

Computational Flow Analysis and Drag Coefficient Research for Angle of Attack in Slocum Underwater Glider

Jeong-Woo Park*, Jung-Woo Lee*, Young-Ho Choi*, Kap-Ho Seo*, Jin-Ho Suh* and Jong-Jin Park**

*Field robotics research area, Korea Institute of robot and convergence (KIRO), Pohang, Korea

**College of Natural Sciences, Kyungpook national university (KNU), Deagu, Korea

Slocum 수중 글라이더의 유영 받음각에 대한 전산유동해석 및 항력계수 연구

박정우* · 이정우* · 최영호* · 서갑호* · 서진호* · 박종진**

*한국로봇융합연구원

**경북대학교

KEY WORDS: Underwater glider 수중글라이더, Slocum 슬로컴, Angle of attack 받음각, Drag coefficient 항력계수, Computational flow analysis 전산유동해석

ABSTRACT: An underwater glider makes it easy to explore a wide area with low power. However, an underwater glider is difficult to use for rapid collection, because the surfacing location cannot be predicted after a dive. Thus, simulation research is needed to predict the swimming path. In this paper, based on research, a linearized equation is derived for the drag coefficient at each angle of attack by assuming the boundary conditions for the Slocum underwater glider and performing a computational flow analysis.

1. 서 론

인간이 직접 탐사하기 어려운 해양 환경에서는 로봇기술을 활용하여 탐사임무를 수행한다. 대표적으로 활용되는 로봇은 이동 방식에 따라 해저 주행식 및 해중 유영식으로 나눌 수 있다. 해중 유영식의 대표적인 형태로 Remotely operated underwater vehicle(ROV)나 Autonomous underwater vehicle(AUV)를 들 수 있다. 이들은 전력 기반의 추진체 다수가 장착되어 있으며, 운영을 통해 수중에서 자유자재로 이동하며 임무를 수행할 수 있다. 이 같은 해중 유영식 로봇은 전력을 많이 필요로 하기 때문에 배터리가 장착된 경우 정해진 운영시간 동안만 탐사하거나 외부에서 전력공급을 받는 경우 케이블 길이의 제한으로 정해진 공간 내에서만 탐사를 할 수 있다.

만약, 탐사임무를 수행해야할 지역이 넓고, 장시간 운영이 필요한 경우 수중 유영식 로봇이 가지는 단점을 회피하기 위해 광범위의 영역을 저전력으로 장시간 탐사할 수 있는 수중 글라

이더를 활용할 수 있다. 수중 글라이더는 AUV와 비슷한 형태를 가지지만 별도의 추진체가 없으며 내부 배터리의 전력으로 부력제어를 통해 상승 또는 하강의 힘을 생성하여 저전력으로 수중 유영을 할 수 있다. 하지만 수중 글라이더는 별도의 케이블이 연결되지 않으며 기본사양의 경우 수중 무선통신장치도 없어서 임무를 위한 감항을 시작하면 부상할 때까지는 운영자가 상태나 위치, 획득한 정보 등을 파악할 수 없다. 이때는 시뮬레이션을 통해 수중 글라이더의 상태를 추정해볼 수 있다. 시뮬레이션을 위해서는 수중 환경 및 수중 글라이더에 대한 동역학 모델링 정립되어야 하며, 이를 위해 모델 분석 및 항력 도출이 선행되어야(Seo et al., 2008; Tan et. al, 2013) 한다.

기존의 연구들은 대상이 되는 모델의 $\pm 90^\circ$ 의 피치 각 영역에 대하여 $10^\circ \sim 30^\circ$ 구간 별로 항력계수를 도출하였다. 하지만 Slocum 수중 글라이더는 순항 유영중에 받음각은 0° 를 기준으로 $\pm 3^\circ$ 이내인 것이 실험적으로(Graver et al., 2003) 나타났기 때문에 순항 유영중인 상태를 시뮬레이션 하기에는 이 받음각

Received 27 July 2016, revised 27 September 2016, accepted 7 October 2016

Corresponding author Jeong-Woo Park: +82-54-279-0445, idealcreator@kro.re.kr

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of Korean Marine Robot Technology Society(KMRTS) 2016 in Busan

영역을 포함한 미소 구간에 대해 정밀한 분석이 필요하다.

