

함정운동에 의해 발사대 해치에 작용하는 외란에 관한 연구

Study on the Disturbance Applied to Launcher Hatch by Ship Motions

변영철, 강이석*
(Young-Chul Byun¹ and E-Sok Kang^{2*})

¹Agency for Defense Development

²Department of Mechanical Design Engineering, Chungnam National University

Abstract: In this paper, the disturbance applied to launcher hatch by ship motions is introduced to identify the vertical ship motion disturbance. Basically, ship motions are comprised of 6 degrees of freedom: roll, pitch, yaw, heave, surge and sway. In the case of the shipboard launcher hatch the coupled pitch, heave and roll are significant motions to be transformed to a vertical direction motion. The maximum acceleration values are obtained from the vertical motion model and the ship motion data in accordance with ship type and hatch location on the ship. We verify that the maximum pitch motion mainly influences the launcher hatch and also present the quantity of the maximum load disturbance by the ship's motion acceleration.

Keywords: ship motion, 6-DOF, vertical motion model, load disturbance, launcher hatch

I. 서론

함정에 탑재되는 일반적인 전기기계 구동장치 및 제어기로 구성되는 함정 시스템은 함정운동 특성에 따른 다양한 외란(disturbance)을 받게 되며 함운용 외란을 제거하기 위한 제어기 설계가 요구된다. 함정 시스템 설계에 필요한 함운용 외란을 실제적으로 측정하여 제어기에 전달하는 경우 시스템 설계가 복잡해지고 고가의 비용이 든다. 따라서 함운용 외란을 잘 분석하여 함정 시스템 설계에 적용한다면 시스템 설계 및 성능 평가에도 유리하고, 설계 및 제작 비용도 절감할 수 있다.

함정에 탑재되는 제어시스템에 작용하는 외란 요소들은 함정종류(ship type) 및 해면상태(sea state)에 의해 결정되는 함정운동(ship motion), 함정의 운항속도(ship speed), 해상에서 부는 바람속도(wind velocity), 적설부하/결빙(icing) 및 함정의 엔진으로부터 전달되는 함진동(ship vibration) 등으로 다양한 형태를 갖는다. 이와 같은 외란 요소들은 함정에 설치되는 안정화 장치(stabilizer) 설계, 유도탄 발사 시의 유도탄 초기 안정성 해석 및 함정 발사대 해치시스템 설계 등에 고려되어야 하는 중요한 설계 요소이다. 특히 함운용시 필수적으로 함정 시스템에 직접 영향을 주는 외란은 함정운동으로 회전운동인 롤(roll), 피치(pitch), 요(yaw) 운동과 병진운동인 히브(heave), 서지(surge), 스웨이(sway) 운동으로 6자유도 운동으로 구성된다. 함정 시스템 설계를 위하여 이러한 함정운동 외란에 대한 식별(identification), 해석(analysis), 추정(estimation) 및 예측(prediction)에 관한 연구가 많이 수행되고 있다.

함정운동과 관련한 주요 연구들로 함정 형상 설계, 함정 운항제어, 함정운동에 대한 보상 및 제어응용을 위한 수학적

모델링 및 시뮬레이션 기법 등이 많이 연구되어 왔다[1,2,10, 11]. 함정운동은 실제 측정된 데이터를 분석하여 예측이 가능하지만 여러 운동이 중첩되어 있어 신경망(neural) 네트워크를 사용하여 조합(couple)된 함정운동에 관한 연구도 수행되었다[3]. 또한 함정에서 유도탄을 발사하기 위해서는 함정운동 외란을 고려한 유도탄 발사 초기 거동에 대한 안정성 해석이 중요하므로 함정운동 외란을 확률변수로 적용하여 유도탄 발사 안정성에 관한 연구도 수행되었다[4]. 함정 갑판에 항공기 착륙을 위하여 칼만 필터를 사용하여 실시간 함정운동을 추정하였으며[5], 또한 ISAR (Inverse Synthetic Aperture Radar) 데이터를 측정하여 함정운동을 추정하는 기법을 제시하였다[6].

본 논문에서는 함정의 COG (Center of Gravity) 또는 COF (Center of Floating)에 작용하는 함정운동 데이터를 사용하여 함정에 탑재되는 발사대 해치에 작용하는 함정운동 외란에 대해서 분석하고, 함정운동 가속도에 의해 발생하는 부하 외란의 크기를 제시하여 해치시스템 설계 및 제어기 설계에 활용할 수 있도록 한다.

II. 함정운동 분석

1. 좌표시스템 및 기본개념

그림 1은 함정운동을 나타내기 위한 좌표시스템으로 함정운동의 중심점인 COG 또는 COF 기준의 X, Y, Z 좌표와 함정에 탑재되는 발사대 해치 COG기준의 x, y, z 좌표로 나타내었다. 그림 2는 함정의 COF 기준축을 중심으로 발생하는 함정의 6자유도 운동 방향을 나타낸다. 6자유도 함정운동은 히브, 서지, 스웨이 병진운동과 롤, 피치, 요 회전운동으로 구성된다. 발사대 해치에 전달되는 함정운동은 함정 중심점에서의 함정운동 모델과 함정 중심점에서의 발사대 탑재 위치를 사용하여 계산할 수 있다.

함정운동 모델은 일반적으로 정현모델(sinusoidal model)과 과도모델(transient model)을 사용한다. 정현모델은 함정의 중

* Corresponding Author

Manuscript received April 8, 2013 / revised July 22, 2013 / accepted September 8, 2013

변영철: 국방과학연구소(ycbyun@add.re.kr)

강이석: 충남대학교 기계설계공학과(eskang@cnu.ac.kr)

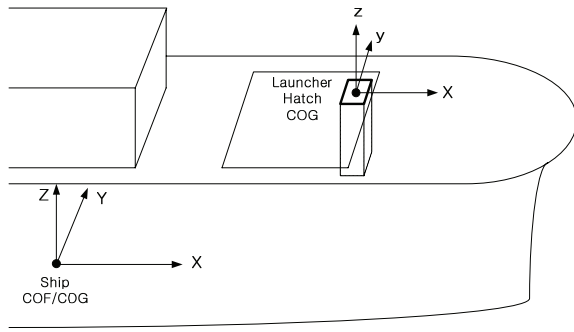


그림 1. 함정과 발사대 해치의 COF/COG 좌표시스템.
Fig. 1. Coordinate systems of the COF/COG of the ship and the launcher hatch.

