

75 kW급 립추진기에 대한 기초 설계

김도엽¹ · 김유탉[†]

(Received November 8, 2018 ; Revised December 14, 2018 ; Accepted December 19, 2018)

Fundamental design of a 75-kW-rim-driven propeller

Do-Yeop Kim¹ · You-Taek Kim[†]

요약: 최근 선박으로부터 배출되는 대기오염물질에 대한 규제 강화에 따라 전기추진선박과 전기추진선박용 립추진기에 대한 관심이 고조되고 있다. 그러나, 립추진기의 많은 장점에도 불구하고 립추진기에 대한 연구는 소수에 불과하다. 본 연구는 가속덕트를 이용하는 허브리스 립추진기의 설계와 성능 해석에 대한 것이다. 본 연구에서는 전통적인 추진기의 설계이론만으로는 추진기를 설계할 수 없는 가혹한 설계조건이 선정되었고, 이러한 문제로 인하여 축류펌프와 워터제트 시스템의 설계 이론을 토대로 립추진기를 설계하였다. 케이스 스터디를 통하여 축류펌프와 워터제트 시스템의 설계 이론을 토대로 립추진기를 설계할 경우 효과적인 설계절차를 발견할 수 있었고 그 설계절차를 본 연구를 통하여 제시하였다. 설계한 립추진기의 성능은 CFD를 통하여 점검하였고 기본적으로 설계조건에서 요구되는 전달동력을 충족하는 립추진기를 설계하였음을 알 수 있었다. 향후 효율적인 립추진기의 운전조건 선정, 그리고 효율 향상 방안, 캐비테이션의 제거 등에 대한 연구를 진행할 예정이다.

주제어: 허브리스 립추진기, 가속덕트, 전기추진선박, CFD

Abstract: Currently, interest in electric propulsion vessels and rim-driven propellers is increasing owing to strict regulations on air pollution emissions from ships. However, despite the several advantages of rim-driven propellers, only a few studies are dedicated to it. In this study, a design and performance analysis of a hubless rim-driven propeller using an acceleration duct was conducted. Harsh design conditions were selected that are unattainable with the conventional propeller design theory. Hence, with the data obtained from case studies, the rim-driven propeller was effectively designed based on the design theory of axial flow pumps and water jet systems. The performance of the designed rim-driven propeller was examined through computational fluid dynamics. The designed rim-driven propeller achieved the required delivery power in the design conditions. Future studies could focus on the selection method of an efficient operating condition of the rim-driven propeller, improvement of its efficiency, and removal of cavitation.

Keywords: Hubless rim-driven propeller, Acceleration duct, Electric propulsion vessel, Computational fluid dynamics

Nomenclature

C_z : blade chord length for the rotational axial direction [m]

D : propeller diameter [m]

E : Euler head [m]

F : thrust force [N]

h : height [m or mm]

K_Q : torque coefficient [-]

K_T : thrust coefficient [-]

LE : leading edge

MCR : maximum continuous rating [kW]

N : rpm

NCR : normal continuous rating [kW]

n : rps

P_D : delivery power [kW]

P_E : effective power [kW]

Q : torque [kN·m]

R : propeller radius [m]

TE: trailing edge

V_a : advance speed [m/s]

V_i : inlet velocity [m/s]

V_j : exit velocity [m/s]

Z : blade number [-]

[†] Corresponding Author (ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9662-2175>): Professor, Division of Marine System Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea, E-mail: kimyt@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4258

¹ Assistant professor, Division of Marine System Engineering, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: doyeop@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4282

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Greeks

α : attack angle [degree]

η_{POW} : propeller efficiency at open water [%]

ρ : density [kg/m³]

σ_s : slip factor [-]

ω : angular velocity [rad/s]

1. 서론

최근 선박으로부터 배출되는 배기가스에 대한 규제의 강화에 따라 전기 추진 선박에 대한 관심이 고조되고 있다. 전기 추진 선박에 적용할 수 있는 추진기의 형식 중에 단연 흥미로운 추진기 형식은 림추진기(RDP : Rim Driven Propeller)이다(특히 hubless type 혹은 shaftless type).

선박의 고전적인 추진기 형식은 스크류 추진기이다. 스크류 추진기는 추진축과 추진기 보스를 가지며 보스에서 추진기의 팁까지 추진기의 날개가 부착된다. 그러나 허브리스 림추진기는 전기 추진 모터의 영구자석과 고정자가 덕트 내에 설치되고 덕트의 림(rim)에서부터 추진기의 회전 중심 근방까지 추진기의 날개가 배치된다. 즉, 추진축은 없으며 덕트의 림에서부터 추진기의 회전중심 근처까지 날개가 형성된다. 스크류 추진기와 림추진기는 각각 **Figure 1**과 **Figure 2**와 같다.

스크류 추진기와 비교되는 림추진기의 장점을 정리하면 다음과 같다[1][2].

- (1) 컴팩트하며 유연한 구성품의 배치
- (2) 보다 높은 모터 효율
- (3) 보다 높은 수력학적 효율
- (4) 탈설계 조건에서 준수한 효율
- (5) 소음과 진동의 저감
- (6) 케이블 등과 같은 이물질의 엮임 예방에 탁월

이와 같은 장점에도 불구하고 림추진기의 설계에 대한 국내외 연구는 극소수에 불과하다. Grümmer[3]는 비교적 덕트의 두께가 얇은 노즐 19A와 카플란 계열의 추진기 Ka 4-70을 이용한 림추진기를 설계하고 CFD를 이용하여 그 성능을 분석하였다. Yakovlev[1]는 설계조건이 토크계수(K_Q)가 0.337이고 전진수(J)가 0.13에서 준수한 성능을 보이는 허브 형식의 림추진기와 허브리스(hubless) 형식의 림추진기를 설계하고 터널 실험과 CFD를 통하여 각 형식의 림추진기의 성능을 비교 분석하였다. 마찬가지로 Song[4] 역시 허브 형식과 허브리스 림추진기를 설계하고 각각의 형식에 대한 성능을 CFD를 이용하여 비교 분석하였다. 상기 두 연구의 일치된 결과는 허브리스 형식이 허브 형식의 림추진기 보다 효율적이라는 것이다. Szafran[5]은 노즐 19A로부터 파생한 4가지 덕트(노즐) 형상에 대한 성능을 CFD를 이용하여 측정하고 각 노즐의 특징과 성능 등을 나

타내었다. Gaggero[6]는 추력의 형성에 도움이 되는 가속 덕트(Acceleration duct)와 캐비테이션의 예방에 도움이 되는 감속 덕트(De-acceleration duct)를 설계하고 이에 대한 비교 평가를 CFD를 통하여 수행하였다.

