

# 횡경사를 고려한 선박조종운동의 새로운 수학적모델에 관한 연구

손 경 호\* · 김 용 민\*\*

## < 목 차 >

### Abstract

- |                      |                 |
|----------------------|-----------------|
| 1. 서 언               | 4. 수치계산 및 결과 고찰 |
| 2. Roll 운동을 고려한 조종운동 | 5. 결 언          |
| 3. 조종운동방정식           | 참고문헌            |

## 요 약

작은 메타센터높이를 가진 선박이나 고속선 등의 조종성능은 횡동요(roll) 운동이 미치는 영향에 대해서 고려되어야 할 것이다. 이러한 조종성능의 추정에는 surge-sway-yaw 조종운동방정식에 횡동요 운동을 추가함으로써 가능하게 된다. 본 연구에서는 선박의 4-자유도 운동에 대한 조종성능 추정기법에 대해서 논하였다. 구체적으로 surge-sway-yaw 조종운동방정식에 추가되는 roll 운동항에 대한 새로운 모델을 제안하였으며, 다른 추정결과값과 비교·검토하였다. 그 결과, 새로운 모델을 운동방정식에 추가함으로써 만족스러운 조종성능을 추정할 수 있었다.

\* 한국해양대학교 해양시스템공학부

\*\* 한국해양대학교 대학원 해양시스템공학과

## 1. 서 언

선박의 조종운동은 6-자유도 운동으로서, 이 모든 운동을 고려하여 운동방정식을 수립하고 조종성능을 평가하기란 매우 복잡하고 어렵다. 그리하여 지금까지, 선박의 조종성능을 추정함에 있어서 전후동요(surge), 좌우동요(sway), 선수동요(yaw)의 운동만을 고려한 많은 연구가 수행되었으며 좋은 결과를 보이고 있다.

그러나, 작은 메타센터높이(GM)를 가진 선박이나 고속선과 같은 경우에는 횡동요(roll) 운동이 조종성능에 미치는 영향을 무시할 수 없다.

따라서, surge-sway-yaw 조종운동방정식에 횡동요(roll) 운동을 추가함으로써 만족스러운 조종성능을 추정할 수 있을 것이다.

지금까지 이러한 선박의 4-자유도 운동에 대한 조종성능 추정기법에 대해 많은 연구가 수행되었다. 그러나 surge-sway-yaw 조종운동방정식에 추가된 roll 운동항이 너무 복잡하거나 만족스럽지 못한 결과를 보여주기도 한다.

본 연구에서는 roll 운동항에 대한 새로운 모델을 제안하였으며, 다른 추정결과값과 비교·검토하였다. 그 결과, 새로운 모델을 운동방정식에 추가함으로써 만족스러운 조종성능을 추정할 수 있었다. 본 연구에서의 새로운 roll 운동항을 추가한, 좀더 단순한 조종운동방정식을 해석함으로써, roll 운동을 고려한 많은 선박의 조종성능을 추정할 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. Roll 운동을 고려한 조종운동

선박의 roll 운동이 조종성능에 미치는 영향에 대한 연구가 국내외적으로 많이 수행되었다. 처음으로 roll 운동의 영향을 고려한 Eda의 연구에 뒤이어 Hirano, Sohn, Kijima 등에 의한 지속적인 연구로 roll 운동을 고려한 조종운동 성능 추정기법에 많은 발전을 가져왔다. 다음은 각 연구에서의 유체동역학적 힘과 모멘트에 미치는 roll의 영향을 나타낸 것이다.

(1) Eda (1980)

$$\cdot Y_{\phi}' \phi, N_{\phi}' \phi$$

⇒ 선형항만 제안 ⇒ 부적합

(2) Hirano (1980)

$$\cdot Y_{\phi}' \phi + Y'_{v|\phi} v'|\phi| + Y'_{r|\phi} r'|\phi|$$

$$\cdot N_{\phi}' \phi + N'_{v|\phi} v'|\phi| + N'_{r|\phi} r'|\phi|$$

⇒  $v'$  가 일정하다고 볼 때,  $\phi > 0$  일 때와  $\phi < 0$  일 때의  $Y$ -force와  $N$ -moment가 같다고 간주.  
 ⇒ 부적합

(3) Sohn (1981)

$$\begin{aligned}
 & \cdot Y'_\phi \phi + Y'_{vv\phi} v'^2 \phi + Y'_{v\phi\phi} v' \phi^2 \\
 & \quad + Y'_{rr\phi} r'^2 \phi + Y'_{r\phi\phi} r' \phi^2 \\
 & \cdot N'_\phi \phi + N'_{vv\phi} v'^2 \phi + N'_{v\phi\phi} v' \phi^2 \\
 & \quad + N'_{rr\phi} r'^2 \phi + N'_{r\phi\phi} r' \phi^2
 \end{aligned}$$

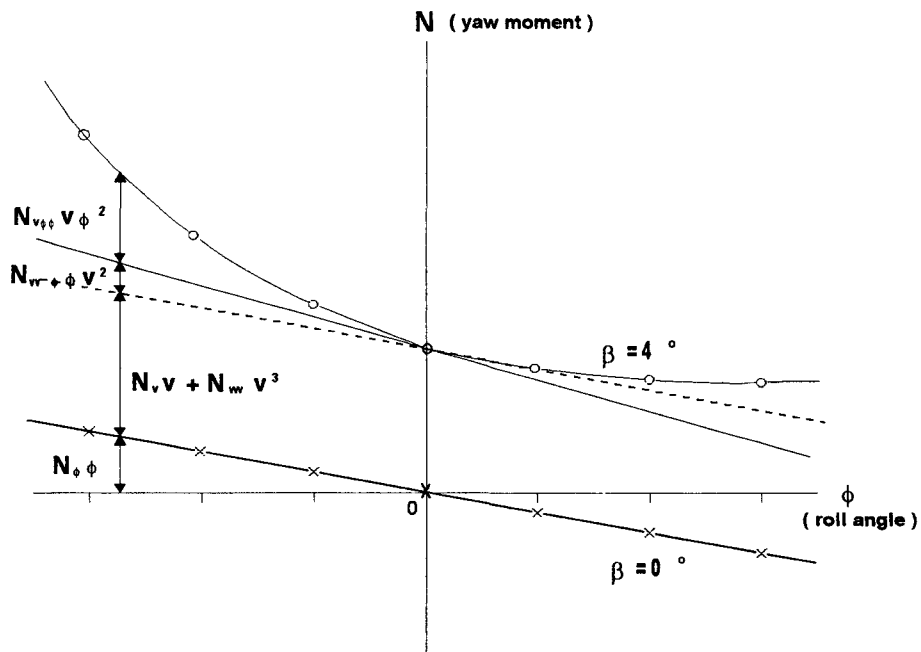


Fig. 1 유체력의 구성 ( $\beta = -v'$ )

