

# 4 축지지 중형선박엔진용 MR 마운트의 진동제어성능 평가

## Control Performance Evaluation of MR Mounts for 4-supported Medium Speed Diesel Engine

박준희\* · 도쭈웬푸\* · 우제관\* · 최승복 †  
**Joon Hee Park, Do Xoan Phu, Jae Kwan Woo and Seung-Bok Choi**

### 1. 서 론

선박에 설치되는 각종 구조물 중 중대형 디젤엔진 발전기세트는 작동 시 매우 큰 크기의 기진력을 발생시킨다. 이는 주변으로 상당한 진동과 소음을 유발하여 승객이 느끼는 승선감과 운송체 자체의 내구성에 큰 영향을 미치게 된다. 특히 엔진작동영역 중 공진점에서 발생하는 강체모드와 유연체모드의 진동은 그 수준이 더욱 크므로 진동을 줄이기위한 방안이 필수적이며 이를 위한 연구가 오래전부터 이루어져 왔다.

이 연구에서는 엔진의 진동을 저감시키기 위한 MR 유체 마운트가 선박엔진에 실적용 되었을 때 실제 제 성능을 다할 수 있을지 예측하기 위하여 Matlab 을 통하여 시뮬레이션 하였다.

### 2. 제어알고리즘 설계

#### 2.1 엔진시스템 모델링

제어알고리즘을 설계하기 위해서는 엔진시스템의 동적 거동을 표현하는 지배식을 필요로 한다. 특히나 이번 연구에서는 선박엔진의 유연체모드가 아닌 강체모드의 진동제어를 평가하였다. 따라서 엔진을 강체로 가정하였고 MR마운트로 4축 지지된 엔진으로부터 다음과 같은 지배식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 F_V - k_1z + k_1b\theta + k_1c\phi - c_1\dot{z} + c_1b\dot{\theta} + c_1c\dot{\phi} \\
 - k_2z - k_2a\theta + k_2c\phi - c_2\dot{z} - c_2a\dot{\theta} + c_2c\dot{\phi} \\
 - k_3z - k_3a\theta - k_3d\phi - c_3\dot{z} - c_3a\dot{\theta} - c_3d\dot{\phi} \\
 - k_4z + k_4b\theta - k_4d\phi - c_4\dot{z} + c_4b\dot{\theta} - c_4d\dot{\phi}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 -R_\eta\dot{z} + R_\eta b\dot{\theta} + R_\eta c\dot{\phi} - f_{MR1} \operatorname{sgn}(\dot{z}_1) \\
 -R_\eta\dot{z} - R_\eta a\dot{\theta} + R_\eta c\dot{\phi} - f_{MR2} \operatorname{sgn}(\dot{z}_2)
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 -R_\eta\dot{z} - R_\eta a\dot{\theta} - R_\eta d\dot{\phi} - f_{MR3} \operatorname{sgn}(\dot{z}_3) \\
 -R_\eta\dot{z} + R_\eta b\dot{\theta} - R_\eta d\dot{\phi} - f_{MR4} \operatorname{sgn}(\dot{z}_4) = M\ddot{z} \\
 M_V + k_1bz - k_1b^2\theta - k_1bc\phi + c_1b\dot{z} - c_1b^2\dot{\theta} - c_1bc\dot{\phi} \\
 - k_2az - k_2a^2\theta + k_2ac\phi - c_2a\dot{z} - c_2a^2\dot{\theta} + c_2ac\dot{\phi} \\
 - k_3az - k_3a^2\theta - k_3ad\phi - c_3a\dot{z} - c_3a^2\dot{\theta} - c_3ad\dot{\phi} \\
 + k_4bz - k_4b^2\theta + k_4bd\phi + c_4b\dot{z} - c_4b^2\dot{\theta} + c_4bd\dot{\phi}
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 + bR_\eta\dot{z} - b^2R_\eta\dot{\theta} - bcR_\eta\dot{\phi} + bf_{MR1} \operatorname{sgn}(\dot{z}_1) \\
 - aR_\eta\dot{z} - a^2R_\eta\dot{\theta} + acR_\eta\dot{\phi} - af_{MR2} \operatorname{sgn}(\dot{z}_2) \\
 - aR_\eta\dot{z} - a^2R_\eta\dot{\theta} - adR_\eta\dot{\phi} - af_{MR3} \operatorname{sgn}(\dot{z}_3) \\
 + bR_\eta\dot{z} - b^2R_\eta\dot{\theta} + bdR_\eta\dot{\phi} + bf_{MR4} \operatorname{sgn}(\dot{z}_4) = J_\theta\ddot{\theta} \\
 M_H + k_1cz - k_1cb\theta - k_1c^2\phi + c_1c\dot{z} - c_1cb\dot{\theta} - c_1c^2\dot{\phi} \\
 + k_2cz + k_2ca\theta - k_2c^2\phi + c_2c\dot{z} + c_2ca\dot{\theta} - c_2c^2\dot{\phi} \\
 - k_3dz - k_3da\theta - k_3d^2\phi - c_3d\dot{z} - c_3da\dot{\theta} - c_3d^2\dot{\phi} \\
 - k_4dz + k_4db\theta - k_4d^2\phi - c_4d\dot{z} + c_4db\dot{\theta} - c_4d^2\dot{\phi}
 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
 + cR_\eta\dot{z} - cbR_\eta\dot{\theta} - c^2R_\eta\dot{\phi} + cf_{MR1} \operatorname{sgn}(\dot{z}_1) \\
 + cR_\eta\dot{z} + caR_\eta\dot{\theta} - c^2R_\eta\dot{\phi} + cf_{MR2} \operatorname{sgn}(\dot{z}_2) \\
 - dR_\eta\dot{z} - daR_\eta\dot{\theta} - d^2R_\eta\dot{\phi} - df_{MR3} \operatorname{sgn}(\dot{z}_3) \\
 - dR_\eta\dot{z} + dbR_\eta\dot{\theta} - d^2R_\eta\dot{\phi} - df_{MR4} \operatorname{sgn}(\dot{z}_4) = J_\phi\ddot{\phi}
 \end{aligned}$$