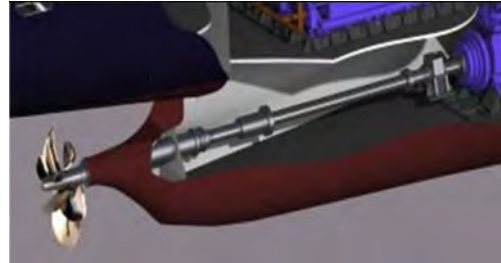


Figure 1: Conventional screw type propeller



Figure 2: Shaft-less RDP

상기 연구들의 공통점은 다음과 같다. 첫째, 상기 연구 중에 소수의 연구들은 제작환경을 충분히 반영하고 있지 못한 것으로 판단된다. 구체적으로는 상기 연구에서 고려한 덕트가 상당히 얇다. 그러나 실제에서는 덕트 내에 베어링, 모터의 영구자석과 고정자가 배치되어야 하므로 전달 동력의 크기가 크다면 덕트가 비교적 두꺼워질 수 밖에 없으며, 특히 국내의 경우 림추진기용 모터에 대한 연구 단계가 초기이므로 국내에서 개발 가능한 모터의 크기와 회전 수 역시 상당히 제한적이다. 둘째, 상기 연구들은 이미 스크류 프로펠러가 준수한 성능을 보이는 설계조건을 사용하거나 목표 설계조건 등을 제시하고 있지 않아 각 설계기법의 우위를 판단하기 어렵다. 현재까지의 공개된 연구에서 다양한 설계조건을 모두 충족할만한 이론적인 설계법칙이 존재하지 않는 것으로 판단된다. 특히, 덕트와 추진기에 대한 상호영향에 대한 명확한 이론적인 배경이 부족한 것으로 보인다.

본 연구의 대상은 림추진기 중에 가속덕트를 이용한 허브리스 형식의 림추진기로 국한하였다. 본 연구에서는 허브리스 림추진기에 대한 국내의 제작환경을 고려하여 상당히 두꺼운 덕트와 빠른 회전수, 그리고 고전적인 스크류 추진기 설계이론으로는 추진기 형상에 대한 해를 얻을 수 없는 가혹한 설계조건이 선정되었다. 이러한 설계조건을 충족하는 림추진기의 온전한 형상을 얻기 위하여 케이스 스

터디를 수행하고 효과적인 설계과정을 수립하였으며 이를 본 논문에서 제시하였다. 그리고 마지막으로 CFD를 이용하여 설계한 립추진기 성능과 현재 본 연구에서 고려되고 있는 립추진기의 문제점 등을 언급하였다.

2. 설계조건

고전적인 스크류 추진기에 대한 연구는 립추진기에 대한 연구와 비교하여 충분한 것으로 판단된다. 피치비에 따른 유효동력, 전달동력, 효율 등과 같은 성능을 특성곡선으로 표현한 방대한 계열 스크류 추진기의 성능 정보가 존재한다[7]. 게다가 설계목적을 달성하기 위한 날개 개수, 코드 길이, 입사각 등을 규정할 수 있는 다양한 스크류 추진기 설계프로그램들이 존재한다. 이러한 설계프로그램의 배경 이론에는 원판이론, 날개요소 운동량 방정식이 공통되게 이용되고 있다. 그러나 립추진기에 대한 성능 곡선은 대단히 소수에 불과하며 이마저도 덕트의 형태가 극단적으로 달라지면 유효하지 않다. 게다가 설계조건에 따라 전통적으로 확고한 추진기 설계이론(원판이론, 날개요소 운동량 이론)으로는 추진기의 형상을 특정하지 못하는 경우가 발생할 수도 있다.

본 연구의 설계조건은 Table 1과 같으며 립추진기에 대한 제한적인 국내의 제작환경을 고려하여 설계와 캐비테이션 방지의 측면에서 가혹한 설계조건을 목표로 설정하게 되었다.

Table 1: Design conditions and requirements

Variables	Value
V_a [m/s]	3.91
D [mm]	440
$P_{D,MCR} = Q \times \omega$ [kW]	75
$P_{D,NCR} = Q \times \omega$ [kW]	67.5
N_{MCR} [rev/min]	500
N_{NCR} [rev/min]	483
h_{duct} [mm]	150

MCR : Max. continuous rating, NCR : normal continuous rating

상기의 설계조건이 전통적 스크류 추진기의 설계이론 및 특성곡선으로부터 추진기의 형상을 특정하지 못하는 가혹한 조건인 이유는 본 연구에서 가용 가능한 모터의 출력과 베어링 그리고 제작비용 등의 제한과 관련이 깊으며, 추진기의 역학적 설계 측면과 캐비테이션의 예방 측면에서 본 연구의 설계조건이 가혹한 구체적인 그 이유는 다음과 같다.

첫째, 설계조건(설계조건은 NCR을 기준으로 함)에 해당하는 토크계수($K_Q = Q/\rho n^2 D^5$)와 전진수($J = V_a/nD$)는 각각 약 1.2 그리고 1.1이다. 해당 전진수에서 과도한 토크계수 1.2를 만족하는 계열 추진기는 존재하지 않는 것으로 조

사되었다. 이것은 토크계수의 크기에 관여하는 직경과 회전속도가 열악한 국내의 제작환경에 따라 이상적으로 결정하지 못한 이유로부터 기인한 문제점이다.

둘째, 설계조건의 회전수는 캐비테이션을 방지할 만큼 충분히 낮지 않다. 대형선에 적용되고 있는 추진기의 회전수는 100 rpm 전후인 반면, 모터와 추진기가 직결로 연결되는 본 연구의 립추진기의 회전속도는 그와 비교하여 약 5 배에 해당한다.

