

수중운동체 주위 와류유동 저감을 위한 부가물 형상 설계기법 연구

여상재* · 홍석윤** · 송지훈****

* 서울대학교 조선해양공학과 박사, ** 서울대학교 조선해양공학과 교수,

*** 전남대학교 조선해양공학과 교수

Research on the Design Methods of Appendages to Reduce Vortex Flows Around Underwater Vehicles

Sang-Jae Yeo* · Suk-Yoon Hong** · Jee-Hun Song****

* Ph.D., Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

** Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

*** Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea

요약 : 수중운동체에는 필수적 기능을 담당하는 함교, 러더와 같은 다양한 부가물들이 장착된다. 이들 부가물과 선체의 접합부에는 유선의 박리로 인해 다양한 와류가 생성된다. 이러한 와류는 수중운동체의 추진기로 유입되어 수중방사소음의 증가와 같은 부정적 효과를 야기해 스텔스 성능의 향상을 위해서는 반드시 저감되어야 한다. 본 연구에서는 부가물과 선체의 접합부에서 생성되는 말발굽와류(HSV)와 뿌리와류(RV)를 저감하는데 효과적인 와류저감장치(VRD)에 대한 설계기준을 도출하였다. 먼저, 접합부 와류의 레이놀즈 상사특성 만족 여부를 분석함으로써 설계기준 도출에 부가물의 제원과 유속의 영향을 레이놀즈수로 대체하였다. 또한 VRD의 형상을 정의하기 위해 베지어 곡선을 활용해 VRD의 3차원 표면을 파라미터화하였다. 이후, 와류저감을 위한 VRD의 설계기준 도출을 위해 다양한 제원의 VRD의 와류저감 성능을 분석함으로써 최적의 길이 대 높이 비율이 선정되었다. 최종적으로 대상 범위의 부가물들에 대해 최적 비율을 만족하는 다양한 크기의 VRD 성능이 비교 분석되었다. 이를 종합하여 임의의 부가물에 대해서도 와류저감 성능을 나타낼 수 있는 VRD의 무차원화 설계기준이 도출되었다.

핵심용어 : 수중운동체, 부가물, 와류유동, 와류저감구조물, 말발굽와류, 뿌리와류, 접합부유동

Abstract : This research establishes design standards for vortex reduction devices (VRDs) aimed at minimizing underwater radiated noise by mitigating horseshoe vortex (HSV) and root vortex (RV) generated at the junction of appendages and the hull of underwater vehicles. Initial analysis replaced the influence of appendage dimensions and flow velocity with the Reynolds number by verifying the Reynolds similarity of vortex flows. The three-dimensional surfaces of VRDs were parameterized using Bezier curves. Optimal length-to-height ratios were identified by evaluating the vortex reduction performances of VRDs with various dimensions. Ultimately, non-dimensional design standards were derived for VRDs, ensuring effective vortex reduction across any appendage, thereby enhancing stealth performance.

Key Words : Underwater vehicle, Appendage, Vortex flow, Vortex reduction device, Horseshoe vortex, Root vortex, Junction flow

1. 서론

수중운동체에는 함교, 러더 등과 같이 필수적인 기능을 위한 다양한 부가물들이 선체에 부착된다. 이러한 부가물들은 선체와의 접합부에서 역압력구배를 야기해 유선형의 선

체 주위에 안정된 유동장을 교란하는 원인이 된다. 특히, 부가물과 선체의 접합부에서 생성되는 말발굽와류(Horseshoe vortex, HSV)와 뿌리와류(Root vortex, RV)는 그 세기가 강하고 소산되지 않는 특성이 있어 추진기로 유입되어 추진 효율의 저하 및 축계 진동의 증가와 같은 부정적 효과를 야기한다고 알려져 있다(Bushnell and Donaldson, 1990; Renilson, 2015). 따라서 수중운동체의 스텔스 성능 향상을 위해서는 부가물 주위에 생성되는 와류유동(Vortex flow)을 저감할 수

* First Author : yeosj0191@snu.ac.kr, 02-880-7331

† Corresponding Author : jhs@jnu.ac.kr, 061-659-7156

있는 방안이 필수적으로 요구된다.

수중운동체의 부가물 접합부 주위에는 강력한 와류유동이 형성되며 이를 저감하기 위한 다양한 설계기법에 대한 연구가 수행되었다. Zhihua et al.(2011; 2012)과 Liu et al.(2014)은 수중운동체의 부가물 앞날 근처에 소형 배플(Baffle)을 적용하여 역와류를 이용한 부가물 와류 저감효과를 유체동역학적 관점에서 분석하였다. Toxopeus et al.(2014)는 이중 곡선형의 덮개 구조물인 필렛(Fillet)을 수중운동체 부가물에 적용하여 부가물 와류저감 효과를 확인하였다. 특히, Yeo et al.(2022)는 부가물에서 발생하는 와류유동이 추진기로 유입되어 불균일 반류장을 야기해 수중방사소음(URN, Underwater radiated noise)이 증가하는 현상과 와류저감장치(VRD, Vortex reduction device)를 적용시 URN 저감에 효과가 있음을 분석하였다. VRD는 역압력구배를 해소해 와류를 저감함으로써 URN 저감 효과가 입증되었지만 현재까지 수행된 연구에서는 이들의 제원 및 형태에 따른 와류저감 성능에 대해 분석된 사례가 없다. 실제 수중운동체에는 다양한 제원의 부가물들이 장착되므로 적절한 VRD의 설계를 위해서는 와류저감 성능을 발휘할 수 있는 정량적 설계 기준이 필수적으로 요구된다.

본 연구에서는 수중운동체의 다양한 부가물 제원과 운용 조건에 대해서도 와류저감 성능을 발휘할 수 있는 VRD를 설계하기 위한 기법을 제시하였다. 먼저, 부가물 주위에 생성되는 와류의 레이놀즈 상사 특성을 도출하였다. 다양한 유속조건과 부가물 제원의 조합은 무수히 많은 경우의 수를 도출하지만 레이놀즈 상사를 만족할 경우 상대적으로 적은 수의 분석을 통해서도 와류저감 특성을 분석할 수 있다는 장점이 있다. 이후 VRD의 3차원 형상을 정의하기 위해 베지어 곡선을 활용해 VRD의 표면을 파라미터화하고, 대상 부가물에 대한 VRD의 설치 위치 및 적용 타입을 도출하였다. 부가물 접합부 와류저감을 위한 VRD의 설계기준은 두 단계로 도출되었다. 먼저, 다양한 제원의 VRD의 와류저감 성능을 분석함으로써 최적의 길이 대 높이 비율이 선정되었다. 이후, 대상 범위의 부가물들에 대해 최적 비율을 만족하는 다양한 크기의 VRD 성능이 비교 분석되었다. 이를 종합하여 최종적으로 임의의 부가물에 대해서도 와류저감 성능을 나타낼 수 있는 VRD의 무차원화 설계기준이 도출되었다.

