

선체운동 예측을 이용한 Dynamic Positioning System의 피드포워드 제어 알고리즘에 관한 연구

송순석* · 김상현**† · 김희수** · 전마로**

*, ** 인하대학교 조선해양공학과

A Study on the Feedforward Control Algorithm for Dynamic Positioning System Using Ship Motion Prediction

Soon-Seok Song* · Sang-Hyun Kim**† · Hee-Su Kim** · Ma-Ro Jeon**

*, ** Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

요 약 : 본 연구의 목적은 가까운 미래의 선박운동정보를 이용하는 피드포워드 제어알고리즘과 FPSO 운동 수치 시뮬레이션 모델을 개발하고 시뮬레이션을 통하여 제어알고리즘의 성능을 검증하는 것이다. 본 논문에서는 조류, 바람, 파력 등의 환경하중에 의하여 발생한 선체운동의 미래 예측치를 활용한 피드포워드 제어력을 추가적으로 가지는 Dynamic Positioning System에 대하여 연구한다. 먼저, 조류력, 풍력 및 파력에 대한 수학모델을 선정하여 환경하중에서의 선체운동을 계산하고, 현재의 선체운동 값과 Brown 지수평활 예측모형을 활용하여 미래 선체운동 값을 예측하였다. 또한 위치 유지와 Heading angle 제어를 위한 제어력을 PID(Proportional-Integral-Derivative)이론을 이용하여 결정한 피드백 제어기와 미래 선체운동 값을 이용하여 결정한 피드포워드 제어기로 구성하였다. 그리고 각 Thruster에 요구되는 추력은 라그랑지승수법을 활용하여 분배하였다. 마지막으로 FPSO(Floating Production Storage and Offloading)의 운동과 Dynamic Positioning System에 대한 시뮬레이션 모델을 구축하여 선박의 위치 및 Heading angle 제어에 관한 시뮬레이션을 수행하여 제안하는 피드백 제어기와 피드포워드 제어기를 동시에 가지는 제어시스템의 성능을 평가하였다. 본 연구의 결과, 피드백 및 피드 포워드 제어기가 적용된 DPS 제어시스템이 기존의 피드백 제어기보다 위치유지 및 헤딩각 유지 능력에서 개선되었고 각 Thruster에 요구되는 평균 제어력 및 최대 제어력의 크기 감소함을 보였다. 이에 따라 DPS에 요구되는 동력 감축과 Azimuth Thruster 용량의 감소로 인하여 비용 절감의 효과를 기대할 수 있다.

핵심용어 : 동적위치유지 시스템, 지수평활 예측모형, 피드백 제어, 피드포워드 제어, 추력 분배

Abstract : In the present study we verified performance of feed-forward control algorithm using short term prediction of ship motion information by taking advantage of developed numerical simulation model of FPSO motion. Up until now, various studies have been conducted about thrust control and allocation for dynamic positioning systems maintaining positions of ships or marine structures in diverse sea environmental conditions. In the existing studies, however, the dynamic positioning systems consist of only feedback control gains using a motion of vessel derived from environmental loads such as current, wind and wave. This study addresses dynamic positioning systems which have feedforward control gain derived from forecasted value of a motion of vessel occurred by current, wind and wave force. In this study, the future motion of vessel is forecasted via Brown's Exponential Smoothing after calculating the vessel motion via a selected mathematical model, and the control force for maintaining the position and heading angle of a vessel is decided by the feedback controller and the feedforward controller using PID theory and forecasted vessel motion respectively. For the allocation of thrusts, the Lagrange Multiplier Method is exploited. By constructing a simulation code for a dynamic positioning system of FPSO, the performance of feedforward control system which has feedback controller and feedforward controller was assessed. According to the result of this study, in case of using feedforward control system, it shows smaller maximum thrust power than using conventional feedback control system.

Key Words : Dynamic positioning system, Exponential smoothing forecasting model, Feedback control, Feedforward control, Thruster allocation

* First Author : sssong0409@nate.com, +447490391709

† Corresponding Author : kimsh@inha.ac.kr, 032-860-7344

1. 서론

최근 에너지 수요 증가에 따라 더욱 깊은 해역에서의 해양 에너지 개발에 대한 관심이 증대하고 있으나 Jack-up Rig, 계류 고정식 해양플랜트 등은 수심의 제한이 있다. 따라서 대수심에서의 해양에너지 자원 개발을 위하여 Dynamic Positioning System(이하 DPS)를 탑재한 Drill ship 및 FPSO의 건조가 증대하고 있다.

DPS란 목표로 하는 선박의 위치와 heading각을 유지하기 위해 Azimuth Thruster 등의 추력장치를 통해 선박을 제어하는 시스템이다. 일반적인 DPS는 피드백 신호를 기반으로 제어력을 결정하는 피드백 제어기와 현재의 하중정보를 이용하는 Wind Feedforward, Current Feedforward 제어기가 있다. 현재의 하중정보를 이용하는 피드포워드 제어기의 경우 피드백 제어기에 비해 보다 좋은 제어성능을 보인다.

국외에서는 Dynamic Positioning System의 설계와 수치 및 실험적 평가에 관한 연구 등이 활발히 이루어져 DPS 제품화에 활용되었으며 최근에는 극점 배치 및 슬라이딩 모드를 이용한 제어시스템 설계와 DPS 안전성에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다(Mahfouz and El-Tahan, 2006; Tannuri et al., 2010).

국내에서는 Drill ship 모형을 이용하여 DPS의 위치유지 성능을 평가하는 모형시험 기법 개발, DPS에 장착된 Thruster의 설계 변수 변화에 따른 위치유지 성능 평가, 반잠수식 해양구조물의 동위치 제어 실험 등과 같이 제어기 설계보다는 모형 시험을 기반으로 하는 DPS의 위치유지 성능 평가에 관한 연구가 이루어졌다(Kim et al., 1995; Lee and Ha, 2001; Choi et al., 2012).