본 논문에서는 Slocum 수중 글라이더 모델을 대상으로 유영 받음각에 대한 항력계수를 도출하기 위해 먼저 실측 기반으로 3D 모델을 구현하였고, 특정 속도로 순항 유영 중의 환경조건 및 적정 구간에 대한 받음각을 설정하여 전산유동해석을 수행하였으며, 받음각 변화에 따른 항력계수의 변화에 대해 연구하였다.

2. 수중 글라이더 모델 및 전산유동해석 환경조건

2.1 수중 글라이더 모델

전산유동해석을 위해 Fig. 1과 같이 Slocum 수중 글라이더를 실측 기반으로 3D 모델을 설계하였다. 그리고 모델링을 통해 얻게 된 사양은 Table 1과 같다.

2.2 전산유동해석 환경조건

수중 글라이더의 상세사양은 전용 매뉴얼(Teledyne, 2012)에 제시되지 않기 때문에 전용 매뉴얼에 제시된 기본사양과 실측된 3D 모델을 참고하여 상세사양을 도출하였다. 그러므로 본 사양은 실제 제품과 사양이 다를 수 있다.

Table 1 The Specifications of Slocum underwater glider's 3D model

Specification	
Size	1939.9 × 988 × 402.2 mm
Weight	50 kg
Volume	0.0490 m ³
Center of mass	X= 0.19, Y= 2.08, Z= 849.4 mm
Moment of inertia (Taken at the center of mass)	$I_{xx} = 8108.969$ $I_{yy} = 0.523$ $I_{zz} = -0.256$ $I_{yx} = 0.523$ $I_{zy} = 8121.730$ $I_{xz} = 96.460$ $I_{zx} = -0.256$ $I_{xy} = 96.460$ $I_{yz} = 362.149$

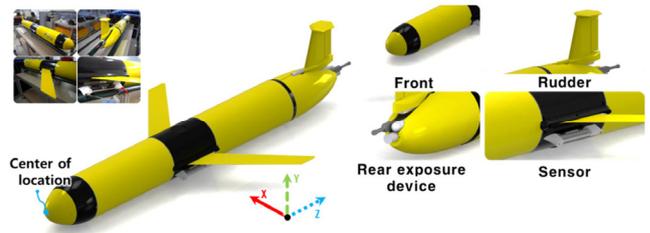


Fig. 1 Designed 3D model based on actual size of the Slocum underwater glider

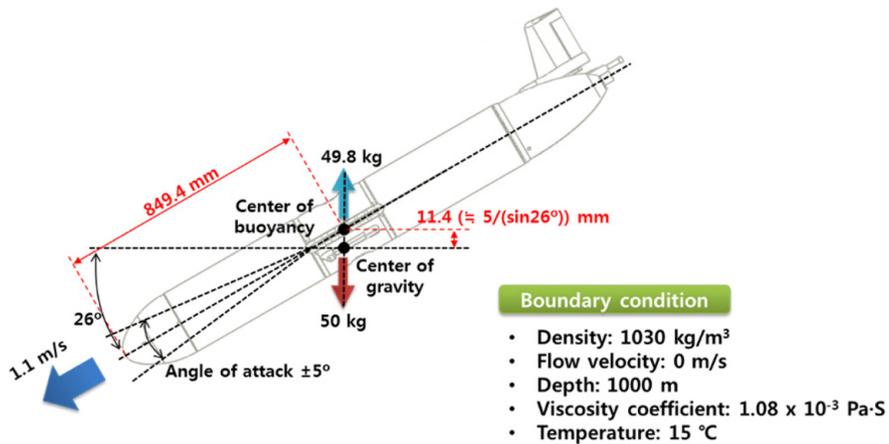


Fig. 2 Boundary conditions of underwater glider at the cruise submerged operation

