

소형 준설선 유압 추진기의 최적 제원 도출 및 성능 검증에 관한 연구

A Study on Derivation of Optimal Specifications and Verification of Performance of Hydraulic Propulsion Propeller for Small Dredger

백도선^{1,2} · 양경욱^{1*}

Do Sun Baek and Kyong Uk Yang

Received: 19 Oct. 2021, Accepted: 28 Oct. 2021

Key Words : Dredger (준설선), Hydraulic Propulsion Propeller (유압 추진기), Numerical Analysis(수치해석)

Abstract: In this study, we designed a hydraulic propulsion propeller system that allows dredged materials to be carried out by the dredger to the disposal place. The proposed model equation was used to formulate the screw propeller specifications considering the resistance to the dredger, and the quantitative specifications of the hydraulic propulsion propeller were determined through the numerical analysis programs. In addition, based on the proposed results, we were able to determine the specifications of the hydraulic system that was used for the hydraulic motor in the propulsion propeller device and then manufactured the hydraulic propulsion propeller. To guarantee the reliability of the proposed model equation, an external testing agency was invited and verified that the hydraulic propulsion propeller based on the proposed model equation could achieve the target speed in the dredger.

1. 서 론

A : projected area, m^2
 C_{ad} : admiralty coefficient indicating viscous resistance coefficient
 C_b : block coefficient
 C_d : drag coefficient
 D : diameter, m
 DW : dead weight tonnage, N
 F_m : magnetic force, N
 F : force, N
 f : coefficient of friction
 g : acceleration of gravity, m/s
 GT : gross tonnage, N

k_v : modification factor to enter the admiralty coefficient under engine speed
 $k_{1,2,3,4}$: offsets for MAU-series propeller blade sections
 L : power or length, W or m
 N : number of revolution, rev/s
 P : pressure, Pa
 Q : flow rate, m^3/s
 Re : Reynold's number
 T : weight or torque, N or Nm
 t : thrust deduction factor
 V : velocity or volume, m/s or m^3
 W : power of hydraulic system or propeller, W
 w : wake fraction ratio
 cb : Center of buoyancy in the longitudinal direction to the dredger, m
 $depth$: depth of the dredger, m
 $engine$: driving horsepower on the dredger, W
 l : pipe line
 $length$: length of the dredger, m
 $load$: Loading force on the dredger, N
 $motor$: Hydraulic motor for driving a hydraulic

* Corresponding author: yangku@jnu.ac.kr
 1 Department of Power System Engineering, Chonnam National University, Yeosu city, Chonnam, Korea
 2 Baekun Dredging Co., Ltd, Suncheon city, Korea
 Copyright © 2021, KSFC
 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.

| | |
|-----------------|---|
| | propulsion propeller |
| <i>pump</i> | : Hydraulic pump for driving a hydraulic propulsion propeller |
| <i>shaft</i> | : shaft horsepower on the dredger, W |
| <i>ship</i> | : the dredger |
| <i>sp</i> | : spiral propeller |
| <i>velocity</i> | : velocity of the dredger, m/s |
| <i>water</i> | : sea water |
| <i>width</i> | : width of the dredger, m |
| γ | : specific weight of hydraulic oil, kg/m ³ |
| Δ | : displacement tonnage, N |
| ρ | : density, m ³ /kg |
| ∇ | : displacement volume, m ³ |

1. 서론

준설선은 강, 운하 및 항만 내 바닥에 있는 흙, 모래, 광물 등을 채취하여 수심을 증가시키기 위해 사용하는 장비로서¹⁾, 해역 바닥의 토질의 종류, 준설된 준설물의 이동 방법 등에 따라 다양한 설비와 장비를 갖추고 있다.

보통 바다에서 준설된 물질이 흙, 진흙, 모래인 경우에는 원심식 펌프를 이용하여 물과 함께 퍼올려 수면상에 설치된 파이프를 통해 폐기 장소로 보내어 버리게 되는 경우와 펌프로 퍼올린 준설물 중에 물은 준설선 밖으로 배출시키고, 준설물 중 고형 물질만을 준설선 내 선창에 모아서 폐기 장소에 갖다 버리는 방법을 사용한다¹⁾. 이때, 준설물을 준설하는 방법으로는 펌프의 흡입구 전단에 준설 커터(cutter)를 설치하여 커터의 회전으로 바닥의 준설물을 분산시켜 쉽게 펌프 흡입구로 흡입하는 방법을 보통 사용한다. 준설 장소인 해역으로 준설선을 이동시키는 방법으로 준설선 내 동력기관을 사용하여 자력(自力)으로 이동하는 방법과 예인선을 이용하여 준설선을 이동시키는 방법이 있다. 자력으로 이동하는 준설선의 경우에는 추진기를 이용하는데, 나선형 프로펠러(screw propeller)²⁾를 사용하는 경우에는 준설선 내 설치된 내연기관에 직결식으로 연결하는 방법과 유압 장치 등을 이용하는 방법이 있다.

