

# 소형 선박용 듀얼 전기추진시스템의 동기제어시스템 설계

변정환\*

## The Synchronous Control System Design of a Dual Electric Propulsion System for Small Boats

Jung-Hwan Byun\*

요 약

최근, 전기추진시스템은 무인선, 어군탐지선 등에 활용되고 있다. 이 추진시스템 중에는 추진력 향상을 위해 두 대의 전기모터와 프로펠러로 구성된 경우가 있다. 이때 두 프로펠러 간의 속도 차에 해당하는 동기오차는 에너지효율과 침로오차에 영향을 미친다. 본 연구에서는 외란과 동특성 불일치에 의해 발생하는 동기오차를 억제하기 위한 동기제어시스템이 설계된다. 이 제어시스템은 기준모델, 예비필터와 속도제어기, 동기제어기로 구성된다. 기준모델은 추진시스템마다 상호 분리된 동기오차와 제어입력의 계산에 이용된다. 예비필터와 속도 제어기는 추진시스템이 오버슈트와 입력포화 없이 지령을 추종하도록 설계된다. 그리고 동기제어기는 안정적이고 신속한 동기화의 관점에서 근궤적법으로 설계된다. 끝으로, 시뮬레이션을 통해 설계된 제어시스템이 외란에 효과적임을 보여준다.

### ABSTRACT

Recently, electric propulsion systems are used for unmanned surface vehicle, fish finder boat, etc. Some of these propulsion systems can be constructed of two electric motors and propellers for advanced impellent force. In this case, the speed difference generated between two propellers, namely, the synchronous error has a bad influence on the energy efficiency and course error. In this study, a synchronous control system is designed to restrain synchronous error caused by disturbance and mismatched dynamic characteristics. The control system is composed of the reference model, pre-filters, speed controllers, and synchronous controllers. The reference model is used for calculating the decoupled synchronous error and control input for each propulsion system. The pre-filters and speed controllers are designed in order that the propulsion system may follow the reference signal without overshoot and input saturation. And the synchronous controllers are designed from the viewpoint of stable and quick synchronization through root locus method. Finally, the simulation results show that the designed control system is effective for the disturbance.

### 키워드

Unmanned Surface Vehicle, Dual Electric Propulsion System, Synchronous Error, Root Locus Method  
무인선, 이중 전기 추진 시스템, 동기 오차, 근궤적법

### 1. 서 론

최근 전기, 전자, 정보통신 등을 활용하여 무인으로

자율 항해하거나, 원격 조정되는 무인선(Unmanned surface vehicle)에 대한 연구가 진행되고 있다[1]. 이 선박은 유해한 해양환경을 실시간으로 파악하거나, 인

\* 교신저자 : 전남대학교 해양기술학부

• 접수일 : 2016. 11. 07

• 수정완료일 : 2017. 02. 13

• 게재확정일 : 2017. 02. 24

• Received : Nov. 07, 2016, Revised : Feb. 13, 2017, Accepted : Feb. 24, 2017

• Corresponding Author : Jung-Hwan Byun  
Dept. of Marine Technology, Chonnam National University  
Email : bjh@jnu.ac.kr

간이 직접 접근하기 어려운 위험지역의 정보를 수집하는 데 유용하게 이용될 수 있다. 이 선박의 추진 동력원으로는 환경오염, 소음진동, 에너지 효율 등의 관점에서 디젤엔진보다 전기모터가 관심을 받고 있다 [2-3]. 또한 소형어선, 레저보트, 어군탐지선 등에도 전기모터를 이용한 추진시스템의 개발에 관한 연구가 있다. 이들 선박의 추진시스템은 일반적으로 1대의 전기모터와 모터의 회전력을 직선운동으로 변환하기 위한 프로펠러(Propeller), 선체의 진행방향을 결정하기 위한 방향타(Rudder) 등으로 구성된다. 그리고 이들 선박 중에는 추진력 향상을 위해 2개의 전기모터와 프로펠러 등으로 구성되는 듀얼 전기추진시스템(Dual electric propulsion system)이 적용될 수 있다[4]. 또한 선미(Stern)에 설치된 좌·우 추진모터는 방향타와 같이 선체의 진행방향을 결정하는데 활용될 수 있다.