셋째, 기존 연구에 따르면 덕트가 얇으면 덕트의 항력은 감소하고 덕트의 추력은 증가한다. 그러나 립추진기의 덕트 내에는 모터의 영구자석과 고정자 뿐만 아니라 베어링이 배치되어야 하므로 덕트의 두께를 무한히 얇게 할 수 없다. 즉, 모터와 베어링류의 소형화 기술이 덕트의 성능을 좌우한다고 할 수 있다. 그러나 국내의 모터 제작 기술력으로는 두께가 얇고 본 연구의 설계목표(전달동력)를 충족하는 효율적인 덕트 형상(구체적으로 nozzle 19A)을 실현할 수 없었다. 현재 검토되고 있는 영구자석과 고정자가 요구하는 높이는 Table 1과 같이 150 mm이며, 베어링과 윤활계통을 위하여 덕트의 축방향 최소 길이는 510 mm (추진기 회전자 직경의 1.16배)로 상당히 길다.

실제로 Table 1의 설계조건에 적합한 추진기를 설계하기 위하여 전통적인 스크류 추진기 설계를 위하여 개발한 인하우스 코드와 오픈 소스인 OpenProp라는 추진기 설계프로그램에 Table 1의 설계조건을 입력하면 해가 없음을 알 수 있었다. 즉, 상기의 설계조건은 현재까지의 립추진기 설계이론 및 전통적인 스크류 추진기의 설계이론으로는 추진기 형상에 대한 해를 얻을 수 없는 가혹한 설계조건임에 틀림이 없다.

한편, Table 1에서 본 연구의 설계조건은 상용출력(NCR : normal continuous rating)이다. 상용출력조건과 최대연속출력(MCR: maximum continuous rating)의 관계는 추진기법칙(출력은 회전수 3승에 비례한다)에 의해 수립되었다. NCR은 MCR의 90%로 설정하였으며 MCR의 회전속도가 500 rpm이므로 추진기 법칙에 의해 NCR의 회전속도는 483 rpm이다.

본 연구에서 설계한 립추진기는 483 rpm과 500 rpm의 회전속도에서 각각 NCR인 67.5 kW와 MCR인 75 kW를 만족해야 한다. 참고로 현재 제작 검토되고 있는 베어링의 최고 연속 회전속도는 800 rpm이다.

3. 립추진기의 설계

3.1 추진기 설계절차

립추진기의 확고한 설계 이론의 부재와 본 연구의 가혹한 설계조건으로 인하여 본 연구에서는 케이스 스터디를 수행하였다(케이스 스터디 137회). 케이스 스터디로부터 가장 효과적인 설계절차를 수립할 수 있었으며, 순서대로 그 절차를 표현하면 Figure 3과 같다.

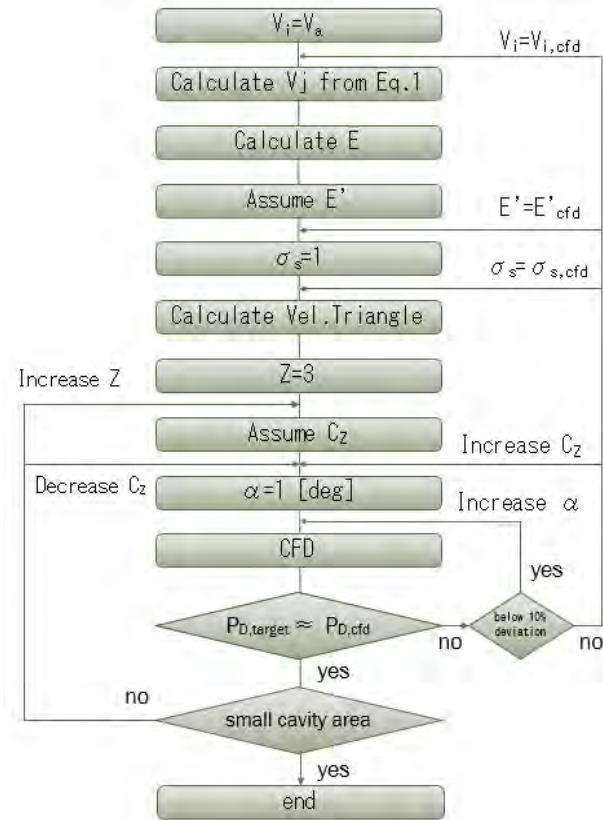


Figure 3: The design process in this study

전술한 바와 같이 전통적인 스크류 추진기의 설계이론(원판이론, 날개 요소 이론)만으로는 설계목표인 전달동력(67.5 kW)을 만족하는 추진기의 형상에 대한 해를 찾을 수 없었다. 이것은 본 연구의 설계조건이 지나치게 높은 토크계수를 요구하기 때문이다.

전통적인 스크류 추진기의 설계이론의 대안으로 본 연구에서는 추진기의 형상과 유사한 축류펌프의 설계 이론을 채택하였다. 그 이유는 전통적으로 추진기는 전달동력(혹은 토크계수)을 줄이는 방향으로 설계이론이 발전해왔다면 축류펌프는 전달동력(혹은 토크계수)을 증가시키는 방향으로 설계이론이 발전해왔기 때문이다.

추진기의 설계 이론은 원판이론과 날개요소이론을 토대로 한다면 축류펌프의 설계 이론은 오일러 수두(E)를 토대로 한다. 축류펌프의 설계 이론은 다양한 문헌에서 제공되고 있다[8]-[10].

한편, 림추진기는 덕트(노즐)를 가지므로 축류펌프 뿐만 아니라 워터제트 추진기와도 상당히 유사하다. 워터 제트 시스템의 개략도는 Figure 4와 같으며 워터 제트 시스템에 탑재되는 축류펌프의 전달동력은 식 (1)과 같다[7]. 압력손실계수인 k 가 일정하다고 가정한다면 전달동력은 워터 제트 시스템의 입구와 출구의 속도에만 의존하는 함수이다. 단, 워터 제트 시스템의 유로는 상당히 길어 유로 입구의 속도(V_i)는 추진기 및 선박의 전진속도(V_0)와 비슷하겠지만, 림추진기의 덕트는 비교적 상당히 짧아서 림추진기의

입구 속도는 림추진기의 출구속도(V_j)와 비슷할 것이다. 이러한 워터제트와 림추진기의 차이 때문에 Figure 3과 같이 반복계산이 요구된다.

