

## 전기추진선의 최대추력 운항을 위한 추력손실 억제에 관한 연구

김소연<sup>†\*</sup>, 윤영두<sup>\*\*</sup>, 설승기<sup>\*\*</sup>

해군 사관학교<sup>\*</sup>, 서울대학교 전기컴퓨터공학부<sup>\*\*</sup>

### Suppression of the Thrust Loss for the Maximum Thrust Operation in the Electric Propulsion Ship

So-Yeon Kim<sup>†\*</sup>, Young-Doo Youn<sup>\*\*</sup> and Seung-Ki Sul<sup>\*\*</sup>

Naval Academy<sup>\*</sup>

Seoul National University, School of Electrical Engineering & Computer Science<sup>\*\*</sup>

#### Abstract

This paper presents the thrust loss suppression algorithm in the electric propulsion ship. The thrust loss due to cavitation can be regarded as the disturbance torque. The disturbance torque is estimated by means of the disturbance observer. Considering the estimated disturbance torque, the speed reference of the propeller is modified to suppress the thrust loss. The experimental results which performed in the cavitation tunnel with electric machine operating system and its controller will be shown to verify the proposed algorithm.

※Keywords: Electric propulsion system(전기추진시스템), Cavitation(캐비테이션), Thrust loss(추력손실), Maximum thrust(최대추력), Disturbance observer(외란 관측기)

#### 1. 서론

전기에너지의 60% 이상이 전동기 구동에 이용될 정도로 전동기는 기계시스템의 가장 일반적인 원동력이라고 할 수 있다. 최근 내연기관이 주종을 이루는 수송분야에서도 전기적 구동력을 이용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 내연기관과 비교하여 전동기 구동 시스템의 장점은 다음과 같

이 정리할 수 있다.

- 1) 출력, 속도, 회전력(Torque)의 크기가 다양하다.
- 2) 다양한 형태의 기계적 외관으로 제작될 수 있어 기계적 구동력을 필요로 하는 곳에 손쉽게 부착될 수 있다.
- 3) 배기가스가 없고 내연기관에 비해 소음이 적다.
- 4) 내연기관, 가스터빈에 비해 반응속도가 빠르다.
- 5) 여타의 기계적 구동력에 비해 운전효율이 높고 무부하(No load) 손실이 적다.
- 6) 회전력을 회전방향에 관계없이 제어할 수 있어 효율적인 제동력(Braking torque), 구동력(Driving

접수일: 2006년 12월 26일, 승인일: 2007년 4월 19일

†교신저자: to-yeon57@hanmail.net, 055-549-1253

torque)을 얻을 수 있다.

7) 입력이 전기에너지이므로 상위 정보처리 시스템과 쉽게 연결될 수 있다.

이상의 일반적인 장점은 최근의 정보화 기술, 전력전자 기술의 발전에 따라 더욱 향상되고 있으며 특히 컴퓨터에 의한 직접적인 전력의 제어가 가능하여 수송분야의 무인화, 자동화가 손쉽게 이루어질 수 있다(설승기 2002).

선박 추진시스템의 경우 현재는 디젤기관과 스크류 프로펠러를 사용하는 선박이 주종을 이루고 있지만 엔진에서 추진축 그리고 프로펠러로 이루어지는 전통적인 추진방식이 아닌 새로운 개념의 추진방식이 개발되어 적용되고 있다(화우국제특허법률사무소 등 2004). 특히 전동기 기술의 발달에 힘입어 동력을 발생시키는 주기관 및 발전기는 선체 내부에 배치하고 전동기 및 추진기는 선체 외부에 배치될 수 있는 선회식 전기추진시스템이 개발되어 별도의 타(Rudder)가 불필요하고 복잡한 선미형상에 대한 근본적인 개선이 가능하게 되었다(SINM 2004).

전기추진시스템(Electric Propulsion System)은 통상의 '주기관-감속기어-축계-프로펠러'로 구성되는 추진방식이 '주기관-발전기-제어기-전동기-프로펠러' 추진방식으로 바뀐 것을 의미한다. 전기추진시스템은 동력의 변환과정을 거치면서 동력원으로부터 추진장치에 이르는 손실이 크다는 단점이 있으나 선박의 운항효율 관점에서는 축전달 효율 뿐만 아니라 저항, 추진 및 추진기의 추진효율도 고려하여야 하므로 전체 효율은 오히려 더 높아질 수 있다는 장점이 있다. 특히 주기관 동력을 전력으로 통합하여 추진시스템을 구동하고 기타 소요 전력을 분배함으로써, 추진용 엔진과 발전용 엔진을 통합할 수 있어 엔진의 종류 및 연결 구조를 단순화 할 수 있다는 장점이 있다(반석호 등 2001).