한편 무인선이 설정된 침로(Ship's course)를 따라 정보를 수집할 경우, 제한된 배터리를 탑재한 선박이 임무를 신속히 수행하기 위해서는 경유점(Waypoint)에 최단경로로 도달하는 것이 중요하다. 그림 1은 좌·우측 프로펠러의 속도 차에 의해 발생하는 침로오차를 나타내고 있다. 속도 차이가 없을 경우(a)에는 침로오차가 발생하지 않지만, 속도 차이가 증가할 경우(b), (c)에는 침로오차도 비례하여 증가된다. 즉, 듀얼 추진 시스템에서는 좌·우측 프로펠러의 속도가 일치하지 않으면 선박이 직선경로로 경유점에 도달하기 어렵게 된다. 따라서 듀얼 전기추진시스템의 장점을 적극적으로 활용하기 위해서는 프로펠러 간에 발생하는 속도 차인 동기오차[5-6]를 신속하게 억제할 필요가 있다.

이 듀얼 추진시스템의 선박에 탑재된 중량물의 좌·우 불균형 배치, 추진시스템 간의 동특성 불일치, 외란 등에 의해 동기오차가 발생할 수 있다. 본 연구는 기준모델, 예비필터와 속도제어기, 동기제어기를 이용하여 동기오차를 억제함으로써 선박이 최단경로로 경유점에 도달될 수 있는 동기제어시스템 설계에 목적을 두고 있다.

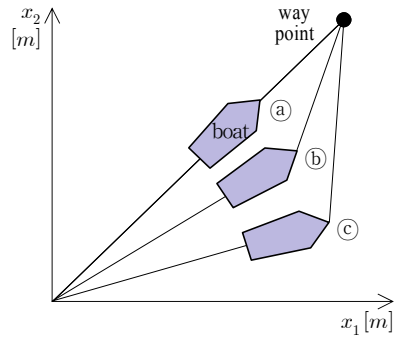


그림 1. 좌·우 프로펠러 간의 속도가 동일(a)하거나, 다른(b),(c) 경우의 침로오차  
 Fig. 1 Course errors in case that speed between right and left propeller is same(a) and different(b),(c)

## II. 전기추진시스템

소형의 탐사용 무인선, 어군탐지선 등에서는 프로펠러를 회전시키는 동력원으로 전기모터[7-8]가 유용하게 이용된다.

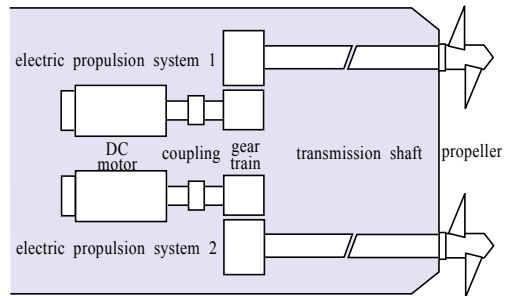


그림 2. 듀얼 전기추진시스템의 개략도  
 Fig. 2 Schematic diagram of a dual electric propulsion system

그림 2는 동일한 특성을 갖는 2대의 전기모터, 프로펠러 등으로 구성되는 전기추진시스템에 대한 개략도이다. 입·출력기어에 모터와 전달축이 연결되고, 전달축의 끝단에 프로펠러가 체결된다. 이때 모터의 회전운동은 프로펠러에 의해 선체의 직선운동으로 변환된다. 한편 그림 3은 전동기, 기어열, 전달축, 프로펠러로 구성되는 추진시스템을 나타내도 있다. 기어열과 전달축의 강성을 무한대로 가정하면 회전시스템의 운동방정식은 식 (1), (2)와 같다.

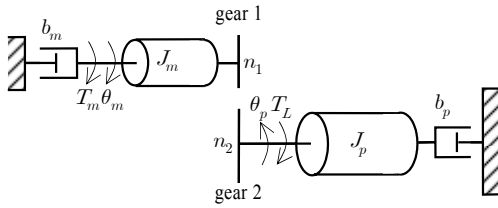


그림 3. 전기추진시스템의 모델  
Fig. 3 Model of an electric propulsion system

$$J_m \frac{d^2\theta_m(t)}{dt^2} + b_m \frac{d\theta_m(t)}{dt} + T_1(t) = T_m(t) \quad (1)$$

$$J_p \frac{d^2\theta_p(t)}{dt^2} + b_p \frac{d\theta_p(t)}{dt} + T_L(t) = T_2(t) \quad (2)$$

여기서  $T_m(t)$ 은 모터 토크,  $T_1(t)$ 은 기어1에 대한 부하토크,  $T_2(t)$ 는 기어2에 전달된 토크,  $T_L(t)$ 은 부하토크이다. 그리고  $J_m$ 은 모터 축의 관성모멘트,  $J_p$ 는 프로펠러 축의 관성모멘트이고,  $b_m$ 은 모터 축의 점성마찰계수,  $b_p$ 는 프로펠러 축의 점성마찰계수이다. 그리고 부하토크와 전달토크  $T_1(t)$ ,  $T_2(t)$ , 모터와 프로펠러 회전각  $\theta_m(t)$ ,  $\theta_p(t)$ , 기어 1과 2의 기어 잇수  $n_1, n_2$ 의 관계는 식 (3)과 같다.

