

선박자동접안 프로그램 개념설계에 관한 연구

강병선* · 정창현**†

* 목포해양대학교 대학원 박사과정, ** 목포해양대학교 교수

A Study on the Concept Design of Automatic Vessel Berthing Program

Byung-Sun Kang* · Chang-Hyun Jung**†

* Doctor's course, Graduate School of Mokpo National Maritime University

** Professor, Mokpo National Maritime University

요 약 : 자율운항선박이 부두 근처에 도착하여 예선이나 도선사의 도움 없이 선박을 자동으로 접·이안하기 위해서는 부두를 인식하고 주어진 외력 조건에서 부두까지 정해진 접안속도로 접안하기 위한 스러스터 출력과 출력각을 산정해야 한다. 이에 본 연구에서는 선박이 접안 중에 작용하는 외력과 모멘트를 분석하고 자동접안을 위한 스러스터의 출력 계산과 자동접안 프로그램 개발을 위한 기본개념을 설계하였다. 선박이 접안 중 바람에 의해 선체에 작용하는 풍압력은 풍압면적을 기초로 선형과 풍향각에 따라 계산하였으며, 선체에 작용하는 유압력은 조류에 의한 유압력과 접안속도에 따른 유압력을 분리하여 계산하였다. 그리고 선박의 횡방향 힘에 따라 선박을 회전시키는 회두모멘트를 계산하였다. 접안 중 선박에 작용하는 힘과 회두모멘트를 고려하여 부두와 평행하게 접안하기 위한 스러스터 출력과 출력각을 계산할 수 있는 이론식을 제시하고 다른 변수들로 인한 회두를 PID 제어로 제어하였다. 또한, 이론식에 필요한 입력요소를 분석하여 프로그램 개발을 위한 기본개념을 제시하였다.

핵심용어 : 자율운항선박, 자동접안, 스러스터, 회두모멘트, PID 제어기

Abstract : In order for an autonomous ship to arrive near the pier and automatically berth without the help of a tugboat or pilot, it is necessary to recognize the pier and calculate the thruster output and output angle for berthing to the pier at a fixed berthing speed under given external force conditions. Therefore, in this study, the external force and moment acting on the ship while berthing were analyzed, and the thruster output calculation for automatic berthing was designed and the basic concept for the development of the automatic berthing program was designed. The wind pressure applied to the hull by the wind while the ship is berthing was calculated based on the wind pressure area and the wind direction angle and the turning moment to rotate the ship according to the transverse force of the ship was calculated. Considering the force acting on the ship and the turning moment during berthing, a theoretical formula was presented to calculate the thruster output and output angle for berthing parallel to the pier, and the turning due to other variables was controlled by the PID controller. In addition, the basic concept for program development was presented by analyzing the input elements necessary for the theoretical formula.

Key Words : Autonomous ship, Automatic berthing, Thruster, Turning moment, PID controller

1. 서 론

자율운항선박은 인공지능, 사물인터넷, 빅데이터, 이기종 센서 융합 등을 이용하여 선박 스스로 상황을 인지·제어함으로써 해양사고를 줄이고 운항시 효율을 높일 수 있기 때문에 국내·외적으로 개발에 많은 관심을 가지고 있다. 자율운항선박의 자율도를 높이기 위해서는 선박 외부 상황을 인

식하고 항로 의사결정과 제어가 가능한 자율운항시스템 기술이 필수적이다(KISTEP, 2020).

자율운항시스템 기술에는 예선이나 도선사의 도움 없이 선박을 자동으로 접·이안하는 선박 자동 접·이안 기술이 포함될 수 있다. 이와 같이 선박을 자동으로 접·이안하기 위해서는 부두 가까이 접근한 선박은 부두를 인식하고 접안속도와 외력의 영향을 고려하여 선수 및 선미의 필요한 스러스터 출력 값을 자동으로 산출해야만 한다.

