

속도형 퍼지 PID제어기의 제어증분을 이용한 선박의 DP 시스템 성능 개선

김민규¹ · 양 현² · 김종화[†]

(Received October 29, 2018 ; Revised December 13, 2018 ; Accepted January 11, 2019)

Improvement of ship's DP system performance using control increment of velocity type fuzzy PID controller

Min-Kyu Kim¹ · Hyun Yang² · Jong-Hwa Kim[†]

요약: 동적위치유지(Dynamic positioning)를 하는데 있어서 선박은 평면운동을 한다고 가정할 수 있기 때문에 6자유도 운동방정식을 3자유도 운동방정식으로 간략화 시킬 수 있으며 3자유도 운동방정식은 전진방향 운동과 조종운동의 결합으로 이루어진다. 최근 석유시추선, 해양작업선, 크레인선등과 같은 특수선박은 먼 대양으로 나가 작업을 함에 따라 환경적 외란이 인가됨에도 불구하고 정확한 위치유지는 필수적이다. 본 논문에서는 사이드 스러스터(Side thruster), 아지무스 스러스터(Azimuth thruster)와 같은 다추력장치를 가진 선박을 대상으로 무게중심에서 정확한 회전과 환경적 외란이 인가됨에도 불구하고 정해진 위치에서 벗어나지 않도록 하기 위한 제어시스템을 제안한다. 이를 실현하기 위해 정상상태에서 제어증분의 성질을 이용하고, 정상상태에서 제어증분을 추력으로 환산하기 위한 추력환산계수를 통해 다추력장치에 환산된 추력을 할당하는 방법을 논한다. 그리고 시뮬레이션을 통해 제안한 방법의 성능과 유효성을 검증한다.

주제어: 동적위치유지, 제어증분, 추력환산계수, 다추력장치, 환경적 외란

Abstract: As the ship is assumed to have a plan motion in dynamic positioning, it is possible to simplify the motion equation of 6 degrees of freedom into the motion equation of 3 degrees of freedom which is consisted of forward and rotation motion. Recently, special vessels such as petroleum drilling rig, crane ship, and ocean working ship work in distant oceans. Hence it is essential to maintain accurate position despite the occurrence of environmental disturbance. In this study, a control system is proposed that can accurately rotate at the center of gravity and does not deviate from the defined position even with environmental disturbances. to this end, the converted thrust was assigned to a multi-actuator using the thrust conversion factor and the properties of the control increment at the steady state. The effectiveness and performance of the proposed method is verified by analyzing the simulation result.

Keywords: Dynamic positioning, Control increment, Thrust conversion factor, Multi-actuator, Environmental disturbance

1. 서 론

다양한 종류와 목적을 가진 특수선이 개발됨에 따라 회두각 유지제어, 항로추종, 자동 접이안, 동적위치유지 시스템(DP 시스템)등과 같은 다양한 기능을 갖는 선박통합제어 시스템에 관한 연구가 필요하다[1]. 선박은 큰 관성력을 가지기 때문에 특히 접이안은 상당한 숙련을 요하는 작업이다. 대형선박의 경우 몇 척의 터그 보트로 선박을 밀고 당기는 과정뿐만 아니라 필요에 의해 선박 자체에 사이드 스러스터, 아지무스 스러스터, 주 프로펠러등과 같은 다추력장치를 이용하기도 한다. 또한 최근 해양에서 이루어지는

작업이 더욱 더 깊고 먼 대양으로 나아감에 따라 고정식 부유물 대신 부유식 구조물에 대한 요구가 증가하고 있어 석유시추선, 준설선, 크레인선등과 같은 부유식 해양 작업선의 DP 시스템에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다 [2]-[5]. 시시각각 변하는 해상환경에서 선박을 실시간으로 제어하지 못한다면 자칫 큰 사고로 이어질 수 있기 때문에 선박의 안정성을 확보하기 위한 DP 시스템은 필수적이다. 이처럼 선박의 목적에 따라 다양한 선박운동을 필요로 하며 이를 수행하기 위해 선박이 원하는 운동을 갖도록 제어할 수 있는 선박운동 제어시스템이 필요하다[6][7]. 선박이

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9005-0663>): Professor, Division of Ocean Science and Technology School, Korea Maritime and Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea, E-mail: kimjh@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4343

1 Ph.D candidate, Department of Convergence Study on the Ocean Science and Technology, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: mu2773@hanmail.net, Tel: 051-410-4894

2 Senior researcher, Maritime ICT R&D Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology, E-mail: yanghyun@kiost.ac.kr, Tel: 051-664-3044

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.

회전운동을 할 경우 선수측 혹은 선미측 다추력장치로 추력을 발생시켜 주는데 이때 유체 동역학적 특성으로 인해 이미 움직여진 선박의 위치변화를 보정할 수 없으며, 횡방향 속도 성분이 발생하여 선박은 무게중심에서 정확한 회전이 불가하다. 또한 실제 환경에서는 미지의 외란(파도, 바람, 해류)으로 발생하는 힘과 모멘트가 선박에 추가되어 선박은 정확한 동적위치유지를 수행하는데 한계가 있다. 본 논문에서는 미지의 외란의 영향을 제거하여 선박이 정해진 위치를 유지하도록 하기 위해 정상상태에서 제어증분의 성질을 이용한다. 제어증분은 설정된 기준입력을 만족하기 위해 생성된 속도형 피치 PID제어기의 출력으로, 기준입력의 크기 변화 및 시스템 출력의 변화에 따라 정상상태에서 오차에 비례하는 성질을 가진다. 이와 같은 성질을 이용하여 정상상태에서 제어증분을 다추력장치에 할당시켜 주기 위한 추력환산계수 K 를 구하고 환산된 추력을 다추력장치에 할당하는 DP 제어시스템을 제안한다. 제안한 시스템의 성능을 확인하기 위해 시뮬레이션을 실시하고 시뮬레이션 결과를 토대로 제안한 방법의 성능을 검증한다.