(4) Kijima (1996)

$$\begin{aligned}
 & \cdot Y_{\phi'} \phi + Y'_{\beta\phi} \beta\phi + Y'_{r\phi} r'\phi + Y'_{\beta\beta\phi} \beta|\beta|\phi \\
 & \quad + Y'_{rr\phi} r'|r'|\phi + Y'_{\beta\beta r\phi} \beta^2 r'|\phi| + Y'_{\beta r r\phi} \beta r'^2\phi \\
 & \cdot N_{\phi'} \phi + N'_{\beta\phi} \beta\phi + N'_{r\phi} r'\phi + N'_{\beta\beta\phi} \beta|\beta|\phi \\
 & \quad + N'_{rr\phi} r'|r'|\phi + N'_{\beta\beta r\phi} \beta^2 r'|\phi| + N'_{\beta r r\phi} \beta r'^2\phi
 \end{aligned}$$

⇒ 여러항을 고려하였으므로 정확성은 있을지 모르지만 비선형항이 너무 복잡하여 실용적이지 못함.

(5) 실용적 모델

지금까지 수행된 여러 구속모형실험 결과를 종합·검토하여 새로운 모델을 제안하고자 한다. 그 내용은 다음과 같다.

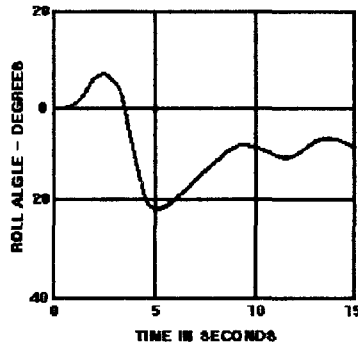


Fig. 2 Roll-angle time records for a starboard turn

선박이 직진침로를 유지하다가 우선회하게 되면,

$$r' > 0, \quad v' < 0 (\beta > 0), \quad \phi < 0$$

선박이 좌선회하게 되면

$$r' < 0, \quad v' > 0 (\beta < 0), \quad \phi > 0$$

의 값을 가지고 운동을 한다.

물론, 선회초기에는 타직압력으로 인하여  $\phi$ 의 값이 위에서와 달리 반대부호를 취하는 과도상태가 있기는 하지만 그 시간과 절대치가 미소하므로 무시할 수 있다.

그러므로, 선박의 조종운동에 있어서 고려해야 할 영역은 상기와 같이 두 영역으로 간단히 생각할 수 있다.

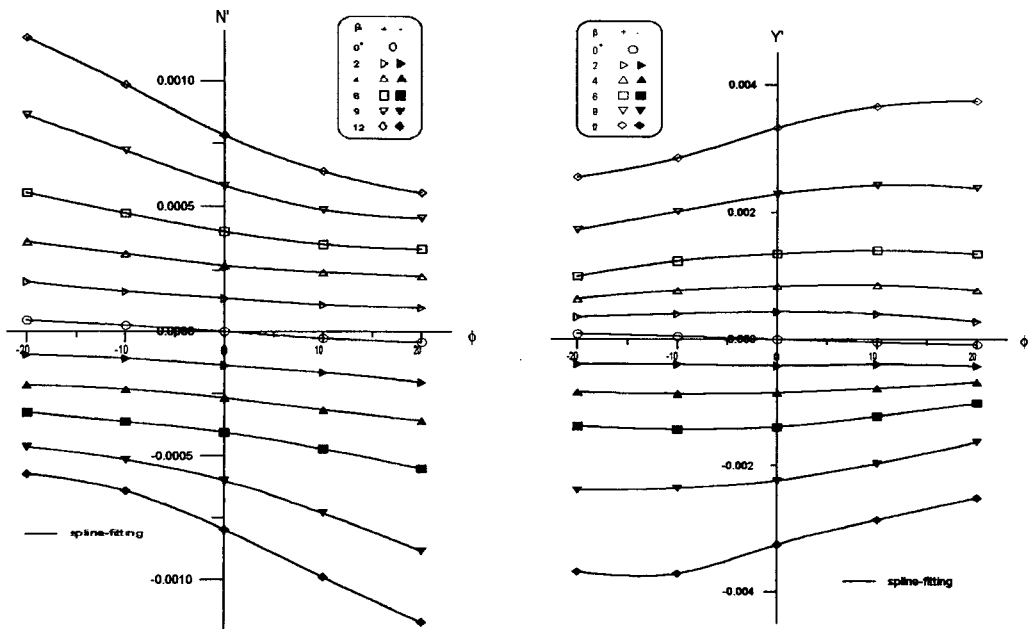
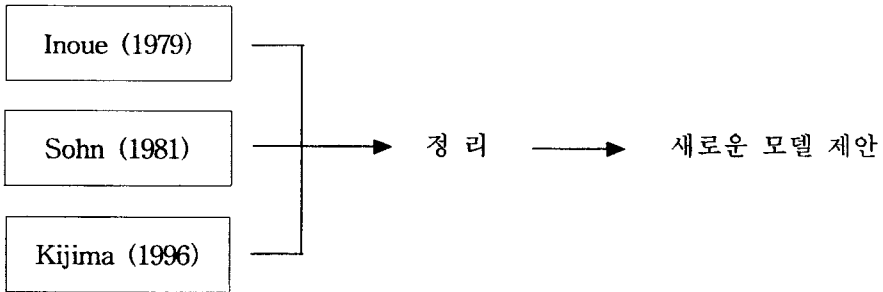


Fig. 3 Lateral force & Yaw moment coefficient due to roll angle with drift angle [Sohn(1981)]