DPS의 성능을 결정하는 구성요소로는 일반적으로 칼만 필터, PID 제어기, 추력분배 알고리즘이 있다. 칼만 필터는 불필요한 제어력을 억제하기 위해 고주파수의 거동을 필터링 하여 저주파수의 위치 및 속도의 신호만으로 제어력을 결정하기 위해 이용된다. 추력분배 알고리즘은 DPS가 적용된 일반적인 선박의 경우 필요한 제어력의 조건을 만족하는 수많은 추력기의 출력 중 최적의 추력분배를 위해 사용된다.

본 논문에서는 현재의 위치 및 heading각 정보를 이용하는 피드백 제어기와 미래의 위치 및 heading각 예측값을 이용한 피드포워드 제어기가 결합된 DPS 제어시스템에 대하여 고찰한다. 본 연구에서는 미래의 선박 운동 정보를 예측하고 이를 이용함으로써 time lag의 영향을 줄여 DPS 제어시스템의 효율을 높이고 급격한 추력발생을 억제할 수 있는 피드포워드 제어 기법을 제안한다.

본 연구의 목적은 가까운 미래의 선박운동정보를 이용하

는 피드포워드 제어알고리즘과 FPSO 운동 수치 시뮬레이션 모델을 개발하고 시뮬레이션을 통하여 제어알고리즘의 성능을 검증하는 것이다.

2. 제어대상 및 운동방정식

2.1 제어대상

본 연구의 대상선박은 Table 1과 같은 주요 제원을 갖는 FPSO이다.

Table 1. Principal dimensions of ship

Item	Principal dimensions
L	200m
B	44m
T	12m
Δ	100410 ton

2.2 운동방정식

본 연구에서는 선박의 수평면 운동 Surge, Sway, Yaw를 제어 대상으로 하였으며 이들 3자유도 운동은 다음 식과 같이 나타낼 수 있으며 좌표계는 Fig. 1과 같이 정의된다(Fossen, 2011b).

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu = \tau_{RB} \quad (1)$$

$$M = M_{RB} + M_A \quad (2)$$

$$C(\nu) = C_{RB}(\nu) + C_A(\nu) \quad (3)$$

$$\dot{\eta} = J_{\Theta}(\eta)\nu \quad (4)$$

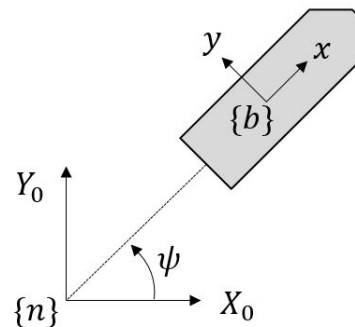


Fig. 1. Earth-fixed coordination and body-fixed coordination.

Fig. 1은 지구고정좌표계 기준점 {n}과 선체고정좌표계 기준점 {b} 그리고 두 좌표계 사이의 각도 ψ 를 표현한다.

식(1)에서 τ_{RB} , ν 는 선박에 작용하는 외력과 점 {b}에서의 선체 속도를 나타내는 벡터이다(Fossen, 2011a). 식(2)에서 M_{RB} , M_A 는 각각 선체의 질량관성행렬, 부가질량행렬을 의미하며 식(3)에서 C_{RB} , C_A 는 각각 선체와 부가질량에 의한 Coriolis힘을 표현하기 위한 행렬이다. 식(4)에서 η 는 기준점 {n}에서의 선박의 위치벡터, $\dot{\eta}$ 는 기준점 {n}에서의 선박의 속도벡터 그리고 J_θ 는 좌표변환 행렬이다.

3. 환경하중 모델

3.1 Current Load

선박에 작용하는 외력 τ_{RB} 을 감쇠력, Wind Load, Current Load, Wave Load로 표현한 운동방정식은 다음과 같다(Fossen, 2011a).

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D\nu_{rc} + d(V_{rc}, \gamma_{rc}) = \tau_{wind} + \tau_{wave} + \tau_{cm} \quad (5)$$

$$d(V_{rc}, \gamma_{rc}) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}\rho A_{Fc} C_{X,c}(\gamma_{rc}) V_{rc}^2 \\ -\frac{1}{2}\rho A_{Lc} C_{Y,c}(\gamma_{rc}) V_{rc}^2 \\ -\frac{1}{2}\rho A_{Lc} L_{oa} C_{N,c}(\gamma_{rc}) V_{rc}^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

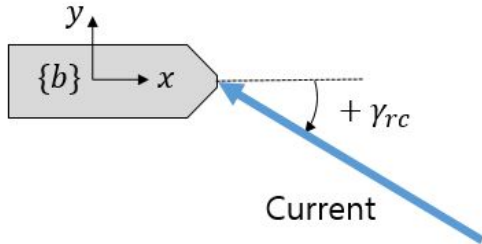


Fig. 2. Example of attack angle.

식(5)에서 $D\nu_{rc}$, $d(V_{rc}, \gamma_{rc})$ 는 조류에 대한 상대속도 ν_{rc} , V_{rc} 를 이용하여 감쇠력과 Current load를 동시에 표현하였다. 여기서, D 는 선형 감쇠계수 행렬이며 d 는 비선형 감쇠력 행렬이다. 비선형 감쇠력 d 행렬에서 A_{Fc} , A_{Lc} 는 횡 단면적과 종 단면적이며 $C_{X,c}$, $C_{Y,c}$, $C_{N,c}$ 는 Current load에 대한 계수를 나타내고, Fig. 2의 γ_{rc} 는 Current의 방향을 나타내는 각도이다.