준설선의 작업 효율은 시간당 준설량에 의해 결정되어지는데, 이 준설량은 펌프 용량, 준설커터의 작업량, 준설선의 이동 속도 등에 영향을 받으므로 이 장치들에 대한 설계 변수들을 결정하는 것이 중요하다. 또한 장치들을 구동시키는 구동 동력원의 선택

및 용량 결정에 영향을 줄 수 있다. 보통 준설선은 실내 공간 자유도가 낮기 때문에 단수의 구동원을 이용하여 준설선에 설치된 장치들을 구동시키므로 준설량을 고려하여 각 장치들에서 요구되는 구동 동력의 용량을 결정하는 것이 중요하다.

이 연구에서 대상으로 하고 있는 준설선은 자력으로 이동하고 준설커터를 이용하여 얻어진 준설물은 원심식 펌프를 이용하여 선창이나 외부에 설치된 파이프를 통해 폐기 장소로 이동시켜야 한다. 또한, 준설선을 이동시키는 추진기는 나선형 프로펠러를 이용하며 이것을 구동시키는 동력은 유압 장치를 사용하는 것으로 선정하였다.

연구 수행 내용은 유압 추진기에 사용되는 유압 장치의 용량을 결정하기 위하여 준설선에 가해지는 외력에 대한 동적 방정식을 유도하였으며, 수치 해석 프로그램을 작성하고 해석하였다. 여기서 얻어진 결과를 이용하여 준설선에 필요한 유압 추진기의 설계 변수들을 결정하고 이것을 바탕으로 추진기를 제작하였다. 또한, 외부 검증기관을 통하여 제안한 추진기의 유용성을 확인하고, 준설선에 필요한 목표 이동 속도를 구현시켜 준설에 필요한 성능을 개선할 수 있도록 하였다.

2. 유압 추진기 구동계 모델링

준설선은 물 위에서 작업을 수행하는 관계로 외부의 저항 및 환경에 영향을 받으므로 안전하게 일을 수행할 수 있는 동력 전달 장치가 필요하다. 준설선의 이동뿐만 아니라 준설 작업을 수행하기 위해서는 준설선 내에 설치된 엔진에서 발생하는 동력을 무난하게 전달받아 작업을 진행해야 하며, 준설시 발생할 수 있는 비선형적인 외력에 대해서도 충분히 이겨내고 작업을 수행할 수 있어야 한다. 유압 장치는 기계 장치나 전기장치에 비하여 적은 개수의 장치로 구성되어 있어서 유지보수나 작동이 다른 장치에 비하여 단순하므로 안전성, 소형화, 신뢰성을 증대시킬 수 있을 것으로 판단하여 이 연구에서는 유압 장치를 대상으로 하였다.

일반적으로 준설선에 사용되고 있는 추진기의 경우, 준설선의 속도의 변화에 따라서 엔진 동력에 영향을 주는데³⁾, 이것은 추진기 자체의 특성에 의해서 그 원인이 있는 것 보다는 준설선의 선형(type of ship), 주요 제원 등에 의해서 구동 동력이 변화하는 것이다. 따라서 추진기 구동 엔진 및 추진기 사양을

정량적으로 계산할 경우에는 선형, 주요 제원 등을 입력 변수로 선정하고 그 변화량에 대한 모델식을 유도하는 것이 추진기 구동 장치 제원을 결정하는데 더 유효할 것으로 판단하였다. 이 연구에서는 동적 변수인 준설선의 속도 변화를 도입하여 모델식을 유도하고 추진기의 제원도 준설선의 속도에 상응하는 제원을 모델식을 통하여 구하였다.

2.1 유압 추진기의 개념 수립

준설선은 보통 내수면에서 작업을 진행할 경우가 많기 때문에 외륜(paddle wheel), 나선 추진기 및 분사 추진기(jet propeller)를 사용하는 것이 작업 특성상 좋으나, 외륜의 경우는 동력발생당 기계 자체의 부피가 너무 크며, 분사 추진기는 준설선의 이동 속도에는 강점이 있으나 속도당 엔진의 동력을 크게 요구하고 작동되는 유체의 특성에 따라 기계의 내구성에 크게 영향을 미치므로 관리에 신경집중이 요구되는 단점을 가지고 있다. 나선 추진기의 경우에는 일반 선박에서도 많이 사용되고 있는 장치로써 2~5개의 날개(blade)를 회전시켜 추진하는 장치로⁴⁾, 위에 언급된 추진기보다 동력당 추진 효율이 높아 선박에 거의 사용되고 있다. 다만, 해수면 아래에 위치되어 있어야 한다는 제약 때문에 준설선의 작업 상황에 따라 영향을 받을 수 있다. 즉, 준설선의 작업 환경에서 수심의 깊이가 중요하므로, 낮은 수심에서 작업을 진행할 경우에는 추진기의 역할을 충분히 발휘하지 못할 것으로 판단된다. 이러한 경우를 고려하여 제한할 나선 추진기는 수심의 깊이에 따라 나선 추진기의 동작점의 높이를 조절할 수 있도록 설계를 할 필요가 있어서 이 연구에서는 유압 실린더를 이용하여 추진기의 높이를 조절할 수 있도록 하였다.