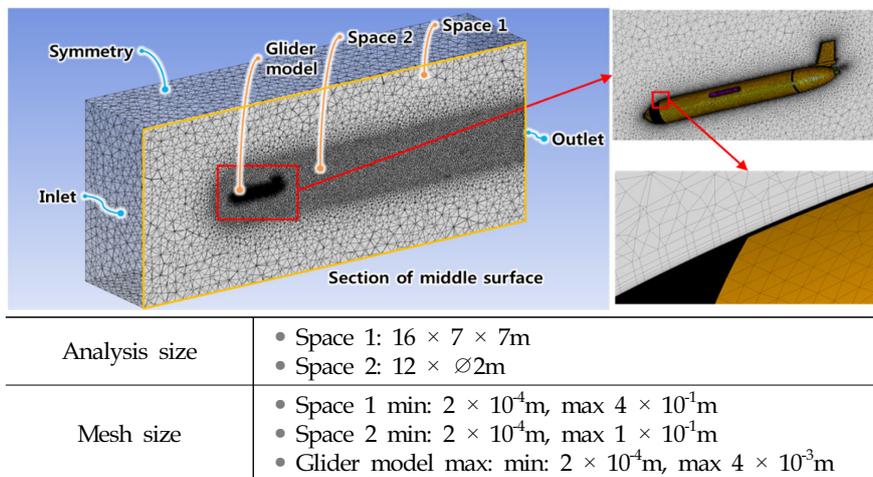


Fig. 3 Mesh design for computational fluid analysis & specifications of mesh

수중 글라이더의 순항 상태는 자체 중력과 부력에 의해 그 자세가 결정이 되는데, 이 또한 매뉴얼을 참고하였다. Fig. 2와 같이 하강 중 자세가 26°의 기울어지며, 순항 중 받음각은 ±5° 이내로 설정하였다. Slocum 수중 글라이더로 몇 가지 상태에 대하여 실험적으로 도출된 결과(Joshua et al., 2003)를 보면 순항 유영중에 받음각은 ±3° 내외임을 보였기 때문에 이 구간을 포함한 미소 구간에 대해 정밀한 분석이 필요하였고 본 논문에서는 받음각의 구간을 ±5° 이내로 설정하였다. 그리고 순항 유영 중의 속력은 1.1m/s로 임의 설정하였다. 그 외 해저 환경에 대한 조건으로서 밀도, 압력, 점성 등에 대해 설정하였다.

전산유동해석을 위한 메쉬는 ANSYS 소프트웨어를 사용하여 설계하였다. 메쉬는 해석 효율성을 위해 면의 조밀도를 공간별로 다르게 설정하는 방법으로 Fig. 3과 같이 설계하였다. 먼저 해석 공간을 수중 글라이더 모델에 근접한 영역과 나머지 영역 두가지로 나누었다. 모델의 격자 크기는 협소하거나 복잡한 부분인 날개의 모서리 부분과 후미부를 고려하였고, 유체에 직접적으로 영향을 주는 부분이기 때문에 격자가 가장 조밀하도록 설정하여야 한다. 하지만 격자수가 많으면 해석시간에 영향을 주기 때문에 반복적인 테스트를 통해 격자 크기를 4mm 이하로 설정하였다. 그리고 모델에 근접한 영역은 유동의 흐름이 안정적이지 않고 와류가 발생할 것으로 보이는 관심 영역이기 때문에 100mm 이하이도록 설정하였다. 나머지 영역의 격자는 근접한 영역의 안정적이지 않은 유동의 흐름을 완충시키면서 해석의 효율을 높일 수 있도록 400mm 이하이도록 설정하였다. 그리고 Inlet과 Outlet은 각각 모델의 정면과 후면 방향으로 긴 해석공간 양면에 지정하였다. 다만, 모델의 정면을 기준으로 특정 받음각 만큼 피치 방향으로 기울어 지도록 설정하여 모델이 특정 받음각 방향으로 순항 유영을 하면 반대의 방향으로 상대적 유속이 발생하는 환경을 구현하였다.

3. 수중 글라이더 받음각에 대한 전산유동해석 결과

전산유동해석 소프트웨어는 ANSYS의 FLUENT를 사용하였으며 아래와 같이 해석 조건을 설정하였다. 유영 방향을 기준좌표계로 설정한 것은 유영 방향이 곧 받음각이기 때문에 이를 기준 좌표계로 설정하고 모델을 받음각 만큼 피치 방향으로 기울이면서 해석 공간을 설정하면 반복적인 해석 작업을 수행하는데 편의를 가질 수 있다. 그리고 격자 구성은 복잡한 형상에 유리한 tetra/prism

타입의 격자를 사용하였다. 그리고 물은 압축율은 $3.3 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$ 정도로 매우 낮기 때문에 해석 공간의 유체는 시간적인 효율을 위해 비 압축성 유체라 가정하였다. 난류모델은 정상 유동장 해석에서 다른 난류 모델에 비해 비교적 우수한 성능을 가진 Shear-stress transport(SST) 모델을 사용하였다.