일반적으로 선박의 추진력(Thrust power)은 해상여유(sea margin)와 엔진여유(engine margin)를 고려하여 실제 동작점(service propulsion point)이 엔진 최대출력의 70-80% 정도가 되도록 결정된다(Woodward 1981, MAN Diesel group 2006). 특

히 군함과 같은 특수목적의 고속선은 저속엔진과 고속엔진을 따로 두어 고속에서 충분한 추진력을 얻을 수 있도록 설계된다. 한편, 고속 운항 시 프로펠러의 회전수가 점점 높아져 임계 회전수를 넘게 되면 캐비테이션(Cavitation) 현상이 심화되어 추력의 손실이 생기게 된다(Carlton 1994). 극단적인 경우에는 캐비테이션 때문에 배가 원하는 속도를 못 내는 경우도 생긴다. 이러한 이유로 선박 설계 시 캐비테이션에 의한 추력손실(Thrust loss)이 미미한 정도에서 최고속력이 결정된다. 이것은 기존의 엔진 추진시스템으로는 운항 중 추력의 손실 정도를 파악하기 어렵기 때문에 모형선 시험과 시운전으로 검증된 속도영역에서만 운항 하는 것이라고 볼 수 있다. 또한 선박 운항조건 변화로 검증된 속도영역에서도 추력손실이 심화되어 계획된 선속이 나오지 않아도 추력손실의 정도를 알 수 없으므로 연료 사용면에서 비효율적인 운항을 계속 할 수 밖에 없다.

본 논문은 전기추진시스템의 큰 장점인 전동기의 우수한 제어 성능을 이용하여, 프로펠러의 추력이 캐비테이션 때문에 제한되기 시작하는 현상을 추정함으로써 최고속력을 미리 결정해놓을 필요 없이 현재 선박의 운항조건에서 가능한 최대추력을 얻을 수 있는 방법을 제안하였다. 즉 선박이 최대 추진력을 얻고자 하는 경우, 운항조건이 변하더라도 추력의 손실을 최소화하면서 전동기의 최대 회전속도를 얻을 수 있다.

## 2. 전기추진시스템의 모델링

전기추진시스템은 추진력을 얻기 위하여 여러 가지 다양한 방법으로 구성될 수 있으나 가장 일반적인 구조는 Fig. 1 과 같이 동력원을 전기에너지로 변환시키는 발전기와 전동기, 전력변환장치, 제어기 그리고 추진기로 구성될 수 있다.

엔진 추진시스템과 달리 전기추진시스템은 전동기로부터 전류와 회전자 각 정보와 같은 신호 정보들을 얻을 수 있으므로, 제어기 연산에 의하여 전동기의 현재 속도와 토크를 계산해 낼 수 있다. 이러한 기능을 이용하면, 추진 시스템의 외부

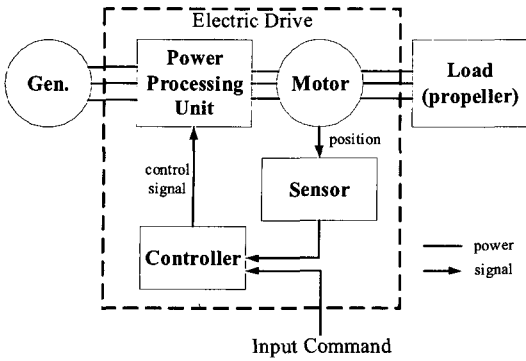


Fig. 1 Electric drive system block diagram.

상태 변화에 따라 요구되는 속도지령 또는 토크지령이 변하는 경우, 실시간으로 최적의 지령을 계산하여 제어기에 새로운 지령을 인가함으로써 시스템이 요구되는 최적의 운전 상태를 유지할 수 있다.

제어시스템을 구성하기 위해서는 우선 프로펠러 부하의 기계시스템을 모델링 해야 할 필요가 있다. 전동기 구동 기계시스템의 일반적인 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e = J_{eq} \frac{d\omega_{rm}}{dt} + B\omega_{rm} + T_d \quad (1)$$

여기서,  $T_e$  는 전동기의 토크[ Nm ],  $\omega_{rm}$  은 전기자의 회전각 속도[ rad/s ]를 기계각 (mechanical angle)으로 표시한 것이며,  $J_{eq}$  는 전동기가 구동하는 전체 시스템의 관성 [ kg-m<sup>2</sup> ],  $B$  는 시스템의 마찰계수 [ Nm/(rad/s) ]를 나타낸다.  $T_d$  는 시스템의 외란 토크[ Nm ]로써 속도에 따라 비선형적으로 변동하는 변수이다.

그러나 전기추진시스템의 부하인 프로펠러는 물속에서 회전운동을 하게 되므로 식 (1)은 유체의 이송과 관련된 토크 방정식이 추가되어야 한다. 일반적으로 팬 부하 기계시스템의 경우 유체를 이송하기 위해서 정상상태에서의 필요 토크는 전동기 회전속도의 제곱에 비례한다. 따라서 전동기의 회전속도뿐만 아니라 프로펠러를 지나는 유속에 의해서 영향을 받는 기계시스템의 모델링은 식

(2)와 같다.

$$T_e = J \frac{d\omega_{rm}}{dt} + B\omega_{rm} + A\omega_{rm}^2 + CV_A + DV_A^2 + E\omega_{rm}V_A + T_d \quad (2)$$

