creative commons

COMMONS DEED

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

dCollection

공학석사 학위논문

보호가이드가 EM-Log 주위 유동에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

An experimental study on the effects of a protection guide affecting the flow near the electro-magnetic log (EM-Log)

2023년 8월

서울대학교 대학원

조선해양공학과

김 재 훈

보호가이드가 EM-Log 주위 유동에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

지도교수 이 신 형

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함
2023년 7월

서울대학교 대학원
조선해양공학과
김 재 훈

김재훈의 석사 학위논문을 인준함
2023년 7월

위 원 장 홍 석 윤 (인)

부위원장 이 신 형 (인)

위 원 남 보 우 (인)

초 록

수중의 잠수함은 EM-Log (Electro-Magnetic Log)로 함속과 함위를 산출한다. EM-Log는 패러데이 법칙으로 선체 주위의 유속을 측정하여 함속을 산출하는 대수속력계이므로 해류나 선체 부가물로 인해 주위 유속이 교란되면 부정확한 함속을 산출하게 된다.

대한민국 해군의 잠수함은 타국의 잠수함과는 달리 EM-Log의 손상을 방지하기 위해 EM-Log 전방에 지느러미 형상의 보호가이드를 부착한다. 본 연구는 보호가이드가 EM-Log에 미치는 영향을 분석하기 위해 캐비테이션 터널에서 모형실험을 수행하였으며, PIV (Particle Image Velocimetry)로 유동장을 계측하고, tuft test 기법으로 유동을 가시화하였다.

모형실험은 원통으로 단순화한 EM-Log 모형과 지느러미 형상, 직사각형 형상, 반타원형 형상 평판으로 단순화한 보호가이드 모형에 대해 수행하였다. 실험 변수는 PIV 계측면 높이(h), 편류각(β), Reynolds number(Re_D)이며, 실험 조건은 h/H_c = 0.7, 0.8, 0.9, β = 0°, 5°, 10°, Re_D = 4.0×10^4, 8.0×10^4, 1.2×10^5, 1.6×10^5 이다. H_c는 EM-Log 모형의 높이를 의미하며, Re_D의 특성길이는 EM-Log 모형의 지름이다.

유동장 분석을 통해 직사각형 형상, 반타원형 형상 보호가이드 모형에 의한 EM-Log 모형 주위 유동 교란이 β = 10°에서 강하게 나타나는 것을 확인하였다. 유동 교란으로 인해 EM-Log 모형의 한쪽 영역을 지나는 유속이 감소하였다.

β = 10°, $Re_D \geq 5.0 \times 10^4$ 조건의 반타원형 형상 보호가이드 모형 끝단(tip)에서 발생한 tip vortex는 EM-Log 모형 주위 유동을 크게 교란하였다. Tip vortex의 영향으로 인해 EM-Log 모형 전방에 유속이 저하되는 영역이 생성되었다.

보호가이드 유무와 β에 따라 EM-Log가 산출하는 함속이 변화하는 정도를 계산하였다. EM-Log만 있는 경우 β에 따른 함속 변화량은 평균 1% 수준이며, β와 함속 변화량의 관계는 선형적이었다. 보호가이드가 있는 경우 β에 따른 함속 변화량은 평균 4% 수준이며, β와 함속 변화량의 관계는 비선형적이었다. 함속의 변화는 보호가이드 형상과 무관하게 동일한 경향으로 나타났다.

보호가이드는 형상과 무관하게 EM-Log 주위 유동을 교란시키며, EM-Log가 부정확한 함속을 산출하게 만든다. 잠수함의 정확한 함속, 함위 산출과 안전한 항해를 위해 보호가이드를 제거하는 것이 적절하다.

주요어 : PIV (Particle Image Velocimetry), Tuft test, Tip vortex, Submarine, Protection guide, EM-Log (Electro-Magnetic Log)

학 번 : 2021-27544

목 차

제 1 장 서 론 ····· 1

1.1. 연구배경 ····· 1

1.1.1. EM-Log의 원리 ····· 1

1.1.2. 잠수함에 설치된 EM-Log와 보호가이드 ····· 3

1.2. 연구목표 ····· 4

1.3. 연구내용 ····· 4

1.4. 선행연구 ····· 5

1.4.1. 원통과 평판 주위 유동에 관한 실험적 연구 ····· 5

1.4.2. 2개의 원통 주위 유동에 관한 실험적 연구 ····· 6

1.4.3. 전산유체역학을 이용한 원통과 평판 주위 유동에 관한 연구 ····· 8

1.4.4. 선행연구 조사 결과 ····· 9

제 2 장 실험 설계 ····· 10

2.1. 실험 설비 및 장비 ····· 10

2.1.1. 캐비테이션 터널 ····· 10

2.1.2. PIV (Particle Image Velocimetry) system ····· 11

2.1.3. LDV (Laser Doppler Velocimetry) system ····· 18

2.1.4. 초고속 카메라 ····· 25

2.2. 실험 대상 ····· 26

2.2.1. EM-Log 모형 ····· 26

2.2.2. 보호가이드 모형 ····· 27

2.3. 모형 설치 ····· 28

2.4. 좌표계 설정 ····· 31

2.5. 실험 조건 ····· 32
2.5.1. PIV 계측면의 높이(h/H_c) ····· 32
2.5.2. 편류각(β) ····· 33
2.5.3. Reynolds number (Re_D) ····· 34
2.5.4. 실험 조건 종합 ····· 35
2.6. 실험 기법 ····· 36
2.6.1. PIV 계측 ····· 36
2.6.2. LDV 계측 ····· 37
2.6.3. 유동 가시화(tuft test) ····· 38

제 3 장 실험 결과 및 분석 ····· 41
3.1. 검증 실험 ····· 41
3.1.1. 캐비테이션 터널 내 free stream의 유속(U_∞) 검증 ····· 41
3.1.2. PIV 계측 불확실성 검증 ····· 42
3.2. 유동장 ····· 45
3.2.1. 유동장 분석 대상 ····· 45
3.2.2. EM-Log 모형만 있을 때 유동장 ····· 46
3.2.3. 직사각형 형상 보호가이드 모형이 있을 때 유동장 ····· 48
3.2.4. 반타원형 형상 보호가이드 모형이 있을 때 유동장 ····· 55
3.3. 유동 가시화 ····· 67
3.3.1. 직사각형 형상 보호가이드 모형이 있을 때 유동 가시화 · 67
3.3.2. 반타원형 형상 보호가이드 모형이 있을 때 유동 가시화 · 68
3.4. $\overline{u}/U_\infty$ 의 변화 ····· 69
3.4.1. $\overline{u}/U_\infty$ 분석 영역 ····· 69
3.4.2. $\overline{u}/U_\infty$ 분석 방법 ····· 70
3.4.3. EM-Log 모형만 있을 때 $\overline{u}/U_\infty$ 변화 ····· 70
3.4.4. 보호가이드 모형이 있을 때 $\overline{u}/U_\infty$ 변화 ····· 71

제 4 장 결 론 ····· 76
4.1. 보호가이드가 EM-Log 주위 유동에 미치는 영향 ····· 76
4.2. 보호가이드가 EM-Log의 함속 측정에 미치는 영향 · 76

참고문헌 ····· 77

Abstract ····· 81

표 목 차

Table 2-1 Specifications of cavitation tunnel in Seoul National University ····· 11
Table 2-2 Specifications of EverGreen 200 ····· 15
Table 2-3 Specifications of Imager pro SX 5M ····· 18
Table 2-4 Specifications of Stellar-Pro-L Multi-Line/300 ····· 21
Table 2-5 Specifications of 60×61 FlowLite waterproof LDV probe ·· 24
Table 2-6 Specifications of Fastcam mini ux50 ····· 25
Table 2-7 Specifications of cylinder ····· 26
Table 2-8 Specifications of flat plates ····· 27
Table 2-9 Results of drag coefficient according to β in 2-D CFD (Kim, J. et al., 2022, June) ····· 34
Table 2-10 Reynolds number test conditions ····· 34
Table 2-11 Test conditions ····· 35
Table 2-12 Specifications of HGC-10 ····· 37
Table 2-13 Settings of BSA Flow Software ····· 38
Table 2-14 Specifications of Pro intense ····· 39
Table 3-1 The standard deviation of the tracer particle displacement 43
Table 3-2 p-value of PIV measurement data ····· 44
Table 3-3 Results of $\triangle \overline{u}/U_\infty$ according to β and Re_D without a flat plate ····· 71
Table 3-4 Results of $\triangle \overline{u}/U_\infty$ according to β and Re_D with the fin-shaped flat plate ····· 74
Table 3-5 Results of $\triangle \overline{u}/U_\infty$ according to β and Re_D with the rectangular flat plate ····· 74
Table 3-6 Results of $\triangle \overline{u}/U_\infty$ according to β and Re_D with the semi-elliptical flat plate ····· 75

그 림 목 차

Figure 1-1 Schematic diagram of EM-Log's ship velocity measurement ····· 2
Figure 1-2 (a) Republic of Korea navy SS-086. (b) German navy U-32 ····· 3
Figure 1-3 Sketch of experimental models (Yucel, S.B. et al., 2010) ··· 5
Figure 1-4 Variation of *St* with horizontal spacing *G/D* for different vertical distances *Z/D* at *Re* = 400 (Yucel, S.B. et al., 2010) ····· 6
Figure 1-5 Arrangement of cylinders and definitions of symbols (Alam, M.M. & Meyer, J.P., 2013) ····· 7
Figure 1-6 Interaction regimes in *T/D-a* plane (Alam, M.M. & Meyer, J.P., 2013) ····· 7
Figure 1-7 Schematic drawing of the geometry studied (Serson, D. et al., 2014) ····· 8
Figure 1-8 Comparison between *St* for different gaps obtained from 2-D and 3-D simulations for a cylinder with a splitter plate with *L/D* = 1 (Serson, D. et al., 2014) ····· 9
Figure 2-1 Cavitation tunnel in Seoul National University ····· 10
Figure 2-2 Schematic diagram of flow velocity measurement of PIV 12
Figure 2-3 Schematic diagram of 2-D 2-C PIV system ····· 13
Figure 2-4 2-D 2-C PIV system ····· 14
Figure 2-5 EverGreen 200 power supply and laser head ····· 15
Figure 2-6 Schematic diagram of laser sheet optics (ITTC, 2014) ····· 16
Figure 2-7 Laser sheet optics ····· 17
Figure 2-8 CCD camera ····· 17
Figure 2-9 Schematic diagram of flow velocity measurement of LDV 19

Figure 2-10 Schematic diagram of 1-D LDV system ····· 20
Figure 2-11 1-D LDV system ····· 20
Figure 2-12 Stellar-Pro-L Multi-Line/300 ····· 21
Figure 2-13 Schematic diagram of laser beam splitter ····· 22
Figure 2-14 55 × 37 interference filter 514.55 nm ····· 23
Figure 2-15 60 × 61 FlowLite waterproof LDV probe ····· 24
Figure 2-16 Fastcam mini ux50 ····· 25
Figure 2-17 (a) EM-Log (AGI Ltd, 2017), (b) Cylinder ····· 26
Figure 2-18 (a) Fin-shaped flat plate, (b) Rectangular flat plate, (c) Semi-elliptical flat plate, (d) Front view of flat plates, (e) Top view of flat plates ····· 27
Figure 2-19 Schematic diagram of flat plate and cylinder in cavitation tunnel, (a) Top view, (b) Side view ····· 28
Figure 2-20 Observation window of cavitation tunnel ····· 28
Figure 2-21 Schematic diagram of model mount window and coordinate system, (a) Top view, (b) Side view ····· 29
Figure 2-22 (a) No reflectors to remove the shadow zone (b) With reflectors to remove the shadow zone ····· 30
Figure 2-23 Schematic diagram of the X-Y coordinate system and the PIV measurement plane ····· 31
Figure 2-24 Schematic diagram of the x-y coordinate system ····· 32
Figure 2-25 (a) Schematic diagram of EM-Log's magnetic field, (b) Cylinder ····· 32
Figure 2-26 Results of flow field according to β in 2-D CFD (Kim, J. et al., 2022, June) ····· 33
Figure 2-27 (a) HGC-10 container, (b) HGC-10 ····· 36
Figure 2-28 Comparison of TVC in the absence and presence of the 0.7 mm thread at different lengths (Amini, A. et al., 2019) ····· 38

Figure 2-29 High-speed camera and lighting installation for tuft test 39
Figure 2-30 (a) Rectangular flat plate with attached threads,
(b) Semi-elliptical flat plate with attached threads ····· 40
Figure 2-31 Fin-shaped flat plate and cylinder ····· 40
Figure 3-1 Results of the free stream velocity measurement ····· 41
Figure 3-2 Results of the turbulence intensity calculation ····· 42
Figure 3-3 Error distribution of the tracer particle displacement relative to the true value ····· 43
Figure 3-4 (a) Schematic diagram of the cylinder with fin-shaped flat plate, (b) The flow field of the cylinder with fin-shaped flat plate ····· 45
Figure 3-5 The flow field of the cylinder without a flat plate at h/H_c = 0.9, Re_D = 4.0×10^4 ····· 46
Figure 3-6 The flow field of the cylinder without a flat plate at h/H_c = 0.9, Re_D = 8.0×10^4 ····· 46
Figure 3-7 The flow field of the cylinder without a flat plate at h/H_c = 0.9, Re_D = 1.2×10^5 ····· 47
Figure 3-8 The flow field of the cylinder without a flat plate at h/H_c = 0.9, Re_D = 1.6×10^5 ····· 47
Figure 3-9 The flow field of the cylinder with the rectangular flat plate at h/H_c = 0.9, β = 0°, Re_D = 4.0×10^4 ····· 49
Figure 3-10 The flow field of the cylinder with the rectangular flat plate at h/H_c = 0.9, β = 0°, Re_D = 8.0×10^4 ····· 49
Figure 3-11 The flow field of the cylinder with the rectangular flat plate at h/H_c = 0.9, β = 0°, Re_D = 1.2×10^5 ····· 50
Figure 3-12 The flow field of the cylinder with the rectangular flat plate at h/H_c = 0.9, β = 0°, Re_D = 1.6×10^5 ····· 50
Figure 3-13 The flow field of the cylinder with the rectangular flat plate at h/H_c = 0.9, β = 5°, Re_D = 4.0×10^4 ····· 51

Figure 3-14 The flow field of the cylinder with the rectangular flat plate at h/H_c = 0.9, β = 5°, Re_D = 8.0×10^4 ····· 51
Figure 3-15 The flow field of the cylinder with the rectangular flat plate at h/H_c = 0.9, β = 5°, Re_D = 1.2×10^5 ····· 52
Figure 3-16 The flow field of the cylinder with the rectangular flat plate at h/H_c = 0.9, β = 5°, Re_D = 1.6×10^5 ····· 52
Figure 3-17 The flow field of the cylinder with the rectangular flat plate at h/H_c = 0.9, β = 10°, Re_D = 4.0×10^4 ····· 53
Figure 3-18 The flow field of the cylinder with the rectangular flat plate at h/H_c = 0.9, β = 10°, Re_D = 8.0×10^4 ····· 53
Figure 3-19 The flow field of the cylinder with the rectangular flat plate at h/H_c = 0.9, β = 10°, Re_D = 1.2×10^5 ····· 54
Figure 3-20 The flow field of the cylinder with the rectangular flat plate at h/H_c = 0.9, β = 10°, Re_D = 1.6×10^5 ····· 54
Figure 3-21 The flow field of the cylinder with the semi-elliptical flat plate at h/H_c = 0.9, β = 0°, Re_D = 4.0×10^4 ····· 56
Figure 3-22 The flow field of the cylinder with the semi-elliptical flat plate at h/H_c = 0.9, β = 0°, Re_D = 8.0×10^4 ····· 56
Figure 3-23 The flow field of the cylinder with the semi-elliptical flat plate at h/H_c = 0.9, β = 0°, Re_D = 1.2×10^5 ····· 57
Figure 3-24 The flow field of the cylinder with the semi-elliptical flat plate at h/H_c = 0.9, β = 0°, Re_D = 1.6×10^5 ····· 57
Figure 3-25 The flow field of the cylinder with the semi-elliptical flat plate at h/H_c = 0.9, β = 5°, Re_D = 4.0×10^4 ····· 58
Figure 3-26 The flow field of the cylinder with the semi-elliptical flat plate at h/H_c = 0.9, β = 5°, Re_D = 8.0×10^4 ····· 58
Figure 3-27 The flow field of the cylinder with the semi-elliptical flat plate at h/H_c = 0.9, β = 5°, Re_D = 1.2×10^5 ····· 59
Figure 3-28 The flow field of the cylinder with the semi-elliptical flat plate at h/H_c = 0.9, β = 5°, Re_D = 1.6×10^5 ····· 59

Figure 3-29 The flow field of the cylinder with the semi-elliptical flat plate at h/H_c = 0.9, β = 10°, Re_D = 4.0×10^4 ····· 60
Figure 3-30 The flow field of the cylinder with the semi-elliptical flat plate at h/H_c = 0.9, β = 10°, Re_D = 8.0×10^4 ····· 61
Figure 3-31 The flow field of the cylinder with the semi-elliptical flat plate at h/H_c = 0.9, β = 10°, Re_D = 1.2×10^5 ····· 61
Figure 3-32 The flow field of the cylinder with the semi-elliptical flat plate at h/H_c = 0.9, β = 10°, Re_D = 1.6×10^5 ····· 62
Figure 3-33 The flow field of the cylinder with the semi-elliptical flat plate at h/H_c = 0.9, β = 10°, Re_D = 3.0×10^4 - 6.0×10^4 · 62
Figure 3-34 The flow field of the cylinder with the semi-elliptical flat plate at h/H_c = 0.7 - 0.9, β = 10°, Re_D = 8.0×10^4 ····· 64
Figure 3-35 NACA0012 airfoil model (Shin, J. W., 2017) ····· 65
Figure 3-36 Change of TVC (Tip Vortex Cavitation) thickness according to Re (Shin, J. W., 2017) ····· 65
Figure 3-37 The SPIV (Stereoscopic PIV) measurement result of the y-z plane at a = 0°, 7° (Shin, J. W., 2017) ····· 66
Figure 3-38 Flow visualization results with the rectangular flat plate at β = 0°, 5°, 10°, Re_D = 4.0×10^4, 8.0×10^4 ····· 67
Figure 3-39 Flow visualization results with the semi-elliptical flat plate at β = 0°, 5°, 10°, Re_D = 4.0×10^4, 8.0×10^4 ····· 68
Figure 3-40 Schematic diagram of $\overline{u}/U_\infty$ analysis domain ····· 69
Figure 3-41 Graph of u/U_∞ with respect to y/D without a flat plate 70
Figure 3-42 Graph of u/U_∞ with respect to y/D with the fin-shaped flat plate ····· 72
Figure 3-43 Graph of u/U_∞ with respect to y/D with the rectangular flat plate ····· 72
Figure 3-44 Graph of u/U_∞ with respect to y/D with the semi-elliptical flat plate ····· 73

기 호 정 의

Re	: Reynolds number	(-)
Re_D	: 원통의 직경을 특성길이로 하는 Reynolds number	(-)
St	: Strouhal number	(-)
B	: 자기장의 세기	(T)
D	: EM-Log 모형의 직경	(m)
H_c	: EM-Log 모형의 높이	(m)
H_p	: 보호가이드 모형의 높이	(m)
I	: Turbulence intensity	(-)
L	: 보호가이드 모형의 길이	(m)
T	: 보호가이드 모형의 두께	(m)
U	: 유속	(m/s)
U_i	: Free stream의 순간 유속	(m/s)
U_g	: 추적입자의 중력방향 속력	(m/s)
U_∞	: Free stream의 평균 유속	(m/s)
V_c	: 자기장을 수직으로 지나는 해류의 속력	(m/s)
V_f	: 자기장을 수직으로 지나는 유체의 속력	(m/s)
V_p	: 입자의 속력	(m/s)
V_s	: 함정의 속력	(m/s)
d_p	: 추적입자의 직경	(m)
g	: 중력가속도	(m/s^2)
h	: PIV 계측면의 높이	(m)
l	: 자기장 단면의 높이	(m)
t	: 시간	(s)
u	: 유속의 x방향 성분	(m/s)
$\overline{u}$	: 유속의 x방향 성분의 평균	(m/s)

Φ_B	: 자속의 크기	(Wb)
α	: 받음각	(deg.)
β	: 편류각	(deg.)
ϵ	: 유도 기전력의 크기	(V)
$\epsilon_{\triangle X}$	: PIV 추적입자의 X방향 변위 오차	(μm)
$\epsilon_{\triangle Y}$	: PIV 추적입자의 Y방향 변위 오차	(μm)
θ	: 2개의 레이저가 이루는 각도	(rad.)
λ	: 레이저의 파장	(nm)
μ	: 유체의 점성계수	(kg/m·s)
ν	: 유체의 동점성계수	(m^2/s)
ρ_f	: 유체의 밀도	(kg/m^3)
ρ_p	: 추적입자의 밀도	(kg/m^3)
σ	: 표준편차	(-)
σ_{U_∞}	: Free stream 유속의 표준편차	(μm)
$\sigma_{\triangle X}$	: PIV 추적입자의 X방향 변위 표준편차	(μm)
$\sigma_{\triangle Y}$	: PIV 추적입자의 Y방향 변위 표준편차	(μm)
ω	: 임펠러 각속도	(rpm)
$\triangle f$	: 주파수의 변화량	(Hz)
$\triangle \overline{u}/U_\infty$	: $\overline{u}/U_\infty$의 차이	(%)
	* 기준값 : EM-Log 모형만 있을 때 β = 0° 조건의 $\overline{u}/U_\infty$	
$\triangle X$	: PIV 추적입자의 X방향 변위	(μm)
$\triangle Y$	: PIV 추적입자의 Y방향 변위	(μm)

제 1 장 서 론

1.1. 연구배경

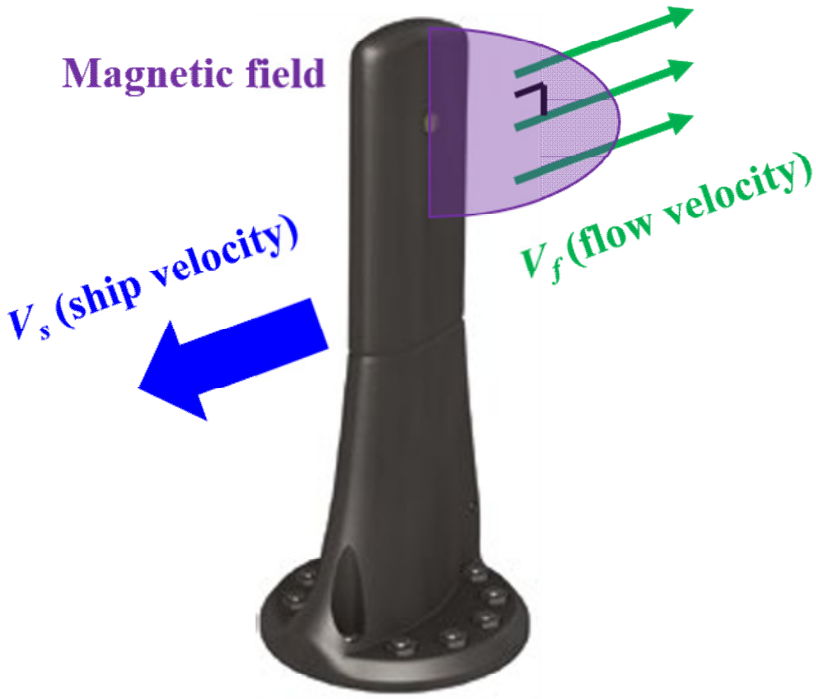
1.1.1. EM-Log의 원리

EM-Log (Electro-Magnetic Log)는 주위 유속을 측정하여 함속을 산출하는 대수속력계이다. Figure 1-1은 EM-Log가 함속을 측정하는 방법을 간단하게 나타낸 모식도이다. EM-Log는 자기장을 생성하고, 생성된 자기장을 수직으로 지나는 유속 성분을 패러데이 법칙으로 측정한다. 패러데이 법칙에 따르면, 함정이 움직이면서 발생하는 유도 기전력의 크기(ε)는 함속과 정비례하며, 계산식은 식(1)과 같다.

$$\epsilon = \frac{d\Phi_B}{dt} = Bl\,V_f = Bl\,(V_s - V_c) \tag{1}$$

ϵ는 유도 기전력의 크기, Φ_B는 자속의 크기, t는 시간, B는 자기장의 세기, l은 자기장 단면의 높이, V_f는 자기장을 수직으로 지나는 유체의 속력, V_s는 함정의 속력, V_c는 자기장을 수직으로 지나는 해류의 속력을 의미한다.

만약, 해류로 인해 편류각(drift angle)이 발생하거나, 선체 부가물에 의해 EM-Log 주위 유동이 교란되면, 유도 기전력의 크기와 함속이 정비례하지 않게 된다. 이런 상황에서 EM-Log는 실제 함속과 다른 값을 산출한다.



Source : https://www.agiltd.co.uk

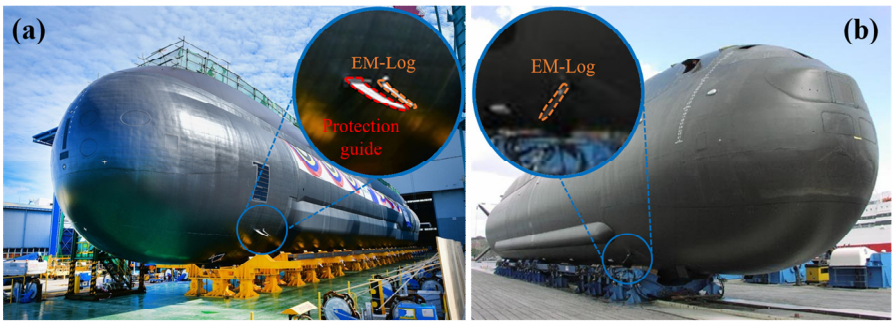
Figure 1-1. Schematic diagram of EM-Log's ship velocity measurement

1.1.2. 잠수함에 설치된 EM-Log와 보호가이드

잠수함은 수상보다 수중에서 더 많은 시간을 항해하는데, 수중에서는 GPS (Global Positioning System) 정보로 함속, 함위를 확인할 수 없다. 따라서, 잠수함은 GPS 정보가 아닌 INS (Inertial Navigation System)와 EM-Log를 통해 함속과 함위를 측정한다.