- 유영 방향을 기준 좌표계로 설정
- Tetra/prism 타입의 격자 사용
- 비 압축성 유체라 가정
- 정상상태 해석
- 난류모델 Shear-stress transport 사용

위 해석조건을 토대로 받음각 +5°, +3°, +1°, 0°, -1°, -3° -5°에 대해 전산유동해석을 수행하였다. 그 중 +5°, 0°, -5°에 대한 공간상의 결과는 Fig. 4, 5, 6과 같다. 그리고 수치적 최대/최소 결과 값은 Table 2과 같다. 각 경우에 대해 살펴보면 받음각이 0° 일 때 모델의 전면부 및 날개의 전면부에 상대적으로 높은 압력이 작용하는 것을 볼 수 있다. 그리고 모델의 후미부에도 상대적으로 높은 압력이 걸리는 것을 볼 수 있는데 속력 분포를 살펴보면 후미부 주변에서 매끄럽지 못한 형상으로 인해 Fig. 5와 같이 와류가 발생하면서 주변에 비해 속도가 상대적으로 낮아지고 이에 따라 압력이 올라간 것으로 볼 수 있다. 이 후미부의 와류에 의한 압력은 수중 글라이더가 유영하는데 저항력으로 작용하는 것으로 볼 수 있다. 받음각이 -5°와 +5°일 때는 0° 일 때와 마찬가지로 와류에 의해 후미부의 압력이 형성됨을 볼 수 있다. 그리고 그림에는 나오지 않지만 날개의 위/아래로 상대적으로 높은 압력이 형성되었고, 날개 끝단의 뒷부분에도 약간의 와류현상이 발생됨을 볼 수 있었다. 그 외에는 모델 주위 로 흐름에 대한 유선이 대체로 균일하게 나타났다.

4. 수중 글라이더 받음각에 대한 항력계수

전산유동해석을 통해 도출한 항력계수는 Table 3과 같다. 이 결과는 실험적으로 도출된 결과(Joshua et al., 2003)와 비교하였을 때 받음각 -3°를 예들 들면 약 -0.14 정도의 큰 차이를 보인다. 이는 항력계수와 속도는 반비례 관계를 가지기 때문에 (Pijush and Ira, 2010) 실험에서의 속도와 본 논문에서 가정 한 속도가 다르기 때문에 이러한 차이를 가지는 것으로 볼 수

Table 2 Result value of each angle of attack(AOA)

Items		Value		Notes
		Pressure[Pa]	Velocity[m/s]	
AOA 0°	Min	-0.00133	≈ 0	Vortex flow at rear
	Max	0.0631	1.52	
AOA -5°	Min	-0.00141	≈ 0	Vortex flow at rear & wings
	Max	0.0633	1.65	
AOA +5°	Min	-0.00141	≈ 0	Vortex flow at rear & wings
	Max	0.0635	1.66	