접이안 과정에서의 항내 조선을 위한 선박에 가해지는 외력에 대한 연구로는 실습선에 작용하는 풍압력과 풍압모멘

* First Author : kbs109011@komsa.or.kr, 061-662-9715

† Corresponding Author : hyon@mmu.ac.kr, 061-240-7182

트 분석을 통한 상대 풍향과 풍속에 따른 표류각 연구(Lee, 2007)와 실습선을 대상으로 항내 어프로칭 조선시 선체에 작용하는 풍압력 분석(Jung et al., 2008) 등이 있다. 그리고 Jung and Nam(2016)은 선체 횡방향 이동 시 발생하는 유압력이 선종과 수심/흘수비의 영향을 크게 받을 것을 예상하고 여객선형 선박에 대한 횡이동 실선실험을 통하여 수심/흘수비에 따른 유압력계수를 비교·평가하였으며, Jung et al.(2014)는 사고 선박의 구조를 위해 선박에 가해지는 저항을 분석하고 실선 예방실험을 통해 선박을 예인하기 위한 예선의 소요마력을 산출하였다.

하지만, 이들 연구에서는 풍압력과 유압력 등 선체에 가해지는 외력에 대한 평가와 선박을 예인하기 위한 예선의 소요마력에 대한 분석이 주로 이루어졌으나, 선박의 자동접안을 위한 주기 및 스러스터의 출력 산정에 대한 연구는 부족한 실정이다.

이에 본 연구에서는 선박의 접안과정 중 작용하는 외력과 회두모멘트를 분석하고 선박의 자동접안을 위한 아지무스 스러스터(Azimuth Thruster)의 출력 계산과 자동접안 프로그램 개발을 위한 기본개념을 제시하고자 한다.

2. 접안 중 선체에 작용하는 힘

선박이 부두에 접안할 때, 바람이나 조류 등과 같은 외력을 받게 되면 선체의 압류나 회두 등의 현상이 발생한다. 이러한 현상은 수면 상부에 작용하는 풍압력과 조류 및 선박의 횡이동으로 인한 수면 하부에 작용하는 유체력이 주요 원인이며, 선체 무게중심을 기준으로 선수를 회전시키는 모멘트를 발생시킨다.

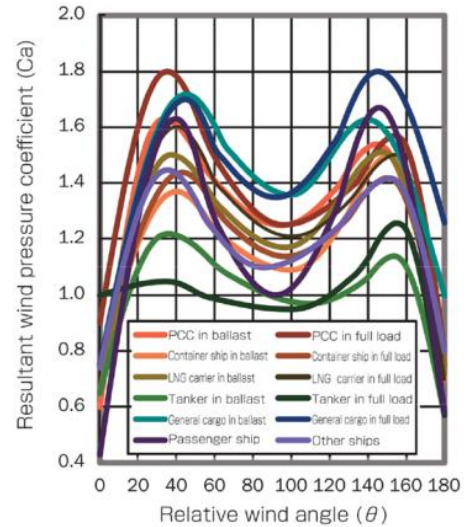
2.1 풍압력 및 풍압모멘트

접안 중 선체에 작용하는 풍압력(F_W)은 식(1)과 같이 풍압면적을 기초로 선형과 풍향각에 따라 산출되는 Hughes의 실험식이 보편적으로 사용된다(Hughes, 1930).

$$F_W = \frac{1}{2} \rho_a C_a (A_T \cdot \cos^2 \theta + A_L \cdot \sin^2 \theta) V_a^2 \times \frac{1}{1000} \quad (1)$$

여기서, ρ_a : 공기밀도(kg·sec²/m⁴), C_a : 풍압합력계수,
 A_T : 정면 풍압면적(m²), A_L : 측면 풍압면적(m²),
 θ : 상대풍향(deg), V_a : 풍속(m/s)

풍압합력계수는 풍동실험에 의해 결정되지만, 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 Inoue(2013)가 제시한 선종별 풍압합력계수를 사용하였다.



Source: Inoue(2013), Theory and Practice of Ship Handling

Fig. 1. Resultant wind pressure coefficient.