그런데 유속을 실시간으로 바꿀 수 없는 본 연구의 실험여건상, 전동기 회전에 의한 유속변화 이외에 유속을 변화시키는 외부 요소가 없다고 가정하면 유속은 전동기의 회전속도에 비례하여 변동하게 된다. 따라서 식 (2)에서 유속을 전동기 회전속도에 포함시키면 식 (3)을 얻을 수 있다.

$$T_e = J \frac{d\omega_{rm}}{dt} + B'\omega_{rm} + A'\omega_{rm}^2 + T_d \quad (3)$$

$B'$  는 전동기의 회전속도에 따른 마찰토크,  $A'$  는 유체를 이송하기 위하여 정상상태에서 필요로 하는 토크 계수[ Nm/(rad/s)<sup>2</sup> ]이다.

### 3. 외란 관측기의 설계 및 지령 수정 알고리즘의 제안

#### 3.1 외란 관측기의 설계

프로펠러에 캐비테이션이 과도하게 발생하게 되면 시스템의 외란이 현저하게 증가하고, 이는 시스템의 모델 식 (3)에서 외란 토크,  $T_d$  의 증가로 나타난다. 따라서 외란 관측기(Disturbance observer)를 구성함으로써 시스템의 외란을 추정할 수 있고 캐비테이션의 증가로 인한 추력의 손실을 파악할 수 있게 된다. Fig. 2 는 기존의 속도 제어시스템에 외란 관측기를 추가한 후, 추정된 외란 토크를 이용하여 속도지령을 수정함으로써 제어기에 새로운 지령을 인가하는 시스템의 구성도이다.

전차원 상태 관측기를 이용하여 외란 토크를 추정하는 방법은 관측기의 수행 시간 동안 외란 토크의 변화량이 영이라고 가정하고 그에 대한 관측기를 구성하는 것이다.

식 (3)의 시스템 모델로부터 시스템의 상태변수에 외란 토크,  $T_d$  를 부가하여 구하면 상태변수에 관한 식을 얻을 수 있다. 그러나 식 (3)이 비선형

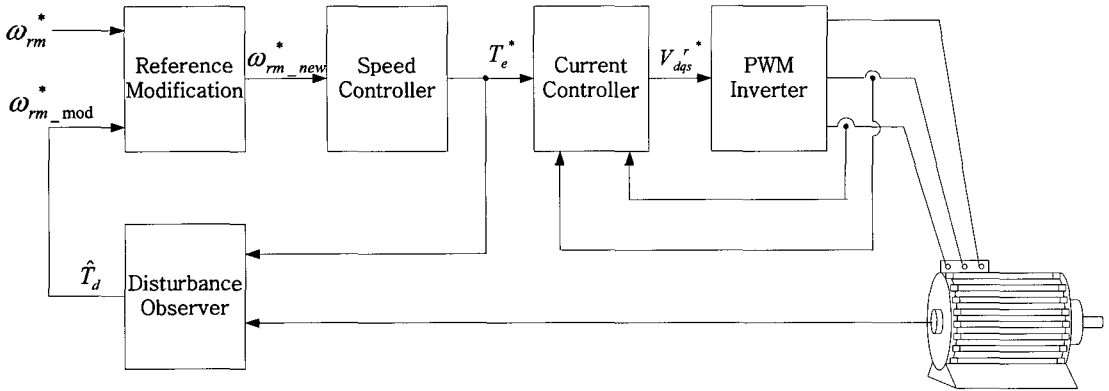


Fig. 2 Speed control system with disturbance observer.

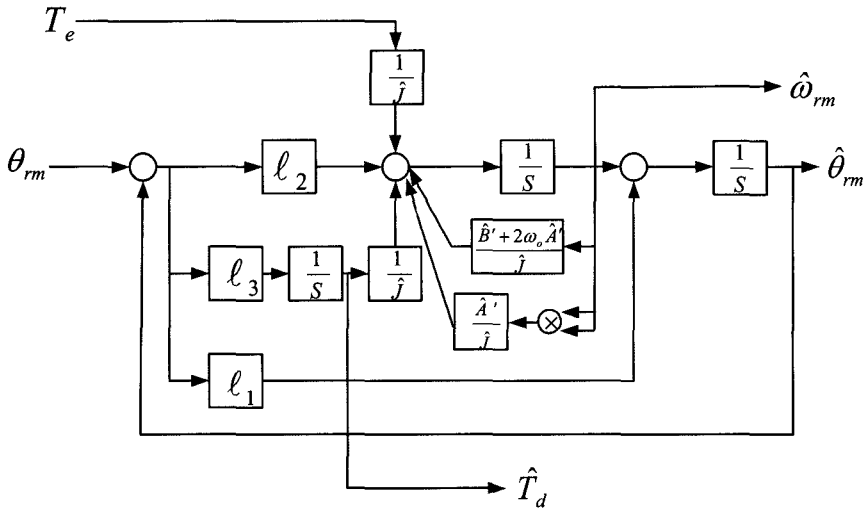


Fig. 3 Disturbance torque estimation using a full order observer in the continuous-time domain.