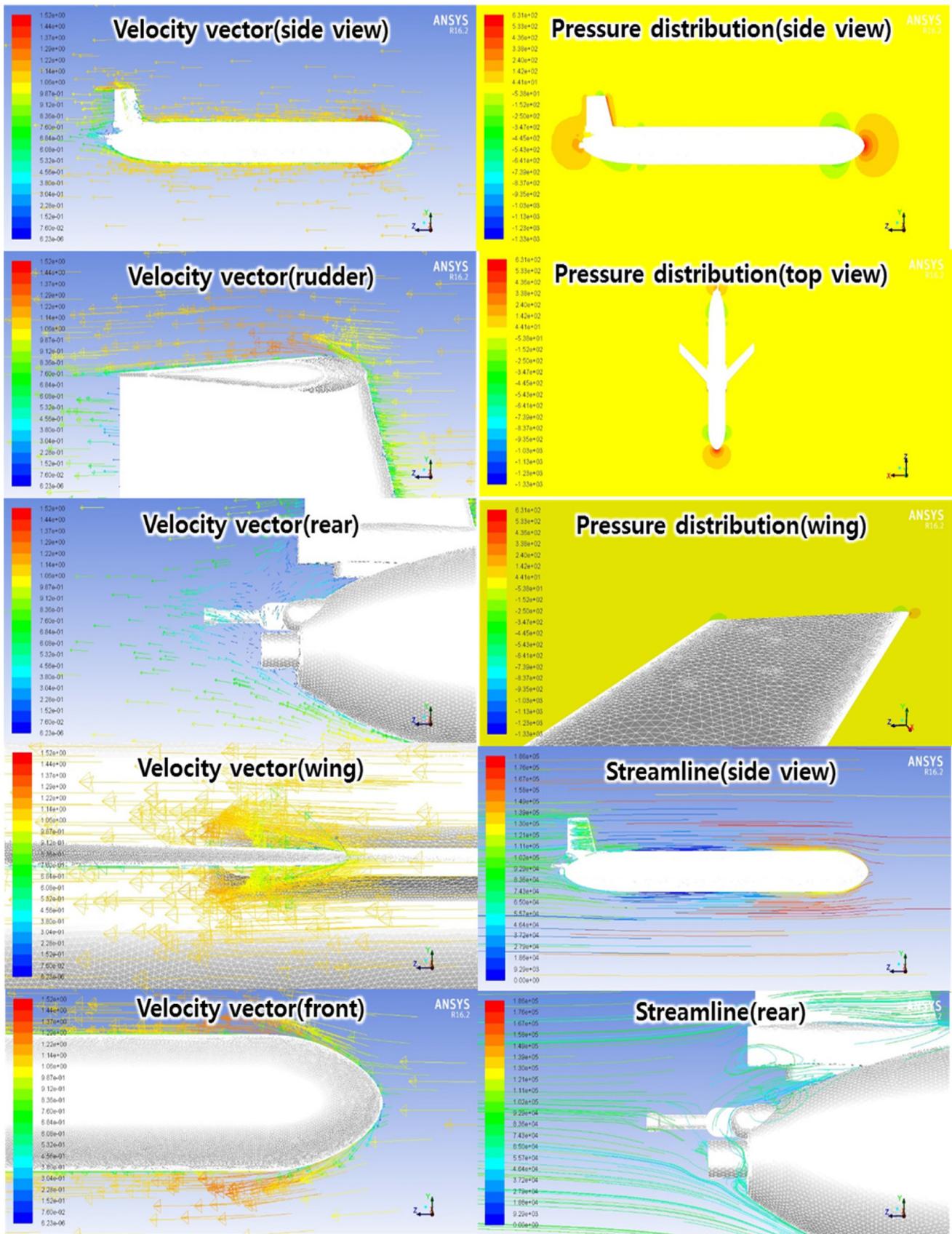


Fig. 4 Computational flow analysis results at AOA of 0°

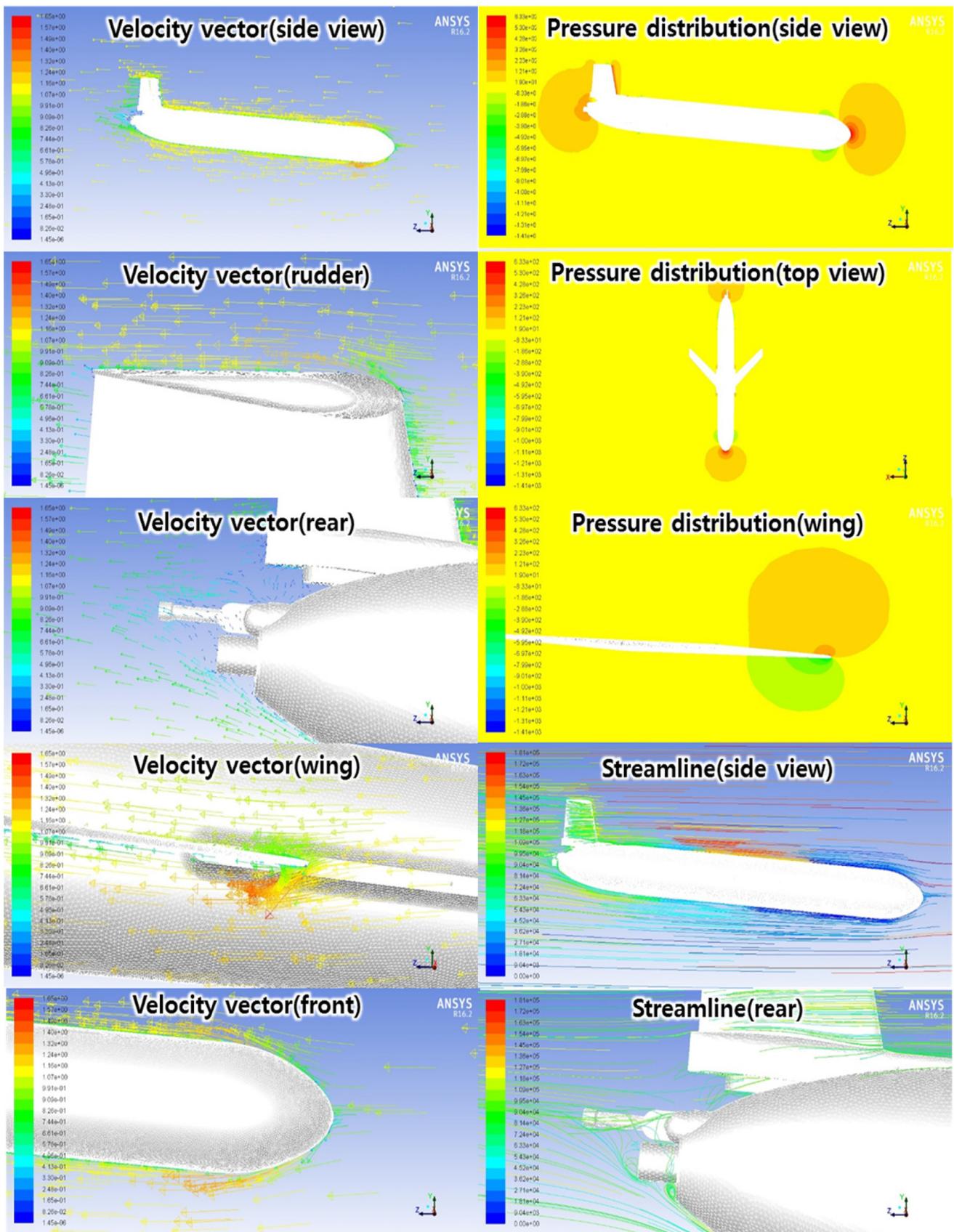


Fig. 5 Computational flow analysis results at AOA of -5°

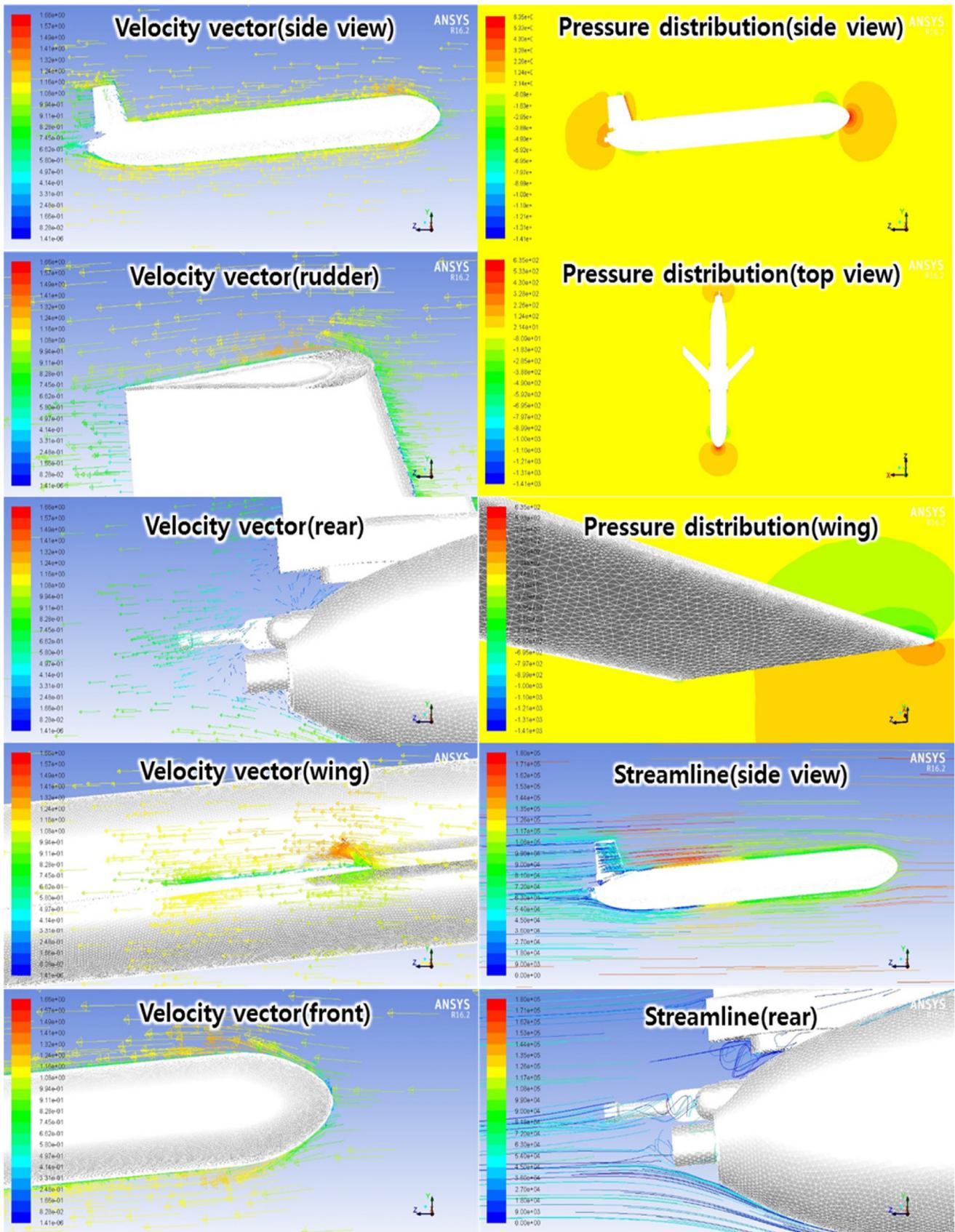


Fig. 6 Computational flow analysis results at AOA of +5°

Table 3 Result value of projection area & drag coefficient at each AOA

AOA	Drag force [N]	Projection area [m ²]	Drag coefficient
+5°	8.422046	0.077493	0.166332
+3°	7.130134	0.064802	0.168395
+1°	6.888378	0.052165	0.202098