추진기에 전달되는 구동 동력의 크기는 준설선의 선형, 이동 속도, 엔진의 용량 등에 의해 좌우되며, 선형은 준설선의 길이, 폭, 깊이, 흘수(draft) 및 재화 중량(dead weight tonnage)과 이동 속도에 따라 결정되어진다. 이 주요 제원들은 준설선에 가해지는 외부 저항의 크기에 영향을 미치므로, 준설선에 사용되는 유압 추진기의 제원을 계산하기 위해서는 주요 제원들을 고려하여 준설선에 가해지는 외부 부하력과 이동 속도를 산출해야 한다.

준설선이 운항하는데 발생되어지는 외부 부하력은 점성 저항, 조파 저항 및 공기 저항으로 구별하며⁵⁾, 특히 점성 저항, 조파 저항은 공통적으로 선체 외판 표면에 대한 조도, 선체 곡면 및 선박의 속도에 영향

을 받기 때문에 쉽게 구할 수 없으므로 모형 준설선을 제작한 후 수조 시험을 통하여 준설선 속도당 선체에 가해지는 저항력을 계산하는 것이 합리적이거나, 이 연구에서는 속도당 준설선에 발생하는 저항에 대한 기존 연구에서 제안한 실험식들을 이용하여 외부 부하력을 계산하였다.

준설선 운항에 필요한 유압 장치의 용량 및 추진기의 제원을 산정하기 위하여, 연구 수행 순서는 현재 건조 중인 준설선의 주요 제원을 이용하여 선박에 가해지는 외부 부하력을 계산하고, 준설선이 목표 최대 속도로 운항할 때 필요한 준설선의 유압 장치의 동력을 산정한 후 유압 추진기의 제원을 결정하였다.

2.2 외부환경 가정 조건

유압 추진기 구동용 유압 장치의 동력 및 추진기의 제원은 준설선의 이동 속도와 선형에 대한 저항 및 재화 중량 등에 의해 달라지므로 아래의 조건을 가정하고 모델식을 유도하였다.

- ① 준설선의 길이, 폭, 깊이는 흘수선을 기준으로 하여 산정하였다.
- ② 재화 중량은 준설선이 실을 수 있는 준설량의 최대치를 이용한다.
- ③ 흘수 높이는 준설선의 최대 재화 중량일 때를 기준으로 한다.
- ④ 유압 장치의 최대 부하율은 최대 재화 중량을 가지고 최고 속도로 운항할 때를 기준으로 한다.
- ⑤ 준설선 운항시 선체에 가해지는 파랑과 공기 저항은 무시한다.
- ⑥ 준설선의 고유 진동수는 고려하지 않는다.

한편, 일반적으로 추진기 설계는 예인 수조에서 모형 시험을 근거로 한 설계 도표를 이용하여 설계한다⁶⁾. 이 연구에서도 주요 변수를 선정할 때 도표를 이용하여 결정하였다. 추진기 설계의 주요 조건 항목은 구동 동력원에서 전달된 전달 마력 및 추진 마력, 추진기의 회전수, 추진기의 날개 수, 전개 면적비 등이며, 이 변수들이 주어지면 대응하는 도표를 사용해서 추진기 효율 범위 안에서 추진기의 날개 크기, 피치, 피치비를 계산하였다.

2.3 유압 추진기의 모델링

2.3.1 외부 부하력을 고려한 추진기 구동 엔진 동력 계산

준설선 운항시 필요한 엔진 동력을 준설선에 관한

부하력과 속도로 표시하면

$$L_{engine} = F_{load} \cdot V_{ship} \quad (1)$$

로 나타낼 수 있으며, 선체에 가해지는 부하력은 침수 중에 움직이는 물체에 작용하는 힘인

$$F_{ship} = C_d \frac{\rho_{water} A_{ship}}{2} V_{ship}^2 \quad (2)$$

로 표시할 수 있으므로, 엔진 동력은 외부 부하력과 준설훈 속도의 3승으로 나타내지며 식(3)으로 표시된다.

$$L_{engine} = C_d \frac{\rho_{water} A_{ship}}{2} V_{ship}^3 \quad (3)$$

항력계수는 유체 흐름에 대한 유동체 형상에 가해지는 마찰을 표시하는 계수이며, 준설훈의 형상을 표시하는 방형비척계수로 대체하면 점성 저항 공식⁷⁾을 이용하여 구할 수 있으나, 이 연구에서는 자료⁸⁾를 통하여 식(4)를 이용하여 방형비척계수들을 구하였고 이 값을 이용하여 푸루우드 수(froude number, $= V_{ship} / \sqrt{L_{length} g}$)를 계산하고 식(6)에 사용하였다.