식에서 볼 수 있는 것처럼 각 수식이 커플링 되어 있음을 볼 수 있다.

#### 2.2 제어기 설계

제어기 설계를 위하여 다음과 같은 상태공간 방정식을 활용 할 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + Bu + L\Gamma_U \tag{4}$$

식(4)는 엔진의 무게중심점에서의  $z$ ,  $\theta$ ,  $\phi$  세 변수로 이루어져 6개의 상태변수들로 이루어진다. 이때 각 마운트로부터 발생하는 항복댐핑력이 제어입력이 된다.

† 교신저자; 정회원, 인하대학교 기계공학과  
 E-mail : seungbok@inha.ac.kr  
 Tel : (032)860-7319, Fax : (032)868-1716  
 \* 인하대학교 기계공학과 대학원

(1) PID 제어기

PID제어기는 구가 간단하고 제어성능이 우수하며, 제어이득 조정이 비교적 쉽게 때문에 자주 쓰이는 제어기이다. 이때의 제어 입력은 다음과 같다.

$$u(t) = K_p \dot{x}(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t \dot{x}(t) dt + K_p T_d \frac{d\dot{x}(t)}{dt} \quad (5)$$

여기서 각 제어이득 값을 잘 조절하면 원하는 진동제어 성능을 얻을 수 있다.

(2) Sliding Mode 제어기

슬라이딩 모드 제어기는 시스템의 궤적들을 미리 설정된 슬라이딩 평면(sliding surface)상에 계속 머물게 하여, 이 동안에는 시스템의 불확실성, 외란 등에 대해서 안정성과 강건성을 보장하는 특징을 갖고 있다. 이때 상태변수들로부터 다음과 같은 슬라이딩 모드 제어입력을 유도할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{Bmatrix} = U^T (U U^T)^{-1} \begin{Bmatrix} \tilde{u}_1 \\ \tilde{u}_2 \\ \tilde{u}_3 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

여기서  $U$  는 다음과 같다.

