

논문 2018-13-34

M&S기법을 활용한 선박용 지향성 요동보상장치 성능 분석

(Performance Estimation for Shipboard Directional Pedestal by Using M&S Methodologies)

이성균*, 고진용, 한용수, 김창환

(Sungkyun Lee, Jinyong Go, Yongsu Han, Changhwan Kim)

Abstract : Recently, the tasks assigned to surface ship are becoming diverse and important. In this trend, shipboard directional pedestals are widely used for surveillance and electronic warfare because ships are always under angular motion such as rolling, pitching and yawing. To estimate the performance of pedestal, the motion responses of vessel as well as mechanical characteristics of pedestal should be considered. In this study, both the motion responses of vessel which the pedestal will be mounted and the behavior of 3-axis pedestal are considered. Numerical analysis based on potential theory is used to obtain motion characteristics of vessel and then 6-DOF motions of vessel are simulated under operational condition. 1st-order time delay model and LQR control algorithm are used for modeling of pedestal drive model and control model, respectively. By using coordinate transform, the angular motions which the pedestal should compensate are calculated from the vessel's angular motion. Through these M&S methodologies, time history of pedestal behavior and maximum angular error of each pedestal axis are obtained. Overall M&S results show that 3-axis pedestal compensate the angular motion induced by vessel, efficiently.

Keywords : M&S, Directional pedestal, Surface ship, Potential theory, LQR control

I. 서론

오늘날 수상함의 임무들은 점차 다양화/고도화되고 있으며, 감시정찰과 전자전에 대한 임무 중요도 역시 증대되고 있다. 이러한 임무들을 성공적으로 수행하기 위해서는 수상함에 탑재된 전자광학장비 및 안테나가 정확하게 표적을 지향하는 것이 중요하다. 따라서 파도에 의한 수상함의 동요 운동을 보상하는 요동보상장치(이하, 페데스탈)의 성능이 전체 임무의 성공에 지대한 영향을 미치게 된다.

선박용 동요안정화 페데스탈(Pedestal)은 다양한 목적으로 활용되어 왔다. 선박에 탑재된 위성 추적 안테나의 동요안정화 시스템에 적용된 바 있으며

[1], 선박용 야간감시장치에 적용되어 망원 카메라의 동요안정화 시스템에 활용되기도 하였다 [2]. 이와 같은 연구에서, 서브모터를 포함한 페데스탈 시스템의 모델링과 페데스탈 파라미터 추정에 대한 연구가 활발히 진행되었다. 페데스탈의 효율적 사양 선정 및 검토를 위해서는 페데스탈 자체에 대한 고려 뿐 아니라, 임무 시의 해상상태와 그에 따른 수상함의 운동특성을 함께 고려해야 한다.

본 논문에서는 전체적인 임무 상황에서의 페데스탈 성능을 공학급 M&S 기법을 활용하여 분석하였다. 이를 위해 해상상태에 따른 수상함 6자유도 운동을 모델링하였으며, 수상함의 운동을 보상하기 위한 3축 페데스탈의 거동을 시뮬레이션 하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II장에서는 임무 환경인 해상상태가 반영된 수상함의 운동을 모의하고, III장에서는 페데스탈의 구동 및 제어를 모의한다. IV장에서는 앞에서 언급한 모델들이 결합된 최종 M&S결과를 보이며, V장에서 결론을 맺는다.

*Corresponding Author (sungkyun.lee@lignex1.com)

Received: Apr. 4 2018, Revised: July 12 2018,

Accepted: July 27 2018.

S. Lee, J. Go, Y. Han, C. Kim: LIGNEX1

II. 수상함 운동 모델

1. 해상상태 모델

해상의 상태를 나타내는 방법으로 가장 대표적인 것은 ‘Beaufort Scale’과 ‘Sea State Code’이다. ‘Beaufort Scale’은 해상의 풍속을 기준으로 하는 방법이며, ‘Sea State Code’는 파고를 기준으로 해상의 상태를 구분하는 방법이다. 과거에는 파도의 파고를 직접적으로 측정하는 것이 힘들었고 상대적으로 풍속의 측정이 용이했기 때문에 ‘Beaufort Scale’를 활용하였으나, 현재는 파고 측정 기술이 발달하면서 ‘Sea State Code’가 일반적으로 활용되고 있다.