$$P_D = \rho V_j A [0.5(1+k) V_j^2 - 0.5 V_i^2] \quad (1)$$

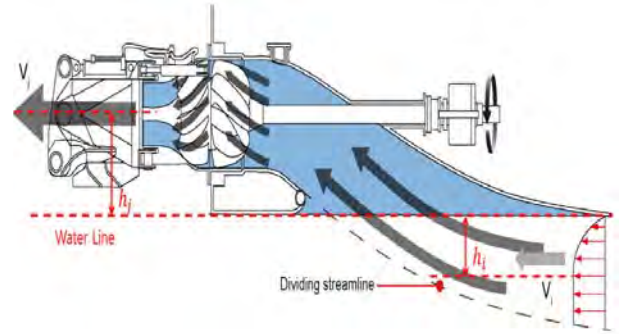


Figure 4: Water jet propulsion system

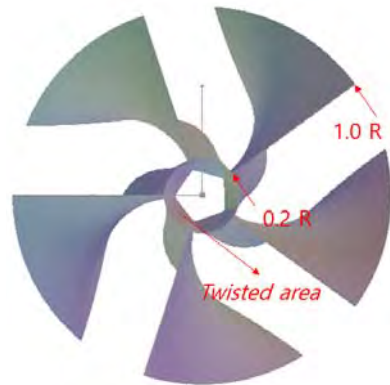


Figure 5: A propeller for constant E

축류펌프의 일반적인 설계방법에서 오일러 수두는 펌프의 전체 날개 스판에서 동일한 것으로 설정한다[8]-[10]. 그러나 본 연구의 설계조건에 의해 림추진기 날개의 반경방향으로 오일러 수두가 일정하다고 가정한다면 Figure 5와 같이 추진기의 날개가 0.2R 근처에서 꼬임이 발생하여 해당 조건을 만족하는 형상 데이터를 얻을 수 없었다. Figure 5는 0.2R 부근에 가상의 허브가 있다고 가정하고 BladeGen V13.0을 이용하여 모델링 한 것이다.

축류펌프의 설계이론을 토대로 케이스 스터디를 수행한 결과로부터 0.2R의 추진기 날개는 극단적으로 낮은 오일러 수두를 가지며 1.0R(rim 부근)의 추진기 날개는 0.2R의 오일러 수두보다 비교적 높은 오일러 수두를 가진다는 것을 알 수 있었다. 이것은 추진기 날개가 부재한 0.2R 이하에서는 전달동력이 전혀 없기 때문이다. 마찬가지로의 이유로 0.2R에서 미끄럼계수(slip factor)는 0.7~0.8 정도이나 1.0R에서 미끄럼계수는 거의 1에 가까웠다.

Figure 3의 C_z 는 축방향 코드 길이이며 α 는 입사각(Attack angle)이다. 상기 두 변수는 전달동력과 밀접한 영향이 있다. 두 변수 모두 전달동력과 비례관계에 있다. 본 연구에서는 주

로 날개 길이를 변화시키면서 전달동력을 달성시켰으며 목표 전달동력과 CFD 결과로부터의 전달동력의 차이가 크지 않을 경우에만 입사각을 증가시켜서 목표 전달동력을 달성하였다.

Figure 3의 마지막 단계는 공동영역의 제거이다. 공동영역을 제거하기 위한 전통적인 방법은 코드 길이를 줄이는 것이다. 이에 따라 공동영역의 제거를 위하여 본 연구에서는 코드 길이를 지속적으로 줄였다. 단, 코드 길이를 줄이는 것은 전달동력의 감소를 초래한다. 본 연구에서는 코드 길이의 조정에 따라 줄어든 출력을 보완하기 위해서 추진기 날개의 수(Z)를 증가시켰다. 날개 수의 증가는 압력이 낮아 캐비테이션의 발생 위험이 높은 흡입면이 인접한 날개의 압력면과 가까워짐에 따라 캐비테이션의 감소에 도움이 된다. 다양한 형태의 캐비테이션이 있으나[7], 본 연구에서는 날개의 앞날(LE: leading edge)에서 발생하는 시트 캐비테이션과 흡입면에 발생하는 버블 캐비테이션 영역의 크기를 줄이기 위해 상당한 노력을 하였다. 두 가지 형태의 캐비테이션 모두 공동(cavity)이 날개와 직접 접촉하므로 침식의 개연성이 높기 때문이다.

3.2 가속 덕트 설계

가속덕트는 립추진기의 추력 형성에 도움을 줄 수 있다. 본 연구에서 고려되고 있는 D6030 덕트는 **Figure 6**과 같다. 추진기의 반경이 220 mm이고 모터의 고정자와 영구자석의 배치를 위한 덕트의 높이는 150 mm 이다. 모터의 고정자와 영구자석 뿐만 아니라 베어링과 윤활 시스템의 요구에 따라 덕트에 요구되는 최소한의 길이는 510 mm(추진기 직경의 1.16배)이다. 덕트의 유선화를 위하여 덕트 코와 꼬리까지의 길이는 900 mm(추진기 직경의 약 2배)가 고려되고 있으며 본 연구에서 채택한 덕트 설계의 변수는 덕트 코와 꼬리의 높이이다. 케이스 스터디를 통하여 덕트 코의 높이는 덕트 높이 150 mm의 60 %에 해당하는 90 mm, 그리고 덕트 꼬리의 높이는 덕트 높이의 30 %에 해당하는 45 mm 일 때 덕트는 최대의 추력을 형성할 수 있었다.

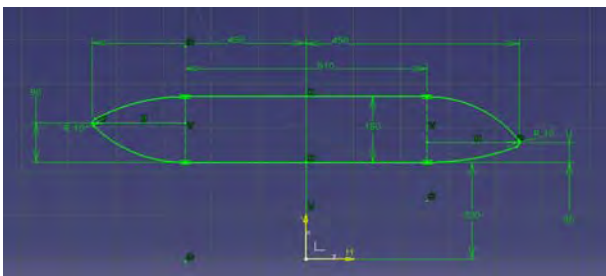


Figure 6: D6030 dimension

3.3 최종형상

상기의 립추진기 설계절차에 따라 목표 전달동력을 만족 하면서 캐비테이션 면적을 줄인 최선의 케이스는 Case 136 번에 해당한다. Case 136번은 추진기 회전자의 입사각이 2.5 deg.이며 캐비테이션 면적을 줄이기 위해서 날개의 수는 8개

지 증가시켰다. 또한 Case 136번은 0.2R에서 1.0R까지 오일 리 수두는 0.927 m에서 6.93 m으로, 그리고 미끄럼계수는 0.8에서 1.0으로 선형적으로 증가한다고 가정하고 축방향 코드 길이(C_2)는 **Figure 7**과 같이 설정한 케이스에 해당한다. 또한 Case 136의 덕트는 전술한 D6030을 적용한 케이스이다.