2. 부가물 접합부 와류의 상사특성 분석

2.1 부가물 접합부 와류 종류

부가물은 기능학적 관점에서 필수적인 구조물이지만, 유체동역학적 관점에서 부정적 반류(Unfavorable wake)나 와류유동(Vortex flow)을 생성한다. 이렇게 발생된 부가물 와류는

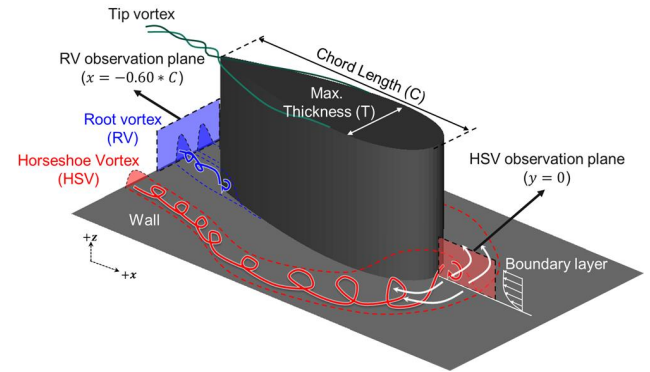


Fig. 1. Schematics of vortex system around appendage.

추진기로 유입되어 유체동역학적인 상호작용을 통해 추진기 유동소음을 증가시키는 주요 원인으로 작용한다.

Fig. 1은 일반적인 부가물 형상을 대표하여 벽면에 부착된 수중익 구조물 주변에 생성되는 와류 시스템을 나타낸다. 본 연구에서 VRD를 통해 저감하고자 하는 와류는 부가물의 전, 후면부와 바닥의 접합부에서 발생하는 HSV와 RV이다. 수중익의 끝단에서 생성되는 날개 끝 와류(Tip vortex, TV)는 와류의 세기가 약해 소산되기 쉽고, 선체에서 멀리 떨어진 위치에서 발생해 함미부의 추진기로 유입되지 않는다. 반면, HSV와 RV는 선체 근처에서 형성되어 선체를 타고 흘러 함미부의 추진기로 유입되기 때문에 추진기 반류에 직접적인 영향을 준다. 이와 같이 HSV와 RV는 불균일 반류장을 야기하여 추진기의 유동소음 증가를 야기하기 때문에, 수중운동체의 URN 성능 관점에서 반드시 저감되어야 하는 성분에 해당한다.

본 연구에서는 HSV와 RV의 세기를 정량적으로 분석하기 위해 측정 기준면을 선정하였다. HSV는 부가물 전면부 유선의 박리에 의해 야기되기에 Fig. 1의 붉은색으로 표기된 대칭평면($y=0$)에서 와도(Vorticity)의 y -방향 성분 최댓값을 기준으로 하였다. RV의 경우 수중날개의 끝날(TE)에서 바닥면에 가까운 위치에 유선이 박리하여 발생되기 때문에, 수중날개의 TE에서 후류 방향에 위치한 수직평면($x=-0.6 * C$)에서 와도의 x -방향 성분 최댓값을 기준으로 하였다. 기준면에서 측정된 HSV와 RV의 와도는 부가물의 제원과 유속을 기반으로 식 (1)과 같이 무차원화된 와도로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} HSV^* &= HSV^* C/U \\ RV^* &= RV^* C/U \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, HSV^* 와 RV^* 는 무차원 와도를 뜻하고, HSV 와 RV 는 Fig. 1에서 제시하는 평면에서 측정된 와도의 최댓값을

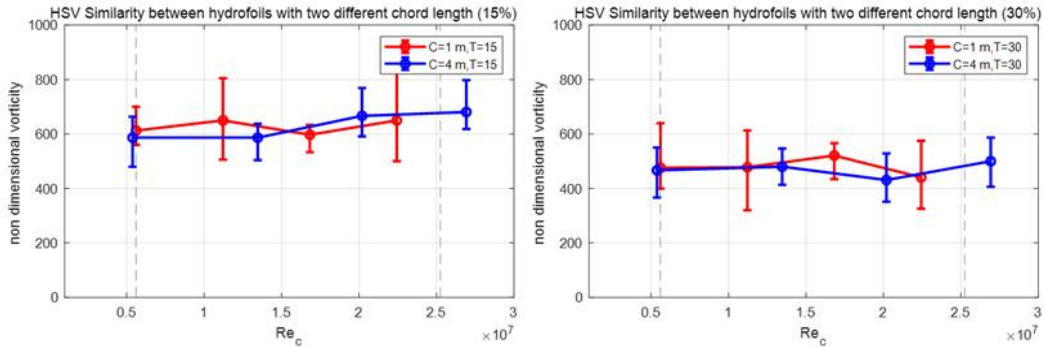


Fig. 2. Comparison of nondimensional vorticity of HSV generated from hydrofoils of different dimensions (left) hydrofoil with maximum thickness of 15% (right) hydrofoil with maximum thickness of 30%.

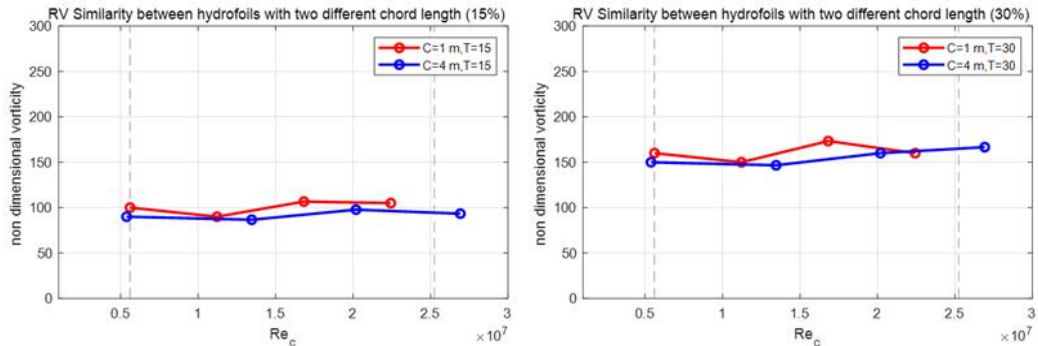


Fig. 3. Comparison of nondimensional vorticity of RV generated from hydrofoils of different dimensions (left) hydrofoil with maximum thickness of 15% (right) hydrofoil with maximum thickness of 30%.

뜻한다. C 는 수중날개의 코드길이를 뜻하고 U 는 유속을 의미한다.

2.2 부가물 접합부 와류의 레이놀즈 상사특성 분석

수중운동체에는 서로 다른 제원의 부가물이 장착되어 있으며 운용속도 또한 대상 함형에 따라 달라진다. 따라서 VRD 설계를 위해서는 부가물 와류의 상사특성에 대한 분석이 우선적으로 수행되어야 한다. 부가물에서 발생하는 HSV와 RV는 유선의 경계층 박리에 의해 발생되며 이는 유체의 점성력(Viscosity force)과 관성력(Inertia force) 특성에 의해 지배된다. 일반적으로 유체의 점성 및 관성력이 지배하는 현상에 대해서는 레이놀즈 상사법칙(Reynolds' law of similarity)을 적용해 볼 수 있다. 상사법칙이 만족할 경우, 유속조건과 부가물의 제원으로 도출되는 레이놀즈수를 기준으로 무차원 와류의 세기를 분석할 수 있으며, 특정 레이놀즈수 조건에서 발생 가능한 와류의 세기도 예측할 수 있다. 따라서 낮은 수의 케이스 분석을 통해 넓은 범위의 특성을 예측할 수 있다는 장점이 있다.

Fig. 2는 서로 다른 크기의 수중날개에서 발생하는 HSV에 대하여 무차원화 와도를 레이놀즈수(Re_c)에 따라 비교한다.