해상상태는 유의파고 (H_s , Significant wave height)와 주기 (T_p , peak period)로 표현되며, 본 논문에서는 ITTC (International Towing Tank Conference) 파 스펙트럼 [3]을 활용하여 해상상태의 시계열 파고를 모의하였다. 해상상태 구분에 따른 유의파고와 파도 주기는 표 1에 나타내었으며, 파 주파수 (w)에 따른 파 스펙트럼 (S_ζ)은 식 (1)과 같다. 그림 1은 식 (1)을 통해 얻어진 해상상태별 파 스펙트럼을 보여준다. 각 해상상태별 스펙트럼의 최대값이 표 1의 주기와 일치하며 해상상태가 높아질수록 스펙트럼의 면적, 즉 에너지가 증가함을 알 수 있다.

$$S_\zeta(w) = \frac{487.1 \cdot H_s^2}{T_p^4} \cdot w^{-5} \cdot \exp\left(-\frac{1948}{T_p^4} \cdot w^{-4}\right) \quad (1)$$

이렇게 얻어진 파 스펙트럼은 이후, 수상함의 운동특성을 나타내는 RAO (Response Amplitude Operator)와 함께 해상상태에서의 수상함 운동변위를 모의하는 데 활용된다.

2. 수상함 응답진폭 모델

해상에서의 수상함 운동을 모의하기 위해서는 우선 대상 수상함의 진폭 응답 함수 (이하 RAO)를 산출해야 한다. RAO는 대상체의 운동 특성을 나타내는 일종의 전달함수로, 파 진폭 (wave amplitude) 1m에 대한 대상체의 운동진폭의 크기를 파 주파수에 따라 나타낸 것이다. 입사되는 파의 진폭과 대상의 운동 진폭이 선형적으로 비례한다는 가정하에, RAO를 활용하여 다양한 해상상태에서의 운동응답 산출이 가능하다.

본 논문에서는 포텐셜 이론을 통한 수치해석을 통해 대상 수상함의 RAO를 산출하였다. 포텐셜 이

표 1. 해상상태 등급표
Table 1. Sea State Table

Sea State	Significant Wave Height [m]	Peak Period [sec]
4	1.88	8.8
5	3.25	9.7
6	5.00	12.4

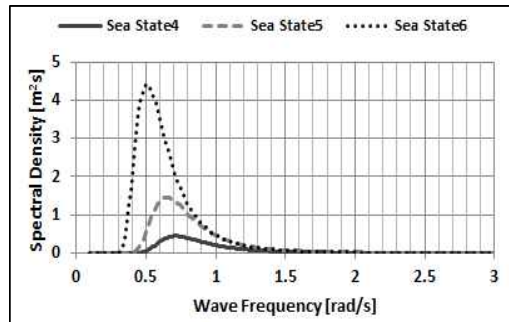


그림 1. ITTC 파 스펙트럼
Fig. 1 ITTC Wave Spectrum

론이란, 유체를 비압축성·비점성의 이상유체로 가정하여 부유체의 운동 응답을 효율적으로 계산하는 수치해석 방법이다 [4]. 수치해석의 수행을 위해서 노르웨이 선급협회인 DNV-GL사의 WASIM이라는 상용 프로그램을 활용하였다. WASIM은 포텐셜 이론에 근거하여 전진속도가 있는 선박의 6자유도 운동과 국부하중 등을 계산하는 프로그램이다. 물체와 자유표면에 격자를 생성하고 렌킨소스패널법 (Rankine source panel method)으로 포텐셜 계산을 수행한다 [5].

RAO는 선속과 파의 입사각 (incident wave angle)에 따라 다르게 계산된다. 그림 2는 파 입사각의 정의를 나타낸다. 파가 선수로부터 들어오는 선수와 상태를 파 입사각 180°, 파가 우현으로 들어오는 우현파 상태를 파 입사각 90°로 정의하였다.

그림 3은 선체와 자유표면에 생성된 격자를 나타내며, 그림 4, 5는 수치해석을 통해 얻어진 6자유도 운동 RAO를 보여준다. 본 논문에 활용된 대상 수상함 정보는 표 2에 기재하였다.