본 연구의 대상 선박의 경우, 고유주기가 매우 크다고 가정하여 조파 감쇠 계수는 고려하지 않았으며, 선형 점성 감쇠력만 고려하였다.

3.2 Wind Load

Wind load는 Blendermann(1994)에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\tau_{wind} = \frac{1}{2} \rho_{air} V_{rw}^2 \begin{bmatrix} C_{X,w}(\gamma_{rw}) A_{Fw} \\ C_{Y,w}(\gamma_{rw}) A_{Lw} \\ C_{N,w}(\gamma_{rw}) A_{Lw} L_{oa} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$C_X(\gamma_w) = -CD_t \frac{A_{Lw}}{A_{Fw}} \frac{\cos(\gamma_w)}{1 - \frac{\delta}{2} (1 - \frac{CD_t}{CD_l}) \sin^2(2\gamma_w)} \quad (8)$$

$$C_Y(\gamma_w) = CD_t \frac{\sin(\gamma_w)}{1 - \frac{\delta}{2} (1 - \frac{CD_t}{CD_l}) \sin^2(2\gamma_w)} \quad (9)$$

$$C_N(\gamma_w) = \left[\frac{s_L}{L_{oa}} - 0.18(\gamma_w - \frac{\pi}{2}) \right] C_Y(\gamma_w) \quad (10)$$

식(8)의 CD_t , CD_l 은 각각 횡 방향, 종 방향 저항 계수이고 cross-force parameter δ 는 선형에 맞는 값을 표를 이용해 얻을 수 있다(Blendermann, 1994).

이때, $CD_l = CD_{lAF}(\gamma_{rw}) A_{Fw} / A_{Lw}$ 의 관계가 있으며 $|\gamma_{rw}| < \pi/2$ 이면 $CD_{lAF} = CD_{lAF}(0)$ 그렇지 않으면 $CD_{lAF} = CD_{lAF}(\pi)$ 를 이용한다.

3.3 Wave Load

본 연구에서는 Modified Pierson-Moskowitz (MPM) Spectrum을 이용하여 N개의 불규칙파를 생성하여 파랑하중을 계산하였고, 단 방향파의 경우만 고려하였다.

파랑 강제력은 다음 식과 같다.

$$\tau_{wave} = \tau_{wave1} + \tau_{wave2} \quad (11)$$

$$\tau_{wave1}^{def} = \left| \sum_{k=1}^N F_{wave1}^{def}(w_k, \beta) \right| A_k \cos(w_k t + \angle F_{wave1}^{def}(w_k, \beta) + \epsilon_k) \quad (12)$$

$$\tau_{wave2}^{def} = \left| \sum_{k=1}^N F_{wave2}^{def}(w_k, \beta) \right| A_k^2 \cos(w_k t + \epsilon_k) \quad (13)$$

식(11)의 τ_{wave1} , τ_{wave2} 는 각각 1차 파랑강제력, 2차 파랑 강제력을 나타낸다. 1차 파랑 강제력의 경우, DPS의 제어대상인 단주기 파는 칼만필터를 이용하여 걸러낸 신호

만 제어에 사용하였다. 식(12), (13)에서 A_k, ω_k 그리고 ϵ_k 는 k 번째 파의 진폭, 각주파수, 위상을 의미한다(Fossen, 1994). 단, ϵ_k 는 $0 \leq \epsilon_k < 2\pi$ 인 랜덤 변수이다. $F_{wave1}^{dof}, F_{wave2}^{dof}$ 는 1, 2차과랑강제력의 Force-Moment RAO를 나타내고, $\angle F_{wave1}^{dof}$ 는 과랑강제력의 위상지연이다.

본 논문의 대상은 DPS가 적용된 선박이고 그 속도가 충분히 작기 때문에 만남주파수는 고려하지 않았다.

4. 피드백 및 피드포워드 제어기 설계

본 연구에서 제안하는 DPS의 제어입력은 피드백 제어입력과 피드포워드 제어입력으로 구성되며 제어력은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\tau_{con} = \tau_{pid} + \tau_{ff} \quad (14)$$

식 (14)의 τ_{pid}, τ_{ff} 는 피드백 제어력과 피드포워드 제어력으로 본 연구에서 제안한 DPS 제어시스템의 제어력은 둘의 합으로 나타낼 수 있다.

4.1 피드백 제어기

피드백 제어기는 현재의 선박 위치 및 헤딩각 정보와 PID제어를 이용한다. 이용된 PID 제어입력은 다음과 같이 결정된다. PID 제어란 현재 값과 목표 값 사이의 오차에 대한 비례게인(Proportional-gain), 오차의 적분에 대한 적분(Integral gain) 및 오차의 미분에 대한 미분게인(Derivative gain)을 이용하여 식 (15)와 같이 제어입력을 결정하는 제어 이론이다(Fossen, 2011c).

$$\tau_{pid} = -(K_p e + K_d \dot{e} + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau) \quad (15)$$

$$e = \eta - \eta_{target} \quad (16)$$

$$K_p = \begin{bmatrix} m\omega_n^2 & 0 & 0 \\ 0 & m\omega_n^2 & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz}\omega_n^2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$K_d = \begin{bmatrix} 2\zeta_{surge}m\omega_n - D_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 2\zeta_{sway}m\omega_n - D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 2\zeta_{yaw}m\omega_n - D_{66} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$K_i = \alpha_I \omega_n K_p \quad (19)$$

식(16)의 e 는 선박 위치 및 헤딩각의 목표값과 현재값 사이의 오차이며 \dot{e} 와 $\int_0^t e(\tau) d\tau$ 는 각각 오차 e 의 미분값과 적분값이다. 또한 K_p, K_d, K_i 는 각각 비례, 미분, 적분 게인값이며 식(17), (18), (19)에 의하여 결정된다. ω_n 은 제어기의 고유 각주파수이며 이 값을 이용하여 적절한 게인값을 결정한다. 식(18)에서 $\zeta_{surge}, \zeta_{sway}, \zeta_{yaw}$ 는 각각 Surge, Sway, Yaw 방향의 제동비를 나타내며 D_{11}, D_{22}, D_{66} 은 선형감쇠계수이다. 식(19)에서 α_I 는 K_i 의 크기를 정해주기 위한 계수이다.