방정식이므로  $\omega_{rm}^2$  항을 동작적( $\omega_o$ )에서 선형화 시켜 수식을 전개한다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_{rm} \\ \dot{\omega}_{rm} \\ \dot{T}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B' + 2\omega_o A'}{J} & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{rm} \\ \omega_{rm} \\ T_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J} \\ T_d \end{bmatrix} T_e + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{A'}{J} \\ 0 \end{bmatrix} \omega_o^2 \quad (4)$$

페루프 관측기는 대상 시스템을 그대로 복사하여 개루프 관측기를 구성한 후 출력의 오차에 이득 행렬을 곱하여 그 극점의 위치를 임의로 조절

할 수 있다. 식 (4)의 기계시스템을 이용하여 페루프 관측기를 구성하면 식 (5)와 같고 이를 연속 시간 영역에서의 블록 다이어그램으로 나타내면 Fig. 3 과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_{rm} \\ \dot{\omega}_{rm} \\ \dot{T}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{\hat{B}' + 2\omega_o \hat{A}'}{\hat{J}} & -\frac{1}{\hat{J}} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta}_{rm} \\ \hat{\omega}_{rm} \\ \hat{T}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{\hat{J}} \\ \hat{T}_d \end{bmatrix} T_e + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\hat{A}'}{\hat{J}} \\ 0 \end{bmatrix} \omega_o^2 + \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{bmatrix} (\theta_{rm} - \hat{\theta}_{rm}) \quad (5)$$

여기서 비례이득( $l_1, l_2, l_3$ )은 만족스러운 추정 오차 특성을 얻기 위해 설계자가 설정하는

값이다.

3.2 지령 수정 알고리즘의 제안

전동기의 속도가 증가할수록 캐비테이션의 발생 정도가 증가하므로 외란 토크도 점점 증가하게 된다. 따라서 추력의 손실을 최소화하기 위해서는 속도 지령이 증가해도 외란 토크를 최소 상태에서 유지할 수 있도록 지령속도를 수정해 주어야 할 필요가 있다.

외란 토크를 줄이기 위하여 목적함수를 다음과 같이 잡았다.

$$J = \frac{1}{2}(\Delta T_d)^2 \tag{6}$$

$$\Delta T_d = \hat{T}_d - T_d^* \tag{7}$$

여기서,  $T_d^*$ 는 추력 손실 발생시의 외란 토크 지령이고,  $\Delta T_d$ 는 외란 토크와 외란 토크 지령 사이의 오차를 나타낸다.

지령은 식 (8)과 같은 방법으로 수정된다.

$$\dot{\omega}_{rm\_mod}^* = k \cdot \nabla J \tag{8}$$

여기서,  $k$ 는 이득이다.

외란의 상태는 다음과 같은 식으로 근사화가 가능하다고 가정할 수 있다.

$$T_d = \begin{cases} a(\omega_{rm} - \omega_o)^2, & \omega_{rm} \geq \omega_o \\ 0, & \omega_{rm} < \omega_o \end{cases} \tag{9}$$

여기서,  $\omega_o$ 는 추력 손실이 나타나는 임계 속도이고,  $a$ 는 상수이다.  $\omega_o$ 와  $a$ 는 운전 환경에 따라 변동한다.

따라서, 식 (8)은 다음과 같이 전개할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_{rm\_mod}^* &= k \cdot \nabla J = k \cdot \frac{\partial J}{\partial \omega_{rm}} \\ &= k \cdot \Delta T_L \cdot 2a(\omega_{rm} - \omega_o) \end{aligned} \tag{10}$$

식 (10)의  $\omega_o$ 와  $a$ 는 정확히 추정할 수 없으므로, 식 (10)을 간단히 하여 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\omega}_{rm\_mod}^* \approx \beta \cdot \Delta T_d \tag{11}$$

$$\dot{\omega}_{rm\_mod}^* \approx \int \beta \cdot \Delta T_d dt \tag{12}$$

수정된 속도 지령은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\omega_{rm\_new}^* = \omega_{rm}^* - \omega_{rm\_mod}^* \tag{13}$$

알고리즘의 오작동을 막기 위해  $\omega_{rm\_mod}^*$ 가 0 미만으로 나타나는 경우는 0으로 제한하였다.

이상의 제어 시스템 구성요소를 전체적으로 나타내면 Fig. 4와 같다.

제안된 알고리즘은 추력 손실이 발생하는 어떤 속도 지령이 인가되어도 추정된 외란 토크가 외란 토크 지령이 되도록 속도 지령이 수정된다. 이 때 외란 토크의 지령은 전동기 정격 토크의 수 %가 되도록 알고리즘에서 설정해 주면 된다.

