = 200$ 까지 완전히 층류다. $Re > 4 \times 10^6$ 에서 양 측면의 후류 및 경계층은 완전히 난류다. 이 두 극단 사이에는 다양한 중간 단계가 존재한다. 난류 현상은 2.6 절에서 더 자세히 논의 될 것이다. 또한 $Re > 5$ 에서 실린더의 양측에서 유동이 분리되고 $Re > 40$ 에서 보텍스(vortex)가 존재함을 알 수 있습니다. 경계층 분리 및 와류 배출은 2.1.2 및 2.1.3 절에서 논의된다.

2.1.2 경계층(Boundary layer)

경계층은 표면의 존재로 인하여 유체 속도가 느려지는 고체 표면에 가까운 흐름의 한 영역이다. 이는 점도 때문이며 유체 및 고체 표면이 교차하는 경우 표면에 대한 유체 속도가 0 이된다. 후자의 상태는 노 슬립 상태(no-slip condition)로 알려져 있다. 그림 2.2 는 경계층의 일반적인 모양을 보여준다. $u(y)$ 는 벽면과 평행한 속도이고 벽면으로부터의 거리인 y 에 따라 변한다. δ 는 경계층의 크기이다. 원통형 실린더의 층류 경계층의 경우, 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다:

$$\frac{\delta}{D} = O\left(\frac{1}{\sqrt{Re}}\right) \quad (2.2)$$

이 식은 난류 또는 다른 기하학 물체에 적용되지 않지만 일반적으로 레이놀즈 수가 증가함에 따라 δ 가 감소한다는 것은 사실이다.




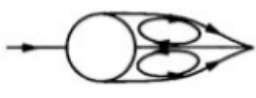



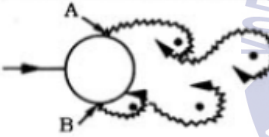
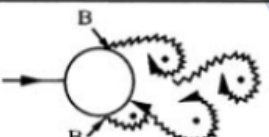
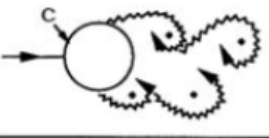
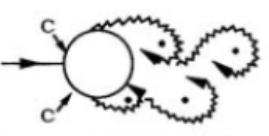
	No separation. Creeping flow	$Re < 5$
	A fixed pair of symmetric vortices	$5 < Re < 40$
	Laminar vortex street	$40 < Re < 200$
	Transition to turbulence in the wake	$200 < Re < 300$
	Wake completely turbulent. A: Laminar boundary layer separation	$300 < Re < 3 \times 10^5$ Subcritical
	A: Laminar boundary layer separation B: Turbulent boundary layer separation; but boundary layer laminar	$3 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^5$ Critical (Lower transition)
	B: Turbulent boundary layer separation; the boundary layer partly laminar partly turbulent	$3.5 \times 10^5 < Re < 1.5 \times 10^6$ Supercritical
	C: Boundary layer com- pletely turbulent at one side	$1.5 \times 10^6 < Re < 4 \times 10^6$ Upper transition
	C: Boundary layer comple- tely turbulent at two sides	$4 \times 10^6 < Re$ Transcritical

FIGURE 2.1: Flow regimes (Sumer and Fredsøe, 1997, Chapter 1)

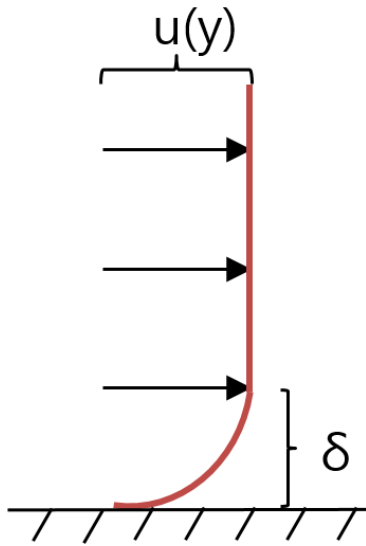


FIGURE 2.2: boundary layer (Sketch by author)

2.1.3 경계층 박리 및 보텍스 방출

흐름의 교차 방향에서 두께가 0 이 아닌 물체가 흐름에 배치되면 흐름의 수축이 발생한다. 그림 2.3 에서 볼 수 있듯이 원통형 실린더의 경우 속도는 원통의 상단과 하단에서 증가한다. (표면에 매우 근접한 경우 제외). 이로 인하여 압력이 떨어지고 실린더 뒷면에서 회복된다. 이로 인하여 압력이 떨어지고 실린더 뒷면에서 회복된다. 표면의 미끄럼 상태 때문에 압력이 증가하면 역류(back-flow)가 발생하고 경계층이 표면에서 박리된다. 역류가 처음 발생하는 표면 위치를 박리 점이라고 한다. 박리때문에 실린더의 양측에 보텍스가 형성된다. $Re > 40$ 의 경우 매끄러운 원형 실린더의 경우 보텍스가 불안정해지고 보텍스 방출(vortex shedding) 현상이 발생한다.

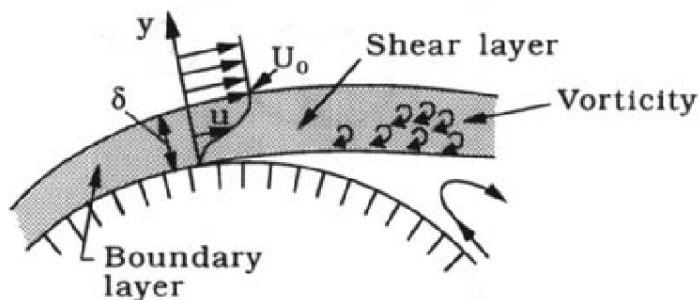


FIGURE 2.3: Separation (Sumer and Fredsøe, 1997, Chapter 1)

그림 2.4 는 이 과정을 보여준다. 순간 (a)에, 보텍스 (A)는 보텍스 (B)에 의하여 차단되고, 이는 보텍스 (B)에 의하여 하류(downstream)로 이동하는 자유 보텍스가되어 실린더 주위에 시계 방향으로 순환을 일으킨다. 이것은 순간 (b)에서 보텍스 B 를 차단하고 반 시계 방향으로 순환을 생성하는 보텍스 (C)를 생성한다. 프로세스는 교대로 계속된다.

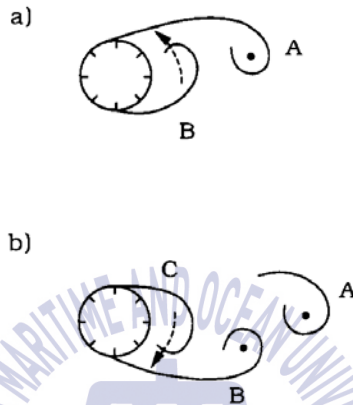


FIGURE 2.4: Vortex shedding (Sumer and Fredsøe, 1997, Chapter 1)

보텍스 방출(vortex shedding)은 그림 2.5 에서 볼 수 있듯이 교대 순환 때문에 기하학에 일정하지 않은 힘을 유발한다. 교차 흐름 힘은 0 에 대하여 조화롭게 변화 할 것이지만, 흐름 방향의 힘은 주파수의 두 배와 0 이 아닌 평균 값으로 조화롭게 변할 것이다.

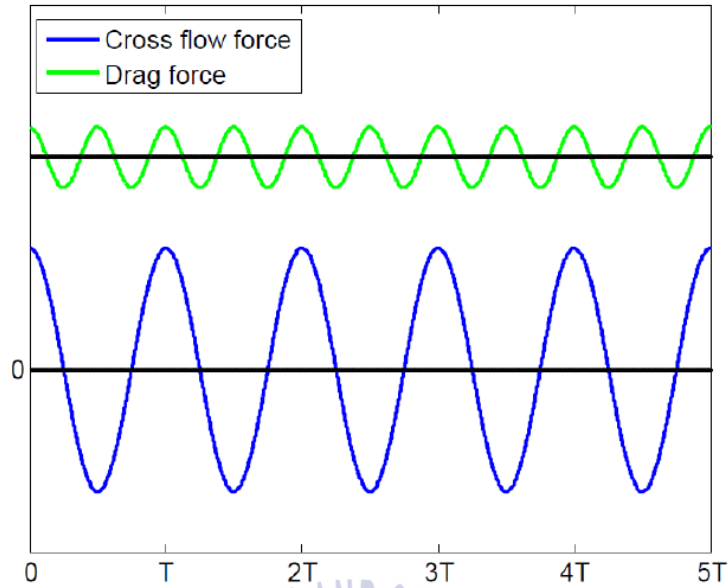


FIGURE 2.5: Cross flow and drag forces (Sketch by author)

2.1.4 무차원수

유체 내의 물체에 대한 힘은 다음과 같이 무차원화하여 나타낸다.

$$C_x = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A_{proj}} \quad (2.3)$$

$$C_y = \frac{F_y}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A_{proj}} \quad (2.4)$$

F_x 는 x 방향의 물체에 대한 순 힘, F_y 는 y 방향의 물체에 대한 순 힘, ρ 는 유체의 밀도, U_∞ 는 자유 흐름 속도, A_{proj} 는 기초의 투영 면적이다. 양력(drag) 또는 인라인(in line) 및 크로스 플로우(cross flow)라는 용어는 이 논문의 x 및 y 방향의 힘에 각각 사용됩니다. 힘 계수는 종종 평균값 또는 평균 제곱근 값으로 표현된다. 힘 계수 C 의 평균 및 제곱 평균 제곱근은 다음과 같이 정의된다:

$$\bar{C} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N C_n \quad C_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N C_n^2} \quad (2.5)$$

여기서 C_n 은 샘플링 포인트 번호 n 이고 N 은 샘플링 포인트의 총 수이다. 해저에 작용하는 전단 응력은 전단 응력 τ 와 해저의 한 지점에서의 전단 응력의 비로 표현되며, 여기서 유동은 물체의 존재에 의하여 방해 받지 않는다. 이는 현재 연구에서 전단 응력 증폭 계수 또는 α 라고 불린다:

$$\alpha = \frac{\tau}{\tau_{\infty}} \quad (2.6)$$

베드 전단 응력은 다음과 같이 무차원화하여 나타낸다:

$$C_{\tau} = \frac{\tau}{\frac{1}{2}\rho U_{\infty}^2} \quad (2.7)$$

압력 계수는 다음과 같이 정의된다:

$$C_p = \frac{p - p_{\infty}}{\frac{1}{2}\rho U_{\infty}^2} \quad (2.8)$$

여기서 p_{∞} 은 유동이 물체의 영향에 의하여 방해 받지 않는 기준점의 압력이다.

2.2 말굽 보텍스 시스템(Horseshoe vortex system)

그림 2.6 은 모노파일 주위의 일정한 경계층 유동의 말굽 보텍스 시스템을 보여준다. 해저에 정상 current 로 수직 원형 말뚝 존재하면 유동장이 변경된다. 가장 중요한 새 기능은 다음과 같다:

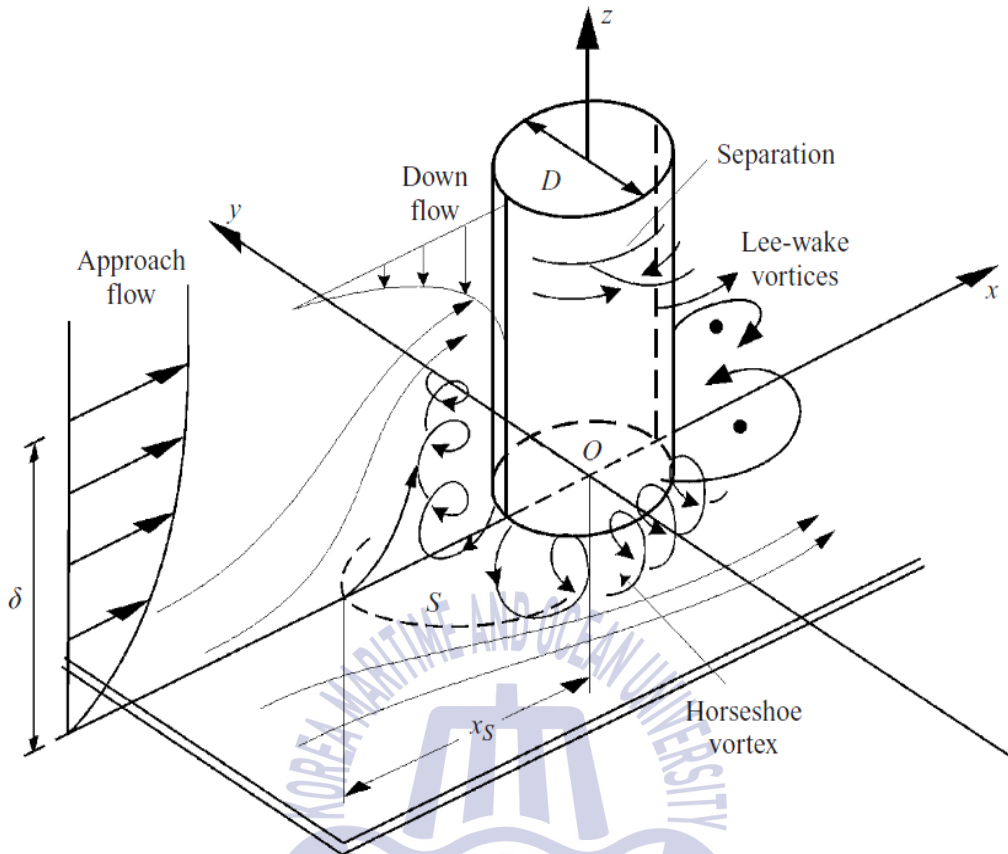


FIGURE 2.6: Horseshoe vortex system (Roulund et al., 2005)

- 1) 말뚝 앞쪽에 있는 말굽 볼텍;
- 2) 말뚝의 뒤쪽에 있는 보텍스;
- 3) 흐름의 수축;
- 4) 말뚝 앞에서의 하향 류 (Sumer and Fredsøe, 2002).

말뚝/파일의 존재로 인하여 발생하는 압력 경도(pressure gradient)는 말뚝/파일 앞쪽의 해저에서 경계층을 분리하게 한다. 분리 된 경계층이 말아서 말 말굽 모양의 보텍스를 형성다. 흐름 상황에 따라 뒤쪽에 보텍스 탈락이 생길 수 있다. 하향 류는 속도 프로파일의 형태로 인하여 말뚝/파일 앞쪽의 수직 압력 변화(vertical variation in pressure)에 의하여 발생한다. 흐름이 가장 감속되는 곳에서는 압력 상승이 더 높아진다.

2.3 세굴(Scour)

2.2 절에서 기술된 유동의 변화는 평균 베드 전단 응력(average bed shear stress)의 증가와 난류 정도의 증가로 인하여 구조물에 가까운 구역의 유사 수송 능력(sediment transport capacity)을 증가시킬 것이다(Sumer and Fredsøe, 2002, Chapter 1). 유사 수송은 대체로 해저면 하중(bed load, 베드와 접촉), 부유 하중(suspended load, 베를 건드리지 않음) 및 용해 하중(dissolved load)의 세 가지 주요 그룹으로 나눌 수 있다. 해저면에 작용하는 하중에 의한 유사 수송 속도는 다음 식을 통하여 베드 전단 응력과 관련이 있다:

$$q_b \sim \tau^{3/2} \quad (2.9)$$

여기서 τ 는 유사 이동이 발생하기 위한 임계 값보다 커야 한다. 세굴 과정은 베드가 침식되어 $\alpha = 0$ (1)가 될 때까지 계속되며, 여기서 α 는 식 2.6 에 의하여 주어진다.