$$T_1(t) = \frac{\theta_p(t)}{\theta_m(t)} T_2 = n T_2(t) \quad (3)$$

여기서  $n = \frac{n_1}{n_2}$ 이다. 식 (1)~(3)을  $\theta_m(t)$ 에 대해 정리하면 식 (4)와 같다.

$$J_{meq} \frac{d^2\theta_m(t)}{dt^2} + b_{meq} \frac{d\theta_m(t)}{dt} + n T_L(t) = T_m(t) \quad (4)$$

여기서  $J_{meq} = J_m + n^2 J_p$ ,  $b_{meq} = b_m + n^2 b_p$ 이다.

또한 모터 토크  $T_m(t)$ 과 전기시스템에 대한 회로 방정식은 식 (5), (6)과 같다.

$$T_m(t) = K_t i_a(t) \quad (5)$$

$$L_a \frac{di_a(t)}{dt} + R_a i_a(t) + K_e \frac{d\theta_m(t)}{dt} = v_a(t) = K_a u(t) \quad (6)$$

여기서  $i_a(t)$ 는 전기자 전류,  $K_t$ 는 토크상수,  $v_a(t)$ 는 전기자 전압입력,  $K_a$ 는 증폭기이득,  $u(t)$ 는 증폭기 전압입력,  $R_a$ 는 저항,  $K_e$ 는 역기전력상수,  $L_a$ 는 인덕턴스이다. 일반적으로 전기적 응답은 회전자의 움직임보다 훨씬 빠르고, 전압부가에 의한 전류변화는 매우 짧은 시간에 존재하므로  $L_a$ 는 생략된다.

식 (5)를 식 (6)에 대입하여  $T_m(t)$ 에 대해 정리하면 식 (7)과 같다.

$$\frac{K_t}{R_a} [K_a u(t) - K_e \theta_m(t)] = T_m(t) \quad (7)$$

그리고  $y_m(t) = d\theta_m(t)/dt$ ,  $y(t) = d\theta_p(t)/dt$ 로 두고 식 (4), (7)을 라플라스 변환하여 추진시스템을 블록선도로 나타내면 그림 4와 같다. 그림에서 증폭기 전압입력  $u(s)$ 와 프로펠러 회전속도  $y(s)$ 의 관계를 전달함수  $P_n(s)$ 로 나타내면 식 (8)과 같다.

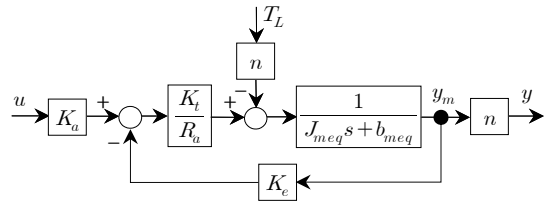


그림 4. 전기추진시스템의 블록선도  
Fig. 4 Block diagram of an electric propulsion system

$$P_n(s) = \frac{n K_a K_t}{R_a J_{meq} s + R_a b_{meq} + K_t K_e} \quad (8)$$

### III. 동기제어시스템 설계

#### 3.1 속도제어시스템

동일한 특성을 갖는 전기모터와 프로펠러로 구성되는 듀얼 추진시스템에서 프로펠러가 과도한 오버슈트 없이 빠르게 목표속도에 도달하도록 속도제어 시스템을 설계할 필요가 있다. 일반적인 PI제어기로 제어시스템을 구성할 경우, 속도지령의 기울기가 크면 영점은 과도상태에서 오버슈트와 제어입력 포화의 발생요인으로 작용한다. 이점을 고려하여 추진시스템의 속도제어시스템은 그림 5와 같이 구축한다.