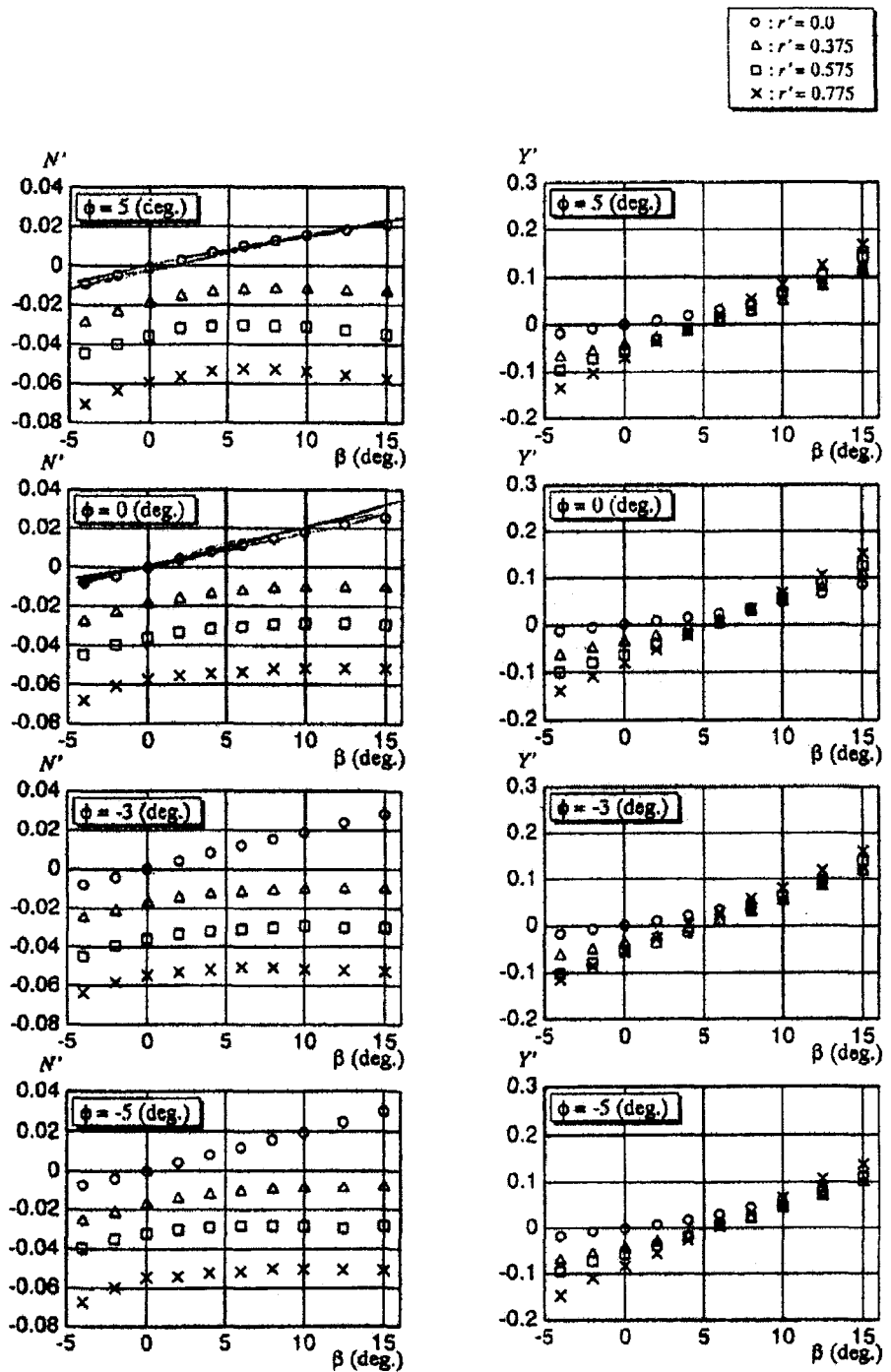


Fig. 4 Lateral force & Yaw moment coefficient due to roll angle with drift angle [Kijima(1996)]