이 때의 세굴 깊이(scour depth)를 평형 세굴 깊이(equilibrium scour depth)라고 한다. 그림 2.7 은 원형의 수직 파일(monopile) 주변의 일반적인 세 구멍을 보여준다.

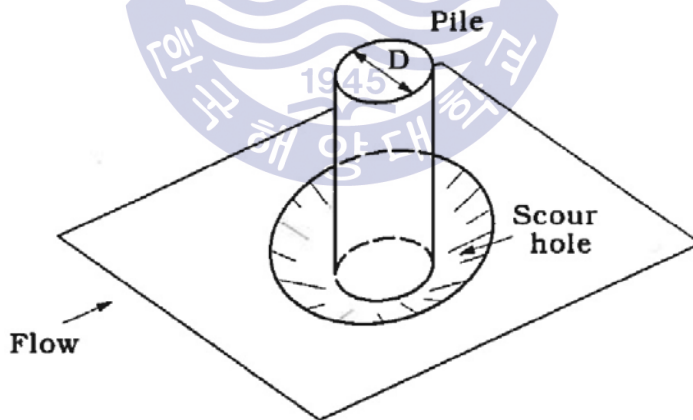


FIGURE 2.7: Sketch of a scour hole around a vertical pile (Sumer and Fredsøe, 2002, Chapter 3)

세굴 과정 자체는 현재 연구에서 연구되지 않았으며, 그 초점은 세굴이 일어나기 전에 평평한 해저에 있는 파운데이션 주위의 흐름이다. 그러나 세굴 과정에 중요한 흐름의 특성을 연구할 것이다.

2.4 Navier-Stokes 방정식

Navier-Stokes 방정식은 연속체 가정에서 Newtonian 유체에 대한 완전한 수학적 설명을 제공한다. 운동량 방정식(The momentum equation)과 연속 방정식(the continuity equation)으로 구성된다. 운동량 방정식은 질량에 적용되는 힘이 운동량을 변화시킨다는 뉴턴의 제 2 법칙으로부터 유도된다. 각 차원에 대하여 하나의 방정식이 있는 벡터 방정식이다. 중력이 없는 비 압축성 운동량 방정식은 다음과 같다:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \quad (2.10)$$

연속 방정식은 질량 보존을 나타내는 스칼라(scalar) 방정식이다. 비 압축성 연속 방정식은 다음과 같다:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2.11)$$

여기서 (x, y, z) 는 (x_1, x_2, x_3) 이며 (u, v, w) 는 (u_1, u_2, u_3) 을 뜻한다. 인덱스 i 는 차원 $(x = 1, y = 2, z = 3)$ 이며, 항은 $j = 1, 2, 3$ 에 대하여 합계된다.

2.5 난류 모델링(Turbulence Modeling)

2.5.1 난류(Turbulence)

난류는 폭포, 굴뚝의 연기 또는 배 뒤에 일어나는 것과 같은 많은 일상 현상에서 관찰된다. 그들은 불규칙성(Irregularity), 파동(Fluctuations) 및 와(Eddies)가 특징이다. 난류는 근본적으로 입체적인 현상이다. 이 절에서는 난류의 중요한 특성과 모델링에 대하여 설명한다.

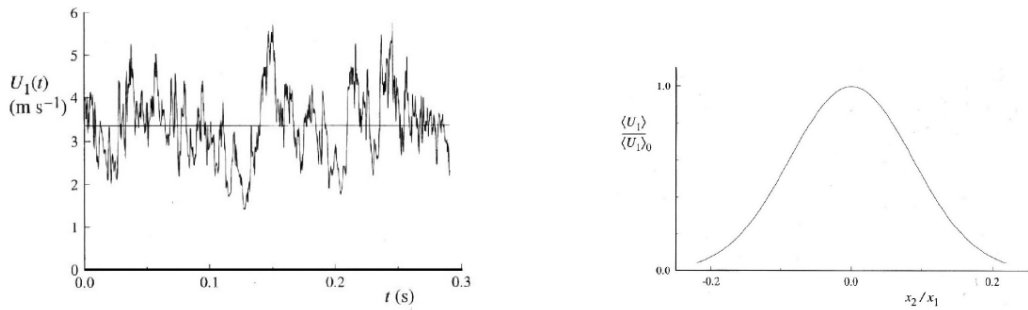


FIGURE 2.8: Velocity measurements in a turbulent jet (Pope, 2000, Chapter 1)

그림 2.8 은 $Re = 95500$ 에서의 난류 제트의 속도 측정 값을 보여준다. 왼쪽 그래프는 시간에 대하여 플롯 된(plotted) 제트의 중심선에서의 축 속도를 보여 주며 오른쪽 그래프는 시간 평균 축 속도를 중심선으로부터 반경 방향의 거리에 대한 함수로 나타낸 것이다. 축 속도는 불규칙적으로 변동하지만, 대부분의 값은 평균값에 가깝고 아무 것도 그 값과 크게 다르지 않다. 또한 시간 평균 속도 프로파일은 부드럽고 층류 제트(laminar jet)와 유사하다는 것을 알 수 있다.

에디(Eddies)는 난류의 또 다른 특징이다. 정확한 정의를 벗어나지만 크기 1 의 지역에 국한된 난기류로 인식된다. 이것은 적어도 적당히 일관성이 있다. 큰 에디가 차지하는 지역은 더 작은 에디를 포함 할 수 있다.

2.5.2 직접 수치 시뮬레이션(Direct Numerical Simulation, DNS)

직접 수치 시뮬레이션은 임의의 난류 모델링없이 Navier-Stokes 방정식을 직접적으로 풀어냄으로써 모든 공간과 시간 규모에서 에디를 해결한다. 그것은 높은 정확성의 장점을 가지고 있지만 레이놀즈 수와 함께 급격히 증가하는 높은 계산 비용의 단점이 있다. 현재 산업 응용 프로그램은 DNS 를 통하여 실행하기가 힘든 일이다.

2.5.3 큰 에디 모사법(Large eddy simulation, LES)

큰 에디 모사법은 셀(cell) 크기보다 작은 에디에게 난류 모델링을 사용한다는

점에서 DNS 와 다르다. 이를 서브 그리드 스케일 모델링(subgrid-scale modelling)이라고 한다. LES 는 DNS 보다 계산 상 저렴하며 많은 산업 응용 분야에서 충분히 정확하다.

2.5.4 레이놀즈 평균 나비에스톡스(Reynolds-Averaged Navier Stokes, RANS)

RANS 로 줄여 쓰게 된 Reynolds-Averaged Navier Stokes 는 여러가지 CFD 방법 중 가장 정확도가 낮은 방법이다. 전산 영역의 모든 것은 각 시간 단계에 걸쳐 시간 평균된다. 난류의 속도는 다음과 같이 쓸 수 있다:

$$U_i = u_i + u_i' \quad (2.12)$$

여기서 U_i 는 전체 속도이고, u_i 는 시간 단계(time step)에 걸친 평균 속도이고, u_i' 는 파동 속도 성분이다. 모두 방향 i 이다. RANS 에서 시간 단계에 걸친 파동 요소의 시간 평균 값은 0 이라고 가정한다. 즉 $\overline{u_i'} = 0$. Navier-Stokes 방정식에 식 2.12 을 삽입하면 운동량 및 연속 방정식이 다음과 같이 된다:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_j} \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2.14)$$

운동량 방정식의 오른쪽에 있는 새로운 항은 시간 평균 구간에서 파동 속도의 곱의 시간 평균 인 레이놀즈 응력 성분 $\overline{u_i' u_j'}$ 로 표현된다. RANS 모델은 Boussinesq 가정 또는 에디 가정을 사용하는데, 난류 에디로 인한 운동량 전달은 점도의 증가, 즉 에디 점도로 모델링 할 수 있다. 그것은 다음과 같이 표현된다:

$$-\overline{u_i' u_j'} = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (2.15)$$

여기서 δ_{ij} 는 Kronecker delta, k 는 난류 운동 에너지(turbulent kinetic energy), ν_t 는 난류 점도이다. Kronecker delta 는 다음과 같이 정의된다:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{if } i \neq j \\ 1 & \text{if } i = j \end{cases}$$

클로저(closure)는 0, 1 또는 2 방정식 모델로 얻을 수 있다. k-ε 및 kω와 같은 잘 알려진 RANS 모델은 2 방정식 모델이다. Spalart-Allmaras 모델은 1 방정식 모델의 예이다.

2.5.5 Detached Eddy Simulation (DES)

DES (및 DDES, IDDES 등과 같은 유사한 방법)는 벽 근처에서 RANS 를 사용하고 다른 곳에서는 LES 를 사용한다. DES 는 LES 보다 낮은 계산 비용을 가지며, RANS 가 제대로 작동하지 않는 대규모 분리 등 계산을 잘 처리한다. DES 및 DDES 는 2.6.2 절에 설명되어 있다. 그림 2.9 는 정확도 측면에서 DNS, LES 및 RANS 간의 차이를 보여준다.

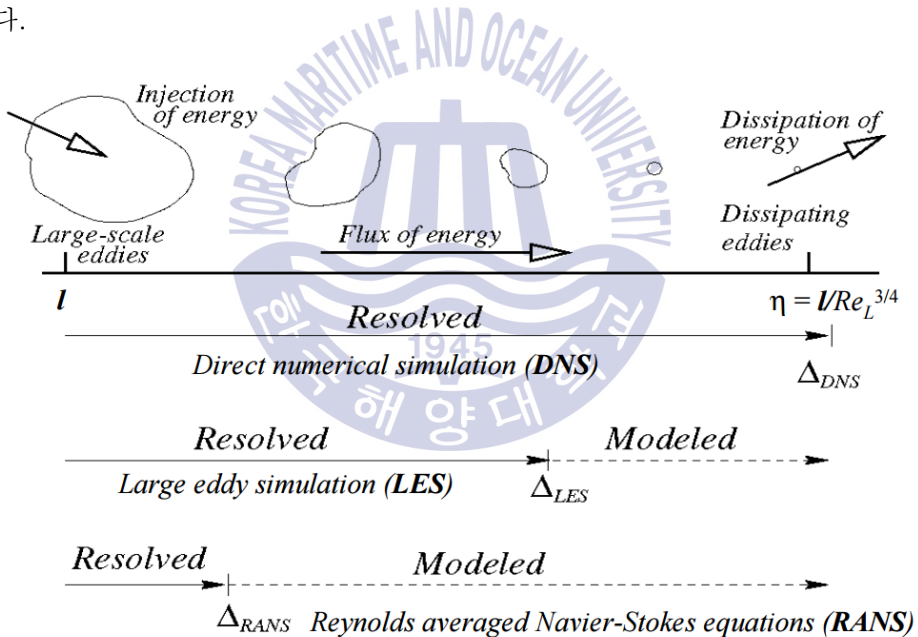


FIGURE 2.9: Comparison of CFD methods (Bakker, A, 2006)

2.6 Spalart-Allmaras Delayed Detached Eddy Simulation (SADDES)

본 연구에서는 Spalart-Allmaras Delayed Detached Eddy Simulation (SADDES)을 사용하는데, 모든 Spalart-Allmaras 난류 모델은 RANS 지역에서 RANS 모델로 사용되며 LES 지역에서 subgrid scale 모델로 사용된다.

2.6.1 Spalart-Allmaras 난류 모델

Spalart-Allmaras 난류 모델은 1992 년에 P. R. Spalart 와 S. R. Allmaras 에 의하여 개발되었다 (Spalart and Allmaras, 1992). RANS 방정식의 레이놀즈 응력($\overline{u_i' u_j'}$)을 1 방정식 모델로 모델링하여 k-ε과 같은 2 방정식 모델보다 계산 비용이 저렴하다.

원래 모델은 다음과 같다. OpenFOAM 에서 구현된 버전은 약간 다르며 그 이후에 설명 될 것이다.

Boussinesq 가정에서 $\frac{2}{3}k\delta_{ij}$ 항을 무시함으로써 1 방정식 접근법을 사용하기가 가능하다. 이는 얇은 전단 흐름, 즉 높은 레이놀즈 수일 경우에서 주요 효과가 아니기 때문이다. 레이놀즈 응력 성분은 다음과 같이 주어진다:

$$\overline{-u_i' u_j'} = \nu t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.16)$$

이 모델은 다음에 의하여 정의되는 작업 변수 $\tilde{\nu}$ 에 대한 전송 방정식(transport equation)을 사용한다.

$$v_t = \tilde{\nu} f_{v1} \quad f_{v1} = \frac{X^3}{X^3 + C_{v1}^3} \quad X = \frac{\tilde{\nu}}{\nu} \quad (2.17)$$

여기서 ν 는 점성을 의미한다. 전송 방정식은 다음과 같다:

$$\frac{D\tilde{\nu}}{Dt} = c_{b1}(1 - f_{t2})\tilde{S}\tilde{\nu} + \frac{1}{\sigma}[\nabla \cdot ((\nu + \tilde{\nu})\nabla \tilde{\nu})] - \left[c_{w1}f_w - \frac{c_{b1}}{k^2}f_{t2} \right] \left(\frac{\tilde{\nu}}{d} \right)^2 + f_{t1}\Delta U^2 \quad (2.18)$$

방정식 2.18 의 왼쪽은 $\tilde{\nu}$ 의 라그랑지(Lagrangian) 또는 물질 파생물(Material derivative)이다. \tilde{S} 는 다음과 같이 주어진다:

$$\tilde{S} = S + \frac{\tilde{v}}{k^2 d^2} \quad f_{v2} f_{v2} = 1 - \frac{X}{1 + X f_{v1}}$$

여기서 S는 와도(vorticity)의 크기이고, d는 가장 가까운 벽까지의 거리이다. 함수 f_{v2} 는 다음과 같이 정의된다:

$$f_w = g \left[\frac{1 + c_{w3}^6}{g^3 + c_{w3}^6} \right]^{1/6} \quad g = r + c_{w2} (r^6 - r) \quad r = \frac{\tilde{v}}{\tilde{S} k^2 d^2}$$

여기서 w는 벽(wall)을 나타낸다. f_{t1} 및 f_{t2} 는 트립 방정식(trip function)이라고 하며, 다음과 같이 정의된다:

$$f_{t1} = c_{t1} g_t \exp \left(-c_{t2} \frac{w_t^2}{\Delta U^2} [d^2 + g_t^2 d^2] \right) \quad f_{t2} = c_{t3} \exp(-c_{t4} X^2)$$

OpenFOAM에서 구현된 Spalart-Allmaras 버전을 f_{v3} 구현이라고 한다. 이것은 완전히 난류에 대한 것이므로 트립 항 f_{t1} 과 f_{t2} 는 무시된다. \tilde{S} 및 f_{v2} 가 다음과 같이 수정되었다.

$$\tilde{S} = f_{v3} S + \frac{\tilde{v} f_{v2}}{k^2 d^2} \quad f_{v2} = \frac{1}{\left(1 + \frac{X}{c_{v2}}\right)^3} \quad f_{v3} = \frac{(1 + X f_{v1})(1 - f_{v2})}{X} \quad c_{v2} = 5$$

f_{v3} 구현은 (Gainer et al., 2001)에 설명되어 있다.