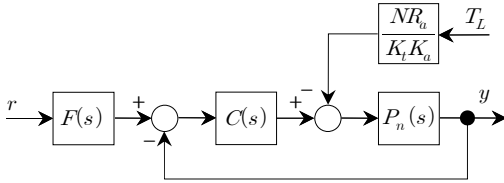


그림 5. 전기추진시스템의 속도제어시스템  
Fig. 5 The speed control system of an electric propulsion system

그림 5에서  $C(s)$ 는 토크부하  $T_L(s)$ 의 억제와 속도지령  $r(s)$ 의 추종을 위한 속도제어기이다. 그리고  $F(s)$ 는 영점의 영향을 억제하기 위한 예비필터이다.

$$C(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (9)$$

여기서  $K_p$ 는 비례이득,  $T_i$ 는 적분시간이다. 이때 피드백 제어시스템의 전달함수는 식 (10)과 같다.

$$\frac{y(s)}{r(s)} = \frac{P_n(s)C(s)}{1 + P_n(s)C(s)} \quad (10)$$

식 (10)과 같이 제어시스템을 구성할 경우,  $C(s)$ 의 적분기에 의해 생성되는 영점은 과도상태에서 오버슈트를 발생시키는 요인으로 작용한다. 따라서 영점의 영향을 감소시키기 위한 예비필터  $F(s)$ 를 추가하면 식 (10)의 제어시스템의 전달함수는 식 (11)과 같다.

$$G_r(s) = \frac{P_n(s)C(s)F(s)}{1 + P_n(s)C(s)} = \frac{g_b(T_i s + 1)}{s^2 + g_a s + g_b} F(s) \quad (11)$$

$$\text{여기서 } g_a = \frac{R_a b_{meq} + K_t(K_e + nK_p K_a)}{R_a J_{meq}},$$

$$g_b = \frac{nK_p K_a K_t}{T_i R_a J_{meq}} \text{ 이다.}$$

식 (11)에서 영점의 영향을 제거하기 위해  $F(s) = 1/(T_i s + 1)$ 로 선정한다. 그리고 제어기 계수는 극배치기법으로 다음과 같이 결정한다.

퍼센트 오버슈트  $O_p$ 와 정착시간  $T_s$ 를 설계지침으로 하여 식 (12)와 같은 대표극점을 구한다.

$$r_1, r_2 = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (12)$$

여기서  $\zeta$ 는 감쇠비,  $\omega_n$ 은 고유진동수를 나타내며 식 (13)과 같다.

$$\zeta = \sqrt{\frac{[\ln(O_p/100)]^2}{\pi^2 + [\ln(O_p/100)]^2}}, \quad \omega_n = \frac{4}{T_s \zeta} \quad (13)$$

식 (12)으로부터 설계조건을 만족하는 특성방정식은 식 (14)와 같다.

$$s^2 - (r_1 + r_2)s + r_1 r_2 = 0 \quad (14)$$

그리고 식 (10)에서 제어기 계수가 포함된 특성방정식은 식 (15)와 같다.

$$s^2 + g_a s + g_b = 0 \quad (15)$$

식 (14)과 (15)의 계수를 비교하면 식 (9)의 계수는 식 (16)과 같이 된다.

$$K_p = -\frac{R_a b_{meq} + K_t K_e + R_a J_{meq}(r_1 + r_2)}{n K_t K_a} \quad (16)$$

$$T_i = -\frac{R_a b_{meq} + K_t K_e + R_a J_{meq}(r_1 + r_2)}{R_a J_{meq} r_1 r_2}$$

한편 토크부하  $T_L(s)$ 가 프로펠러 속도  $y(s)$ 에 미치는 영향을 나타내는 전달함수는 식 (17)과 같다.

$$\frac{y(s)}{T_L(s)} = \frac{P_n(s)}{1 + P_n(s)C(s)} \frac{n R_a}{K_a K_t} \quad (17)$$

$$= \frac{\frac{n^2}{J_{meq}} s}{s^2 + g_a s + g_b}$$

식 (17)은 스텝상의 토크부하가 인가될 경우 일정 시간이 경과되면 제어기  $C(s)$ 에 의해 오차가 0으로 수렴됨을 의미한다.

### 3.2 동기제어시스템의 구조

그림 6은 프로펠러 간의 속도동기를 위해서 디커플링구조에 기초하여 설계된 동기제어시스템이다. 이 제어시스템은 기준모델  $G_r(s)$ , 실제 추진시스템의 속도 제어시스템  $G_{1,2}(s)$ , 동기제어기  $C_{s1, s2}(s)$ 로 구성된다. 그림에서  $r$ 은 속도지령,  $y_r$ 은  $G_r(s)$ 의 속도,  $y_{1,2}$