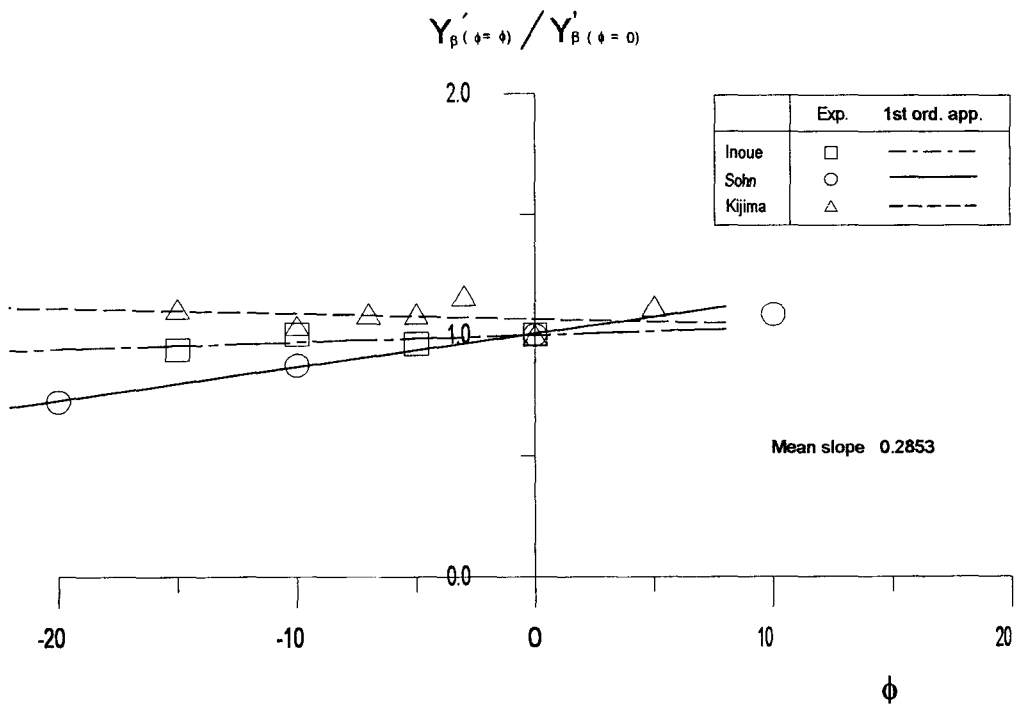


Fig. 5 Linear derivative  $Y_{\beta}'$  as function of roll angle

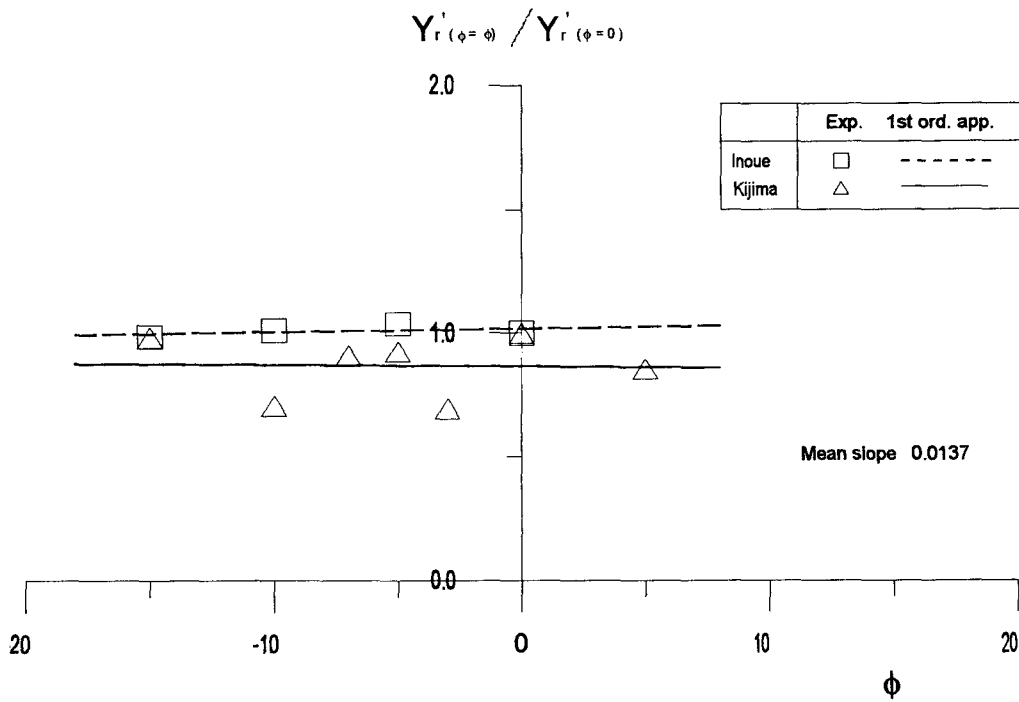


Fig. 6 Linear derivative  $Y_r'$  as function of roll angle

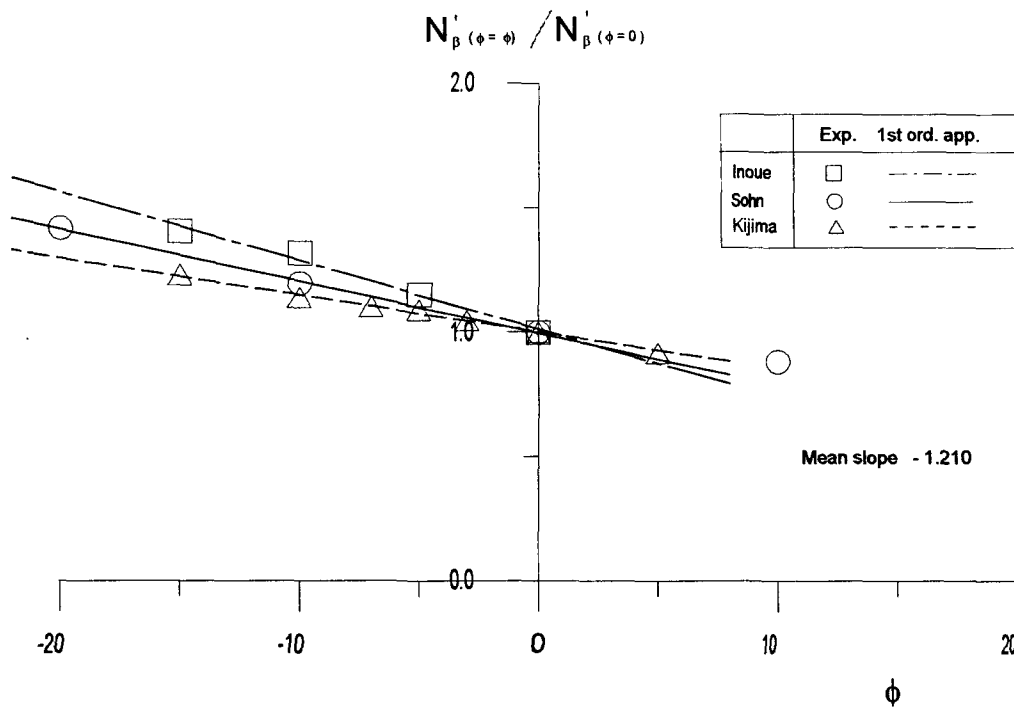


Fig. 7 Linear derivative  $N'_\beta$  as function of roll angle

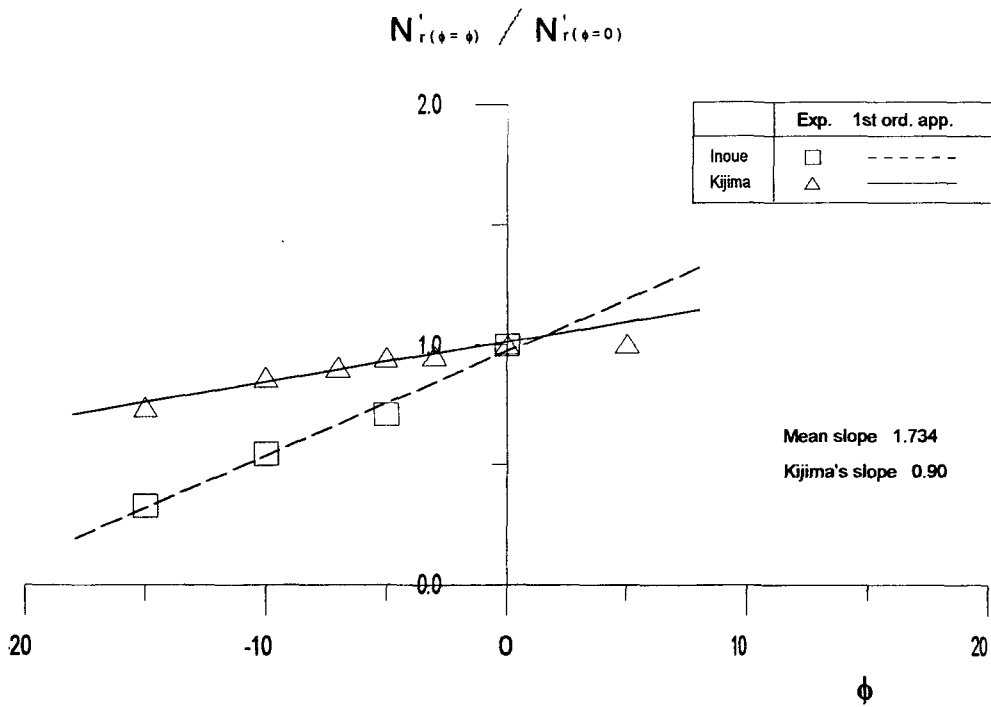


Fig. 8 Linear derivative  $N'_r$  as function of roll angle



상기 실험 자료들의 재해석치를 이용하여  $\beta, r', \phi$ 에 기인하는 Y-force와 N-moment를 정리하면 다음과 같다. 단,  $\beta, r'$ 의 비선형항을 제외하고 나타낸다.

$$\begin{aligned} \cdot Y'(\beta, r', \phi) &= Y'_\beta \beta (1 + 0.2853 \phi) + Y'_r r' (1 + 0.0137 \phi) + Y'_\phi \phi \\ &= Y'_\beta \beta + Y'_{\beta\phi} |\beta| \phi + Y'_r r' + Y'_{r\phi} |r'| \phi + Y'_\phi \phi \end{aligned}$$

$$\text{여기서, } Y'_{\beta\phi} \approx 0.2853 Y'_\beta \quad Y'_{r\phi} \approx 0.0137 Y'_r$$

$$\begin{aligned} \cdot N'(\beta, r', \phi) &= N'_\beta \beta (1 - 1.210 \phi) + N'_r r' (1 + 0.90 \phi) + N'_\phi \phi \\ &= N'_\beta \beta + N'_{\beta\phi} |\beta| \phi + N'_r r' + N'_{r\phi} |r'| \phi + N'_\phi \phi \end{aligned}$$

$$\text{여기서, } N'_{\beta\phi} \approx -1.21 N'_\beta \quad N'_{r\phi} \approx 0.90 N'_r$$

따라서, roll 운동의 영향을 나타내는 추가항은

$Y'_\phi \phi + Y'_{\beta\phi}  \beta  \phi + Y'_{r\phi}  r'  \phi$ $N'_\phi \phi + N'_{\beta\phi}  \beta  \phi + N'_{r\phi}  r'  \phi$
---

의 식으로 간단하게 나타낼 수 있다.

