

함정 추진전동기 진동 분석

Vibration Analysis of Electric Motor Propulsion System of Naval Vessel

이경현 † · 한형석 * · 박성호 *
KyoungHyun Lee, HyungSuk Han and Sungho Park

1. 서 론

수중소음은 해군 함정의 생존성과 매우 밀접한 관련이 있으며 세계 각국의 해군에서는 함정의 수중소음을 저감하기 위해 많은 투자가 이루어지고 있다. 따라서 근래에 건조되고 있는 해군함정들은 디젤엔진에 비해 진동/소음 특성이 뛰어난 추진전동기가 탑재되고 있다.

추진전동기가 탑재된 함정은 CIS(Cavitation Inception Speed) 미만의 속력에서 추진축계의 비틀림 진동은 비중이 큰 소음원 중 하나이다. 따라서 추진전동기 탑재 함정의 추진축계와 전동기의 토크를 수학적으로 모델링하여 비틀림 진동을 해석하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 함정의 추진축계 및 전동기의 토크를 수학적으로 모델링하고자 한다.

2. 추진축계의 모델링

2.1 추진축계의 다자유도 진동 모델

축계 비틀림진동의 수학적모델링에 사용된 추진전동기 탑재함정의 추진축계시스템은 Fig 1 과 같다.

추진축계 시스템은 다절점 진동모델로 모델링되었으며 각 질량절점에서는 자유도를 회전방향으로만 갖는다고 가정하였다. 추진축계에서 회전질량을 갖는 부분은 모터의 로터, 플렉시블 커플링의 외부, 내부, Thrust Shaft, 축 커플링, 프로펠러+해수로 질량절점으로 모델링하였다. 추진축계 시스템은 질량절점이 비틀림강성을 갖는 요소로 연결되며 비틀림토크는 연결요소의 탄성력에 의해 전달되게 모델

링되었다. 그리고 질점에서 비틀림운동에 의한 감쇠 효과는 프로펠러에서만 발생한다고 가정하였다.

2.2 추진축계 진동방정식 유도

추진축계의 진동방정식은 식(1)의 Lagrange's

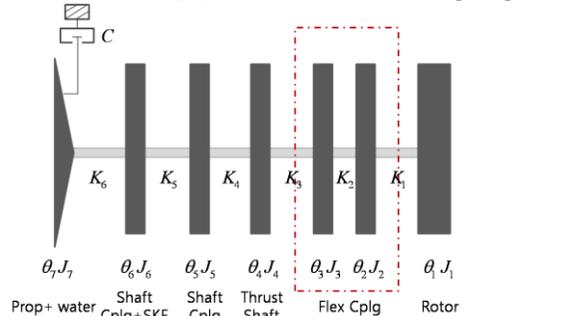


Fig 1 . Modeling of a Propulsion system

equations을 통해 유도된다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial U}{\partial q_i} = Q_i \quad (1)$$

여기서 T 는 시스템의 운동에너지이며 Q 는 시스템의 위치에너지이다. 시스템의 운동에너지는 다음과 같이 유도된다.

$$T = \frac{1}{2} \left[J_1 \left(\frac{d}{dt} \theta_1 \right)^2 + J_2 \left(\frac{d}{dt} \theta_2 \right)^2 + J_3 \left(\frac{d}{dt} \theta_3 \right)^2 + J_4 \left(\frac{d}{dt} \theta_4 \right)^2 + J_5 \left(\frac{d}{dt} \theta_5 \right)^2 + J_5 \left(\frac{d}{dt} \theta_5 \right)^2 \right] \quad (2)$$

시스템의 위치에너지 Q 는 기계적위치 Q_{mech} 와 모터의 에어갭(air gap)에 내제된 자기자의 위치에너지 Q_{magn} 의 합으로 나타낼 수 있다.

$$Q = Q_{mech} + Q_{magn} \quad (3)$$

Q_{mech} 는 연결요소의 탄성에너지이며 다음과 같이 유도된다.

$$Q_{mech} = \frac{1}{2} \left[K_1 (\theta_1 - \theta_2)^2 + K_2 (\theta_2 - \theta_3)^2 + K_3 (\theta_3 - \theta_4)^2 + K_4 (\theta_4 - \theta_5)^2 + K_5 (\theta_5 - \theta_6)^2 \right] \quad (4)$$