2.6.2 DDES

DDES(추가 D는 Delayed 이다)는 DES의 개선된 버전이다(Spalart et al., 2006). 두 모델 모두 LES와 RANS 간의 전환 기준으로 길이 스케일 \tilde{d} 를 사용한다. DES에서

\tilde{d} 는 다음과 같이 정의됩니다:

$$\tilde{d}_{DES} = \min(d, C_{DES}\Delta) \quad (2.19)$$

여기서 C_{DES} 는 차수 1 의 상수이고 $\Delta = \max(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 이다. $\tilde{d} = d$ 면 RAN 를 사용하고 $\tilde{d} = C_{DES}\Delta$ 인 경우 솔버(solver)는 Spalart-Allmaras 난류 모델을 서브그리드 스케일 모델(subgrid-scale model)로 사용하여 LES 모드로 전환한다. 동일한 기준이 DDES 에도 적용되지만 RANS 에서 LES 로의 전환을 지연 시켜 \tilde{d} 가 수정된다. 이는 LES 에서 제대로 모델링 할 수 없는 콘텐츠에 LES 를 사용하지 않기 위해서이다. 새로운 \tilde{d} 는 다음과 같이 정의된다:

$$\tilde{d}_{DDES} = d - f_d \max(0, d, -C_{DES}\Delta) \quad (2.20)$$

여기서, $f_d = 1 - \tanh([8r_d]^{-3})$ 이고 $r_d = (v_t + \nu) / (\tilde{S}\kappa^2 d^2)$ 이다. ν 의 역할은 r_d 가 벽 근처에서 거의 제로가 되는 것을 방지하는 것이다. 아래 첨자 d 는 지연(delayed)을 의미한다. DES 와 DDES 공식의 중요한 차이점은 DES 는 계산 메쉬(mesh)에만 의존하는 반면 DDES 는 솔루션 자체에도 의존한다는 것이다. DDES 는 실험 데이터와의 비교에서 DES 보다 우수한 성능을 보였다(Spalart et al., 2006).

2.7 난류 속도 프로파일 및 벽 방정식(wall functions)

평평한 판 위에 난류의 경계층을 연구하면 4 개의 구역이 있다는 것을 알 수 있다. 가장 안쪽은 점성 내부층(viscous sublayer)으로 알려진 작은 내부층이며 점성 효과가 지배적이며 속도 프로파일은 사실상 선형이다. 다음 내부층은 버퍼층(buffer layer)이라고 하며, 난류 효과가 뚜렷하지만 점성 효과가 지배적이다. 3 번째는 중첩 내부층(overlap sublayer)이나 로그층(logarithmic layer)이다. 여기서 난류 효과는

더욱 현저하지만 지배적이지는 않다. 점성 내부층의 속도 프로파일은 로그 형태를 갖는다. 마지막 내부층은 난류 효과가 지배적인 외부 또는 난류 내부층(outer or turbulent sublayer)이다 (Cengel and Cimbala, 2010).

벽에 평행 한 속도와 경계층에서 벽으로부터의 수직 거리는 u^+ 와 y^+ 는 일반적으로 무차원적으로 다음과 같이 표현된다:

$$u^+ = \frac{U}{u_\tau} \quad (2.21)$$

$$y^+ = \frac{u_\tau y}{\nu} \quad (2.22)$$

여기서 $u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$ 는 마찰 속도(friction velocity), y 는 벽으로부터의 법 방향 거리(normal distance), ν 는 동점성계수(kinematic viscosity)이다. τ_w 는 벽 전단 응력(wall shear stress)이고 ρ 는 유체 밀도이다. 점성 내부층의 선형 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$u^+ = y^+ \quad (2.23)$$

이것은 벽의 법칙으로 알려져 있으며, $y^+ < 5$ 에 유효하다. 점성 내부층의 대수 모양은 다음과 같이 쓸 수 있다:

$$u^+ = \frac{1}{k} \ln(Ey^+) \quad (2.24)$$

$\kappa = 0.41$ 및 $E = 9.8$ (OpenFOAM Ltd, 2015). 이것은 대수 법칙 또는 로그

법칙으로 알려져 있으며 $30 < y^+$ 에서 $y^+ = 1000$ 부근까지 유효하다. 대수 법칙은 난류 내부층에서 정확하다. 이들 법칙 중 어느 것도 버퍼층에 맞지 않는다. 즉, $5 < y^+ < 30$ 이다. 그림 2.10 은 y^+ 의 함수로서 u^+ 의 플롯과 각 내부층의 위치를 전시한다.

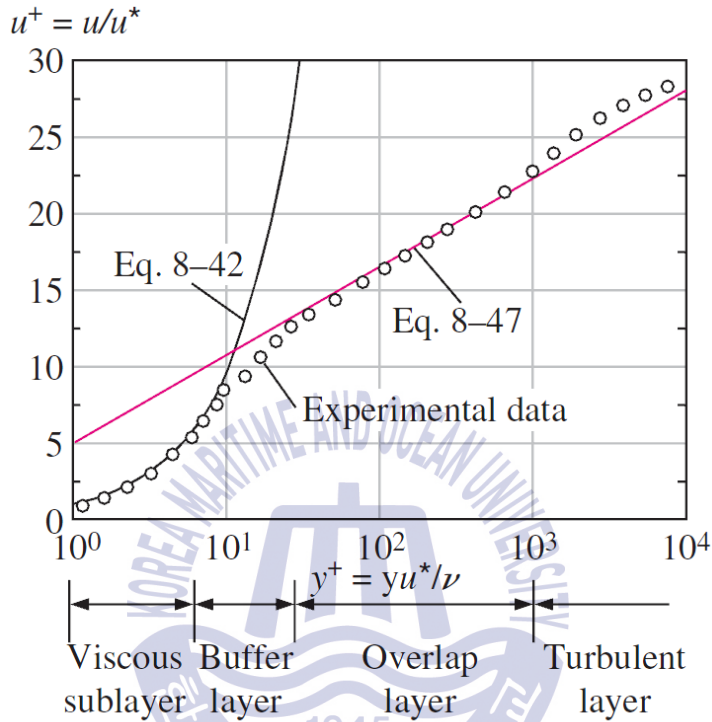


FIGURE 2.10: Sublayers in a turbulent boundary layer (Cengel and Cimbala, 2010, Chapter 8)

벽의 법칙(law of the wall)과 대수 법칙(logarithmic law)은 압력 구배(pressure gradient)가 없는 평판의 가정을 기반으로 하지만, 부착 된 경계층의 대부분의 경우에는 합리적인 근사치가 나온다. 이것은 벽 방정식을 통하여 많은 난류 모델에서 이용된다. 사용자는 벽에서부터 메쉬의 첫 번째 노드까지의 노멀 거리(normal distance)인 y^+ 가 30 보다 조금 이상에 해당하는 값으로 정상 거리를 설정할 수 있으며 첫 번째 셀의 해는 이러한 관계를 사용한 코드에 의하여 설정된다. 벽 방정식이 없다면, 경계층은 계산적으로 요구되는 $y^+ = 30$ 이하에서 조밀하게 메쉬하여야 할 것이다.

2.8 OpenFOAM

OpenFOAM 은 Open Field Operation And Manipulation 의 약자로, 연속체 역학의 문제를 해결하도록 설계된 무료 오픈 소스 소프트웨어 패키지이다. 이것은 CFD 를 포함할 뿐만 아니라, 전자기학 및 고체역학 등 여러 분야의 문제를 해결할 수 있다. OpenFOAM 은 Linux 환경에서 실행되며 C++로 작성되고 사용자가 편집할 수 있는 텍스트 파일로 정렬된다. 비영리 조직 OpenFOAM Foundation 은 OpenFOAM 의 개발을 관리한다. OpenFOAM 2.3.1 이 본 연구에서 사용되었다.

분석을 실행하려면 사용자는 3 개의 부 폴더가 있는 폴더를 만들어야 한다. 0 은 분석에 포함 된 양에 대한 경계 조건을 정의하는 파일을 포함하고 constant 는 메쉬 및 문제의 물리적 속성을 정의하고 system 은 해결 방법을 정의하고 세부 사항을 처리하는 파일을 포함한다.

2.8.1 격자(meshing) 및 전처리(pre-processing)

격자는 계산 도메인을 더 작은 서브도메인(subdomain)으로 나누는 것이다. 나누된 도메인을 메쉬(mesh) 또는 그리드(grid)라고 한다. 일반적으로 가장 큰 압력 및 속도를 가진 구역은 가장 작은 메쉬를 설치하며 경계층 구역의 해상도가 특히 중요하다. 유한 체적 방법으로 문제가 공간적으로 해결되는 방식 때문에 격자 밀도의 갑작스러운 변화를 피하는 것도 중요하다.

2.8.2 수치계산(solving)

OpenFOAM 은 유한 체적 방법(finite volume method, FVM)을 사용하여 공간에서 Navier-Stokes 방정식을 해결한다. 사용자는 셀 중심에서 면 중심으로의 스킴(scheme), gradient 항, Laplacian 항에 대한 스킴 등을 지정할 수 있다.

시간 적분(time integration)은 유한 차분 방법(finite difference method, FDM)으로 수행된다. 사용자는 거꾸로 오일러 방법(backward Euler method) 등 여러 가지

방법을 선택할 수 있다. OpenFOAM 은 비압축성 유동, 압축성 유동, 포텐셜 유동(potential flow)에 대한 광범위한 솔버를 가지고 있다. 본 연구는 비압축성 유동에만 주목된다.

Courant 수는 명시적(explicit) 유한 차분 법을 사용하여 편미분 방정식을 풀 때 안정성을 판단할 수 있다. 1D Courant 수는 다음과 같이 정의된다.

$$C = \frac{u\Delta t}{\Delta x} \quad (2.25)$$

여기서 u 는 셀 속의 속도, Δt 는 시간 간격(time step), Δx 는 x 방향의 셀 길이이다. 암시적(implicit) 유한 차분 법보다 안정적이며 Courant 수에 대한 제약은 엄격하지 않다. 그러나 솔루션에 영향을 미치기 때문에 낮은 상태를 유지해야한다. Courant 수의 물리적 해석은 $C > 1$ 일 때 유체 입자가 시간 간격 동안 셀의 길이보다 멀리 이동한다는 것이다.

2.8.3 후처리

OpenFOAM 에는 wallShearStressLES, Q 등 광범위한 후처리 유틸리티와 결과를 시각화 하는 데 사용할 수 있는 ParaView 라는 읽기 모듈이 있습니다. ParaView 4.10 은 3D 시각화 및 등치선, 등가면 그래프 등을 위하여 현재 작업에 사용되었다.

제 3 장 전산 모델(Computational Model)

해상 풍력 터빈에 대한 4 개의 서로 다른 중력식 기초 주위의 흐름은 Spalart-Allmaras Delayed Detached Eddy Simulation 과 함께 OpenFOAM 에서 레이놀즈 수 4×10^6 으로 모델링 되었다. 계산 모델의 세부 사항이 이 장에서 설명된다.

3.1 기하학 구조(Geometry)

3.1.1 Lillgrund 풍력 터빈

Lillgrund 해상 풍력 터빈은 스웨덴 Øresund 해협에 위치하고 있다. 스웨덴 연안에서 7km, 덴마크 연안에서 9km, Øresund 대교에서 남쪽으로 7km 떨어져 있다. 수심은 4 ~ 8 미터이다. 총 110MW 용량의 48 개 풍력 터빈으로 구성되어 있다(Jeppsson et al., 2008).

Lillgrund 의 기초에는 전형적인 중력 기반의 기초 디자인이 있다. 그림 3.1 과 3.2 는 기초 디자인의 치수를 보여준다. 가장 중요한 정보가 빨간색으로 표시되었다. 기초가 꼭대기에 6 각형의 밀면 슬래브(bottom slab), 원통형 샤프트(cylindrical shaft) 및 얼음 보호를 위한 원뿔 형상물의 세 부분으로 구성되어 있음을 확인할 수 있다. 기초는 철근 콘크리트로 만들어졌다.

3.1.2 CFD 모델의 기하학 형태(geometry)

4 가지 다른 기하학적 기초가 수치 해석에 사용된다. 하나는 Lillgrund 기초의 간소화된(simplified) 모델이다. 상단의 원형 샤프트(cylindrical shaft)와 하단의 중력식 슬래브(slab)로 구성되며 이를 6 각형 중력식 기초(hexagonal gravity-based foundation, hexagonal GBF)라고 한다. 또 다른 2 개는 6 각형을 제외하고는 하단 슬래브가 원통형과 8 각형으로 되어 있다. 원통형 중력식 기초(cylinder GBF) 및 8 각형 중력식 기초(octagonal GBF)라고 한다. 4 번째 기하학적 기초는 모노파일(monopile) 또는 모노파일 기초(monopile foundation)라고 하는 단일 파일 기초이다.

모든 기하학적 기초는 해저(밀면)에서 y 방향으로 길이가 같으며 D 라고 불린다. D는 모노파일 기초의 직경과 원형 GBF의 하단 슬래브의 직경이다.

그림 3.3 은 6 각형 GBF 와 8 각형 중력식 기초 를 보여준다. 하단 슬래브는 정 6 각형이다. Lillgrund 기초의 원래 형상에 대한 일부 변경이 이루어졌다. 얼음 보호 장치가 포함되어 있지 않으며 원통형 샤프트의 높이가 연장된다. 이것은 총 높이가 모노파일의 높이와 같도록 이루어진 것이다. 모노파일 높이는 구조를 가늘게 만들기 위하여 Roulund et al., 2005 에 의한 연구와 동일하게 설정된다. 이러한 변화는 해저에 가까운 흐름과 바닥 슬래브에 무시할 만한 영향을 미칠 것이다.

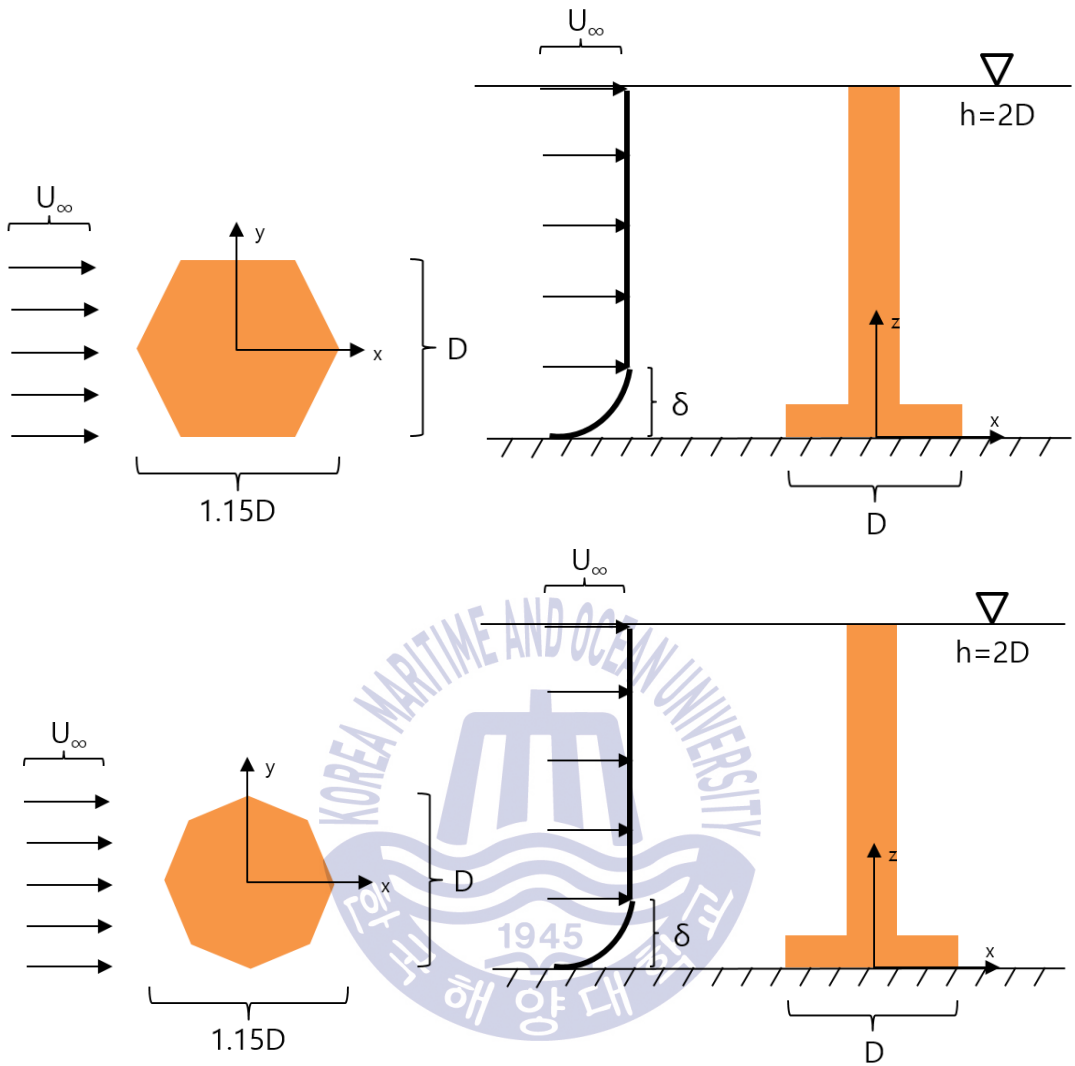


FIGURE 3.3: Geometry of the hexagonal GBF (Sketch by the author)

그림 3.4 는 원형 중력식 기초를 보여줍니다. 하단 슬래브가 직경 D 의 원형 인 것을 제외하고 6 각형 GBF 와 동일하다.