는  $G_{1,2}(s)$ 의 속도,  $e_{s1,s2}$ 는  $G_r(s)$ 과  $G_{1,2}(s)$ 의 속도 차인 동기오차,  $d_{1,2}$ 는 외란을 의미한다. 일반적인 디커플링구조와 같이  $G_1(s)$ 와  $G_2(s)$ 의 속도 차를 비교하여 동기제어를 실행할 경우,  $G_1(s)$ 이 외란의 영향을 받으면  $G_2(s)$ 도 속도를 변동시켜야 동기오차가 감소된다[9]. 이런 문제점을 보완하기 위해, 기준모델  $G_r(s)$ 을 동기제어시스템에 부가하고, 외란의 영향을 받지 않는 기준모델  $G_r(s)$ 의 속도  $y_r$ 과 실제 플랜트  $G_{1,2}(s)$ 의 속도  $y_{1,2}$ 를 비교하여 동기오차  $e_{s1,s2}$ 를 계산한다. 그리고 각 추진시스템마다 분리된 동기제어기  $C_{s1,s2}(s)$ 를 통해 동기오차를 억제하도록 동기제어시스템이 구성된다. 이때  $G_r(s)$ 의 속도  $y_r$ 은  $C_{s1,s2}(s)$ 가 포함된 컴퓨터에서 실시간으로 계산된다 [10].

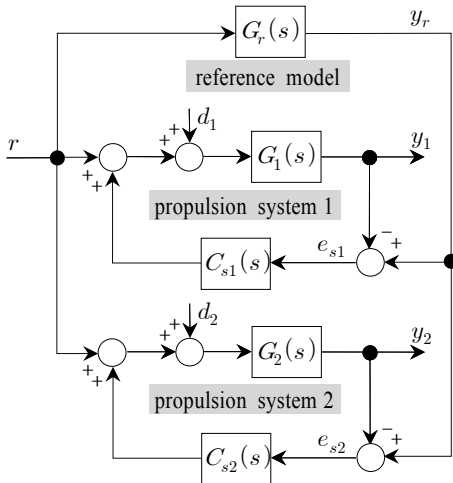


그림 6. 듀얼 전기추진시스템의 동기제어시스템  
Fig. 6 The synchronous control system for a dual electric propulsion system

### 3.3 동기제어기

그림 7은 동기제어기  $C_{si}(s)$ 를 설계하기 위해, 그림 6에서 기준모델  $G_r(s)$ 과 한 개의 속도제어시스템  $G_i(s)$ 를 분리하여 나타낸 것이다.

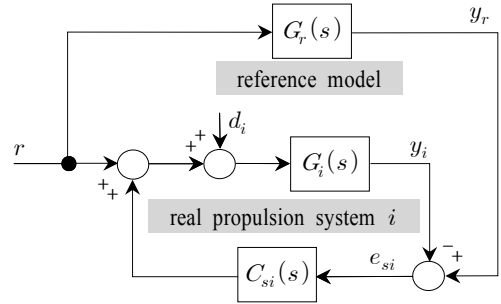


그림 7. 각 전기추진시스템의 동기제어시스템  
Fig. 7 The synchronous control system for each electric propulsion system

$G_r(s)$ 와  $G_i(s)$ 의 변위 차인 동기오차  $e_{si}(s)$ 는 식 (18)과 같다. 이때 첨자  $i=1,2$ 로 각 추진시스템에 관련된 신호와 기호를 구분하기 위한 숫자이며, 이하에서도 같다.

$$e_{si}(s) = y_r(s) - y_i(s) \quad (18)$$

그림 7에서  $C_{si}(s)$ 의 유무에 따른 동기오차  $e_{si}(s)$ 의 변화를 검토한다. 먼저 동기제어기  $C_{si}(s)$ 에 의한 피드백제어가 없으면,  $e_{si}(s)$ 는 식 (19)와 같다.

$$e_{si}(s) = (G_r(s) - G_i(s))r(s) - G_i(s)d_i(s) \quad (19)$$

그리고  $C_{si}(s)$ 를 포함한 피드백제어가 있으면,  $e_{si}(s)$ 는 식 (20)과 같다.

$$e_{si}(s) = -\frac{G_i(s)}{1+L_i(s)}d_i(s) + \frac{G_r(s) - G_i(s)}{1+L_i(s)}r(s) \quad (20)$$

여기서  $L_i(s) = G_i(s)C_{si}(s)$ 이다.  $e_{si}(s)$ 에 대해 식 (19), (20)을 비교하면, 식 (19)는  $G_r(s) = G_i(s)$ ,  $d_i(s) = 0$ 이면  $e_{si}(s) = 0$ 이 된다. 반면 식 (20)에서는  $G_r(s) \neq G_i(s)$ ,  $d_i(s) \neq 0$ 인 경우에도  $C_{si}(s)$ 를 적절히 설계하면  $e_{si}(s) = 0$ 이 가능하다.