풍압력의 횡요소는 선체 무게중심 주변에 회두모멘트를 형성하여 선수를 회두시킨다. 풍압중심(a)는 식(2)와 같이 대략적으로 위치를 추론할 수 있고, 풍압모멘트(M_W)는 식(3)과 같이 계산될 수 있다(Inoue, 2013).

$$a = (0.291 + 0.0023\theta)L \quad (2)$$

$$M_W = F_W \cdot \sin \theta \times (0.5L - a) \quad (3)$$

여기서, θ : 상대풍향(deg), L : 선체 길이(LOA, m)

2.2 유압력 및 유압모멘트

접안 중 선체에 작용하는 유압력은 식(4)와 같이 조류에 의한 유압력(F_C)과 접안속도에 따른 유압력(F_U)이 복합적으로 작용하며, 각 유압력에 따른 유압모멘트(M_C , M_U)는 식(5)와 같이 산출된다.

$$F_C = \frac{1}{2} \rho_w C_{yc} L d V_c^2 \times \frac{1}{1000} \quad (4)$$

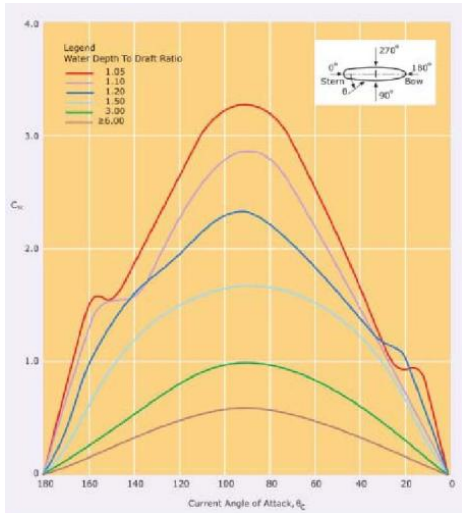
$$F_U = \frac{1}{2} \rho_w C_{yc} L d U^2 \times \frac{1}{1000}$$

$$M_C = \frac{1}{2} \rho_w C_{mc} L^2 d V_c^2 \times \frac{1}{1000} \quad (5)$$

$$M_U = \frac{1}{2} \rho_w C_{mc} L^2 d U^2 \times \frac{1}{1000}$$

여기서, ρ_w : 해수밀도(kg·sec²/m⁴), C_{yc} : 유압력계수,
 C_{mc} : 유압모멘트계수, L : 선체 길이(LBP, m),
 d : 흘수(m), V_c : 유속(m/s),
 U : 접안속도(m/s)

유압횡력계수는 수심/흘수비(h/d)에 따라 크게 달라지고 UKC가 작아질수록 선체를 횡으로 이동시키는데 보다 큰 힘이 필요하다. OCIMF에서는 Tanker에 대한 모형시험을 실시하고 그에 따른 유압횡력계수를 Fig. 2와 같이 제시하고 있다(OCIMF, 2008). 또한, Inoue(2013)는 VLCC에 대한 유압횡력계수 및 유압모멘트계수 계산식을 식(6)과 같이 제시하고 다른 선종에 대해서는 결과값의 90%(LNG선), 85%(컨테이너선), 75%(PCC)를 적용하고 있다. 본 연구에서는 Inoue(2013)가 제시한 유압횡력계수와 유압모멘트계수를 사용하였다.



Source: OCIMF(2008), Mooring Equipment Guidelines
Fig. 2. Lateral Current Force Coefficient (loaded tanker).

$$C_{yc} = \left(\frac{0.75}{\frac{h}{d} - 0.9} + 1 \right) \sin \beta \quad (6)$$

$$C_{mc} = \left(\frac{0.075}{\frac{h}{d} - 0.9} + 0.1 \right) \sin (2\beta)$$

여기서, h : 수심(m), d : 흘수(m), β : 입사각(deg)