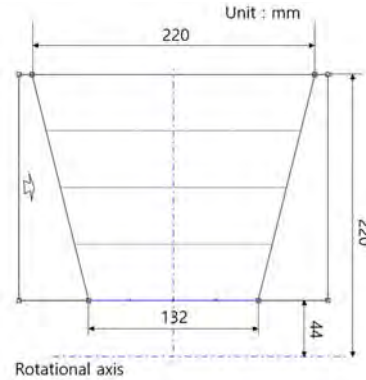


Figure 7: Propeller dimension of the case 136

덕트와 추진기의 모델링에는 각각 CATIA R15와 BladeGen V13.0이 사용되었다. 덕트와 추진기를 취합한 최종 형상은 **Figure 8**과 같다.

Figure 9는 립추진기의 설계 및 제작 기술을 보유한 세계적인 기업인 Voith사의 Voith inline thruster(VIT)와 Voith inline propulsor(VIP)의 제품군에 대한 개략적인 정면도이다 [11]. 본 연구에서 설계한 Case 136의 추진기 형상이 Voith사의 VIT & VIP 제품군과 상당히 닮아있음을 알 수 있다.

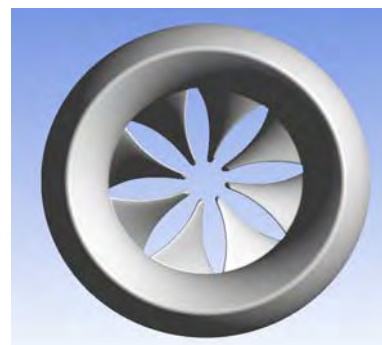


Figure 8: Case 136 with D6030

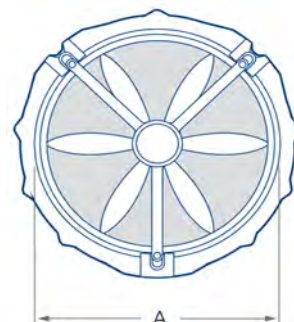


Figure 9: VIT & VIP of the Voith

4. 성능분석

4.1 유로의 모델링

추진기에 대한 CFD의 전형적인 해석 영역은 프로펠러 상류방향으로 프로펠러 직경의 2배 거리까지, 하류 방향으로는 프로펠러 직경의 5-10배 거리까지이며, 반경방향으로는 2-3배까지의 거리이다[7].

본 연구의 림추진기의 덕트 외경은 740 mm 이며 이를 기준으로 상류 방향으로 2.5배, 하류 방향으로 7배, 반경방향으로 3배의 유동 영역을 모델링하였다. 고정도메인의 모델링에는 CATIA R15를 사용하였으며 단일유로(추진기 날개 개수가 8개이므로 단일유로에서 고려한 각도는 45 deg. 임)만을 모델링한 결과는 Figure 10과 같다.

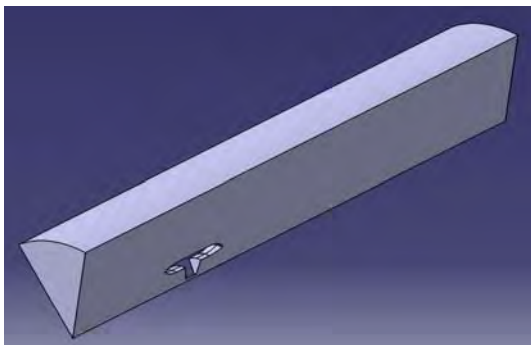


Figure 10: Stationary domain for the case 136

추진기의 형상은 BladeGen V13.0을 이용하여 모델링하고 이를 토대로 필렛 등의 후처리는 CATIA R15를 이용하였다. 회전도메인 역시 단일유로만을 모델링하였으며 그 결과는 Figure 11과 같다.

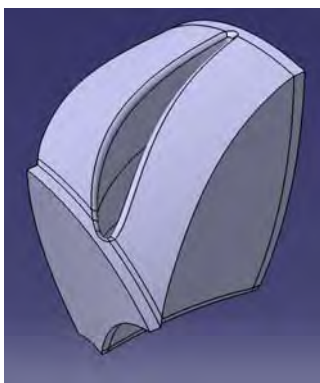


Figure 11: Rotational domain for the case 136

4.2 격자의 형성

격자 형성에는 비회전 도메인과 회전 도메인 모두 Ansys Meshing V13.0을 이용하여 비정렬격자와 프리즘을 형성하였다.

격자 의존성 점검은 주요 종속변수인 전달동력을 기준으로 하였으며 최종 격자의 수는 약 1450만개이다. 격자의존성 점검 결과는 Figure 12와 같으며 비회전 그리고 회전 도메인에 적용

된 최종격자의 수는 Table 2와 같다. 최종격자의 max. y+는 20.5로 해석에 사용한 SST 난류모델의 권장 범위를 만족한다.

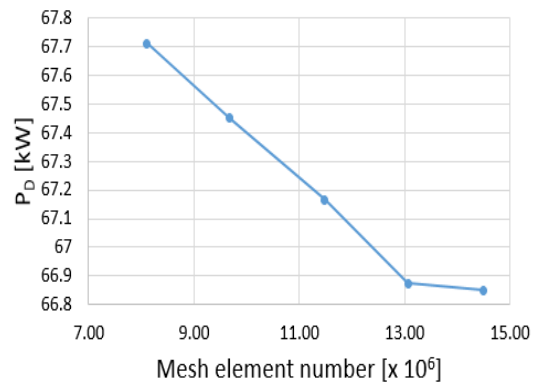


Figure 12: Convergence test results of the case 136

Table 2: Information of the final mesh

Domain	Mesh element No.[-]
Stationary Domain	7,867,425
Rotational Domain	6,621,247
Total	14,488,672

4.3 설계조건에 대한 성능 분석 결과

성능 분석에는 ANSYS CFX V13.0을 사용하였다. 입구에는 Table 1의 전진속도(V_a)와 난류강도 5%, 그리고 출구 경계면에는 수면 아래 추진기의 설치 위치를 고려하여 정압 조건 107.325 kPa을 사용하였다. 회전도메인의 회전수는 설계조건과 동일한 483 rpm을 설정하였으며 난류모델은 SST 난류모델을 사용하였다. 고정도메인(Stationary domain)의 외주면에는 open 경계를 설정하고 출구의 정압조건과 같은 압력을 설정하였다. 각 인터페이스에는 주기 조건과 frozen rotor 모델을 적용하여 해석을 수행하였다. Advection scheme과 turbulence numerics의 설정은 각각 high resolution 과 first order로 CFX V13.0의 default values를 따랐다.