4. 실험 및 분석

4.1 실험 장치의 구성

우선 캐비테이션이 발생할 수 있는 압력조건을 맞추어주기 위해 캐비테이션 터널을 이용한다. 모형 전기추진시스템은 추진전동기와 모형 프로펠러 그리고 추진축과 추력센서로 구성된다. 전동기의 구동력은 고무벨트로 연결된 구조를 통하여 전달된다. 또한 프로펠러의 추진축으로 전달되는 추력은 추진축 내부에 장착된 스트레인 게이지 타입의 센서를 사용한다. 추진시스템의 전력 변환부는 PWM 인버터와 스위칭 신호 구동회로(gate driver circuit)로 구성되며, 제어기의 구현을 위해 고성능 DSP인 TMS320VC33을 적용한다. Fig. 5는 실험 장치의 전체적인 구성도를 보인 것이다. 2kW 동기 추진전동기와 모형 프로펠러의 상세한 제원은 Table 1과 Table 2에 표기하였다.

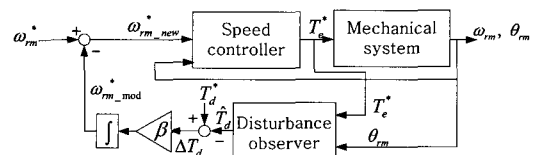


Fig. 4 Reference modification algorithm

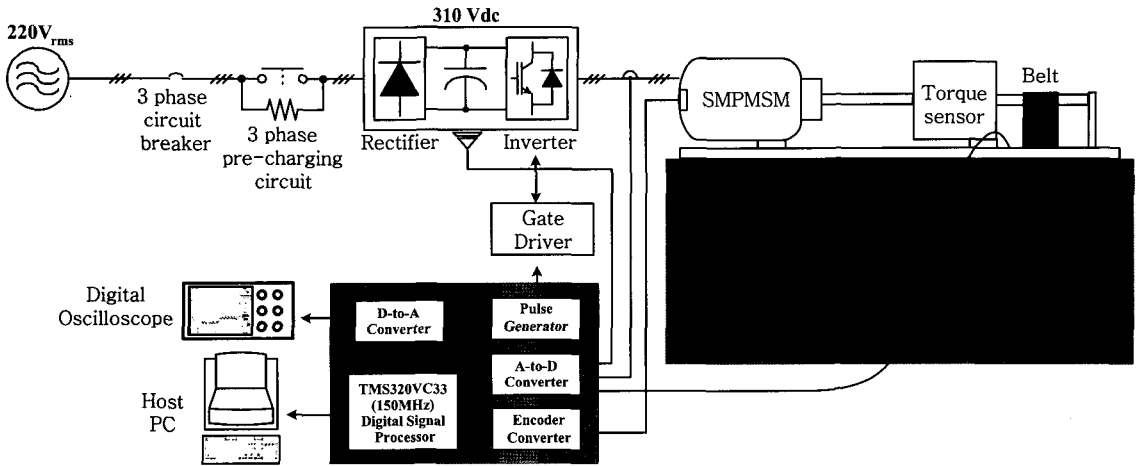


Fig. 5 Configuration of experimental set-up.

Table 1 Characteristic of Model propeller.

Number of Blades	5
Diameter	0.146 m
Expanded Area ratio	0.725
Pitch ratio	1.2

Table 2 Parameters of 2kW SPMSM.

Rated Power	2 kW
Rated Torque	9.55 Nm
Rated Speed	2000 r/min
Number of Poles	8
Torque constant	0.678 Nm/A <sub>rms</sub>

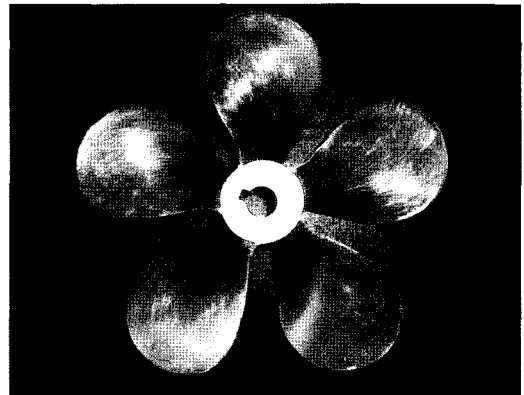


Fig. 6 Photo of model propeller.

실험에 사용한 모형 프로펠러는 Fig. 6 에 보이고 있으며 캐비테이션 터널의 계측부에 장착한 모형 전기추진시스템은 Fig. 7 에 나타내었다.

#### 4.2 실험 결과 및 분석

실험의 초기 조건으로 캐비테이션 터널의 압력을 120[mmHg(mercury)]로 감압하고 초기 유속은 1[m/s]로 설정하였다. 기계시스템의 채정수인  $B'$  과  $A'$  을 산출하기 위해서 캐비테이션이 발생 하지 않는 속도인 200[r/min]에 1300[r/min]

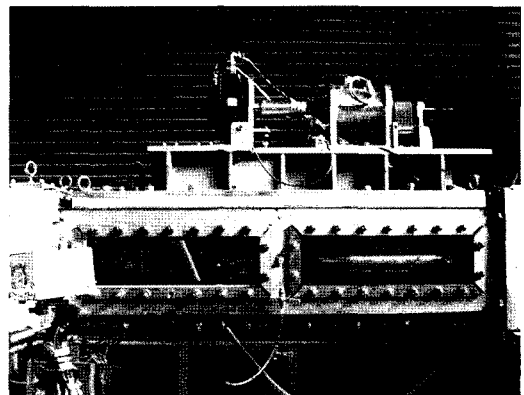


Fig. 7 Photo of electric propulsion system.