조류는 선체에 횡방향으로 작용할 경우에는 횡유압력을 발생시키지만, 길이방향으로는 선체 수면하 표면에 마찰력이 작용한다. 마찰력(F_f) 계산은 식(7)과 같고, 마찰저항계수는 Reynold number에 따른 Schoenherr 곡선 및 ITTC 1957 모형선-실선 상관곡선을 이용하였다(Ship resistance and propulsion, 2012).

$$F_f = \frac{1}{2} \rho_w C_f S V_c^2 \times \frac{1}{1000} \quad (7)$$

여기서, ρ_w : 해수밀도($\text{kg}\cdot\text{sec}^2/\text{m}^4$), C_f : 마찰저항계수,
 S : 침수표면적(m^2), V_c : 유속(m/s)

그리고 침수표면적(S)은 식(8)과 같이 계산되어 식(7)에 적용된다.

$$S = (1.7d + C_b \cdot B)L \quad (8)$$

여기서, d : 흘수(m), C_b : 방형비척계수,
 B : 선폭(m), L : 선체 길이(LBP, m)

3. 스러스터 출력산정

3.1 이론계산

선박자동접안을 위해서는 Fig. 3과 같이 선박이 일정속도(U)로 접안 시 작용하는 외력 및 모멘트를 계산하고, 그에 대응하는 스러스터 출력 값을 산출해야 한다. 이때 외력을 식(9)와 같이 선박의 종방향(F_x), 횡방향(F_y)으로 분리할 수 있고 회두모멘트(M)의 총합은 식(10)과 같다.

$$F_x = F_W \cdot \cos \theta + F_F \cdot \cos \theta \quad (9)$$

$$F_y = F_W \cdot \sin \theta + F_C + F_U$$

$$M = M_W + M_C + M_U \quad (10)$$

여기서, M_W : 바람에 의한 풍압모멘트,

M_C : 조류에 의한 유압모멘트,

M_U : 접안속도에 의한 유압모멘트,

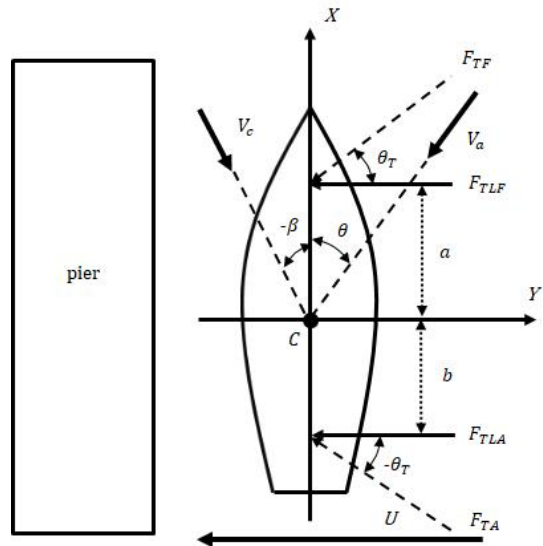


Fig. 3. Coordinate system.

3.2 스러스터 출력산정

선박의 종방향 이동을 제어하기 위한 힘은 F_x 가 되고, 선박을 U 의 속도로 접안하기 위한 힘은 F_y 가 된다(식(11)). 회

두모멘트를 고려하여 선박을 부두와 평행한 상태로 유지하기 위한 선박의 무게 중심(C)으로부터 a , b 만큼 떨어진 선수와 선미의 스러스터의 출력은 식(12)와 같다.

$$\begin{aligned} F_X &= (F_{TF} + F_{TA}) \sin \theta_T \\ F_Y &= F_{TLF} + F_{TLA} \end{aligned} \quad (11)$$

$$M = aF_{TLF} + bF_{TLA} \quad (12)$$

여기서, a : 무게중심과 선수 스러스터 간 거리(m),
 b : 무게중심과 선미 스러스터 간 거리(m),
 F_{TLF} : 선수 스러스터 출력 중 선박 횡방향 분력,
 F_{TLA} : 선미 스러스터 출력 중 선박 횡방향 분력