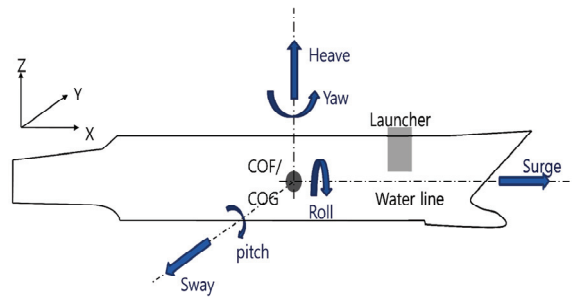


그림 2. COF/COG 기준축에서의 병진 및 회전에 대한 6자유도 함정운동.
Fig. 2. The translational and rotational 6-DOF ship motion at the COF/COG reference axis.

표 1. 파도 높이 및 풍속에 따른 해면상태.
Table 1. Sea state number according to the wave height and the wind speed.

| Sea state number | Wave height(m) | | Wind speed(knots) | |
|------------------|----------------|------|-------------------|------|
| | Range | Mean | Range | Mean |
| 0-1 | 0-0.1 | 0.05 | 0-6 | 3.0 |
| 2 | 0.1-0.5 | 0.30 | 7-10 | 8.5 |
| 3 | 0.5-1.25 | 0.88 | 11-16 | 13.5 |
| 4 | 1.25-2.5 | 1.88 | 17-21 | 19.0 |
| 5 | 2.5-4 | 3.25 | 22-27 | 24.5 |
| 6 | 4-6 | 5.00 | 28-47 | 37.5 |
| 7 | 6-9 | 7.50 | 48-55 | 51.5 |
| 8 | 9-14 | 11.5 | 56-63 | 59.5 |
| 9 | >14 | >14 | >63 | >63 |

류 및 표 1의 해면상태에 따라 진폭(amplitude)과 주기(period)가 결정되며 함정운동 사이에 작용하는 커플링(coupling) 운동을 고려하지 않는다. 따라서 실제 측정된 데이터를 사용하는 과도모델에 비해 상당히 보수적으로 함정운동 외란이 추정될 수 있다. 그러나 과도모델은 적용하고자 하는 함정의 실제 측정된 함정운동 데이터 또는 시간에 따른 해석 데이터가 필요하므로 함정 데이터 획득에 대한 많은 시간과 비용이 든다. 따라서 본 논문에서는 함정의 COF 중심점에 작용하는 함정운동의 주기와 진폭을 사용하는 정현모델을 이용하여 발사대 해치 중심에 작용하는 함정운동을 분석하고자 한다.

2. 함정의 6자유도 운동 분석

함정운동 분석을 위한 COF에서의 6자유도 운동에 대한

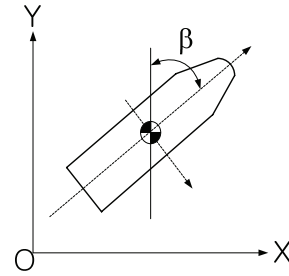


그림 3. OXY 평면에서의 함정의 heading 각 beta.
Fig. 3. The heading angle beta of the ship on the OXY plane.

모델식은 식 (1)과 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$u = u_a \cos(\omega t + \alpha) \tag{1}$$

$$\omega = c - 2\pi / \lambda \cdot (V \cos \beta) \tag{2}$$

식 (1)은 함정운동의 정현모델에 대한 기본식이며 u_a 는 함정운동의 진폭을 나타낸다. 위상각 α 는 함정의 COF에서의 운동 파형과 COG에서의 운동파형과의 위상차에 의해 발생된다. 함정운동 데이터는 일반적으로 함정의 COF기준으로 측정되며 이 경우 $\alpha = 0$ 이다. 식 (2)에서 함정운동의 주기는 파도 주파수 c , 함정속도 V , 파도의 파장 λ 및 그림 3의 heading 각도 β 등에 의해 결정된다[7]. 함정이 정지되어 있는 경우 함정운동의 주기는 파도 주파수와 동일하며 함정의 운항 속도 및 heading 각도에 따라 함정운동의 주기는 변화한다.

발사대 해치는 방탄을 위한 강체 구조로 되어 있으며, 해치의 운용주기는 함정운동 주기에 비해 상당히 짧다. 따라서 발사대 해치는 함정운동 주기에 의해 작동 중 발생할 수 있는 기계적 진동 및 공진 특성 등은 고려하지 않아도 된다. 그러나 함정의 수직방향 운동의 가속도는 발사대 해치의 운용시 부하 외란 요소로 작용하므로 해치시스템의 제어기 설계시 고려하지 않는다면 운용성능이 저하될 수 있다. 함정운동에 대한 가속도 식은 식 (1)을 미분 연산을 통하여 식 (3)과 같이 나타낼 수 있으며, 가속도 크기는 식에서 알 수 있듯이 함정운동의 주기 및 진폭에 따라 결정된다. 따라서 주기에 영향을 주는 함정의 운항속도 및 heading 각도에 따른 진폭의 변화 특성을 분석하여야 한다.

$$\ddot{u} = \omega^2 u_a \cos(\omega t + \alpha + \pi) \tag{3}$$

그림 4로부터 그림 9는 배수량 4000톤급 구축함(destroyer)의 함정속도 10 knots, 18 knots, 25 knots 및 heading 각 변화에 따른 6자유도 함정운동의 진폭을 보여준다. 그림 4는 롤 운동으로 heading 각 60°에서 함정 속도에 영향을 받지 않으며 최대 진폭이 발생함을 알 수 있고, 90° 이상에서는 함정 속도에 따라 진폭 변화가 있음을 보여준다. 그림 5는 피치 운동으로 heading 각 90°에서 진폭이 가장 작게 나타나며, 150° 이상의 각도에서 최대 진폭이 발생함을 알 수 있다. 그림 6은 요 운동으로 모든 heading 각에서 함정속도에 따른 진폭 변화가 발생하며 30°와 60° 사이에서 함정속도에 따른 최대 진폭이 발생함을 알 수 있다.

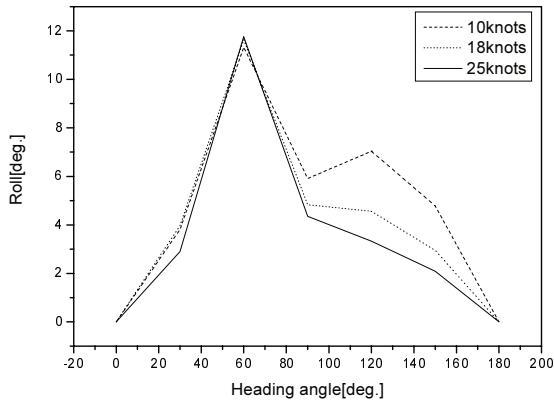


그림 4. 함정속도 및 heading 각에 따른 롤 운동의 진폭.
 Fig. 4. The amplitude of the roll motion with ship speed and heading angle variation.