0°	6.684474	0.046724	0.218952
-1°	7.086405	0.053336	0.203341
-3°	7.397042	0.066971	0.169042
-5°	8.82913	0.080947	0.166932

있다. 이제 수중 글라이더 받음각의 변화에 따른 항력계수의 변화를 식으로 표현하고자 하는데 일반적으로 알려진 항력계수와 레이놀즈 수의 관계식은 구의 형태에 한해서 도출한 식인데다 레이놀즈의 수를 구하면 의 값을 가짐으로서 항공기와 같이 고속의 모델에 적합한 마하 수를 다루어야 하기 때문에 본 모델에는 적합하지 않다(Ahmadi, 2004; Polezhaev and Chircov, 2011; Morrison, 2013). 그래서 본 논문에서는 식 (1)과 같은 2차식에 MATLAB의 커브피팅(Curve fitting) 툴을 이용하여 항력계수의 변화를 식으로 표현하고자 한다(Tan et. al, 2013).

$$C_D = K_1\theta_a^2 + K_2\theta_a + K_3 \quad (1)$$

여기서, θ_a 는 받음각이며, K_1 , K_2 , K_3 는 구하고자 하는 계수이다. 항력계수의 변화를 살펴보면 받음각 0°를 기준으로 대칭의 양상을 보인다. 하지만 그 값을 대칭으로 비교해 보면 미세하지만 차이를 보이고 있다. 그리고 Fig. 7과 같이 받음각에 대한 사영면적의 변화를 보면 받음각 0°에서 비선형적인 양상을 보인다. 그래서 항력계수의 변화를 선형화 하는데 받음각 0°를 기준

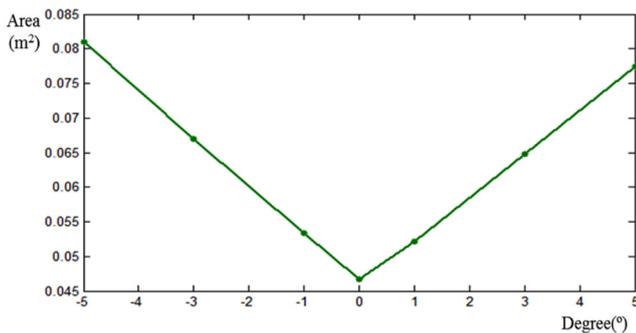


Fig. 7 Projection area at each AOA

Table 4 Projection area & drag coefficient result value at each AOA

AOA	Projection area [m ²]	Drag force [N]	Drag coefficient
≥0°	0.002822	-0.02516	0.2209
<0°	0.002724	0.02463	0.2211