까지의 영역에서 회전속도에 따른 전동기 토크를 계속하였다.

우선 추력손실 현상을 확인하기 위하여 전동기의 속도를 400[r/min]부터 2400[r/min]까지 200[r/min]씩 올리면서 그 때의 전동기 토크와 추력, 외란 토크를 관측하였으며 그 결과는 Fig. 8 과 같다.

1600[r/min]까지는 토크와 추력 모두 증가하고 있으며 외란 토크는 1200[r/min]까지는 거의 영으로 보이나 기계 정수의 오차로 인하여 1400[r/min]과 1600[r/min]에서는 약간 양의 값으로 증가하는 경향이 있다. 그러나 1800[r/min]부터는 토크와 추력 모두 거의 증가하지 않고 있으며 반면 외란 토크는 음의 값으로 현저하게 증가하고 있다. 2400[r/min]에서 약 3[Nm]까지 증가하였다.

이러한 토크와 추력의 감소량은 대기압과 감압 상태에서 비교하면 더욱 명확하게 알 수 있다. Fig. 9 는 그 비교 결과를 보여주고 있으며 앞의 실험 결과와 마찬가지로 1800[r/min]에서 현저하게 감소하고 있다. 2400[r/min]에서 토크의 감소량이 약 3[Nm]로 외란 토크의 감소량과 거의 일치하는 것을 볼 수 있다.

다음은 스트로보스코프를 이용하여 프로펠러에 발생하는 캐비테이션 현상을 관측한 결과를 Fig. 10

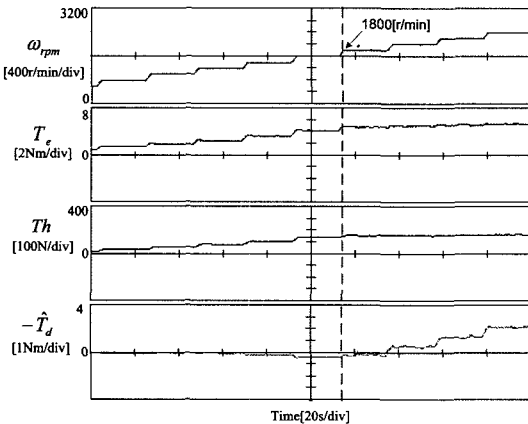
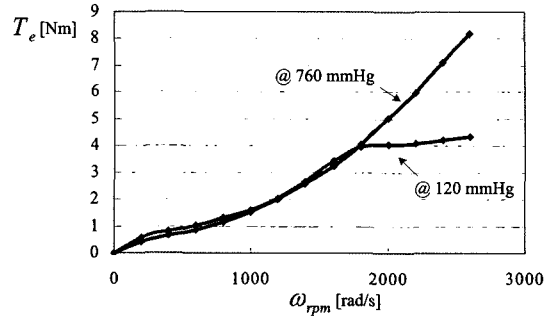
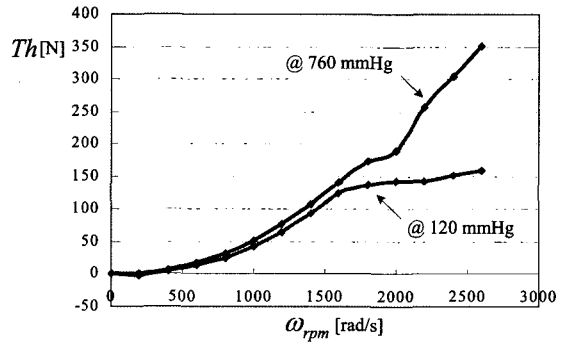


Fig. 8 Phenomenon of thrust loss.



(a) Torque loss



(b) Thrust loss

Fig. 9 Comparison of torque loss and thrust loss at different pressure.

에 보이고 있다. 캐비테이션이 발생한 이후, 추력이 계속해서 증가하는 구간에서는 캐비테이션이 날개 끝을 약간 덮고 있으나 추력이 더 이상 증가하지 않는 구간에서는 캐비테이션이 날개 전체를 덮고 있는 것을 확인할 수 있다.