4.2 피드포워드 제어기

피드포워드 제어기는 미래의 선박 위치 및 헤딩각의 예측값과 P제어를 이용하며 예측값은 Brown의 지수평활 예측 모델을 이용하여 결정된다(Lee, 2009).

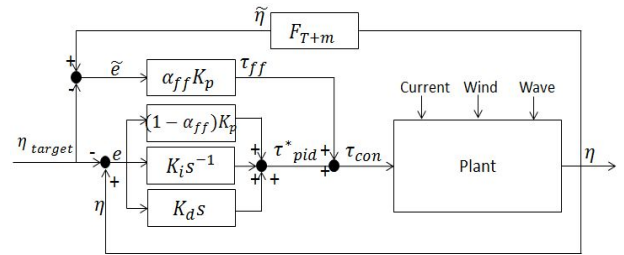


Fig. 3. Feedback & Feedforward control system block diagram.

Fig. 3은 본 연구에서 제안하는 피드백 제어기와 피드포워드 제어기를 동시에 갖는 DPS 제어시스템이다. 제안한 제어기의 피드백 제어력과 피드포워드 제어력은 다음 식과 같다.

$$\tau_{con} = \tau_{pid}^* + \tau_{ff} \quad (20)$$

$$\tau_{pid}^* = -\left\{ (1 - \alpha_{ff}) K_p e + K_d \dot{e} + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \right\} \quad (21)$$

$$\tau_{ff} = -\alpha_{ff} K_p \tilde{e}(t + T_f) \quad (22)$$

$$\tilde{e} = \tilde{\eta} - \eta_{target} \quad (23)$$

식(20)에서 τ_{con} 은 DPS의 총 제어력이며 식(21)과 식(22)는 제안한 제어기의 피드백 제어력, 피드포워드 제어력을 나타낸다. 또한 α_{ff} 는 피드포워드 제어의 비중을 나타내는 계수이다. 식(23)의 \tilde{e} 는 예측 오차로 예측된 선박위치벡터 $\tilde{\eta}$ 와 목표값 η_{target} 과의 오차를 나타낸다.

4.3 Brown의 지수평활 예측모형

Brown의 지수평활 예측모형은 본 연구에서 대상 선박의 위치 및 heading을 예측하는데 이용되었으며 반복평활을 이용하여 지수평활법에서 생기는 시차 (lag)을 보상하고, 현재의 추세를 이용하여 미래의 값을 예측하는 방법이다. 미래 시점 $T+m$ 에서 예측값을 구하기 위한 수학적 표현은 다음과 같다.

$$S'_T = \alpha Y_T + (1-\alpha)S'_{T-1} \quad (24)$$

$$S''_T = \alpha S'_T + (1-\alpha)S''_{T-1} \quad (25)$$

식(24)에서 Y_T, S'_T 는 시점 T 에서의 관측값, 지수평활 예측값이며 S'_{T-1} 는 시점 $T-1$ 에서의 예측값이다. α 는 Y_T 의 가중치이다. 식(25)에서 S''_T 는 시점 T 에서 S'_T 의 예측값이며 α 는 S'_T 의 가중치이다.

Fig. 4에서 S'_T 는 시점 $T+1$ 에서의 예측값이며 임의의 α 를 이용하여 나타내었고 S''_T 는 시점 $T+2$ 에서의 예측값이다.

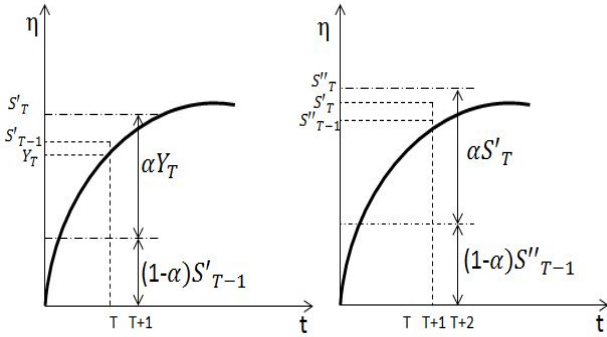


Fig. 4. Value of S'_T, S''_T .

본 연구에서 사용되는 F_{T+m} 은 다음과 같은 식들로 표현될 수 있다.

$$a_T = S'_T + (S'_T - S''_T) = 2S'_T - S''_T \quad (26)$$

$$b_T = \frac{\alpha}{1-\alpha}(S'_T - S''_T) \quad (27)$$

$$F_{T+m} = a_T + b_T m \quad (28)$$

식(26)에서 a_T 는 시점 T 에서 보상된 예측값이며 예측값 S'_T 과 보상값 $S'_T - S''_T$ 의 합으로 표현한다. 식(27)의 b_T 는 현재 시점 T 에서 가지는 추세를 나타낸다. 식(28)에서 F_{T+m} 는 시점 $T+m$ 에서의 예측값으로 a_T 와 b_T 를 이용하여 나타내었다. m 은 예측하는 시점까지의 step수이며 수학적 표현은 $T_f/\Delta t$ 이다.

여기에서 T_f 는 예측주기이고 Δt 는 time Interval이다.