참고로,

$$\begin{aligned} Y'_{|\beta|\phi} &= Y'_{|\nu|\phi}, \quad N'_{|\beta|\phi} = N'_{|\nu|\phi} \\ Y'_\beta &= -Y'_\nu, \quad N'_\beta = -N'_\nu \end{aligned}$$

의 관계가 성립된다.

한편, 상기  $N'_{r\phi}$ 의 값을 결정하는 과정에서 mean slope를 사용하지 않고 Kijima의 실험결과의 slope를 사용하였다. Inoue의 실험결과는 다소 slope가 큰 경향이 있었고 다음과 같이 검증하였을 때 mean slope를 이용하면 추정치와 상당한 차이를 보인다는 것을 알 수 있었다.

본 연구에서 채택한 SR-108 선박의  $N'_r$ 와  $N'_v$ 의 구속모형실험 결과값은 다음과 같다.

$$N'_r = -0.0457, \quad N'_v = -0.07936$$

(1) mean slope

$$\begin{aligned} N'_{r\phi} &= 1.734 \times N'_r \\ &= 1.734 \times (-0.0457) \approx -0.07924 \end{aligned}$$

(2) Kijima 실험치

$$\begin{aligned} N'_{r\phi} &= 0.90 \times N'_r \\ &= 0.90 \times (-0.0457) \approx -0.0411 \end{aligned}$$

(3) 이론적 추정치

$$\begin{aligned} v' &= -l'_p \cdot r' \\ N'_{r\phi} &= \frac{\partial^2 N'}{\partial |r'| \partial \phi} = \frac{\partial^2 N'}{\partial |v'| l'_p \partial \phi} \\ &= l'_p \times \frac{\partial^2 N'}{\partial |v'| \partial \phi} = l'_p \cdot N'_{v\phi} \\ \therefore N'_{r\phi} &= 0.45 \times (1.21 \times N'_v) \\ &= 0.45 \times 1.21 \times (-0.07936) \approx -0.0432 \end{aligned}$$

상기 (2), (3)의 결과는 거의 일치한다.

### 3. 조종운동방정식

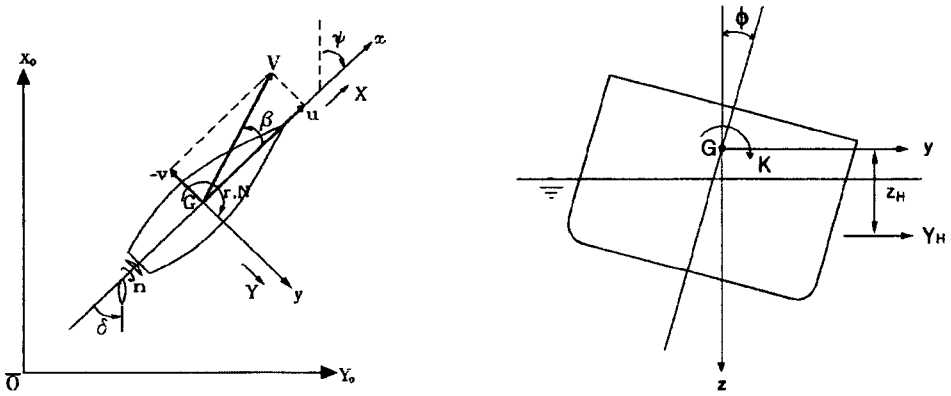


Fig. 9 Coordinate systems

상기 Fig. 9 과 같이 배의 무게중심을 좌표 원점으로 하는 선체고정좌표계를 사용하여 3-자유도 운동방정식에 횡동요를 포함시킨 4-자유도 운동방정식, surge-sway-yaw-roll 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (m + m_x) \dot{u} - (m + m_y) vr &= X \\ (m + m_x) \dot{v} + (m + m_x) ur + m_y \alpha_y \dot{r} - m_y l_y \ddot{\phi} &= Y \\ (I_z + J_z) \dot{r} + m_y \alpha_y \dot{v} &= N \\ (I_x + J_x) \ddot{\phi} - m_y l_y \dot{v} - m_x l_x ur + W \cdot GM\phi &= K \end{aligned}$$

여기서,  $l_x$ ,  $l_y$  는 x, y방향 부가질량중심의 z방향 위치이며  $\alpha_y$  는 y방향 부가질량중심의 x방향 위치이다. 그리고 우변의 외력항은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} X' &= X_H' + X_P' + X_R' \\ Y' &= Y_H' + Y_R' \\ N' &= N_H' + N_R' \\ K' &= K_H' + K_R' \\ X', Y' &= X, Y / \left( \frac{1}{2} \rho L d V^2 \right) \\ N', K' &= N, K / \left( \frac{1}{2} \rho L^2 d V^2 \right) \end{aligned}$$

여기서, 첨자 H, P, R은 각각 선체(hull), 프로펠러, 타를 의미한다.

선체, 프로펠러 및 타에 기인하여 선박에 작용하는 유체력은 다음과 같이 표시할 수 있다

• 선체에 기인하는 유체력

$$X_H' = X_{uu}' u'^2 + X_{vr}' v' r' + X_{vv}' v'^2 + X_{rr}' r'^2 + X_{\phi\phi}' \phi^2$$

$$Y_H' = Y_v' v' + Y_r' r' + Y_\phi' \phi + Y_{\dot{\phi}}' \dot{\phi} + Y_{vvv}' v'^3 \\ + Y_{vvr}' v'^2 r' + Y_{vrr}' v' r'^2 + Y_{rrr}' r'^3 \\ + Y_{v\phi}' |v'| \phi + Y_{r\phi}' |r'| \phi$$

$$N_H' = N_v' v' + N_r' r' + N_\phi' \phi + N_{\dot{\phi}}' \dot{\phi} + N_{vvv}' v'^3 \\ + N_{vvr}' v'^2 r' + N_{vrr}' v' r'^2 + N_{rrr}' r'^3 \\ + N_{v\phi}' |v'| \phi + N_{r\phi}' |r'| \phi$$