$$C_d = \frac{GT \times 2.83}{L_{length} \times L_{width} \times L_{depth}} \quad (4)$$

준설훈의 길이 및 선체 형상에 대한 점성 저항 계수는 아래의 실험식⁹⁾을 이용하여 구하였다.

$$C_{ad} = 52 \cdot L_{length}^{0.4} \cdot k_v \quad (5)$$

k_v 는 엔진 회전수에 대한 수정계수로 아래의 근사식⁹⁾으로 표시되며 다른 선형에 대해서도 공통적으로 사용되고 있다.

$$k_v \approx \left[1 + \frac{0.205 \left(\frac{N}{120} - 1 \right)^{0.8}}{1 + 3.6 (V_{ship} \sqrt{L_{length} \cdot g} - 0.22)} \right]^{-1}, N > 120 \quad (6)$$

$$k_v \approx 1 + 0.0014(120 - N)^{1.24}, N < 120$$

준설훈의 투영면적은 최대 재화중량과 개략의 소요 만재배수량을 선형별 DW/Δ 로 계산하여 구한 재화용적을 가지고 유추할 수 있으며, 아래의 실험식(7)¹⁰⁾을 이용하여 투영 면적에 대한 저항력을 계산하였다.

$$DW/\Delta = 0.7(DW/10^3)^{0.04} \quad (7)$$

현실적으로 엔진의 동력은 선체무게와 재화중량을 이동시켜야 하므로 식(8)을 이용하여 선체무게와 재화중량을 합한 준설훈의 전체 톤수를 구하였다.

$$T_{ship} = \frac{DW}{DW/\Delta} \quad (8)$$

따라서, 식(3)의 엔진 동력은 선체에 가해지는 점성 저항 계수를 구하는 식(5)와 준설훈의 전체 중량을 구하는 식(8)을 이용하면 속도당 엔진 동력을 구하는 식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$L_{velocity} = \frac{T_{ship}^{2/3}}{C_{ad}} \cdot V_{ship}^3 \quad (9)$$

또한, 엔진 크랭크축에서 추진기까지의 기계적 효율¹¹⁾을 고려하여 엔진의 축마력은 아래의 식을 이용하여 구하였다.

$$L_{shaft} = L_{velocity} \cdot 1.15 \quad (10)$$

엔진의 공칭마력과 축마력과의 효율¹²⁾은 기계 사이의 마찰력을 표시하는 기계효율을 감안하여, 이 연구에서는 아래의 식을 이용하여 준설훈 속도당 엔진 동력을 계산하였다.

$$L_{engine} = \frac{L_{shaft}}{0.9} \quad (11)$$

또한, 만재 흘수는 준설훈에 실을 수 있는 화물의 크기에 따라 변화하고 준설훈의 톤수에도 관계가 있으나, 직접적으로는 준설훈의 선형에 따라 흘수간의 차이가 생기므로 정확한 상호 관계를 표시할 수 없으나, 개략적인 상호 관계는 유추할 수 있으므로 식(12)¹³⁾를 이용하여 최대 및 최소 예상 재화톤수를 구하였다.

$$\frac{GT}{DW} = 0.63 \sim 0.74 \quad (12)$$

2.3.2 준설훈의 구동 엔진 계산 프로그램

준설훈 구동 동력원 제원을 구하기 위하여 Altair Embed¹⁴⁾를 이용하여 수치 해석 프로그램을 작성하였다. 프로그램 구성은 크게 단순 계산 부분과 준설훈

의 속도 변화를 반복하는 부분, 참고 자료에서 얻어진 평균 엔진 마력과 준설선 최고 속도에서의 추정 엔진 마력을 비교하는 부분으로 되어있다.

프로그램은 아래의 순서로 수행되어진다.

① 준설선의 주요 제원인 준설선의 길이, 폭, 깊이 및 자료를 이용하여 얻은 최대 재화중량, 방형비척계수 등을 입력한다.

② 입력된 값들을 이용하여 식(1)~식(12)를 통하여 결과를 도출한다.

③ 준설선 속도가 0~6knot로 변화하는 동안에 발생하는 외부 부하력을 고려한 준설선의 추정 엔진 마력을 계산한다.

④ 추정 엔진 마력이 준설선의 목표 운항 속도의 95~105% 범위 안에 들어오면 그때의 준설선의 속도를 구함. 여기서 얻어진 추정 엔진 마력과 준설선의 속도는 실제 준설선에서 최고 속도를 낼 수 있는 엔진 마력을 의미하는 것으로 이 속도 이상으로 준설선은 운항할 수 없다.

⑤ 구해진 추정 엔진 마력을 구동하기 위한 엔진 동력을 산출한다.