빨간색 실선과 파란색 실선은 각각 코드길이 1m, 4m로 서로 다른 제원의 수중날개에서 발생된 HSV 와도를 나타낸다. 회색 점선으로 표시된 수직선은 분석된 레이놀즈수($6.1e+6 \sim 2.8e+7$)의 범위를 나타내며, 선속 10 knot를 기준으로 할 때 부가물 길이가 1.6~7.2 m에 대응하는 실제 수중운동체의 운용조건을 고려하여 선정되었다. 좌측 그림은 최대 두께 15%를 가지는 서로 다른 크기의 수중날개에서 발생하는 HSV의 무차원 와도를 비교해서 나타낸다. 우측의 그림은 최대 두께가 30%에 해당하는 서로 다른 크기의 수중날개에서 발생하는 HSV 무차원 세기를 비교한다. HSV의 경우 비정상(Unsteady) 특성을 나타내기에 시간의 흐름에 따라 와류의 세기가 섭동(Fluctuation)하는 특성이 있다(Baker, 1979; 1980). 그 래프에서 오차막대는 와류의 비정상 특성에 의한 섭동 범위를 나타낸다. 결과를 살펴보면 두께가 15%인 경우와 30%인 경우 모두에서 HSV의 무차원화 세기가 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 또한 레이놀즈수의 변화에 따라 유사한 무차원 와도 값이 도출되는 것을 확인할 수 있다. 최대 두께에 따라서는 값이 달라지며 두께 15%의 경우 600~700, 두께 30%의 경우 이보다 낮은 400 정도의 무차원 와도가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 3은 서로 다른 크기의 수중날개에서 발생하는 RV의 무차원화 와도를 비교해서 나타낸다. RV의 경우에도 HSV와 동일하게, 서로 다른 크기의 수중날개에서 발생하는 RV의 무차원화 와도가 전체 레이놀즈 수 범위에서 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 또한, RV도 레이놀즈수의 변화에 따라 무차원화 와도가 일정한 값으로 발생하고, 두께에 따라서는 그 값이 달라진다. 두께 15%의 경우 100, 두께 30%의 경우 이보다 증가한 150 정도의 무차원화 와도가 나타난다.

이를 통해 수중날개의 전, 후면부에서 각각 발생하는 HSV와 RV의 무차원화 와도가 레이놀즈 상사특성을 만족하는 것을 확인할 수 있다. 특히 HSV와 RV 모두 레이놀즈 수의 범위에 크게 의존하지 않고 유사한 수준의 무차원 와도를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 또한 HSV의 경우 두께가 두꺼워짐에 따라 무차원 와도가 낮아지고 RV의 경우에 두께가 두꺼워짐에 따라 무차원 와도가 높아지는 것을 확인할 수 있다. HSV와 RV가 레이놀즈 상사법칙을 만족하기에, 이후의 부가물 와류의 분석에는 코드 길이를 기준길이 ($C=1m$)로 고정하고 와류세기 분석을 수행한다.

3. 와류저감구조물의 설계 파라미터 정의

3.1 부가물 와류 특성에 따른 VRD 타입 선정

VRD는 부가물과 선체의 접합부에 설치되어 기존의 불연속적인 역압력 구배를 해소함으로써 와류의 생성 원인을 제거한다. 이때 와류 저감 성능을 나타내기 위해서는 부가물에서 생성되는 와류의 특성에 따라 적절한 VRD 타입이 적용되어야 한다. Fig. 4는 서로 다른 두 가지 타입의 VRD 형

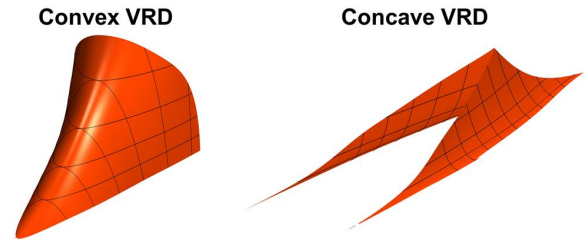


Fig. 4. Geometric types of VRDs.

상을 나타낸다. 왼쪽은 수직 단면이 볼록 곡선으로 이루어진 볼록형 VRD를 나타내고, 오른쪽은 오목형 VRD를 나타낸다. 부가물의 전면부에서 생성되는 HSV의 경우, 볼록형 VRD를 적용했을 때 와류 저감에 탁월한 성능을 나타내는 것으로 알려져 있다(Toxopeus et al., 2014).

반면, 후면부에서 발생하는 RV를 저감하기 위해 전면부와 동일하게 볼록형 VRD를 적용할 경우, 절벽체 흐름(Bluff body flow) 현상과 유사하게 VRD의 끝날 부분에서 와류 이탈(Vortex shedding)이 발생해 오히려 와류 생성을 촉진한다. Fig. 5는 동일 조건에서 후면부에 각각 볼록형 및 오목형 VRD를 적용했을 때 와류저감 성능을 비교한다. 부가물 후면부에서는 유동장이 끝날에서 떨어져 나가는 영역에 해당하기에 볼록형 VRD를 적용할 경우 경계층의 박리가 촉진된다. 이로 인해 생성되는 RV의 와도를 비교해보면, 볼록형 VRD의 경우 최대 1800/s에 해당하는 RV가 발생하였고 오목형 VRD의 경우 최대 720/s의 RV가 생성되었다. 이를 통해, 부가물의 후면부에는 오목형 VRD를 적용하는 것이 효과적임을 확인할 수 있다.

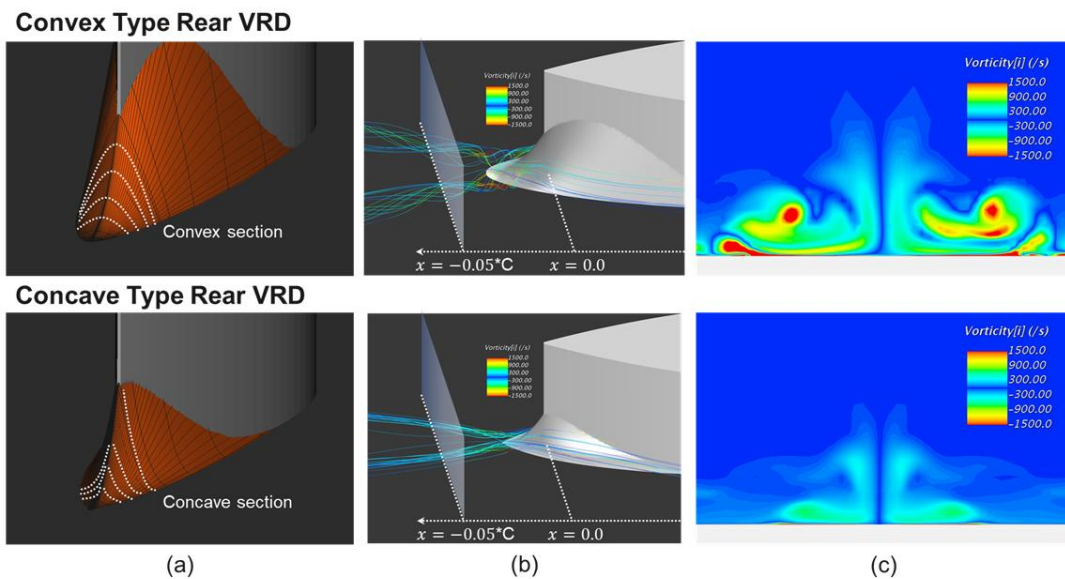


Fig. 5. Comparisons of vortex reduction performance at the rear part of appendages according to VRD types.