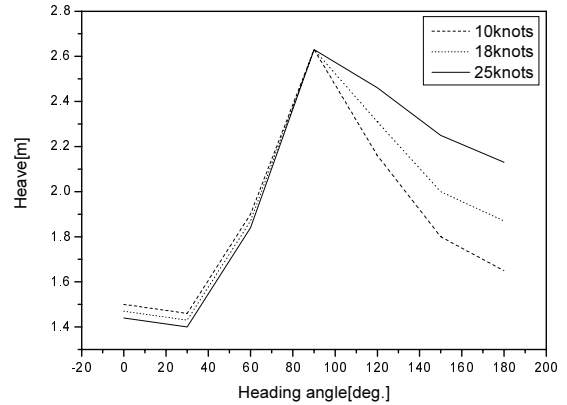


그림 7. 함정속도 및 heading 각에 따른 히브 운동의 진폭.
 Fig. 7. The amplitude of the heave motion with ship speed and heading angle variation.

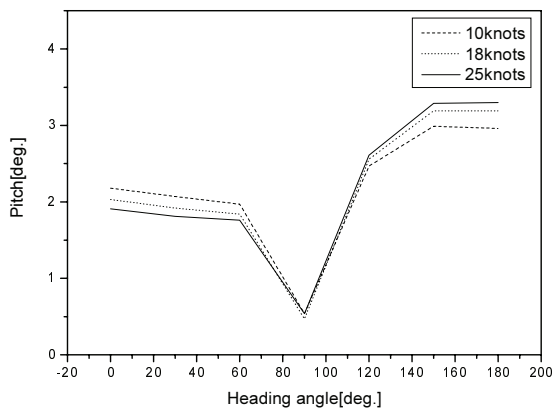


그림 5. 함정속도 및 heading 각에 따른 피치 운동의 진폭.
 Fig. 5. The amplitude of the pitch motion with ship speed and heading angle variation.

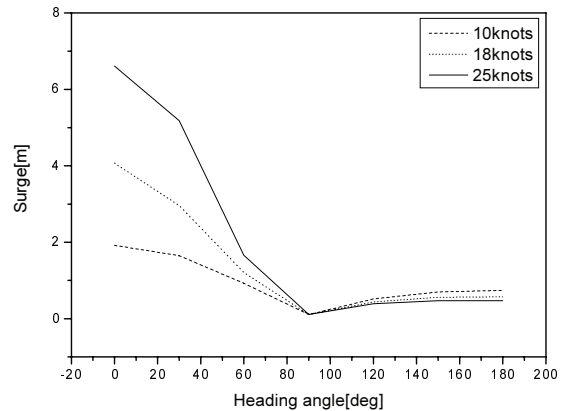


그림 8. 함정속도 및 heading 각에 따른 서지 운동의 진폭.
 Fig. 8. The amplitude of the surge motion with ship speed and heading angle variation.

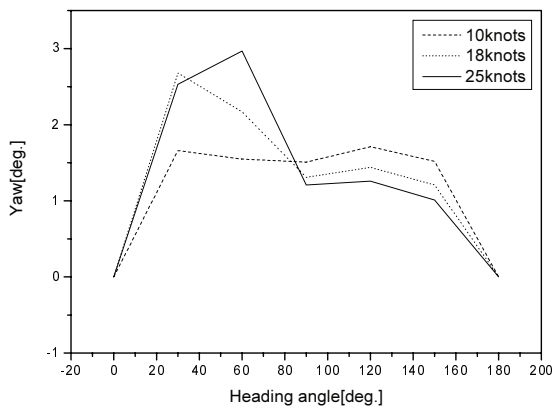


그림 6. 함정속도 및 heading 각에 따른 요 운동의 진폭.
 Fig. 6. The amplitude of the yaw motion with ship speed and heading angle variation.

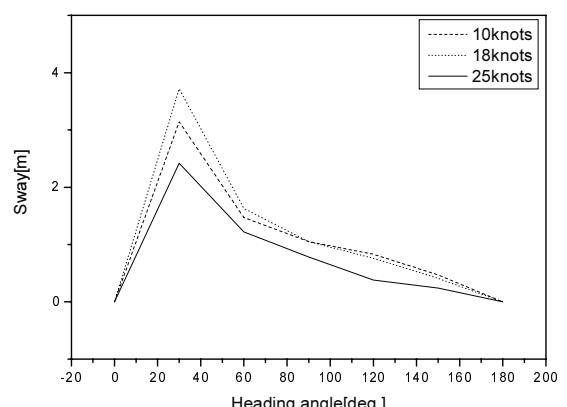


그림 9. 함정속도 및 heading 각에 따른 스웨이 운동의 진폭.
 Fig. 9. The amplitude of the sway motion with ship speed and heading angle variation.

그림 7은 히브 운동으로 heading 각 90° 에서 최대 진폭을 나타내며 90° 이상에서부터 함정속도에 따른 진폭 변화가 증가함을 알 수 있다. 그림 8은 서지 운동으로 heading 각 0°와 30° 에서 최대 진폭이 발생하며 0°와 90° 사이에서는 함정속도에 따른 진폭변화가 생기며 90° 에서 운동이 거의 없는 최

소 상태가 된다. 그림 9는 스웨이 운동으로 모든 heading 각에서 함정속도에 따른 진폭 변화와 함께 스웨이 운동이 발생하고 있음을 알 수 있고, heading 각 30° 에서 최대 진폭을 발생한다. 스웨이 운동의 특징은 낮은 함정속도에서 진폭이 커짐을 알 수 있다.

표 2. 함정운동의 최대 진폭에서의 heading 각도.

Table 2. The heading angle at maximum amplitude of the ship motion.

| 6-DOF Motion | Max. Roll | Max. Pitch | Max. Yaw | Max. Heave | Max. Surge | Max. Sway |
|--------------|-----------|------------|----------|------------|------------|-----------|
| Angle (deg) | 60 | 150~180 | 60 | 90 | 0 | 30 |

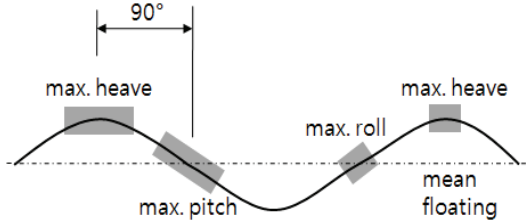


그림 10. 최대 히브 운동과 최대 피치/롤 운동과의 위상차.
Fig. 10. Phase difference between maximum heave and maximum pitch/roll motion.