2.3.3 준설선의 주요 제원

제작할 준설선의 주요 제원 등을 Table 1에 나타냈으며 이 값을 식(4)와 식(12)에 대입하여 방형비척계수와 예상 재화톤수를 계산하였다.

준설선의 선형 계수 중 만재 흘수선 이하의 선박의 형상은 준설선의 유체 역학적 특성과 밀접한 관계가 있으므로, 만약 두 준설선의 길이와 폭 그리고 흘수가 서로 동일하다 하더라도 이 형상이 다르면 선체에 가해지는 외부 부하력이 달라지고 엔진동력에 영향을 미치게 되므로 속도에 따른 엔진 동력에 영향을 준다. 이 연구에서 엔진 동력을 계산할 때에는 안전율을 감안하여 최대 예상 재화톤수를 이용하였고 식(4)를 이용하여 방형비척계수를 계산하였다.

Table 1 Properties of the dredger

| | |
|-------------|-----------|
| Length | 10.149[m] |
| Breadth | 8.256[m] |
| Draft | 1.225[m] |
| Dead weight | 30[ton] |

2.3.4 추진기 구동 유압 장치의 모델링과 주요 제원

추진기 구동 시스템의 모델링은 정역학적인 입장에서

에서 모델화를 수행하였다. 선체 외벽에 가해지는 부하력은 선박 속도에 의해서 변화하고 엔진의 구동 동력에 영향을 미치나, 엔진 구동 동력에 의해서 동력을 발생시키는 유압 장치의 동적 변화에는 크게 영향을 미치지 않은 관계로 이 연구에서는 정역학적 입장에서 모델화하였다¹⁵⁻¹⁶.

준설선에 사용되는 유압 펌프의 유량은

$$Q_{pump} = V_{pump} \cdot N_{pump} \quad (13)$$

로 나타낼 수 있으며, 유압 펌프의 토크는 아래의 식을 사용하였다.

$$T_{pump} = \frac{V_{pump} \cdot P_{pump}}{2\pi} \quad (14)$$

유압 펌프에서 발생하는 동력은 토크와 회전수의 관계로 나타낼 수 있으며 아래의 식을 사용하여 계산할 수 있다.

$$W_{pump} = \frac{T_{pump} \cdot N_{pump}}{9.55} \quad (15)$$

한편, 준설선에 사용되는 유압 모터의 유량은

$$Q_{motor} = V_{motor} \cdot N_{motor} \quad (16)$$

로 구하였으며, 유압 모터의 토크는 아래의 식을 사용하였다.

$$T_{motor} = \frac{V_{motor} \cdot P_{motor}}{2\pi} \quad (17)$$

유압 모터에서 발생하는 동력은 아래 식(18)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$W_{motor} = \frac{T_{motor} \cdot N_{motor}}{9.55} \quad (18)$$

유압 모터에 작용하는 압력은 관로 마찰로 인하여 유압 펌프에서 발생하는 압력보다 낮아지게 된다. 이 연구에서는 선형적으로 유압유의 속도가 변화하는 것으로 간주하여 관로에서 발생하는 압력손실은 다음 식¹⁷을 이용하여 계산하였다.

$$\Delta P_l = f_l \frac{L_l}{D_l} \frac{V_l^2}{2g} \gamma \quad (19)$$

여기서, 마찰계수는 레이놀즈수 함수로 표시하여 나타내면 다음 식이 된다.

$$f_l = \frac{64}{Re} \quad (20)$$

유압 추진기 구동에 사용될 준설선 유압 장치의 주요 제원을 Table 2에 표시하였다.

Table 2 Properties of hydraulic system in the dredger

| | |
|----------------------------------|--|
| Density | 850[kg/m ³] |
| Bulk modulus | 1.72×10 ⁹ [N/m ²] |
| Pipe length | 16[m] |
| Pipe diameter | 0.03016[m] |
| Displacement of hydraulic pump | 0.000126[m ³ /rev] |
| Displacement of hydraulic motor | 0.0003[m ³ /rev] |
| RPM of engine | 1500[rpm] |
| Setting pressure of relief valve | 3.9226×10 ⁶ [Pa] |

2.3.5 추진기 모델링

실제 해양구조물 중 준설선은 계획 모형선의 예항(曳航)시험에서 저항 값을 구하며, 추진 효율 요소를 자항(自航)시험에서 구하고 실선실적(實船實積)의 해석에서 얻어진 충분한 수정 자료를 가미해서 추정하는 것이 보다 신뢰성 있는 방법이나¹⁸⁾, 이 연구에서는 외부 환경이 선형 변화하는 것으로 간주하고 기 연구된 결과로 제시된 실험식 등을 이용하여 모델링을 수행하였다.