그림 4에서는 파 주기가 커질수록 수상함 운동 진폭과 파 운동 진폭의 비율이 1에 수렴하고 있다. 파 주기가 커지면 파의 파장이 증가하게 되며, 함의 입장에서는 파가 아닌 해수면 높이가 증가하는 것과 같다. 따라서 그림 4의 결과가 타당함을 알 수

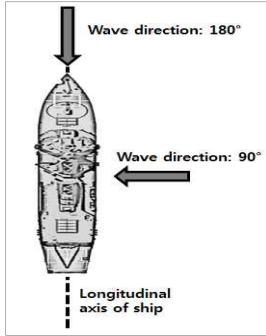


그림 2. 파 입사각 정의

Fig. 2 Definition of incident wave angle

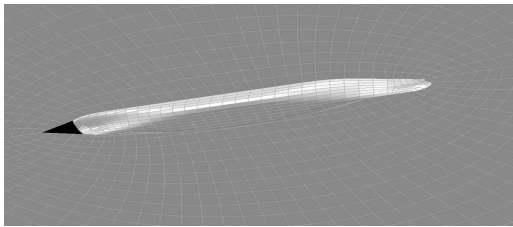


그림 3. 선체와 자유표면의 패널 격자

Fig. 3 Panels on the hull and free surface

표 2. 대상 수상함 제원

Table 2. Main particulars of surface vessel

Particular	Value
Length / Breadth [m]	278 / 16.1
Draft [m]	15.0
Displacement [ton]	96,267
Center of gravity [m] (LCG from stern / KG)	122.95 / 13
Radius of gyration [m] (Roll / Pitch / Yaw)	8.69 / 69.5 / 69.5
Speed [knots]	20

있다. 그림 5에서는 회전운동의 공진주기가 뚜렷하게 식별된다. 수상함의 형상이 함폭 대비 길이가 긴 세장체이기 때문에 회전운동 중 특히 횡동요가 크게 발생함을 확인할 수 있다.

3. 해상에서의 수상함 운동응답 모델

파 스펙트럼 ($S_{\zeta}(w)$)과 입사 파 진폭 ($\zeta_a(w)$)과 그에 따른 운동 진폭 ($z_a(w)$)의 비를 나타내는 RAO를 활용하면 해상상태에서의 운동 스펙트럼 ($S_z(w)$)

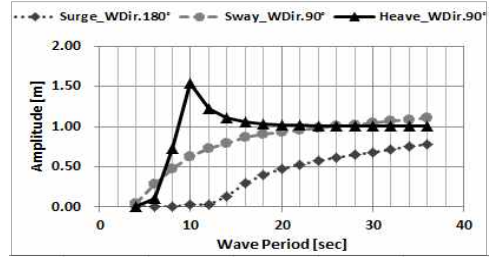


그림 4. 병진운동 RAO

Fig. 4 RAO in translation motion

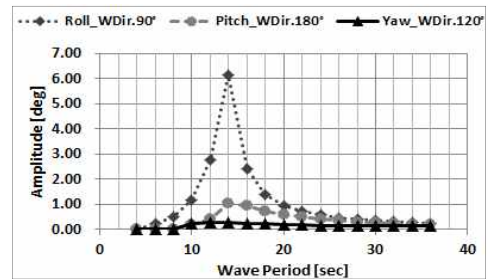


그림 5. 회전운동 RAO

Fig. 5 RAO in angular motion

을 식 (2)와 같이 얻을 수 있으며, 식 (3)과 같이 해상상태에서의 파 주파수 별 운동진폭을 산출할 수 있다.

$$S_z(w) = \left| \frac{z_a}{\zeta_a}(w) \right|^2 \cdot S_{\zeta}(w) \tag{2}$$

$$z_a(w) = \sqrt{2S_z(w) \cdot \Delta w} \tag{3}$$

그림 6은 해상상태 6의 선수와 상황에서 입사파 및 대상함의 전후동요 (surge) / 상하동요 (heave) / 종동요 (pitch)를 보여준다. 본 과정을 통해 산출한 해상상태에서의 수상함 회전운동은 페데스탈이 보상해야하는 요동으로 고려된다.

III. 페데스탈 모델

1. 구동 모델

선박에 사용되는 페데스탈의 구조는 구동 방식에 따라 2축, 3축, 4축 구동 방식으로 크게 분류된다 [1]. 그 중에서도 3축 구동 방식은 보상해야 할 운동성분인 선박의 3자유도 회전운동을 각 축별로 보상할 수 있어 제어에 편리하다. 본 논문에서는 그림 7과 같은 3축 구동 방식을 고려하였다.