† 교신저자; 정회원, 국방기술품질원

E-mail : leekh@dtaq.re.kr

Tel : 051-750-2566, Fax : 051-758-3992

* 국방기술품질원

에어갭 내부의 자기장의 위치에너지는 다음과 같이 에어갭 내부의 공간에 대한 적분으로 표현할 수 있다.

$$Q_{magn} = \frac{1}{2\mu_0} \int_V B^2 dV \quad (5)$$

μ_0 는 공기의 투자율이며 B 는 에어갭 내부의 자속밀도이다. B 는 영구자석형 모터의 경우 에어갭 내부에서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$B(\hat{\theta}, \theta_1) = B_r(\hat{\theta}) \frac{h_m}{h_m + g(\hat{\theta}, \theta_1)} \quad (6)$$

여기서 $\hat{\theta}$ 는 영구 자석을 기준으로 한 좌표계에서의 각도이며 h_m 은 영구자석의 두께이다. 각 기호에 대한 설명은 Fig 2에 표시되어 있다. B_r 의 분포를 근사화 하면 Fig 3과 같이 나타낼 수 있으며 $B_r^2(\hat{\theta})$ 은 주기함수이기 때문에 푸리에급수를 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$B_r^2(\hat{\theta}) = \sum_n B_{rn} \cos 2np\hat{\theta} \quad (7)$$

여기서 p 는 극수이며 B_{rn} 은 푸리에 급수의 계수이다. 로터의 회전에 따른 에어갭의 변화를 표현한 함수 $\frac{h_m}{h_m + g(\hat{\theta}, \theta_1)}$ 역시 주기함수이기 때문에 푸리에 급수를 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$\left(\frac{h_m}{h_m + g(\hat{\theta}, \theta_1)} \right)^2 = \sum_n G_n \cos nz(\hat{\theta} + \theta_1) \quad (8)$$

여기서 z 는 슬롯의 개수이다.

(1) 식을 통해 다자유도계 진동방정식을 유도하면 식 (9)와 같다.

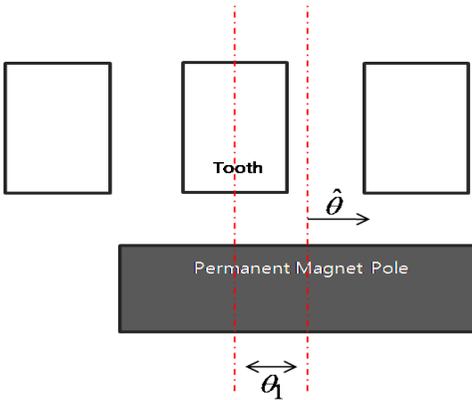


Fig 2. Coordinate system of airgap

$$\begin{bmatrix} J_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \\ \ddot{\theta}_4 \\ \ddot{\theta}_5 \\ \ddot{\theta}_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \\ \dot{\theta}_5 \\ \dot{\theta}_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 & -K_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -K_1 & K_1 + K_2 & -K_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -K_2 & K_2 + K_3 & -K_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -K_3 & K_3 + K_4 & -K_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -K_4 & K_4 + K_5 & -K_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -K_5 & K_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \\ \theta_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{magn}}{\partial \theta_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{em}(t) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서 T_{em} 은 로터에 작용하는 전자기 토크이며 이는 시간에 대한 함수로 표현되고 외력으로 작용한다. 그리고 (7), (8)을 (5)에 대입하면 코깅토크 T_{cog} 는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial Q_{magn}}{\partial \theta_1} = T_{cog}(\theta_1) = \frac{\pi z L}{4\mu_0} (R_2^2 - R_1^2) \times \left(\sum_{n=1}^{\infty} n G_n B_r(nz/p) \sin nz\theta_1 \right) \quad (11)$$

3. 결론

본 연구를 통해서 추진전동기 추진시스템이 탑재된 함정의 추진축계의 비틀림진동을 코깅토크와 전자기토크가 포함된 수학적모형을 구성하였다. (9)식은 수치해석법인 Runge-Kutta Method를 활용하여 Initial value problem을 풀게 되면 비틀림 진동계의 steady-state response 및 transient response를 얻을 수 있으며 이는 함정 추진축계 진동 문제 해결에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.