INS는 자이로스코프로 함정의 가속도를 측정하고, 이를 적분하여 함속과 함위를 계산한다. INS가 측정하는 가속도의 오차는 매우 작지만, 적분으로 함속과 함위를 계산하는 INS의 특성으로 인해 시간이 갈수록 함속과 함위의 오차가 누적되는 문제가 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 잠수함은 EM-Log로 측정한 함속 정보를 이용하여 INS의 오차를 보상한다. 정확한 함속과 함위를 아는 것은 잠수함의 안전한 항해를 위한 필수 요소이므로 EM-Log가 정확한 함속을 측정하는 것은 중요하다.

EM-Log는 잠수함의 선체에 돌출된 채 설치되어 해양 부유물에 의해 손상될 가능성이 존재한다. 이를 방지하기 위해 대한민국 해군의 잠수함은 EM-Log 전방에 지느러미 형상의 보호가이드 (protection guide)를 부착한다. Figure 1-2의 (a)는 대한민국 해군 신채호함의 사진이며, EM-Log 전방에 위치한 보호가이드를 확인할 수 있다. 반면, 타국의 잠수함은 보호가이드로 인한 EM-Log 주변 유동의 교란으로 부정확한 함속이 측정되는 것을 방지하기 위해 Figure 1-2의 (b)와 같이 보호가이드를 부착하지 않는다.



Source : https://www.korea.kr　　Source : https://www.econovill.com

Figure 1-2. (a) Republic of Korea navy SS-086.
(b) German navy U-32

1.2. 연구목표

본 연구의 목표는 보호가이드가 EM-Log에 미치는 영향을 실험을 통해 확인하는 것이다. 보호가이드 후방의 후류(wake)에서 발달된 와류(vortex)는 EM-Log 주위 유동을 급격하게 변화시킨다. 본 연구는 실험을 통해 보호가이드 유무에 따른 EM-Log 주위 유동 변화를 확인하고, 보호가이드가 EM-Log에 미치는 영향을 분석하는 것을 목표로 한다.

1.3. 연구내용

본 연구는 서울대학교 캐비테이션 터널에서 PIV (Particle Image Velocimetry)와 유동 가시화 기법을 이용하여 전방의 보호가이드가 후방의 EM-Log 주위 유동에 미치는 영향을 관측하였으며, 보호가이드와 EM-Log의 형상은 평판과 원통으로 단순화하여 모사하였다. 보호가이드의 형상은 지느러미 형상뿐만 아니라 직사각형 형상과 반타원형 형상까지 총 3개의 형상을 사용하였다. 실험의 변수는 보호가이드의 형상, PIV 계측 위치, 편류각, Re (Reynolds number)이며, 실험 조건은 실제 잠수함과 EM-Log의 특성을 고려하여 설정하였다.

1.4. 선행연구

1.4.1. 원통과 평판 주위 유동에 관한 실험적 연구

Yucel, S.B. et al. (2010)은 Figure 1-3과 같이 전방의 원통과 후방의 평판에서 발생하는 유동 현상을 PIV를 활용하여 분석하였다. 실험은 다양한 유속 조건(Re = 200, 400, 750)에서 수평거리(G)와 수직거리(Z)를 변화시키며 수행되었으며, Figure 1-4와 같이 G/D와 Z/D가 임계점을 지나면 St (Strouhal number)가 수렴한다고 분석하였다.

임계점은 G/D = 3.0, Z/D = 0.7이며, 임계점에서 원통과 평판이 이루는 받음각(a)은 10°이다.

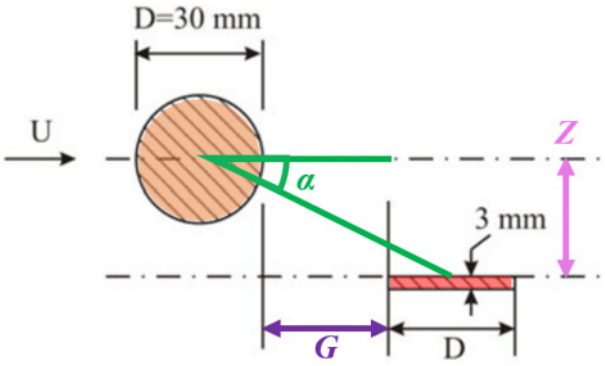


Figure 1-3. Sketch of experimental models (Yucel, S.B. et al., 2010)

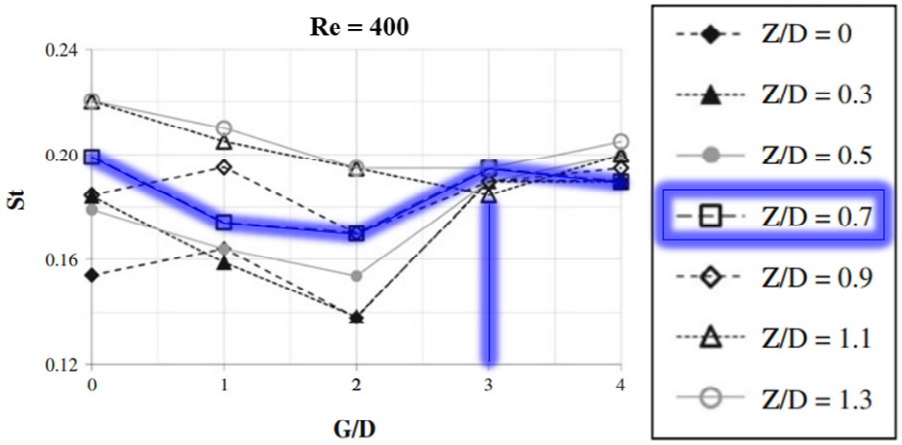


Figure 1-4. Variation of *St* with horizontal spacing *G/D* for different vertical distances *Z/D* at *Re* = 400 (Yucel, S.B. et al., 2010)

1.4.2. 2개의 원통 주위 유동에 관한 실험적 연구

Alam, M.M. & Meyer, J.P. (2013)는 Figure 1-5와 같이 2개의 원통에서 발생하는 유동 현상을 load cell과 hydrogen bubble technique을 활용하여 분석하였다. 실험은 $Re = 5.5 \times 10^4$에서 수평거리(T)와 받음각(a)을 변화시키며 수행되었으며, Figure 1-6과 같이 수평거리와 받음각에 따라 유동 현상을 여섯 종류로 분류하고 영역을 나누었다.

Figure 1-6에서 붉은색 점선으로 표시된 부분은 본 연구에서 보호가이드 모형과 EM-Log 모형이 설치되는 것과 유사한 수평거리와 받음각 조건의 영역이며, 해당 영역에서 유동 현상이 변화하는 임계점은 $a \approx 20°$이다.

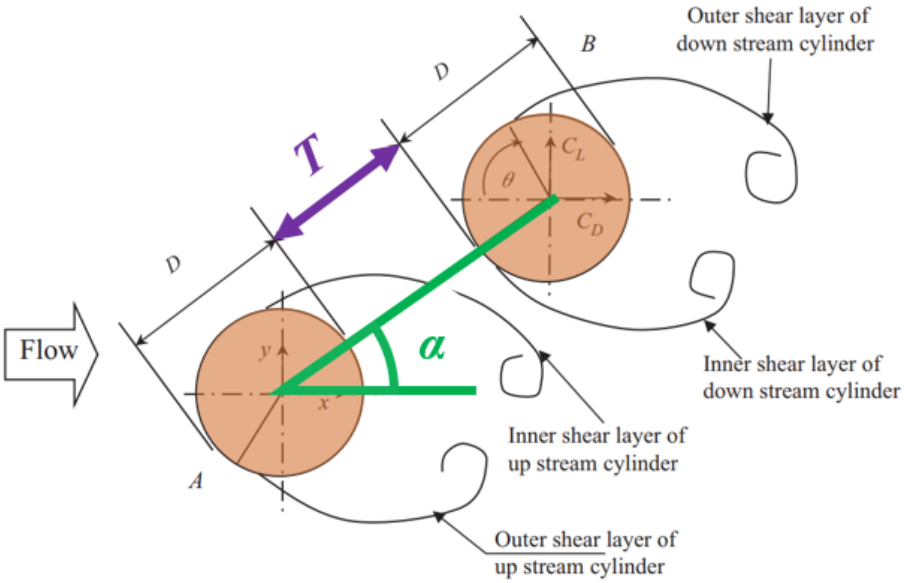


Figure 1-5. Arrangement of cylinders and definitions of symbols (Alam, M.M. & Meyer, J.P., 2013)

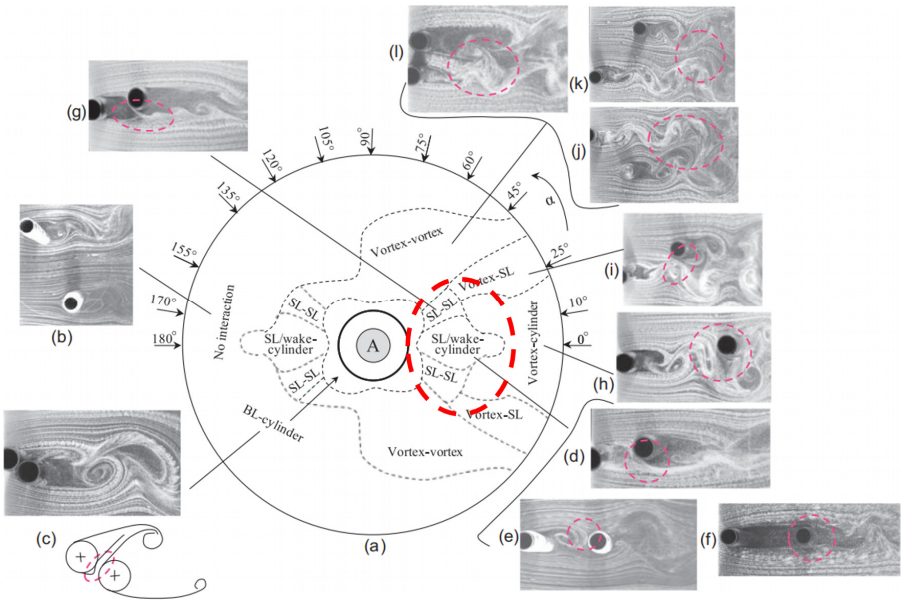


Figure 1-6. Interaction regimes in T/D – a plane (Alam, M.M. & Meyer, J.P., 2013)

1.4.3. 전산유체역학을 이용한 원통과 평판 주위 유동에 관한 연구

Serson, D. et al. (2014)은 Figure 1-7과 같이 전방의 원통과 후방의 평판에서 발생하는 유동 현상에 대해 CFD (Computational Fluid Dynamics) 해석을 수행하였다. 해석은 Re = 100 - 350에서 수평거리(g)와 평판의 길이(L)를 변화시키며 수행되었으며, Figure 1-8과 같이 2차원 CFD 해석과 3차원 CFD 해석의 St를 비교하였다.

Figure 1-8에서 붉은색 점선으로 표시된 부분과 같이 Re = 300 조건은 2차원 CFD 해석과 3차원 CFD 해석 간 결과의 차이가 존재한다. Re = 200 조건은 이러한 차이가 나타나지 않는다.

Serson, D. et al. (2014)은 Re = 300 조건에서 2차원 CFD 해석과 3차원 CFD 해석 간 결과의 차이가 발생하는 원인을 Re 증가에 따른 3차원 효과 발생으로 규명하였다.

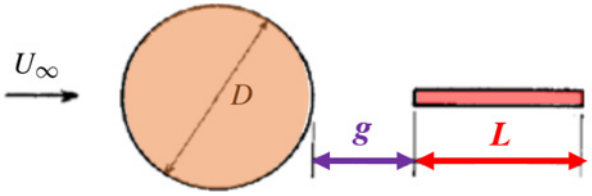


Figure 1-7. Schematic drawing of the geometry studied (Serson, D. et al., 2014)

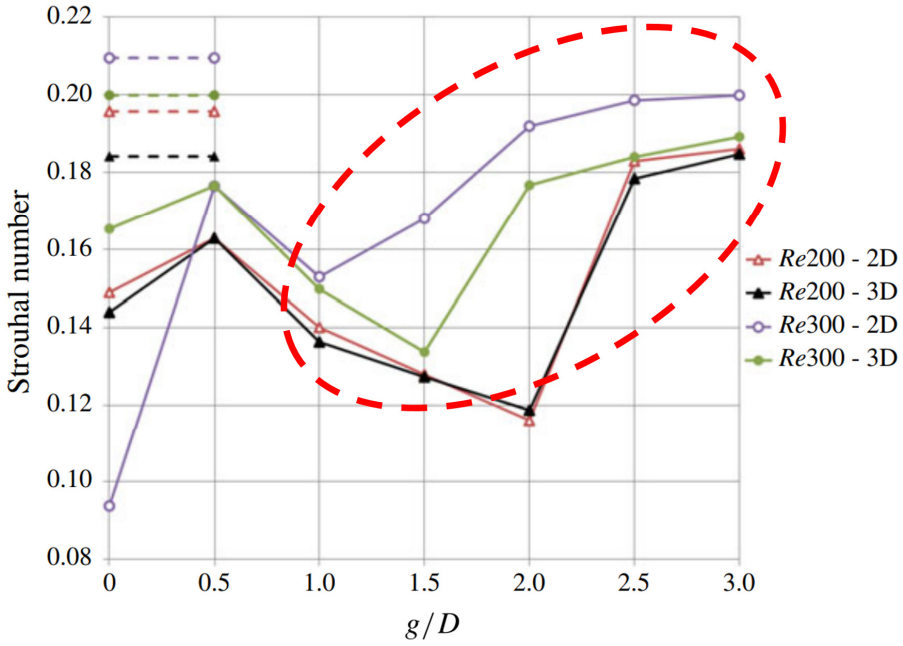


Figure 1-8. Comparison between St for different gaps obtained from 2-D and 3-D simulations for a cylinder with a splitter plate with L/D = 1 (Serson, D. et al., 2014)

1.4.4. 선행연구 조사 결과

선행연구 조사 결과, 전방의 평판과 후방의 원통에서 발생하는 유동 현상을 연구한 사례는 많지 않았으며, 대부분 선행연구가 Re가 1,000보다 작은 조건에서 실험 및 해석을 수행하였다.

선행연구 조사 결과만으로 보호가이드가 EM-Log에 미치는 영향을 추론하는 것이 제한되므로, 본 연구에서는 보호가이드와 EM-Log 주위 유동에 관한 모형실험을 수행하였다.

제 2 장 실험 설계

2.1. 실험 설비 및 장비

2.1.1. 캐비테이션 터널

본 연구는 서울대학교 선형수조실험동에 설치된 캐비테이션 터널에서 수행하였다. 캐비테이션 터널은 2022년 1월에 완전분해수리(overhaul) 및 시운전을 완료하였으며, 완전분해수리를 통해 임펠러 및 모든 밸브를 하나의 패널에서 원격으로 동작할 수 있도록 체계를 재구성하였다. 캐비테이션 터널의 구조는 Figure 2-1과 같으며, 제원은 Table 2-1과 같다.

임펠러 블레이드에서 발생하는 공동현상을 최소화하기 위해 임펠러는 캐비테이션 터널의 하단에 설치되고 임펠러의 회전운동에 의해 회류하는 터널 내부 유체는 관측부(test section) 앞에 위치한 허니콤(honeycomb)을 통과하며 균일류로 정류된다.

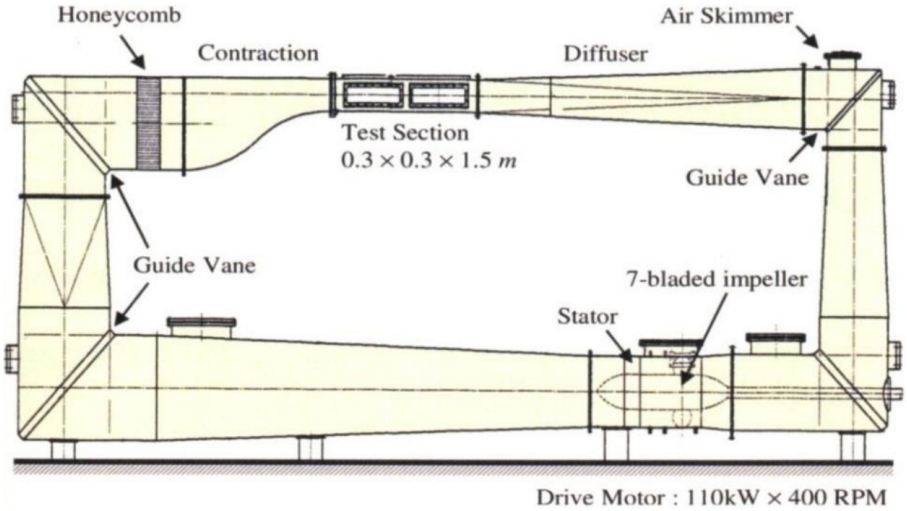


Figure 2-1. Cavitation tunnel in Seoul National University

Table 2-1. Specifications of cavitation tunnel in Seoul National University

Items	Value
Material	Stainless steel
Total length / height of the cavitation tunnel	9.03 m / 3.33 m
Length / width / height of test section	1.5 m / 0.3 m / 0.3 m
Pressure range	0.15 - 3.00 bar
Max. flow velocity in test section	13.5 m/s

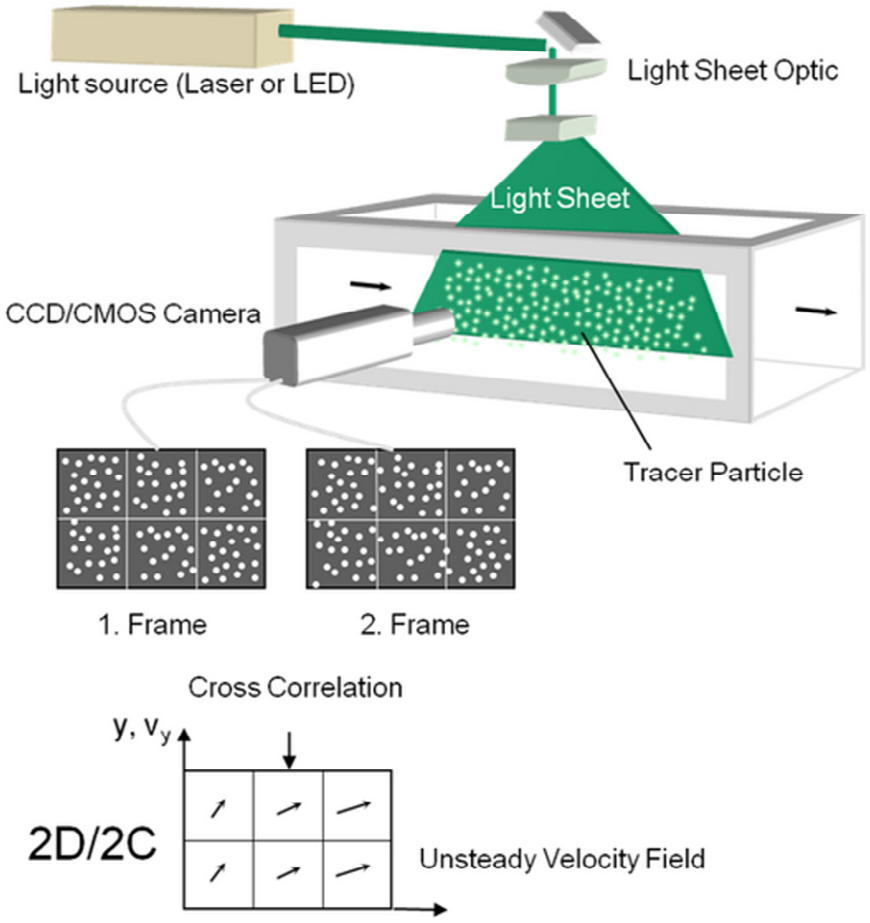
2.1.2. PIV (Particle Image Velocimetry) system

2.1.2.1. PIV 원리

PIV의 주요 구성품은 laser, laser sheet optics, 카메라이다. PIV는 laser에서 나온 laser beam을 laser sheet optics를 통해 laser sheet 형태로 변환하고, 계측하고자 하는 유동장에 laser sheet를 조사한다. laser sheet에 조사된 추적입자는 빛을 반사하고, 반사된 빛을 카메라를 활용하여 미소 시간 간격으로 촬영한다. 촬영한 영상을 조사영역(interrogation window)으로 분할하고, 조사영역마다 미소 시간 동안 변화한 추적입자의 분포 양상을 상호상관기법(cross correlation)으로 분석한다. 추적입자의 분포 양상이 변화한 거리를 미소 시간으로 나누어 각 조사영역마다의 속도를 계측하는 것이 PIV의 원리이다.

추적입자의 밀도가 유체의 밀도와 비슷할수록 정확한 PIV 계측 결과를 얻을 수 있으며, 촬영은 CCD (Charge Coupled Device) 카메라나 CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 카메라를 사용하는 것이 일반적이다.

본 연구에서는 2차원 평면을 지나는 유체의 2가지 유속 성분을 계측할 수 있는 2-D 2-C PIV (Two-Dimensional Two-Components Particle Image Velocimetry) system을 사용하여 보호가이드와 EM-Log 주위 유동을 계측하였다. Figure 2-2는 2-D 2-C PIV system이 유동장을 계측하는 원리를 간단하게 나타낸 모식도이다.



Source : https://www.optolution.com

Figure 2-2. Schematic diagram of flow velocity measurement of PIV

2.1.2.2. PIV system 구성

2-D 2-C PIV system은 LaVision GmbH (Göttingen, Germany)에서 설계하였으며, laser, laser sheet optics, CCD 카메라 2대, PTU (Programmable Timing Unit)가 내장된 system computer로 구성된다.

Figure 2-3은 서울대학교 캐비테이션 터널에 설치된 2-D 2-C PIV system을 간단하게 나타낸 모식도이며, Figure 2-4는 실제 2-D 2-C PIV system의 사진이다.

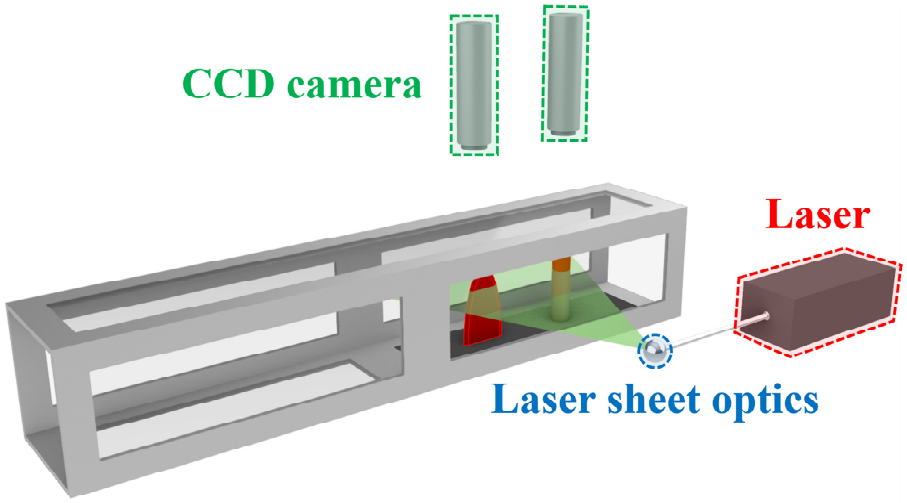


Figure 2-3. Schematic diagram of 2-D 2-C PIV system

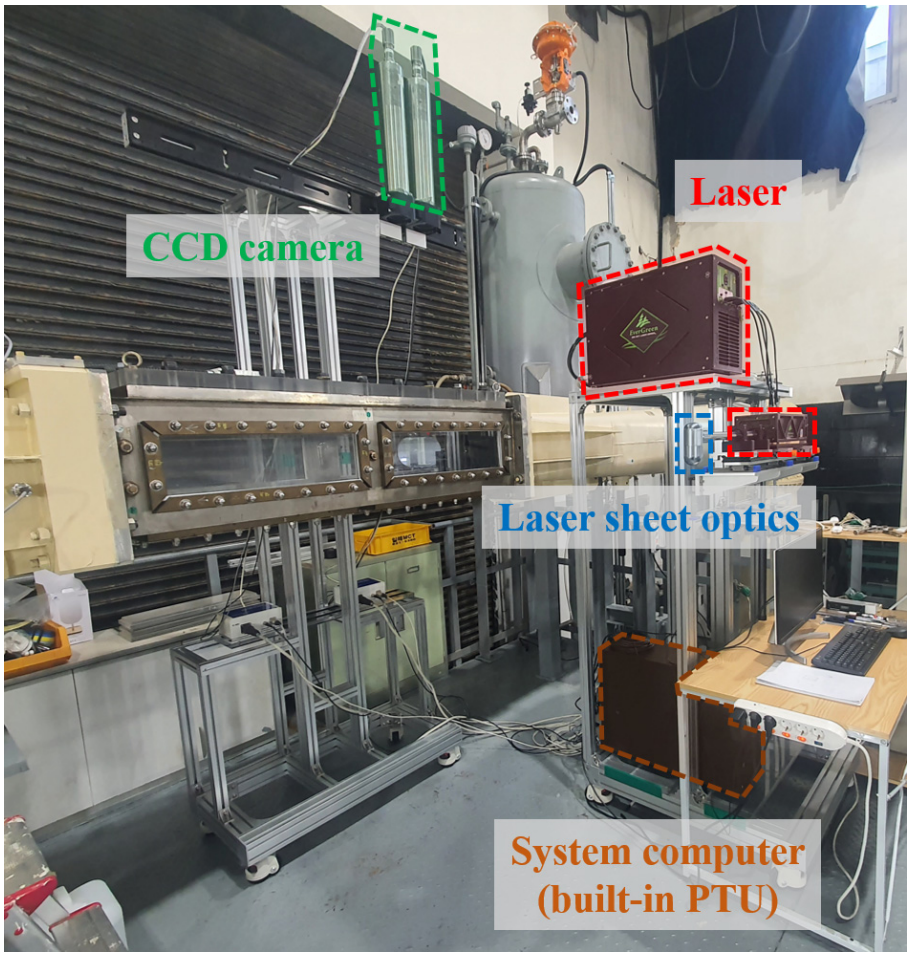


Figure 2-4. 2-D 2-C PIV system

Laser는 Quantel laser (Les Ulis, France)에서 제조한 EverGreen 200을 사용하였다. EverGreen 200은 수냉식 dual head Nd:YAG laser이며, 형상과 주요 제원은 Figure 2-5, Table 2-2와 같다.