선형의 형상 영향계수(form factor)는 Schoenherr이 제안한 아래의 식(21)¹⁹⁾을 이용하였으며, 선미비대도(船尾肥大度) 계수¹⁷⁾는 식(22)를 이용하였다.

$$K_{sch} = \left(\frac{\nabla^{1/3}}{L_{ship}}\right)\left(0.5 C_b + \frac{2r^{1.3}}{C_b}\right) \quad (21)$$

$$r = \left(\frac{B_{ship}}{L_{ship}}\right)\left[(1.3(1 - C_b) - 0.031l_{cb}]\right] \quad (22)$$

선형에 의해 발생하는 반류율(wake fraction)은 단순히 비척계수만이 아니라 선체 길이에 따른 폭을 동시에 고려하는 방법을 많이 사용하므로 다음의 식

²⁰⁾을 가지고 구하였다.

$$w \cong 0.56 \cdot r^{0.6} \quad (23)$$

추력 감소계수는 단독 추진기일 경우에는 만재 상태에서 아래의 토미타(Tomita)식¹⁸⁾을 이용하여 구할 수 있다.

$$t \cong 0.77 \cdot r - 0.11, \quad r < 0.36 \quad (24)$$

$$t \cong 0.77 \cdot r - 0.09, \quad r > 0.36$$

선각 효율은 식(22), (23), (24)을 이용하여 구하면 아래와 같다.

$$\eta_h = \frac{1-t}{1-w} \quad (25)$$

추진기 전진 속도는 식(23)을 이용하여 구할 수 있는데, 선체에 가해지는 외부 부하력을 고려한 선체 속도당 엔진 구동력을 고려하여 구하면 아래 식으로 나타낼 수 있다.

$$V_{as} = V_{ship}(1-w) \quad (26)$$

추진기의 직경과 피치비는 MAU 설계도표⁶⁾를 이용하여 근사적으로 아래의 식을 이용하여 구하였다.

$$\delta_0 \cong k_1 \sqrt{W_{sp}} + k_2 \quad (27)$$

$$\frac{H_{sp}}{D_{sp}} \cong \frac{k_3}{\delta_0} + k_4$$

결국, 선체의 선형에 관련된 실험식 식(21)을 토대로 구한 반류의 크기(식(23), (24))를 고려하여 선체의 이동 속도(식(26))를 구한 후, 이 이동 속도를 구현해 낼 수 있는 추진기(식(27))를 선정하는 과정으로 추진기를 설계하였다.

3. 준설선 유압 추진기의 최적 제원 도출

3.1 선체 구조에 따른 선체 저항 도출

준설선에 사용될 유압 펌프와 유압 모터의 동력을 구하기 위하여 Table 2에 나타낸 변수들을 이용하여 계산한 결과, Table 3의 결과 값을 얻었다.

준설선의 선체에 가해지는 저항력 및 엔진 구동력을 준설선 속도 1~6knot로 변화시키면서 조사한 결과

Table 3 Power of resistance and engine in the dredger according to velocity variation

| Velocity of dredger [knot] | Power of resistance [W] | Power of driven engine [W] |
|----------------------------|-------------------------|----------------------------|
| 1 | 199.41 | 254.80 |
| 2 | 1276.37 | 1630.92 |
| 3 | 3754.06 | 4796.85 |
| 4 | 8098.81 | 10348.5 |
| 5 | 14766.6 | 18868.5 |
| 6 | 24210.3 | 30935.4 |

를 Table 3에 나타내었다. 준설선의 기본 제원은 Table 1을 이용하였으며, 엔진 구동력은 전달효율(75%)을 고려하여 계산하였다.

이 연구에서 목표로 하고 있는 준설선 속도 4knot에서 준설선 저항동력은 8098.81W, 엔진 구동동력은 10348.5W로 계산되었다. 따라서 설치 예정된 유압 모터의 제원을 기초로 하여 추진기를 구동시키는 유압 모터의 발생 동력(식(18)) 11965.6W보다 낮아서 안정적으로 준설선을 목표 속도로 이동시킬 수 있을 것으로 판단할 수 있다.

3.2 유압 추진기 탑재 위치 최적 선체 위치

기존 준설선의 경우 작업 환경상 준설을 수행하고 있는 중에는 추진기가 운용이 안되는 관계로 선저 외판 보다 위쪽으로 설치하므로써 추진기에 들어가는 유체의 흐름을 방해하는 경향이 있었다. 이러한 작업 환경을 고려하여 준설선의 이동에 관계있는 추진기의 위치는 선체를 지나는 유체의 흐름에 관계없이 안정되게 추진기로 들어갈 수 있도록 추진기의