이때, a , b 는 미리 알 수 있으므로 F_{TLF} , F_{TLA} 은 식(13)과 같이 계산된다. 그리고 선체 종방향으로 작용하는 외력(F_X)을 고려하면 스러스터의 출력각이 필요하다. 선수, 선미의 스러스터의 출력각(θ_T)이 동일하다고 가정하면 주어진 외력 조건에 선체를 부두와 평행한 상태를 유지하면서 요구되는 접안속도로 접안하기 위한 선수, 선미 스러스터 출력각(θ_T)과 출력(F_{TF} , F_{TA})은 식(14), 식(15)와 같다. 그리고 F_{TF} , F_{TA} 는 1.0t·f당 100마력 또는 1.5t·f당 100kW로 환산하여 나타낼 수 있다(Inoue, 2013).

$$\begin{aligned} F_{TLF} &= \frac{M - bF_Y}{(a - b)} \\ F_{TLA} &= F_Y - F_{TLF} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\theta_T = \text{atan}\left(\frac{F_X}{F_Y}\right) \quad (14)$$

$$\begin{aligned} F_{TF} &= F_{TLF} \cdot \sec \theta_T \\ F_{TA} &= F_{TLA} \cdot \sec \theta_T \end{aligned} \quad (15)$$

4. 선체 회두 제어

선수와 선미의 스러스터 출력값은 선박이 정해진 속력으로 접안 중 작용하는 외력과 회두모멘트는 적용되었지만 실제 환경에서는 다양한 변수들로 인해 선박이 부두와 평행한 상태를 유지하지 못 할 수 있다. 따라서 선수방위(heading)의 변화에 따른 스러스터 출력값을 조정해 줄 피드백 제어 시스템이 필요하다. 본 연구에서는 피드백 제어 시스템으로 PID(Proportional-Integral-Derivative) 제어를 사용하였다.

4.1 PID 제어기

PID 제어기는 비례(P) - 적분(I) - 미분(D) 제어를 의미하

고, 제어하고자 하는 대상의 입력값(input)을 측정하여 목표 설정값(set point)과 비교하여 오차(error)를 계산한다. 오차값을 이용하여 제어에 필요한 제어값(output)을 계산하고, 이 제어값은 피드백 구조로써 제어하고자 하는 대상의 입력값으로 다시 사용되는 구조이다. PID 제어기는 식(16)과 같이 구성되어 있다.

$$MV(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (16)$$

여기서, $MV(t)$ 은 출력 함수, $e(t)$ 는 에러 함수, K_p 는 비례 이득계수, K_i 는 적분 이득계수, K_d 는 미분 이득계수를 의미한다. 미분항은 현재 상태에서의 오차값의 크기에 비례한 제어작용을 하며, 적분항은 정상상태 오차를 없애는 작용을 하고, 미분항은 출력값의 급격한 변화에 제동을 걸어 오버슈트(overshoot)를 줄이고 안정성을 향상시킨다.

4.2 회두제어

선박의 선수방위와 부두방위(부두선의 진방위)와의 차이를 PID 제어기의 입력값으로 두고 결과값(MV)을 F_{TLF} 조정값으로 보면 식(17)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} MV_n &= MV_{n-1} + \Delta MV \\ \Delta MV &= K_p(e_n - e_{n-1}) + K_i e_n \\ &\quad + K_d((e_n - e_{n-1}) - (e_{n-1} - e_{n-2})) \end{aligned} \quad (17)$$

여기서, MV_n : n번째 F_{TLF} 조정값,
 e_n : n번째 선박의 선수방위와 부두방위의 차이

선박과 부두의 방향차이로 F_{TLF} 이 조정되지만(F_{TLF}') F_Y 의 변화는 없어야 하기 때문에 F_{TLA} 은 식(18)과 같이 조정된다(F_{TLA}'). 그리고 F_{TF} , F_{TA} 은 식(19)와 같이 피드백된다.

$$\begin{aligned} F_{TLF}' &= F_{TLF} + MV_n \\ F_{TLA}' &= F_Y - F_{TLF}' \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} F_{TF} &= F_{TLF}' \cdot \sec \theta_T \\ F_{TA} &= F_{TLA}' \cdot \sec \theta_T \end{aligned} \quad (19)$$