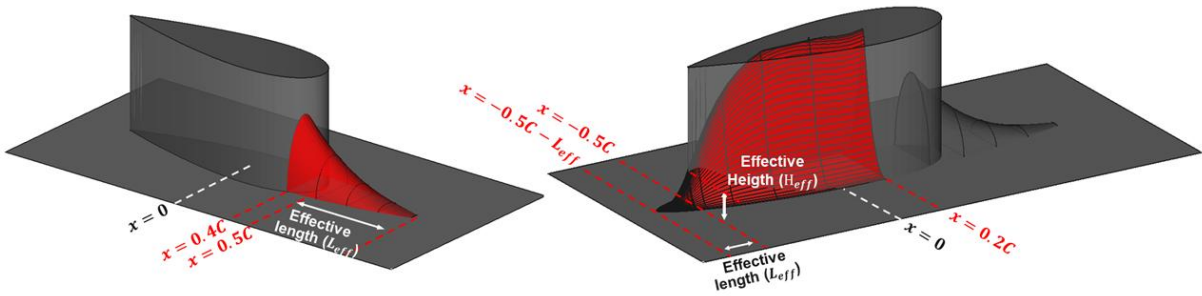


Fig. 6. Definition of installation location and dimensions of VRDs (left) front VRD (right) rear VRD.

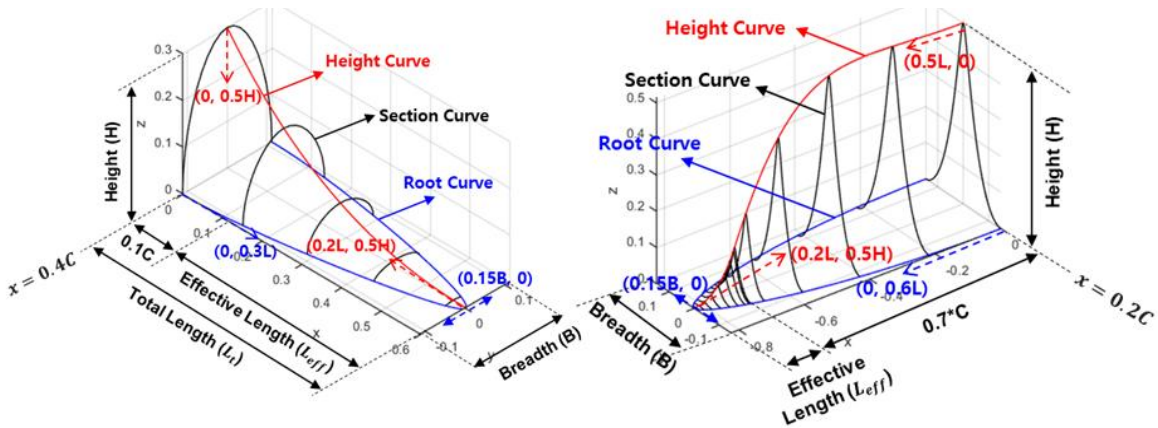


Fig. 7. Definition of main curves of VRDs (left) front VRD (right) rear VRD.

3.2 베지어 곡선을 이용한 VRD 형상 파라미터화

부가물의 다양한 제원 및 유속 조건에 대해 VRD 설계기준을 도출하기 위해서는 VRD의 기하학적 형상과 장착 위치에 대한 명확한 정의가 우선적으로 요구된다. Fig. 6은 전, 후면부 VRD가 부가물에 장착되는 기준 위치를 나타낸다. 전면부 VRD의 경우, 대상 부가물의 앞날 (LE)을 기준으로 코드 길이의 10% 만큼 뒤로 이동된 위치($x=+0.4C$)를 기준으로 선정하였다. 후면부 VRD는 부가물의 뒷날 (TE) 부근에서 발생하는 RV의 생성을 억제하는 목적을 가진다. 일반적으로 RV는 부가물로 유입된 경계층 유동이 부가물의 최대 두께를 거쳐 뒷날까지 부가물의 두께가 지속적으로 얇아지는 수축부(Contraction part)에서 형성된 역압력구배에 의해 발생한다. 따라서 RV 저감을 위해서는 오목형 VRD를 부가물의 최대 두께에서부터 끝날까지의 수축부 전구간에 적용할 때 최대의 효과를 기대할 수 있다. 따라서 후면부 VRD의 기준 위치는 대상 부가물의 최대 두께 지점으로 즉, 부가물의 날개 중심에서 코드길이의 20% 앞으로 전진된 위치($x=+0.2C$)로 정의하였다.

Fig. 7은 전, 후면부 VRD의 3차원 형상을 정의하기 위한 주요곡선 (Main curves)과 단면곡선 (Section curve)에 대한 정의를 나타낸다. VRD의 주요곡선은 높이곡선 (Height curve)과 뿌리곡선 (Root curve)으로 구성되며 모두 3차 베지어곡선

(Bezier curve)으로 정의된다. 높이곡선은 측면도에서 바라본 VRD의 길이와 높이를 결정하고 뿌리곡선은 평면도에서 바라본 VRD의 폭 변화를 정의한다. 전면부 VRD의 경우 앞서 생성된 주요곡선을 따라 5개의 단면곡선이 등간격으로 배치되며, 각각의 단면곡선은 양끝이 수직인 3차 베지어 곡선으로 정의된다. VRD의 전체 제원은 전체 길이(Total length)와 폭(Breadth), 높이(Height)로 정의되고, 제원과 일치하는 3개의 주요곡선과 단면곡선이 생성된다. 이때 각각의 베지어 곡선의 조절점은 Fig. 7에 표기된 바와 같이 VRD 제원의 고정된 비율로써 정의하였다. VRD의 설치 기준위치를 고려하여 대상 부가물로부터 돌출된 길이를 유효길이(Effective length)로 정의한다. 전면부 VRD의 폭은 대상 부가물의 최대 두께의 75%로 고정하였다. 이는 VRD가 설치되는 기준 위치($x=+0.4C$)에서 대상 부가물 두께와 일치한다.

후면부 VRD도 주요곡선을 기준으로 단면곡선을 생성하고 이들을 연속적으로 연결하여 VRD를 생성하였다. 후면부 VRD의 생성을 위해 단면곡선은 총 16개가 활용되었다. 후면부 VRD는 단면곡선의 양쪽이 수평인 3차 베지어 곡선을 적용하였다. 후면부 VRD의 제원도 전체길이, 폭, 높이로 구성되며 부가물에서 뒤쪽으로 돌출된 VRD의 길이를 유효길이라고 정의한다. 후면부 VRD의 폭은 대상 부가물이 가진 최대 두께로 고정하였다.