Fig. 5에서 a_T 는 시점 $T+1$ 에서의 보상된 예측값이고 예측오차는 m 과 b_T 의 값에 따라서 달라지는 것을 볼 수 있으며 m 의 수학적 표현이 $T_f/\Delta t$ 임을 고려하면 T_f 가 클수록 예측오차가 증대하는 것을 예상할 수 있다. 본 연구에서는 Trial & Error를 반복하여 적절한 값을 선정하였다.

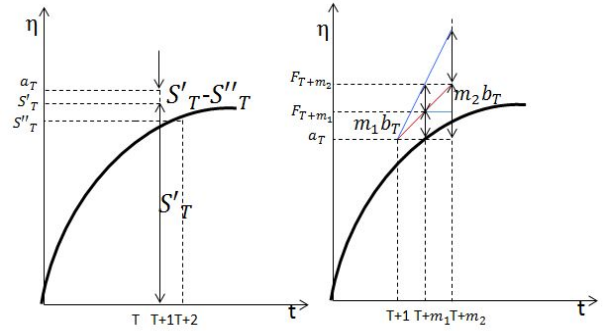


Fig. 5. Value of a_T, F_{T+m} .

다음 Fig. 6과 Fig. 7은 Brown 지수평활 예측모형을 이용하여 예측 주기 T_f 를 1초, 3초로 설정했을 때 선박의 지구 고정좌표계에서의 X_0 변위를 예측한 결과이다.

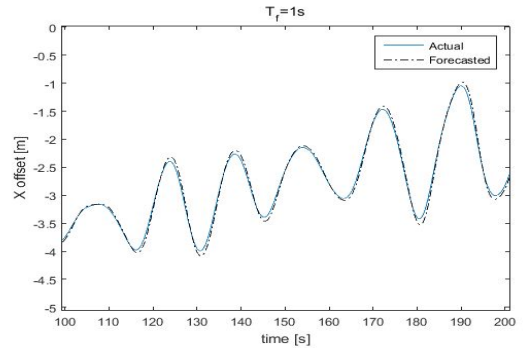


Fig. 6. Forecasting of X_0 ($T_f = 1s$).

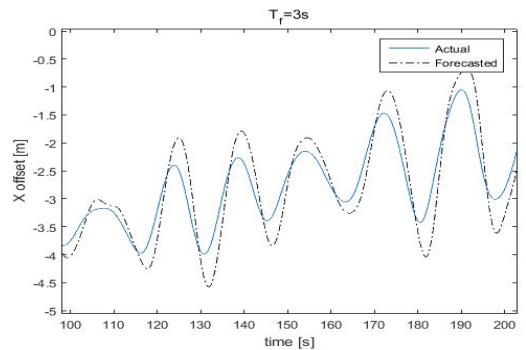


Fig. 7. Forecasting of X_0 ($T_f = 3s$).

Fig. 6과 7을 비교하였을 때, Actual 값과 Forecasted 값이 $T_f=1s$ 일 때는 거의 예측을 할 수 있는 반면에 $T_f=3s$ 일 때에는 Forecasted 값이 Actual값보다 다소 크게 Overshoot되는 것을 볼 수 있다. 따라서 예측주기 T_f 가 커질수록 예측값의 정확도는 감소하는 것을 알 수 있다.

입사각 20° 의 Current, Wind, Wave의 환경하중을 받는 경우, 수평면 좌표와 헤딩각의 예측과 실제값의 오차에 대한 표준편차는 다음과 같다.

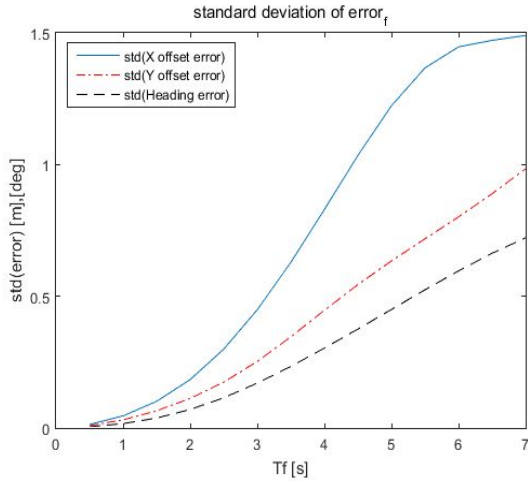


Fig. 8. Standard deviation of forecasting error.

4.4 추력분배 알고리즘

대상 선박의 DPS는 6개의 Thruster를 이용하고 있으며 Thruster 배치 및 최대 추력은 Fig. 9와 Table 2와 같다.

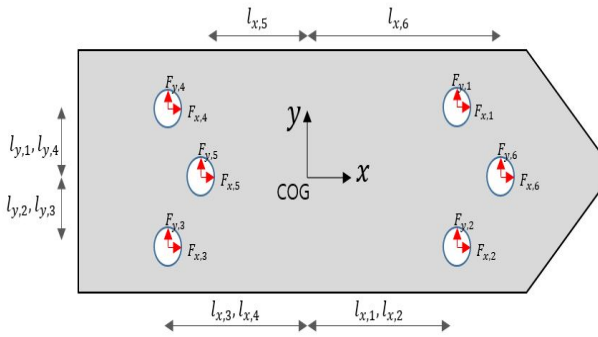


Fig. 9. Formation of thrusters.