5. 선박자동접안 프로그램

5.1 스러스터 출력 및 출력각 계산 절차

선박자동접안 프로그램이 입력된 환경에 따라 스러스터 출력 및 출력각을 계산하는 과정은 Fig. 4와 같다. 먼저 주어진 풍속, 유속 환경에서 원하는 접안속도로 선박이 접안 시

선체에 작용하는 외력을 계산하고(External forces), 외력에 의해 발생하는 회두모멘트(Turning moments)를 계산한다. 그리고 작용하는 힘의 총합을 선박 종방향과 횡방향으로 분리한다(Division of forces). 선체에 작용하는 힘과 회두모멘트를 고려한 스러스터의 출력 및 출력각을 계산하고(Thruster power), 그 외 변수들로 인해 발생하는 선체의 회두를 PID제어기로 제어하고 부두방위(Pier's direction)와 평행한 상태로 접안하기 위한 스러스터 출력값을 피드백한다(Turning control).

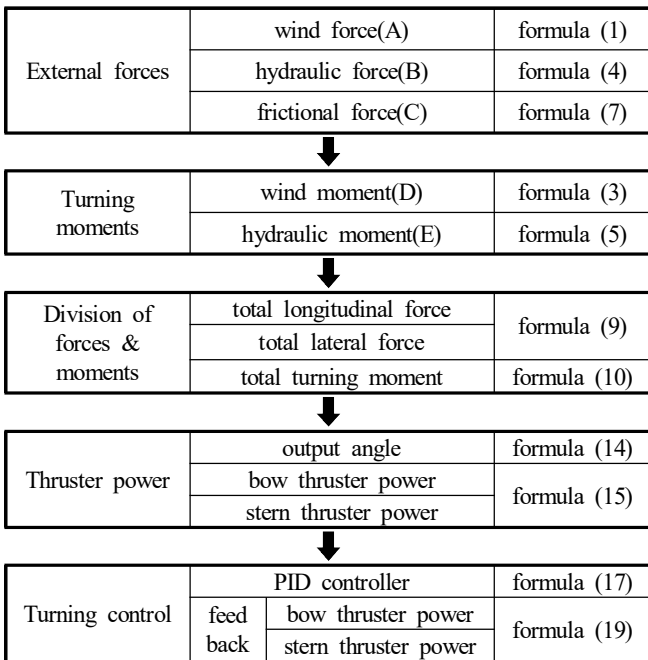


Fig. 4. Procedure of calculation.

5.2 입력요소 결정

선박자동접안 프로그램을 구축하여 실행하기 위한 계산 과정에서 요구되는 주요 입력요소를 분류하면 Table 1, Table 2 및 Table 3과 같다. Table 1은 전장, 수선간장, 선평, 흘수 등 선박의 주요 제원과 접안환경 조건에 해당되는 내용이다. 정면 및 측면 풍압면적은 수면상부 구조물의 폭과 높이로 계산할 수 있다. 풍속, 상대풍향, 유속, 입사각, 접안속도는 실제 접안환경에 맞도록 입력한다.

Table 2는 Table 1의 입력요소를 입력함으로써 중간 계산 과정에서 정해지는 값이며, Table 3은 항상 동일하게 적용되는 값이다. 즉, Table 2와 Table 3은 계산과정에서 필요한 항목이지만 해당 프로그램에서 사용자가 입력요소를 직접 입력하지 않아도 되는 항목이다.