4. 와류저감구조물의 무차원화 설계기준 도출

4.1 VRD의 와류저감성능 해석기법

Table 1. Target models and numerical settings for CFD calculation

Settings		Description
Hydrofoil geometry	Type	NACA00 series
	Length/Height	1/0.5 m
	Thickness	10~30%
	Flow velocity	10~60 m/s
	Mesh elements	3D unstructured, trimmer mesh
CFD settings	Solver	3D segregated flow
	Turbulence model	Detached eddy simulation (DES)
	Time derivative	1 st order implicit unsteady
	Gradient	Hybrid Gauss-LSQ
	Time step	1e-3 sec

전면부 및 후면부 VRD의 설계기준을 제시하기 위해서는 임의로 주어진 부가물의 제원과 유속 조건에 대해 와류저감 성능을 발휘하는 VRD의 높이 및 길이가 도출되어야 한다. 본 연구에서는 VRD의 설계기준을 두 단계로 나누어서 도출하였다. 첫 번째는 VRD의 길이와 높이의 비율을 조절하며 최적의 길이 대 높이 비율을 도출하는 것이다. 두 번째는 설계기준의 도출이 필요한 레이놀즈수 영역에서 대상 부가물의 제원에 따라 앞서 도출된 VRD의 최적 길이 대 높이 비율을 만족하는 다양한 크기의 VRD 성능을 분석하는 것이다. 이를 통해 넓은 범위의 레이놀즈 수에서 다양한 부가물 제원에 적용할 수 있는 VRD 설계 기준을 도출할 수 있다.

Table 1은 VRD의 와류저감성능 해석을 위해 수행된 CFD

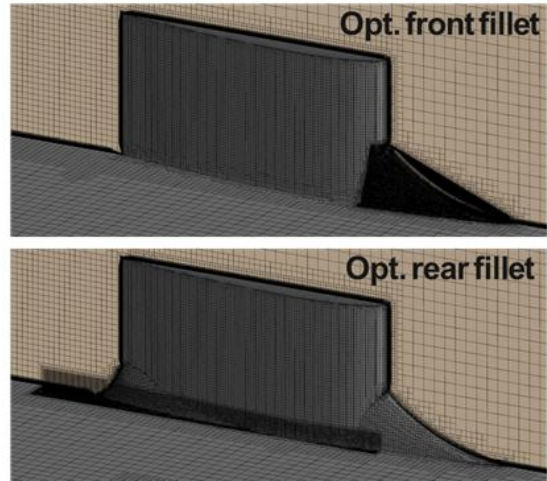
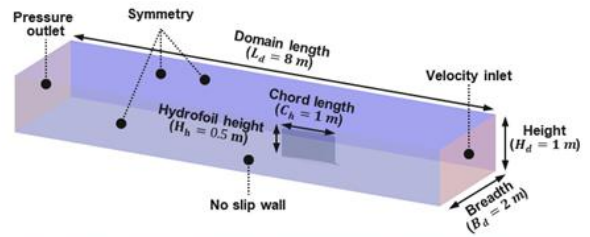


Fig. 8. CFD domain and grids for VRDs performance analysis.

의 해석 대상물과 수치해석적 조건을 나타낸다. 비정상 특성을 나타내는 부가물 주위 와류는 시간평균 모델이 적용된 RANS로는 정확한 모사가 불가능하다. 따라서, 본 연구의 CFD해석에는 DES(Detached eddy simulation) 난류모델이 적용되었다. 와류 Fig. 8은 전, 후면부 VRD의 와류저감 성능 분석을 위해 사용된 CFD 도메인과 격자를 나타낸다. 상단의 그림은 CFD 해석 도메인의 제원과 경계조건을 나타낸다. 대상 부가물은 상사법칙에 따라 기준길이(Reference length)를 적용

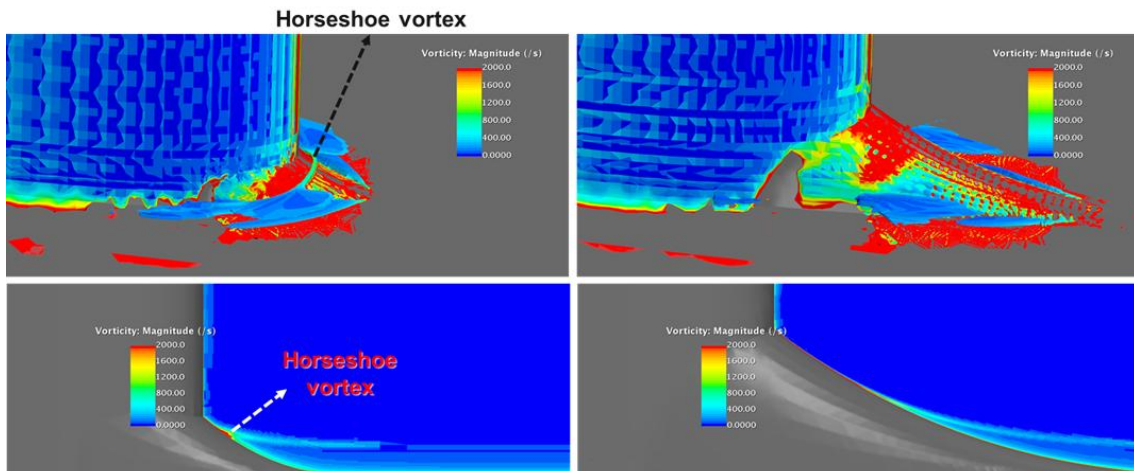


Fig. 9. Performance comparison of front VRDs with different dimensions (left) $L_t = 0.20\text{ m}$, $H = 0.20\text{ m}$ (right) $L_t = 0.40\text{ m}$, $H = 0.20\text{ m}$.

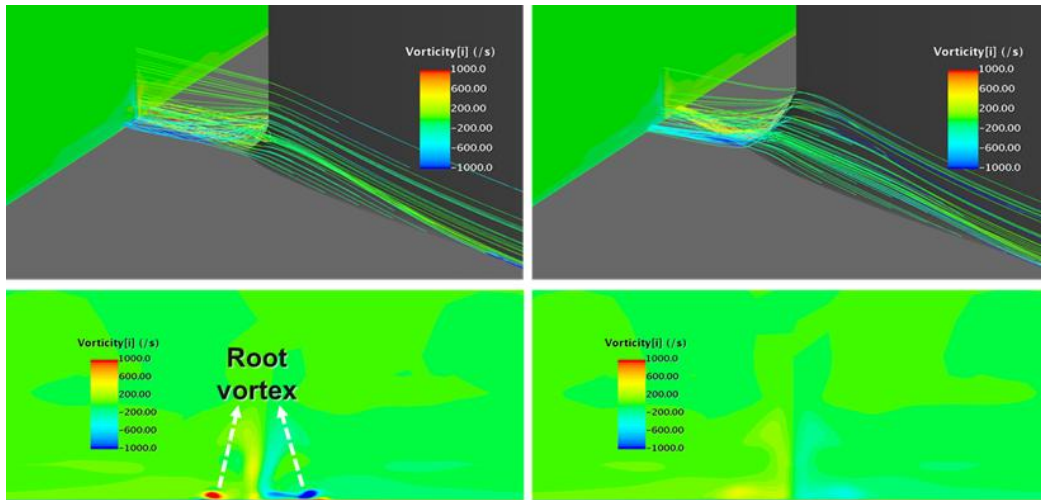


Fig. 10. Performance comparison of rear VRDs with different dimensions (left) $L_t = 0.05\text{ m}$, $H = 0.05\text{ m}$ (right) $L_t = 0.10\text{ m}$, $H = 0.10\text{ m}$.