$$K_H' = K_{\dot{\phi}}' \dot{\phi} - Y_H' \cdot z_H'$$

• 프로펠러에 기인하는 유체력

$$X_p' = (1 - t) T'$$

여기서,

$$T = \rho n^2 D^4 K_T$$

$$K_T = a_1 + a_2 J_P + a_3 J_P^2$$

$$J_P = u_P / (nD) = u(1 - w_p) / (nD)$$

• 타에 기인하는 유체력

$$X_R' = -(1 - t_R) F_N' \sin \delta$$

$$Y_R' = (1 + a_H) F_N' \cos \delta$$

$$N_R' = (x_R' + a_H x_H') F_N' \cos \delta$$

$$K_R' = -(1 + a_H) z_R' F_N' \cos \delta = -Y_R' \cdot z_R'$$

여기서,

$$F_N = \frac{1}{2} A_R f_a V_R^2 \sin \alpha_R$$

$$f_a = 6.13 \lambda / (\lambda + 2.25)$$

$$\alpha_R = \delta - \gamma(\beta - l'_R r')$$

$$V_R = \sqrt{u_R^2 + v_R^2}$$

$$u_R = \varepsilon n P \sqrt{1 - 2(1 - \eta k) s + (1 - \eta k(2 - k)) s^2}$$

$$\varepsilon = (1 - w_R) / (1 - w_p)$$

$$k = 0.6 / \varepsilon$$

$$w_p = w_{p_0} \exp(-4.0(\beta - x_p' r')^2)$$

$$w_R = w_{R_0} \cdot w_p / w_{p_0}$$

$$\eta = D / H$$

$$s = 1 - u_p / (nP)$$

#### 4. 수치계산 및 결과 고찰

새로운 모델을 적용한 조종운동방정식을 기존의 실험으로 구한 유체력미계수를 이용, Runge-Kutta-Gill 방법으로 시뮬레이션을 수행하였다. 대상 선형은 SR-108 컨테이너운반선으로 선박의 기본제원은 다음과 같다.

Hull		Rudder	
Length B.P.	175.0 m	Area	33.0376 m <sup>2</sup>
Breadth	25.4 m	Height	7.7583 m
Draft	8.5 m	Aspect ratio	1.8219
Displacement		Area ratio	1/45.0
volume	21222 m <sup>3</sup>	Propeller	
KM	10.39 m		
KB	4.6154 m	Diameter	6.533 m
C <sub>B</sub>	0.559	Pitch ratio	1.009
C <sub>F</sub>	0.580	Expanded area ratio	0.67
C <sub>w</sub>	0.686	Boss ratio	0.18
C <sub>M</sub>	0.966	Number of blade	5
L.C.B			
from F.P.	0.518 L		

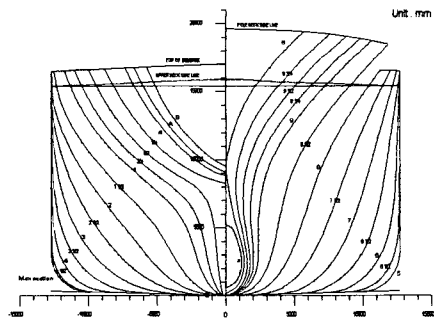


Fig. 10 Principal dimensions and body plan of SR-108 container ship

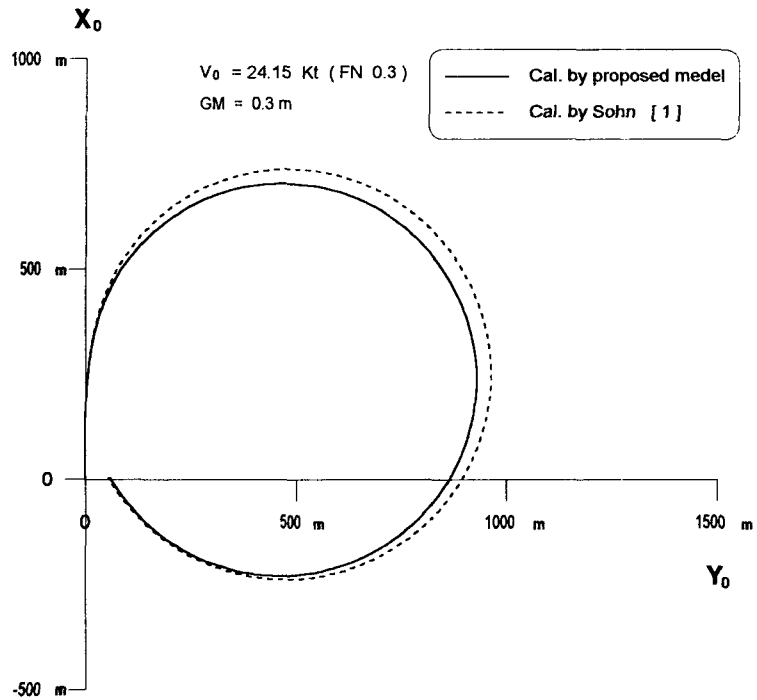


Fig. 11 turning trajectory (  $GM = 0.3$  )

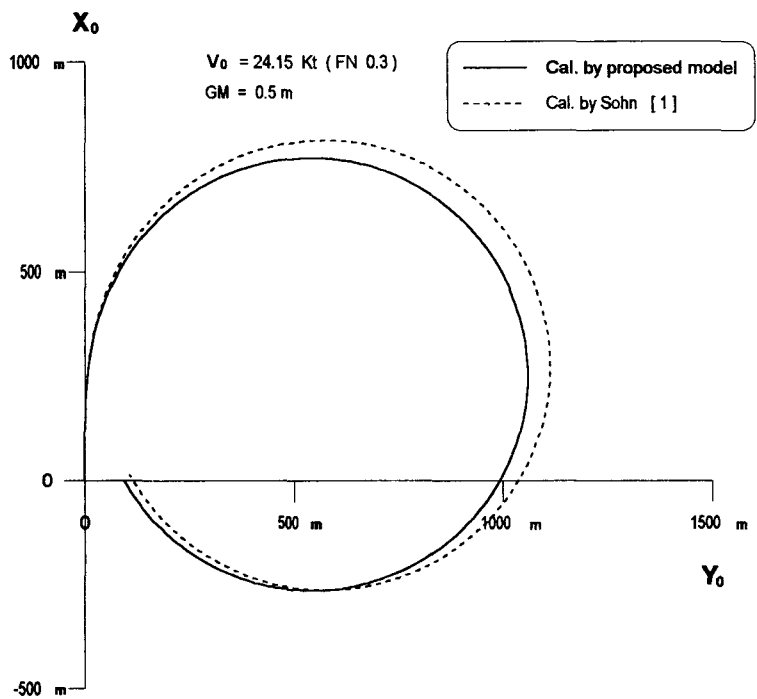


Fig. 12 turning trajectory (  $GM = 0.5$  )