Source : https://www.quantel-laser.com

Figure 2-5. EverGreen 200 power supply and laser head

Table 2-2. Specifications of EverGreen 200

Items	Value
Wavelength	532 nm
Max. pulse power	200 mJ
Max. repetition rate	15 Hz

Laser sheet optics는 점 형태로 방출되는 laser beam을 면 형태의 laser sheet로 변환해주는 장비이며, Figure 2-6은 laser sheet optics가 작동하는 방법에 대한 모식도이다.

Figure 2-7은 laser sheet optics의 형상이다. laser sheet optics는 support tube를 통해 laser head와 결합된다. laser sheet optics는 2개의 축을 기준으로 회전이 가능하며, support tube에는 lens의 위치를 조절할 수 있는 control dial이 존재한다. laser sheet optics의 회전과 lens의 위치 조절을 통해 laser sheet의 두께와 위치를 설정할 수 있다.

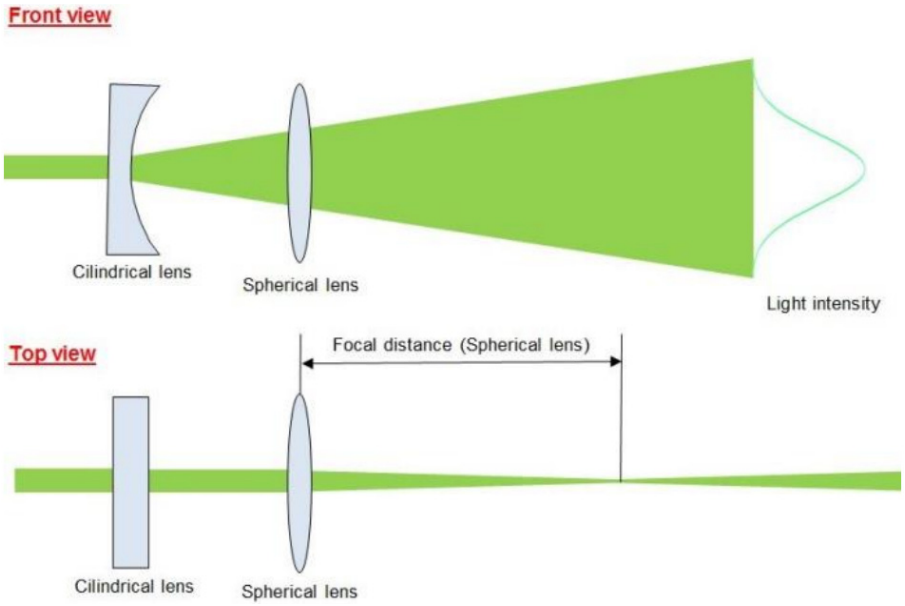


Figure 2-6. Schematic diagram of laser sheet optics (ITTC, 2014)

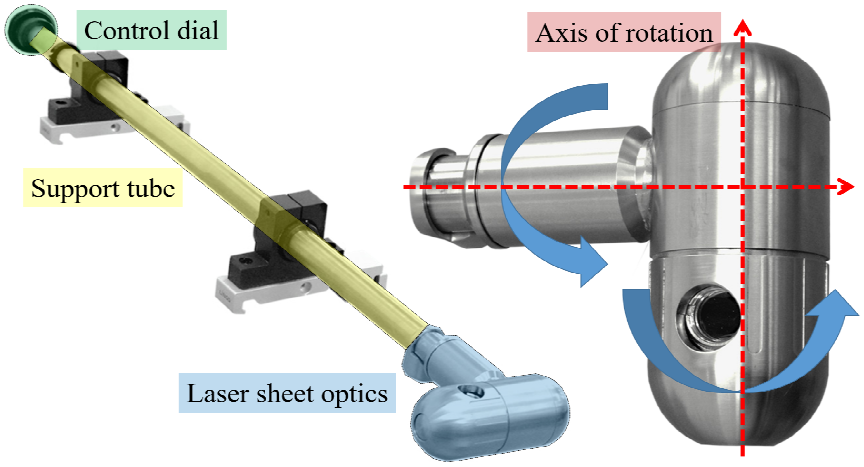


Figure 2-7. Laser sheet optics

CCD 카메라는 LaVision (GmbH, Göttingen, Germany)에서 제조한 Imager pro SX 5M 2대를 사용하였다.

CCD 카메라는 카메라 렌즈, scheimpflug angle adaptor와 결합된 상태로 hollow tube 내에 설치된다. Figure 2-8은 CCD 카메라의 형상이다. 카메라 렌즈는 Canon EF 50 mm f/1.4 USM (Canon, Tokyo, Japan)을 사용하였다.

Imager pro SX 5M의 주요 제원은 Table 2-3과 같다.

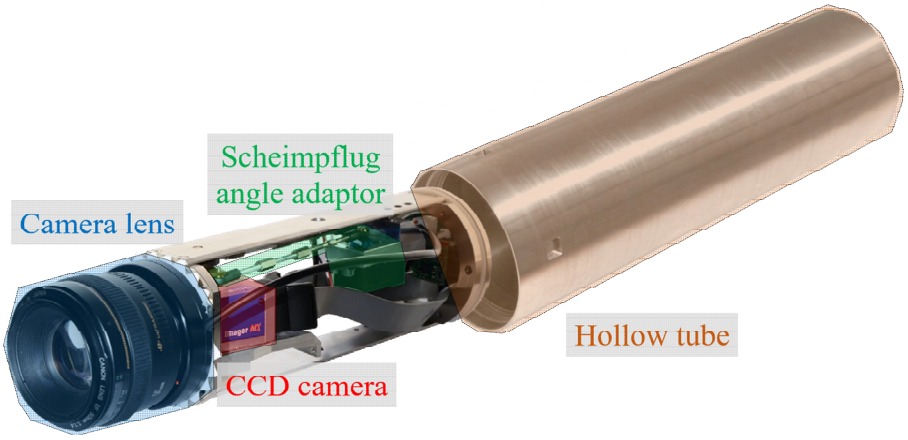


Figure 2-8. CCD camera

Table 2-3. Specifications of Imager pro SX 5M

Items	Value
Resolution	2448 × 2050 pixels with 12-bit dynamic range
Min. time interval	600 ns
Max. frame rate	14.2 fps (frames per second)

2.1.3. LDV (Laser Doppler Velocimetry) system

2.1.3.1. LDV 원리

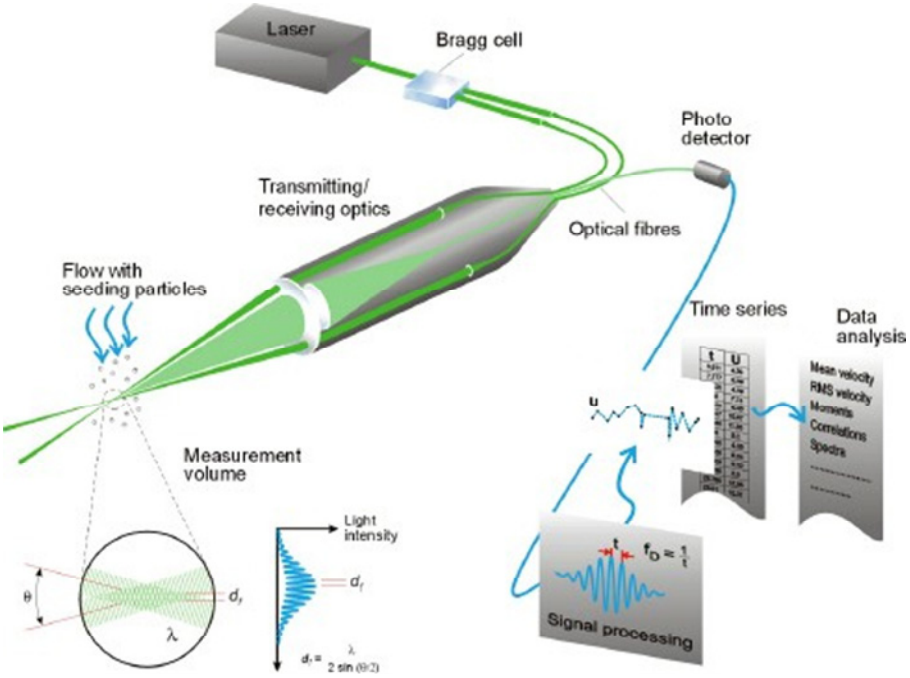
LDV의 주요 구성품은 laser, laser beam splitter, probe이다. LDV는 laser에서 나온 하나의 laser beam을 laser beam splitter를 통해 2개의 laser으로 나눈다. 2개로 나뉜 laser는 probe에서 일정한 각도를 이룬 채 한 점을 향해 조사되며, 점을 지나는 유체입자는 빛을 반사한다. 유체입자가 반사하는 빛은 도플러 원리에 따라 주파수가 변화하며, 변화한 주파수를 계측하여 식(2)와 같이 유체의 속력을 계산하는 것이 LDV의 원리이다.

$$V_p = \frac{\lambda \triangle f}{2\sin(\theta/2)} = V_f \tag{2}$$

V_p는 입자의 속력, λ는 레이저의 파장, $\triangle f$는 주파수의 변화량, θ는 2개의 레이저가 이루는 각도, V_f는 유체의 속력을 의미한다.

본 연구에서는 유속의 3가지 성분 중 1가지 성분만 실시간으로 계측 가능한 1-D LDV System (One-Dimensional Laser Doppler Velocimetry)을 사용하여 임펠러 각속도에 따른 캐비테이션 터널 내 유속을 계측하였다. 유속 계측 data를 통계적 기법으로 분석하고 ITTC (2021)의 권고치와 비교하여 캐비테이션 터널 내 유동이 균일류임을 검증하였다.

Figure 2-9는 LDV system이 유속을 계측하는 원리를 간단하게 나타낸 모식도이다.



Source : https://www.dantecdynamics.com

Figure 2-9. Schematic diagram of flow velocity measurement of LDV

2.1.3.2. 1-D LDV system 구성

1-D LDV system은 Dantec Dynamics A/S (Skovlunde, Denmark)에서 설계하였으며, laser, laser beam splitter, probe로 구성된다.

Figure 2-10은 서울대학교 캐비테이션 터널에 설치된 1-D LDV system을 간단하게 나타낸 모식도이며, Figure 2-11은 실제 1-D LDV system의 사진이다.

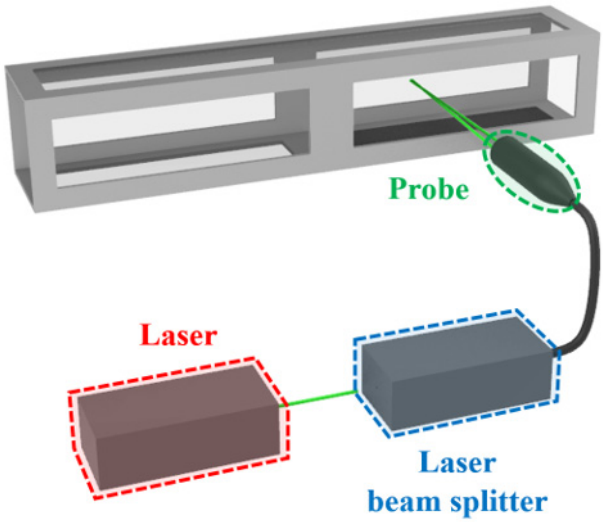


Figure 2-10. Schematic diagram of 1-D LDV system

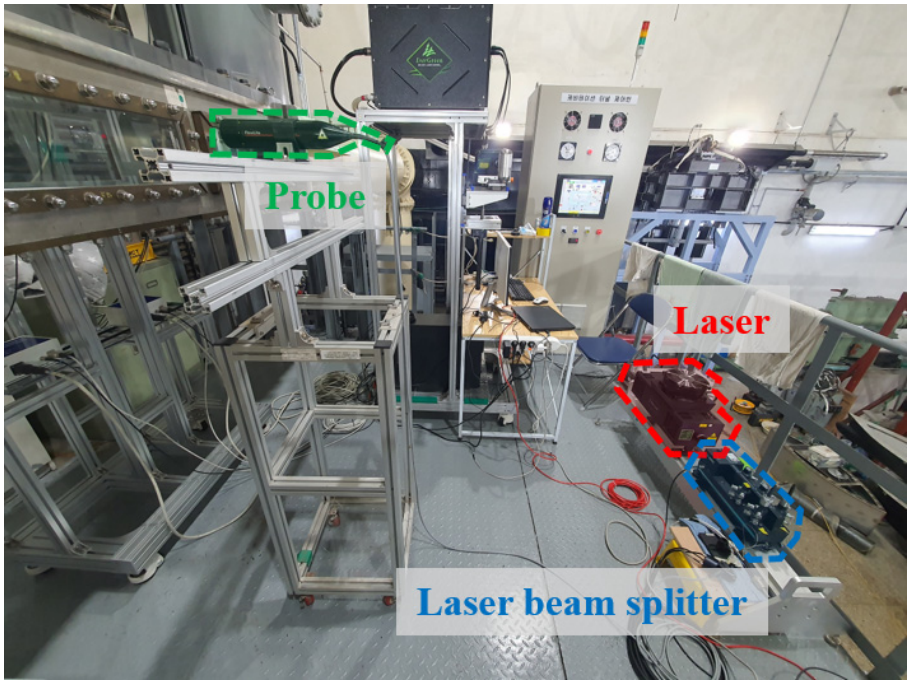


Figure 2-11. 1-D LDV system

Laser는 Modu-Laser (Centerville, USA)에서 제조한 Stellar-Pro-L Multi-Line/300을 사용하였다. Stellar-Pro-L Multi-Line/300은 공랭식 argon ion laser이며, 형상과 주요 제원은 Figure 2-12, Table 2-4와 같다.

Source : https://modu-laser.com

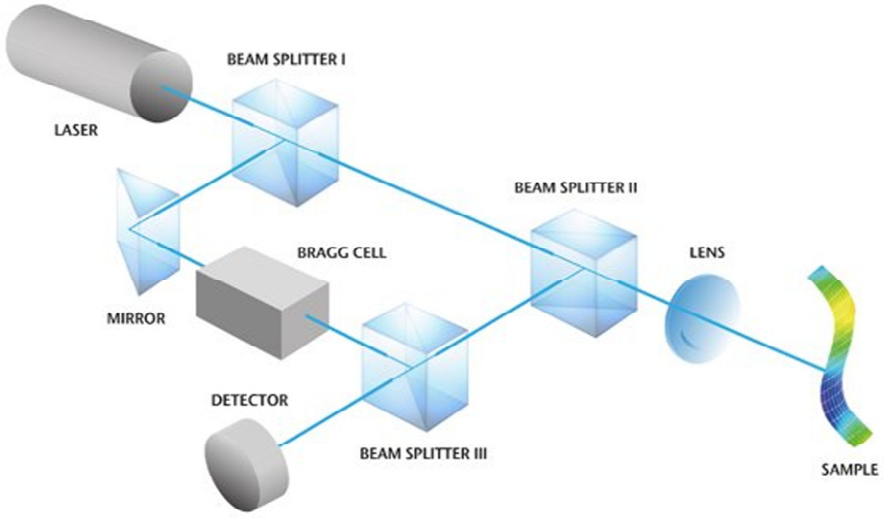
Figure 2-12. Stellar-Pro-L Multi-Line/300

Table 2-4. Specifications of Stellar-Pro-L Multi-Line/300

Items	Value
Wavelength	457.9 - 514.5 nm
Max. total output power	300 mW
Beam diameter	0.75 mm

Laser beam splitter는 laser에서 방출되는 하나의 laser beam을 2개로 나눠주는 장비이며, laser beam splitter의 구성품 중 하나인 bragg cell은 나눠진 laser beam의 주파수를 이동시킨다. Figure 2-13은 laser beam splitter가 작동하는 방법에 대한 모식도이다.

Laser beam splitter는 Dantec Dynamics A/S (Skovlunde, Denmark)에서 제조한 55 × 37 interference filter 514.5 nm를 사용하였으며, 나눠진 laser beam의 주파수는 40 MHz 이동된다. Figure 2-14는 55 × 37 interference filter 514.5 nm의 사진이다.



Source : https://www.polytec.com

Figure 2-13. Schematic diagram of laser beam splitter

Source : www.dantecdynamics.com

Figure 2-14. 55 × 37 interference filter 514.55 nm

Probe는 유속을 직접적으로 계측하는 장비이다. Probe는 Dantec Dynamics A/S (Skovlunde, Denmark)에서 제조한 60 × 61 FlowLite waterproof LDV probe를 사용하였다..

60 × 61 FlowLite waterproof LDV probe의 형상과 주요 제원은 Figure 2-15, Table 2-5와 같다.

Figure 2-15. 60 × 61 FlowLite waterproof LDV probe

Table 2-5. Specifications of 60 × 61 FlowLite waterproof LDV probe

Items	Value
Laser beam diameter	1.35 mm
Laser beam spacing	38 mm
Focal length	399.5 mm

2.1.4. 초고속 카메라

본 연구에서 사용한 초고속 카메라는 Fastcam mini ux50 (Photron, Tokyo, Japan)이며, 초고속 카메라로 가시화된 유동을 촬영하였다.

Fastcam mini ux50의 형상과 주요 제원은 Figure 2-16, Table 2-6과 같다.

Source : https://www.photron.com

Figure 2-16. Fastcam mini ux50

Table 2-6. Specifications of Fastcam mini ux50

Items	Value
Max. frame rate	2,500 fps (at 1280 × 800 pixels)
	2,000 fps (at 1280 × 1024 pixels)
Light sensitivity	ISO 10,000 monochrome
	ISO 5,000 color

2.2. 실험 대상

2.2.1. EM-Log 모형

본 연구에 사용된 EM-Log 모형은 실제 EM-Log의 형상을 참고하여 원통으로 제작한 축소 모형이다. 보안을 고려하여 축척비는 공개 불가하다. 실제 EM-Log와 모형의 형상은 Figure 2-17과 같으며, EM-Log 모형의 주요 제원은 Table 2-7와 같다.

Figure 2-17. (a) EM-Log (AGI Ltd, 2017), (b) Cylinder

Table 2-7. Specifications of cylinder

Items	Value
Material	Al6061 with anodizing
Diameter (D)	38.5 mm
Height (H_c)	150 mm

2.2.2. 보호가이드 모형

본 연구에 사용된 보호가이드 모형은 총 세 종류이다. Figure 2-18의 (a)는 실제 잠수함에 부착된 보호가이드의 형상을 참고하여 제작한 지느러미 형상(fin-shaped)의 평판이다. Figure 2-18의 (b), (c)는 첫 번째 모형과 동일한 길이, 두께, 높이를 가지는 직사각형(rectangular), 반타원형(semi-elliptical) 형상의 평판이다. 보안을 고려하여 축척비는 공개 불가하다.

모든 보호가이드 모형의 가장자리는 날이 있도록 가공하였으며, 형상과 주요 제원은 Figure 2-18, Table 2-8과 같다.

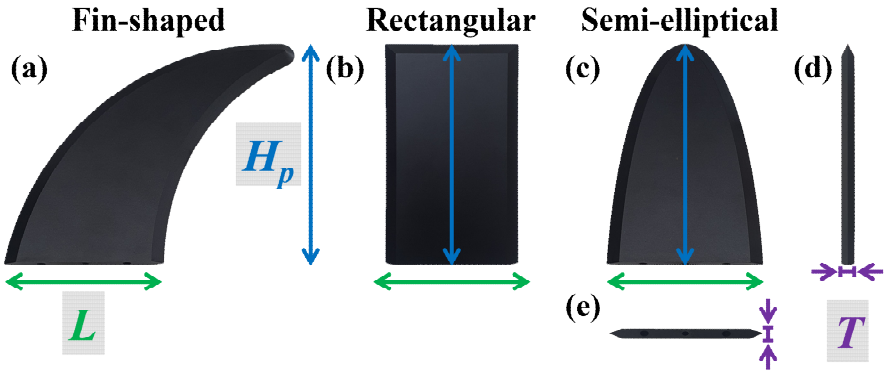


Figure 2-18. (a) Fin-shaped flat plate, (b) Rectangular flat plate, (c) Semi-elliptical flat plate, (d) Front view of flat plates, (e) Top view of flat plates

Table 2-8. Specifications of flat plates

Items	Value
Material	Al6061 with anodizing
Length (L)	94 mm
Height (H_p)	155 mm
Thickness (T)	9.4 mm

2.3. 모형 설치

모형은 model mount window에 설치되며, model mount window는 캐비테이션 터널 관측부(test section)에 설치된다. Figure 2-19는 모형 설치에 대한 모식도이며, Figure 2-20은 모형이 설치된 캐비테이션 터널 관측부의 사진이다.

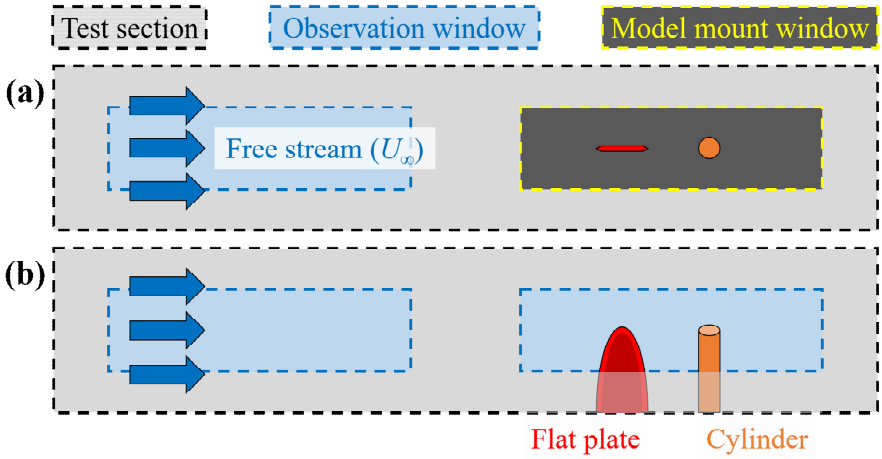


Figure 2-19. Schematic diagram of flat plate and cylinder in cavitation tunnel, (a) Top view, (b) Side view

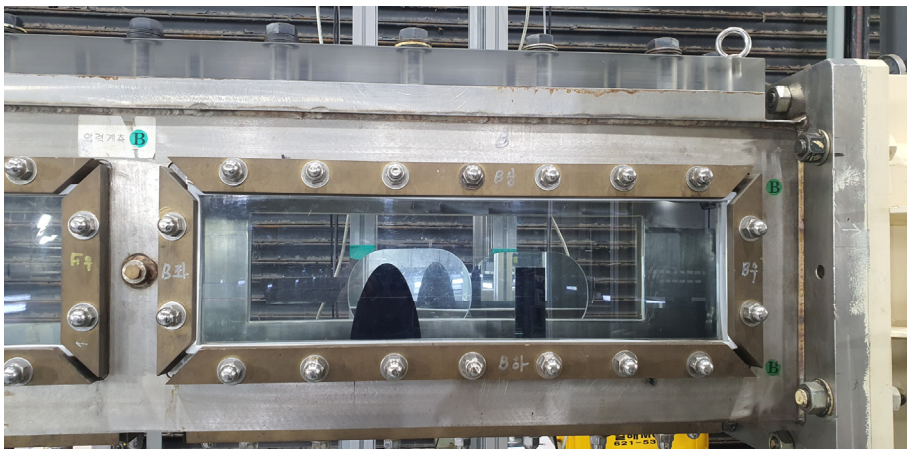


Figure 2-20. Observation window of cavitation tunnel

EM-Log 모형은 model mount window에 직접 설치되며, 보호가이드 모형은 각도조절 mount가 있는 adaptor를 통해 model mount window에 설치된다. adapotr의 각도조절 monut로 보호가이드 모형의 편류각을 변경하여도 보호가이드 모형과 EM-Log 모형 간 수평거리(G)는 3D로 일정하게 유지된다.

Figure 2-21은 EM-Log 모형과 보호가이드 모형이 model mount window에 설치된 형상을 나타낸 모식도이다.