이하에서는 동기오차를 신속하고 안정적으로 감소시키는 동기제어기를 설계한다. 식 (19), (20)에서  $G_r(s)$ 과  $G_i(s)$ 의 동특성 차는 동기오차  $e_{si}$ 를 발생시키는 하나의 요인이다. 이 동특성 차에 의해 발생되는 동기오차  $e_{si}$ 를 감소시키기 위해 각 추진시스

템의 속도제어기에 대한 설계지침인  $O_p$ ,  $T_s$ 를 동일하게 지정할 필요가 있다. 이렇게 결정된  $G_r(s)$ 와  $G_i(s)$ 는 식 (21)의 조건에 근접하게 된다.

$$G_r(s) = G_i(s) \quad (21)$$

식 (21)의 조건은 외란  $d_i(s)$ 가 없으면  $C_s(s) = 0$  일 경우에도 동기오차가 억제될 수 있음을 의미한다. 반면 외란  $d_i(s)$ 가 인가될 경우에는 동기오차를 감소시키기 위해 동기제어기  $C_{si}(s)$ 가 존재해야 한다. 설계된 각 추진시스템이 식 (21)의 조건을 만족하면 식 (20)은 식 (22)로 된다.

$$e_{si}(s) = -\frac{G_i(s)}{1 + G_i(s)C_{si}(s)} d_i(s) \quad (22)$$

식 (22)에서 동기제어기를  $C_{si}(s) = K_{psi}$ 로 두고, 최종치  $e_{ssi} = \lim_{t \rightarrow \infty} e_{si}(t)$ 와 비례제어기  $K_{psi}$ 의 관계는 식 (23)과 같다. 단,  $d_i(s) = D_i/s$ 이다.

$$e_{ssi} = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{G_i(s)}{1 + G_i(s)C_{si}(s)} d_i(s) = \frac{D_i}{1 + K_{psi}} \quad (23)$$

식 (23)에서 동기오차는 동기제어기  $C_{si}(s) = K_{psi}$ 에 반비례함을 확인할 수 있다. 이때 비례제어기  $K_{psi}$ 는 동기제어시스템의 감쇠성과 속응성을 고려하여 근궤적법(Root locus method)으로 설계한다.

#### IV. 시뮬레이션 및 고찰

설계된 제어시스템의 타당성을 검증하기 위해 이용되는 동일한 동특성을 갖는 추진시스템 1, 2의 계수값은 표 1과 같다. 이때  $O_p = 0.5\%$ ,  $T_s = 0.05[s]$ 로 설정하면 속도제어기의 계수값은  $K_p = 7.87 \times 10^{-2}$ ,  $T_i = 5.83 \times 10^{-3}$ 이 된다. 또한  $F(s) = 1/(T_i s + 1)$ 이다. 이 값들을 식 (11)에 대입하면 기준모델 및 내부루프에 해당하는 속도제어시스템의 전달함수는  $G_r(s) = G_i(s) = \frac{8650.1}{s^2 + 160.0s + 8650.1}$  이 된다.

표1. 전기추진시스템의 파라미터  
Table 1. Parameters of the electric propulsion system

| item  | value                 | unit                  |
|-------|-----------------------|-----------------------|
| $K_t$ | $2.26 \times 10^{-1}$ | Nm/A                  |
| $K_a$ | 5.0                   |                       |
| $K_e$ | $2.22 \times 10^{-1}$ | V/rad/s               |
| $R_a$ | 1.6                   | $\Omega$              |
| $J_m$ | $3.50 \times 10^{-4}$ | kgm <sup>2</sup> /rad |
| $b_m$ | $5.50 \times 10^{-3}$ | Nm/rad/s              |
| $J_p$ | $1.50 \times 10^{-4}$ | kgm <sup>2</sup> /rad |
| $b_p$ | $3.00 \times 10^{-2}$ | Nm/rad/s              |
| $n$   | 1/3                   |                       |

그리고  $C_{si}(s) = K_{psi}$ 는 동기제어시스템의 감쇠와 속응성을 고려하여 그림 8과 같은 근궤적법으로 설계한다. 이때  $K_{psi} = 4.38, 10.1, 18.1$ 인 경우 극점은 각각  $p_{1,2} = 80 \pm j200, 80 \pm j300, 80 \pm j400$ 이다.