2. 선박 모델

일반적으로 선박은 강체운동 역학적 방정식과 유체 역학적 방정식의 합으로 이루어진 6자유도 운동방정식으로 표현된다. 6자유도 운동방정식은 x, y, z 축으로의 이동운동과 회전운동을 의미하며 식 (1)과 같다[8].

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + g(\eta) = \tau \quad (1)$$

여기서, 벡터 ν 는 $[u, v, w, p, q, r]^T$ 로 정의되며 순서대로 x, y, z 축의 속도와 각속도이다. 그리고 M, C, D 는 각각 관성행렬, 코리올리스행렬, 댐핑행렬, τ 는 선박이 운동을 하는데 있어서 필요한 힘과 모멘트이며 $g(\eta)$ 는 복원력과 관련된 항으로 안정한 선박일 경우 무시가 가능하다. 선박이 동적위치유지를 수행함에 있어서는 x, y 축의 이동운동과 z 축의 회전운동만 생각해도 무방하기 때문에 본 논문에서는 기본적으로 3자유도 운동방정식을 이용한다.

2.1 3자유도 운동방정식

3자유도 운동방정식은 선박의 속도 변화가 작고 횡방향 속도 v , 회두각 속도 r 이 아주 작을 경우 전진방향 속도 모델과 조종운동 모델로 분리할 수 있다.

2.1.1 전진방향 속도 모델

전진방향 속도 모델은 식 (2)와 같다.

$$(m - X_{\dot{u}})\dot{u} - X_u u - X_{|u|u}|u|u = \tau_s \quad (2)$$

여기서, τ_s 는 전진방향의 추력, m 은 선박의 질량, \dot{u} 은 전진방향의 선가속도, $X_u, X_{|u|u}$ 는 유체력 미계수이다.

2.1.2 조종운동 모델

조종운동 모델은 2자유도로 구성되며 식 (3)과 같다. 식 (1)과 구분하기 위해 아래첨자 2를 추가한다.

$$M_2\dot{\nu} + C_2(\nu)\nu + D_2\nu = \tau_2 \quad (3)$$

여기서, 벡터 $\nu = [v, r]^T$ 이며 $M_2, C_2(\nu), D_2$ 는 식 (4)와 같고 선박이 조타기 한 개에 의해 제어된다면 τ_2 는 식 (5)와 같다.

$$M_2 = \begin{bmatrix} m - Y_v & mx_G - Y_r \\ mx_G - Y_r & I_z - N_r \end{bmatrix}$$

$$C_2(\nu) = \begin{bmatrix} 0 & (m - X_u)u \\ (X_u - Y_v)u & (mx_G - Y_r)u \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$D_2 = \begin{bmatrix} -Y_v - Y_r \\ -N_v - N_r \end{bmatrix}$$

$$\tau_2 = \begin{bmatrix} -Y_\delta \\ -N_\delta \end{bmatrix} \delta \quad (5)$$

여기서, m, x_G 는 선박의 질량과 무게중심, I_z 는 z 축에 대한 회전 관성모멘트, δ 는 조타각을 의미하고 $Y_v, Y_r, N_v, Y_v, Y_r, N_r, N_\delta$ 은 유체력 미계수이다.

2.2 CPP 모델

선박이 동적위치유지를 수행하기 위해 주로 사용되는 프로펠러는 피치를 조절할 수 있는 CPP(controllable-pitch propeller)이며, CPP의 추력 방정식은 식 (6)과 같다[9].

$$F(n, p) = K(n)|(p - p_0)|(p - p_0) \quad (6)$$

여기서, F 는 추력, $K(n)$ 은 추력계수를 나타내는 대각행렬로 프로펠러 회전에 의해 결정된다. p 는 피치 비율이며 $p = P/D$ 와 같다. p_0 는 피치 비율의 오프셋으로 $p = p_0$ 일 때 추력이 0일 경우 정의된다. P 는 프로펠러 한번 회전당 이동하는 거리, D 는 프로펠러의 반지름을 의미한다.

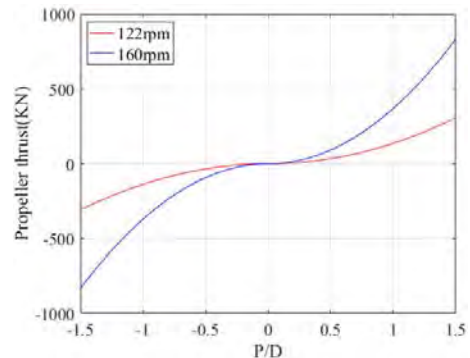


Figure 1: Propeller thrust due to pitch change

Figure 1은 rpm이 160인 경우와 122인 경우 피치 변화에 따른 CPP 프로펠러의 추력을 나타낸 시뮬레이션 결과이다. 피치비율의 변화에 따라 프로펠러 추력이 달라지는 것을 알 수 있다.

3. DP 시스템 모델

본 논문에서 동적위치유지를 수행하기 위해 선박에 장착된 다추력장치의 위치는 Figure 2와 같다. 선수, 선미측에 각각 1개의 사이드 스러스터와 아지무스 스러스터를 장착하고 추진을 위한 주 프로펠러를 선미 끝단에 좌우 대칭으로 2대 장착하여 총 6개의 다추력장치를 사용한다.