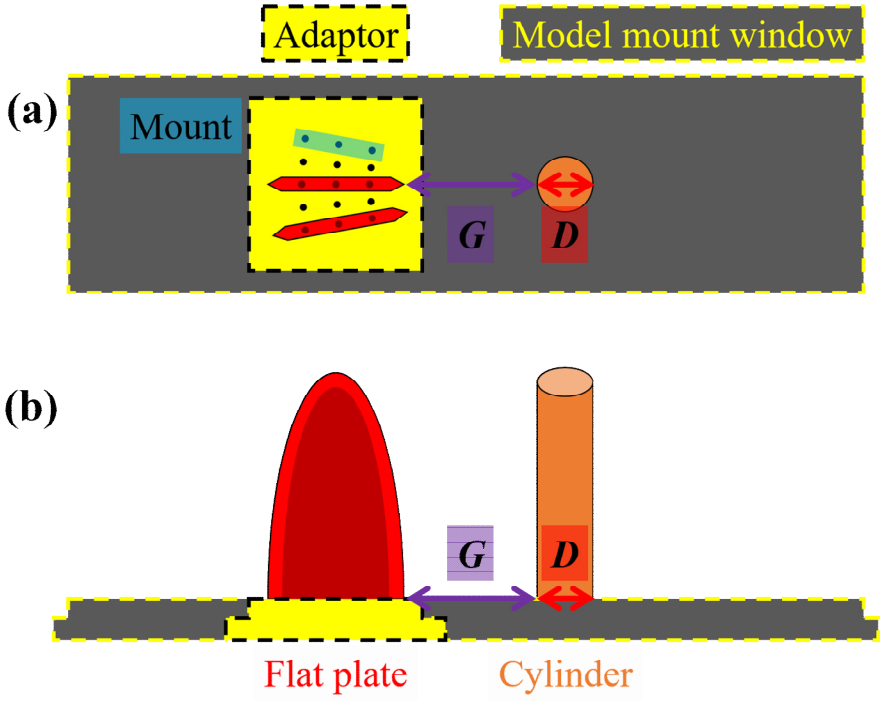


Figure 2-21. Schematic diagram of model mount window and coordinate system, (a) Top view, (b) Side view

모형의 그림자로 인해 Figure 2-22의 (a)와 같이 음영구역이 발생한다. 음영구역은 Figure 2-22의 (b)와 같이 반사경(reflector)을 설치하여 제거하였다.

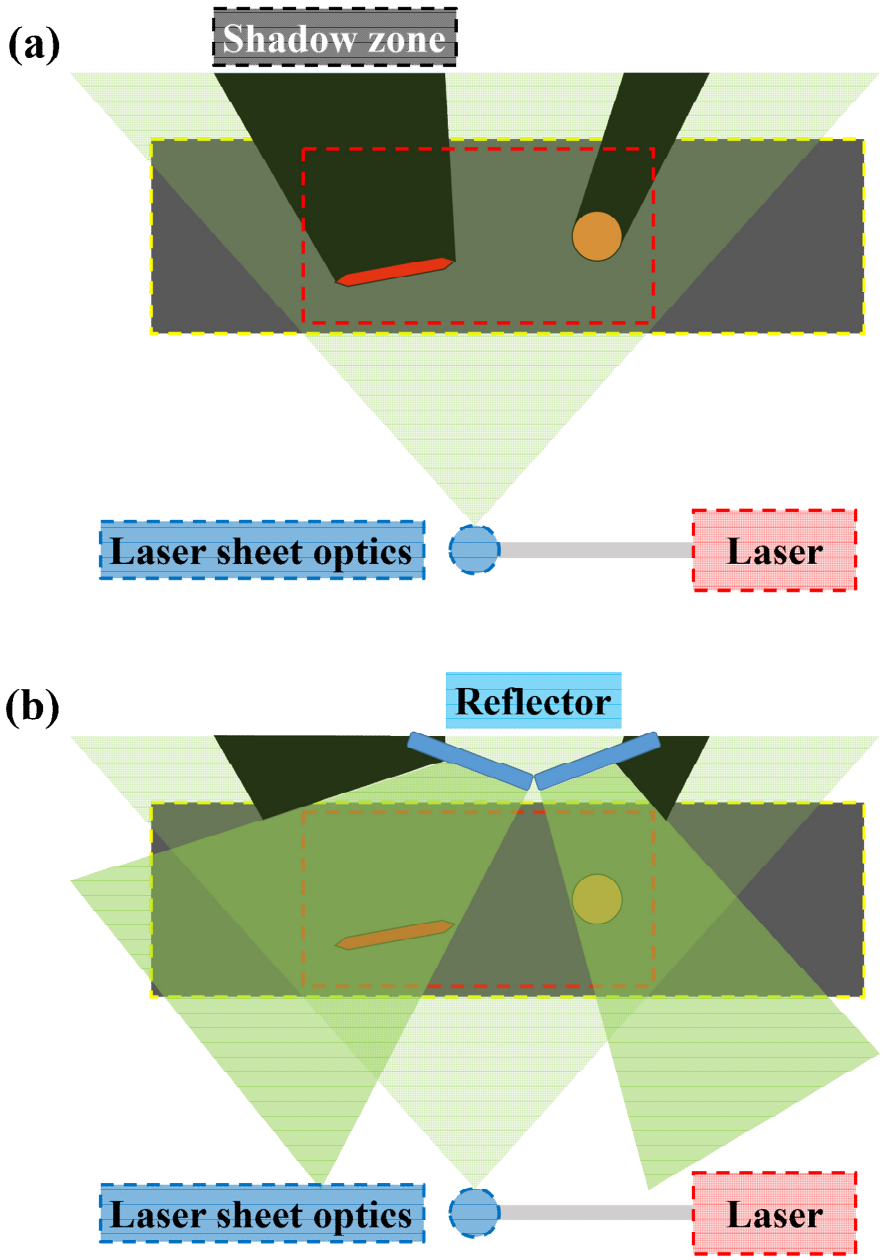


Figure 2-22. (a) No reflectors to remove the shadow zone
(b) With reflectors to remove the shadow zone

2.4. 좌표계 설정

좌표계는 EM-Log 모형 중심(O)을 원점으로 하는 X-Y 직교좌표계를 절대좌표계로 설정하였으며, 결과 해석을 위해 편류각(β)에 따라 회전하는 x-y 직교좌표계를 추가로 설정하였다.

PIV 계측면의 위치는 절대좌표계 기준 $-6.1D \leq X \leq 0.75D$, $-1.5D \leq Y \leq 1.5D$에 해당하며, 계측면은 바닥과 평행하게 h만큼 떨어져 있다.

Figure 2-23은 X-Y 직교좌표계와 PIV 계측면의 위치를 나타낸 모식도이며, Figure 2-24는 x-y 직교좌표계를 나타낸 모식도이다.

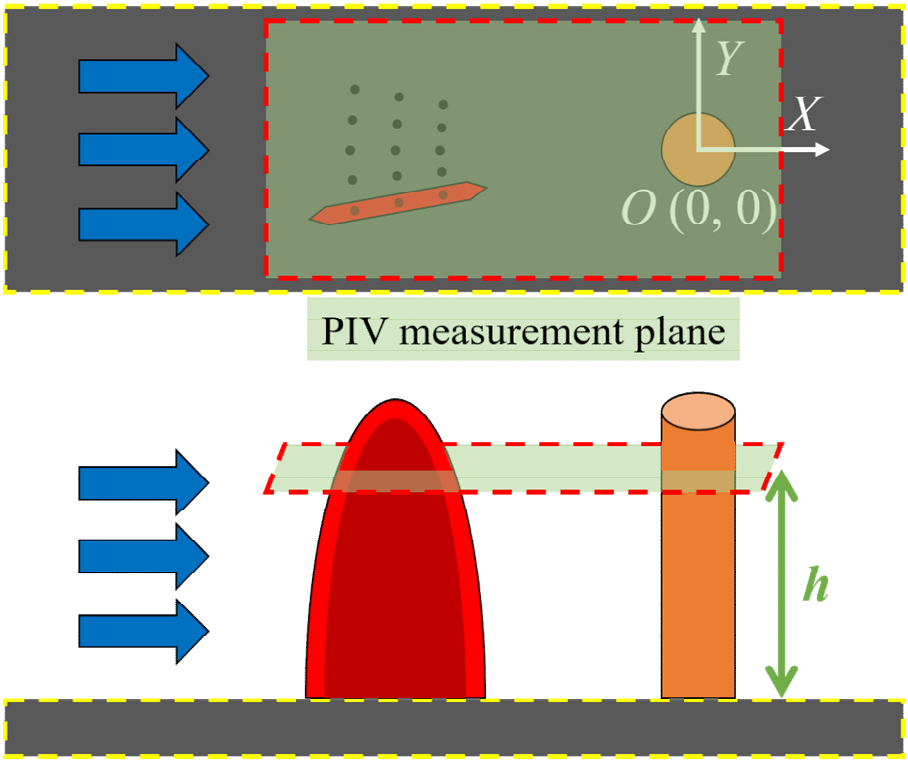


Figure 2-23. Schematic diagram of the X-Y coordinate system and the PIV measurement plane

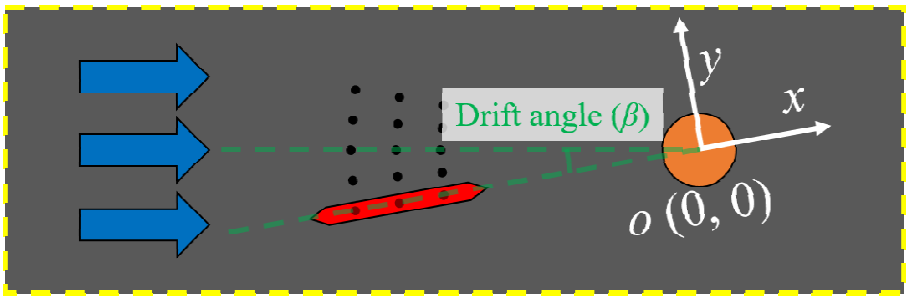


Figure 2-24. Schematic diagram of the x-y coordinate system

2.5. 실험 조건

2.5.1. PIV 계측면의 높이(h/H_c)

EM-Log가 생성하는 자기장의 위치를 고려하여 PIV 계측면의 높이를 실험 변수로 선정하였으며, PIV 계측면의 실험 조건은 h/H_c = 0.7, 0.8, 0.9로 설정하였다.

Figure 2-25는 EM-Log의 전극(electrode)에서 생성되는 자기장(magnetic field)과 EM-Log 모형을 나타낸 모식도이다.

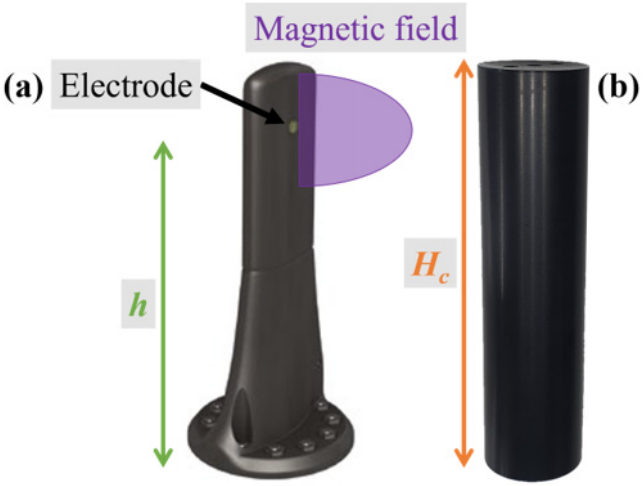


Figure 2-25. (a) Schematic diagram of EM-Log's magnetic field, (b) Cylinder

2.5.2. 편류각(β)

잠수함의 함속과 주로 운용하는 심도의 해류를 고려하여 편류각을 실험 변수로 선정하였다. 편류각 실험 조건은 유사한 형상을 대상으로 수행한 김재훈 등(2022)의 2차원 CFD 해석 결과를 참고하여 β = 0°, 5°, 10°로 설정하였다.

2차원 CFD 해석 결과, Figure 2-26, Table 2-9와 같이 β = 10°에서 유동장과 항력계수가 급격히 변화하는 것을 확인하였다.

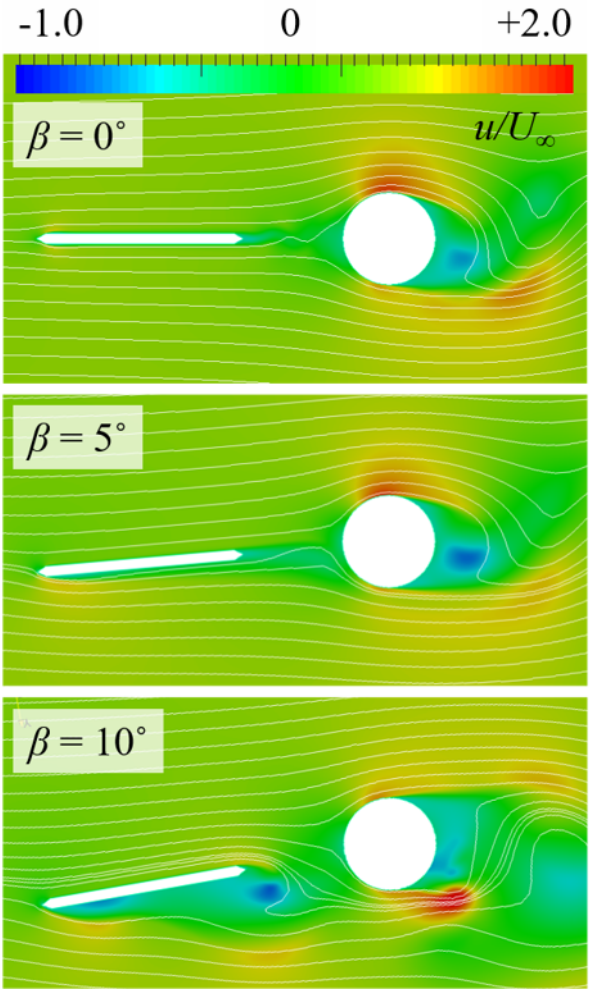


Figure 2-26. Results of flow field according to β in 2-D CFD (Kim, J. et al., 2022, June)

Table 2-9. Results of drag coefficient according to β in 2-D CFD (Kim, J. et al., 2022, June)

Items	Reynolds number		
	1.1×10^5	1.7×10^5	2.3×10^5
$\beta = 0°$	1.090	1.024	1.037
$\beta = 5°$	1.001	0.934	0.951
$\beta = 10°$	0.742	0.650	0.690

2.5.3. Reynolds number (Re_D)

Reynolds number (Re_D)는 유체역학에서 관성에 의한 힘과 점성에 의한 힘의 관계를 나타내는 무차원수이며, 본 연구는 EM-Log 모형의 직경(D)을 특성길이로 하는 Re_D를 실선 상사 무차원 수로 선정하였다.

Re_D의 계산식은 식(2)와 같으며, Re_D 실험 조건은 잠수함이 주로 운용하는 함속 범위와 상사가 맞도록 Table 2-10과 같이 설정하였다.

$$Re_D = \frac{(Free\ stream\ velocity) \times (characteristic\ length)}{(kinematic\ viscosity)} = \frac{U_\infty \times D}{\nu} \quad (2)$$

Re_D는 원통의 직경을 특성길이로 하는 Reynolds number, U_∞는 free stream의 평균 유속, D는 EM-Log 모형의 직경, ν는 유체의 동점성계수를 의미한다.

Table 2-10. Reynolds number test conditions

Items	Free stream velocity (U_∞)	Reynolds number (Re_D)	Kinematic viscosity of fresh water at 10℃
value	1.36 m/s	4.0×10^4	1.31×10^{-6} m^2/s
	2.73 m/s	8.0×10^4	
	4.09 m/s	1.2×10^5	
	5.45 m/s	1.6×10^5	

2.5.4. 실험 조건 종합

실험 변수는 보호가이드 유무 및 형태, PIV 계측면의 높이(h), 편류각(β), Re_D이며, 조합에 따른 실험 case는 총 120개이다.

실험 변수별 실험 조건은 Table 2-11와 같다.

Table 2-11. Test conditions

Flat plates	h/H_c [-]	β [deg.]	Re_D [-]
No flat plate	0.7, 0.8, 0.9	-	4.0×10^4, 8.0×10^4, 1.2×10^5, 1.6×10^5
With the fin-shaped flat plate		0, 5, 10	
With the rectangular flat plate			
With the semi-elliptical flat plate			
Total number of test conditions = 120 cases			

2.6. 실험 기법

2.6.1. PIV 계측

2.6.1.1. 추적입자

PIV 계측을 위한 추적입자는 HGS-10 (Dantec Dynamics A/S, Skovlunde, Denmark)을 사용하였다. 추적입자의 크기가 작고 비중이 유체와 비슷할수록 정확한 PIV 계측이 가능하다.

추적입자는 유체와의 밀도차로 인해 중력 방향 속력이 작용하며, 이는 식(3)과 같이 계산된다.

$$U_g = \frac{d_p^2(\rho_p - \rho_f)}{18\mu} g \tag{3}$$

U_g는 추적입자의 중력방향 속력, d_p는 추적입자의 직경, ρ_p는 추적입자의 밀도, ρ_f는 유체의 밀도, μ는 유체의 점성계수, g는 중력가속도를 의미한다. HGS-10이 10℃ 물 안에서 받는 중력방향 속력은 4.2×10^{-6} m/s이며, 이는 터널 내 유속보다 매우 작으므로 무시할 수 있다.

Figure 2-27은 HGC-10의 보관용기와 HGC-10의 사진이며, Table 2-12는 HGC-10의 제원이다.

Source :
https://www.dantecdynamics.com

Figure 2-27. (a) HGC-10 container, (b) HGC-10

Table 2-12. Specifications of HGC-10

Items	Value
Particle shape	Spherical powder
Average diameter	10 μm
Specific gravity	1.1

2.6.1.2. PIV data 해석

PIV data 해석은 상용 프로그램인 DaVis 8.1.1 (LaVision GmbH ,Göttingen, Germany)을 사용하여 수행하였다.

DaVis 8.1.1은 기본적으로 cross correlation 기법으로 PIV data를 해석하며, 본 연구는 cross correlation 기법을 반복 수행하여 정확도를 높이는 adaptive cross correlation 기법으로 해석을 수행하였다.

PIV data 해석을 위해 cross correlation을 총 3회 반복하였으며, 첫 번째 step은 중첩 없이 64×64 pixels의 조사영역을 해석하고, 두 번째, 세 번째 step은 50% 중첩하여 48×48 pixels의 조사영역을 해석하였다.

48×48 pixels 조사영역의 실제 크기는 1.4×1.4 mm^2이며, 해석영역은 총 14,904개(184×81)의 조사영역으로 구성된다.

2.6.2. LDV 계측

LDV 계측은 상용 프로그램인 BSA Flow Software (Dantec Dynamics A/S, Skovlunde, Denmark)를 사용하여 100 Hz 이상의 data rate로 20초 동안 수행하였다.

BSA Flow Software의 설정값은 Table 2-13과 같이 설정하였다.

Table 2-13. Settings of BSA Flow Software

Items	Value
Sensitivity	1200 V
Signal gain	26 dB
Burst detector SNR level	-6 dB
Anode current limit	1500 A
Level validation ratio	4

2.6.3. 유동 가시화(tuft test)

2.6.3.1. Tuft test를 이용한 tip vortex 가시화

Tuft test는 물체의 표면에 실(thread)을 부착하여 유동을 가시화하는 기법이다.

Amini, A. et al. (2019)은 Figure 2-28과 같이 elliptical hydrofoil의 끝단(tip)에 nylon 재질의 실(thread)을 부착하여 tip vortex를 가시화하였다.

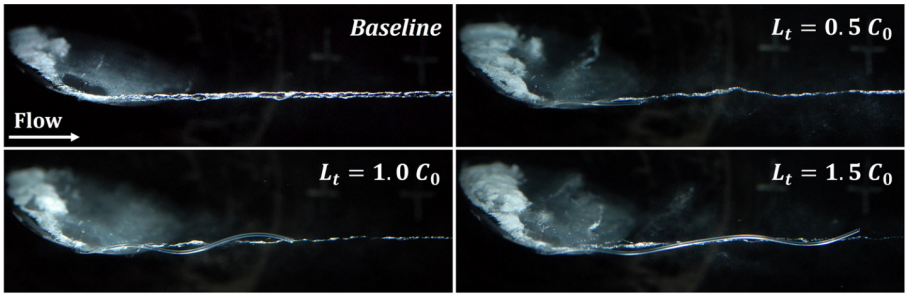


Figure 2-28. Comparison of TVC in the absence and presence of the 0.7 mm thread at different lengths (Amini, A. et al., 2019)

2.6.3.2. Tuft test 설계

Figure 2-29와 같이 초고속 카메라와 조명을 설치하여 tuft test를 통해 가시화된 유동을 영상으로 촬영하였다.

Tuft test에 사용된 실(thread)은 Pro intense (Banax, Incheon, Republic of Korea)이며, 제원은 Table 2-14와 같다.

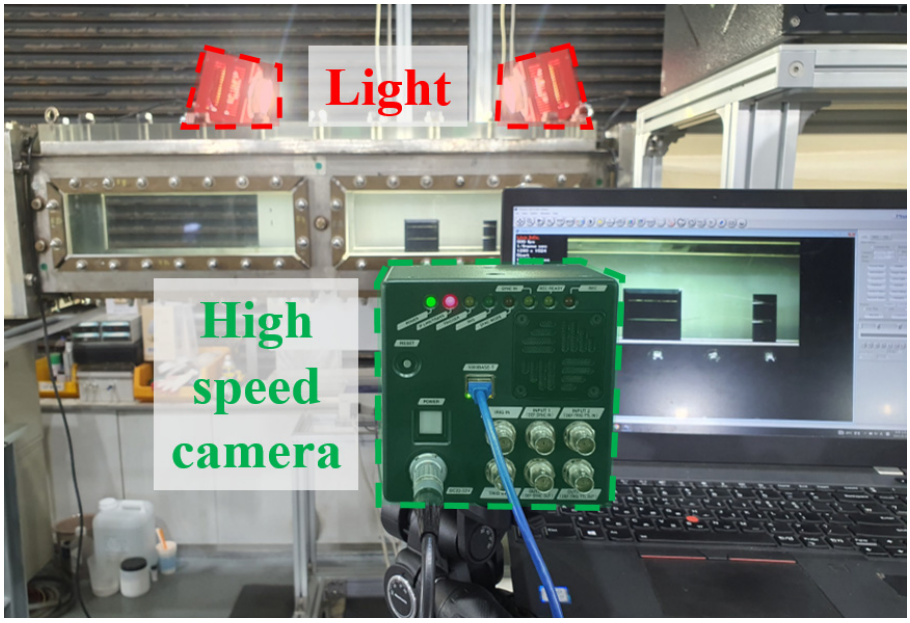


Figure 2-29. High-speed camera and lighting installation for tuft test

Table 2-14. Specifications of Pro intense

Items	Value
Material	PE 100
Diameter	0.41 mm
Specific gravity	0.95

2.6.3.3. Tuft test 수행 조건

Tuft test 대상은 직사각형 형상의 보호가이드 모형과 반타원형 형상의 보호가이드 모형이다. 실(thread)은 Figure 2-30과 같이 보호가이드 모형의 끝단(tip)과 높이 0.7 H_c 위치에 부착하였다.

지느러미 형상의 보호가이드 모형은 Figure 2-31과 같이 EM-Log 모형과의 간격이 충분하지 않아 실(thread)을 부착할 수 없기에 tuft test 대상에서 제외하였다.

Tuft test는 β = 0°, 5°, 10°와 Re_D = 4.0×10^4, 8.0×10^4 조건에서 수행하였다.

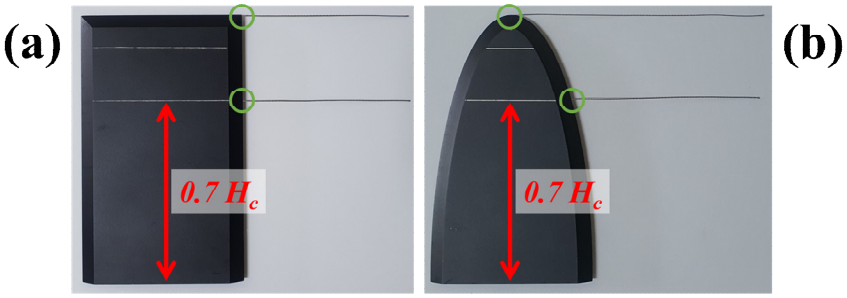


Figure 2-30. (a) Rectangular flat plate with attached threads,
(b) Semi-elliptical flat plate with attached threads

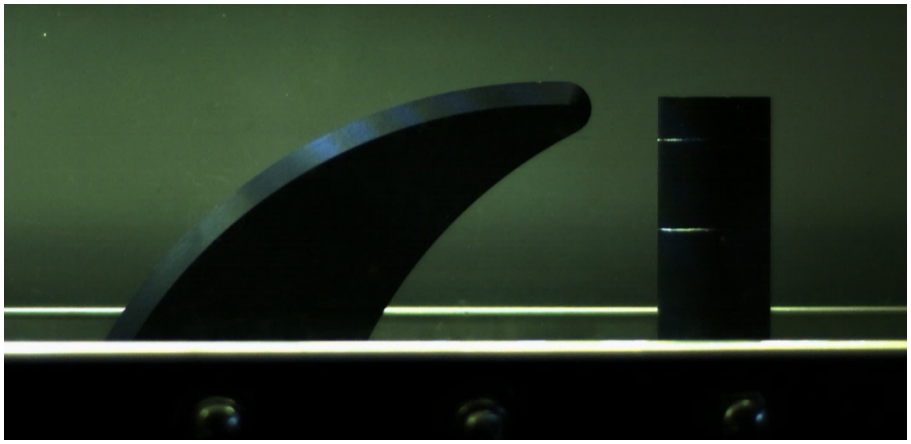


Figure 2-31. Fin-shaped flat plate and cylinder

제 3 장 실험 결과 및 분석

3.1. 검증 실험

3.1.1. 캐비테이션 터널 내 free stream의 유속(U_∞) 검증

임펠러 각속도(ω) 변화에 따른 캐비테이션 터널 내 free stream의 유속(U_∞)을 LDV로 3회 반복 계측하였으며, Figure 3-1과 같이 U_∞가 임펠러 각속도에 정비례하고, 양호한 반복성을 보이는 것을 확인하였다. U_∞는 순간 유속(U_i)을 산술평균하여 계산하였다.