격자 의존성 점검을 마치고 y+ 값을 규정 범위 내로 규제한 최종격자를 이용한 Case 136의 최종결과는 Table 3과 같다.

Table 3: Performance of the case 136 at NCR

Variable	Values
$P_E = F \times V_a$ [kW]	23.606
$P_D = Q \times \omega$ [kW]	66.850
$\eta_{POW} = P_E / P_D \times 100$ [%]	35.3

설계조건인 상용출력(NCR)은 회전속도 483 rpm에서 67.5 kW이며 CFD의 해석결과를 살펴보면 설계조건에서 전달동력은 Table 3과 같이 66.850 kW로 그 오차가 약 1%에 불과하다. 기본적으로 본 연구의 목표는 림추진기의 전달동력을 충족하는 것이므로 연구 목표를 달성하는 림추진기를 설계하였음을 알 수 있다.

한편, 일반적으로 추진기 단독효율(η_{POW} : propeller efficiency at open water)은 추진기의 직경, 회전수, 날개 수와 밀접한 관계를 가진다. 즉, 추진기의 직경이 크고 회전속도가 느리고 날개 수가 적을수록 추진기 단독효율은 높다. 본 연구에서 설계한 추진기의 단독효율은 Table 3에 보인 바와 같이 35.3 %에 불과하다. 이와 같이 낮은 효율의 원인은 제한된 연구비로 인하여 직경을 상당히 줄였기 때문이다. 또한 모터와 추진기가 직결하는 립추진기의 특성상 회전수를 줄일 수 없었으며 높은 추진기 회전속도가 야기한 캐비테이션을 줄이기 위하여 날개 수를 8개까지 증가시킨 것이다. 즉, 이 문제는 여러 가지 연구 환경의 제약에 따라 설계조건을 이상적으로 선정하지 못한 탓에 야기된 것으로 판단할 수 있으며 향후 립추진기의 지속적인 연구로 개선되어야 할 사항으로 사료된다.

전술한 바와 같이 본 연구에서는 전달동력을 충족하는 것을 목표로 규정하고 있으나 향후 실선 실험이 계획 중에 있으므로 캐비테이션 또한 최대한 억제하기 위해 다

양한 케이스 스터디를 수행하였다. Case 136은 전달동력의 충족과 함께 캐비테이션을 가능한 줄인 케이스이며 그 과정 및 결과를 부연하기 위해 Case 122 또한 살펴볼 필요가 있다.

먼저 Case 122는 캐비테이션을 줄이기 위하여 날개 수를 8개로 증가시켰으나 0.2R에 날카로운 모서리를 제거하지 않았으며 1.0R에 필렛이 없이 립과 맞붙어 있는 케이스로 Figure 13과 같은 형상을 갖는다. Figure 13의 초록색으로 표시한 영역이 3000 Pa 이하의 공동 영역이다. 일반적으로 추진기의 캐비테이션 영역은 3000 Pa 이하인 영역으로 규정되고 있다[7]. Case 122는 앞날(Leading edge)에서 발생하는 시트 캐비테이션은 완벽하게 제거한 상태이나 흡입면에서 상당한 크기의 공동영역(버블 캐비테이션 영역)과 0.2R 앞날에는 극소한 크기의 공동영역이기는 하나 강력한 부압의 공동영역을 발견할 수 있다. Figure 14와 같이 흡입면에서 발생하는 공동 영역의 공동핵의 압력은 -19.3 kPa이며 0.2R 앞날의 공동핵의 압력은 -138 kPa에 달한다.