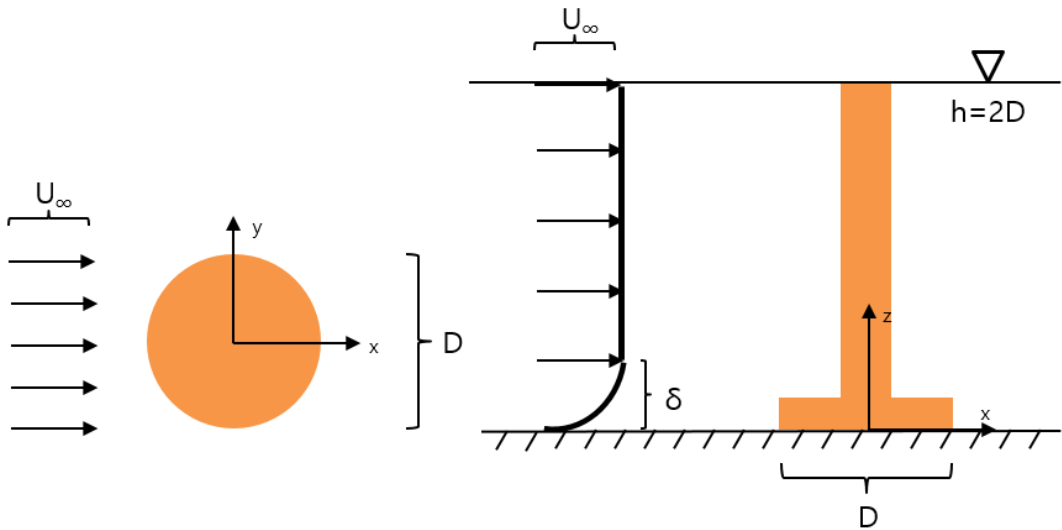


FIGURE 3.4: Geometry of the circular GBF (Sketch by the author)

그림 3.5 는 모노파일 기초를 보여준다. 직경은 D 이다.

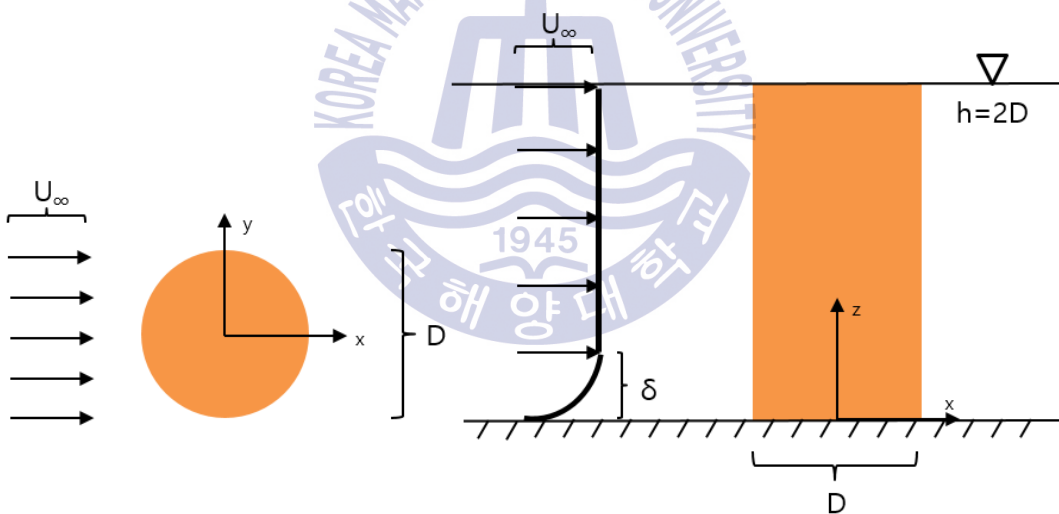


FIGURE 3.5: Geometry of the monopile foundation (Sketch by the author)

그림 3.6 은 메쉬 유틸리티인 blockmesh 와 snappyHexMesh 으로 만든 모노파일과 중력식(3 가지) 기초의 3D 보기를 보여준다. 파란색 선은 메쉬를 나타낸다.

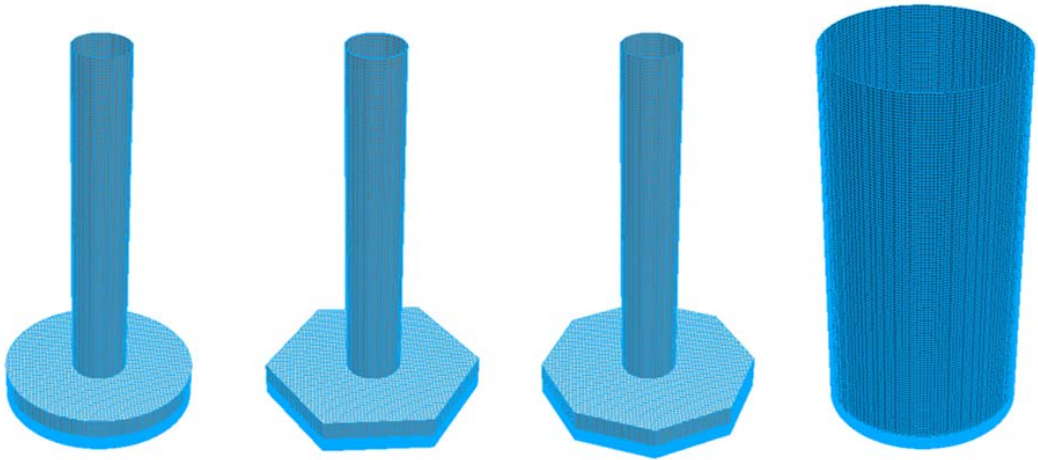


FIGURE 3.6: 3D view of the foundation meshes

3.2 계산조건(Numerical conditions)

3.2.1 레이놀즈 수

레이놀즈 수는 D , 자유 유속 U_{∞} 및 동점성계수 ν 를 기준으로 한다. 레이놀즈 수에 기초한 유사성은 기초의 바닥 근처에서 동일한 난류 수준이 얻도록 사용된다. 4×10^6 만큼 높은 레이놀즈 수는 현실적이라고 쉽게 주장 할 수 있다. $D = 16.454$ (Lillgrund) 및 $\nu = 10^6$ 인 경우, 이는 0.24m/s 의 자유 유속에 해당하며, 특히 높지는 않다.

3.2.2 경계층(boundary layer)

그림 4.7 은 분석에 사용된 계산 구역을 보여준다. 이것은 $20D \times 20D \times 2D$ 를 측정하는데, 이는 Roulund et al. (2005)에 의한 연구와 동일한 구역이다.

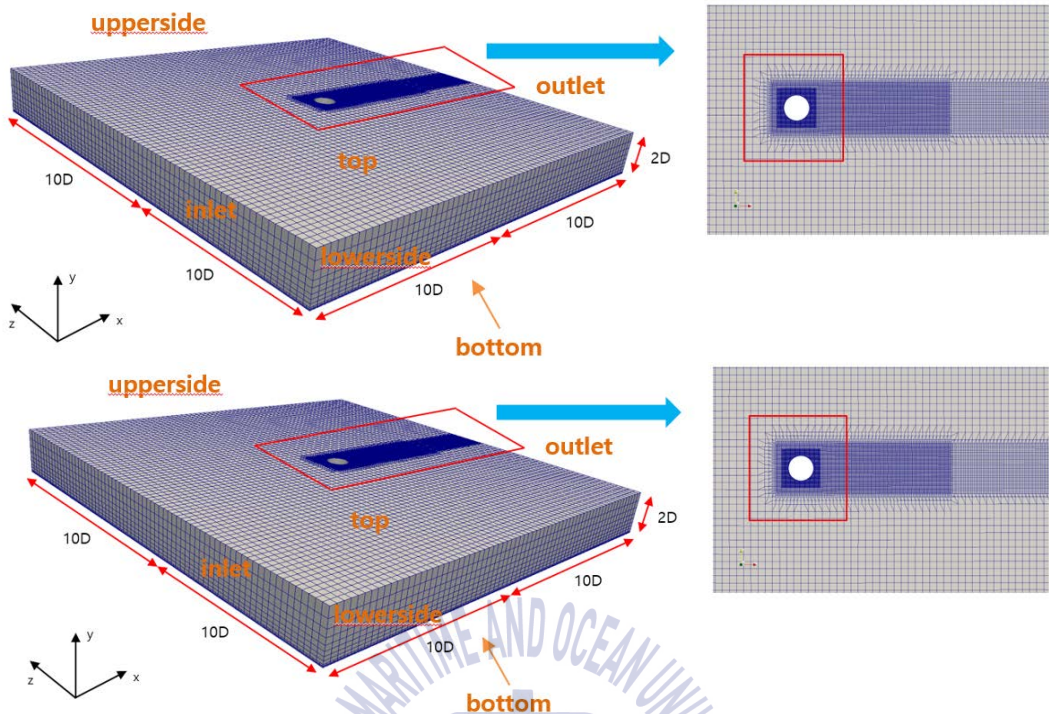


FIGURE 3.7: Computational domain. Up: Monopile Foundation, Down: GBFs.

OpenFOAM 의 Spalart-Allmaras DDES 모델에는 U , p , ν_t 및 $\tilde{\nu}$ 에 대한 경계 조건이 필요하다. U 는 3 차원 속도 벡터, 즉 $U = (u, v, w)$ 이며 p 는 압력이며, ν_t 는 난류 점성계수(turbulence viscosity)이며 $\tilde{\nu}$ 는 Spalart-Allmaras 수송 방정식에서의 작업 변수이다.

입구 프로파일은 다른 방법으로 얻을 수 있다. (Roulund et al., 2005)의 연구에서 별도의 균일한 채널 흐름 계산에서 얻어진 평형 프로파일(equilibrium profiles)을 사용했다. 이는 합리적인 방법이지만 시간이 많이 걸린다. 실험 데이터를 사용하는 또 다른 방법이지만, 실험 데이터가 존재하지 않는 레이놀즈 수와 ν_t 와 같은 양은 실험적 연구에서 쉽게 얻을 수 없다. u , v , w 및 ν_t 에 대한 입구 값은 평평한 해저에 가까운 원형 실린더 주변의 2 차원 유동을 연구하기 위하여 경계층 속도 프로파일을 입구 조건으로 사용했던 (Ong et al., 2010) 로부터 가져온 것이다.

입구 속도 프로파일은 다음과 같이 주어진다.

$$u = \min \left\{ \frac{u_\tau}{k} \ln \left(\frac{z}{z_w} \right), U_\infty \right\} \quad (3.1)$$

여기서 마찰 속도는 $u_\tau = \frac{\kappa U_\infty}{\ln(\delta/z_w)}$ 로 정의된다. z_w 는 1×10^6 의 매우 작은 값으로 설정된 헤저 거칠기이다. 거칠기 z_w 는 헤저 및 기초에 추가된다. 작은 거칠기는 매끄러운 벽면에 비하여 결과에 상당한 영향을 미치지만 시뮬레이션의 수치 안정성을 향상시킨다. v 및 w 는 입구에서 제로로 설정된다. 입구에서의 u_i 분포는 $k-\varepsilon$ 모델에서 난류 점성계수의 정의를 사용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$v_i = \frac{C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (3.2)$$

난류 운동 에너지 k 와 난류 운동 에너지의 소산 속도 ε 은 다음과 같이 정의된다.

$$k = \begin{cases} \max \left\{ C_\mu^{-\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{z}{\delta} \right)^2 u_\tau^2, 0.0001 U_\infty^2 \right\} & \text{if } z \leq \delta \\ 0.0001 U_\infty^2 & \text{if } z > \delta \end{cases}$$

$$\varepsilon = \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{l}$$

여기서 난류 길이 스케일 l 은 다음과 같다.

$$l = \min \left(kz \left(1 + 3.5 \frac{z}{\delta} \right)^{-1}, C_\mu \delta \right) \quad (3.3)$$

상수 C_μ 는 0.09 이다. OpenFOAM 조건 zeroGradient 는 입구의 압력에 사용된다. zeroGradient 조건은 경계에 수직 방향으로 지정된 양의 변화도가 0 임을 의미한다. \tilde{u} 는 본 연구에서 입구 경계에서 u_i 와 동일하게 설정된다. (Kalitzin et al., 2005)는

Spalart-Allmaras 난류 모델이 zeroGradient 조건을 갖는 평판에 흐르는 유동인 경우, Spalart-Allmaras 난류 모델이 사용될 때 대수 내부층(logarithmic sublayer)에서 $v_i = \tilde{v}$ 라고 주장한다. 이는 점성 배부층과 중간 내부층에서는 사실이 아니지만 벽에 가까운 부분의 불일치는 벽 방장식을 사용하기 때문에 입구의 하류에서 신속하게 수정된다.

밀면과 기초 경계에서 v_i 에 nutUSpalding 이라는 벽 함수가 사용된다. (Ong et al., 2009)는 벽 함수가 있는 $k-\varepsilon$ 모델을 사용하여 $Re = 1 \times 10^6, 2 \times 10^6$ 및 3×10^6 에서 매끄러운 원형 실린더(모노파일) 주변의 2 차원 유동을 연구했다. 연구의 결과는 초 임계 및 상향 유동, 즉 $Re > 10^6$ 에서 엔지니어링 설계 목적으로 만족할 만한 것이다. 따라서 본 연구에서 벽 함수 사용은 합리적이라고 가정된다.