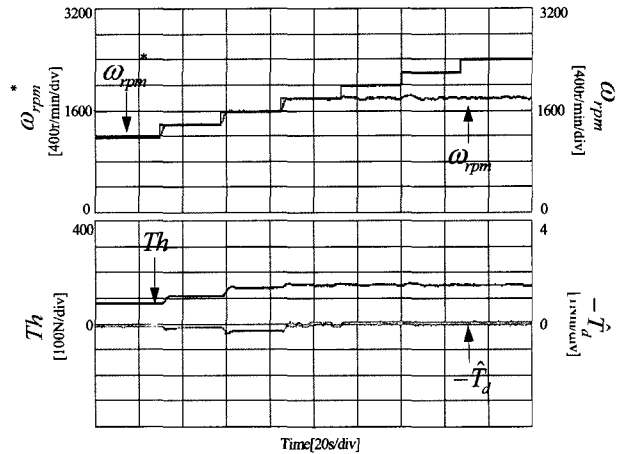
이상의 추력손실 현상에 대한 실험 결과를 바탕으로 제안한 알고리즘을 적용하여 추력손실을 최소화하면서 최대추력을 얻는 실험 결과를 보이도록 하겠다. Fig. 11 은 외란 토크의 지령은 정격의 1%인 0.1[Nm]로 설정하였고, 속도 지령은 800[r/min]부터 2400[r/min]까지 200[r/min]씩 올리면서 그 때의 실제 속도와 추력, 외란 토크를 관측하였다.

1800[r/min]에서 최대 추력을 나타내고 있다. 따라서 2000[r/min]부터 증가하는 속도 지령에 대해서 실제 속도는 약 1850[r/min]정도로 감소

하여 제어되고 있다. 이때 외란 토크는 외란 토크 지령의 크기로 일정하게 제어되고 있다. 그리고 속도 지령과 실제 속도의 차이인 속도지령 수정항의 크기는 점점 증가하고 있다.

다음으로 3000[r/min]의 속도 지령을 인가한 결과이다. 실제 선박의 경우 속도 지령을 천천히 올리게 되므로 본 실험에서도 초당 100[r/min]의 기울기로 속도를 증가시켰다.

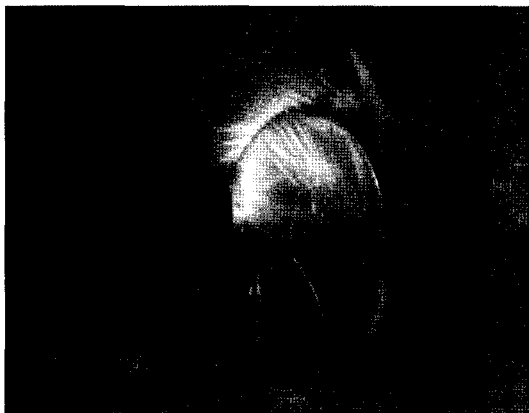
외란 토크의 지령은 정격 토크의 5%인 0.5[Nm]로 설정하였다. 추력의 손실이 발생하는 3000[r/min]과 2200[r/min]의 지령에 대해서는 실제 속도가 약 2000[r/min]에서 제어되고 있으며 추력의 손실이 발생하지 않는 그 이하의



(a) Thrust and disturbance torque

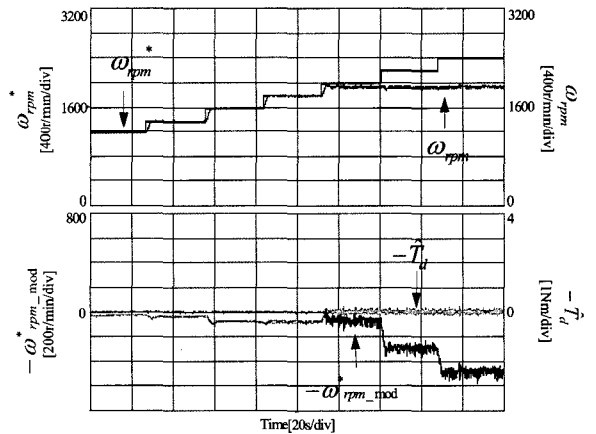


(a) @1500[r/min]



(b) @2000[r/min]

Fig. 10 Photo of propeller cavitation.



(b) Speed reference modification

Fig. 11 Experimental result of proposed algorithm 1.

속도 지령에 대해서는 실제 속도가 수정 되지 않고 그대로 추종하고 있다. 즉 선박이 최대 추력을 얻는 방법에 있어서, 아무리 높은 속도지령이 인가되어도 추력의 손실이 발생하면동기의 속도를 감소시켜 추력의 손실을 최소화하면서 최대추력을 얻는 결과를 보여주고 있다.

이러한 추력손실 현상, 즉 최대추력의 제한은 캐비테이션의 발생조건에 따라 더 높은 속도에서 생길 수도 있고 또는 더 낮은 속도에서 생길 수도



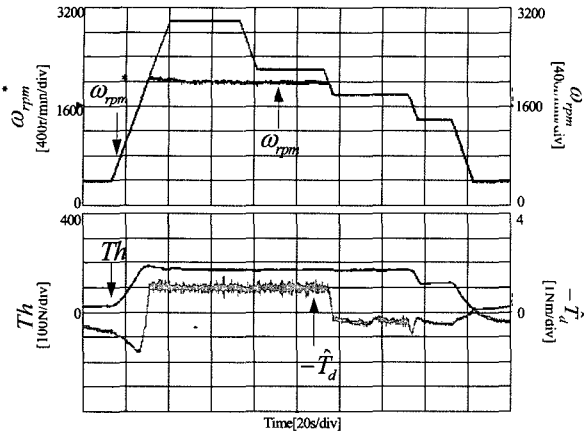


Fig. 12 Experimental result of proposed algorithm 2.