표 2는 함정의 최고속도에서 6자유도 운동의 최대 진폭을 갖는 heading각을 나타내며, 최대 운동조건으로 함정운동을 분석하기 위하여 운동이 최대가 되는 heading 각에 대하여 함정운동 데이터를 선정하고 분석한다. 그림 10은 히브 운동과 롤/피치 운동에 대한 웨이브(wave) 형상으로 최대 히브 운동은 최대 피치 운동 또는 롤 운동과 90°의 위상차를 갖는다. 따라서 최대 진폭의 히브 운동과 최대 진폭의 롤/피치 운동은 동시에 발생되지 않으며, 함정운동은 조합된 형태로 나타남을 알 수 있다.

3. 함정의 롤, 피치, 히브 운동 분석

함정에 탑재되는 발사대 해치시스템은 그림 11과 같이 해치 회전축을 기준으로 회전하는 시스템으로 함정운동에 의한 중력방향 가속도의 영향을 받는다. 따라서 함정의 6자유도 함정운동 중에서 롤, 피치, 히브 운동에 의한 수직방향의 운동에 의한 영향을 받는다. 롤 운동과 피치 운동은 회전운동이지만 변환 행렬을 통하여 임의의 좌표에서 수직방향 운동으로 변환할 수 있으며, 히브 운동은 함정의 상하방향의 병진운동으로 COF에서 획득한 함정운동 데이터를 변환 없이 사용할 수 있다.

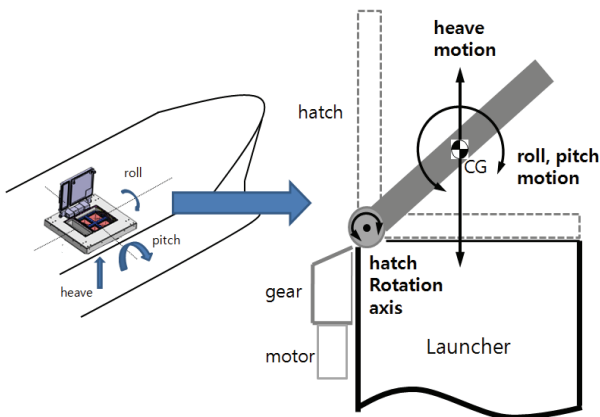


그림 11. 발사대 해치시스템에 작용하는 수직방향 함정운동.
Fig. 11. The vertical direction ship motions applied to the launcher hatch system.

표 3. 함정 운용 조건 및 배수량.

Table 3. The ship operational condition and ship displacement.

| Ship conditions | C1 | C2 | C3 | C4 |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|
| Sea state | 5 | 6 | 6 | 6 |
| Speed(knots) | 18 | 15 | 25 | 25 |
| Displacement(ton) | 5,000 | 3,000 | 4,000 | 7,000 |

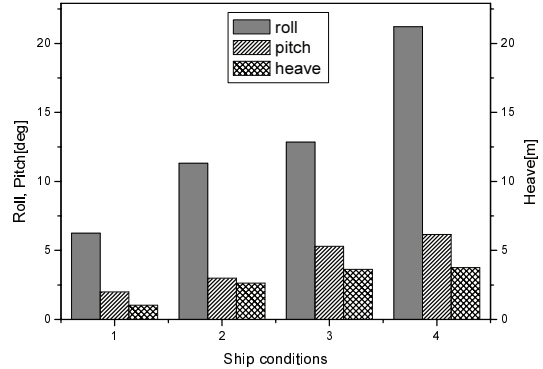


그림 12. 함정 조건에 따른 최대 롤, 피치, 히브 운동 비교.
Fig. 12. The comparison of the maximum roll, pitch and heave motion for ship conditions respectively.

그림 12는 표 3에 나타난 함정의 크기와 관련된 배수량 및 함정 운용 조건에 따라 분석하여 롤, 피치 및 히브 운동에 대한 최대값을 보여준다. 표 1의 해면상태 등급 6, 최대 함운항 속도 25 knots, 함정의 배수량 7,000톤급 함정인 C4 조건에서 최대의 롤, 피치 및 히브 운동이 발생함을 보여준다. 앞에서 분석한 함정운동 결과에서 롤, 피치 및 히브 운동에 대한 최대 운동은 함정 속도에 의한 영향보다 함 운항 조건인 해면상태와 함정의 크기에 영향을 받음을 알 수 있다.

4. 함정의 수직방향 운동

발사대 해치에 작용하는 수직방향의 함정운동을 계산하기 위해서는 함정의 회전운동을 병진운동으로 변환하여야 한다. 함정의 COF에서 발생하는 롤(ϕ), 피치(θ), 요(ψ) 회전운동은 변환행렬을 통하여 일정 거리로 떨어져 있는 임의의 좌표 $P(x_b, y_b, z_b)$ 에서의 병진운동으로 나타낼 수 있다. 함정운동의 회전변환 행렬은 롤, 피치, 요에 대한 오일러(euler) 회전식을 사용하여 식 (4)와 같이 나타낼 수 있으며, 롤, 피치, 요의 회전각이 작은 라디안(radian) 값을 갖는다면 식 (6)과 같이 선형화된 식으로 나타낼 수 있다[8].

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\theta + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\theta + c\psi c\theta s\phi \\ s\psi c\theta & c\psi c\theta + s\phi s\theta s\psi & -c\psi s\theta + s\theta s\psi c\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{pmatrix} \quad (4)$$

여기서, C와 S는 각각 cosine과 sine 함수를 나타낸다.

$$\begin{aligned} \sin \phi &\approx \phi, & \sin \theta &\approx \theta, & \sin \psi &\approx \psi \\ \cos \phi &\approx 1, & \cos \theta &\approx 1, & \cos \psi &\approx 1 \\ \phi \cdot \theta &= \theta \cdot \psi = \psi \cdot \phi \approx 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -\psi & \theta \\ \psi & 1 & -\phi \\ -\theta & \phi & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{pmatrix} \quad (6)$$