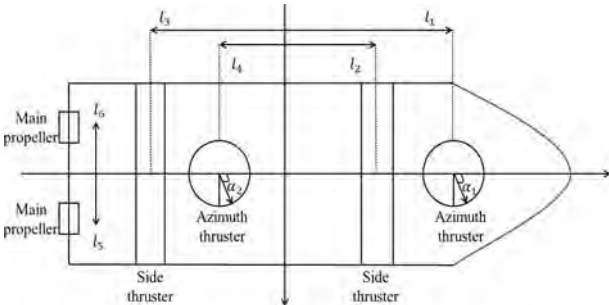


Figure 2: Thrust configuration for a ship

3.1 다추력장치의 방정식

Figure 2와 같이 선박에 장착된 다추력장치에 의해 선박이 받는 힘과 모멘트를 식으로 나타내면 식 (7)과 같다[10].

$$\tau = T(\alpha)Kp \quad (7)$$

여기서, $T(\alpha)$ 는 다추력장치의 configuration 행렬로 다추력장치에서 발생된 추력을 선박좌표계 기준에서 x, y 축에 대한 힘과 z 축에 대한 모멘트로 변환시켜주며 식 (8)의 3×6 행렬과 같다. K 는 스러스터 계수 행렬로 대각행렬로 이루어지며 p 는 동적위치유지를 수행하기 위한 제어 입력으로 피치, τ 는 최종적으로 다추력장치에서 발생한 추력이 실제 선박에 영향을 주는 힘과 모멘트로 변환된 값이다. 식 (7)을 수식을 표현하면 식 (8)과 같다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_1) & 0 & \cos(\alpha_2) & 0 & 1 & 1 \\ \sin(\alpha_1) & 1 & \sin(\alpha_2) & 1 & 0 & 0 \\ l_1 \sin(\alpha_1) & l_2 - l_3 \sin(\alpha_2) & -l_4 - l_5 & l_6 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} K_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서, $l_i (i=1, \dots, 6)$ 은 모멘트 팔로서 선박의 무게 중심에서 각각의 다추력장치까지의 거리이고, α_1, α_2 는 선수측과

선미측에 부착된 아지무스 스러스터의 각도를 의미하며 X, Y, N 은 τ 의 성분으로써 다추력장치에 의해 발생된 추력을 실제 선박이 영향을 받는 x, y 축에 대한 힘과 z 축에 대한 모멘트로 변환시킨 값이다.

3.2 다추력장치와 선박모델의 결합

식 (7)을 2.1절에서 기술한 선박의 3자유도 방정식에 결합하면 식 (9)와 같다[10]. 선박이 동적위치유지를 수행함에 있어서는 선박의 속도의 변화가 매우 작다고 가정할 수 있기 때문에 3자유도 방정식에서 코리올리스항 $C_2(\nu)\nu$ 는 무시하였다.

$$M\dot{\nu} + D\nu = \tau \quad (9)$$

$$\dot{\tau} = A_{thr}(\tau - \tau_{com})$$

여기서, $A_{thr} = -diag[1/T_{surge}, 1/T_{sway}, 1/T_{yaw}]$ 와 같은 시정수를 포함하는 대각행렬이며 τ_{com} 은 기준 스러스터를 의미한다. 한편 지구 고정좌표계 기준에서 선박의 위치와 회두각은 선박의 속도와 회두각속도를 이용해 식 (10)과 같이 표현 가능하다.

$$\dot{\eta} = R(\psi)\nu \quad (10)$$

여기서, $\dot{\eta} = [\dot{x}, \dot{y}, \dot{\psi}]$ 로 정의되고, $R(\psi)$ 는 z 축을 기준으로 하는 회전행렬로 식 (11)과 같다.

$$R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

식 (9), 식 (10)을 결합하여 상태공간 방정식으로 표현하면 식 (12)와 같고 이 상태공간 방정식은 본 논문에서 사용하는 기본 모델이다.

$$\dot{x} = Ax + B\tau_{com} \quad (12)$$

여기서, 상태벡터 $x = [\eta, \nu, \tau]^T$ 로 이루어지며 A, B 는 식 (13)과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & R(\psi) & 0 \\ 0 & -M^{-1}D & M^{-1} \\ 0 & 0 & A_{thr} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ A_{thr} \end{bmatrix}$$

4. 동적위치유지를 위한 피지 PID 기반 제어시스템

선박이 정확한 동적위치유지를 하기 위해서 선박은 무게 중심에서 정확한 회전이 필수적이다. 그러나 선박이 회전운

동을 할 때 유체 동역학적 특성으로 인해 선박의 무게중심의 위치가 움직이게 되고 횡방향으로 속도성분이 생겨 무게중심에서 정확한 회전이 불가능하다. 또한 환경적 외란이 인가된다면 선박은 정확한 동적위치유지를 수행할 수 없고 위치에서 벗어나게 된다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 4장에서는 속도형 퍼지 PID제어기의 구조와 출력인 제어증분에 대해 설명하고[11][12] 제어증분을 추력으로 환산하기 위한 추력환산계수 산정방법을 논한다. Figure 3은 속도형 퍼지 PID제어기의 알고리즘으로 입력으로 속도 오차 vel_e , 속도 오차의 속도 vel_r , 속도 오차의 가속도 vel_a 를 이용하여 출력으로 $\Delta vel'$ 을 생성한다. 속도형 퍼지 PID제어기는 퍼지화기와 서로 다른 두 개의 퍼지제어 블록으로 이루어지며 퍼지제어 블록은 퍼지제어 규칙, 비퍼지화기로 구성된다. GE, GR, GA 는 각각 $vel_e^*, vel_r^*, vel_a^*$ 의 퍼지화 스케일 파라미터이고, GU 는 출력 $\Delta vel'$ 의 스케일 파라미터이다. 비퍼지화 알고리즘으로는 무게중심법을 사용하였으며 비퍼지화를 통해 최종적으로 제어증분 $\Delta vel'$ 이 생성되며 $\Delta vel'$ 은 식 (14)와 같다.