Table 2. Formation of Thrusters

Thruster	Location of COG		Max Thrust
	X	Y	
Azimuth no.1	90m	18m	1000kN
Azimuth no.2	90m	-18m	1000kN
Azimuth no.3	-90m	-18m	1000kN
Azimuth no.4	-90m	18m	1000kN
Azimuth no.5	-85m	0	1000kN
Azimuth no.6	95m	0	1000kN

6개 Thruster의 x, y방향 추력행렬 f , 추력분배행렬 T 그리고 제어력 τ_{con} 은 다음과 같다(Fossen, 2011d).

$$\tau_{con} = Tf \quad (29)$$

$$f = [F_{x,1} F_{y,1} F_{x,2} F_{y,2} F_{x,3} F_{y,3} F_{x,4} F_{y,4} F_{x,5} F_{y,5} F_{x,6} F_{y,6}]^T \quad (30)$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ -l_{y,1} & l_{x,1} & l_{y,2} & l_{x,2} & l_{y,3} & -l_{x,3} & -l_{y,4} & -l_{x,4} & 0 & -l_{x,5} & 0 & l_{x,6} \end{bmatrix} \quad (31)$$

본 연구에서 6개 Thruster의 추력분배는 랑그랑지승수법을 사용하여 결정하였고 Thruster의 추력을 최소화하기 위한 최적분배를 위한 J 는 다음과 같이 결정된다.

$$J = \min_f \{f^T W f\} \text{ subject to: } \tau_{con} - Tf = 0 \quad (32)$$

식(32)에서 W 는 각 Thruster의 추력에 대한 가중치 행렬이며 랑그랑지승수법을 이용해 풀면 f 는 τ_{con} 과 T 의 관계식으로 얻어진다.

$$f = W^{-1} T^T (T W^{-1} T^T)^{-1} \tau_{con} \quad (33)$$

본 연구의 경우 사용된 Thruster들의 최대 추력이 같기 때문에 $W=I$ 이며 식(33)은 다음과 같이 간단한 형태로 나타낼 수 있다.

$$f = T^T (T T^T)^{-1} \tau_{con} \quad (34)$$

식(34)을 이용해 추력 행렬 f 가 결정되면 각각의 Thruster의 추력의 크기 F_i 와 각도 α_i 는 다음과 같이 결정된다.

$$F_i = \sqrt{F_{x,i}^2 + F_{y,i}^2}, \alpha_i = \text{atan2}(F_{y,i}, F_{x,i}) \quad (35)$$

라그랑지승수법을 이용하여 최적화된 Thruster의 추력을 700초간 관측한 결과는 다음과 같다.

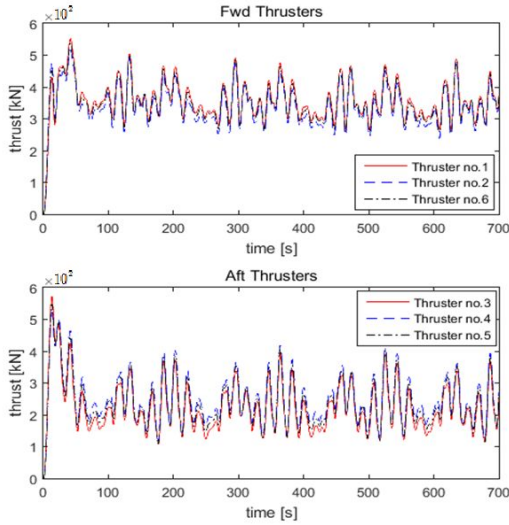


Fig. 10. Allocation of thrusters.

5. 시뮬레이션

5.1 시뮬레이션 조건

본 연구에서 제안하는 DPS 제어기의 성능 검증을 위한 시뮬레이션 조건은 다음과 같다. 세가지 환경하중 Wind, Current, Wave의 방향은 단 방향으로 설정하였으며 모두 같은 받음각으로 선체에 접근하는 것으로 설정하였다. 또한 받음각의 범위는 0° ~ 60°이며 Wind의 속도 V_{wind} , Current의 속도 $V_{current}$ 는 각각 20m/s, 1m/s로 설정 하였다. Wave load는 유의파고 $H_s = 5m$, 모달주기 $T_0 = 15s$ 의 단방향 불규칙파를 생성하여 산출하였다.

5.2 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안한 DPS 제어 시스템의 성능을 검증하기 위해 기존의 피드백 제어기만을 이용한 결과와 본 연구에서 제안한 피드백 및 피드포워드 제어기 결과를 비교하였다. 제어기의 성능을 평가하기 위해 Offset error의 표준편차 및 최대값, Heading error의 표준편차 및 최대값 그리고 평균 제어력과 최대 제어력을 비교하였다. DPS 위치 유지 성능 향상의 관점에서 $T_f = 6s$, $\alpha_{ff} = 0.4$ 로 설정한 피드백 및 피드포워드 제어기가 가장 우수한 성능을 보여 본 연구에서 이 값들을 사용하였다. 단, 최적의 T_f , α_{ff} 는 향상시키고자 하는 DPS의 특성에 따라서 달라질 수 있다.

본 연구의 시뮬레이션은 700초간 관측한 결과이며 피드

백 제어기의 위치 제어 성능과 피드백 및 피드포워드 제어기의 위치 제어 성능을 비교하는데 사용되었다.

Fig. 11는 피드백 제어기를 이용한 DPS의 X, Y위치와 헤딩각의 값들을 관측한 결과이며 Fig. 12는 대상 선박이 XY평면에서 관측 시간동안 위치 유지 제어를 수행한 결과를 나타낸다. 대상 선박의 초기 위치는 원점이었으며 환경하중에 의하여 좌측 상단으로 이동 후 다시 원점에서 위치 유지를 하는 것을 확인할 수 있다.