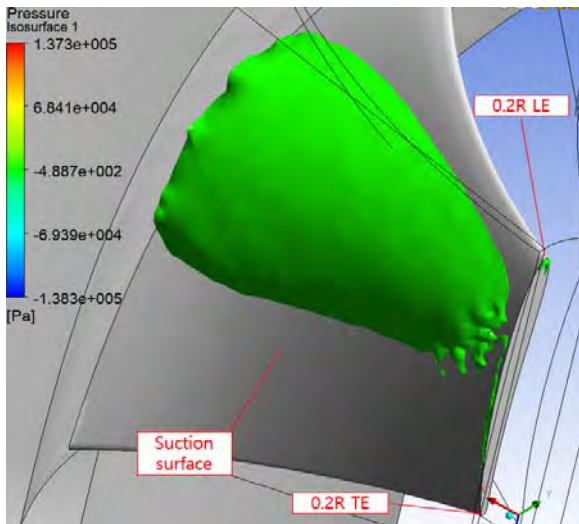


Figure 13: Cavity area of the case 122

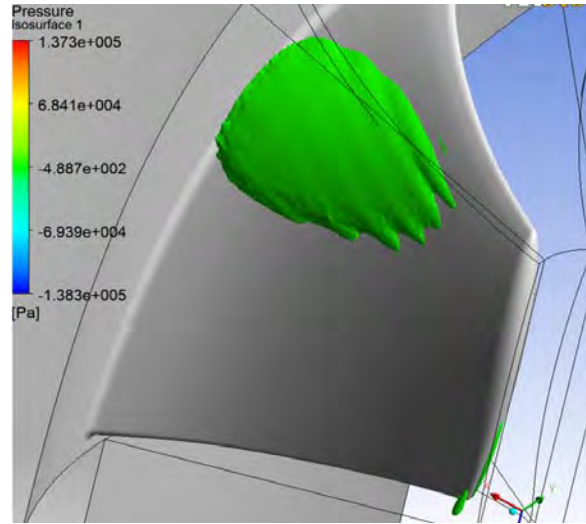


Figure 15: Cavity area of the case 136

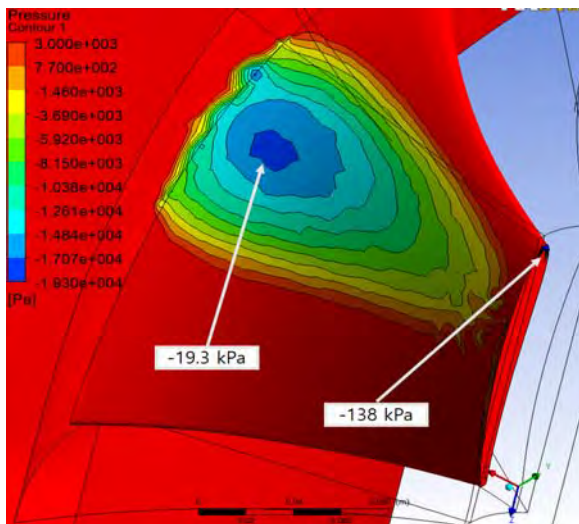


Figure 14: Pressure contour of the case 122

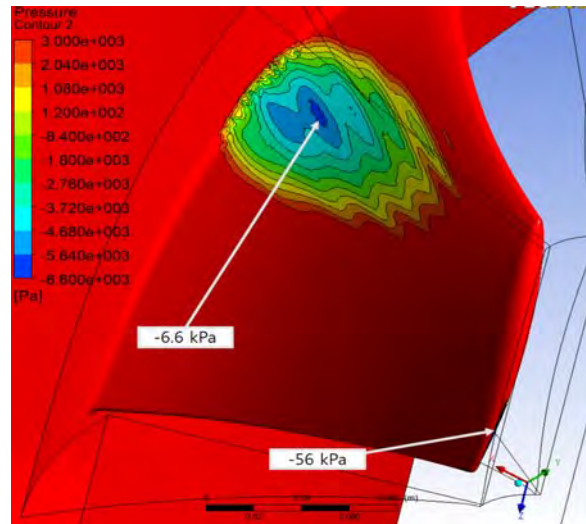


Figure 16: Pressure contour of the case 136

한편 Case 136은 Case 122와 마찬가지로 날개 수는 8개이며 0.2R 앞날과 뒷날의 날카로운 모서리를 제거하고 제작성과 강도를 확보하기 위하여 1.0R의 날개와 덕트의 림 부위가 접하는 모서리에 필렛을 준 경우로 Figure 15와 같다. Case 136은 Case 122의 추진기 형상으로부터 0.2R의 날카로운 모서리의 제거 및 유선화를 위하여 0.2R에서 0.25R까지 해당 영역을 CATIA R15를 이용하여 편집한 케이스이며 이에 따라 발생한 출력 저하의 문제는 입사각의 증가로 보완한 케이스이다. Case 122의 공동영역을 표시한 Figure 13과 Figure 15를 비교하면 흡입면의 버블 캐비테이션 영역의 크기를 Case 136에서 상당히 줄었음을 알 수 있으며 Figure 14와 Figure 16의 비교로부터 버블 캐비테이션 영역의 공동핵의 압력을 개선하였음을 알 수 있다. 또한 0.2R 앞날에서 발생하였던 강력한 공동영역은 완벽하게 제거하였음을 Figure 15를 통하여 알 수 있다. 그러나 Case 122에서는 발생하지 않았던 0.2R 뒷날(Trailing edge) 쪽에 팁 보텍스 캐비테이션이 Case 136에서는 발생함을 Figure 15와 Figure 16을 통해 알 수 있다. 이러한 팁 보텍스 캐비테이션은 다행히 날개와 공동의 접촉면적이 작아 날개의 강도와 추진기 성능에 미치는 영향이 적으므로 본 연구에서는 심각한 문제로 판단하지 않았다.

Case 136은 불리한 설계조건에서 목표출력을 만족하면서 캐비테이션 영역을 가능한 억제한 최선의 케이스이다. 그럼에도 불구하고 조악한 설계조건에 의하여 캐비테이션을 완벽하게 제거하지 못하였다. 특히 문제가 될 것으로 판단되는 캐비테이션 영역은 흡입면에서 발생하는 버블 캐비테이션이다. 향후 직경과 회전수의 변화 그리고 목표 출력의 저하 없이 캐비테이션을 제거하기 위한 연구 및 창조적인 발상이 필요하다.

4.4 탈설계조건에 대한 성능 분석 결과

본 연구에서 설계한 림추진기는 설계조건인 483 rpm에서 NCR인 67.5 kW를 만족시켜야 하며 500 rpm에서 MCR인 75 kW를 동시에 만족하여야 한다. 또한, 현재 실선 실험에 이용할 선체의 형상과 전진속도가 불확실하다. 그러므로 탈설계조건에 대한 성능 분석을 수행하였다.

Table 4는 전진속도를 NCR의 전진속도인 3.91 m/s로 유지하고 RPM을 500 rpm으로 수정하여 해석한 결과이다. 500 rpm 일 때 설계목표인 전달동력은 75 kW이며 Table 4에 보인 바와 같이 본 연구에서 설계한 추진기는 MCR 75 kW에 근접한 전달동력을 기대할 수 있다.

Table 4: Performance of the case 136 at MCR

Variable	Values
$P_E = F \times V_a$ [kW]	25.853
$P_D = Q \times \omega$ [kW]	74.045
$\eta_{POW} = P_E / P_D \times 100$ [%]	34.9

다양한 운전조건에 해당하는 추진기의 성능은 전진수(J)에 대하여 추력 계수(K_T)와 토크 계수(K_Q) 그리고 추진기 단독효율(η_{POW})로 나타낼 수 있다. 각 변수의 정의는 식 (2) ~ 식 (5)와 같다.