$$\Delta vel' = K_i vel_e + K_p vel_r + K_d vel_a \quad (14)$$

여기서, K_i, K_p, K_d 는 적분이득, 비례이득, 미분이득이다.

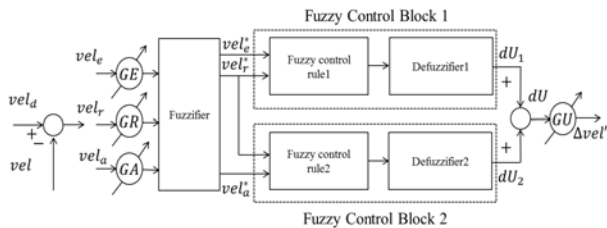


Figure 3: Functional diagram of a velocity type fuzzy PID controller

4.1 속도형 퍼지 PID제어기 제어증분의 성질

정상상태에서 제어증분의 성질을 알아보기 위해서 식 (13)과 같은 DP 시스템 모델에서 선박의 전진방향 속도인 u 를 이용하여 시뮬레이션을 실시하였다.

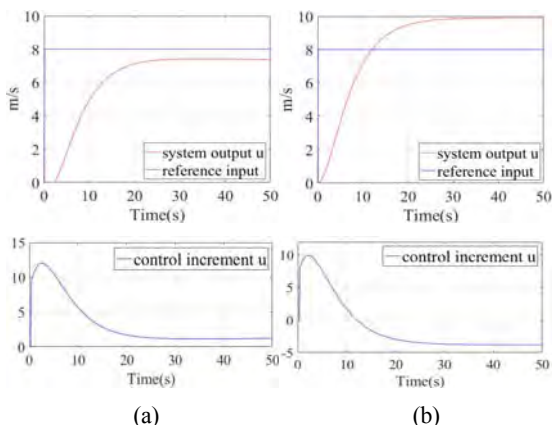


Figure 4: Control increment according to system output

Figure 4의 a와 b는 기준입력을 $8m/s$ 로 설정해 두고 시스템 출력 u 의 크기 변화에 따른 제어증분의 크기를 비교한 시뮬레이션 결과이다. 시스템 출력의 크기가 크면 클수록 정상상태에서 제어증분의 크기도 크게 나오며 작으면 작을수록 정상상태에서 제어증분의 크기가 작게 나올 수 있다. 결론적으로 시스템 출력 u 의 크기 변화에 따라 정상상태에서 제어증분의 크기는 이에 비례하는 성질을 가짐을 확인할 수 있다. 이와 같은 성질을 활용하여 퍼지 PID 기반 제어시스템의 제어증분을 추력으로 환산하기 위한 추력환산계수 K 산정에 이용하고자 한다.

4.2 동적위치유지를 위한 제어시스템

Figure 5는 선박이 정확한 동적위치유지를 수행할 수 있도록 제어증분을 활용한 제어시스템의 구조이다.

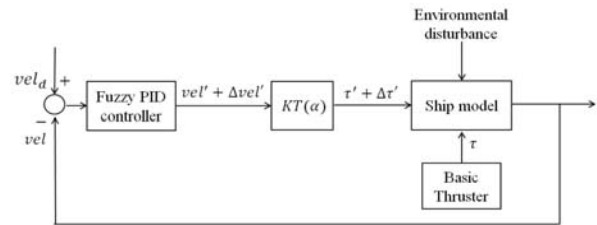


Figure 5: Control structure for DP system

여기서, Basic Thruster는 선박이 기본적으로 회전하고 전진 방향 운동을 하는데 사용되는 다추력장치로 다추력장치에 의해 발생된 힘과 모멘트 τ 를 선박에 전달한다. Environmental disturbance는 환경적 외란으로 파도, 바람, 해류이며 선박운동을 방해하는 요소로 작용한다. 회전운동을 할 경우 선박은 유체 동역학적 특성으로 횡방향 속도가 발생하여 무게중심에서 정확한 회전이 불가능하기 때문에 횡방향 속도를 0으로 만들어 주어야 한다. 따라서 횡방향 속도의 기준입력 값 vel_d 는 0으로 선정한다. 그리고 전진방향 운동을 할 경우에는 선박이 설정된 속도로 운동할 수 있도록 하기 위해 전진방향 속도의 기준입력 값을 설정된 전진방향 속도로 선정한다. 환경적 외란이 인가되지 않으면 퍼지 PID제어기는 정상상태에서 기준입력 값을 만족하기 때문에 오차, 오차의 속도, 오차의 가속도인 vel_e, vel_r, vel_a 은 0으로 수렴하여 $\Delta vel'$ 이 0으로 수렴한다. 그러나 환경적 외란이 인가된다면 정상상태에서 오차의 속도, 오차의 가속도 성분인 vel_r, vel_a 는 0으로 수렴하지만 오차인 vel_e 가 발생하여 식 (15)와 같은 제어증분이 발생한다.