노 슬립(no-slip) 조건, $U = (u, v, w) = (0, 0, 0)$ 은 벽에 적용된다. 압력은 zeroGradient 조건으로 설정된다. 벽 근처의 첫 번째 노드에서의 v_i 는 k 와 ε 에 대한 표준 근거리 벽 조건(standard near-wall conditions)에서 발견된다.

$$k = \frac{u_\tau^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad \varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{\kappa h_p}$$

h_p 는 벽에 가장 가까운 노드까지의 법 방향 거리(normal distance)이다. $v_i = \frac{C_\mu k^2}{\varepsilon}$

와 $y^+ = \frac{u_\tau h_p}{\nu}$ 를 사용하면, v_i 에 적용되는 근벽 조건(near wall condition)을 얻을 수 있다.

$$v_i = \nu k y^+ \tag{3.4}$$

메쉬는 밀면과 기초에서 평균 y^+ 가 약 30(실제로는 약 40)이 되도록 h_p 를 조정했다. \tilde{v} 는 방정식 3.9에 의하여 v_i 와 결합되므로 벽 함수가 필요하지 않다.

벽에서 0 으로 설정된다.

출구에서 압력은 0 으로 설정된다. 다른 모든 량은 이 경계에서 zeroGradient 으로 설정된다.

OpenFOAM 의 0 폴더에 사용된 입력 파일은 부록에 있다. ν_i 는 여기 "nuSgs"(subgrid-scale)라고 불리며 $\tilde{\nu}$ 는 "nuTilda"라고 불린다. 파일 "nut"도 있는데 밀면과 기초 경계에 작은 거칠기를 추가하는 것이다.

3.3 메쉬(mesh)

그림 4.6 과 그림 4.7 에서 보이는 듯이 본 연구의 모든 계산 메쉬는 구조화 메쉬(structured mesh) 유형이다. 계산 메쉬는 압력과 속도의 변화가 가장 높은 기초 주위에 가장 조밀하다. 기초 표면에서부터 $3 \times D$ 거리의 하류(downstream) 구역과 밀면에 가까운 구역에서도 적당히 조밀하겠 설치한다.

3.4 수치방법

Linear Gaussian finite volume integration 은 본 연구에서 사용되며 2 차 backwards (암시 적) Euler 방법이 시간 적분(time integration)에 사용된다. 비압축성 흐름을 위한 pisoFoam (Pressure Implicit with Splitting of Operators) 솔버가 사용된다.

제 4 장 해석결과

분석 결과와 토론은 이 장에 진행된다. 압력과 속도에 대한 결과는 선택된 시간 간격의 모든 시간 단계를 기반으로 평균을 계산하는 OpenFOAM 의 fieldAverage 를 사용하여 시간 간격 $T = 50 \frac{D}{u_{\infty}}$ 에 걸쳐 시간 평균 작업을 하는 것이다. 벽 전단 응력과 같은 양은 후처리 유틸리티에서 찾아 되는 것이므로 이 기능으로 시간 평균을 낼 수 없다.

4.1 속도

속도는 $y/D=0$ 에서 $x-z$ 평면에 표시되고 $y/D=0$ 을 따라 속도 프로파일로 표시되어 기초 형상이 속도 영역에 미치는 영향을 보여준다.

4.1.1 downflow

Downflow 는 음의 수직 속도로, backflow 는 음의 수평 속도로 나타낸다. 속도의 z 와 x 성분 w 와 u 는 그림 5.1 와 5.2 의 $y/D=0$ 에서 $x-z$ 평면으로 보여준다. 그림 4.1 는 모든 기초 앞의 유동장 영역에 downflow 가 존재함을 보여준다. (1)로 표시된 모노파일 앞쪽의 downflow 는 해저에 이르기까지의 모든 영역을 포함한다. 중력식 기초의 경우, (2)로 표시된 원통형 샤프트 앞쪽에서 발생하는 downflow 는 하단 슬래브의 존재 때문에 슬래브 상단에서 멈춘다. (3)으로 표시된 것처럼 중력식 기초의 하단 슬래브 앞, 해저면 근처에 downflow 영역이 발생한다. 이 영역의 downflow 는 유속이 크지만 국지적이다.

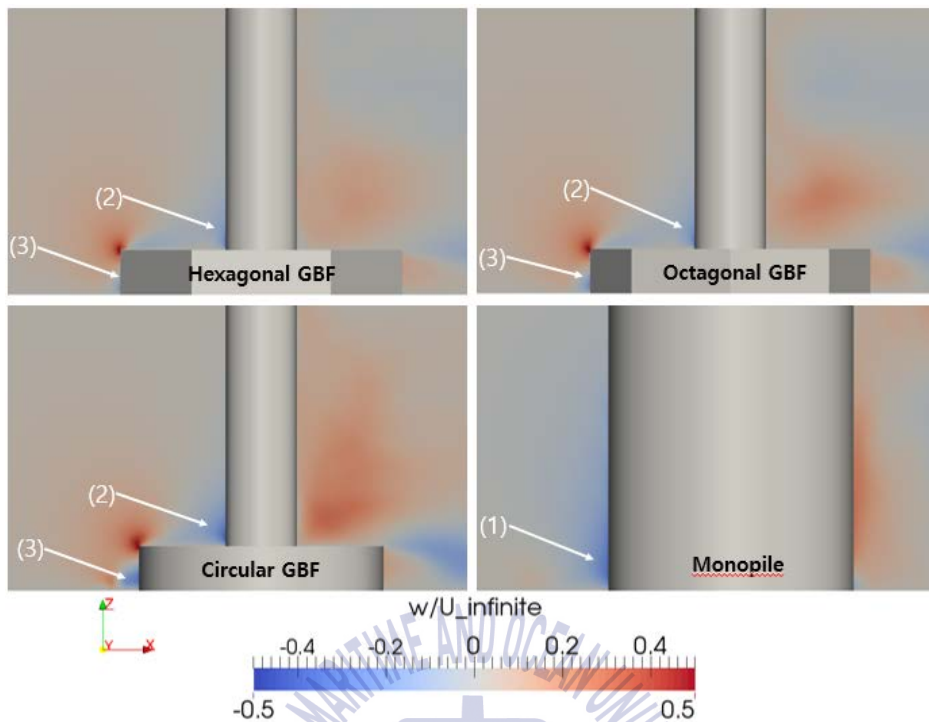


FIGURE 4.1: Vertical velocity w in the $y = 0$ plane

4.1.2 backflow

기초 앞쪽에서의 downflow 는 질량의 보전(convergence of mass)으로 인하여 하단 슬래브와 해저 위에서 backflow 를 야기할 것이다. 그림 4.2 에서 볼 수 있듯이, 앞쪽에 심한 downflow 가 있는 모노파일 기초는, 해저 위에는 backflow 가 심한 영역이 있다. 중력식 기초는 해저 위에서 backflow 가 더 작은 영역을 갖는다. downflow 와 마찬가지로 중력식 기초 앞의 backflow 속도는 크고 국지적이다. 중력식 기초의 기하학적 형태(즉, 하단 슬래브)는 해저에서의 downflow 와 backflow 를 제한한다고 말할 수 있다.

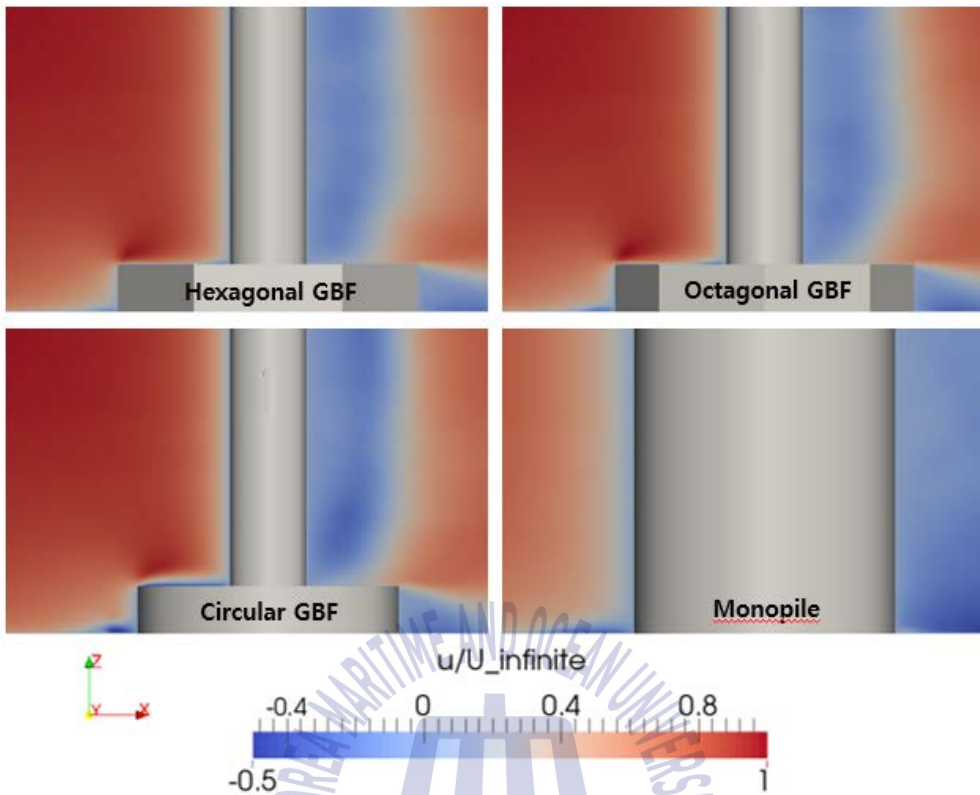


FIGURE 4.2: Horizontal velocity u in the $y = 0$ plane

4.2 압력

이 절에서 본 연구의 압력 분포는 등치선(contours) 및 등가면(isosurfaces)으로 나타난다. 압력은 압력 계수 C_p 로 다음과 같이 표현된다.

$$C_p = \frac{p}{\frac{1}{2}\rho U^2}$$

여기서 p 는 시간 평균을 하고 난 뒤의 평균 압력이다.

4.2.1 등치선(contours)

$y/D=0$ 에서 $x-z$ 평면에서 시간 평균 압력계수의 등가선은 그림 4.3, 4.4, 4.5 및 4.6에 나와 있다. 위에서 아래로 기초의 앞쪽에 있는 가장 안쪽의 등치선에 이어, 그것들의 주요 특징은 그들이 안쪽(기초쪽)으로 곡선을 이루고 있다는 것이다. 이 효과는 중력식 기초보다 모노파일 기초에 더 강하다. 이 효과는 기초 앞에서의 유동이

지연되기(retardation) 때문이다. 감속도(deacceleration)가 속도 프로파일의 초기 속도가 더 높을수록 더 커지므로, 양의 수직 압력 구배(positive vertical pressure gradient)가 나온다. 구체적으로, 기초 앞쪽의 표면에는 $dp/dz > 0$. 이로 인하여 4.1 절에서 설명 된 downflow 가 발생한다.

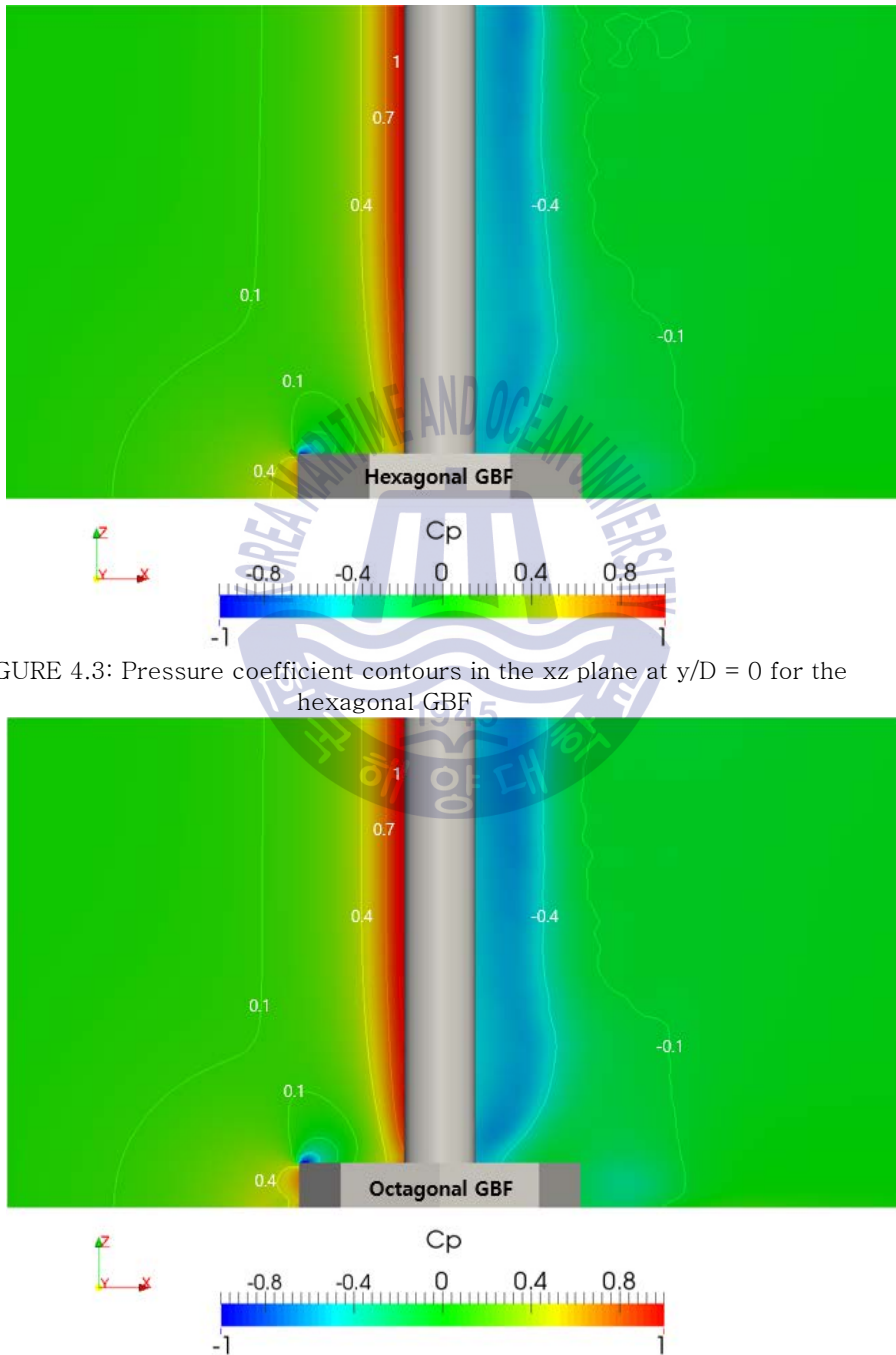


FIGURE 4.3: Pressure coefficient contours in the xz plane at $y/D = 0$ for the hexagonal GBF

FIGURE 4.4: Pressure coefficient contours in the xz plane at $y/D = 0$ for the octagonal GBF