ITTC (2021)는 회류하는 유동의 turbulence intensity (I)가 5% 미만일 것을 권고한다. I는 식(4)와 같이 계산된다.

$$I = \frac{\sigma_{U_\infty}}{U_\infty}, \sigma_{U_\infty} = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(U_i - U_\infty)^2}, U_\infty = \overline{U_i} \tag{4}$$

I는 turbulence intensity, σ_{U_∞}는 free stream 유속의 표준편차, U_∞는 free stream의 평균 유속, U_i는 free stream의 순간 유속을 의미한다.

계산 결과, Figure 3-2와 같이 캐비테이션 터널 내 유동은 ITTC (2021)가 권고하는 5%보다 낮은 수준의 turbulence intensity를 가지므로 캐비테이션 터널 내 유동을 균일류로 간주하고 실험을 수행하였다.

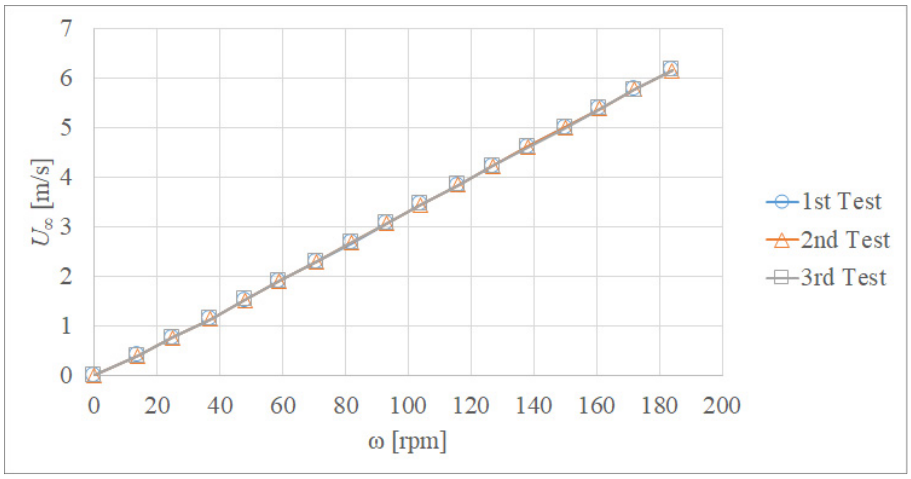


Figure 3-1. Results of the free stream velocity measurement

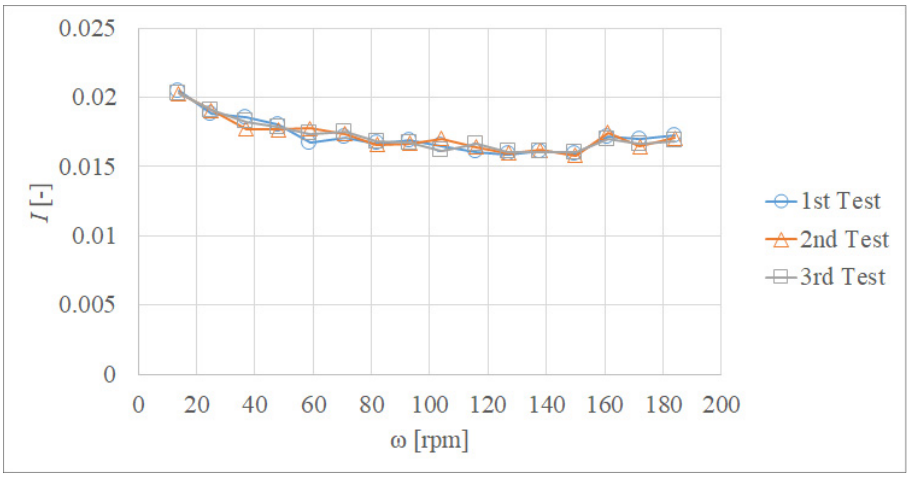


Figure 3-2. Results of the turbulence intensity calculation

3.1.2. PIV 계측 불확실성 검증

3.1.2.1. 추적입자 변위의 표준편차(σ)

Paik, B. G. et al. (2005)은 균일류의 유속을 PIV로 계측하고, PIV 계측 data에서 추적입자의 X방향 변위($\triangle X$)와 Y방향 변위($\triangle Y$)를 계산하였다. 그는 추적입자 변위의 참값과 실제 추적입자 변위 간 차이를 통해 추적입자 변위의 표준편차(σ)를 계산하여 PIV 계측 불확실성을 검증하였다.

본 연구는 Re_D 실험 조건에 대응하는 균일류 유속을 LDV와 PIV로 각각 계측하였으며, LDV 계측 data를 참값으로 정의하고, PIV 계측 data를 참값과 비교하였다.

Paik, B. G. et al. (2005)과 동일하게 추적입자 변위의 참값과 실제 추적입자 변위 간 차이를 계산하였으며, 그 결과는 Figure 3-3과 같다. Figure 3-3을 통해 PIV 계측 data가 참값에 잘 밀집된 것을 확인하였다.

Table 3-1은 Re_D 실험 조건별 추적입자 변위의 표준편차를 나타낸 표이다.

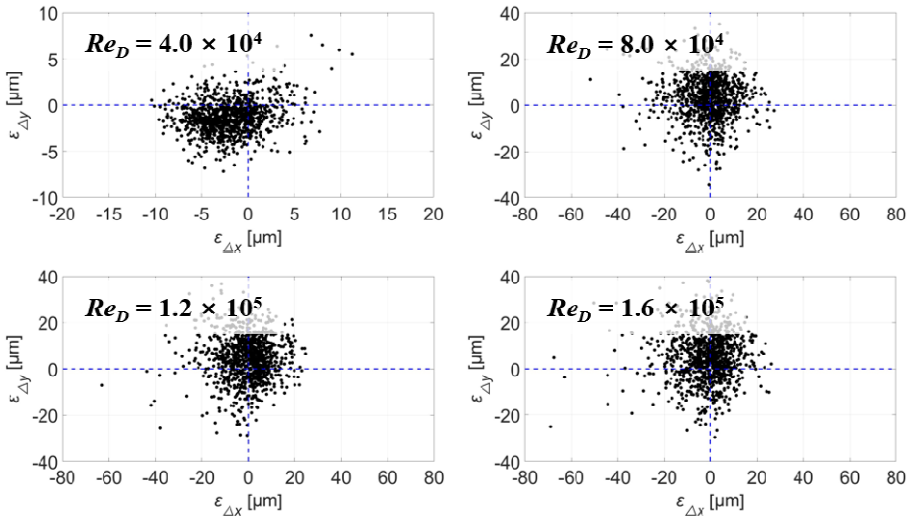


Figure 3-3. Error distribution of the tracer particle displacement relative to the true value

Table 3-1. The standard deviation of the tracer particle displacement

Re_D	$\sigma_{\Delta X}$	$\sigma_{\Delta Y}$
4.0×10^4	3.10	1.78
8.0×10^4	9.48	9.93
1.2×10^5	9.93	9.97
1.6×10^5	9.72	9.56

3.1.2.2. 일표본 T 검정을 이용한 불확실성 분석

많은 PIV 실험 논문들이 Paik, B. G. et al. (2005)과 같이 추적입자 변위의 표준편차로 PIV 계측 불확실성을 검증하나, 표준편차만으로는 통계적으로 유의미한 PIV 계측 불확실성을 나타낼 수 없다.

Di Felice, F. (2004)는 균일류의 유속을 PIV로 계측하고, PIV 계측 data에 대한 일표본 T 검정을 수행하여 통계적으로 유의미한 PIV 계측 불확실성을 나타냈다. data에 대한 일표본 T 검정에서 유의확률(p-value)이 0.05보다 크다는 것은 data를 95% 이상 신뢰할 수 있다는 것을 의미한다.

본 연구는 Re_D 실험 조건에 대응하는 균일류 유속을 PIV로 계측하였으며, Di Felice, F. (2004)와 동일하게 PIV 계측 data에 대한 일표본 T 검정을 수행하였다.

Table 3-2는 PIV 계측 data에 대한 일표본 T 검정 결과를 나타낸 표이며, 모든 실험 조건에서 유의확률(p-value)이 0.05보다 크므로 본 실험의 PIV 계측 data는 95% 이상 신뢰할 수 있다.

Table 3-2. p-value of PIV measurement data

Re_D	p-value
4.0×10^4	0.87
8.0×10^4	0.11
1.2×10^5	0.07
1.6×10^5	0.73

3.2. 유동장

3.2.1. 유동장 분석 대상

유동장 분석은 직사각형 형상 보호가이드 모형과 반타원형 형상 보호가이드 모형에 대해 수행하였다. 지느러미 형상 보호가이드 모형의 경우 Figure 3-4와 같이 모형의 기하학적 특성으로 인해 laser가 과반사 되는 영역과 음영구역이 존재하므로 유동장 분석 대상에서 제외하였다.

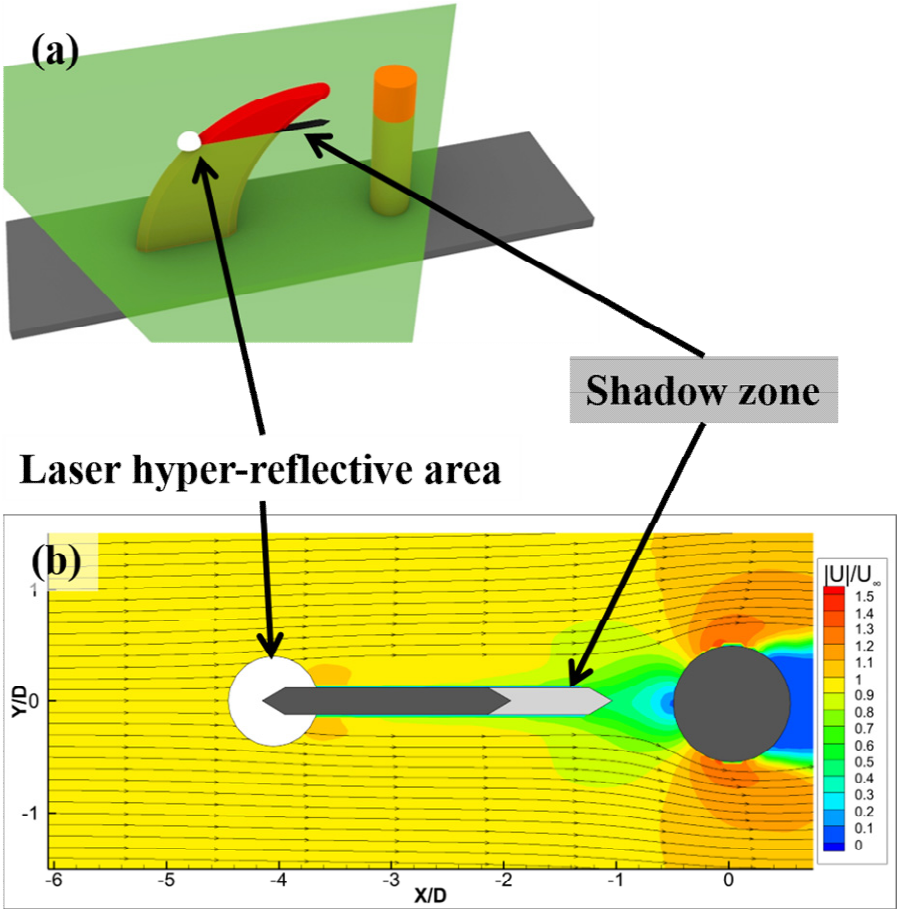


Figure 3-4. (a) Schematic diagram of the cylinder with the fin-shaped flat plate, (b) The flow field of the cylinder with the fin-shaped flat plate

3.2.2. EM-Log 모형만 있을 때 유동장

EM-Log 모형만 있을 때, h/H_c = 0.9에서의 유동장은 Figure 3-5에서 3-8까지와 같다. 유동장 분석 결과, Re_D 증가에 따라 유동박리점이 EM-Log 모형의 뒤쪽으로 밀리는 것을 확인하였으며, h/H_c = 0.7, 0.8에서도 동일한 현상이 발생하였다. 이러한 현상은 Re_D 증가에 따라 유동의 난류성분이 커지기 때문에 발생한다.

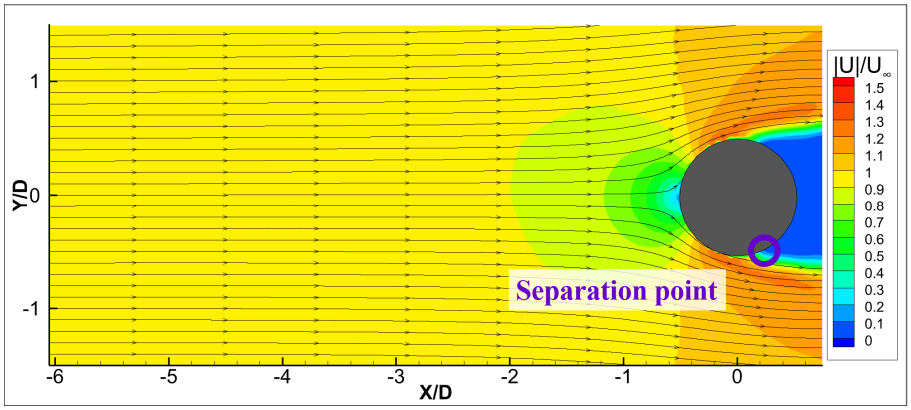


Figure 3-5. The flow field of the cylinder without a flat plate at h/H_c = 0.9, Re_D = 4.0×10^4

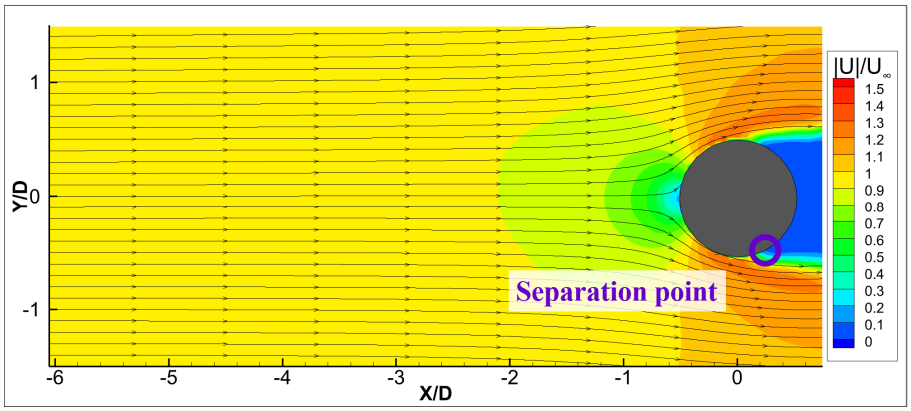


Figure 3-6. The flow field of the cylinder without a flat plate at h/H_c = 0.9, Re_D = 8.0×10^4

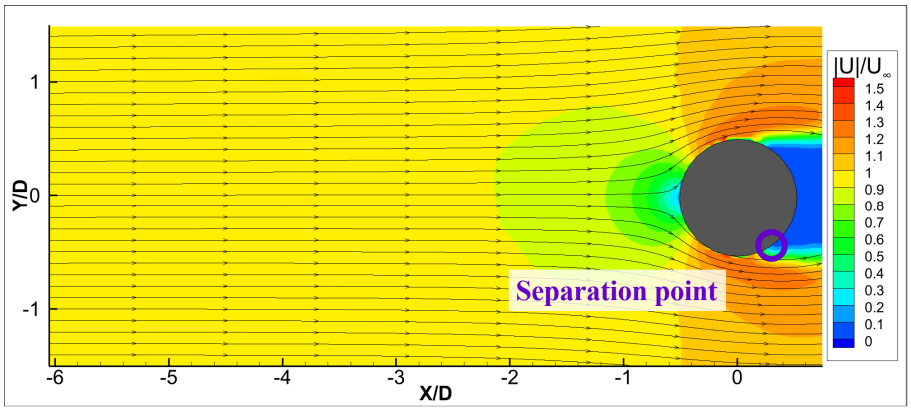


Figure 3-7. The flow field of the cylinder without a flat plate at h/H_c = 0.9, Re_D = 1.2×10^5

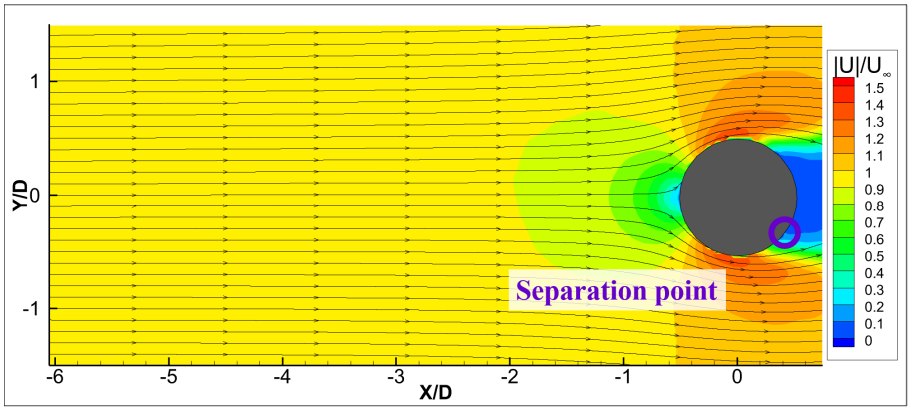


Figure 3-8. The flow field of the cylinder without a flat plate at h/H_c = 0.9, Re_D = 1.6×10^5

3.2.3. 직사각형 형상 보호가이드 모형이 있을 때 유동장

3.2.3.1. 직사각형 형상 보호가이드 모형이 있을 때 $\beta = 0°$에서 유동장

직사각형 형상 보호가이드 모형이 있을 때 h/H_c = 0.9, β = 0° 에서의 유동장은 Figure 3-9에서 3-12까지와 같다. 유동장 분석 결과, EM-Log 모형만 있을 때와 마찬가지로 Re_D 증가에 따라 유동박리점이 EM-Log 모형의 뒤쪽으로 밀리는 것을 확인하였으며, h/H_c = 0.7, 0.8에서도 동일한 현상이 발생하였다. 이러한 현상은 Re_D 증가에 따라 유동의 난류성분이 커지기 때문에 발생한다.

직사각형 형상 보호가이드 모형이 있을 때는 $Re_D = 8.0 \times 10^4$부터 $Re_D = 1.6 \times 10^5$까지 유동박리점의 변화가 크지 않은 것을 확인하였다. 이러한 현상은 $Re_D = 8.0 \times 10^4$부터 직사각형 형상 보호가이드 모형에 의해 충분히 발달된 난류가 EM-Log 모형을 지나기 때문에 발생한다.

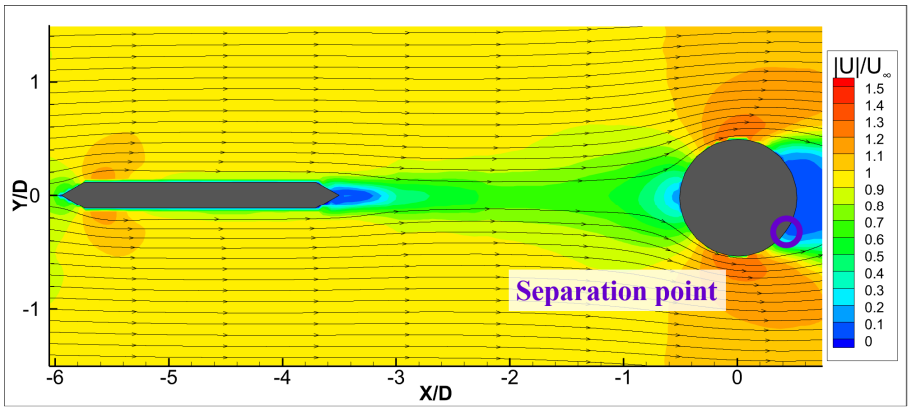


Figure 3-9. The flow field of the cylinder with the rectangular flat plate at h/H_c = 0.9, β = 0°, Re_D = 4.0 × 10^4

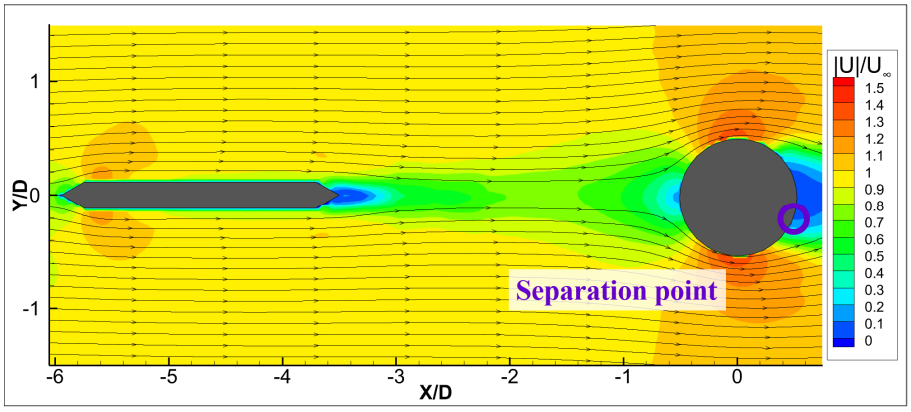


Figure 3-10. The flow field of the cylinder with the rectangular flat plate at h/H_c = 0.9, β = 0°, Re_D = 8.0 × 10^4

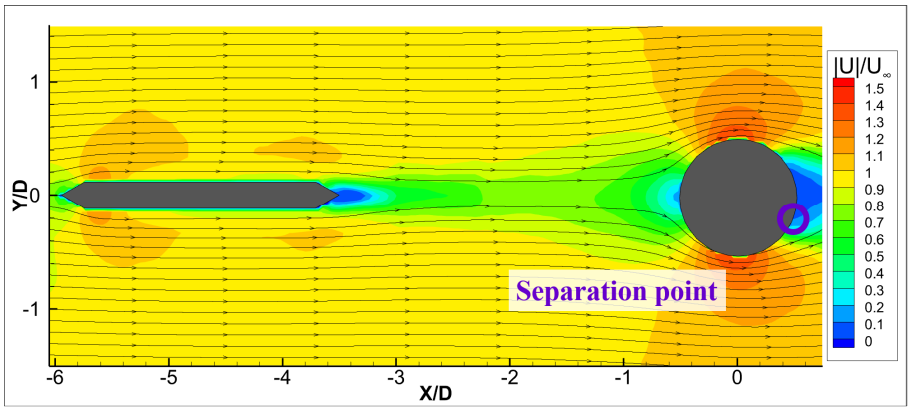


Figure 3-11. The flow field of the cylinder with the rectangular flat plate at h/H_c = 0.9, β = 0°, Re_D = 1.2×10^5

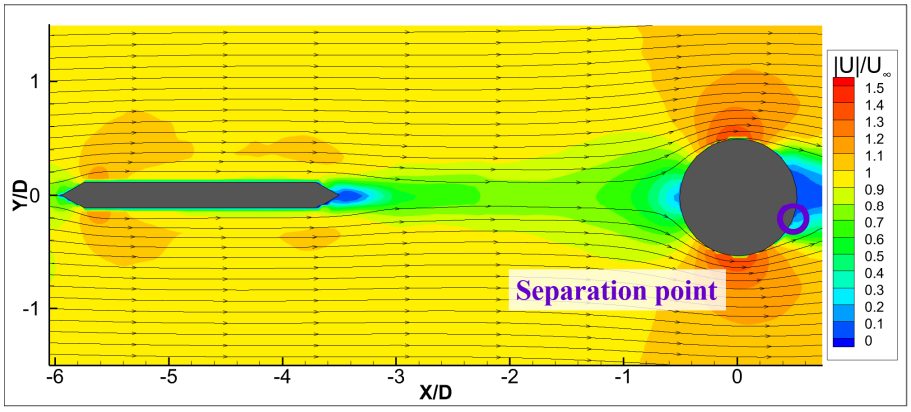


Figure 3-12. The flow field of the cylinder with the rectangular flat plate at h/H_c = 0.9, β = 0°, Re_D = 1.6×10^5

3.2.3.2. 직사각형 형상 보호가이드 모형이 있을 때 β = 5°에서 유동장

직사각형 형상 보호가이드 모형이 있을 때 h/H_c = 0.9, β = 5° 에서의 유동장은 Figure 3-13에서 3-16까지와 같다. β = 5°에서의 유동장은 β = 0°에서의 유동장과 유사하다.