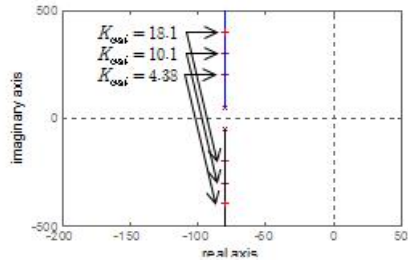


그림 8.  $1 + K_{psi}L_i(s) = 0$ 의 근궤적  
Fig. 8 Root locus of  $1 + K_{psi}L_i(s) = 0$

그림 9는 200[rpm]의 스텝지령과 추진시스템 1에 0.5[Nm]의 토크부하 하에서  $K_{psi} = 4.38, 10.1, 18.1$ 에 의한 동기오차  $e_{s1}(=y_r - y_1)$ 를 각각 나타내고 있다. 그림에서  $K_{psi}$ 가 증가되면 최대 동기오차는 감소하지만 상대안정성은 저하됨을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 동기제어기의 설계지침을 고려하여  $K_{psi} = 10.1$ 을 동기제어기  $C_{si}(s)$ 으로 선정한다.

앞에서 결정된 기준모델  $G_r(s)$ , 예비필터  $F_i(s)$ 와 속도제어기  $C_i(s)$ , 동기제어기  $C_{si}(s) = K_{psi}$ 로 그림 6과 같은 동기제어시스템을 구성하고, 시뮬레이션을 통해 설계된 제어시스템의 유효성을 확인한다.

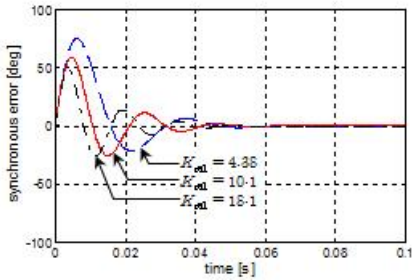
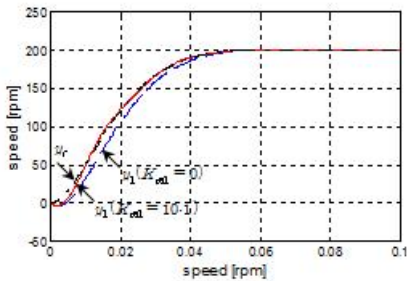
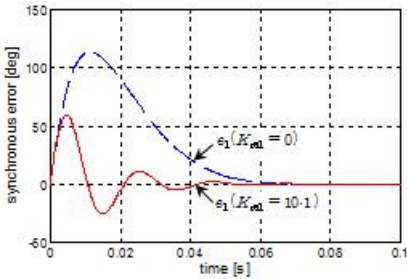


그림 9.  $K_{ps1} = 4.38, 10.1, 18.1$ 인 경우의 동기오차  
 Fig. 9 Synchronous errors in case of  $K_{ps1} = 4.38, 10.1, 18.1$



(a) 스텝응답  
 (a) step responses



(b) 동기오차  
 (b) synchronous errors

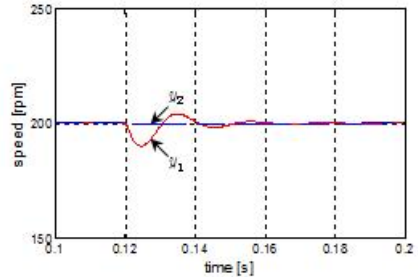
그림 10. 동기제어기의 유·무에 따른 스텝응답과 동기오차

Fig. 10 Step responses and synchronous errors with synchronous and without synchronous controller

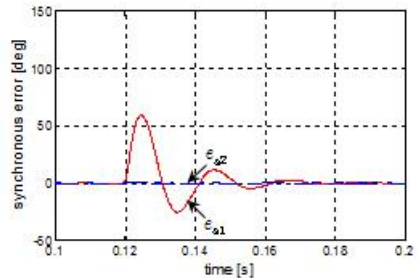
그림 10은 추진시스템 1에 0.5[Nm]의 부하가 인가된 상태에서 동기제어기의 유·무에 따른 응답을 나타내고 있다. (a)는 추진시스템 1의 속도  $y_1(K_{ps1} = 0)$ ,  $y_1(K_{ps1} = 10.1)$ , (b)는 동기오차  $e_{s1}(K_{ps1} = 0)$ ,  $e_{s1}(K_{ps1} = 10.1)$ 를 각각 나타내고 있다. 추진시스템 1에 인가된 외란은 PI제어기에 의해 제거되므로 동기

제어기가 없는  $K_{ps1} = 0$ 인 경우에도 동기오차  $e_{s1} = 0$ 이 된다. 반면 동기제어기  $K_{ps1} = 0$ 인 경우와 비교하여  $K_{ps1} = 10.1$ 일 경우에는 동기오차  $e_{s1}$ 가 보다 신속하게 감소되며, 동기오차의 최대치도 작아진다.