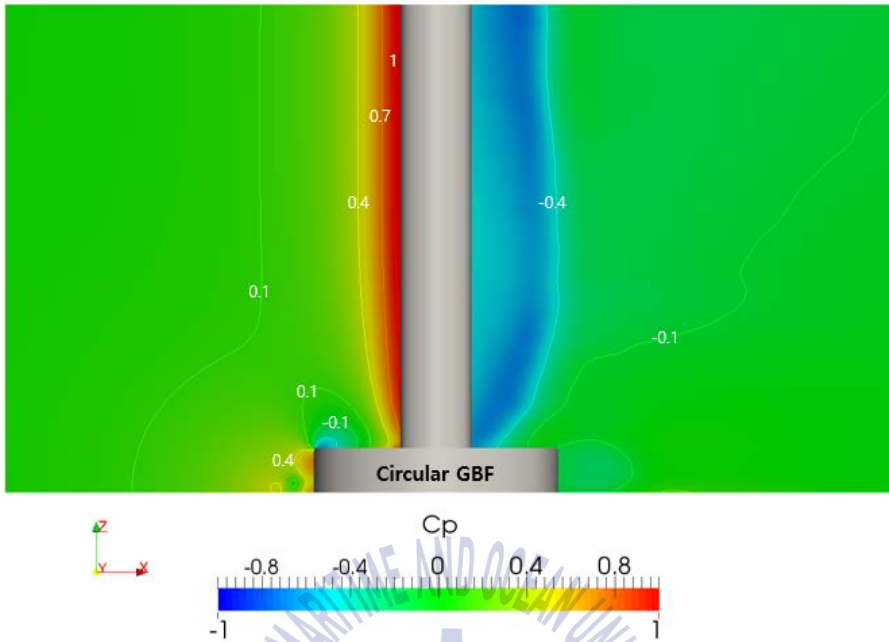


FIGURE 4.5: Pressure coefficient contours in the xz plane at $y/D = 0$ for the circular GBF

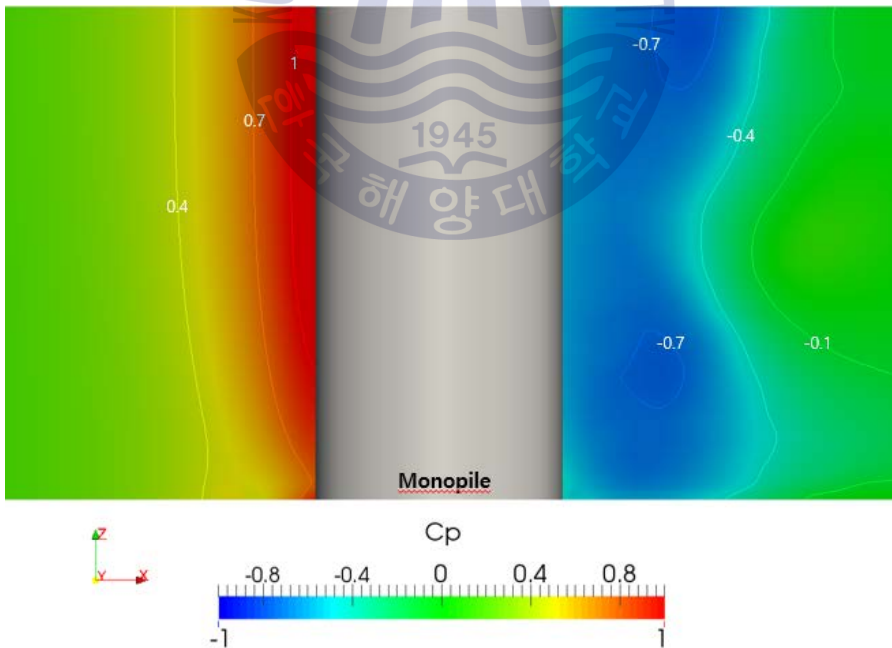


FIGURE 4.6: Pressure coefficient contours in the xz plane at $y/D = 0$ for the monopile foundation

4.2.2 등가면(isosurfaces)

시간 평균 압력은 그림 4.7, 4.8, 4.9 및 4.10 에서 C_p 의 등가면으 표시된다. 4 개의 등가면이 보이고, $C_p=0.1$, $C_p=0.4$, $C_p=0.7$ 그리고 $C_p=1$ 이다. 왼쪽 그림은 최 외각이 $C_p=0.1$ 인 짙은 파란색 면이다. 오른쪽 그림은 최 외각이 $C_p=0.4$ 인 얇은 파란색 면인 3 개의 표면이 포함된 등가면 그림이다. 기초 앞의 수직 압력 구배는 오른쪽 그림에서 $C_p=0.4$ 인 등가면 형태에서 볼 수 있다. 등가면은 중력식 기초의 앞보다 모노파일 기초 앞에서 더 큰 부피를 가지고 있는 것을 관찰할 수 있다.

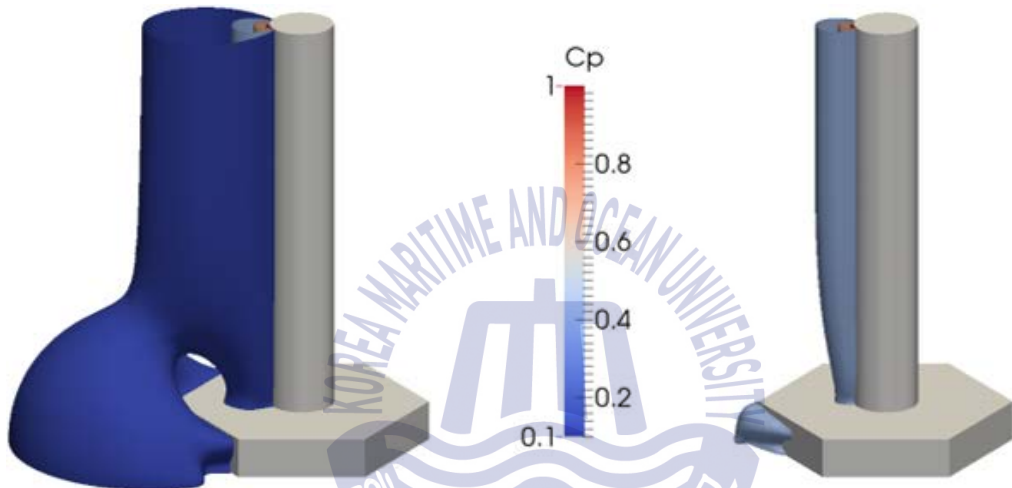


FIGURE 4.7: Pressure coefficient isosurfaces for the hexagonal GBF

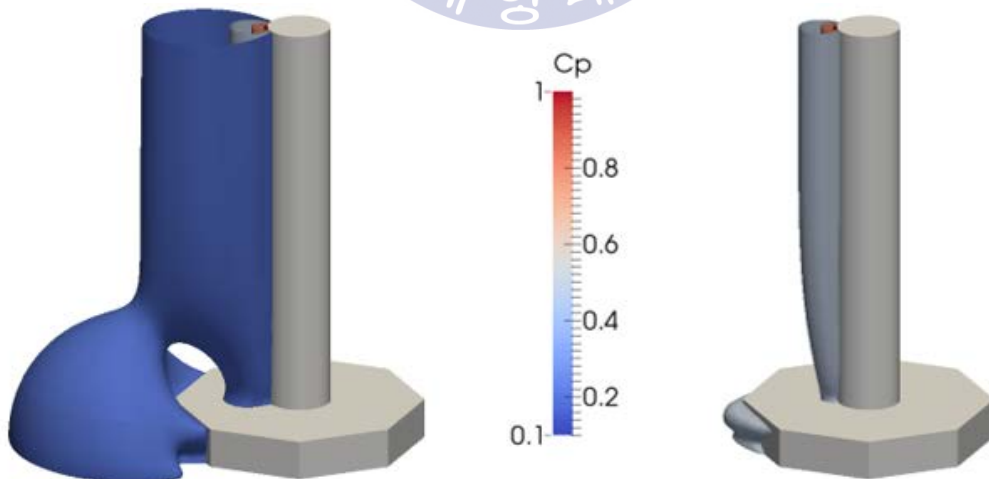


FIGURE 4.8: Pressure coefficient isosurfaces for the octagonal GBF

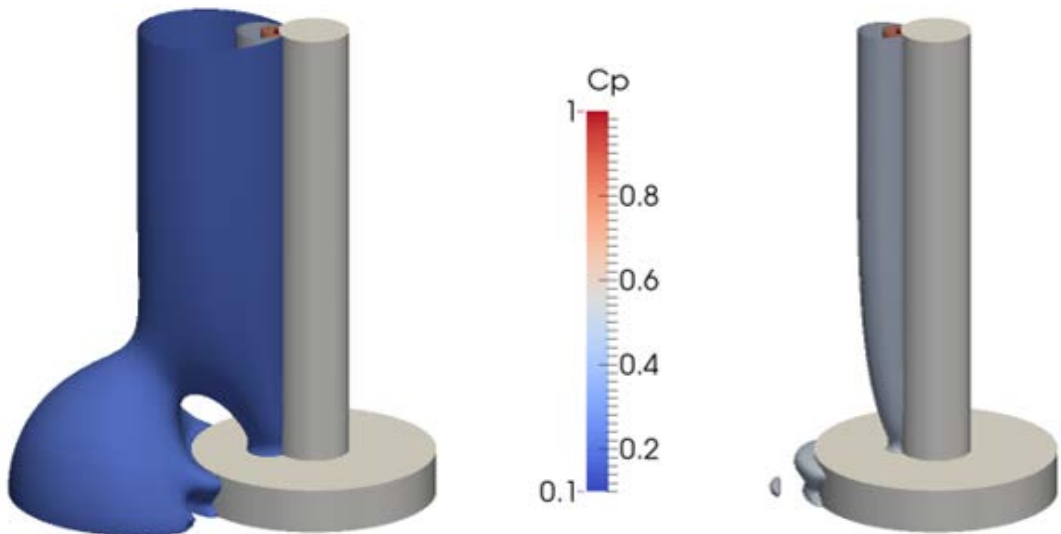


FIGURE 4.9: Pressure coefficient isosurfaces for the circular GBF

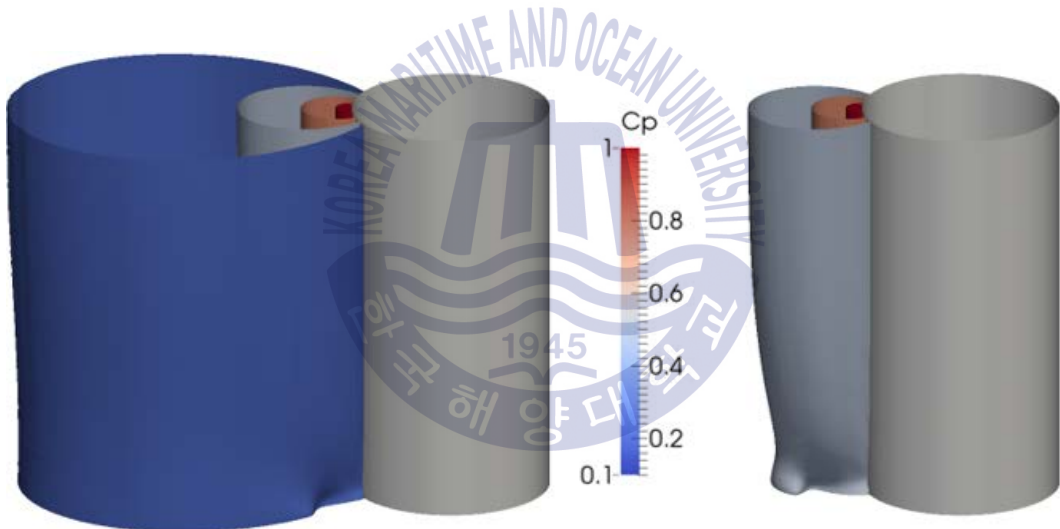


FIGURE 4.10: Pressure coefficient isosurfaces for the monopile foundation

4.3 와도(vorticity)

유동의 구조는 Q 기준(Q-criterion)에 의한 3D 시각화와 $z/D = 0.025$ 에서 해저에 가까운 평면에서 와류의 성분을 비교함으로써 전시된다. 이러한 양은 즉각적인 시간 프레임으로 표시된다.

4.3.1 와류 구조(vortical structures)

Q 기준은 일관된 와류 구조를 확인하는 방법이다 (Jeong and Hussain, 1995). $Q = 5s^{-2}$ 가 모든 그림에서 사용된다.

그림 4.11 과 4.12 는 모노파일 기초 주변의 흐름의 3 차원 및 아래쪽(z 방향)의 와류 구조를 각각 보여준다. 말굽(horseshoe) 모양의 와류가 모노파일 앞에서 명확히 보이는데, 주로 후류의 와류(lee-wake vortices)와 접촉하지 않는다. 이것은 두 가지 메커니즘, 즉 기초 앞의 해저에서의 유동 분리와 기초의 측면에서의 유동 분리에 의하여 생성되기 때문이다. 그림 4.14 는 후류의 와류(lee-wake vortices)가 더 먼 하류로 갈수록 커지는 것을 보여준다.



FIGURE 4.11: 3D view of instantaneous vortical structures around the monopile foundation.



FIGURE 4.12: 2D view of instantaneous vortical structures around the monopile

foundation.

또한 그림 4.12 는 (1)로 표시된 기초에서 흘러 나오는 작은 선들이 앞의 해저에 존재함을 보여준다. 이것은 메쉬 품질 때문일 것이고 물리적인 것이 아니다. 그러나 그것들은 매우 작고 유동장의 나머지 부분에는 아무런 영향을 주지 않는다.

그림 4.13 와 4.14 은 6 각형 중력식 기초 주위의 와류 구조가 모노파일의 경우와 유사하다는 것을 보여준다. 그러나, 말굽 모양의 와류는 두 개의 부분으로 나뉘는데, 하나는 해저에, 하나는 기초 슬래브의 바닥에 있으며, 그림 4.13 의 (1)과 (2)로 표시되어 있다. 하단 앞의 샤프(sharp) 에지는 말굽의 크기를 대칭 평면($y/D = 0$)에서 작게 만든다.



FIGURE 4.13: 3D view of instantaneous vortical structures around the hexagonal GBF



FIGURE 4.14: 2D view of instantaneous vortical structures around the hexagonal GBF

그림 4.15 와 4.16 은 8 각형 중력식 기초 주위의 와류 구조가 6 각형 중력식 기초의 경우와 유사하다는 것을 보여준다. 다만 기초 뒤쪽 부분의 보텍스가 대칭 형태가 아니고 $-y$ 방향으로 편향된 것으로 나타났다. 6 각형보다 각이 더 많으므로 유동이 기초를 경과 하고 난 뒤에 유동 방향 변화가 심하게 발생했다고 생각 된다.



FIGURE 4.15: 2D view of instantaneous vortical structures around the octagonal GBF



FIGURE 4.16: 2D view of instantaneous vortical structures around the octagonal GBF

그림 4.17 과 그림 5.18 은 말굽 모양 와류가 원통형 중력식 기초의 경우 3 부분으로 나뉘어 졌음을 보여준다. 하나는 하단 슬래브의 맨 위에 (3)으로 표시되고, 2 개는 해저 위에 (1)과 (2)로 표시되며, 여기서 (1)로 표시된 기초에 가장 가까운 와류가 더 강하다. 이에 대한 물리적인 설명이 없다.