$$\Delta vel' = K_i vel_e \quad (15)$$

본 논문에서는 회전운동을 개선시키고 환경적 외란의 영향을 제거시켜 주기 위해 정상상태에서 $\Delta vel'$ 을 이용하기 때문에 $\Delta vel'$ 을 추력으로 환산시켜 줄 필요가 있다. 이때 K 는 $\Delta vel'$ 을 추력으로 환산시켜주는 추력환산계수를 의미하며 식 (16)으로 정의된다. 여기서, $Thrust_x$ 는 기준입력이 xm/s 일

경우의 선박의 추력이고, $Thrust_y$ 는 시스템 출력이 gm/s 일 경우의 추력을 의미하며 정상상태의 제어증분을 vel_x 라 한다.

$$K = \frac{Thrust_x - Thrust_y}{vel_x} \quad (16)$$

K 값이 선정되면 식 (17)과 같이 $KT(\alpha)$ 에 $\Delta vel'$ 을 곱해 주면 선박이 회전운동을 할 때 발생하는 횡방향 속도와 미지의 외란으로 선박에 추가되는 속도를 제거시켜주는 힘과 모멘트 $\Delta \tau'$ 을 생성할 수 있다.

$$\Delta \tau' = KT(\alpha) \Delta vel' \quad (17)$$

그리고 기본적으로 vel' 과 τ' 을 이용하여 선박의 속도를 기준입력까지 빠른 상승시간을 가질 수 있도록 성능을 개선시켜 주는 퍼지 PID제어기를 적용하였다.

5. 시뮬레이션

5.1 선박의 회전운동

5.1절에서는 속도형 퍼지 PID제어기의 제어증분을 이용하여 생성된 $\Delta \tau'$ 이 선박의 회전운동을 개선시킬 수 있는지 검증한다. 기본적으로 회전을 수행하기 위해 선수측 사이드 스텐더를 이용하고 선미측 사이드 스텐더를 이용하여 회전운동을 개선시킨다. 시뮬레이션에 사용된 선박의 제원은 Table 1과 같다.

Table 1: Specification of a ship

$L(m)$	171.8
$L_{pp}(m)$	160.93
$\nabla(m^3)$	18541
$B(m)$	23.17
$Draft(m)$	8.23

여기서, L 는 선박의 길이, L_{pp} 는 수선간장, ∇ 는 재화중량, B 는 선박의 폭, $Draft$ 는 흘수이다. Figure 6은 선수측 사이드 스텐더에만 추력을 준 경우 선박의 회전운동과 선박의 횡방향 속도를 나타낸 시뮬레이션 결과이다. 회전운동을 함에 있어서 유체 동역학적 특성으로 인해 선박의 무게중심의 위치가 변하고, 횡방향으로도 속도가 발생하여 선박은 무게중심에서 정확한 회전이 불가능함을 알 수 있다.

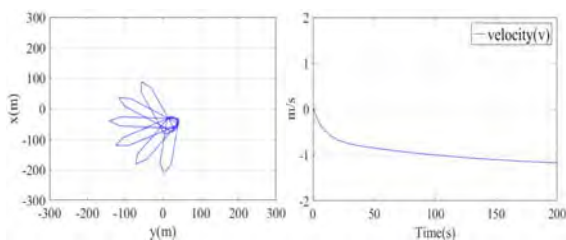


Figure 6: Rotation motion and velocity v of ship

선박이 무게중심에서 정확한 회전이 가능하도록 하기 위해 횡방향 속도 v 의 제거는 필수적이다. v 를 제거하기 위해 4장에서 설명한 속도형 퍼지 PID제어기의 제어증분을 이용한다. 횡방향 속도 성분을 제거하는 것이 목적이기 때문에 횡방향 속도의 기준입력을 $0m/s$ 로 선정한 상태에서 속도형 퍼지 PID제어기의 출력인 제어증분을 이용하고 제어증분은 Figure 7과 같이 생성된다. Figure 6에서 횡방향 속도가 음으로 나타났기 때문에 이를 $0m/s$ 로 만들어주기 위해서 제어증분이 양으로 생성됨을 알 수 있다.

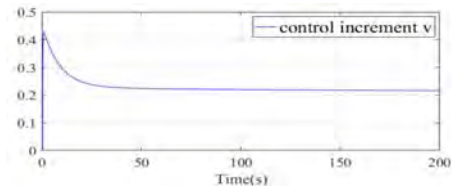


Figure 7: Control increment v

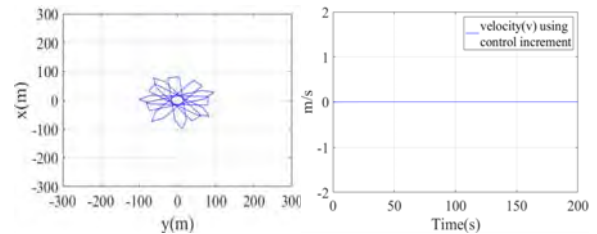


Figure 8: Rotation motion and velocity v of ship

Figure 8은 선박의 회전을 위해 선미측 사이드 스텐더에 추력을 준 상태에서 무게중심에서 정확한 회전이 가능하도록 선미측 사이드 스텐더에 추력을 할당한 경우 선박의 회전운동과 횡방향 속도 v 를 나타낸 시뮬레이션 결과이다. 선미측 사이드 스텐더에서 제어증분에 비례한 추력이 생성되어 선박은 횡방향 속도가 발생하지 않고 무게중심 기준에서 정확한 회전이 가능함을 알 수 있다.