$$J = V_a / nD \tag{2}$$

$$K_T = F / \rho n^2 D^4 \tag{3}$$

$$K_Q = Q / \rho n^2 D^5 \tag{4}$$

$$\eta_{POW} = P_E / P_D \times 100 \tag{5}$$

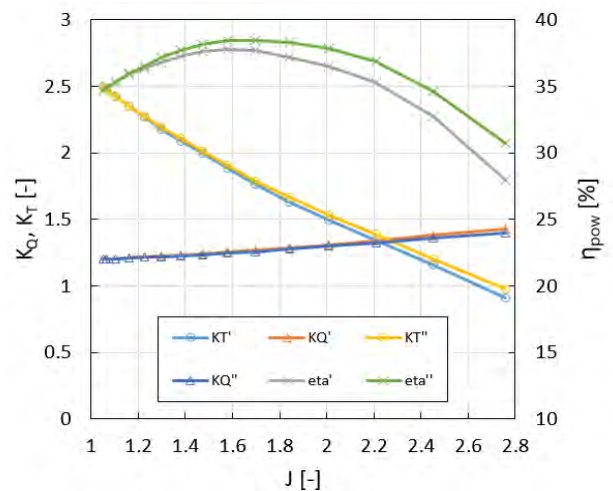


Figure 17: Performance chart of the case 136

본 연구에서 설계한 림추진기의 성능 곡선은 Figure 17과 같다. 전진수(J)에서 탈설계 성능분석에서 조작 가능한 변수는 전진속도(V_a : m/s)와 회전속도(n : rps)이다. 전진속도(V_a)를 설계조건으로 일정하게 유지하고 회전속도를 설계 회전속도의 0.4에서 1.05 (step: 0.05) 까지 CFD 성능 해석을 수행한 결과는 Figure 17에 상첨자 '(single prime)로 표시하였다. 한편, 회전속도를 설계조건으로 일정하게 유지하고 전진속도(V_a)를 조작하여 얻은 성능 해석 결과는 상첨자 ''(double prime)로 표시하였다. Figure 17에 보인 바와 같이 두 경우의 탈설계곡선이 비교적 잘 일치한다. 운전조건에 따라 본 연구에서 설계한 추진기의 성능을 예측함에 있어 Figure 17을 활용할 수 있을 것이다.

NCR 조건 즉, 설계조건에 해당하는 전진수는 1.104에 해당하며 MCR의 조건에 해당하는 전진수는 1.066에 해당한다. 본 연구에서 설계한 림추진기는 이러한 NCR와 MCR의 전진수로부터 전진수가 증가함에 따라 토크계수는 증가하며 추력계수는 감소하는 특성을 보인다. 전진수가 설계조건 일 때보다 약 1.7일 경우 효율이 최대가 되며 이 때 효율은 38.5 %이다. 설계조건이 아닌 탈설계조건(J = 1.70)에서 효

율이 최대가 되는 것은 덕트와 추진기의 상호관계와 림추진기의 명확한 설계이론의 부재 때문인 것으로 판단된다. 본 연구에서 제시한 설계기법에는 아직 추진기 효율을 고려하고 있지 못하나, 향후 추진기 효율을 고려한 설계기법의 개발이 필요하다는 것을 성능곡선으로부터 알 수 있다.

5. 결 론

림추진기의 많은 장점에도 불구하고 림추진기에 대한 연구는 소수에 불과하다. 본 연구는 가속덕트를 사용하는 허브리스 림추진기의 설계와 성능 해석에 대한 것이다. 림추진기의 설계 이론의 부재, 국내의 관련기술 부족, 열악한 연구 환경 등으로 인하여 본 연구에서는 가혹한 설계조건이 선정되었다. 즉, 전통적인 추진기의 설계이론(원판이론, 날개요소이론)만으로는 본 연구의 설계조건을 만족하는 림추진기를 설계할 수 없었다. 이에 따라 본 연구에서는 축류 펌프의 설계 이론과 워터제트 설계이론을 토대로 림추진기의 설계를 진행하였다. 케이스 스터디를 수행하였고 이를 토대로 본 연구에서는 축류 펌프의 설계이론과 워터제트의 설계 이론을 림 추진기의 설계에 이용할 경우 효과적인 설계절차를 제시하였다.

CFD 성능 분석을 통하여 본 연구에서 제시한 림추진기의 설계 절차에 따라 가혹한 설계조건에서 요구하는 전달 동력을 만족하는 림추진기를 설계할 수 있음을 알 수 있었다. 그러나, 본 연구에서 도출한 림추진기의 설계안은 낮은 효율과 캐비테이션을 완벽하게 제거하지 못한 경우에 해당한다. 그러므로 향후 림추진기의 효율적인 설계 및 운전 조건 선정, 그리고 효율 향상 방안, 캐비테이션의 제거 등에 대한 추가적인 연구를 진행할 예정이다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “소형선박용 150kW급 림 구동 전기추진시스템 개발” 사업으로 수행된 결과입니다(과제번호: P0002106).

Author Contributions

The following statements should be used “Investigation, D. Y. Kim; Design, D. Y. Kim; Numerical Simulation, D. Y. Kim; Writing-Original Draft, D. Y. Kim; Funding Acquisition, Y. T. Kim; Project Administration, Y. T. Kim; Editing Y. T. Kim”.

References

- [1] A. Y. Yakovlev, M. A. Sokolov, and N. V. Marinich, “Numerical design and experimental verification of a rim-driven thruster,” *Proceedings of Second International Symposium on Marine Propulsors*, 2011.
- [2] X. Yan, X. Liang, W. Ouyang, Z. Liu, B. Liu, and J.

- Lan, “A review of progress and applications of ship shaft-less rim-driven thrusters,” *Journal of Ocean Engineering*, vol. 144, pp. 142-156, 2017.
- [3] H. Grümmer, *Design and Optimization of a Hubless rim-driven Thruster for an Autonomous Surface Vehicle using RANSE Simulation*, M.S Dissertation, Department of Dynamics of Maritime Systems, Technical University of Berlin, German, 2016.
- [4] B. W. Song, Y. J. Wang, and W. L. Tian, “Open water performance comparison between hub-type and hubless rim driven thrusters based on CFD method,” *Journal of Ocean Engineering*, vol. 103, pp. 55-63, 2015.
- [5] K. SZAFRAN, O. SHCHERBONOS, and D. EJMOCKI, “Effects of duct shape on ducted propeller thrust performance,” *Transactions of the Institute of Aviation*, vol. 237, no. 4, pp. 84-91, 2014.
- [6] S. Gaggero, D. Villa, G. Tani, M. Viviani, and D. Bertetta, “Design of ducted propeller nozzles through a RANSE-based optimization approach,” *Journal of Ocean Engineering*, vol. 145, pp. 444-463, 2017.
- [7] A. F. MOLLAND, S. R. TURNOCK, and D. A. HUDSON, *Ship Resistance and Propulsion*, Cambridge University Press, 2017.
- [8] A. T. SAYERS, *Hydraulic and Compressible Flow Turbomachines*, McGraw-Hill, 1990.
- [9] D. JAPIKSE, W. D. MARSCHER, and R. B. FURST, *Centrifugal Pump Design and Performance*, Concepts ETI Inc, 1997.
- [10] D. Japikse and N. Baines, *Introduction to Turbomachinery*, Concepts ETI Inc and Oxford University Press, 1994.
- [11] http://voith.com/corp-en/VT2357_en_Product-Range-Marine_2016-06.pdf, Accessed October 24, 2018.