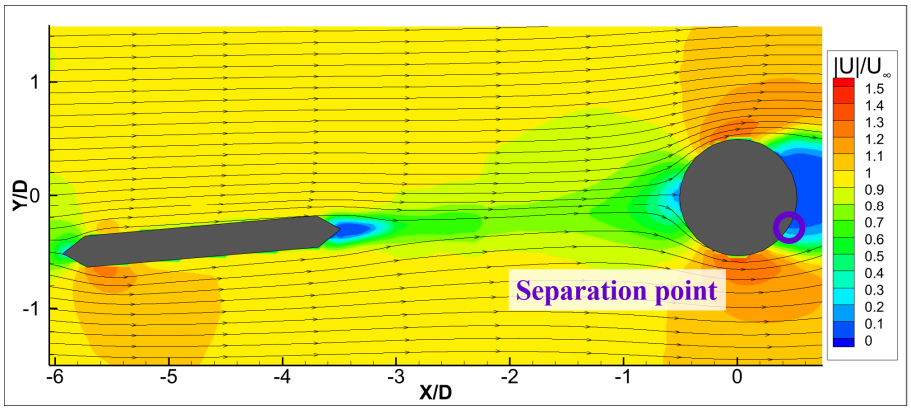


Figure 3-13. The flow field of the cylinder with the rectangular flat plate at h/H_c = 0.9, β = 5°, Re_D = 4.0 × 10^4

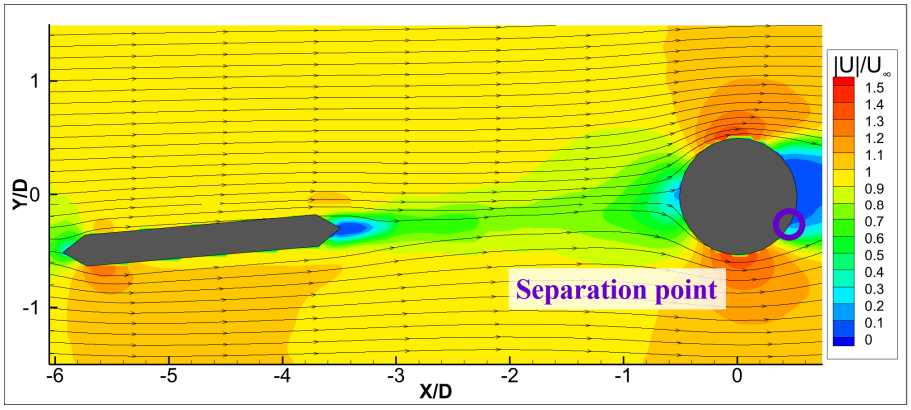


Figure 3-14. The flow field of the cylinder with the rectangular flat plate at h/H_c = 0.9, β = 5°, Re_D = 8.0 × 10^4

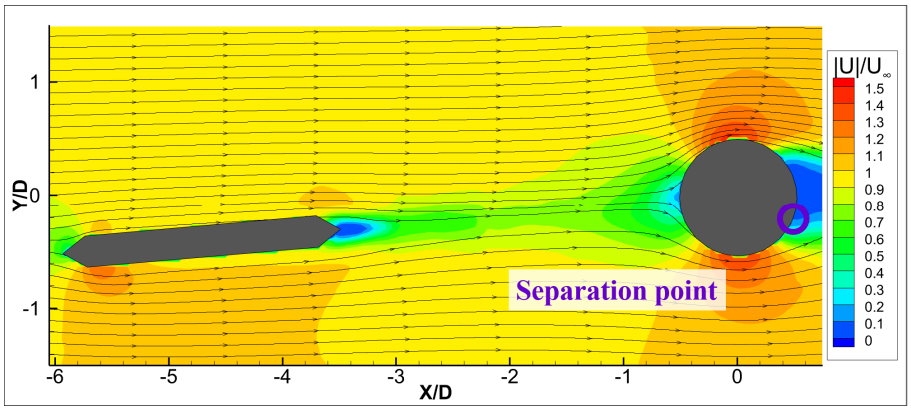


Figure 3-15. The flow field of the cylinder with the rectangular flat plate at h/H_c = 0.9, β = 5°, Re_D = 1.2×10^5

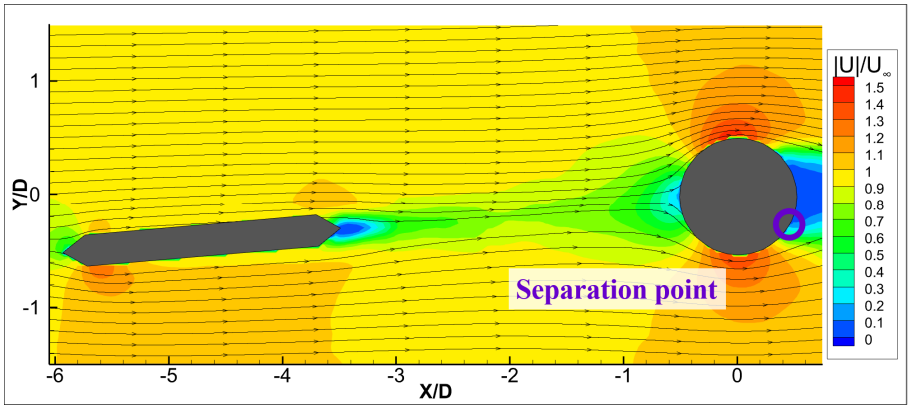


Figure 3-16. The flow field of the cylinder with the rectangular flat plate at h/H_c = 0.9, β = 5°, Re_D = 1.6×10^5

3.2.3.3. 직사각형 형상 보호가이드 모형이 있을 때 β = 10°에서 유동장

직사각형 형상 보호가이드 모형이 있을 때 h/H_c = 0.9, β = 10° 에서의 유동장은 Figure 3-17에서 3-20까지와 같다. 유동장 분석 결과, β = 10°에서는 β = 0°, 5°와 달리 EM-Log 모형 주위 영역 중 Y가 양수인 영역의 유속이 감소하는 것을 확인하였다.

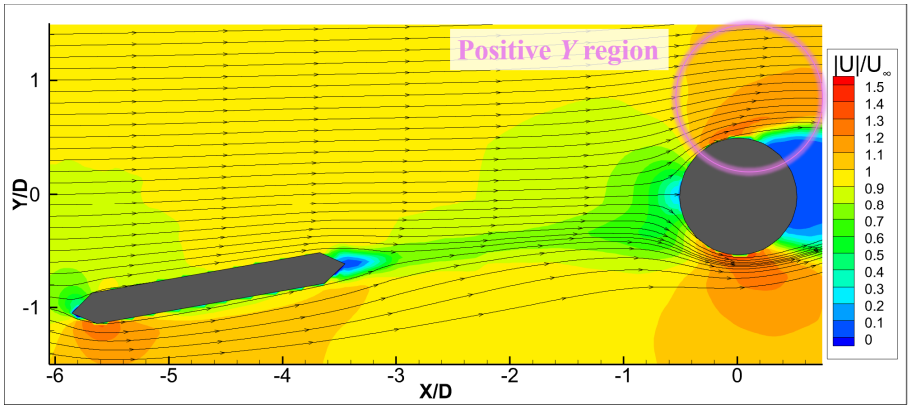


Figure 3-17. The flow field of the cylinder with the rectangular flat plate at h/H_c = 0.9, β = 10°, Re_D = 4.0 × 10^4

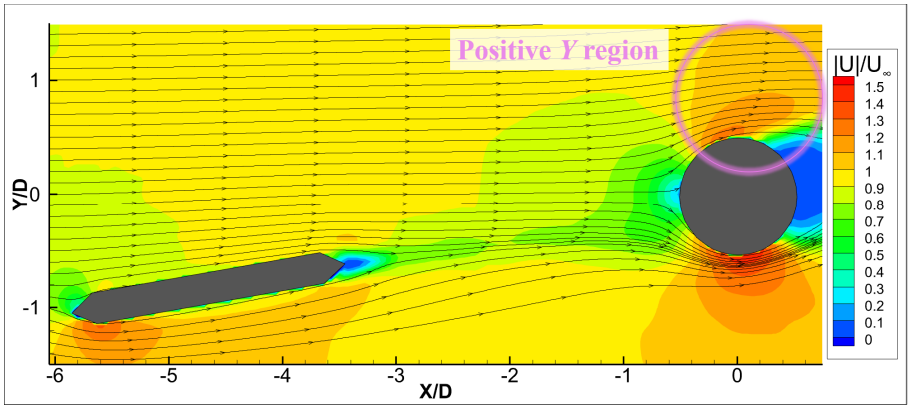


Figure 3-18. The flow field of the cylinder with the rectangular flat plate at h/H_c = 0.9, β = 10°, Re_D = 8.0 × 10^4

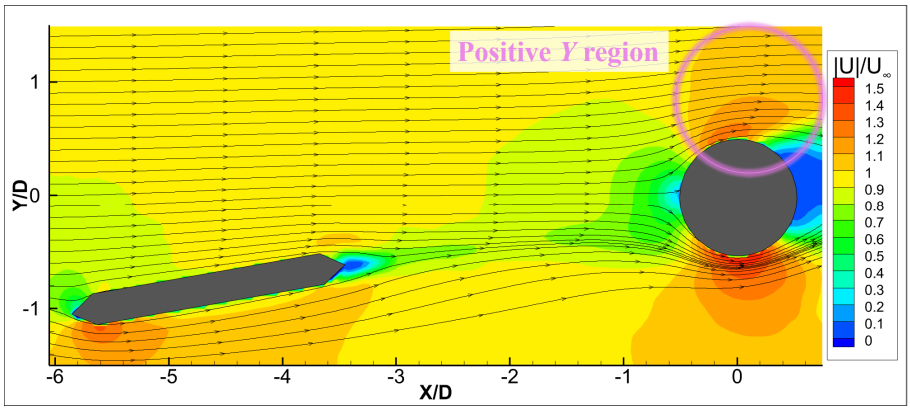


Figure 3-19. The flow field of the cylinder with the rectangular flat plate at h/H_c = 0.9, β = 10°, Re_D = 1.2×10^5

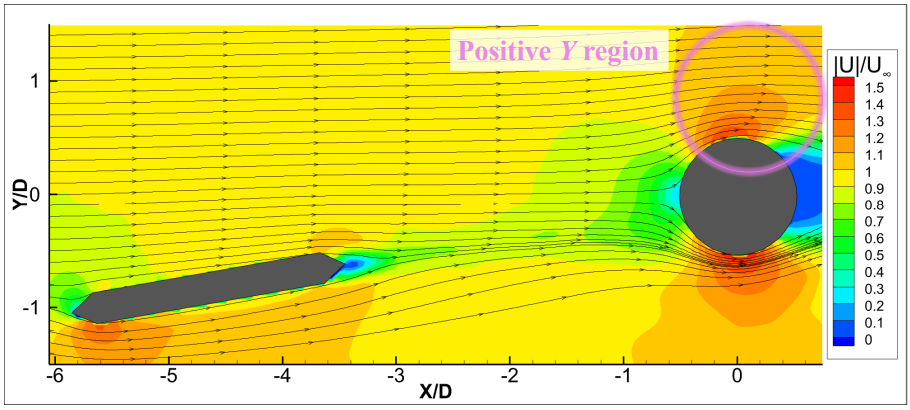


Figure 3-20. The flow field of the cylinder with the rectangular flat plate at h/H_c = 0.9, β = 10°, Re_D = 1.6×10^5

3.2.4. 반타원형 형상 보호가이드 모형이 있을 때 유동장

3.2.4.1. 반타원형 형상 보호가이드 모형이 있을 때 $\beta = 0°$에서 유동장

반타원형 형상 보호가이드 모형이 있을 때 h/H_c = 0.9, β = 0° 에서의 유동장은 Figure 3-21에서 3-24까지와 같다. 유동장 분석 결과, 직사각형 형상 보호가이드 모형이 있을 때와 마찬가지로 Re_D 증가에 따라 유동박리점이 EM-Log 모형의 뒤쪽으로 밀리는 것을 확인하였으며, h/H_c = 0.7, 0.8에서도 동일한 현상이 발생하였다. 이러한 현상은 Re_D 증가에 따라 유동의 난류성분이 커지기 때문에 발생한다.

반타원형 형상 보호가이드 모형이 있을 때는 $Re_D = 1.2 \times 10^5$과 $Re_D = 1.6 \times 10^5$의 유동박리점 변화가 크지 않은 것을 확인하였다. 이러한 현상은 $Re_D = 1.2 \times 10^5$부터 반타원형 형상 보호가이드 모형에 의해 충분히 발달된 난류가 EM-Log 모형을 지나기 때문에 발생한다.

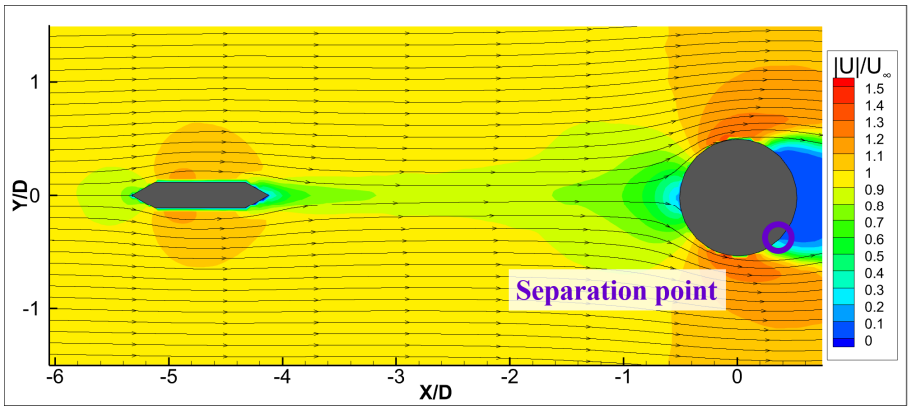


Figure 3-21. The flow field of the cylinder with the semi-elliptical flat plate at h/H_c = 0.9, β = 0°, Re_D = 4.0 × 10^4

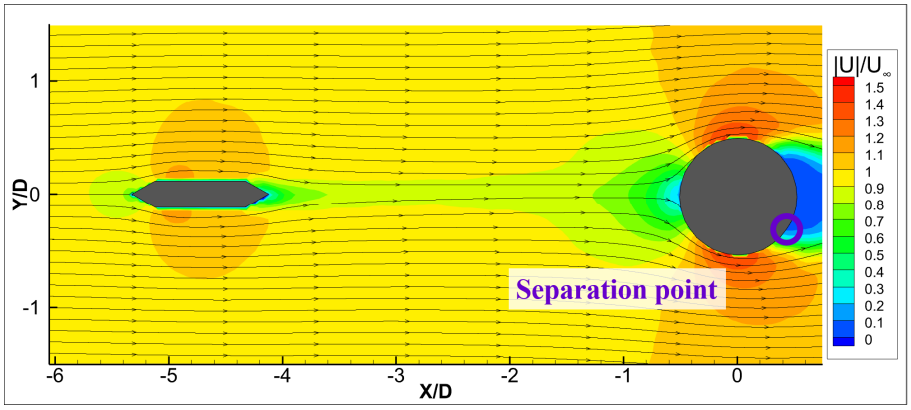


Figure 3-22. The flow field of the cylinder with the semi-elliptical flat plate at h/H_c = 0.9, β = 0°, Re_D = 8.0 × 10^4

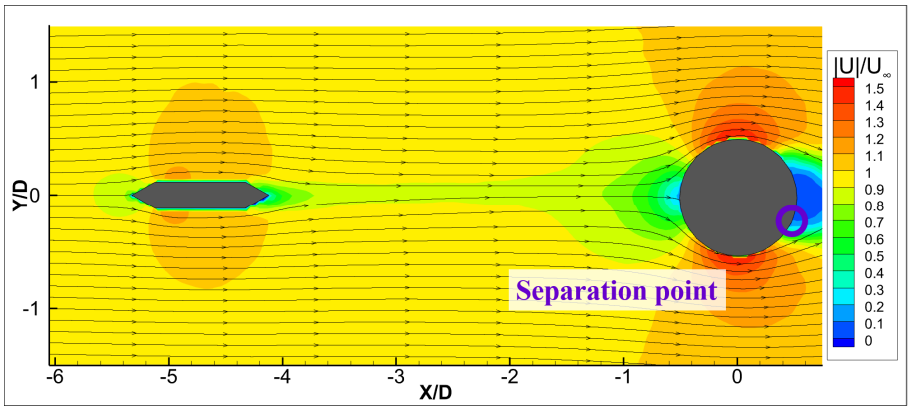


Figure 3-23. The flow field of the cylinder with the semi-elliptical flat plate at h/H_c = 0.9, β = 0°, Re_D = 1.2×10^5

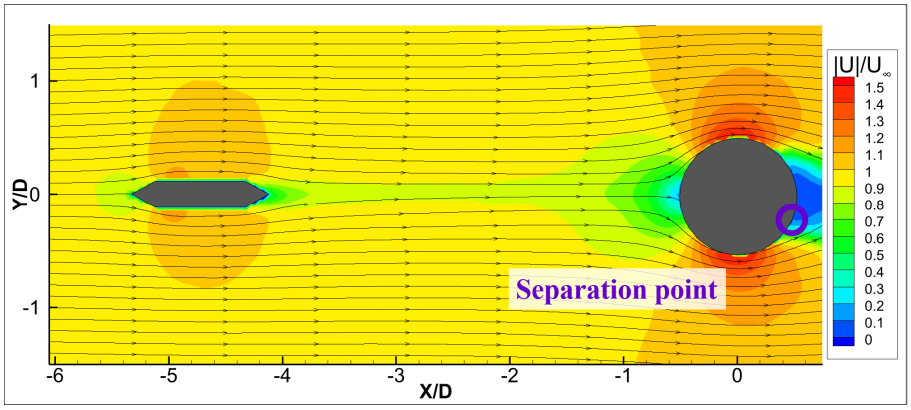


Figure 3-24. The flow field of the cylinder with the semi-elliptical flat plate at h/H_c = 0.9, β = 0°, Re_D = 1.6×10^5

3.2.4.2. 반타원형 형상 보호가이드 모형이 있을 때 β = 5°에서 유동장

반타원형 형상 보호가이드 모형이 있을 때 h/H_c = 0.9, β = 5° 에서의 유동장은 Figure 3-25에서 3-28까지와 같다. β = 5°에서의 유동장은 β = 0°에서의 유동장과 유사하다.

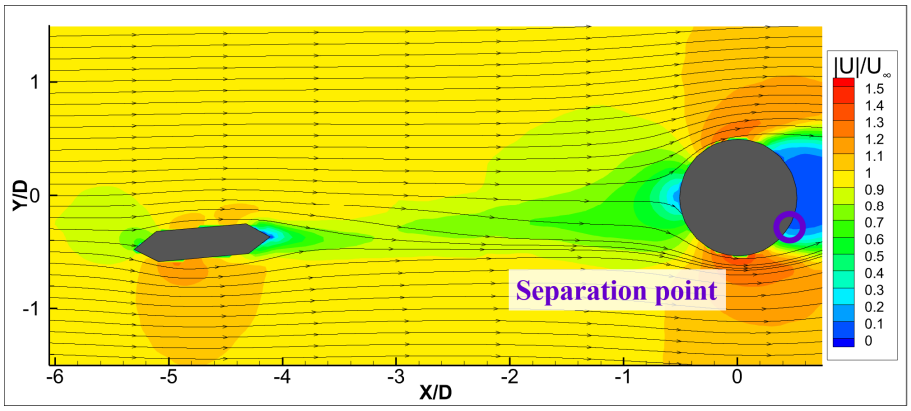


Figure 3-25. The flow field of the cylinder with the semi-elliptical flat plate at h/H_c = 0.9, β = 5°, Re_D = 4.0 × 10^4

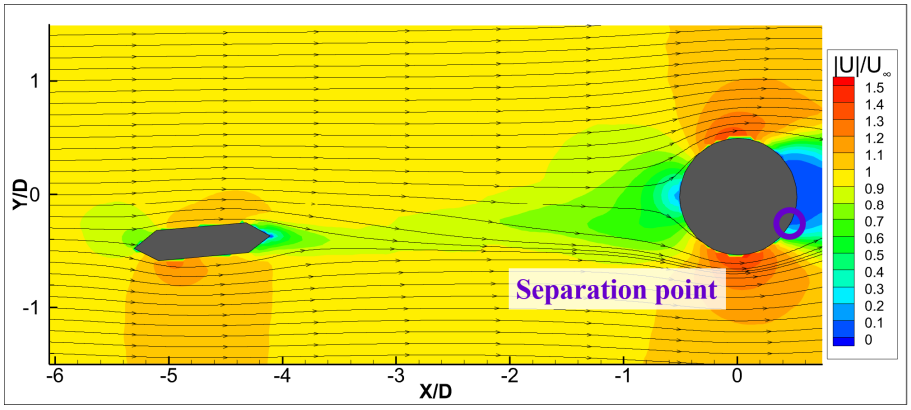


Figure 3-26. The flow field of the cylinder with the semi-elliptical flat plate at h/H_c = 0.9, β = 5°, Re_D = 8.0 × 10^4

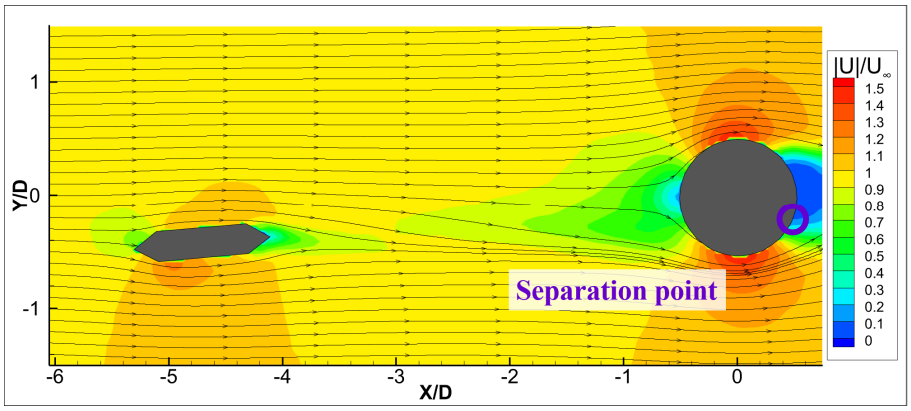


Figure 3-27. The flow field of the cylinder with the semi-elliptical flat plate at h/H_c = 0.9, β = 5°, Re_D = 1.2×10^5

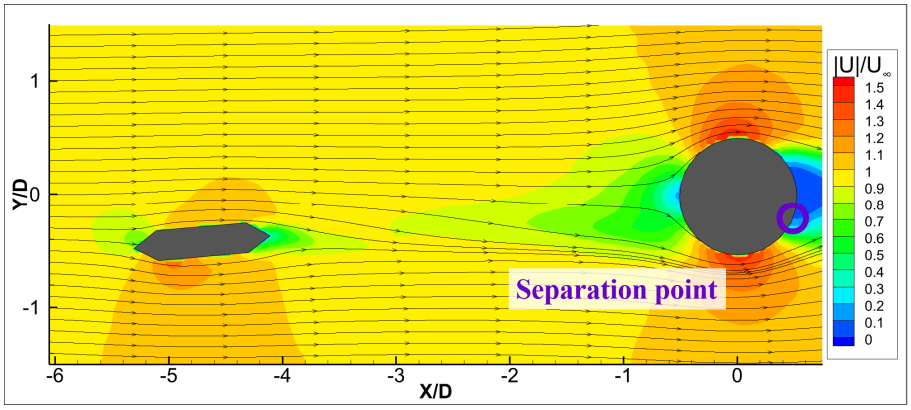


Figure 3-28. The flow field of the cylinder with the semi-elliptical flat plate at h/H_c = 0.9, β = 5°, Re_D = 1.6×10^5

3.2.4.3. 반타원형 형상 보호가이드 모형이 있을 때 β = 10°에서 유동장

반타원형 형상 보호가이드 모형이 있을 때 h/H_c = 0.9, β = 10° 에서의 유동장은 Figure 3-29에서 3-32까지와 같다. 유동장 분석 결과, 직사각형 형상 보호가이드 모형이 있을 때와 마찬가지로 β = 10°에서는 β = 0°, 5°와 달리 EM-Log 모형 주위 영역 중 Y가 양수인 영역의 유속이 감소하는 것을 확인하였다.

직사각형 형상 보호가이드 모형이 있을 때와 달리 반타원형 형상 보호가이드 모형이 있을 때는 Figure 3-30에서 3-32까지에 붉은색 점선으로 표시된 부분과 같이 유속이 저하되는 영역이 나타난다. 이러한 현상이 나타나는 원인을 분석하기 위해 다른 실험 조건의 유동장을 확인하였다.