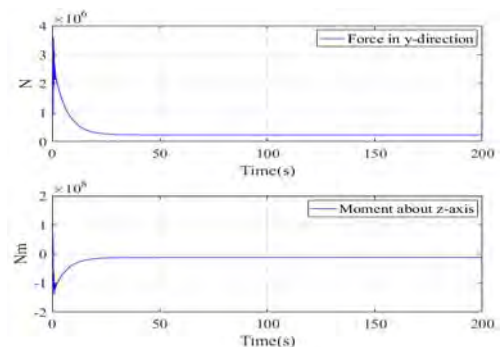


Figure 9: Force and moment about $\Delta \tau'$

Figure 9는 선미측 사이드 스텐더에서 발생된 추력을 실제 선박이 영향을 받는 힘과 모멘트로 변환시킨 $\Delta \tau'$ 을 나타낸 시뮬레이션 결과이다. $\Delta \tau'$ 이 회전운동을 할 때 발생된 횡방향 속도를 제거시켜 주어 무게중심에서 정확한 회전이 가능함을 알 수 있다.

5.2 환경적 외란의 영향을 받는 선박의 동적위치유지

최근 해양에서 이루어지는 작업이 더욱 더 깊고 먼 대양으로 나아감에 따라 고정식 부유물 대신 부유식 구조물에 대한 요구가 증가하고 있어 부유식 해양 작업선의 DP 시스템에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이렇듯 선박이 먼 대양으로 나가게 된다면 환경적 외란의 영향을 무시할 수 없다. 5.2절에서는 선박이 작업하는 실제 상황과 유사한 환경을 만들어주기 위해 선박에 환경적 외란을 인가시켜 준다. 그리고 환경적 외란의 영향을 제거시켜 주기위해 **Figure 3**으로 이루어진 속도형 퍼지 PID제어기에서 정상상태의 제어증분을 이용하고, 다추력장치에 제어증분에 비례하는 추력을 할당한다. 그리고 할당된 추력이 환경적 외란의 영향을 감소시켜 선박이 정확한 동적위치유지를 수행할 수 있는지 검증한다. 선박에 인가되는 환경적 외란은 대표적인 3가지 해류, 파도, 바람을 이용하였다. 1차 Gauss-Markov 프로세스를 사용하여 해류를 생성하였으며, 파도는 PM(Perison-Moskowitz) 스펙트럼 밀도 함수를 상태공간으로 표현하여 생성하였다. 마지막으로 바람은 바람의 힘과 모멘트에 대한 계수, 바람의 속도, 각도 등을 이용하여 바람의 힘과 모멘트를 계산하는 Isherwood가 제안한 방법을 사용하였다. 환경적 외란을 생성하는 자세한 내용은 참조문헌 [13]-[15]에 상세히 기술되어 있다. 시뮬레이션은 **Table 1**과 같은 선박을 대상으로 하였으며 환경적 외란의 힘과 모멘트는 시간에 따라 선박에 영향을 미치는 방향이 변하는 경우로 설정하였고, 시간에 따른 방향은 **Table 2**와 같은 조건을 가진다. 그리고 **Table 3**은 해류, 파도, 바람의 조건을 의미한다. 그리고 선박이 회두각을 유지할 수 있도록 식 (18)과 같은 PD형 오토파일럿 시스템을 적용한다[16].

$$\delta = -K_p(\psi_d - \psi) + K_d r \tag{18}$$

여기서, $K_p = 1$, $K_d = 70$ 으로 최적 설정하여 기준 회두각 ψ_d 를 유지하도록 하였다.

Table 2: The direction of environmental disturbances on the ship over time

Time (sec)	Direction (deg)
$0 \leq t \leq 400$	30
$400 < t \leq 1400$	-30
$1400 < t \leq 2000$	60

시뮬레이션은 선박이 정지된 상태 즉 u, v, r 이 0인 상태에서 시작하고 그 후 선박은 회전운동을 하며 회두각이 60° 가 되면 회전을 멈추고 지구고정좌표계 기준에서 y 축이 $-500m$ 가 될 때까지 $1m/s$ 로 전진방향 운동을 한다. 그리고 $-500m$ 가 되면 전진방향 운동을 멈추고 정지한 뒤 회두각이 0° 가 될 때 까지 다시 회전운동을 한다. 마지막

Table 3: The conditions of environmental disturbances

current direction (deg)	Table 2
current average speed (m/s)	0.3
wind speed (knot)	10
wind direction (deg)	Table 2
wave direction (deg)	Table 2
wave period (s)	5.23
wave amplitude (m)	0.26

으로 $1m/s$ 로 전진방향 운동을 하다가 $(-500, 1400)$ 지점이 되면 정지를 하는 조건으로 하였다. 선박이 회전운동을 할 경우 PD형 오토파일럿은 사용하지 않고, 회전이 끝난 뒤 선박이 전진방향 운동을 할 경우에는 선박이 회두각을 유지할 수 있도록 식 (18)로 이루어진 PD형 오토파일럿을 이용한다. 환경적 외란의 영향으로 선박에 추가되는 u, v 를 제거하기위해 사용되는 다추력장치는 **Table 4**와 같고 회전운동과 전진방향운동을 할 경우 마다 각각 다른 다추력장치를 사용하여 환경적 외란의 영향을 제거시킨다.