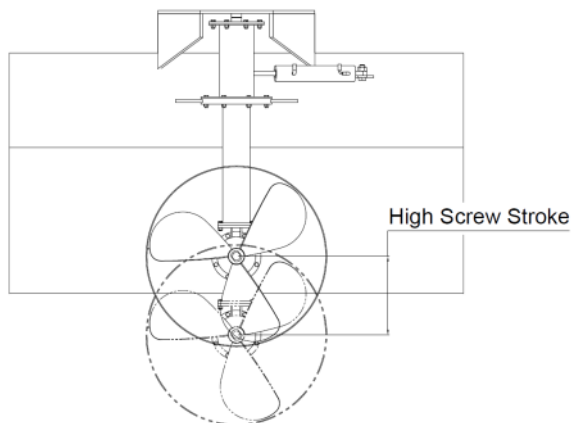


Fig. 1 Proposed positional system of hydraulic propulsion propeller in the dredger

선저 외판보다 아래에 위치되도록 하였으며, 준설 작업시에는 작업환경에 영향을 주지 않도록 선저 외판 보다 위쪽으로 추진기를 이동시킬 수 있는 유압 시스템을 구성하였다. 그 결과, 실선 실험시 목표로 하는 준설선의 이동 속도를 확보하였다.

3.3 유압 추진기 제원 도출

3.3.1 준설선 속도 변화에 따른 추진기 직경, 피치 및 피치비(3엽 날개일 때)

준설선의 목표 속도에 따른 최적의 추진기(3엽 날개)의 제원을 식(21)~(27)을 통하여 계산하였고 이 결과를 Table 4에 나타내었다. 준설선 속도 1, 2knot인 경우에는 추진기 제원을 구할 수가 없었는데 그 이유는 추진기 동력 계통과 추진기 제원 사이에 에너지 손실이 커지기 때문이다. 즉, 추진기의 슬립율(slip ratio)이 커져서 추진기의 회전 에너지를 준설선의 추력 에너지로 변화하는데 효율이 떨어진 결과이다. 다만, 유압 모터의 회전수를 감속시키면 되지만. 고정 용량형 유압 모터를 사용하기 때문에 구현하기에 어려움이 있는 것으로 계산되었다.

목표로 하고 있는 준설선 속도 4knot에서 추진기 직경은 0.8818m, 피치는 0.2903m, 피치비는 0.3292로 계산되었으며, 추진기 선정시 이 제원을 참고하여 설치하면 안정적인 준설선의 속도를 확보할 수 있을 것으로 판단하였다.

Table 4 Diameter, pitch and pitch ratio in the propeller(3rd-blades) according to velocity variation

| Velocity of dredger [knot] | Diameter of propeller [m] | Pitch of propeller [m] | Pitch ratio of propeller |
|----------------------------|---------------------------|------------------------|--------------------------|
| 3 | 0.8107 | 0.2534 | 0.3125 |
| 4 | 0.8818 | 0.2903 | 0.3292 |
| 5 | 0.9166 | 0.3418 | 0.3728 |
| 6 | 0.9794 | 0.3844 | 0.3925 |

3.3.2 준설선 속도 변화에 따른 추진기 직경, 피치 및 피치비(4엽 날개일 때)

4엽 날개를 가진 추진기의 제원도 준설선의 목표 속도에 따라 계산하였으며, 결과를 Table 5에 나타내었다. 4엽 날개 추진기는 준설선 속도 4knot에서 추진기 직경은 0.8818m, 피치는 0.3154m, 피치비는 0.3577로 계산되었다.

Table 5 Diameter, pitch and pitch ratio in the propeller(4th-blades) according to velocity variation

| Velocity of dredger [knot] | Diameter of propeller [m] | Pitch of propeller [m] | Pitch ratio of propeller |
|----------------------------|---------------------------|------------------------|--------------------------|
| 3 | 0.8107 | 0.2775 | 0.3423 |
| 4 | 0.8818 | 0.3154 | 0.3577 |
| 5 | 0.9166 | 0.3646 | 0.3978 |
| 6 | 0.9794 | 0.4074 | 0.4159 |

3.3.3 유압 추진기 시제품 제작

제안한 모델식을 기반으로 얻은 추진기의 제원을 토대로 추진기를 제작하였다. 목표로 하는 준설훈 이동 속도는 4knot이므로 안정한계를 고려하여 준설훈의 이동 속도가 5knot일 경우에 얻어진 3엽 날개 추진기의 직경, 피치, 피치비 값을 고려하여 제작하였다.

Fig. 2에 제안한 유압 추진기의 시작품을 나타낸 것이다. 현장 테스트 결과 4knot 이상의 속도가 나오는 것으로 외부 검증에서 확인되었다. 검증 기관은 한국 선급(Korean Register)²¹⁾이며, 선박에 관련된 장치 및 기술에 관하여 국제적인 인증과 검사를 실시하는 기관이다.