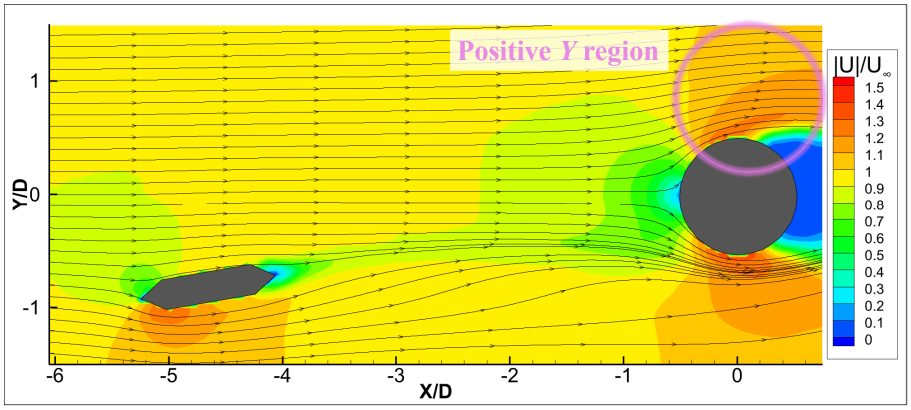


Figure 3-29. The flow field of the cylinder with the semi-elliptical flat plate at h/H_c = 0.9, β = 10°, Re_D = 4.0 × 10^4

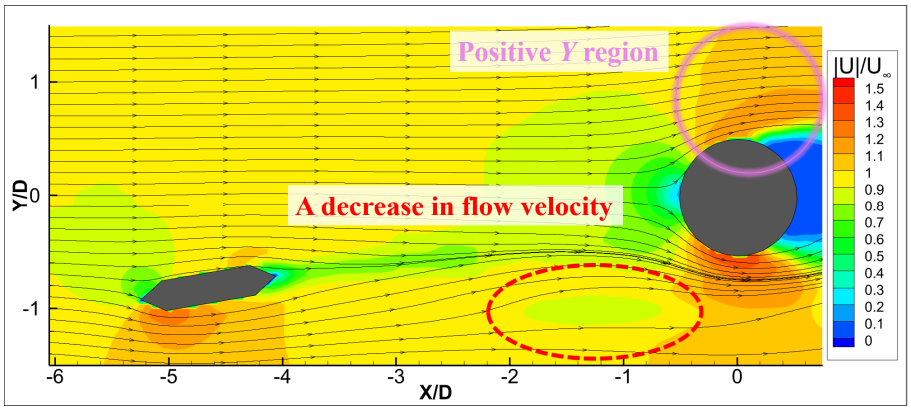


Figure 3-30. The flow field of the cylinder with the semi-elliptical flat plate at h/H_c = 0.9, β = 10°, Re_D = 8.0 × 10^4

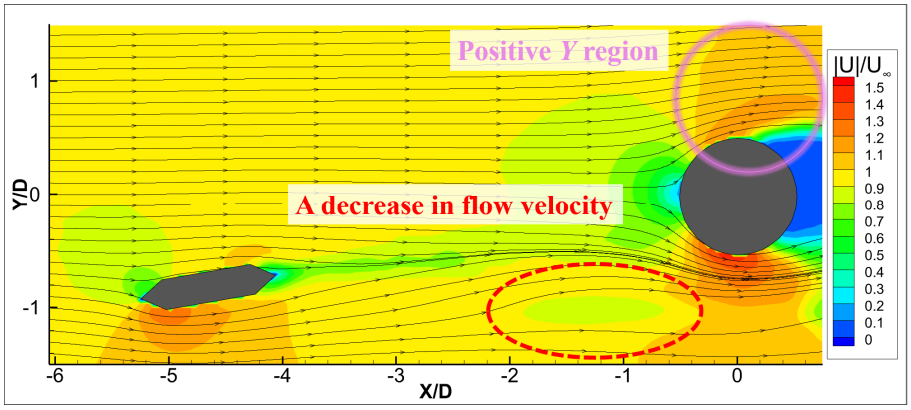


Figure 3-31. The flow field of the cylinder with the semi-elliptical flat plate at h/H_c = 0.9, β = 10°, Re_D = 1.2 × 10^5

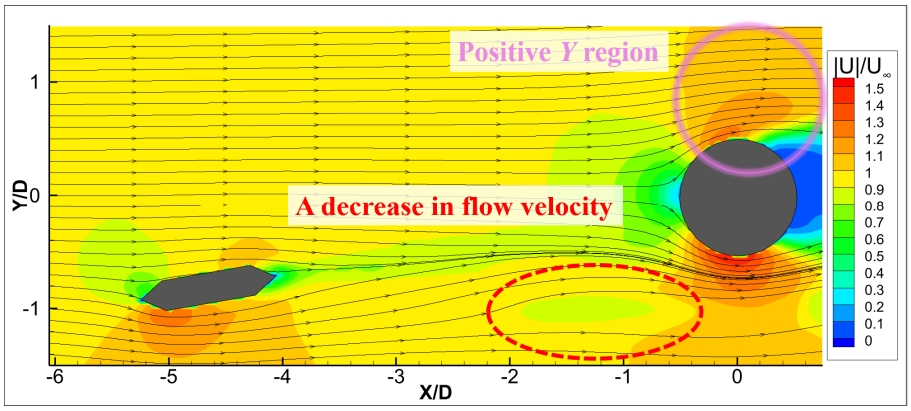


Figure 3-32. The flow field of the cylinder with the semi-elliptical flat plate at h/H_c = 0.9, β = 10°, Re_D = 1.6 × 10^5

반타원형 보호가이드 모형이 있을 때 h/H_c = 0.9, β = 10°, Re_D = 3.0 × 10^4 - 6.0 × 10^4에서 유동장은 Figure 3-33과 같다. Re_D = 5.0 × 10^4부터 붉은색 점선으로 표시된 부분과 같이 유속이 저하되는 영역이 나타난다. 이를 통해 유속이 저하되는 영역의 발생 원인이 Re_D 증가에 따른 유동 현상임을 확인하였다.

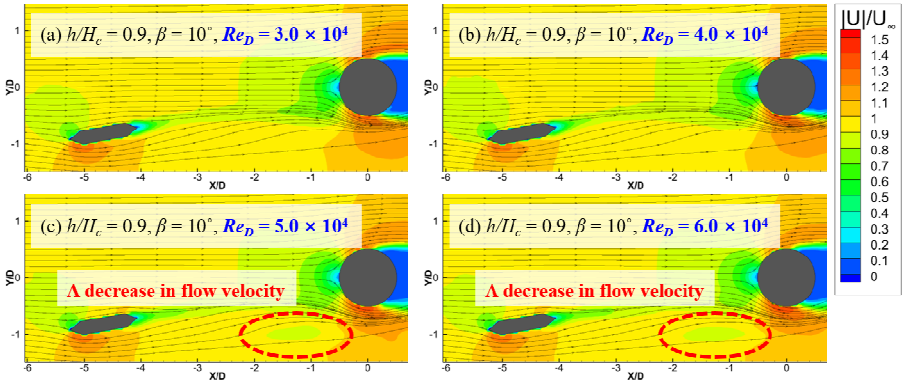


Figure 3-33. The flow field of the cylinder with the semi-elliptical flat plate at h/H_c = 0.9, β = 10°, Re_D = 3.0 × 10^4 - 6.0 × 10^4

반타원형 보호가이드 모형이 있을 때 h/H_c = 0.7 - 0.9, β = 10°, Re_D = 8.0×10^4에서 유동장은 Figure 3-34와 같다. h/H_c = 0.9에서 나타나는 유속이 저하되는 영역이 h/H_c = 0.7, 0.8에서는 나타나지 않는다. 이를 통해 유속이 저하되는 영역의 발생 원인이 보호가이드 모형의 끝단(tip)에서 발생하는 유동현상임을 확인하였다.

신진우(2017)는 서울대학교 선형수조실험동에 설치된 캐비테이션 터널에서 NACA0012 airfoil 모형에서 발생하는 TVC (Tip Vortex Cavitation)와 NACA0012 airfoil 뒤쪽 y-z 평면의 유동장을 계측하였다. 신진우(2017)의 연구에 사용된 NACA0012 airfoil의 형상은 Figure 3-35와 같다.

신진우(2017)의 연구 결과에 따르면 Figure 3-36과 같이 Re가 증가할수록 NACA0012 airfoil의 끝단(tip)에서 발생하는 tip vortex가 강해지며, Figure 3-37과 같이 받음각(a)이 있으면 tip vortex의 영향으로 유동이 전체적으로 회전하는 경향을 보인다.

이상의 내용을 통해 본 연구의 β = 10°, $Re_D \geq 5.0 \times 10^4$ 조건에서 유동장 내 유속이 저하되는 영역이 발생하는 원인을 β 및 Re_D 증가에 따른 보호가이드 모형 끝단(tip) tip vortex 발생인 것으로 가정하였으며, 이를 검증하기 위해 유동 가시화를 수행하였다.

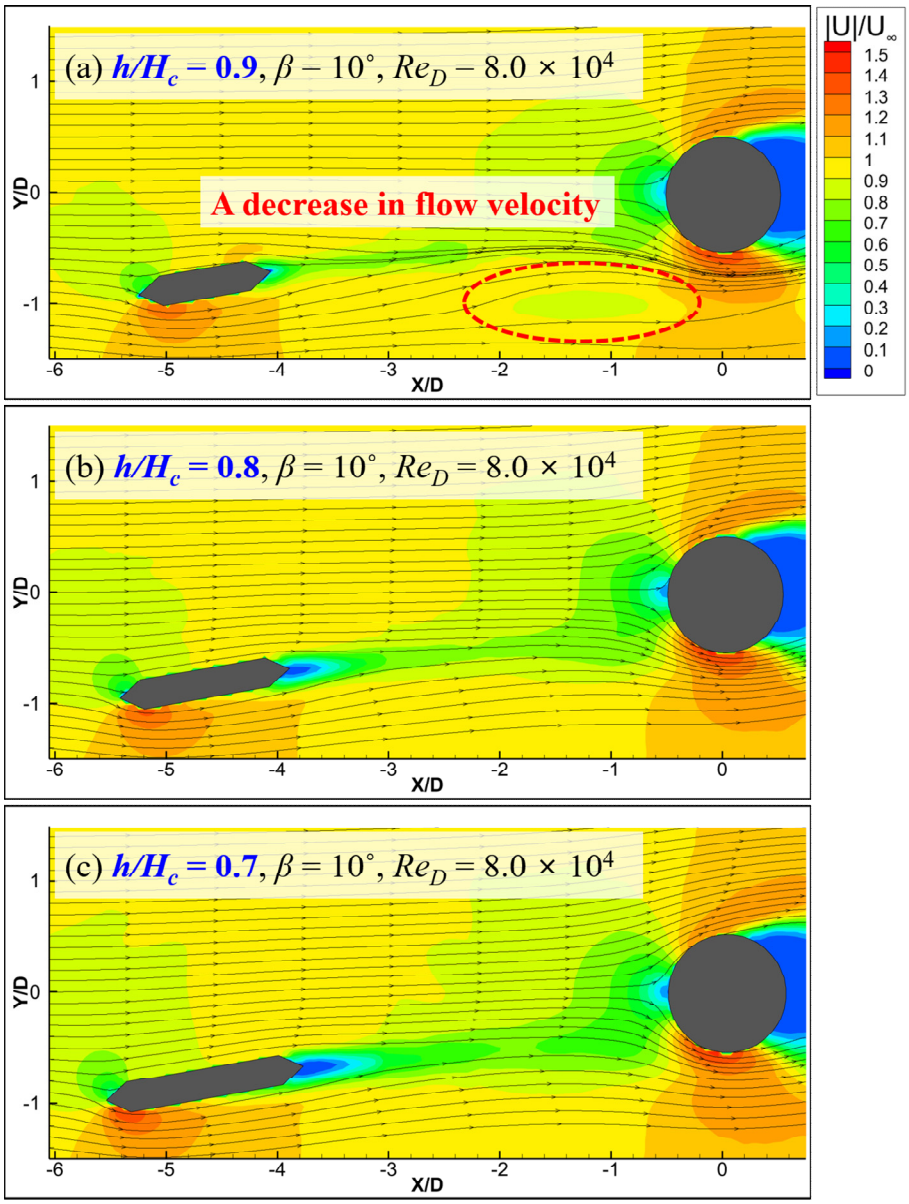


Figure 3-34. The flow field of the cylinder with the semi-elliptical flat plate at h/H_c = 0.7 – 0.9, β = 10°, Re_D = 8.0 × 10^4

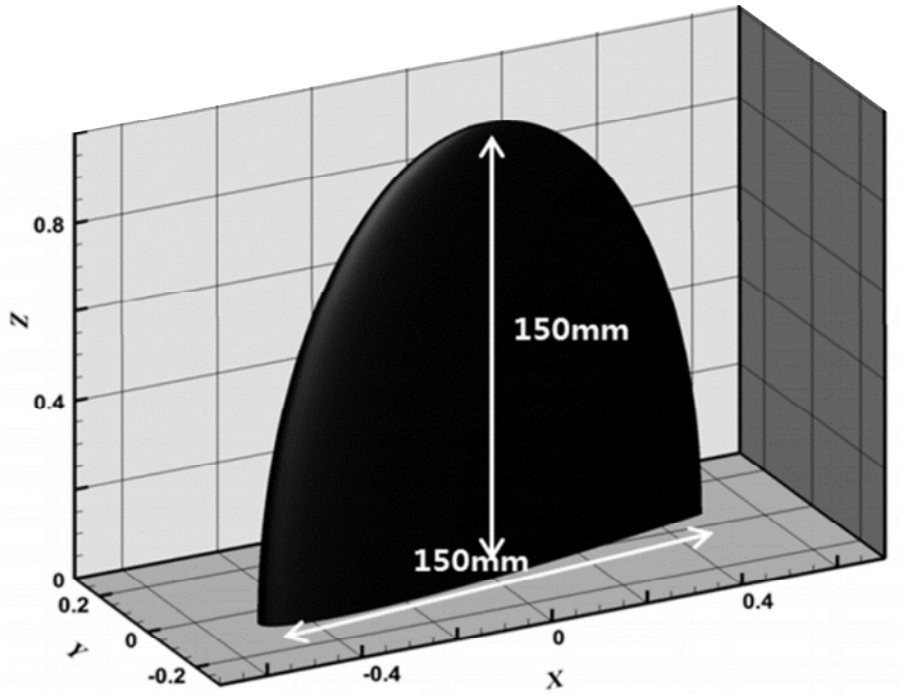


Figure 3-35. NACA0012 airfoil model (Shin, J. W., 2017)

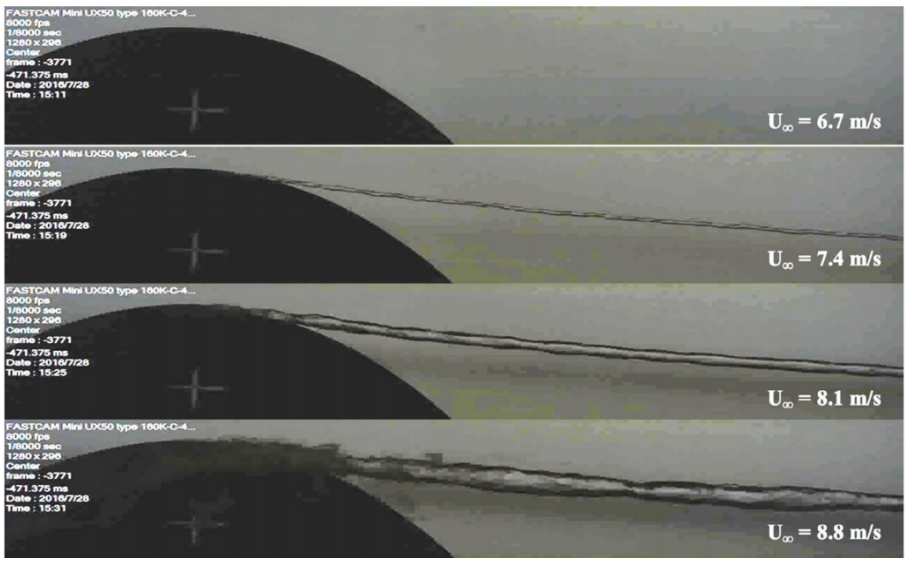


Figure 3-36. Change of TVC (Tip Vortex Cavitation) thickness according to *Re* (Shin, J. W., 2017)

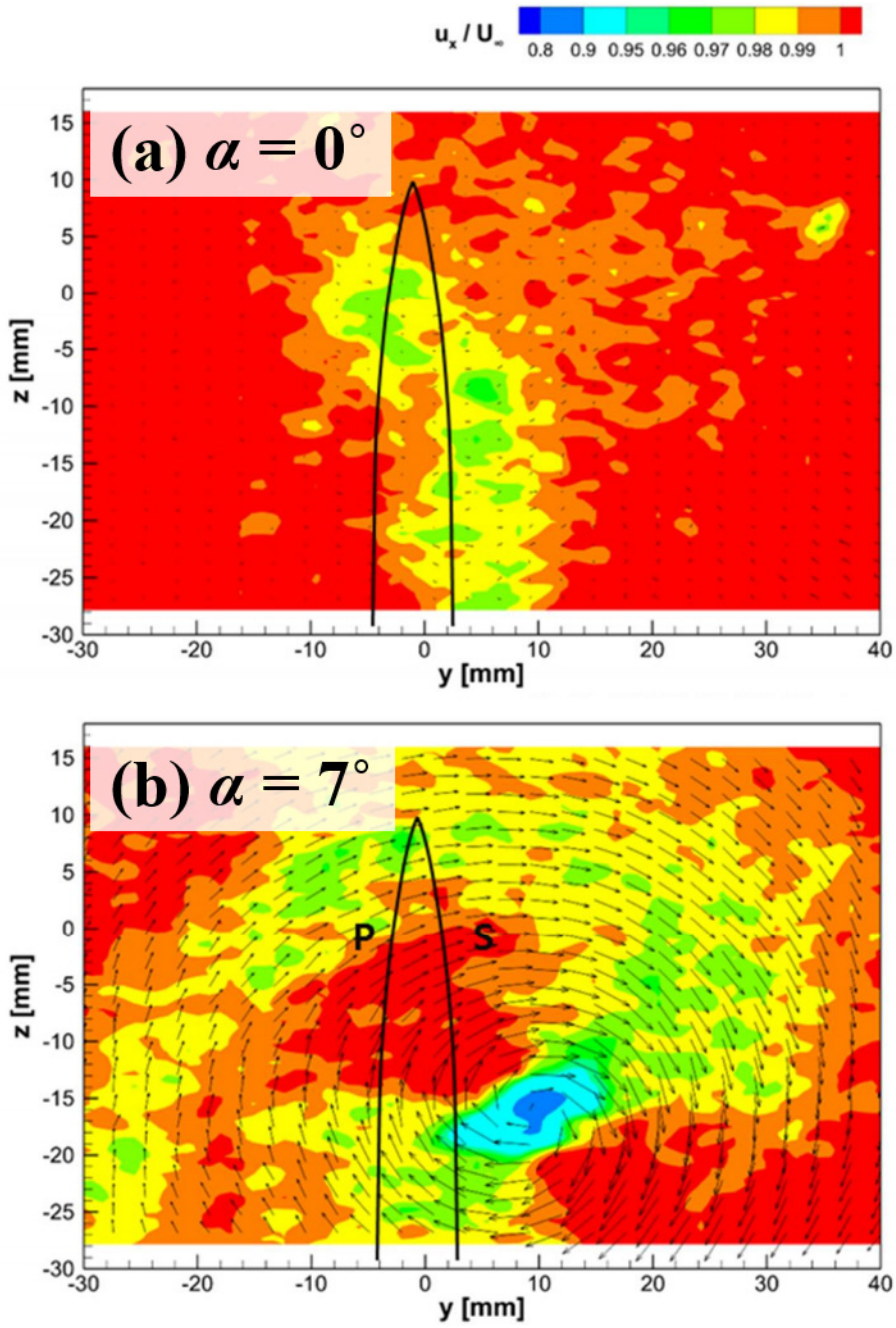


Figure 3-37. The SPIV (Stereoscopic PIV) measurement result of the y-z plane at α = 0°, 7° (Shin, J. W., 2017)

3.3. 유동 가시화

3.3.1. 직사각형 형상 보호가이드 모형이 있을 때 유동 가시화

Figure 3-38과 같이 유동 가시화를 통해 직사각형 형상 보호가이드 모형의 끝단(tip)에서 발생하는 tip vortex를 확인하였다. Figure 3-38의 (e), (f)와 같이 β = 10°에서 끝단(tip)에 부착된 실(thread)이 가장 강하게 꺾이며, 이는 tip vortex가 가장 강하게 발생한다는 것을 의미한다.

β = 10°, Re_D = 4.0 × 10^4보다 β = 10°, Re_D = 8.0 × 10^4에서 실(thread)의 꺾임이 더 강하게 나타나는 것을 통해 Re_D 증가에 따라 tip vortex가 강하게 나타나는 것을 확인하였다(Figure 3-38의 (e), (f)).

Figure 3-38의 유동 가시화 동영상은 참고문헌 [28]에서 [33]에서 확인할 수 있다.

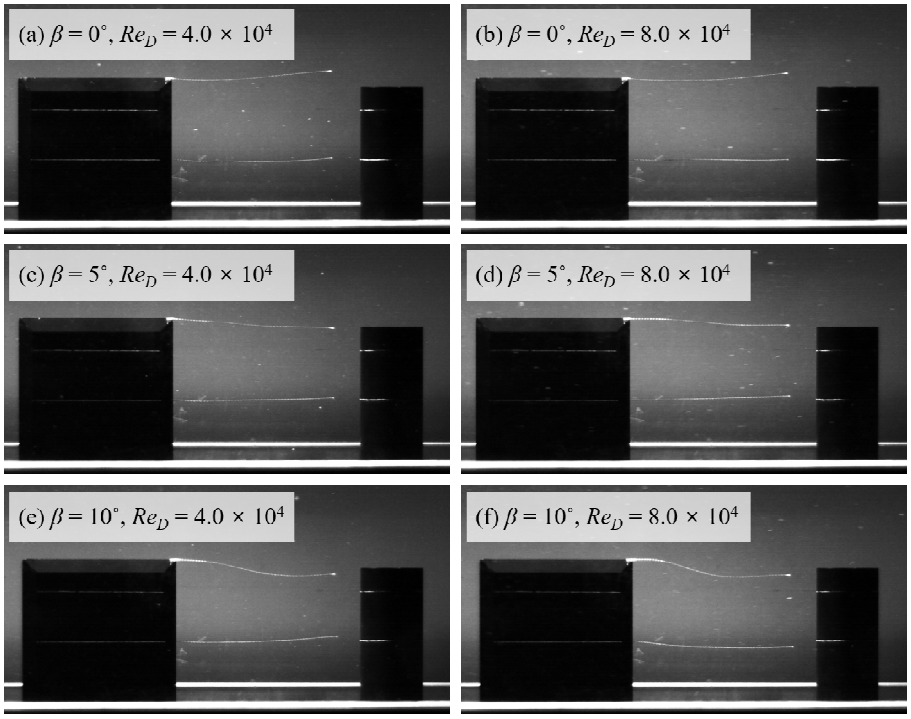


Figure 3-38. Flow visualization results with the rectangular flat plate at β = 0°, 5°, 10°, Re_D = 4.0 × 10^4, 8.0 × 10^4

3.3.2. 반타원형 형상 보호가이드 모형이 있을 때 유동 가시화

Figure 3-38과 같이 유동 가시화를 통해 반타원형 형상 보호가이드 모형의 끝단(tip)에서 발생하는 tip vortex를 확인하였다. Figure 3-38의 (e), (f)와 같이 β = 10°에서 끝단(tip)에 부착된 실(thread)이 가장 강하게 꺾이며, 이는 tip vortex가 가장 강하게 발생한다는 것을 의미한다.

β = 10°, Re_D = 4.0×10^4와 달리 β = 10°, Re_D = 8.0×10^4에서는 실(thread)이 $0.9\,H_c$ 높이보다 아래까지 내려온다(Figure 3-38의 (e), (f)). 이를 통해 반타원형 형상 보호가이드 모형이 있을 때 h/H_c = 0.9, β = 10°, $Re_D \geq 5.0 \times 10^4$ 조건의 유동장에서 EM-Log 모형 주위에 유속이 저하되는 영역이 발생하는 원인이 tip vortex로 인한 유동 교란임을 확인하였다.

Fgiure 3-39의 유동 가시화 동영상은 참고문헌 [34]에서 [39]에서 확인할 수 있다.

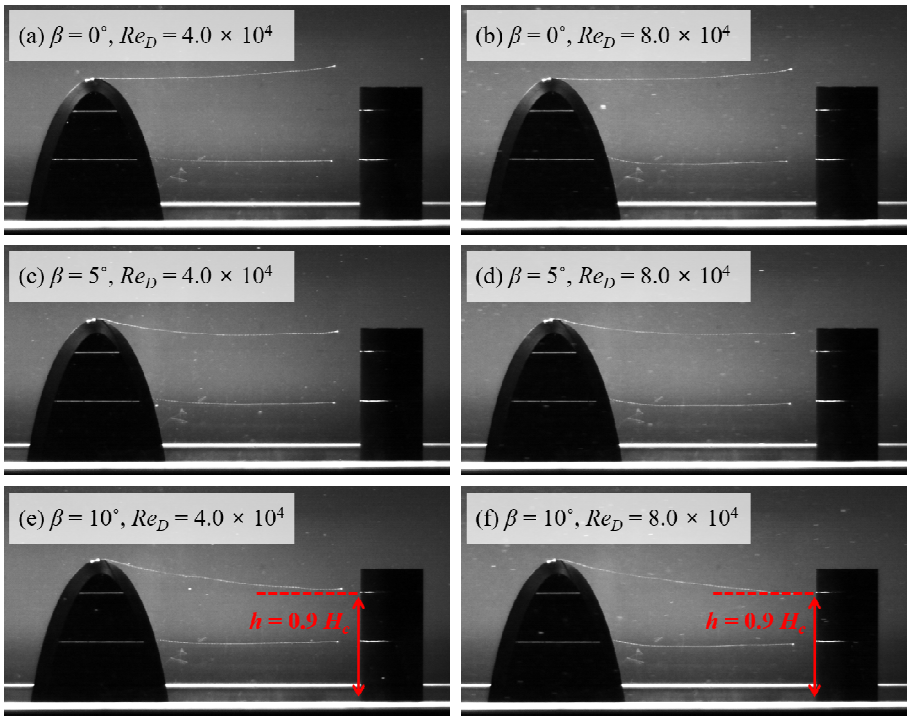


Figure 3-39. Flow visualization results with the semi-elliptical flat plate at β = 0°, 5°, 10°, Re_D = 4.0×10^4, 8.0×10^4

3.4. $\overline{u}/U_\infty$ 의 변화

3.4.1. $\overline{u}/U_\infty$ 분석 영역

EM-Log가 생성하는 자기장 위치를 바탕으로 $\overline{u}/U_\infty$ 분석 영역을 Figure 3-40과 같이 설정하였다. 여기서 $\overline{u}$는 유속의 x방향 성분의 평균을 의미한다. EM-Log는 자기장을 수직으로 지나는 유속 성분을 측정하여 함속을 측정하므로 $\overline{u}/U_\infty$의 변화는 곧 EM-Log가 측정하는 함속의 변화를 의미한다.