하여 코드길이가 $C_h = 1\text{ m}$ 이고, 높이는 $H_h = 0.5\text{ m}$ 인 수중 날개 형상이다. 상사가 성립하기에 대상 부가물의 코드 길이는 고정된 채로 유입 유속만을 변경하며 레이놀즈수를 조정하였다. 중간 그림은 전면부 VRD의 와류저감 성능 분석을 위해 생성된 격자의 예시를 나타낸다. 전면부 VRD 성능 분석을 위해서는 HSV의 생성여부를 확인해야 하므로 VRD 주위의 격자밀도를 주변 격자보다 밀하게 설정하였다. 하단 그림은 후면부 VRD의 최적화를 위해 생성된 격자의 예시를 나타낸다. 후면부 VRD의 기능을 확인하기 위해서는 후면부로 유입되는 유동이 안정화되어 있어야 하고, 이를 위해 전면부에는 모든 조건에서 HSV 와류를 저감할 수 있는 충분한 크기($L = 0.6\text{ m}$, $H = 0.3\text{ m}$)의 전면부 VRD를 일괄적으로 적용하여 후면부 VRD만의 기능을 분석할 수 있도록 설정하였다. 또한, 후면부 VRD의 RV 저감성능을 확인하기 위해 RV가 생성되는 영역에서 격자밀도를 주변보다 밀하게 설정하였다. 앞서 언급된 바와 같이 RV는 부가물로 유입된 경계층이 대상 부가물의 최대 두께를 지나서부터 끝날(TE)까지의 수축부에 형성되는 지속적인 역압력구배로 인해 발생한다. 이를 CFD로 정확히 모사하기 위해서 수축부 구간에서 부가물과 바닥의 접합부 근처에 일괄적으로 높은 격자밀도를 적용하였다.

Fig. 9는 서로 다른 제원의 전면부 VRD의 HSV 와류저감 성능을 비교해서 나타낸다. 좌측 결과는 길이 0.2 m , 높이 0.2 m , 우측 결과는 길이 0.4 m , 높이 0.2 m 인 VRD의 결과를 나타낸다. 상단 그림은 와류 분포를 3차원으로 표현하는 Q-criterion의 등위면(Isosurface)을 나타내고, 하단 그림은 앞서 정의된 HSV 계측면($y = 0$)에서 와도 크기 분포를 나타낸다. Q-criterion 결과를 살펴보면 좌측의 경우, VRD의 길이가

충분하지 않아 상단부에서 강한 HSV가 생성되는 것을 확인할 수 있다. 반면 우측의 VRD는 길이가 2배 증가됨에 따라 와류 코어가 소멸된 것을 확인할 수 있다. 정량적 비교를 위해 와도 분포를 살펴보면 좌측의 결과에서는 최대 와도 약 2000 /s 의 HSV가 생성된다. 반면에 우측의 결과에서는 HSV가 완전히 소멸된 것을 확인할 수 있다. 이와 같이, 전면부 VRD가 HSV 와류 저감 효과를 나타내기 위해서는 주어진 레이놀즈수와 대상 부가물의 제원에 대해 적절한 길이와 높이에 대한 설계기준을 만족하는 전면부 VRD가 적용되어야 하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 서로 다른 제원의 후면부 VRD의 RV 와류저감 성능을 비교해서 나타낸다. 좌측 결과는 길이 0.05 m , 높이 0.05 m , 우측 결과는 길이 0.10 m , 높이 0.10 m 인 VRD의 결과를 나타낸다. 상단은 RV가 발생하는 영역에서 유선(Streamline)을 따라 와도의 세기를 나타낸 것이고, 하단은 사전에 정의된 RV 계측면($x = -0.6 * C$)에서 RV의 x-성분 와도 분포를 나타낸다. 좌측 결과를 보면 후면부 부가물이 장착되었음에도 RV가 생성되어 계측면에서 와도 1000 이상의 와류가 유입되는 것을 확인할 수 있다. VRD 주변의 유선을 살펴보면 후면부 VRD 길이가 충분하지 못해 유선이 후면부 VRD를 타고 흘러가지 못하고 중간에 박리하면서 강한 RV가 생성되는 것을 확인할 수 있다. 우측의 결과는 길이와 높이가 2배 증가된 후면부 VRD 결과를 나타낸다. 좌측 결과와 달리 VRD 주변 유선이 후면부 VRD를 타고 흘러감으로써 박리를 최소화한다. 이와 같이, 후면부 VRD가 RV 와류저감 효과를 나타내기 위해서는 주어진 레이놀즈수와 대상 부가물의 제원에 대해 적절한 길이와 높이에 대한 설계기준을 만족하는 후면부 VRD가 적용되어야 한다.

Table 2. Optimal length-to-height ratio of front VRD

Hydrofoil	L_t (m)	H (m)	L_t/H	HSV (/s)
	Total length of VRD	Height of VRD	Length to height ratio	Maximum vorticity of HSV
C = 1 m T = 15% U = 10 m/s	0.150	0.100	1.500	4000
	0.200	0.100	2.000	3100
	0.300	0.100	3.000	4000
	0.400	0.100	4.000	3100
	0.500	0.100	5.000	3200
	0.130	0.200	0.650	6000
	0.150	0.200	0.750	3800
	0.200	0.200	1.000	2500
	0.300	0.200	1.500	1000
	0.400	0.200	2.000	250
	0.500	0.200	2.500	-
	0.150	0.300	0.500	3100
	0.200	0.300	0.667	2000
	0.300	0.300	1.000	1500
	0.350	0.300	1.167	900
0.400	0.300	1.333	600	
0.500	0.300	1.666	-	
0.600	0.300	2.000	-	

4.2 전면부 VRD의 무차원화 설계기준 도출

Table 2는 전면부 VRD의 설계기준 도출을 위한 첫 번째 단계로 전면부 VRD의 최적 길이 대 높이 비율을 도출한다. 주어진 부가물 조건(C=1m, T=15%, U=10m/s)에서 다양한 길이와 높이의 조합을 가지는 VRD의 와류저감 성능이 CFD 해석을 통해 분석되었다. 먼저 높이가 H=0.100m인 전면부 VRD의 와류저감 성능을 살펴보면, 길이가 0.15m에서 0.50m 까지 5개의 VRD가 분석되었지만 HSV 저감 효과를 확인할 수 없었다. 이를 통해 최소한의 높이가 확보되지 않으면 전면부 VRD 성능이 나타나지 않음을 확인할 수 있다. 높이가 0.20m 이상인 VRD의 결과를 살펴보면 특정 길이 이상일 때 즉, 길이 대 높이 비율이 2.0 이상일 때 높은 와류저감 성능이 나타난다. 따라서 전면부 VRD의 최적 길이 대 높이 비율을 2.0으로 도출하였다. 또한 전면부 VRD의 경우 같은 높이에서 길이가 길수록 우수한 와류저감성능을 나타낸다.