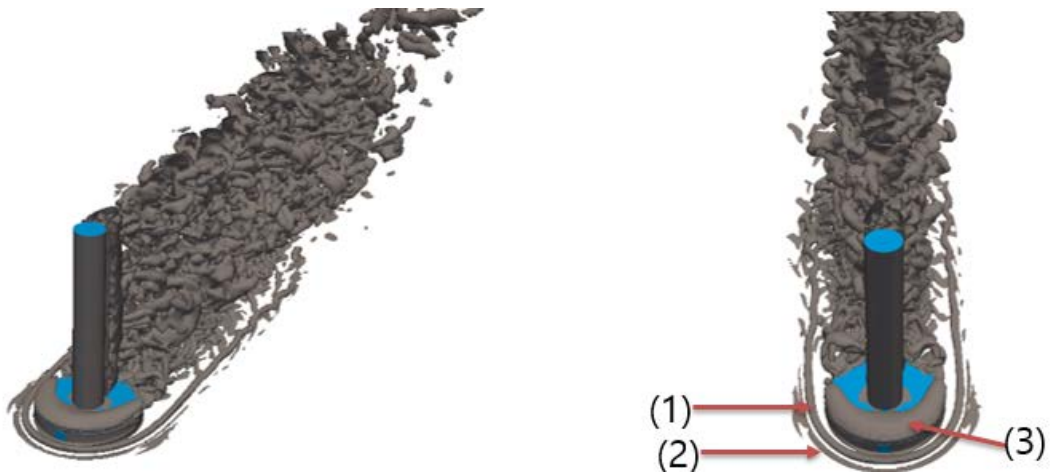


FIGURE 4.17: 3D view of instantaneous vortical structures around the circular GBF



FIGURE 4.18: 2D view of instantaneous vortical structures around the circular GBF

4.3.2 와도(vorticity)의 강도 및 x , y , z 성분

유동의 와도는 속도 장의 컬(curl)로서 계산되며, 컬은 3 가지 구성 요소를 가지고 있다. 축에 대한 컬의 양수 성분은 양의 축 방향을 볼 때 흐름의 회전이 시계 방향임을 의미한다. 와도는 $z/D = 0.025$ 평면에서 음의 z 방향(negative z -direction)을 보고 측정된다. 와도의 x , y 및 z 성분은 그림 4.19, 4.20, 및 4.21 에 각각 나와 있다. 4 가지 기초에 대한 결과가 각 그림에 나와 있다.

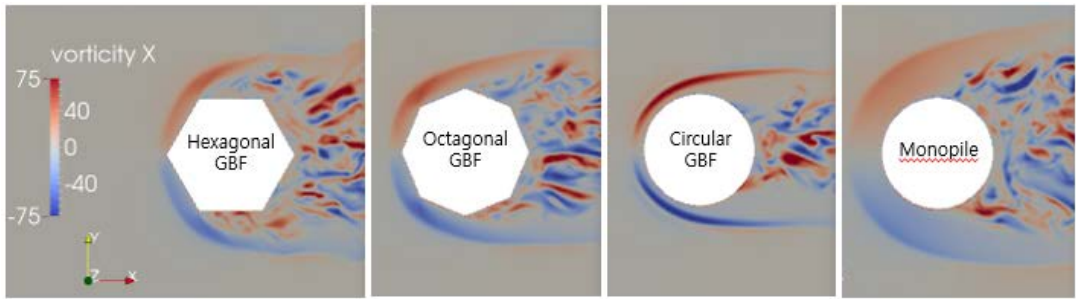


FIGURE 4.19: X-component of vorticity at $z/D = 0.025$

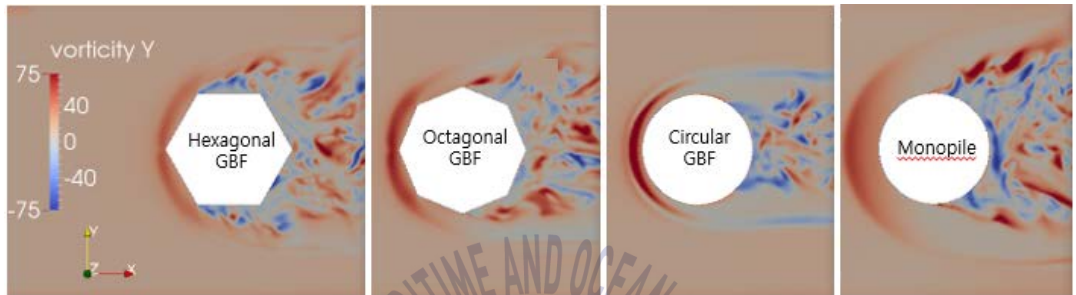


FIGURE 4.20: Y-component of vorticity at $z/D = 0.025$

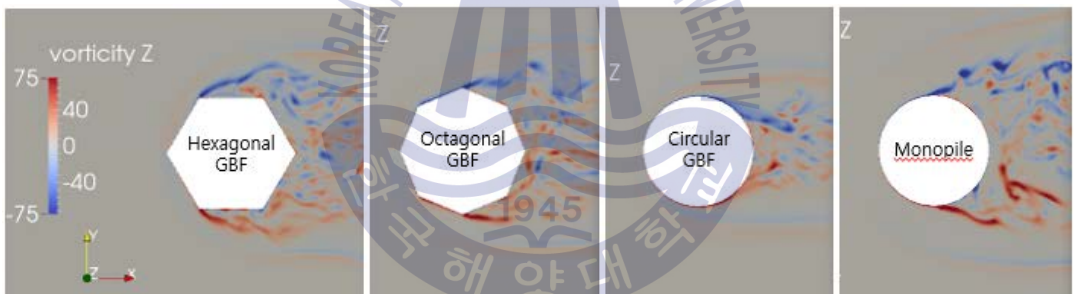


FIGURE 4.21: Z-component of vorticity at $z/D = 0.025$

기초 앞에서 와도의 가장 큰 성분은 y 방향 성분이며, 그 다음에는 x 방향 성분이다. 이것은 와류가 기초 앞에 형성되고 말굽 모양을 따라 하류로 이동 하는 것을 나타낸다. z 방향 성분은 말굽 모양의 와류에 거의 영향 주지 않는다는 것이 보인다.

4.4 해저면 전단 응력 (bed shear stress)

전단 응력 τ 는 OpenFOAM 의 wallShearStressLES 라는 후처리 유틸리티를 통하여 나타낸다. 전단 응력 확대 계수 또는 전단 응력 계수 (τ/τ_w)로 표현된다. τ_w 은 $y/D=9$, $z/D=0$ (기초와의 거리가 충분히 멀다)에서의 해저 전단 응력이다. 기초의 존재에

의하여 거의 방해 받지 않으므로 y 및 z 성분은 거의 제로이다.

4.4.1 기초 표면 및 해저의 전단 응력

그림 4.22 에서 $\tau = 140 \frac{D}{U_\infty}$ 시각 4 가지 기초 주변 해저의 전단 응력 분포가 표시된다. 기초 뒤쪽의 전단 응력은 말굽 구역보다 덜 뚜렷한 것을 관찰할 수 있다. 또한 후처리 작업을 통하여 받은 기초 뒤쪽에서의 전단 응력은 시간에 따라 급하게 변화하므로 이하에 분석하기가 어렵다.

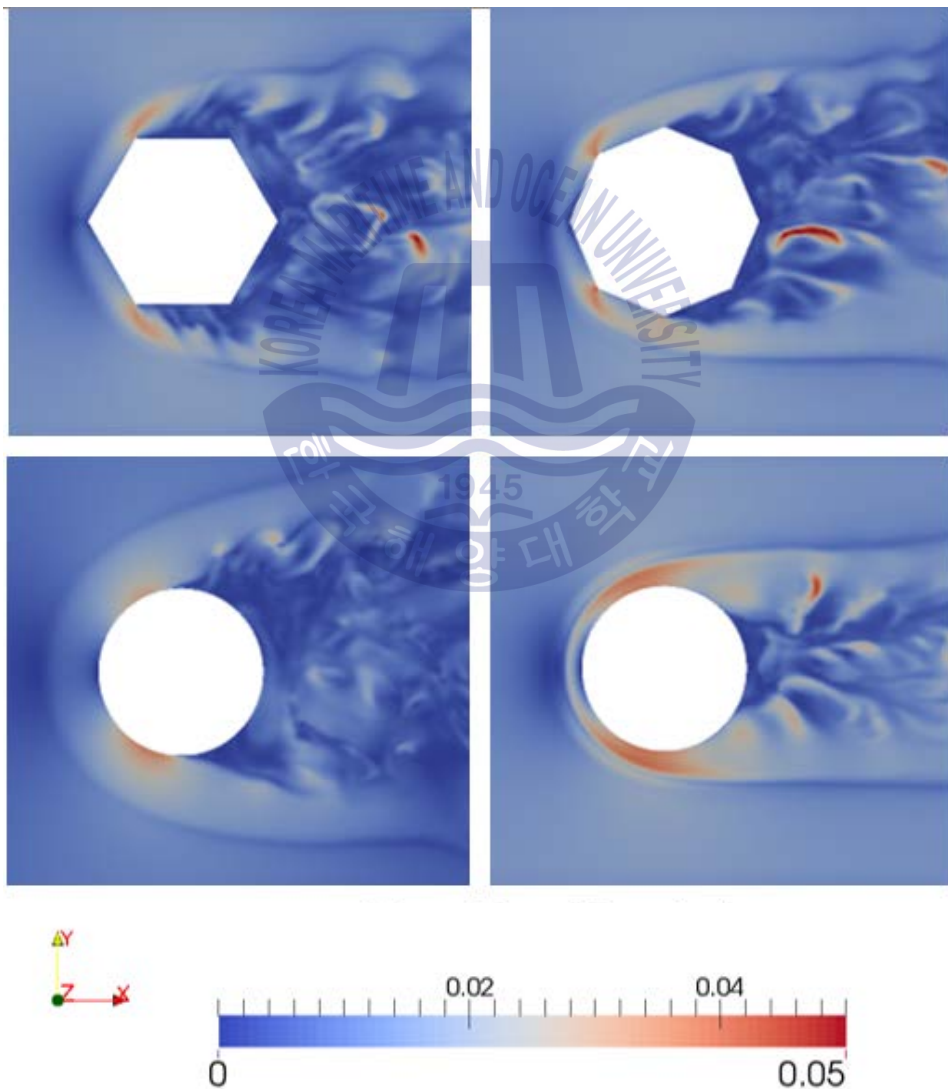


FIGURE 4.22: The shear stress magnitudes at the seabed around 4 foundations

그림 4.23 에서 $\tau = 140 \frac{D}{U_\infty}$ 시각 4 가지 기초 표면의 전단 응력 분포가 표시된다. 형식이 같은 3 가지의 중력식 기초인 경우, 상단 샤프트의 양측은 하단 슬래브 보다 전단 응력은 훨씬 뚜렷한 것을 관찰할 수 있다. 유사적으로, 모노파일 경우에도 해저와 접촉하는 표면 부분의 전단 응력은 위쪽 부분 보다 덜 뚜렷하다. 기초 뒤쪽과 달리 기초 앞쪽에서의 전단 응력은 $\tau = 100 \frac{D}{U_\infty}$ 쯤부터 steady 상태가 된다.

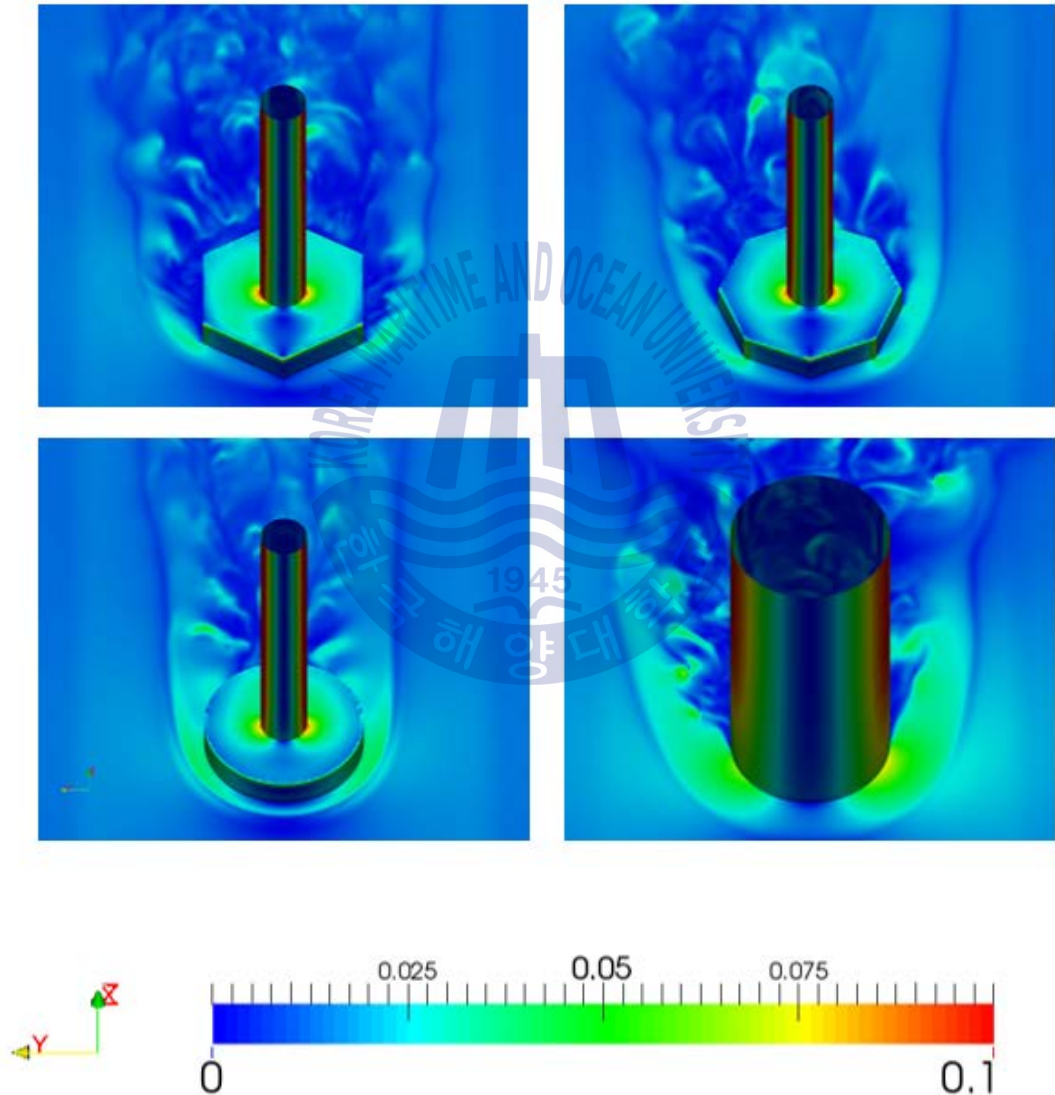


FIGURE 4.23: The shear stress coefficients of 4 foundations

4.4.2 중앙 대칭선에서의 전단응력

$y/D = 0, z/D = 0$ 에서의 x 방향의 선은 대칭 선이라고 본 연구에서 불린다. 특히 모노파일 기초 $-2D < x < -0.5D$ 에서의 전단 응력 계수는 (Roulund et al., 2005)의 모노파일 기초에 대한 실험 결과와 비교되고 그림 4.24 에서 나와 있다. 실험 조건은 $Re = 1.7 \times 10^5$, $\delta/D = 1$ 및 부드럽고 강체 해저이다.