$\overline{u}/U_\infty$ 분석 영역은 x-y 직교좌표계에서 $x = 0$, $0.6\,D < |y| < 1.4\,D$, $0.7\,H_c < h < 0.9\,H_c$에 해당하는 영역이며, Figure 3-40의 (c)와 같이 $0.6\,D < y < 1.4\,D$ 영역을 positive y region으로 $-1.4\,D < y < -0.6\,D$ 영역을 negative y region으로 정의하였다.

EM-Log 모형의 벽면 근처는 정확한 PIV 계측이 제한되므로 $\overline{u}/U_\infty$ 분석 영역에서 제외하였다.

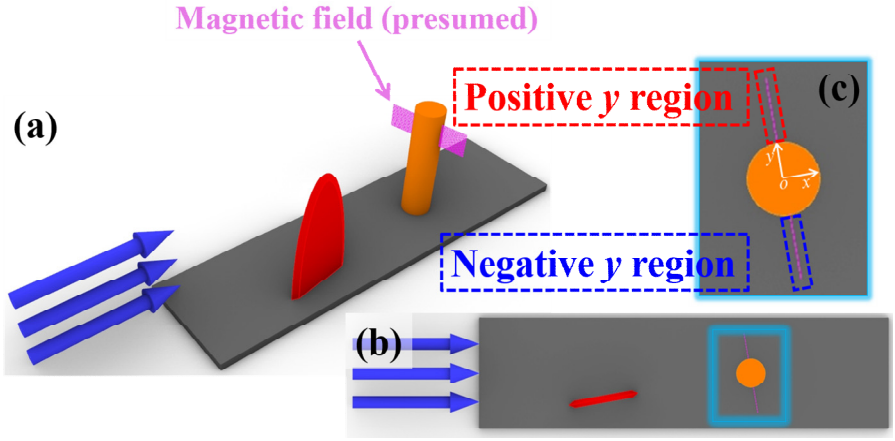


Figure 3-40. Schematic diagram of $\overline{u}/U_\infty$ analysis domain

3.4.2. $\overline{u}/U_\infty$ 분석 방법

식(5)와 같이 EM-Log 모형만 있을 때 β = 0° 조건의 $\overline{u}/U_\infty$ 값을 기준으로 $\overline{u}/U_\infty$ 차이($\triangle\overline{u}/U_\infty$)를 백분율로 계산하였다.

$$\triangle\overline{u}/U_\infty = \left(\frac{(\overline{u}/U_\infty)_\beta - (\overline{u}/U_\infty)_{0^\circ}}{(\overline{u}/U_\infty)_{0^\circ}}\right)\times 100 \tag{5}$$

$(\overline{u}/U_\infty)_\beta$는 보호가이드 모형이 있을 때 β에서의 $\overline{u}/U_\infty$, $(\overline{u}/U_\infty)_{0^\circ}$는 EM-Log 모형만 있을 때 β = 0°에서의 $\overline{u}/U_\infty$를 의미한다.

3.4.3. EM-Log 모형만 있을 때 $\overline{u}/U_\infty$ 변화

Figure 3-41은 EM-Log 모형만 있을 때 y/D에 대한 u/U_∞ 값을 실험 조건에 따라 표시한 그래프이다. β = 5°, 10° 조건에서 Re_D가 증가하면 negative y region의 EM-Log 모형 벽면 근처를 지나는 유속이 빨라지는데, 이러한 현상은 Re_D 증가에 따라 난류가 발달하여 유동 박리점이 뒤로 밀리기 때문에 발생한다.

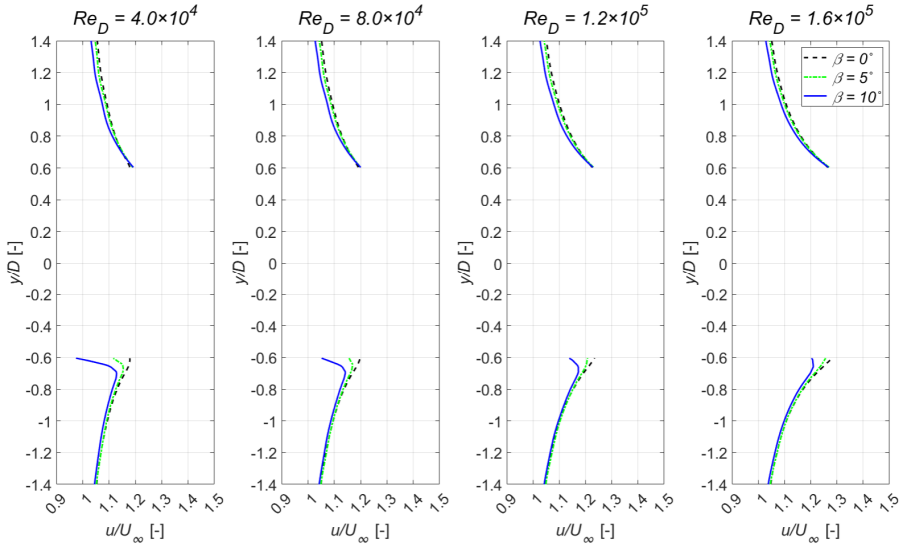


Figure 3-41. Graph of u/U_∞ with respect to y/D without a flat plate

Table 3-3은 Figure 3-41의 u/U_∞ 값을 평균하여 EM-Log 모형만 있을 때 $\triangle\overline{u}/U_\infty$를 계산한 결과이다. EM-Log 모형만 있을 때 $\triangle\overline{u}/U_\infty$는 평균 1% 수준이며, $\triangle\overline{u}/U_\infty$는 β에 선형적으로 변화한다. 즉, EM-Log만 있는 경우 해류에 의한 편류각으로 인해 EM-Log가 부정확한 함속을 측정할 가능성은 낮다.

Table 3-3. Results of $\triangle\overline{u}/U_\infty$ according to β and Re_D without a flat plate

Items		Re_D			
		4.0×10^4	8.0×10^4	1.2×10^5	1.6×10^5
Positive y region	$\beta = 5^\circ$	-0.5%	-0.3%	-0.1%	-0.3%
	$\beta = 10^\circ$	-2.1%	-1.6%	-1.1%	-1.3%
Negative y region	$\beta = 5^\circ$	-0.3%	-0.4%	-0.5%	-0.4%
	$\beta = 10^\circ$	-1.4%	-1.6%	-1.7%	-1.5%

3.4.4. 보호가이드 모형이 있을 때 $\overline{u}/U_\infty$ 변화

Figure 3-42, 3-43, 3-44는 보호가이드 모형이 있을 때 y/D에 대한 u/U_∞ 값을 실험 조건에 따라 표시한 그래프이다. 보호가이드 모형의 형상과 무관하게 y/D에 대한 u/U_∞의 경향은 유사하게 나타났다.

보호가이드 모형이 있을 때 β = 0°, 5° 조건에서 u/U_∞는 EM-Log 모형만 있을 때보다 증가하는 경향을 보인다. 반면, β = 10° 조건의 u/U_∞는 positive y region에서 감소하는 경향이 나타난다.

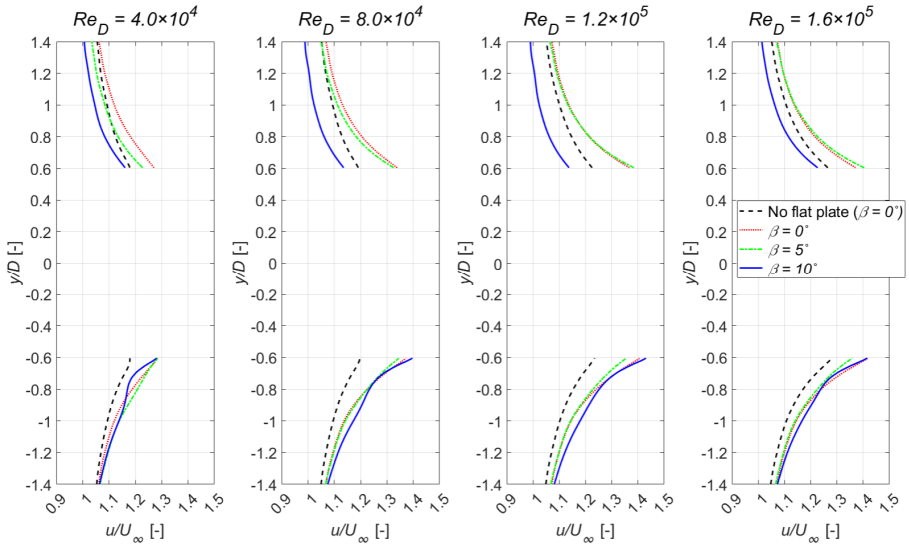


Figure 3-42. Graph of u/U_∞ with respect to y/D with the fin-shaped flat plate

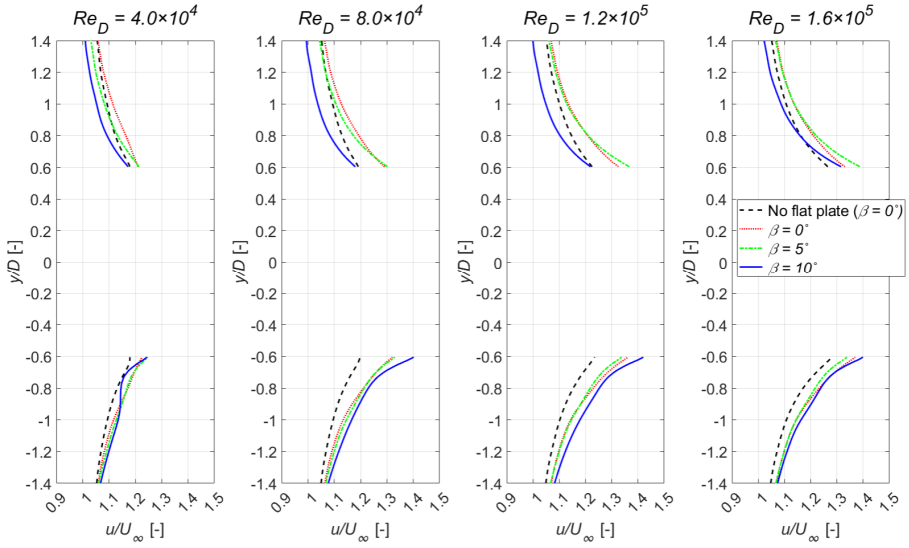


Figure 3-43. Graph of u/U_∞ with respect to y/D with the rectangular flat plate

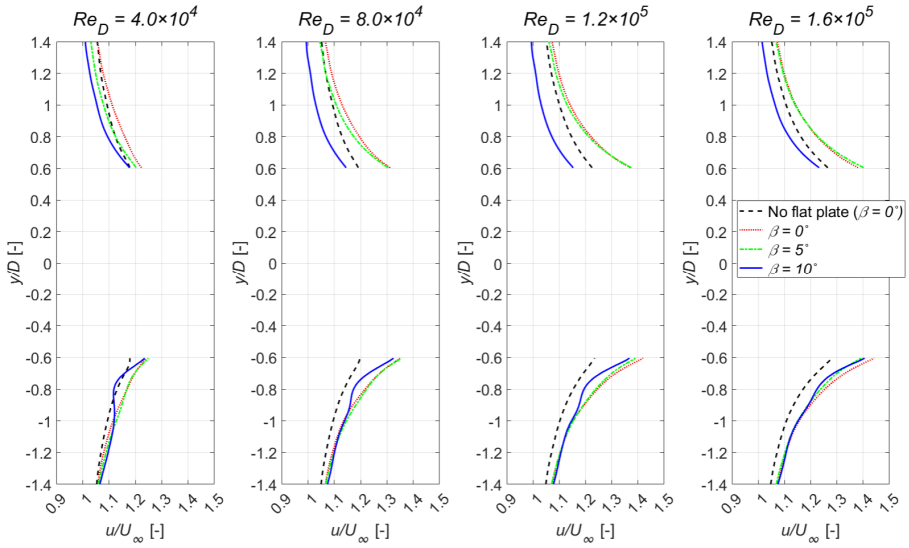


Figure 3-44. Graph of u/U_∞ with respect to y/D with the semi-elliptical flat plate

Table 3-4, 3-5, 3-6은 Figure 3-42, 3-43, 3-44의 u/U_∞ 값을 평균하여 보호가이드 모형이 있을 때 $\triangle\overline{u}/U_\infty$를 계산한 결과이다. 보호가이드 모형이 있을 때 $\triangle\overline{u}/U_\infty$는 평균 4% 수준이며, $\triangle\overline{u}/U_\infty$는 β에 비선형적으로 변화한다.

$\triangle\overline{u}/U_\infty$는 대부분의 실험 조건에서 2% 이상이며, 실험 조건 중 1/4이 5% 이상의 $\triangle\overline{u}/U_\infty$를 갖는다. 모든 형상의 보호가이드 모형에서 유의미한 수준의 $\triangle\overline{u}/U_\infty$가 나타나나, 특히 실제 잠수함의 보호가이드와 형상이 유사한 fin-shaped 보호가이드 모형에서 $\triangle\overline{u}/U_\infty$이 가장 크게 나타난다.

즉, 보호가이드는 EM-Log 주위 유동을 교란하여 EM-Log가 부정확한 함속을 측정하게 만든다. Table 3-4, 3-5, 3-6에서 붉은색으로 표시한 부분은 $\triangle\overline{u}/U_\infty$가 5% 이상인 조건을 의미한다.

Table 3-4. Results of $\triangle \overline{u}/U_\infty$ according to β and Re_D with the fin-shaped flat plate

red text : 5.0% ≤ $\triangle \overline{u}/U_\infty$

Items		Re_D			
		4.0×10^4	8.0×10^4	1.2×10^5	1.6×10^5
Positive y region	$\beta = 0^\circ$	+3.3%	+4.8%	+4.5%	+3.7%
	$\beta = 5^\circ$	-0.1%	+3.1%	+4.5%	+4.3%
	$\beta = 10^\circ$	-3.9%	**-6.0%**	**-6.8%**	-3.8%
Negative y region	$\beta = 0^\circ$	+3.5%	**+5.5%**	**+5.6%**	+4.6%
	$\beta = 5^\circ$	+4.6%	**+5.4%**	**+4.7%**	+3.5%
	$\beta = 10^\circ$	+3.4%	**+7.1%**	**+7.3%**	**+5.2%**

Table 3-5. Results of $\triangle \overline{u}/U_\infty$ according to β and Re_D with the rectangular flat plate

red text : 5.0% ≤ $\triangle \overline{u}/U_\infty$

Items		Re_D			
		4.0×10^4	8.0×10^4	1.2×10^5	1.6×10^5
Positive y region	$\beta = 0^\circ$	+2.0%	+3.8%	+3.9%	+3.1%
	$\beta = 5^\circ$	-0.4%	+2.3%	+4.0%	+3.8%
	$\beta = 10^\circ$	-3.3%	-4.5%	-4.1%	-1.0%
Negative y region	$\beta = 0^\circ$	+2.2%	+4.4%	+4.7%	+3.9%
	$\beta = 5^\circ$	+2.7%	**+5.0%**	+4.3%	+3.2%
	$\beta = 10^\circ$	+2.5%	**+7.0%**	**+7.2%**	**+5.0%**

Table 3-6. Results of $\triangle \overline{u}/U_\infty$ according to β and Re_D with the semi-elliptical flat plate

red text : 5.0% ≤ $\triangle \overline{u}/U_\infty$

Items		Re_D			
		4.0×10^4	8.0×10^4	1.2×10^5	1.6×10^5
Positive y region	$\beta = 0^\circ$	+1.9%	+4.2%	+4.9%	+4.1%
	$\beta = 5^\circ$	-0.8%	+2.4%	+4.1%	+4.3%
	$\beta = 10^\circ$	-3.1%	-5.4%	-6.1%	-3.6%
Negative y region	$\beta = 0^\circ$	+2.1%	+4.9%	+1.6%	+5.5%
	$\beta = 5^\circ$	+2.7%	+5.4%	+5.6%	+4.4%
	$\beta = 10^\circ$	+1.5%	+4.0%	+4.4%	+4.4%

제 4 장 결 론

4.1. 보호가이드가 EM-Log 주위 유동에 미치는 영향

직사각형 형상 보호가이드 모형과 반타원형 형상 보호가이드 모형의 끝단에서 발생하는 tip vortex는 β = 10°에서 특히 강하게 나타나며, Re_D 가 증가할수록 tip vortex가 강해진다.

EM-Log 모형만 있는 경우와 비교했을 때, β = 0°, 5°에서는 보호가이드 모형에 의한 EM-Log 모형 주위 유동 변화가 크지 않다. 반면, β = 10°에서는 보호가이드 모형이 EM-Log 모형 주위 유동을 크게 변화시키며, 이로 인해 EM-Log 모형의 positive y region 영역을 지나는 유속이 감소한다. 이러한 현상은 보호가이드 모형의 형상과 무관하게 동일한 경향으로 나타난다.

이를 통해 보호가이드 모형(평판)과 EM-Log 모형(원통)의 주위 유동이 변화하는 임계점이 β = 10°임을 확인하였으며, 이는 Yucel, S. B. et al. (2010)의 연구결과와 유사하다.

4.2. 보호가이드가 EM-Log의 함속 측정에 미치는 영향

보호가이드는 EM-Log의 자기장을 수직으로 통과하는 유속 성분을 평균 4% 변화시킨다. 이러한 변화는 β에 비선형적으로 나타나므로 변화를 예측하는 것은 제한된다. 보호가이드에 의한 EM-Log 주위 유동 변화는 EM-Log가 부정확한 함속을 측정하게 만들며, 이는 잠수함의 부정확한 함위 산출로 이어진다.

수중에서 잠수함이 정확한 함속과 함위를 아는 것은 잠수함의 안전한 항해와 직결되는 요소이므로 본 연구는 잠수함의 안전 항해를 위해 보호가이드를 제거하는 것을 권고한다.

참고문헌

[1] Raffel, M., Willert, C. E., Scarano, F., Kähler, C. J., Wereley, S. T., & Kompenhans, J. (2018). Particle image velocimetry: a practical guide. Springer.

[2] 남만우. (2020). 해양경찰 종합항해(항해술/항해학). 북스케치.

[3] ITTC, (2021), ITTC-Recommended Procedures and Guidelines, Laboratory modelling of currents.

[4] ITTC, (2014), ITTC-Recommended Procedures and Guidelines, Guideline on Best Practices for the Applications of PIV/SPIV in Towing Tanks and Cavitaion Tunnels

[5] Amini, A., Seo, J., Rhee, S. H., & Farhat, M. (2019). Mitigating tip vortex cavitation by a flexible trailing thread. Physics of Fluids, 31(12), 127103.

[6] Serson, D., Meneghini, J. R., Carmo, B. S., Volpe, E. V., & Gioria, R. S. (2014). Wake transition in the flow around a circular cylinder with a splitter plate. Journal of fluid mechanics, 755, 582-602.

[7] Alam, M. M., & Meyer, J. P. (2013). Global aerodynamic instability of twin cylinders in cross flow. Journal of Fluids and Structures, 41, 135-145.

[8] Yucel, S. B., Cetiner, O., & Unal, M. F. (2010). Interaction of circular cylinder wake with a short asymmetrically located downstream plate. Experiments in fluids, 49, 241-255.

[9] Paik, B. G., Lee, C. M., & Lee, S. J. (2005). Comparative measurements on the flow structure of a marine propeller wake between an open free surface and closed surface flows. Journal of marine science and technology, 10, 123-130.

[10] Di Felice, F. (2004). Experimental investigation of the propeller wake at different loading conditions by particle image velocimetry. Journal of Ship Research, 48(02), 168-190.

[11] Jo, Minsu. (2020). A EM-Log Aided Navigation Filter Design for Maritime Environment. Journal of Advanced Navigation Technology, 198-204.

[12] 신진우. (2017). 유연부가물이 부착된 3차원 날개 후류 SPIV 계측을 이용한 와류 특성 연구 [석사학위, 서울대학교]

[13] 설동명. (2013). 예인수조용 2차원 입자영상유속계를 이용한 유선형 수면관통 물체 후류의 난류유동 해석 [박사학위, 서울대학교].

[14] 한국건설기술연구원. (2014). 입자영상유속계(PIV)를 이용한 하천구조물 주변 유동해석 기법 개발.

[15] 한국원자력연구소. (2004). LDV의 구성 및 유속 측정.

[16] 김재훈, 서인덕, & 이신형. 2022년 6월. EM-Log와 보호가이드 주위 유동 분석을 위한 2차원 전산유체역학 해석. 제12회 한국유체공학학술대회. 대한민국 창원시.

[17] 해군·방위사업청. (2021.9.28.). 3000톤급 잠수함 3번함 '신채호함' 진수… SLBM 탑재. 대한민국 정책브리핑. https://www.korea.kr/news/policyNewsView.do?newsId=148893617

[18] 문근식. (2014.5.1.). [문근식의 잠수함 전투이야기] 4. U-보트 한달새 41척 침몰, '검은 5월' 맞다. 이코노믹 리뷰. https://www.econovill.com/news/articleView.html?idxno=186969

[19] AGI Ltd. AGILOG 2 Electromagnetic Speed Log System. https://www.agiltd.co.uk/naval-products/ship-navigation/agilog-speed-log/

[20] Optolution. Measurement principle of the Particle Image Velocimetry (PIV). https://www.optolution.com/en/measuring-principles/piv-principle/

[21] Quantel laser. EverGreen^2 (70-200mJ @ 532nm). https://www.quantel-laser.com/en/products/item/evergreen-70-200-mj-.html

[22] Dantec dynamics. Measurement Principles of LDA. https://www.dantecdynamics.com/solutions/fluid-mechanics/laser-doppler-anemometry-lda/measurement-principles-of-lda/

[23] Modu-laser. Modu-laser Argon Laser Products. https://modu-laser.com/argon-laser-products

[24] Polytec. Laser Doppler vibrometry. https://www.polytec.com/eu/vibrometry/technology/laser-doppler-vibrometry

[25] Dantec dynamics. FiberFlow components. https://www.dantecdynamics.com/components/fiberflow-components/?sourceid=1385

[26] Photron. Fastcam mini ux. https://photron.com/fastcam-mini-ux/

[27] Dantec dynamics. HGS-10, diam. 10μm, 250g. https://www.dantecdynamics.com/product/hgs-10-diam-10-m-250-g/

[28] Youtube. SNUTT. https://youtu.be/h0Krt8-2hzo

[29] Youtube. SNUTT. https://youtu.be/H-aiC1emwp4

[30] Youtube. SNUTT. https://youtu.be/QBC97FMZ0CU

[31] Youtube. SNUTT. https://youtu.be/AQsgROGk9_8

[32] Youtube. SNUTT. https://youtu.be/xcuIKDkEpm0

[33] Youtube. SNUTT. https://youtu.be/hNzHpukrJXc

[34] Youtube. SNUTT. https://youtu.be/YLOwS-gxvaE

[35] Youtube. SNUTT. https://youtu.be/apHLyDR0Zfk

[36] Youtube. SNUTT. https://youtu.be/IAfte4Xxq7Q

[37] Youtube. SNUTT. https://youtu.be/fuIyoqsC7Zg

[38] Youtube. SNUTT. https://youtu.be/wy-CvrH5zpw

[39] Youtube. SNUTT. https://youtu.be/5jdznFCYbdM

Abstract

An experimental study on the effects of a protection guide affecting the flow near the electro-magnetic log (EM-Log)

KIM JAEHUN
Naval Architecture and Ocean Engineering
The Graduate School
Seoul National University

Submarines calculate the ship's velocity and position using EM-Log (Electro-Magnetic Log) underwater. EM-Log measures the flow velocity and calculates the ship's velocity by Faraday's law. Inaccurate measurements of the ship's velocity can be attributed to the ocean currents and hull appendages, which disturb the flow near the EM-Log.

Submarines of the Republic of Korea Navy attach a fin-shaped protection guide in front of the EM-Log to prevent the EM-Log's damage. Submarines of other countries do not attach protection guides. In this study, model experiments were conducted in the cavitation tunnel to analyze the effect of the protection guide on the EM-Log. The flow was measured using PIV (Particle Image Velocimetry) and visualized using the tuft test technique.

Model experiments were conducted on cylinder and flat plates of

three shapes (fin-shaped, rectangular, and semi-elliptical). Cylinder and flat plates were simplified shapes of EM-Log and protection guides. The experimental variables are the height of the PIV measurement plane (h), the drift angle (β), and the Reynolds number (Re_D). The test conditions are h/H_c = 0.7, 0.8, 0.9 and β = 0°, 5°, 10° and Re_D = 4.0×10^4, 8.0×10^4, 1.2×10^5, 1.6×10^5. H_c means the height of the cylinder, and the characteristic length of Re_D is the diameter of the cylinder.

In the case of the rectangular and semi-elliptical flat plate, the flow disturbance appeared strongly near the cylinder at β = 10°, resulting in a decrease in flow velocity.

At β = 10° and $Re_D \geq 5.0 \times 10^4$, the tip vortex generated greatly from the tip of the semi-elliptical flat plate. The tip vortex disturbed the flow near the cylinder. Due to the effect of the tip vortex, the flow velocity reduced near the cylinder.

The change in the ship's velocity was observed with respect to the protection guide and β. In the case of no protection guide, the ship's velocity was changed by 1% on average, and the change rate was linear to β. In the case of all protection guides, the ship's velocity was changed by 4% on average, and the change rate was non-linear to β.

The protection guide disturbed the flow near the EM-Log, regardless of its shape, and made the EM-Log calculate an inaccurate ship's velocity. It is recommended to remove the protection guide for safe navigation, the calculation of the accurate velocity, and range of the submarines.

keywords : PIV (Particle Image Velocimetry), Tuft test, Tip vortex, Submarine, Protection guide, EM-Log (Electro-Magnetic Log)

Student Number : 2021-27544