따라서 임의의 점 P에서의 x, y, z 방향에 대한 함정 운동은 각각 식 (7), 식 (8), 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$x_p = x - y_b\psi + z_b\theta \quad (7)$$

$$y_p = y + x_b\psi - z_b\phi \quad (8)$$

$$z_p = z - x_b\theta + y_b\phi \quad (9)$$

식에서 x, y, z, ϕ, θ, ψ 는 함정의 COF에서의 6자유도 운동을 나타내며 함정에 수직으로 탑재된 발사대 해치에 수직 방향으로 작용하는 z 축 방향의 함정운동은 식 (9)와 같다. 식 (9)에서 알 수 있듯이 함정에 수직방향 운동은 히브 운동과 선형화된 롤과 피치 운동의 조합으로 나타낼 수 있다. 함정운동의 정현모델 식 (1)을 사용한 히브, 롤, 피치운동을 식 (9)에 대입하고 정리하면 수직방향의 정현모델은 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다. 식에서 z_v, θ_a, ϕ_a 는 각각 히브, 피치, 롤 운동의 크기인 진폭을 나타낸다.

$$z_p = z_a \cos(\omega t + \alpha) - x_b \theta_a \cos(\omega t + \alpha) + y_b \phi_a \cos(\omega t + \alpha) = [z_v \cos \alpha] \cdot \cos(\omega t) - [z_v \sin \alpha] \cdot \sin(\omega t) \quad (10)$$

여기서

$$z_v \cos \alpha = z_a \cos \alpha - x_b \theta_a \cos \alpha + y_b \phi_a \cos \alpha \quad (11)$$

$$z_v \sin \alpha = z_a \sin \alpha - x_b \theta_a \sin \alpha + y_b \phi_a \sin \alpha \quad (12)$$

임의의 위치에 탑재된 발사대 해치에 작용하는 수직방향 운동의 진폭, 속도 및 가속도 식은 각각 식 (13), 식 (14), 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$z_v = \sqrt{(z_v \cos \alpha)^2 + (z_v \sin \alpha)^2} \quad (13)$$

$$\dot{z}_p = \omega \cdot z_v \cdot \cos(\omega t + \alpha + \pi/2) \quad (14)$$

$$\ddot{z}_p = \omega^2 \cdot z_v \cdot \cos(\omega t + \alpha + \pi) \quad (15)$$

III. 발사대 해치에 작용하는 외란

함정에 탑재되는 발사대 해치에 작용하는 함정운동에 의한 외란은 해치에 수직방향으로 작용하는 가속도와 가속도에 의해 부가되는 부하이다. 함정운동의 주기가 발사대 해치 운용 시간보다 충분히 길다면 함정운동에 의한 가속도 변동은 함정운동에 따라 일정 크기를 갖는 계단입력으로 모델링할 수 있다. 따라서 발사대 해치의 함정운동 외란에 대한 성능은 최대 가속도 크기를 갖는 부하 외란에 대한 계단입력 응답을 통하여 성능 입증 가능하다. 그림 13은 함정의 상부에서 바라본 형상으로 발사대 해치는 함정의 COF와 발사대 해치의 CG위치와의 직선거리 x_b, y_b 만큼 떨어져 설치된다. 발사대 해치의 수직방향 가속도 분석을 위하여 탑재 가능한 함정으로 해면상태 6조건의 Type 1과 5조건의 Type 2를 선정하였다. 함정종류별 발사대 설치 위치에 대한 거리 x_b, y_b는 표 4에 나타냈으며 함정종류 Type 2에 대해서는 발사대 해치의 탑재 위치에 따른 피치와 롤 운동 영향을 확인하기 위하여 설치 위치를 LOC1과 LOC2에 대하여 표 4와 같이 2종류의 좌표로 구성하였다. 표 5는 함정 Type 1과 Type 2에 대한

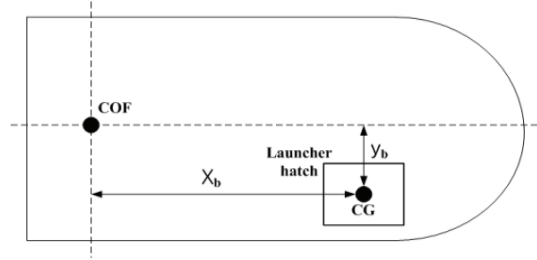


그림 13. 함정 COF로부터의 발사대 해치 위치.

Fig. 13. The location of launcher hatch from COF of ship.

표 4. 함정종류에 따른 탑재 위치 x_b와 y_b.

Table 4. The value of location x_b and y_b for the type of ship.

| Type of ship | | x _b | y _b |
|--------------|------|----------------|----------------|
| Type 1 | | 48.35M | 3.59M |
| Type 2 | LOC1 | 4.2M | 7.2M |
| | LOC2 | 17.7M | 0.72M |

표 5. 함정종류에 따른 최대 롤 및 피치 함정운동 데이터.

Table 5. The ship motion data for the maximum roll and pitch.

| Type of ship | Ship motion data | | Heave (m) | Roll (deg.) | Pitch (deg.) |
|----------------------|------------------|-----------|-----------|-------------|--------------|
| Type 1 (sea state 6) | Max Roll | Amp. | 3.62 | 12.85 | 2.4 |
| | | Period(s) | 14 | 11 | 10 |
| | Max Pitch | Amp. | 3.28 | 0 | 5.3 |
| | | Period(s) | 8 | 0 | 7 |
| Type 2 (sea state 5) | Max Roll | Amp. | 1 | 6.26 | 1.40 |
| | | Period(s) | 34.7 | 12.5 | 12.3 |
| | Max Pitch | Amp. | 1.04 | 0.6 | 1.90 |
| | | Period(s) | 21.5 | 12.38 | 5.57 |

최대 롤 및 피치조건의 함정운동 데이터로 함정 제작사인 조선소에서 함정에 탑재될 운용장비 공급자에게 제공하는 데이터이며, 탑재장비에 작용하는 함정운동에 의한 외란을 분석하기 위한 입력으로 사용된다. 이러한 함정운동 데이터는 탑재장비를 설계하기 위한 기본 데이터이며, 함정의 형상 및 함정이 운용될 해면상태 조건에 따라 이미 함정 제작사인 조선소에서 모델 및 수조실험을 통하여 검증된 데이터이다. 따라서 표 4의 발사대 설치 위치좌표와 표 5의 함정운동 데이터를 수직방향에 대한 운동식 (10)에 대입하면 발사대 설치 위치에서의 발사대 해치에 작용하는 히브, 롤, 피치에 대하여 조합된 수직방향에 대한 운동을 구할 수 있으며, 미분 연산을 통하여 시간영역에서의 속도 및 가속도 운동을 나타낼 수 있다.