Table 3은 설계기준 도출의 두 번째 단계 결과를 나타낸다. 다양한 부가물 제원과 레이놀즈수 조건에 대해 최적의 길이 대 높이 비율(2.0)을 만족하는 다양한 크기의 VRD의 와류저감 성능을 분석하고 최소요구길이(Minimum required length)가 도출되었다. 대상 부가물의 코드 길이는 기준길이(1m)로 고정하였으며, 대상 부가물의 두께는 10~30%, 유속은 10~60m/s 범위로 선정하였다. 각 대상 부가물의 두께와 유속 조건에 대해서 최소요구길이를 도출하기 위해서는 최소 3가지 이상의 다른 크기의 VRD에 대한 CFD 케이스 해석

Table 3. Minimum required length of front VRD

Hydrofoil	L_t (m)	H (m)	L_t/H	HSV (/s)
	Total length of VRD	Height of VRD	Length to height ratio	Maximum vorticity of HSV
C=1 m, T=10.0, U=10m/s	0.230	0.115	2.000	7700
	0.260	0.130	2.000	1500
C=1 m, T=10.0, U=20m/s	0.230	0.115	2.000	8000
	0.260	0.130	2.000	2500
C=1 m, T=10.0, U=40m/s	0.230	0.115	2.000	20000
	0.260	0.130	2.000	3000
C=1 m, T=10.0, U=60m/s	0.230	0.115	2.000	30000
	0.260	0.130	2.000	4000
C=1 m, T=15.0, U=10m/s	0.260	0.130	2.000	3400
	0.300	0.150	2.000	1000
C=1 m, T=15.0, U=20m/s	0.260	0.130	2.000	5000
	0.300	0.150	2.000	1500
C=1 m, T=15.0, U=40m/s	0.260	0.130	2.000	14000
	0.300	0.150	2.000	2000
C=1 m, T=15.0, U=60m/s	0.260	0.130	2.000	22000
	0.300	0.150	2.000	2500
C=1 m, T=22.5, U=10m/s	0.330	0.165	2.000	2000
	0.360	0.180	2.000	1200
C=1 m, T=22.5, U=20m/s	0.330	0.165	2.000	4000
	0.360	0.180	2.000	2000
C=1 m, T=22.5, U=40m/s	0.330	0.165	2.000	8000
	0.360	0.180	2.000	2000
C=1 m, T=22.5, U=60m/s	0.330	0.165	2.000	22000
	0.360	0.180	2.000	3000
C=1 m, T=30.0, U=10m/s	0.360	0.180	2.000	2500
	0.400	0.200	2.000	600
C=1 m, T=30.0, U=20m/s	0.360	0.180	2.000	3000
	0.400	0.200	2.000	1500
C=1 m, T=30.0, U=40m/s	0.360	0.180	2.000	6000
	0.400	0.200	2.000	2500
C=1 m, T=30.0, U=60m/s	0.360	0.180	2.000	15000
	0.400	0.200	2.000	3000

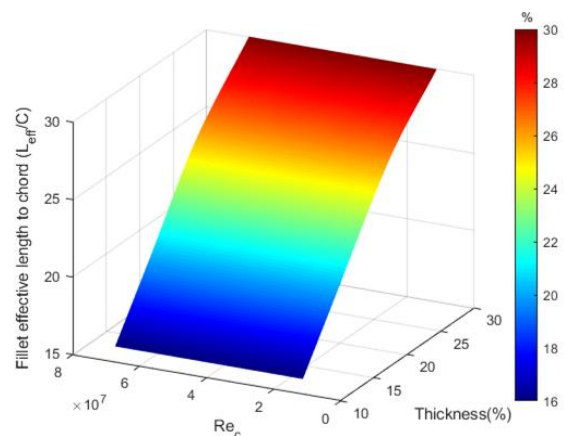


Fig. 11. Required minimum length of front VRD depending on appendage thickness and Reynolds number.

이 요구되지만 표에는 HSV의 저감 성능이 나타나는 경계치에 대한 결과만을 요약하여 기술하였다.

Table 4. Optimal length-to-height ratio of rear VRD

Hydrofoil	L_{eff} (m)	H (m)	L_{eff}/H	RV (%)
	Effective length of VRD	Height of VRD	Length to height ratio	Maximum vorticity of RV
C=1 m T=15% U=10 m/s	0.025	0.050	0.500	83
	0.050	0.050	1.000	70
	0.100	0.050	2.000	67
	0.038	0.075	0.500	100
	0.075	0.075	1.000	84
	0.150	0.075	2.000	85
	0.050	0.100	0.500	110
	0.100	0.100	1.000	85
	0.200	0.100	2.000	150
	0.063	0.125	0.500	110
	0.125	0.125	1.000	100
	0.250	0.125	2.000	150

Fig. 11은 도출된 전면부 VRD의 최소요구길이를 보간하여 3차원으로 나타낸 것으로 와류저감성능을 보장하는 전면부 VRD의 설계기준을 의미한다. 그래프의 x-축은 대상 부가물의 코드 길이와 유속에 의해 결정되는 레이놀즈수를 뜻하고 y-축은 대상 부가물의 두께를 뜻한다. z-축은 해당 조건에서 전면부 VRD의 최소요구길이를 대상 부가물의 코드길이에 대한 상대길이를 나타낸다. 도출된 그래프를 활용하면 수중 운동체의 부가물 길이와 선속을 기반으로 도출된 레이놀즈수와 대상 부가물의 두께 값을 통해 전면부 부가물의 최소요구길이를 도출할 수 있다.

$$L_{eff}/C \approx 13.61 + 2.565e^{-7} Re_c - 0.0001371 * Thickness(\%) \quad (2)$$

식(2)는 도출된 설계기준을 변수로 수식화한 것이며, 이를 통해 임의 제원의 부가물에 대해 와류 저감 성능을 나타낼 수 있는 전면부 부가물의 설계기준을 도출하였다.

4.3 후면부 VRD의 무차원화 설계기준 도출

Table 4는 후면부 VRD의 최적 길이 대 높이 비율에 대한 분석 결과를 나타낸다. 후면부 VRD의 경우 전면부와 달리 VRD의 길이가 지나치게 길면 오히려 성능이 떨어지는 경향이 있다. 후면부 VRD의 길이와 높이의 비율에 따른 와류저감 성능 결과를 종합해보면 길이 대 높이 비율이 1.000 일때에 최적의 RV 저감효과를 나타내는 것으로 분석된다.

Table 5는 후면부 VRD의 설계기준 도출을 위한 두 번째 단계로 최적의 길이 대 높이 비율(1.0)을 만족하는 VRD의 와류저감성능을 분석하여 설계기준이 도출되었다. 전면부 VRD의 경우 길이가 길수록 우수한 성능을 나타내기에 설계기준으로 최소요구길이가 도출된 것과 달리, 후면부 VRD는

Table 5. Optimal length of rear VRD

Hydrofoil	L_{eff} (m)	H (m)	L_{eff}/H	RV (%)
	Effective length of VRD	Height of VRD	Length to height ratio	Maximum vorticity of RV
C=1m, T=10.0, U=10m/s	0.050	0.050	1.000	32
C=1m, T=10.0, U=20m/s	0.050	0.050	1.000	55
C=1m, T=10.0, U=40m/s	0.050	0.050	1.000	115
C=1m, T=10.0, U=60m/s	0.050	0.050	1.000	180
C=1m, T=15.0, U=10m/s	0.050	0.050	1.000	70
C=1m, T=15.0, U=20m/s	0.050	0.050	1.000	120
C=1m, T=15.0, U=40m/s	0.050	0.050	1.000	255
C=1m, T=15.0, U=60m/s	0.050	0.050	1.000	355
C=1m, T=22.5, U=10m/s	0.125/ 0.150	0.125/ 0.150	1.000/ 1.000	250/ 250
C=1m, T=22.5, U=20m/s	0.100/ 0.125	0.100/ 0.125	1.000/ 1.000	430/ 460
C=1m, T=22.5, U=40m/s	0.100/ 0.125	0.100/ 0.125	1.000/ 1.000	1100/ 1100
C=1m, T=22.5, U=60m/s	0.100/ 0.125	0.100/ 0.125	1.000/ 1.000	1700/ 1700
C=1m, T=30.0, U=10m/s	0.150/ 0.175/ 0.200	0.150/ 0.175/ 0.200	1.000/ 1.000/ 1.000	330/ 300/ 330
C=1m, T=30.0, U=20m/s	0.150/ 0.175/ 0.200	0.150/ 0.175/ 0.200	1.000/ 1.000/ 1.000	720/ 740/ 730
C=1m, T=30.0, U=40m/s	0.175	0.175	1.000	1600
C=1m, T=30.0, U=60m/s	0.150	0.150	1.000	2600