있다. 다음은 캐비테이션 터널의 압력을 바꾸어, 프로펠러에 작용하는 압력을 높여봄으로써 최대추력을 좀 더 얻을 수 있는 상황에서의 알고리즘 성능을 확인해보도록 한다.

Fig. 13 은 2200[r/min]의 속도 지령에 대해서 실제속도가 1950[r/min]으로 제어가 되고 있다. 캐비테이션 터널의 압력을 120[mmHg]에서 170[mmHg]로 변화시켰을 때의 결과를 보여주고 있다. 추력은 다시 증가하고 외란 토크는 감소하고 있으며 이때 실제 속도는 수정되지 않고 2200[r/min]의 속도 지령을 따라서 증가하고 있다. 그러나 압력을 바꾼 후 다시 속도 지령을 2400[r/min]으로 증가시키면 외란 토크가 증가하므로 알고리즘이 동작하여 외란 토크 지령의 크기로 제어가 되고 있으며 실제 속도도 2200[r/min]에서 다시 제어가 되고 있다.

### 5. 결론 및 향후 과제

선박이 최대 추진력을 얻기 위하여 프로펠러의 회전속도를 증가시키는 경우, 임계 회전속도를 넘어가게 되면 프로펠러에 캐비테이션이 과도하게 발생하여 전달할 수 있는 추력이 제한된다. 그래서 기존의 엔진 추진시스템을 갖추고 있는 선박의

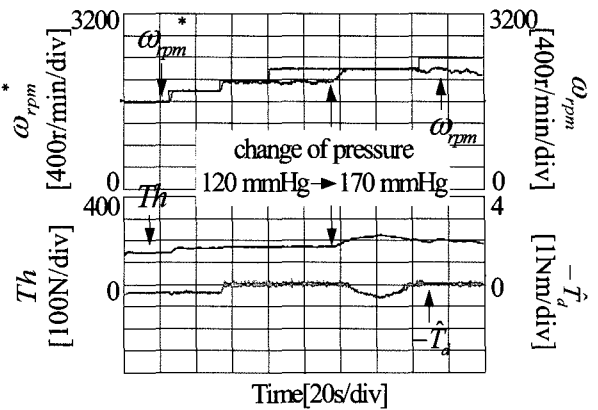


Fig. 13 Experimental result of control performance during pressure change.

설계 관점에서는 이러한 추력의 제한이 발생하지 않는 속도영역에서 최대추력, 곧 최고속력이 결정된다. 그러나 캐비테이션은 선박의 톤수나 해양 밀도와 같은 운항 조건이 변하면 발생 환경이 변하므로 추력이 제한되기 시작하는 프로펠러의 최대 회전속도는 변동할 수 있다.

본 논문에서는 모형 전기추진시스템을 구성하여 프로펠러가 고속으로 회전할 때 발생하는 추력손실 현상을 확인하였고 외란 관측기를 이용하여 선박의 추력손실을 추정할 수 있음을 증명하였다. 또한 지령 수정 알고리즘을 적용하여 추력손실을 최소화하는 전동기의 속도로 제어함으로써 보다 효율적으로 최대추력을 얻는 방법을 제안하였다. 무엇보다도 본 논문은 전기추진선의 기존 제어시스템에서 하드웨어의 추가 없이 소프트웨어의 구성만으로 제안한 알고리즘의 성능을 구현할 수 있음을 보였다.

마지막으로 본 논문에서는 실험여건의 제한으로 수행하지 못한 유속의 변화가 있는 경우에 대한 실험이 이루어져야 한다. 그리고 고속 운항 선박의 추력손실 현상에 대해서 본 논문에서는 프로펠러의 캐비테이션 현상만을 고려하였으나 향후 실제 운항 상황과 모형 실험 조건에 대한 좀 더 명확한 이론이 성립되어야 할 필요가 있다.

참 고 문 헌

- 반석호, 이춘주, 김우전, 조용진, 김도현, 2001, 함정 설계기술 기반 구축 연구(Ⅶ)-함 외모타 전기추진형 선형/체계 개발, 해군조함단 연구보고서 BSG0042-2338(5).
- 설승기, 2002, 전기기기 제어론, 홍릉과학출판사, 서울.
- 화우국제특허법률사무소, 이영규, 김문찬, 전호환, 2004, 2004 년도 PM 보고서 선박추진 기술, 특허청 한국발명진흥회.
- Carlton, J.S., 1994, Marine Propellers and Propulsion, Butterworth-Heinemann Ltd.
- MAN Diesel Group Technical Paper, 2006, Basic Principles of Ship Propulsion, <http://www.manbw.com/files/news/files0f3859/P254-04-04.pdf>.
- SINM, 2004, Focus on Propulsion POD, [http://www.sinm.it/downloads/ENG\\_POD.pdf](http://www.sinm.it/downloads/ENG_POD.pdf).
- Woodward, J.B., 1981, Low Speed Marine Diesel, John Wiley & Sons, Inc.



< 김 소 연 > < 윤 영 두 > < 설 승 기 >