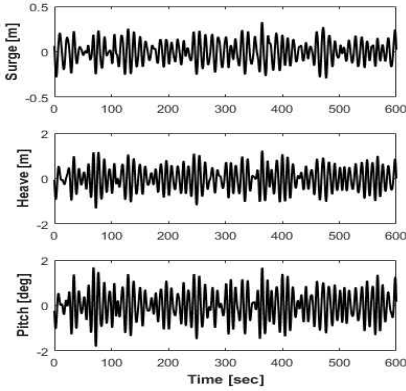


그림 6. 수상함 운동응답 (해상상태6, 선수과)
Fig. 6 Motion response of vessel (Sea state6, Head sea)

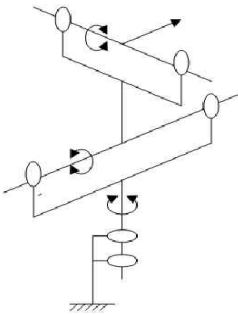


그림 7. 3축 구동 페데스탈
Fig. 7 3-axis mount pedestal

페데스탈 각 축의 구동모델은 식 (4)와 같이 표현할 수 있다. 식 (4)은 제어입력과 페데스탈 출력(경사각)의 관계를 1차 시간지연 모델로 나타낸 것이다. 여기서 $U_i(s)$ 는 제어입력, $Y_i(s)=\theta_i(s)$ 는 경사각 출력, K_i 는 이득, T_i 는 시정수, L_i 는 시간지연을 의미한다 식에서 첨자 r, p, y는 각각 횡동요(roll), 종동요(pitch), 선수동요(yaw)를 의미한다.

$$Y_i(s) = \frac{K_i e^{-L_i s}}{(1 + T_i s)} U_i(s) \quad (i = r, p, y) \quad (4)$$

식 (4)에서 시간지연 요소인 $e^{-L_i(s)}$ 를 테일러 급수로 표시하고 2차항 이상의 고차항을 무시하면, 구동모델의 상태방정식은 식 (5)와 같이 구성할 수 있다 [6]. 여기서, $\mathbf{x}_i = [\mathbf{x}_{i1} \ \mathbf{x}_{i2}]^T$ 는 상태벡터, $y_i = \theta_i$ 는 출력, d_i 는 외란을 의미한다.

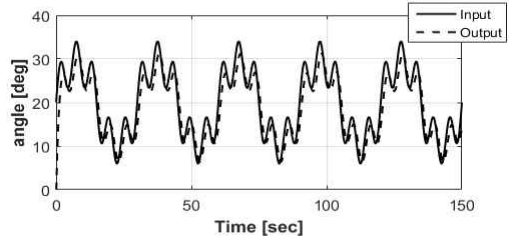


그림 8. 페데스탈 구동모델 입출력
Fig. 8 Input/Output signal of drive model

표 3. 구동모델 변수

Table 3. Parameters for pedestal drive model

Parameters	Value
K (system gain)	0.941
L (time delay)	0.094
T (time constant)	0.642

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_i = A_i \mathbf{x}_i + B_i u_i + d_i \\ y_i = C_i \mathbf{x}_i \end{cases} \quad (i = r, p, y) \quad (5a)$$

$$A_i = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -a_{i2} & -a_{i1} \end{pmatrix}, \quad B_i = \begin{pmatrix} b_{i1} \\ b_{i2} - a_{i1} b_{i1} \end{pmatrix}, \quad (5b)$$

$$C_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$a_{i1} = \frac{2}{L_i} + \frac{1}{T_i}, \quad a_{i2} = \frac{2}{T_i L_i}, \quad (5c)$$

$$b_{i1} = -\frac{K_i}{T_i}, \quad b_{i2} = \frac{2K_i}{T_i L_i}$$

구동모델에 활용된 변수들은 표 3에 나타내었으며, 각 축별 구동모델에 동일한 변수들을 적용하였다. 구동모델을 확인하기 위해 식 (6)와 같은 임의의 제어입력을 부과하였으며, 제어입력에 따른 구동모델의 출력은 그림 8에 나타내었다. 시간 지연 오차를 포함한 구동모델은 제어입력을 완벽히 추종하지 못하고 있음을 알 수 있다. 이러한 오차는 페데스탈의 효율적인 제어를 통해 줄일 수 있다.

$$u(t) = 10 \sin\left(\frac{\pi}{15}t\right) + \sin\left(\frac{\pi}{5}t\right) + 5 \sin\left(\frac{\pi}{3}t\right) + 20 \quad (6)$$

2. 제어 모델

페데스탈의 제어명령 추종을 위해 적분기가 추가된 LQR 제어 모델을 적용하였다. 정상편차를 줄이기 위한 적분기를 식 (7)과 같이 도입하였고, 이를 반영하여 식 (8)과 같이 상태방정식을 재구성하였다 [6].