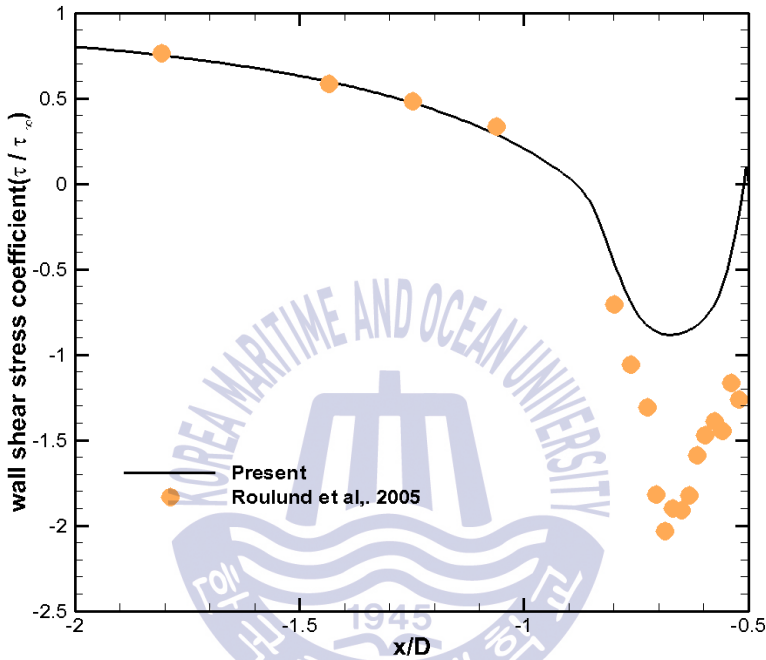


FIGURE 4.24: Comparisons of shear stress coefficients along $y/D = 0, z/D = 0$

해저면 전단 응력 계수 τ/τ_w 의 τ 는 전단 응력의 x 성분을 기반으로 하며 다른 구성 요소는 이 영역(대칭선)에서 무시할 수 있다. 전단 응력은 해저면의 속도 gradient에 의존하기 때문에, 대칭 선을 따른 분리 점은 전단 응력이 0인 곳이다. 이것은 대략 $x/D = 0.89$ 에서 발생한다. 이 점을 초과 한 음의 값은 backflow를 상징하는 것은 분명하다. 대략 $x/D = -0.85$ 까지 본 연구의 CFD 시뮬레이션 결과는 (Roulund et al., 2005)의 실험 결과와 유사하다. $-0.85 < x/D < -0.5$ 사이에서 본 연구의 전단 응력 계수는 실험 결과에 비하여 반 정도 작다.

레이놀즈 수 크기에 따라 해저의 전단 응력 값이 변하는지 아닌지를 판단하고자 한다. 표 4.1 및 그림 4.25에서 보이는 듯이 레이놀즈 수가 서로 다른 3개의 케이스를

시뮬레이션 했다.

case	레이놀즈 수	$\left \frac{\tau}{\tau_\infty} \right _{\max}$
1	9.2×10^5	0.62
2	4.6×10^6	0.88
3	1.4×10^7	0.99

TABLE 4.1: Comparisons of maximum shear stress coefficients between different Reynolds numbers

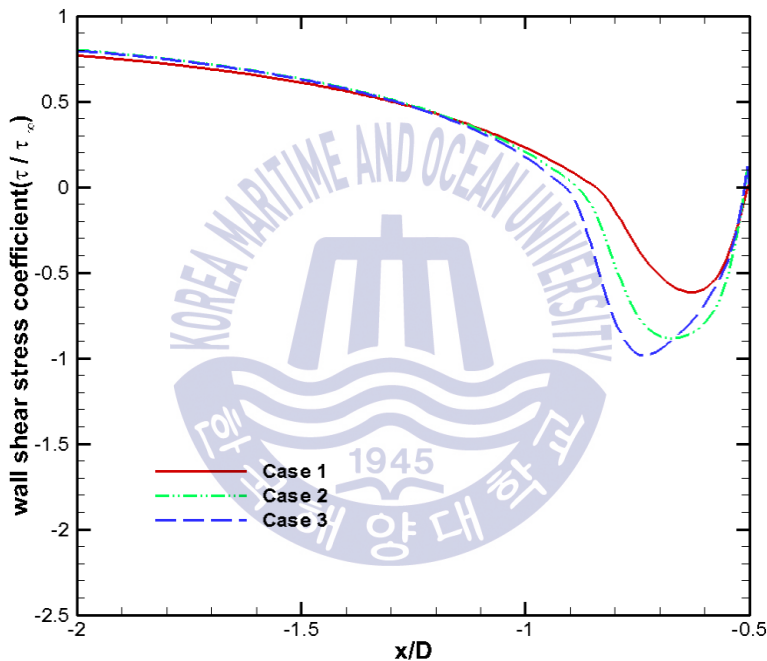


FIGURE 4.25: Comparisons of shear stress coefficients at different Reynolds number

메쉬 격자 질량을 보증함으로 이하하여 레이놀즈 수를 1×10^5 까지 줄이지 못 했다. 그림 4.25 을 통하여 높은 레이놀즈 수 경우에는 레이놀즈 수가 늘어날수록 해저 전단 응력의 최대 값이 크다는 것을 나타낼 수 있다.

6 각형 중력식 기초 및 8 각형 중력식 기초(그림 5.26)의 결과는 말굽형 보텍스 강도가 현저하게 감소 함을 보여준다. 기초의 샤프한 앞 에지가 대칭 선에 위치하기 때문일 수 있다. 또한 6 각형 중력식 기초에 비하여 8 각형 중력식 기초 앞쪽의

말굽형 보텍스 강도가 더 큰 것으로 나타날 수 있다. 6 각형 중력식 기초에 비하여 8 각형 중력식 기초 앞쪽의 해저 전단 응력이 더 크기 때문이다.

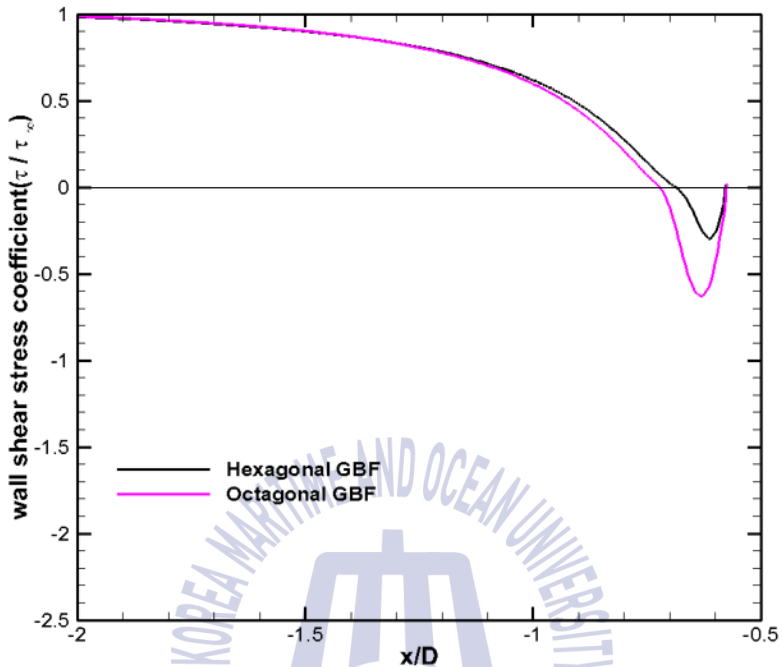


FIGURE 4.26: Shear stress coefficients along the symmetry line, Hexagonal & Octagonal GBF

그림 4.27 은 말굽형 보텍스가 기초 앞의 해저에서 두 부분으로 나뉘어진 것을 보여주는 4.3.1 절의 원형 중력식 기초 주위의 와류 구조와 일치한다. 이 그림은 가장 깊은 보텍스가 다른 기초보다 훨씬 강하다는 것을 보여준다. 이 현상에 대한 연구나 설명이 없다. 더 깊이 연구가 필요하다.

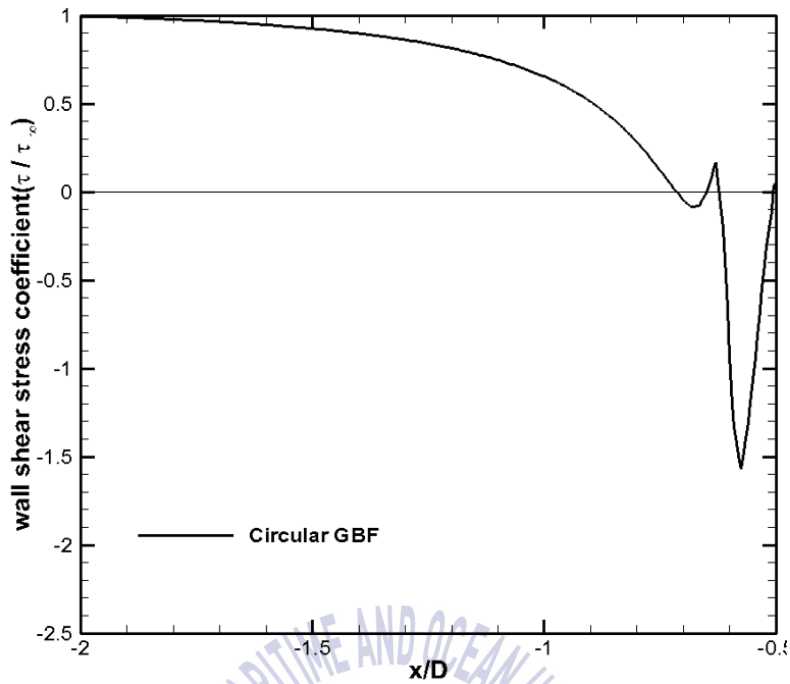


FIGURE 4.27: Shear stress amplification along the symmetry line, circular GBF

표 4.2 는 $\left| \frac{\tau}{\tau_{\infty}} \right|_{\max}$ 에 대한 결과를 요약한다. 모노파일 기초(원통식 기초)보다 중력식 기초 앞의 헤저 전단 응력이 더 적으며, 6 각형 중력식 기초는 중력식 기초 중에 제일 작은 것이 나타난다.

Foundations	$\left \frac{\tau}{\tau_{\infty}} \right _{\max}$
Hexagonal	0.29
Octagonal	0.62
Circular	1.56
Monopile	0.88

TABLE 4.2: Comparisons of maximum shear stress coefficients between different foundations

제 5 장 결론

4 가지 바닥 고정형 풍력 터빈 기초(원통식 또는 모노파일, 원형 중력식, 6 각형 중력식 및 8 각형 중력식) 주위의 경계층 유동이 CFD 시뮬레이션으로 연구되었다.

기초 앞에서의 downflow 와 backflow 가 연구되었다. 모노파일 앞쪽에는 넓은 범위의 downflow 가 존재하여 해저까지 이른다. 이것은 질량 보존으로 인해 해저면 근처의 기초 앞에서 backflow 를 유발한다. 중력식 기초의 하단 슬래브는 해저 부근의 downflow 를 제한하는 것으로 나타났다.

기초 주변의 압력 분포는 $y/D = 0$ 에서 $x-z$ 평면에서 등치선과 기초 주변의 3D 공간에서 등가면으로 연구되었다. 기초 앞에 양(+)의 수직 압력 구배 $dp/dz > 0$ 이 존재하였다. 더 큰 부피를 갖는 모노파일은 다른 기초보다 압력 구배가 더 큰 것으로 나타났다.

4 가지 기초 주변의 보텍스 구조, 특히 기초 주변의 해저 위에 생긴 말굽 모양의 보텍스는 구조를 계산을 통하여 관찰하였다. 모노파일 기초 주변에 1 가지의 말굽형 보텍스가 기초 주변의 해저 위에서 생겼다. 6 각형 중력식 기초 및 8 각형 중력식 기초 주변에서 2 가지의 말굽형 보텍스가 생겼다. 하나는 하단 슬래브에서, 하나는 해저 위에서 생겼다. 또한 8 각형 중력식 기초 뒤쪽 부분의 보텍스가 대칭 형태가 아니고 $-y$ 방향으로 편향된 것으로 나타났다. 원형 중력식 기초의 경우, 말굽 모양의 보텍스는 3 부분으로 나뉘었다. 하나는 하단 슬래브에서, 2 개는 해저 위에서 생겼다.

$y/D = 0$, $z/D = 0$ 선을 따른 해저 전단 응력의 x 성분이 조사되었다. 결과는 전단 응력 계수인 τ / τ_w 로 표현되었다. 말굽형 보텍스 크기도 전단 응력 계수로 측정되었다. 6 각형 중력식 기초는 제일 작은 전단 응력이 나타났다. 해저 전단 응력과 말굽형 보텍스 크기를 고려하여, 6 각형 중력식 기초 주변의 세굴 문제가 제일 심하지 않다는 결론이다.

참고문헌

- Bakker, A. (2006), *Lecture 10 - Turbulence Models, Applied Computational Fluid Dynamics*, accessed 10 June 2015, <http://www.bakker.org/dartmouth06/engs150/10-rans.pdf>
- Cengel, Y. A. and Cimbala, J. M. (2010). *Fluid Mechanics, Fundamentals and Applications, Second Edition*, McGraw-Hill.
- European Commission (2015), *2030 framework for climate and energy policies*, accessed 10 June 2015, http://ec.europa.eu/clima/policies/2030/index_en.htm
- European Wind Energy Association (2015b), *Wind in power - 2014 European statistics*, accessed 10 June 2015, <http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/EWEA-Annual-Statistics-2014.pdf>
- Gainer, T. G., Morrison, J. H., Rivers, S. M., Mysko, S. J., and Witkowski, D. P. (2001), 'Cfd sensitivity analysis of a modern civil transport near buffet-onset conditions', <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20020015798.pdf>
- Global Wind Energy Council (2015), *Global Wind Energy Council homepage*, accessed 10 June 2015, <http://www.gwec.net/global-Figures/graphs/>
- Jeong, J. and Hussain, F. (1995), 'On the identification of a vortex', *Journal of fluid mechanics*, 285:69–94.
- Jeppsson, J., Larsen, P. E., and Larsson. (2008), 'Technical description lillgrund wind power plant', *Lillgrund Pilot Project. Vattenfall Vindkraft AB*.
- Kalitzin, G., Medic, G., Iaccarino, G., and Durbin, P. (2005), 'Near-wall behaviour of rans turbulence models and implications for wall functions',

Journal of Computational Physics, 204:265–291.

Karimirad, M. (2014), *Offshore Energy Structures*, Springer.

Lorc, Knowledge (2011), *Lorc-webpage*, accessed 10 June 2015, <http://www.lorc.dk/offshore-wind-farms-map/list>

Ong, M. C., Utnes, T., Holmedal, L. E., Myrhaug, D., and B., P. (2010), 'Numerical simulation of flow around a circular cylinder close to a flat seabed at high reynolds numbers using a $k-s$ model', *Coastal Engineering*, 57:931–947.

Ong, M. C., Utnes, T., Holmedal, L. E., Myrhaug, D., and Pettersen, B. (2009), 'Numerical simulation of flow around a smooth circular cylinder at very high reynolds numbers', *Marine Structures*, 22:142–153.

OpenFOAM Ltd (2015), *OpenFOAM User Guide*, accessed 10 June 2015, <http://cfd.direct/openfoam/user-guide/>

O'Riordan, N. J. and Clare, D. G. (1990). 'Geotechnical considerations for the installation of gravity base structures, paper otc 6381', *22nd Offshore Technology Conference, May 7-10, Houston*, pages 309–316.

Pope, S. B. (2000), *Turbulent Flows*, Cambridge University Press.

Roulund, A., Sumer, B. M., Fredsøe, J., and Michelsen, J. (2005), 'Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile', *Journal of Fluid Mechanics*, 534:351– 401.

Spalart, P. R. and Allmaras, S. R. (1992), 'A one-equation turbulence model for aerodynamic flows', In *30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, January 6-9, Reno, NV, USA*.

Spalart, P. R., Deck, S., Shur, M. L., Squires, K. D., Strelets, M. K., and Travin, A. (2006), 'A new version of detached-eddy simulation, resistant to ambiguous grid

densities', *Theoretical and computational fluid dynamics*, 20(3):181–195.

Sumer, B. M. and Fredsøe, J. (1997), *Hydrodynamics Around Cylindrical Structures*, World Scientific.

Sumer, B. M. and Fredsøe, J. (2002), *The Mechanics of Scour in the Marine Environment*, World Scientific.