$$U = \begin{bmatrix} -\frac{1}{b} & -\frac{1}{a} & -\frac{1}{a} & -\frac{1}{b} \\ \frac{J_\theta}{c} & -\frac{J_\theta}{c} & -\frac{J_\theta}{c} & \frac{J_\theta}{c} \\ \frac{J_\phi}{d} & \frac{J_\phi}{d} & -\frac{J_\phi}{d} & -\frac{J_\phi}{d} \end{bmatrix} \quad (7)$$

이때 4개의 각 마운트로 가해지는 슬라이딩 모드 제어입력들은 비독립적으로 각  $z$ ,  $\theta$ ,  $\phi$  에 커플링되어 영향을 미친다. 따라서 제어입력을 단독으로 구할 수 없기 때문에 다음과 같이 치환된  $\tilde{u}_1$ ,  $\tilde{u}_2$ ,  $\tilde{u}_3$  로부터 그 크기를 결정하고 각 마운트로 입력되는 최종적인 제어입력 값을 찾는다. 이때  $u$  와  $\tilde{u}$  의 관계가 불충분결정조건이므로 식(6)과 같이 최소자승법을 통하여 최종적으로  $u$  를 구하게 된다.

2. 제어 시뮬레이션 결과

제어성능 평가를 위한 시뮬레이션을 위해 엔진이 22.5Hz로 가동되고 3초후 제어기가 구동되도록 설정하였다. 이때 PID제어기와 Sliding Mode 제어기에 대한 엔진의 수직방향으로의 속도는 Fig.1과 같다. 또한 각각의 제어 입력은 Fig.2와 Fig.3에 나타내었다.

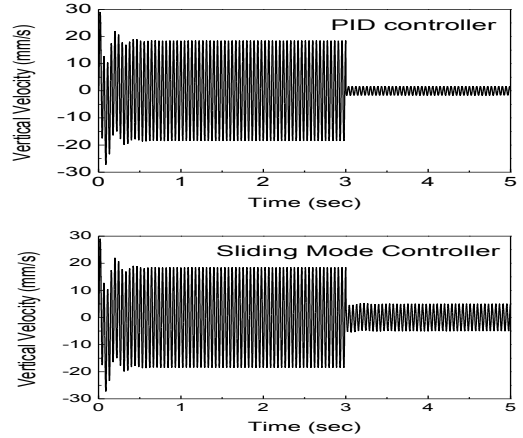


Fig. 1 Control simulation result of vertical velocity

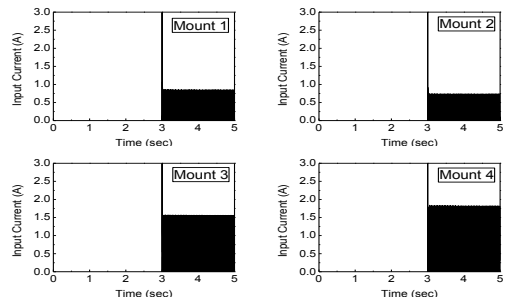


Fig. 2 PID control inputs on each MR mount

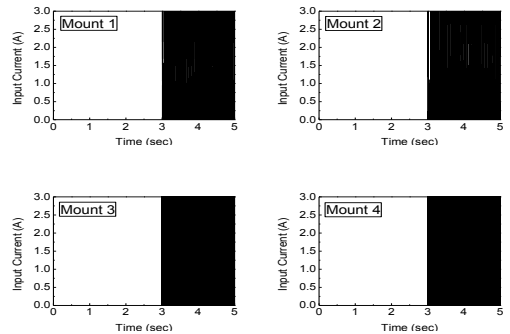


Fig. 3 Sliding mode control inputs on each MR mount

3. 결 론

이 연구에서는 4개의 MR마운트에 PID제어기와 Sliding Mode제어기를 적용한 시뮬레이션을 진행하였다. 결과로부터 제안된 각 제어기를 통해 엔진의 수직방향성분이 잘 제어됨을 확인하였다. 향후에는 이를 향상시키기 위해 보다 고차원적인 제어알고리즘을 통해 성능을 평가할 것이다.