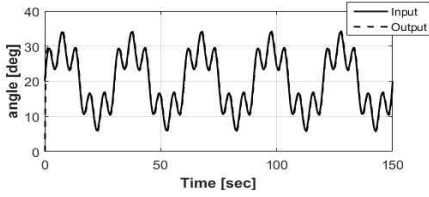


그림 9. 페데스탈 모델 입출력

Fig. 9 Input/Output signal of pedestal model

$$z_i = \int y_i dt \quad (7)$$

$$\begin{cases} \dot{\tilde{\mathbf{x}}}_i = \tilde{\mathbf{A}}_i \tilde{\mathbf{x}}_i + \tilde{\mathbf{B}}_i u_i + \tilde{\mathbf{d}}_i \\ y_i = \tilde{\mathbf{C}}_i \tilde{\mathbf{x}}_i \end{cases} \quad (i=r, p, y) \quad (8a)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{x}}_i &= \begin{pmatrix} \mathbf{x}_i \\ z_i \end{pmatrix}, \tilde{\mathbf{A}}_i = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_i & 0 \\ \mathbf{C}_i & 0 \end{pmatrix}, \tilde{\mathbf{B}}_i = \begin{pmatrix} \mathbf{B}_i \\ 0 \end{pmatrix}, \tilde{\mathbf{d}}_i = \begin{pmatrix} \mathbf{d}_i \\ 0 \end{pmatrix} \\ \tilde{\mathbf{C}}_i &= [\mathbf{C}_i \ 0] \end{aligned} \quad (8b)$$

LQR 제어 기법은 선형최적제어 기법 중 하나로서 (9)와 같은 성능함수 지수 (performance index) 를 최소화 하는 제어입력을 찾는 방법이다 [7]. 선형최적제어기법에서 설계변수는 최적화 성능지수의 가중행렬 (weighting matrix)인 Q와 R이 된다. 행렬 Q를 이용하여 상태변수들에 가중치를 부여할 수 있고, 행렬 R을 이용해 제어입력 변수들의 가중치를 부여하게 된다. 최적의 제어이득 K는 성능함수 지수와 식 (10)으로 표현되는 ARE (Algebraic Riccati Equation)의 해를 구함으로써 계산할 수 있다.

$$J = \int_0^{\infty} (\tilde{\mathbf{x}}_i^T Q_i \tilde{\mathbf{x}}_i + u_i^T R_i u_i) dt \quad (9)$$

$$PA + A^T P - PBR^{-1}R^T P + Q = 0 \quad (10a)$$

$$K = R^{-1}B^T P \quad (10b)$$

그림 9는 제어모델을 적용했을 때, 식 (6)의 제어입력에 대한 페데스탈 모델의 출력을 보여준다. 제어모델 적용 전 (그림 8)에 비해 입력과 출력 간의 오차가 현저히 줄어든 것을 확인할 수 있다.

IV. 시뮬레이션

1. 좌표계 정의

수상함 요동 보상을 위한 페데스탈의 거동을 시뮬레이션하기 위해, 본 논문에서는 관성좌표계 (reference), 함정좌표계 (vessel-fixed), 페데스탈