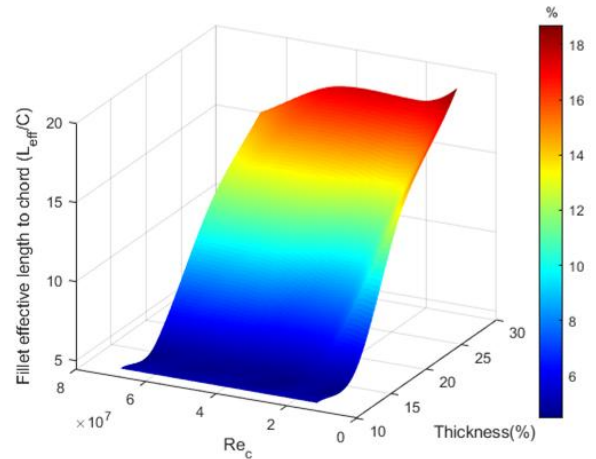


Fig. 12. Optimal length of rear VRD depending on appendage thickness and Reynolds number.

설계기준으로 최적길이(Optimal length)가 도출되었다. 대상 부가물의 코드 길이는 동일하게 기준길이를 고정하였으며, 부가물의 두께와 유속 범위도 전면부와 동일하게 적용하였다. 표의 결과는 각 조건에 대하여 최적의 RV 저감성능이 나타나는 VRD 크기에 대한 결과만을 요약하여 나타낸다.

Fig. 12는 도출된 후면부 VRD의 최적길이를 보간하여 3차원으로 나타낸 것으로 와류저감성능이 나타나는 후면부

VRD의 설계기준을 의미한다. 후면부 VRD의 설계기준에도 유효길이를 활용하였다.

$$L_{eff}/C \approx 30.95 - 3.873 \text{Thickness} - 4.984e^{-7} Re_c + 0.2075 \text{Thickness}^2 + 8.78e^{-9} \text{Thickness} Re_c + 1.125e^{-14} Re_c^2 - 0.002933 \text{Thickness}^3 - 2.132e^{-10} \text{Thickness}^2 Re_c - 2.115e^{-17} \text{Thickness} Re_c^2 - 8.633e^{-23} Re_c^3 \quad (3)$$

식(3)은 도출된 설계기준을 변수로 수식화한 것이며, 본 결과를 활용하면 수중운동체의 함교나 러더 같은 대상 부가물에 부가물의 길이와 선속으로 도출된 레이놀즈수와 대상 부가물의 두께에 대응되는 z-축 값을 통해 후면부 VRD의 최적 길이를 도출할 수 있다. 이를 통해 최종적으로 임의의 부가물에 대해 전면부 및 후면부의 HSV와 RV를 저감할 수 있는 VRD의 설계기준이 도출되었다.

5. 결론

본 논문에서는 수중운동체의 수중방사소음 증가에 원인이 되는 부가물 주위 접합부 와류를 저감하기 위한 VRD의 설계기준을 제시하였다. 먼저, 부가물 접합부 와류의 레이놀즈 상사 특성이 분석되었다. HSV와 RV의 무차원 세기는 서로 다른 크기의 부가물에서 동일하게 나타남으로써 상사 특성을 만족함을 보였다. 이후 VRD의 설계기준을 도출하기 위해 부가물에 VRD의 설치위치가 정의되었고, VRD의 3차원 형상은 베지어 곡선 기반의 주요 곡선을 통해 정의되었다. 다음으로 부가물의 전, 후면부에서 발생하는 HSV와 RV의 특성에 따라 와류저감에 효과적인 VRD의 타입이 분석되었다. 이후 VRD의 설계기준은 두 단계로 구분하여 도출되었다. 첫 번째는 VRD의 길이와 높이의 최적 비율을 결정하는 단계로써, 전, 후면부 VRD의 최적 비율을 우선적으로 도출하여 분석 케이스를 최소화 할 수 있었다. 두 번째는 최적비율을 만족하는 VRD를 대상 부가물의 제원에 대해 적용하여 설계기준 도출이 수행되었다. 전면부 VRD의 경우, 크기가 클수록 와류저감 성능이 우수해져 대상 부가물 별로 최소요구길이를 도출하였고, 후면부 VRD는 최적길이를 설계기준으로 도출하였다. 최종적으로 도출된 VRD 설계기준은 수중운동체의 운용속도 및 부가물 제원에 제한이 없기에 잠수함 또는 무인잠수정과 같은 다양한 무기체계의 부가물에 적용되어 URN 감소에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 전남대학교 학술연구비(과제번호: 2023-1170-01)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- [1] Baker, C. J.(1979), The laminar horseshoe vortex. Journal of fluid mechanics, Vol. 95, No. 2, pp. 347-367.
- [2] Baker, C. J.(1980), The turbulent horseshoe vortex. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 6, No. 1-2, pp. 9-23.
- [3] Bushnell, D. M. and C. D. Donaldson(1990), Control of submersible vortex flows. Submarine Technology Symposium (No. NASA-TM-102693).
- [4] Liu, Z. H., Y. Xiong, and C. X. Tu(2014), The method to control the submarine horseshoe vortex by breaking the vortex core. Journal of Hydrodynamics, Vol. 26, No. 4, pp. 637-645.
- [5] Renilson, M.(2015), Submarine Hydrodynamics, Vol. 31. Springer.
- [6] Toxopeus, S., R. Kuin, M. Kerkvliet, H. Hoeijmakers, and B. Nienhuis(2014), Improvement of resistance and wake field of an underwater vehicle by optimising the fin-body junction flow with CFD. International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, American Society of Mechanical Engineers, Vol. 45400, V002T08A046.
- [7] Yeo, S. J., S. Y. Hong, J. H. Song, and H. S. Seol(2022), Analysis of the effect of Vortex reduction devices on submarine tonal noise via frequency-domain method employing thickness noise source. Ocean Engineering, 257, 111640.
- [8] Zhihua, L., X. Ying, and T. Chengxu(2011), Numerical simulation and control of horseshoe vortex around an appendage - body junction. Journal of Fluids and Structures, Vol. 27, No. 1, pp. 23-42.
- [9] Zhihua, L., X. Ying, and T. Chengxu(2012), Method to control unsteady force of submarine propeller based on the control of horseshoe vortex. Journal of ship research, Vol. 56, No. 1, pp. 12-22.

Received : 2024. 02. 13.

Revised : 2024. 03. 29.

Accepted : 2024. 04. 26.