Table 4: Used multi-actuator to eliminate the effect of unknown disturbance

rotation motion	used multi-actuator to eliminate u and v	
	u	two main propeller
	v	aft side thruster
forward direction motion	used multi-actuator to eliminate u and v	
	u	fore azimuth thruster
	v	aft azimuth thruster

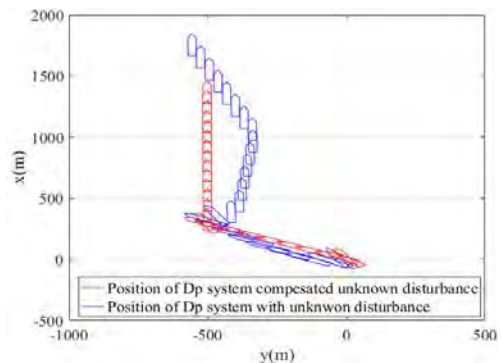


Figure 10: Comparison of DP system's positions between compensated and with unknown disturbance

Figure 10 ~ Figure 12는 환경적 외란이 인가된 경우와 환경적 외란의 영향을 Δr 으로 보상시켜준 경우 선박의 위치와 속도를 비교한 시뮬레이션 결과이다. 그리고 $t = 0$ 인 지점에서 선박은 둘 다 무게중심이 $(0, 0)$ 으로 동일한 위치이며, 80초 간격으로 선박의 위치를 나타내었다. 환경적 외란이 인가된 경우 선박에 횡방향, 전진방향으로 속도성분

이 추가되어 선박은 무게중심에서 정확한 회전이 불가할 뿐만 아니라 설정된 위치에서 벗어나게 된다. 그러나 $\Delta\tau'$ 으로 보상시켜준 경우 환경적 외란으로 u, v 추가되는 속도성분이 제거되어 무게중심에서 정확한 회전이 가능하며 선박이 정해진 위치에서도 크게 벗어나지 않고 운항할 수 있음을 알 수 있다.

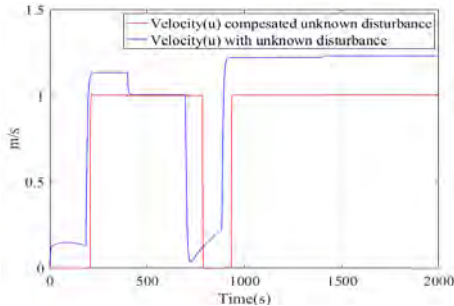


Figure 11: Comparison of velocities u between compensated and with unknown disturbance

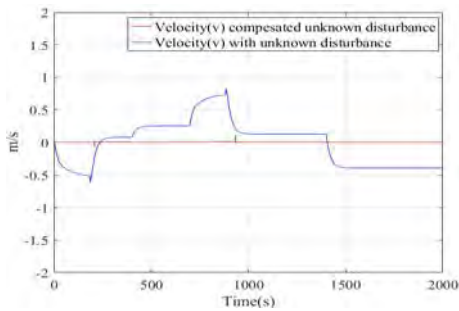


Figure 12: Comparison of velocities v between compensated and with unknown disturbance

선박이 전진방향 운동을 할 경우에는 u, v 에 대한 기준 입력은 $1m/s, 0m/s$ 로 설정하고, 회전운동을 할 경우에는 u, v 에 대한 기준입력을 각각 $0m/s$ 로 설정한 상태에서 생성된 제어증분 $\Delta vel'$ 은 Figure 13과 같다.

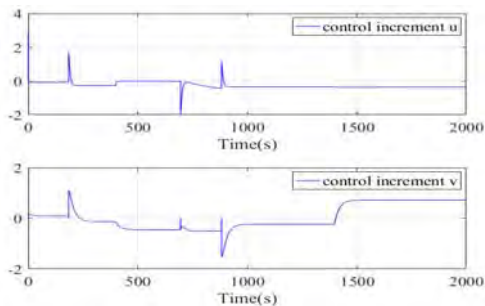


Figure 13: Control increments for u and for v

$\Delta vel'$ 은 외란으로 인해 발생하는 속도의 변화에 따라 정상상태에서 크기가 비례하며 생성되는 것을 알 수 있고, 이는 $\Delta\tau'$ 을 생성하는데 사용된다. Figure 14는 Table 4의 조건에 부합하는 다추력장치에 할당된 추력으로 인해 생성된 $\Delta\tau'$

즉 x, y 축에 대한 힘과 z 축에 대한 모멘트를 나타낸 시뮬레이션 결과이다. Figure 14와 같은 힘과 모멘트가 선박에 추가되었기 때문에 환경적 외란의 영향을 제거시켜 줄 수 있다.

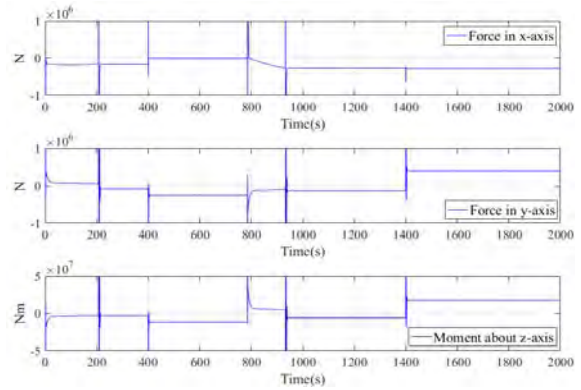


Figure 14: Forces and moment about $\Delta\tau'$

Figure 15는 회두각을 나타낸 시뮬레이션으로 PD형 오토 파일럿으로 인해 설정된 기준 회두각인 60° 와 0° 를 유지할 수 있는 것을 알 수 있다.