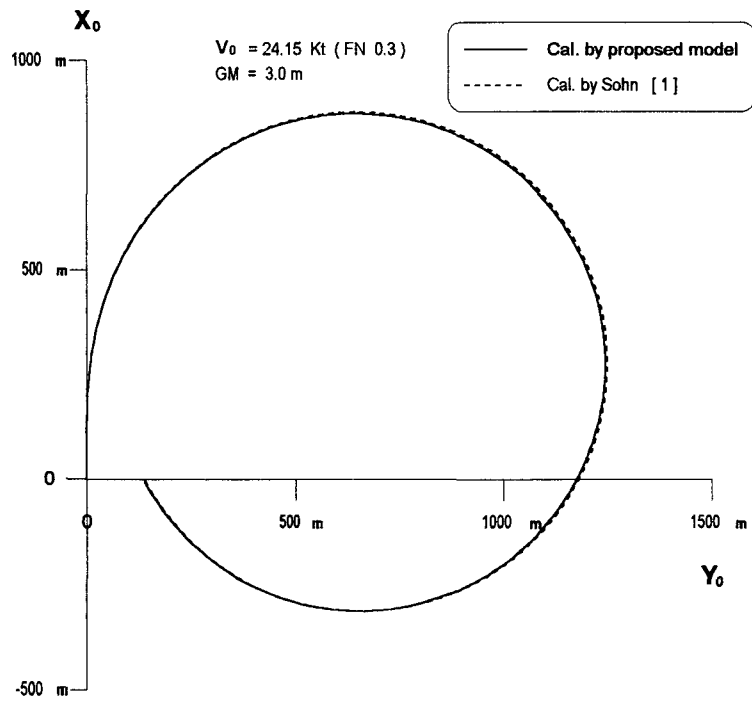


Fig. 13 turning trajectory ( GM = 3.0 )

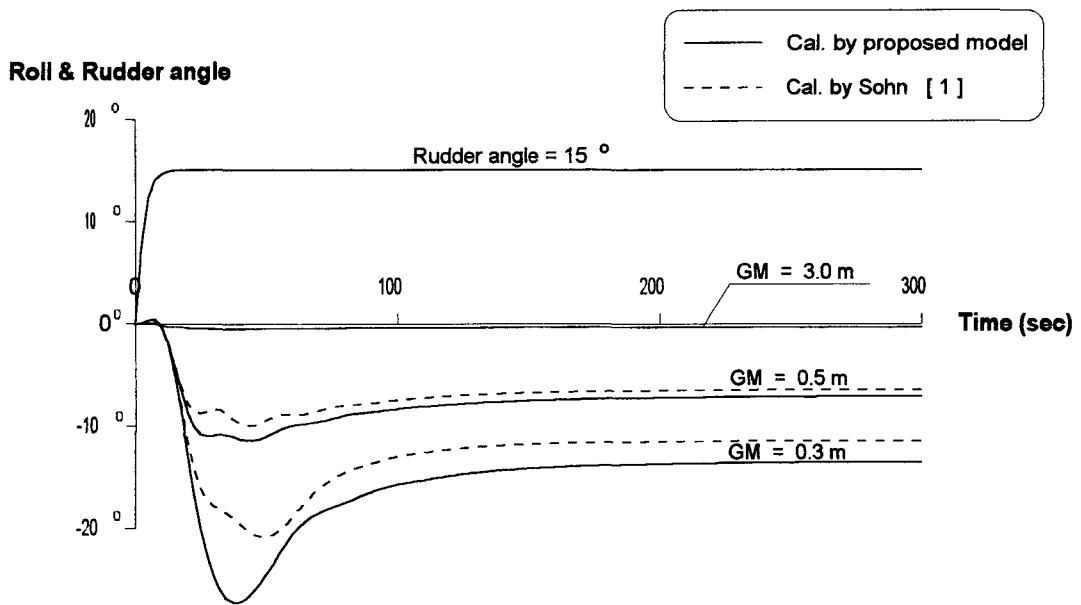


Fig. 14 Variation of roll angle in turning

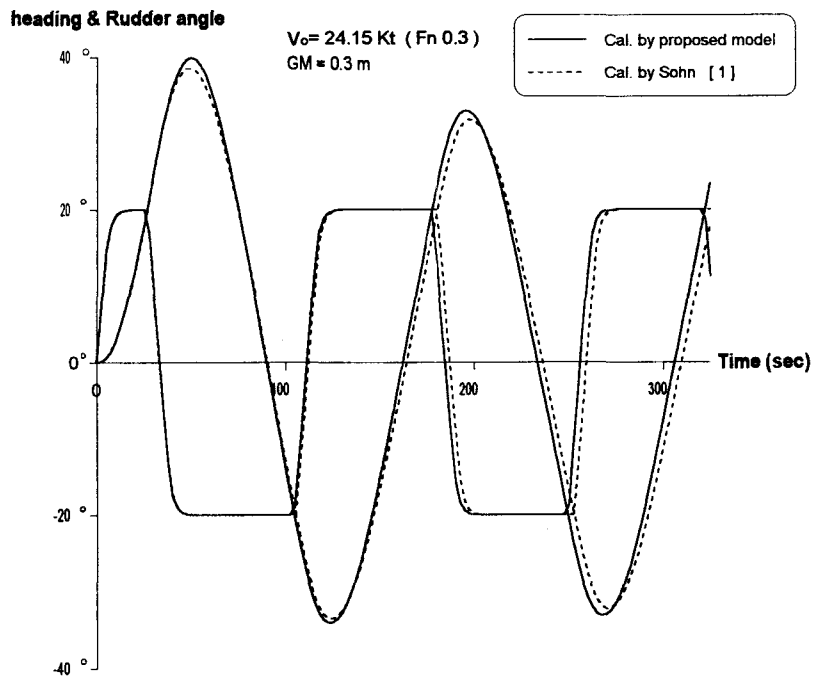


Fig. 15  $20^\circ / 20^\circ$  Zigzag maneuver (  $GM = 0.3$  )