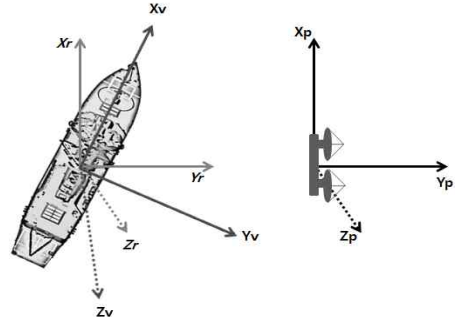


그림 10. 좌표계 정의

Fig. 10 Definition of coordinate system

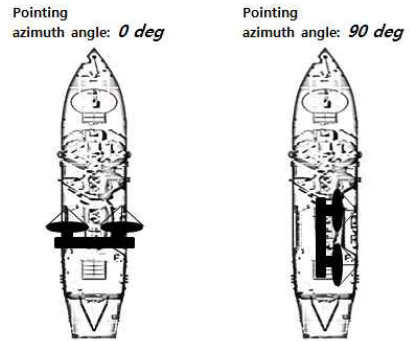


그림 11. 표적 지향 방위각 정의

Fig. 11 Definition of pointing azimuth angle

좌표계 (pedestal-fixed)가 사용되었다. 그림 10은 좌표계의 정의를 보여준다. 각운동 변위는 각 축을 중심으로 오른손 방향의 회전을 양의 방향으로 정의하였다. 단, 페데스탈의 고각은 수면 위쪽으로 들어올러지는 방향을 양의 방향으로 정의하였다. 각 좌표축의 첨자 r, v, p는 각각 관성좌표계, 함정좌표계, 페데스탈 좌표계를 의미한다. 표적 지향 방위각의 정의는 그림 11에 나타내었다. 표적 지향 방위각은 함정좌표계의 x축과 페데스탈 좌표계의 y축 사이의 각도로 정의하였다.

표 4. 시뮬레이션 조건

Table 4. Simulation conditions

	Incident wave angle: 90°	
	Ship speed : 20 knots	
	Pointing azimuth angle	Pointing elevation angle
Case1	0°	45°
Case2	45°	45°

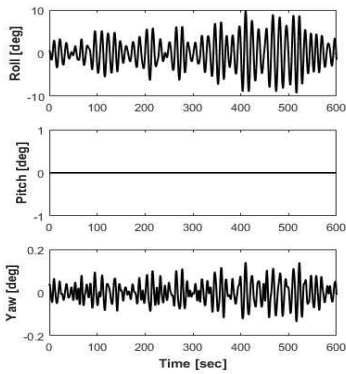


그림 12. 수상함 회전운동응답 (해상상태6, 우현파)

Fig. 12 Angular motion response of vessel (Sea state6, Beam sea)

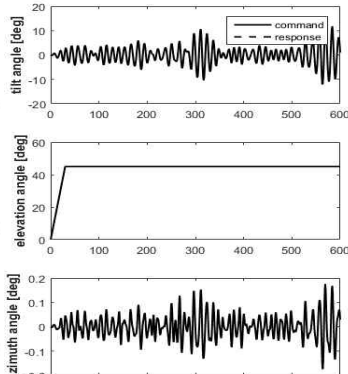


그림 13. 페데스탈 운동응답 (Case1)

Fig. 13 Motion response of pedestal (Case1)

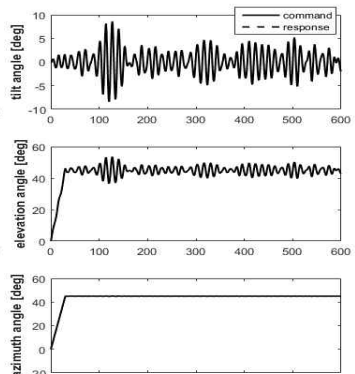


그림 14. 페데스탈 운동응답 (Case2)

Fig. 14 Motion response of pedestal (Case2)

2. 시뮬레이션 결과

과랑 중 수상함의 페데스탈의 거동을 모의하기 위해 표 4와 같이 시뮬레이션 조건을 설정하였다. 함 운동이 큰 상황을 모의하기 위해 횡동요가 발생되는 우현파에서 수상함이 20 knots의 일반적인 속력으로 전진하고 있다고 가정하였다. 이러한 조건에서, 표적 지향 명령각에 따른 페데스탈의 거동을 모의하였다. Case1과 Case2의 비교를 통해, 함 운동이라는 외란을 페데스탈의 각 구동축이 어떻게 달리 작동하여 보상하는 지를 확인할 수 있다.

그림 12는 페데스탈의 요동보상 대상인 수상함의 회전운동을 나타내며, 그림 13-14는 서로 다른 표적 지향 명령각에 따른 페데스탈의 거동을 보여준다. Case1의 경우 페데스탈의 좌우경사각 (tilt angle)이 선박의 횡동요를, 방위각 (azimuth angle)이 선박의 선수동요를 각각 보상하고 있다. Case2의 경우에는 페데스탈의 고각과 좌우경사각을 동시에 활용하여 선박의 횡동요를 보상하고 있다. 표 5는 각 시뮬레이션 조건 별 페데스탈 보상오차를 정리한 것이다. 이와 같이 임무상황에서의 페데스탈 성능을 M&S 방법을 통해 분석하였다.