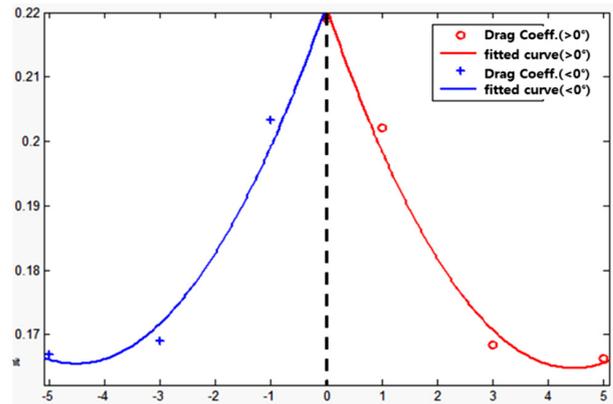


Fig. 8 Curve fitting result about drag coefficient

으로 영역 둘로 나누어 각각의 식을 구하였으며 커브피팅을 통해 구한 식의 계수와 결과는 Table 4와 Fig. 8과 같다.

5. 결 론

수중 글라이더의 신속한 회수를 위해서는 부상할 것으로 예상되는 위치를 시뮬레이션을 통해 추정하는 방법이 있는데 이 시뮬레이션을 위해서는 수중 환경 및 수중 글라이더에 대한 동역학적 모델링이 필요하다. 이 동역학적 모델을 세우기 위한 기반 연구 중의 하나로 모델에 대한 항력계수를 도출하는 연구가 필요한데, 본 논문을 통해서 Slocum 수중 글라이더의 전산유동해석을 통해 항력계수에 대한 식을 도출하는 연구를 수행하였다. 먼저 실측 기반으로 수중 글라이더의 3D 모델을 설계하고 이를 분석하였다. 그리고 순항 유영 상태와 환경조건을 가정하여 해석환경을 설정하였고 받음각 ±5° 범위 이내에 대해 ANSYS FLUENT를 이용해 각도별 전산유동해석을 수행하였다. 마지막으로 해석결과 도출된 항력계수 값을 토대로 MATLAB 커브피팅 툴을 이용하여 받음각의 변화에 대한 항력계수의 변화를 식으로 표현하였다.

추후에는 속도의 변화에 대한 항력계수의 변화 양상을 분석하고 이를 본 논문의 결과와 융합하여 각도와 속도에 대해 선형화된 항력계수 식을 구하는 연구를 수행하도록 하겠다. 그리고 이를 토대로 수중 글라이더의 동역학적 모델식에 적용하여 잠항 후 부상하기까지의 경로 및 상태를 시뮬레이션하고 부상 위치를 추정하는 연구를 수행하도록 하겠다.

후 기

이 논문은 2016년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (동해권 실시간 원격 해양탐사를 위한 수중글라이더 운용시스템 개발, 20140558)

References

Tan, K.M., Lu, T.-F., Anvar, A., 2013. Drag Coefficient

- Estimation Model to Simulate Dynamic Control of Autonomous Underwater Vehicle (AUV) Motion. 20th International Congress on Modelling and Simulation, Australia, 963-969.
- Seo, D.C., Jo, G., Choi, H.S., 2008. Pitching Control Simulations of an Underwater Glider Using CFD Analysis. OCEANS 2008-MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean, 1-5.
- Graver, J.G., Bachmayer, R., Leonard, N.E., Fratantoni, D.M., 2003. Underwater Glider Model Parameter Identification. Proceedings of the 13th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST).
- Pijush, K.K., Ira, M.C., 2010. Fluid Mechanics. Elsevier.
- Polezhaev, Y.V., Chircov, I.V., 2011. Drag Coefficient. Thermopedia. [Online] Available at: <<http://www.thermopedia.com/content/707/>> [Accessed July 2016].
- Morrison, F.A., 2013. Data Correlation for Drag Coefficient for Sphere. Department of Chemical Engineering, Michigan Technological University (MTU), Houghton, MI.
- Ahmadi, G., 2004. Hydrondynamic Forces. Clarkson University
- Teledyne Webb Resarch, 2012. Slocum G2 Glider Operators Manual.