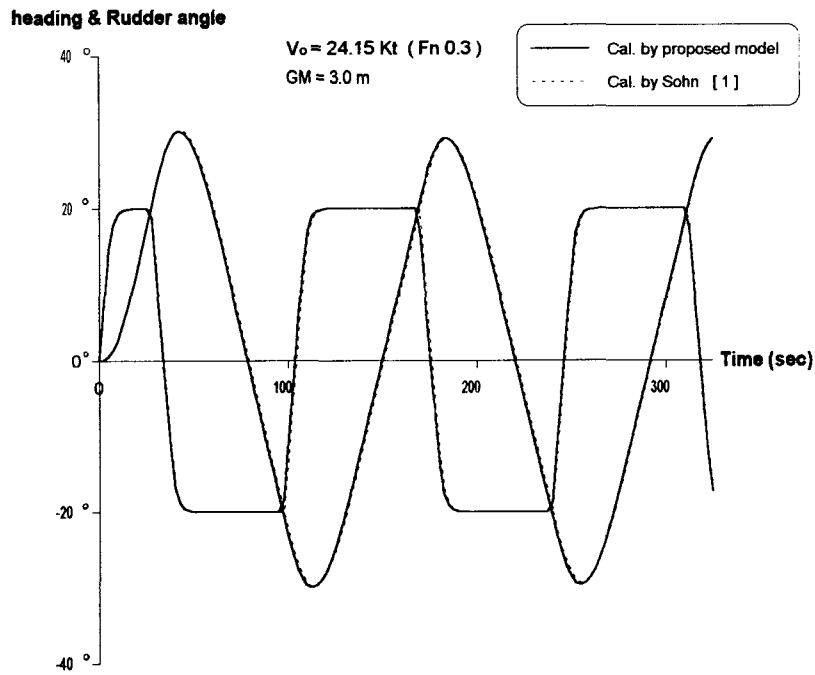


Fig. 16  $20^\circ / 20^\circ$  Zigzag maneuver (  $GM = 3.0$  )



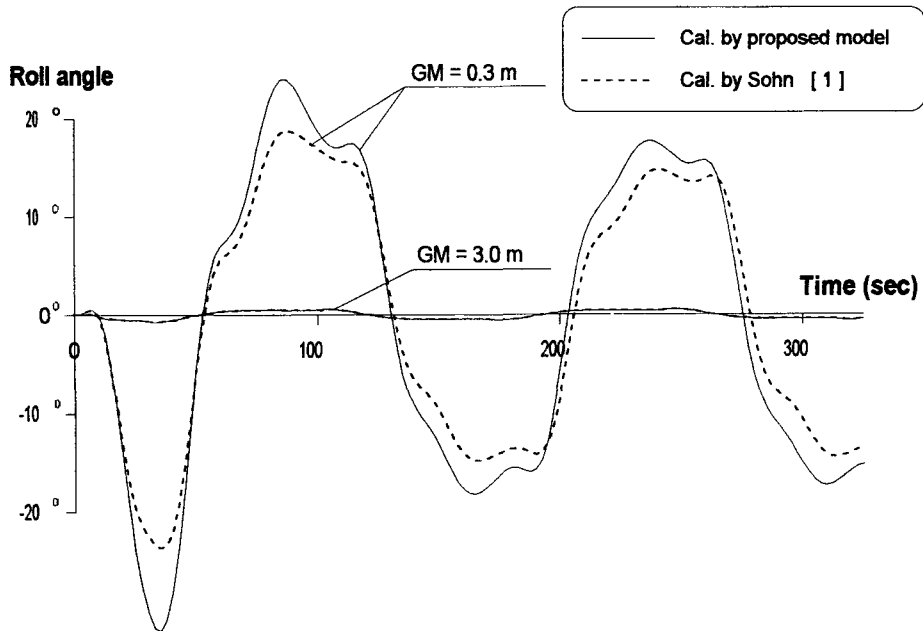


Fig. 17 Variation of roll angle in Zigzag maneuver

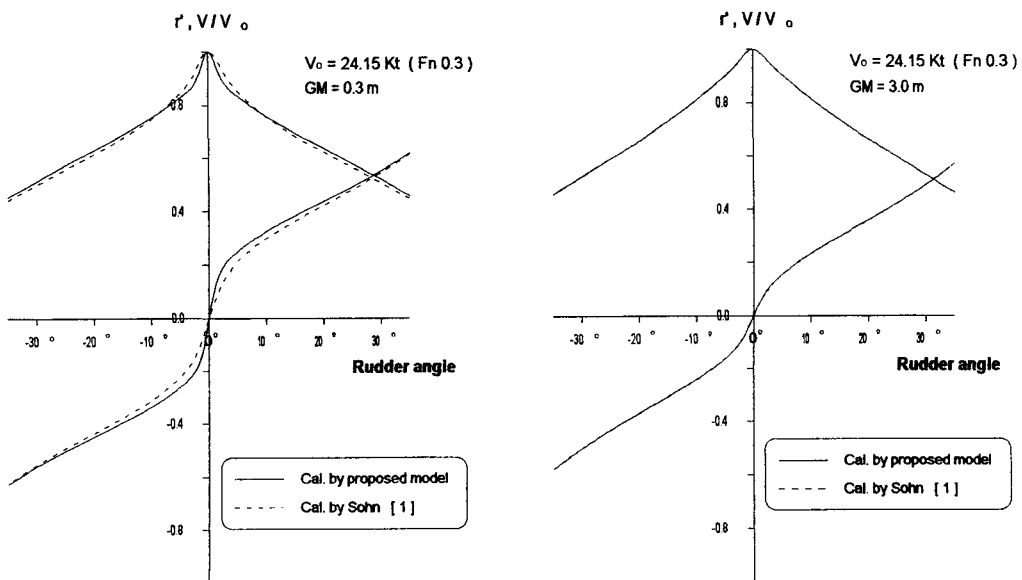


Fig. 18 Turning characteristics

## 5. 결 언

본 연구에서는 선박의 4-자유도 조종운동의 추정기법에 대하여 논하였다. 3-자유도 운동 방정식에 roll 운동의 영향을 나타내는 항을 추가함으로써 조종운동을 추정할 수 있었고, 이 추가항에 대한 새로운 모델을 제안하였다.

이 제안된 항을 포함한 운동방정식을 수치계산하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과, GM이 어느정도 작은 선박의 경우에도 정확한 조종성능을 추정할 수 있었다. 다소 오차가 있었지만 경향만을 본다면 실제의 경우와 크게 다르지 않았다.

향후 제안된 새로운 모델을 이용하여 여러 선형에 대하여 적용, 실제 선박의 조종운동을 추정하고 비교·검토하여 이 모델에 대한 정확도를 검증하고 수정·보완해야 할 것이다.

## 참고문헌

- [1] Inoue, S., "Hydrodynamic Derivatives of Ship Maneuvering Motion at Heeled Condition", Technical Report, SP. 80, Technical Committee of the West-Japan Society of Naval Architects, 1979
- [2] Eda, "Rolling and Steering Performance of High Speed Ships", the 13th Symposium on Naval Hydrodynamics, Tokyo, 1980.
- [3] Hirano, M., et al., "A Calculation of Ship Turning Motion Taking Coupling Effect Due to Heel into Consideration", 西部造船會, 1980.
- [4] 손경호, "高速コンテナ船の操縦運動と横揺れとの連成舉動について", 日本造船學會, 1981.
- [5] Kijima, K., et al., "Influence of Roll Motion on Ship Manoeuvrability", 西部造船會, 1996.