그림 14에서부터 그림 19는 함정종류 Type 1과 Type 2에 대하여 각각 최대 롤 및 피치 조건에서의 발사대 해치에 대한 변위, 속도, 가속도에 대한 함정운동을 나타낸다. 그림 14는 Type 1에 대한 최대 롤 운동 조건에서의 함정운동으로 최대 가속도는 1.74 m/s²이고, 그림 15는 최대 피치 운동 조건으로 최대 가속도는 6 m/s²이다. Type 1에서는 최대 피치 운동조건이 최대 롤 운동조건보다 약 3.5배 큰 가속도가 발생되며, 발사대 해치의 위치가 함정의 COF로부터 길이방향으로 멀리 떨어져 설치되는 경우 피치 함정운동에 의한 수직방향의 가속도가 상당히 커짐을 알 수 있다. 그림 16은 Type 2의 LOC1

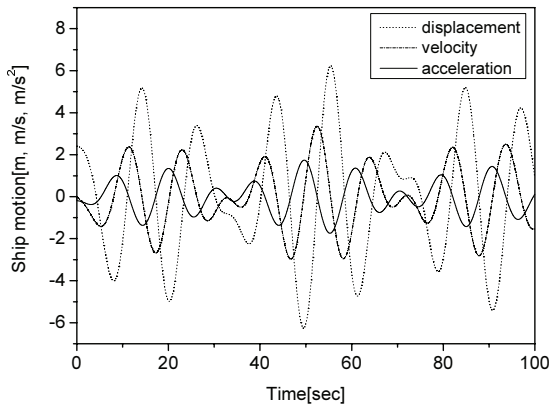


그림 14. Type 1에 대한 최대 롤 운동 조건에서의 수직방향의 함정운동 외란.

Fig. 14. The vertical ship motion disturbance in maximum roll motion condition for type 1.

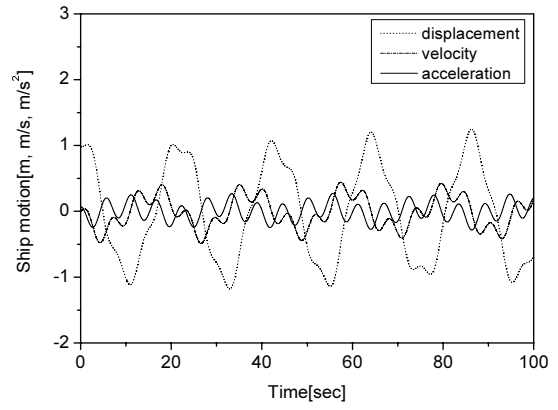


그림 17. Type 2, LOC1에 대한 최대 피치 운동 조건에서의 수직방향의 함정운동 외란.

Fig. 17. The vertical ship motion disturbance in maximum pitch motion condition for type 2, LOC1.

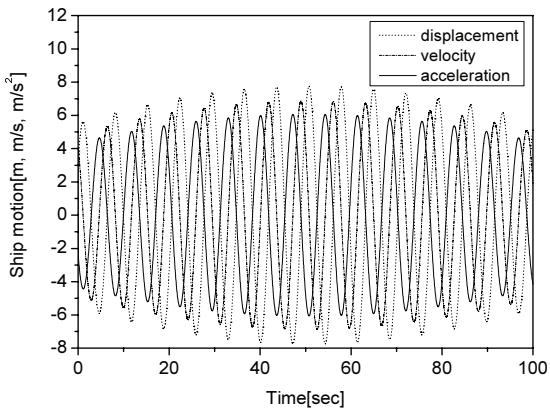


그림 15. Type 1에 대한 최대 피치 운동 조건에서의 수직방향의 함정운동 외란.

Fig. 15. The vertical ship motion disturbance in maximum pitch motion condition for type 1.

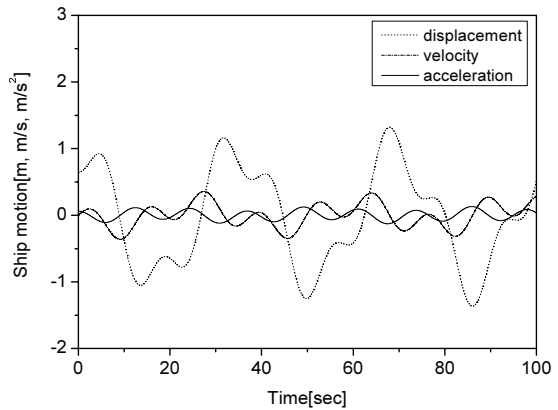


그림 18. Type 2, LOC2에 대한 최대 롤 운동 조건에서의 수직방향의 함정운동 외란.

Fig. 18. The vertical ship motion disturbance in maximum roll motion condition for type 2, LOC2.

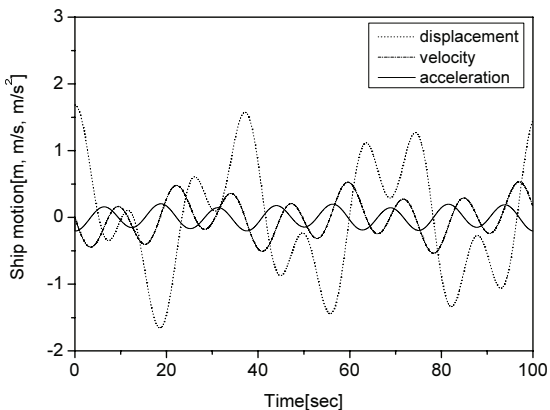


그림 16. Type 2, LOC1에 대한 최대 롤 운동 조건에서의 수직방향의 함정운동 외란.

Fig. 16. The vertical ship motion disturbance in maximum roll motion condition for type 2, LOC1.

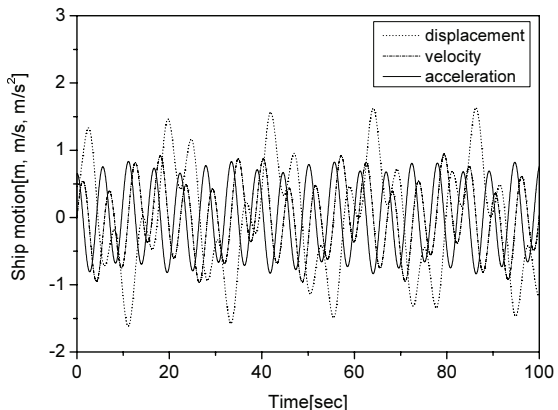


그림 19. Type 2, LOC2에 대한 최대 피치 운동 조건에서의 수직방향의 함정운동 외란.

Fig. 19. The vertical ship motion disturbance in maximum pitch motion condition for type 2, LOC2.