Table 1. Input data

Input data	Value	Unit
LOA		m
LBP		m
Breadth		m
Draft		m
C_b		-
Transverse projected area		m^2
Lateral projected area		m^2
Water depth		m
Wind speed		knot
Relative wind angle		degree
Current speed		knot
Relative current angle		degree
Berthing speed		knot
Pier's direction		degree

Table 2. Fixing data during calculation

Input data	Value	Unit
Resultant wind pressure coefficient		-
Lateral current force coefficient		-
Hydraulic moment coefficient		-
Wetted surface area		m^2

Table 3. Fixed data

Input data	Value	Unit
Air density	0.125	$kg \cdot sec^2/m^4$
Water density	104.6	$kg \cdot sec^2/m^4$
Frictional resistance coefficient	0.002	-

6. 결 론

자율운항선박이 부두 근처에 도착하여 예선이나 도선사의 도움 없이 선박을 자동으로 접·이안하기 위해서는 부두를 인식하고 주어진 외력 조건에서 부두까지 정해진 접안속도로 접안하기 위한 스러스터 출력과 출력각을 산정해야 한다. 따라서 본 연구에서는 선박이 접안 중에 작용하는 외력과 회두모멘트를 분석하고 자동접안을 위한 스러스터의 출력 계산과 자동접안 프로그램 개발을 위한 기본개념을 설계하였다.

접안 중 바람에 의해 선체에 작용하는 풍압력은 풍압면적을 기초로 선형과 풍향각에 따라 계산하였으며, 선체에 작용하는 유압력은 조류에 의한 유압력과 접안속도에 따른 유압력을 분리하여 계산하였다. 그리고 선체에 작용하는 힘 중 선박의 횡방향 힘에 의해 선박을 회전시키는 회두모멘트를 계산하였다.

접안 중 선체에 작용하는 힘을 선박의 종방향, 횡방향으로 나누고 회두모멘트를 고려하여 부두와 평행하게 접안하기 위한 스러스터 출력과 출력각을 계산할 수 있는 이론식을 구성하였다. 그리고 실제환경에서 발생할 수 있는 다양한 변수들로 인한 회두를 제어하고 부두방향과 평행한 상태로 접안할 수 있는 스러스터 출력값을 PID 제어기로 피드백하였다. 또한, 이론식에 필요한 입력요소를 분석하여 직접 입력해야 하는 요소와 자동으로 입력되는 요소를 구분하여 프로그램 개발을 위한 기본개념을 제시하였다.

향후, 본 연구에서 제시한 이론식과 기본설계를 바탕으로 선박자동접안 프로그램을 개발하고, 실선을 대상으로 한 실험을 통해 이론식 및 프로그램 성능 검증과 회두 제어를 위한 이상적인 PID 이득계수를 튜닝하기 위한 후속연구를 할 계획이다.

Received : 2023. 10. 24.

Revised : 2023. 11. 28.

Accepted : 2023. 12. 29.

References

- [1] Hughes, G.(1930), Model Experiments on the Wind Resistance of Ships, Transactions of the Institute of Naval Architects, Vol. 72.
- [2] Inoue, K.(2013), Theory and Practice of Ship Handling, Sanghakdang, p. 149-197.
- [3] Jung, C. Y., G. Y. Kong, and Y. S. Lee(2008), Ship's Maneuverability & Required Number of Tug Boat in Strong Winds for the T.S. HANBADA, Journal of Navigation and Port Research, Vol. 32, No. 8, pp. 597-602.
- [4] Jung, C. Y. and T. K. Nam(2016), The Lateral Current Force Coefficient in the Real Ship Towing Test, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 22, No. 5, pp. 373-379.
- [5] Jung, C. Y., T. K. Nam and H. J. Choi(2014), A Study on the Necessary Thrust of Tugs through the Ship's Towing Test, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 20, No. 4, pp. 405-411.
- [6] KISTEP(2020), Korea Institute of S&T Evaluation and Planning, Technology Trend Brief, Vol. 6, pp. 3-6.
- [7] Lee, Y. S.(2007), A Study on the Effect of Wind Force and Moment Acting on T/S HANNARA, Journal of the Korean Navigation and Port Research, Vol. 31, No. 3, pp. 223-228.
- [8] OCIMF(2008), Mooring Equipment Guidelines 3rd Edition, Witherby Seamanship International, pp. 179-196.
- [9] Ship resistance and propulsion(2012), p. 72.