그림 11은 정상상태인 0.12[s]시점에서 추진시스템 1에 0.5[Nm]의 토크부하가 인가된 경우, 동기제어기  $K_{ps1} = 10.1$ 에 의한 응답이다. (a)는 정상상태에서 부하가 인가되어도 추진시스템 1의 속도제어기  $C_1(s)$ 에 의해 외란이 극복됨을 나타내고 있다. 또한 (b)는 동기제어기  $C_{s1}(s)$ 이 추진시스템 2와 관계없이 추진시스템 1만의 속도  $y_1$ 을 조절하여 동기오차  $e_{s1}$ 가 0으로 수렴됨을 나타내고 있다.



(a) 스텝응답  
 (a) speed responses



(b) 동기오차  
 (b) synchronous errors

그림 11. 외란 하에서 속도응답과 동기오차  
 Fig. 11 Speed responses and synchronous errors under disturbance

## V. 결 론

소형의 무인선, 어군탐지선 등에 듀얼 전기추진시스템을 적용하기 위해서는 외란 등에 의해 발생하는

좌·우 프로펠러 간의 속도 차를 신속하게 억제할 필요가 있다. 본 연구에서는 프로펠러 간의 속도 차인 동기오차를 제거하기 위해 기준모델, 동기제어기 등으로 구성되는 디커플링구조의 동기제어시스템을 구축하였다. 그리고 시뮬레이션으로 다음을 확인할 수 있었다. 먼저 기준모델은 외란이 인가되지 않은 추진시스템의 속도에 영향을 미치지 않고 동기오차를 억제하는 역할을 할 수 있었다. 그리고 동기제어시스템의 특성방정식을 이용하여 근계적법으로 설계된 동기제어기는 동기오차의 최대치를 감소시키면서 신속하게 동기오차를 제거할 수 있었다.

### References

- [1] N. Son and H. Yoon, "Study on a Waypoint Tracking Algorithm for Unmanned Surface Vehicle," *J. of Navigation and Port Research*, vol. 33, no. 1, 2009, pp. 35-41.
- [2] S. Nam, S. Kim, S. Son, H. Park, J. Son, S. Choi, and N. Jang, "Control and Measurement of Electric Propulsion System Using LabVIEW," *Proc. of the Korean Society of Marine Engineering Spring Conf.*, Gyeongju, Korea, June 2008, pp. 389-390.
- [3] W. Jeon, Y. Wang, and S. Jung, "Dynamic Characteristic Analysis at Each Operating Condition for Electric Ship Propulsion System," *J. of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 32, no. 8, 2008, pp. 1296-1302.
- [4] Y. Jeong, D. Lee, U. Jeong, C. Oh, and J. Shin, "Study on Operating Performance Estimation Process of Electric Propulsion Systems for 2.5 Displacement Ton Class Catamaran Fishing Boat," *J. of Ocean Engineering and Technology*, vol. 27, no. 5, 2013, pp. 1-9.
- [5] J. Byun and Y. Kim, "A Study on Construction of Synchronous Control System for Extension and Stability," *Trans. of the Korean Society of Mechanical Engineers*, vol. 26, no. 6, 2002, pp. 1135-1142.
- [6] Y. Shin, C. Chen, and A. Lee, "A novel cross-coupling control for Bi-axis motion," *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, vol. 42, no. 14, 2002, pp. 1539-1548.
- [7] S. Kwak and J. Yang, "Design of Brushless DC Motor Speed Control System for Handpieces," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 11, no. 6, 2016, pp. 597-603.
- [8] Y. Jeon, "Speed Control of the BLDC Motor using the Disturbance Observer," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 11, no. 10, 2016, pp. 955-962.
- [9] S. Jeong, D. Choi, and J. Park, "Synchronous Control of Center Distributed Multi-Head Embroidery Machine Using Disturbance Observer," *J. of the Korean Society of Precision Engineering*, vol. 31, no. 11, 2014, pp. 1015-1021.
- [10] K. Yang and J. Byun, "The Synchronous Control System Design for Four Electric Cylinders," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 11, no. 12, 2016, pp. 1209-1218.

### 저자 소개



#### 변정환(Jung-Hwan Byun)

1992년 부경대학교 기관공학과 졸업(공학사)

1995년 부경대학교 대학원 기관학과 졸업(공학석사)

1997년 부경대학교 대학원 제어기계공학과 졸업(공학박사)

2000년 ~ 현재 : 전남대학교 해양기술학부 교수

※ 관심분야 : 동기제어, 전기추진시스템