에 대한 최대 롤 운동 조건으로 최대 가속도는 0.2 m/s^2 이며, 그림 17은 최대 피치 운동 조건으로 최대 가속도는 0.28 m/s^2

이다. Type 2는 Type 1에 비교하여 상당히 작은 가속도를 보여 준다. Type 2는 Type 1보다 함정운동 주기가 길고 작은 진폭을

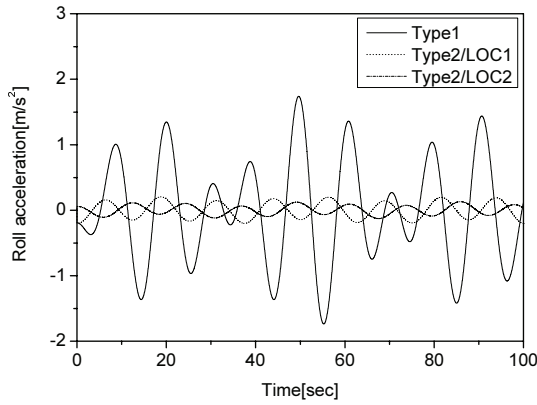


그림 20. 발사대 해치의 최대 롤 가속도 운동.
Fig. 20. The maximum roll acceleration motion for the launcher hatch.

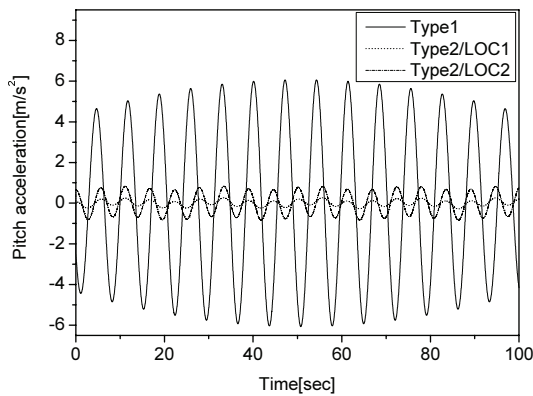


그림 21. 발사대 해치의 최대 피치 가속도 운동.
Fig. 21. The maximum pitch acceleration motion for the launcher hatch.

갖고 있으며 발사대 해치가 COF로부터 가깝게 설치되어 있으므로 함정운동에 의한 가속도의 영향이 Type 1보다 작게 받는다. 그림 18은 Type 2의 LOC2에 대한 최대 롤 운동 조건에서의 함정운동으로 최대 가속도는 0.12 m/s^2 이고, 그림 19는 최대 피치 운동 조건으로 최대 가속도는 0.83 m/s^2 를 보여준다.

동일한 최대 롤 및 피치 함정운동에 있어서 발사대 해치의 위치가 다른 LOC1와 LOC2을 비교하면 LOC2의 피치 운동에서는 함정의 길이방향의 위치 x_0 가 LOC1에 비해 4.2배 길며 이때 LOC2의 가속도가 2.9배 정도 크음을 알 수 있다. 최대 롤 운동에서는 LOC1의 함정의 좌우방향 위치 y_0 가 LOC2에 비해 10배 길며, 이 때 LOC1의 가속도가 1.6배 크게 나타났다.

그림 20과 그림 21의 Type 1과 Type 2의 롤 운동과 피치 운동 가속도 결과로부터 알 수 있듯이 함정에 탑재되는 발사대 해치는 최대 롤 운동 보다 최대 피치 운동 조건에 의한 가속도 외란에 영향을 크게 받음을 알 수 있다. Type 2에서 동일 함정조건의 LOC1과 LOC2의 함정 운동 가속도 결과에서 알 수 있듯이 발사대 해치가 함정의 COF로부터 더 멀리 탑재되는 경우 가속도의 크기가 커짐을 알 수 있다. 따라서 함정에 탑재되는 발사대 해치의 탑재 위치가 외란의 크기를 결정할 수 있음을 알 수 있다. 또한 함정의 COF에 작용하는 함

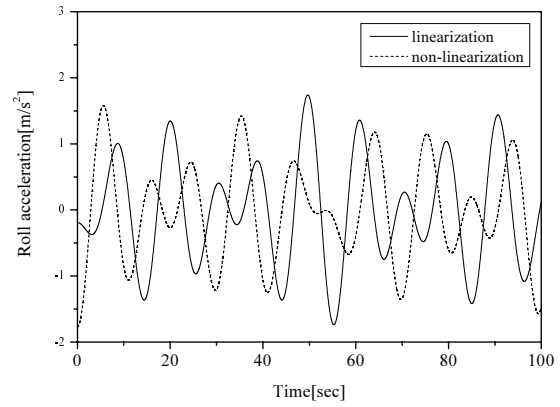


그림 22. 선형 및 비선형 수식에 대한 최대 롤 가속도.
Fig. 22. The maximum roll acceleration for linearization and non-linearization.

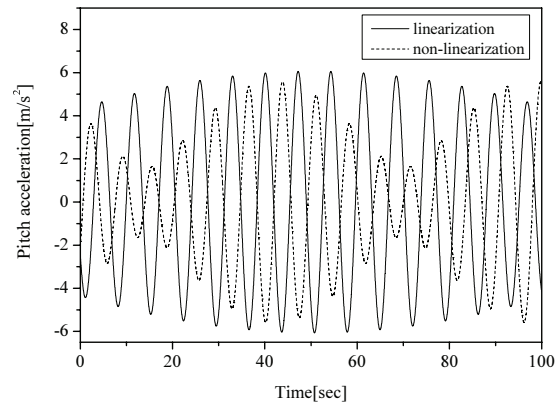


그림 23. 선형 및 비선형 수식에 대한 최대 피치 가속도.
Fig. 23. The maximum pitch acceleration for linearization and non-linearization.

정운동 데이터를 살펴보면 피치 운동이 롤 운동보다 진폭과 주기가 작은 것으로 나타나지만 진폭보다 주기에 의한 영향으로 피치 운동 가속도가 크게 나타남을 알 수 있다. 그림 22와 그림 23은 원래의 오일러 회전변환 식 (4)와 오일러각이 작은 라디안 값을 갖는 가정으로 선형화한 식 (6)을 각각 적용한 최대 롤 및 피치 가속도를 비교한 결과이다. 최대 롤 가속도에서는 최대 가속도 오차가 0.03 m/s^2 으로 약 1.7%의 오차로 나타났고, 최대 피치 가속도에서는 최대 가속도 오차가 0.43 m/s^2 으로 약 7.2%로 나타났다.