표 5. 페데스탈 요동보상 최대오차

Table 5. Maximum error of directional pedestal

	Max. tilt error	Max. elevation error	Max. azimuth error
Case1	0.14°	0.00°	0.003°
Case2	0.10°	0.10°	0.003°

본 분석결과를 활용하여 페데스탈이 충분한 성능을 갖추었는 지의 여부를 확인할 수 있다. 예를 들어, 페데스탈 위에 안테나가 탑재되어 있는 상황이라면 페데스탈의 보상오차로 인한 안테나 수신신호세기의 감쇠가 전체 임무성공에 어떠한 영향을 주는 지 확인 할 수 있다. 이를 통해 페데스탈의 성능이 주어진 임무상황 대비 충분한 성능을 갖추었는지 판별할 수 있으며, 페데스탈 사양결정 시 활용할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 공학급 M&S 모델의 적용을 통해 선박에 탑재되는 페데스탈의 성능 분석을 수행하였다. 우선, 페데스탈의 보상 대상이 되는 수상함의 운동을 모의하였다. 해상상태를 반영한 수상함의 운동응답을 추정하여, 실 임무상황에서의 페데스탈의 거동을 모의하였다.

수상함의 운동응답을 추정하기 위해 해상상태 모델과 수상함 운동진폭 모델을 활용하였고, 페데스탈을 모의하기 위해 구동장치 모델과 제어 모델을 결합하였다. 또한, 수상함의 운동응답은 좌표변환을 통하여 페데스탈의 축별 요동으로 변환하였다.

체계적인 M&S기법의 활용을 통해 표적 지향 명령각에 따른 페데스탈 거동을 모의하였고, 요동보상 오차를 추정하였다. 본 방법은 임무성공을 위한 페데스탈의 성능 검토 및 페데스탈의 설계에 활용 가능할 것이다.

보다 정밀한 페데스탈의 성능 추정을 위해서는 페데스탈의 자세계측 오차 모델, 잡음 모델, 필터 모델 등이 포함되어야 하며, 현재 이를 고려한 페데스탈 모델을 개발 중이다.

References

- [1] W. Koh, "Design, Stabilization and Tracking Algorithms of Ship Board Satellite Antenna Systems," Ph. D. thesis, Department of Control and Instrumentation Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 2002. (in Korean)
- [2] J. Kim, "A Study on the Parameter Estimation of Stabilized Pedestals," MS. D. thesis, Department of Control and Instrumentation Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 2008. (in Korean)
- [3] ITTC, Seakeeping experiments. ITTC-recommended procedures and guidelines (7.05-02-07-02.1), ITTC (International Towing Tank Conference), 2014.
- [4] J.N. Newman, Marine Hydrodynamics, The MIT Press, 1977.
- [5] DNV, SESAM User Manual: WASIM 4.3-04, Wave Loads on Vessels with Forward Speed, DNV-GL, 2010.
- [6] W. Koh, S. Hwang, Y. Ha, G. Jin, "Stabilization and Tracking Algorithms of a Shipboard Satellite Antenna System," Journal of Control, Automation and Systems Engineering, Vol. 8, No. 1, pp. 67-73, 2002. (in Korean)
- [7] F.L. Lewis, Applied Optimal Control and Estimation, Prentice-Hall International Editions, 1992.

Sungkyun Lee (이성균)



He is received B.S. degree in 2007, and the Ph.D degree, in 2013, from Seoul National University, Korea.

His current research interests include fluid dynamics and Modeling and Simulation (M&S) techniques.

Email: sungkyun.lee@lignex1.com

Yongsu Han (한용수)



He is received M.S. degree in 2006, and the Ph.D degree, in 2012, from Seoul National University, Korea.

His current research interests include flight dynamics and Modeling and Simulation (M&S) techniques.

Email: yongsu.han@lignex1.com

Jinyong Go (고진용)



He is received B.S. degree in 2010, and the M.S degree, in 2012, from Seoul National University, Korea.

His current research interests include submerged-body dynamics and Modeling and Simulation (M&S) techniques.

Email: jinyong.go@lignex1.com

Changhwan Kim (김창환)



He is received B.E. degree in aerospace engineering from Inha University in 2008, and the M.S. degree in aerospace engineering from Inha University in 2010.

His current research interests include aerospace control system and Modeling and Simulation (M&S) techniques.

Email: changhwan.kim@lignex1.com