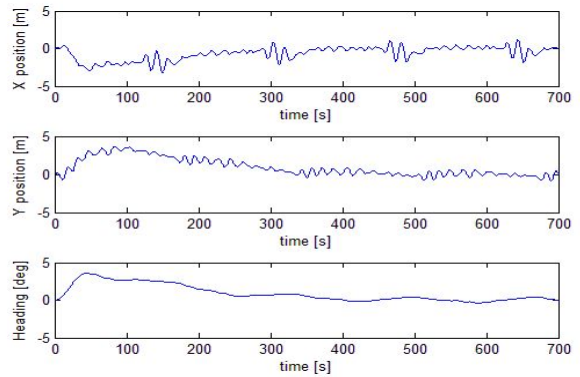


Fig. 11. X, Y position and heading (feedback controller).

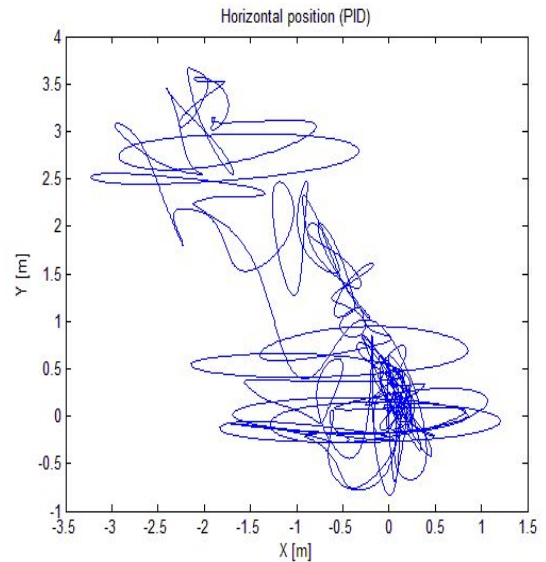


Fig. 12. Horizontal position of vessel (feedback controller).

Fig. 13은 피드백 및 피드포워드 제어기를 이용한 DPS의 X, Y위치와 헤딩각의 값들을 관측한 결과이며 Fig. 14는 XY평면에서 관측 시간동안 피드백 및 피드포워드 제어기를 장착한 대상 선박의 위치 유지 제어를 수행한 결과를 나타낸다.

Fig. 12와 Fig. 14에서 대상 선박의 X, Y방향 움직임을 비교해 보았을 때, 본 연구에서 제안한 피드백 및 피드포워드 제어기와 기존 피드백 제어기를 이용한 DPS의 위치유지 성능이 유사한 것을 확인할 수 있었다.

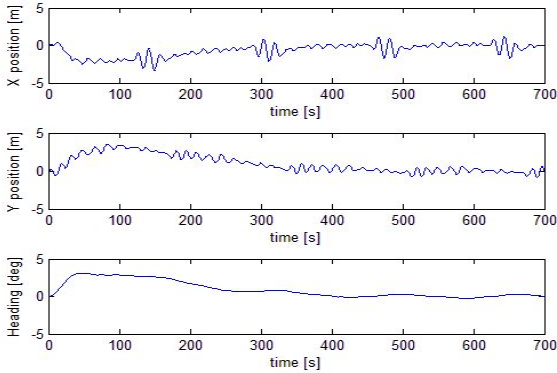


Fig. 13. X, Y position and Heading (feedback & feedforward controller).

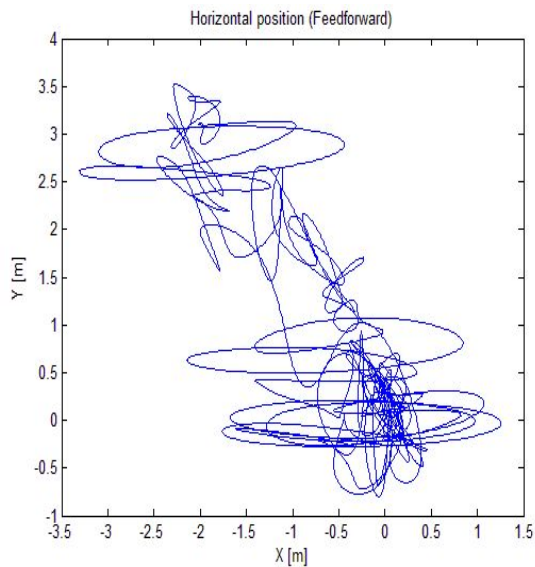


Fig. 14. Horizontal position of vessel (feedback & feedforward controller).

현재 선박의 위치 및 heading각을 오차로 이용한 PID 피드백 제어기와 피드백 및 피드포워드 제어기의 성능을 비교해 본 결과 Fig. 15에서 Horizontal offset error의 경우 피드백 및 피드포워드 제어기와 기존의 피드백 PID 제어기가 비슷한 성능을 보였다. 하지만 Fig. 16에서 Maximum heading error의 경우 피드백 및 피드포워드 제어기에서 최대 약 5.15%의 오차가 감소하는 것을 확인했다.

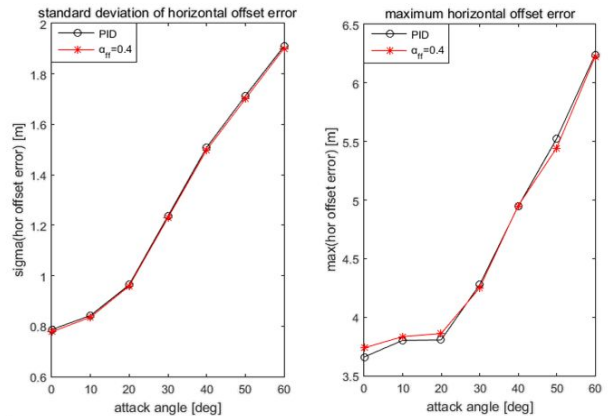


Fig. 15. Standard deviation and maximum value of horizontal offset error.