표 6에 수직방향 외란에 대한 발사대 해치가 받는 최대 가속도에 대한 시뮬레이션 결과를 정리하여 나타냈다. 전체적으로 Type 1에 해치가 탑재되는 경우 가장 큰 롤 운동과 피치 운동에 의한 가속도 외란을 받을 것으로 예상된다. 함정에 탑재되는 발사대 해치시스템의 구동장치 및 제어기 설계시 최대 피치 함정운동에 의해서 부가되는 가속도는 최대 6 m/s^2 으로 0.611 G임을 알 수 있다. 함정운동으로부터 계산된 가속도를 사용하여 함정운동에 의해 발사대 해치에 수직으로 작용하는 부하 외란에 대한 하중 M_{dist} 은 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_{dist} = (M_{hatch} + M_{icng}) \cdot G_{ship} \quad (16)$$

표 6. 수직방향 함정운동 외란에 대한 발사대 해치의 최대 가속도.

Table 6. The result of maximum acceleration of the launcher hatch for the vertical ship motion disturbance.

| Type of ship | Condition | Acceleration | | |
|--------------|------------|------------------|-------|-------|
| | | m/s ² | G | |
| Type 1 | Max. roll | 1.74 | 0.177 | |
| | Max. pitch | 6.00 | 0.611 | |
| Type 2 | LOC1 | Max. roll | 0.20 | 0.020 |
| | | Max. pitch | 0.28 | 0.028 |
| | LOC2 | Max. roll | 0.12 | 0.012 |
| | | Max. pitch | 0.83 | 0.084 |

표 7. 수직방향 함정운동에 의한 발사대 해치의 부하 외란.
Table 7. The maximum load disturbance applied to the launcher hatch by the vertical ship motion.

| Type of ship | M _{hatch} (kg) | M _{icing} (kg) | G _{ship} (G) | M _{dist} (kg) |
|--------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|------------------------|
| Type 1 | 105 | 12.8 | 0.611 | 72 |
| Type 2 | LOC1 | 105 | 0.028 | 3.3 |
| | LOC2 | 105 | 0.084 | 9.9 |

여기서, M_{hatch}: 해치중량, M_{icing}: 적설하중, G_{ship}: 함정운동에 의한 수직방향 가속도이다. 함정의 적설하중은 미군사 핸드북 MIL-HDBK-2036에 20 kg/m²으로 명시되어 있다. 따라서 함정운동에 의해 발사대 해치에 부가되는 부하 외란의 크기는 표 7과 같이 3.3 kg ~ 72 kg임을 알 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 함정에 탑재되는 발사대 해치에 작용하는 수직방향의 함정운동 외란을 분석하고, 부하 외란의 크기를 제시하였다.

발사대 해치에 가장 크게 작용하는 함정운동 조건은 최대 피치 운동 조건임을 확인하였고, 특히 해치가 함정의 중심점에서 멀리 떨어져 탑재되는 경우 최대 0.611 G의 최대 가속도가 작용하여 72 kg의 부하가 외란으로 부가됨을 확인하였다. 최대 롤 운동 조건에서는 최대 가속도가 0.177 G로 최대 피치 운동 조건의 가속도보다 작게 발사대 해치에 작용함을 확인하였다. 함정운동 데이터가 동일한 경우 최대 피치 조건에서 발사대 해치 탑재 거리가 4.2배 증가하는 경우 가속도는 약 3배 증가하였으며, 최대 롤 조건에서는 탑재거리가 10배 증가하는 경우 가속도는 약 1.7배 증가함을 확인하였다. 또한 선형화한 식을 사용하는 경우 Type 1 함정의 최대 피치 운동에서 약 7.2% 오차가 발생함을 확인하였다.

끝으로 발사대 해치를 Type 1과 Type 2에 동일한 형상으로 탑재되어야 하므로 최대 조건인 Type 1의 피치 운동에 대한 가속도 크기를 고려하여 설계하여야 함을 제시하였다. 향후 발사대가 함정에 탑재되는 경우 실험을 통하여 수직방향 운동을 검증하는 연구가 필요할 것으로 사료된다.

REFERENCES

[1] J. M. J. Journee and J. Pinkster, "Introduction in ship hydromechanics," *Delft University of Technology*, Apr. 2002.
[2] D. Sandaruwan, N. Kodikara, R. Rosa, and C. Keppitiyagama,

"Modeling and simulation of environmental disturbances for six degrees of freedom ocean surface vehicle," *Sri Lankan Journal of Physics*, vol. 10, pp. 39-57, 2009.

[3] M. R. Haddara and J. Xu, "On the identification of ship coupled heave-pitch motions using neural networks," *Ocean Engineering*, vol. 26, pp. 381-400, May 1999.
[4] J. S. Ahn, "Missile fly-out launch dynamic analysis including ship motion," *Korea Institute of Military Science and Technology*, vol. 5, pp. 37-49, Jul. 2002.
[5] M. S. Triantafyllou, M. Bodson, and M. Athans, "Real time estimation of ship motions using Kalman filtering techniques," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. OE-8, no. 1, pp. 9-19, Jan. 1983.
[6] D. Gibbins, J. Symons, and B. Haywood, "Ship motion estimation from ISAR data," *ISAAP 1999*, Brisbane, Australia, pp. 22-25, Aug. 1999.
[7] T. Perez and M. Blanke, "Simulation of ship motion in seaway," The University of Newcastle, Technical Report, no. EE02037, 2002.
[8] T. I. Fossen, "Marine control systems: guidance, navigation and control of ships, rigs and underwater vehicles," *Marine Cybernetics AS*, Trondheim, Norway, 2002.
[9] J. Shen, Y. Li, and X. Meng, "Predict pitch and heave motion of ship via inverse triangle transform MGM(1,n) model," *Proc. of the 2010 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 1460-1465, Aug. 2010.
[10] E. A. Boroujeni and H. R. Momeni, "Adaptive sliding control for roll motions of ships," *International Conference on Control, Automation and Systems in Seoul*, pp. 1622-1625, Oct. 2008.
[11] B. D. Kim and J. S. Lee, "A tracking with motion compensation in local navigation frame for ship-borne 2D surveillance radar," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering (in Korean)*, vol. 13, no. 5, pp. 507-512, May 2007.



변영철

1995년 충남대학교 기계설계공학과 공학사 졸업. 1997년 동 대학원 공학석사 졸업. 1997년~현재 국방과학연구소 근무 중, 관심분야 자동제어, 국방로봇 제어, 발사대 구동장치 제어 및 개발.



강이석

1974년 서울대 기계공학과 졸업. 1983년 아주대학교 기계공학과 석사. 1994년 한국과학기술원 기계공학과 박사. 1991년~1992년 MIT대학 방문연구원. 1981년~현재 충남대학교 기계설계공학과 교수. 관심분야는 제어이론의 응용, 로봇틱스, 인공지능, 유압공학.