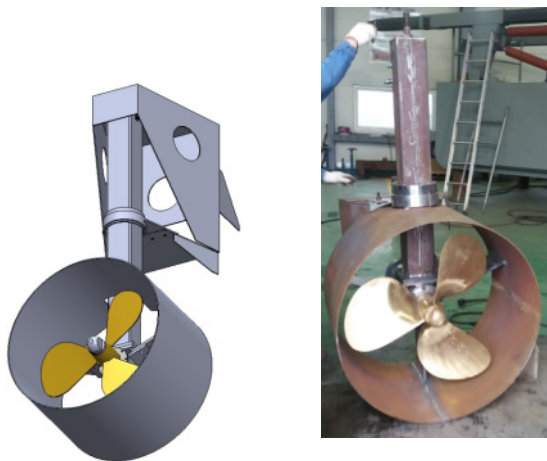


Fig. 2 Photo of proposed hydraulic propulsion propeller prototype

5. 결론

이 연구에서는 준설훈이 자력으로 이동하면서 준설훈 작업을 하고, 준설훈을 통하여 얻어진 준설훈물을 폐기 장소로 원활히 이동시킬 수 있는 유압 장치를 이

용한 나선형 추진기를 설계하였다.

준설훈에 가해지는 저항력을 고려하여 적절한 추진기의 사양을 설계하기 위한 모델링을 수행하였으며, 수치 해석 프로그램을 작성하고 이것을 통하여 정량적인 사양을 결정할 수 있었다. 또한, 제안된 결과를 근거로 하여 실제 추진기의 동력원으로 이용되는 유압 장치의 사양을 결정할 수 있었으며 유압 추진기도 제작하였다.

제안한 모델식의 신뢰도를 확보하기 위하여 외부 시험 기관으로부터 제작한 준설훈의 유압 추진기가 목표로 한 준설훈의 이동 속도를 구현해 낼 수 있음을 검증받았다.

기존 상용화된 추진기 설계 프로그램을 통하여 준설훈에 사용될 추진기를 설계할 수 있으나, 그 사양을 결정하는데 이용되는 모델식에 대한 구체적인 식을 얻어내기란 그리 쉬운 일이 아니다. 따라서 이 연구에서 제안한 모델식을 이용하면 값비싼 대형 프로그램을 구비하지 않더라도 안정되게 추진기의 사양을 정량적으로 계산할 수 있으므로, 소규모 조선소에서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

이 논문은 전남대학교 학술연구비(과제번호: 2020-3811) 지원에 의하여 연구되었음.

이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.

References

- 1) Doopedia, "Dredger", <http://www.doopedia.co.kr>
- 2) C. S. Mun, et al., "Ship Propulsion and Propeller Design", Munundang, Korea, pp.1-5, 2012.
- 3) C. S. Mun, et al., "Ship Propulsion and Propeller Design", Munundang, Korea, pp.57-58, 2012.
- 4) S. Kim, et al., "Ship Structure", Munundang, Korea, pp.18, 2012.
- 5) M. G. Park and N. J. Kwon, "Ship Basic Design", Koreayidonghaksa, Korea, pp.102, 2009.
- 6) C. S. Mun, et al., "Ship Propulsion and Propeller Design", Munundang, Korea, pp.31~37, 2012.

- 7) M. G. Park and N. J. Kwon, "Ship Basic Design", Koreayidonghaksa, Korea, pp.47, 2009.
- 8) Korea Ship Safety Technology Authority, "Technucal Data of Ship Design", Korea, 2015.
- 9) M. G. Park and N. J. Kwon, "Ship Basic Design", Koreayidonghaksa, Korea, pp.133-136, 2009.
- 10) M. G. Park and N. J. Kwon, "Ship Basic Design", Koreayidonghaksa, Korea, pp. 42, 2009.
- 11) G. J. Jo et al., "Ship Propeller Design", Taehwa Publishing C., Korea, pp.18, 1981.
- 12) M. G. Park and N. J. Kwon, "Ship Basic Design", Koreayidonghaksa, Korea, pp.147, 2009.
- 13) S. Kim, et al., "Ship Structure", Munundang, Korea, pp.46, 2012.
- 14) Altair Embed, www.altair.com, 2015.
- 15) S. M. Baek et al., "Design of the Hydro-Mechanical Transmission for a 55kW-Class Agricultural Tractor", Journal of Drive and Control, Vol.17, No.2, pp.19-27, 2020.
- 16) Y. S. Park et al., "A Study on the Regeneration Efficiency of the Electric Forklift Using the Variable Hydraulic Motor", Journal of Drive and Control, Vol.17, No.3, pp.26-32, 2020.
- 17) S. B. Yun, "Fluid Mechanics", Munundang, Korea, pp.389, 2018.
- 18) M. G. Park and N. J. Kwon, "Ship Basic Design", Koreayidonghaksa, Korea, pp.99, 2009.
- 19) M. G. Park and N. J. Kwon, "Ship Basic Design", Koreayidonghaksa, Korea, pp.107, 2009.
- 20) M. G. Park and N. J. Kwon, "Ship Basic Design", Koreayidonghaksa, Korea, pp.121-123, 2009.
- 21) Korean Register, www.krs.co.kr.