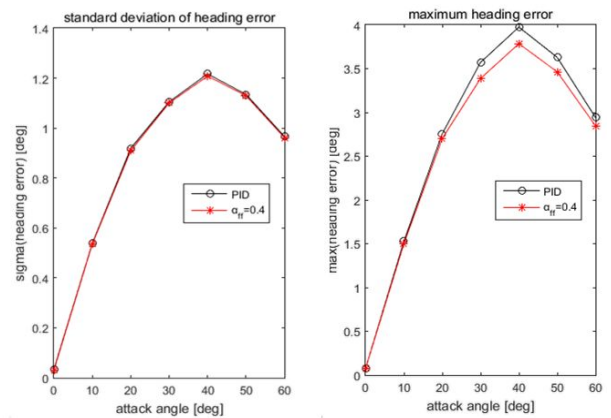


Fig. 16. Standard deviation and maximum value heading error.

Fig. 17에서 Maximum power의 경우, 피드백 및 피드포워드 제어기에서 기존의 피드백 제어기 대비 최대 약 4.91%의 출력이 감소하는 것을 확인했다.

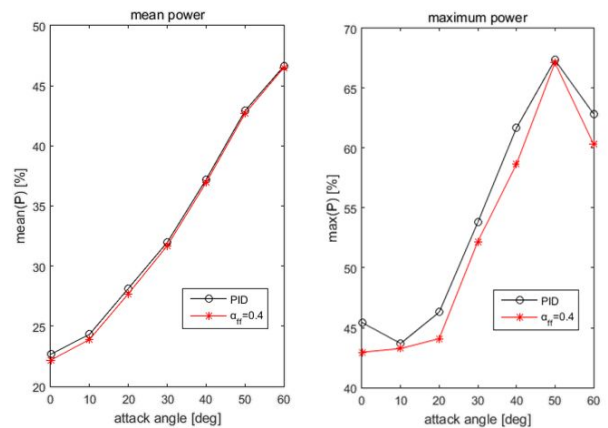


Fig. 17. Mean and maximum value of power.

6. 결 론

본 논문에서는 Brown의 지수평활 예측모형을 이용하여 가까운 미래의 선박 운동을 예측하고 이를 이용하여 제어력을 결정하는 피드백 및 피드포워드 제어를 제안하였다. 그리고 대상 선박에 적용된 DPS 제어시스템의 성능을 시간영역 시뮬레이션을 이용하여 평가하였다. 본 논문에서 제안하는 피드백 및 피드포워드 제어가 적용된 DPS 시스템이 기존의 피드백 제어기보다 heading 각 유지 능력에서 약 5.15% 정도 향상된 성능을 보였으며, 각 Thruster에 요구되는 평균 제어력 및 최대 제어력의 크기 또한 기존의 피드백 제어기 대비 약 4.91% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 그에 따른 기대 효과로는 DPS에 요구되는 동력 감축과 Azimuth Thruster 용량의 감소로 인한 비용 절감, 또한 같은 Azimuth Thruster 용량으로 향상된 위치 제어를 할 수 있다는 것이다.

향후 연구과제로는 선체운동 미래 정보뿐만 아니라 조류, 바람 및 파랑에 의한 환경하중의 미래 정보도 이용하는 피드포워드 제어기법에 대한 연구가 필요할 것이다. 또한 다양한 피드포워드 제어이론에 대한 연구와 미래 정보 예측 알고리즘에 대한 연구도 필요할 것이다. 그리고 제안하는 피드포워드 제어기법의 타당성 검증을 위하여, FPSO 등의 모형의 위치 유지 제어 실험도 요구될 것이다.

후 기

본 연구는 2013년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2013R1A1A2005770)의 지원을 받아 수행한 연구입니다.

References

[1] Blendermann, W.(1994), Parameter Identification of Wind Loads on Ships, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics JWEIA-51, pp. 339-351.
 [2] Choi, J. W., S. W. Kim, M. C. Ryu and Y. S. Kim(2012), Analysis of the effect based on Azimuth Thruster design parameter, The Korean Society for Marine Environment & Energy, pp. 858-863.
 [3] Kim, S. G., H. R. Yoo and S. B. Kim(1995), Experimental Study on Dynamic Positioning Control of a Semi-Submersible Platform, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 19, No. 3, pp. 661-669.

[4] Lee, D. Y. and M. K. Ha(2001), An Experimental Method of Model Installed Dynamic Positioning System for Drillship, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 38, No. 2, pp. 33-43.
 [5] Lee, W. W.(2009), Statistical methods for forecasting, Jayoacademi, pp. 35-72.
 [6] Mahfouz, A. B. and H. W. El-Tahan(2006), On the Use of the Capability Polar Plots Program for Dynamic Positioning Systems for Marine Vessels, Ocean Engineering, Volume 33, Issues 8-9, pp. 1070-1089.
 [7] Tannuri, E. A., A. C. Agostinho, H. M. Morishita and L. Moratelli Jr.(2010), Dynamic Positioning Systems: An Experimental Analysis of Sliding Mode Control, Control Engineering Practice, Volume 18, Issue 10, pp. 1121-1132.
 [8] Fossen, T. I.(1994), Guidance and Control of Ocean Vehicles. Wiley, pp. 57-90.
 [9] Fossen, T. I.(2011a), Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control, Wiley, pp. 152-156.
 [10] Fossen, T. I.(2011b), Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control, Wiley, pp. 187-226.
 [11] Fossen, T. I.(2011c), Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control, Wiley, pp. 372-384.
 [12] Fossen, T. I.(2011d), Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control, Wiley, pp. 398-416.

Received : 2015. 12. 04.

Revised : 2016. 01. 19. (1st)

: 2016. 02. 02. (2nd)

Accepted : 2016. 02. 25.