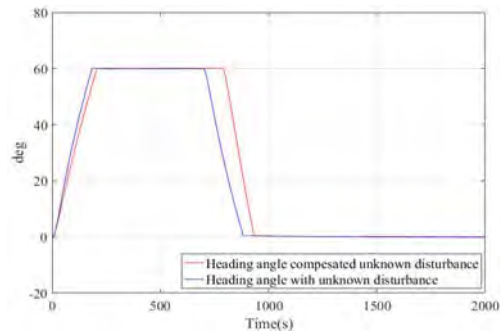


Figure 15: Comparison of heading angles between compensated and with unknown disturbance

6. 결론

본 논문에서는 총 6개의 다추력장치가 장착된 선박을 대상으로 환경적 외란이 인가되더라도 불구하고 선박이 정확한 동적위치유지를 수행할 수 있도록 제어증분을 이용한 제어 시스템을 제안하였다. 선박이 동적위치유지를 함에 있어서 가장 중요한 점은 선박이 정해진 위치에서 벗어나지 않게 하는 것이다. 따라서 무게중심에서 정확한 회전은 필수적이며 또한 먼 대양에서는 환경적 외란의 영향을 무시할 수 없기 때문에 환경적 외란의 영향을 선박에 설치된 다추력장치를 이용해 제거시켜 주어야한다. 이를 수행하기 위해 본 논문에서는 속도형 퍼지 PID제어기의 출력인 제어증분을 이용한다. 그리고 정상상태에서 제어증분을 추력으로 환산시켜 주는 추력환산계수 K 를 구하고 환산된 추력을 다추력장치에 할당하여 환경적 외란의 영향을 제거시켜 주는 $\Delta\tau'$ 을 생성한다. 시뮬레이션을 통해 환경적 외란의 방향이 시간에 따라 변함에도 불구하고 선박이 무게중심에서

정확한 회전이 가능함을 알 수 있고 또한 설정된 전진방향 속도를 유지함과 동시에 횡방향 속도가 발생되지 않아 선박이 정해진 위치에서 크게 벗어나지 않고 운동할 수 있는 가능성을 확인하였다.

Author Contributions

The following statements should be used “Methodology, M. K. Kim and J. H. Kim; Programming, M. K. Kim; Validation, M. K. Kim and H. Yang; Formal Analysis, M. K. Kim and J. H. Kim; Investigation, H. Yang; Writing–Original Draft Preparation, M. K. Kim; Writing–Review & Editing, M. K. Kim; Visualization, J. H. Kim; Supervision, M. K. Kim; Project Administration, J. H. Kim.”

References

[1] J. E. Woo and J. H. Kim, “A study on translational motion control in integrated control system for ship steering motion,” *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 39, no. 1, pp. 32-44, 2015 (in Korean).

[2] D. H. Kim, J. Y. Park, S. H. Hong, and N. W. Kim, “Dynamic position control of a marine particle using backstepping control technique,” *Proceedings of the KAOSTS Conference*, pp. 864-869, 2012 (in Korean).

[3] Y. B. Kim, “Dynamic positioning control system design for surface vessel: Observer design based on H control approach,” *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, vol. 36, no. 10, pp. 1171-1179, 2012 (in Korean).

[4] Y. B. Kim and J. S. Jang, “Nonlinear observer design for dynamic positioning control of a surface vessel,” *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, vol. 16, no. 6, pp. 79-85, 2012 (in Korean).

[5] Y. Wang, Y. Sui, J. Wu, and J. Jiao, “Research on nonlinear model predictive control technology for ship dynamic positioning system,” *Proceeding of IEEE International Conference on Automation and Logistics*, pp. 348-351, 2012.

[6] S. H. Park and J. H. Kim, “A study on rotational motion control for ship steering motion control,” *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 40, no. 2, pp. 120-130, 2016.

[7] B. H. Choi, A Study on the Integrated Control of Ship Motion Based on Joystick Control, M.S. Dissertation, Department of Control and Instrumentation Engineering, Korea Maritime

University, Korea, 2011.

[8] T. I. Fossen, *Marine Control Systems*, Trondheim, Norway: Marine Cybernetics, 2001.

[9] T. I. Fossen, *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*, Sussex, England: John Willy & Sons Ltd, 2011.

[10] T. I. Fossen, *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, Sussex, England: John Willy & Sons Ltd, 2011.

[11] J. H. Kim and S. J. Oh, “A fuzzy PID controller for nonlinear and uncertain systems,” *Journal of the Soft Computing*, vol. 4, no. 2, pp. 123-129, 2000.

[12] B. K. Lee, I. H. Kim, and J. H. Kim, “A study on the nonlinear fuzzy PID controller with variable parameters,” *Journal of the Fuzzy Logic and Intelligent System*, vol. 15, no. 2, pp. 127-134, 2005 (in Korean).

[13] O. M. Faltinsen, *Sea Loads on Ship and Offshore Structures*, New York, USA: Cambridge University Press, 1990.

[14] M. K. Kim, J. H. Kim, and J. K. Choi, “A fuzzy PID autopilot and path following using fuzzy disturbance estimator for a ship,” *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 42 no. 1, pp. 49-57, 2018 (in Korean).

[15] K. D. Do and J. Pan, *Control of Ships and Underwater Vehicles*, Australia: Springer, 2009.

[16] M. K. Kim, J. H. Kim, and J. K. Choi, “Performance improvement on path following of ship using unknown disturbance estimation,” *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 42 no. 1, pp. 31-40, 2018 (in Korean).