

선미형상을 고려한 천수역에서의 조종성능에 관한 연구

이성욱^{*†}

* (주)삼성중공업 중앙연구소

A Study on the Manoeuvrability as Function of Stern Hull Form in Shallow Water

Sungwook Lee^{*†}

* Central Research Institute, Samsung Heavy Industries Co., Ltd

요 약 : 본 연구에서는 선미형상을 고려한 조종성능을 심수역 뿐만 아니라 천수역에 대해서 수치 시뮬레이션을 통해 검토하였다. 선미형상을 나타내는 파라미터 중 C_{wa} 를 미소($\pm 2\%$)하게 변화시킴으로써 각 수역에서의 침로안정성, 선회 및 지그재그 성능이 어떤 변화를 보이고 그 경향이 어떻게 변화하는 지를 검토하였다. 선박의 조종성능 관점에서 흘수 대 수심의 비($=d/H$)가 0.5 부근에서의 조종성에 큰 변화를 가져오는 중요 지점임을 알 수 있었고, 비대선(VLCC, 탱커 등)과 세장선(컨테이너)의 경우 선미형상의 변화에 따라 조종성능의 변화 정도가 많은 차이를 가질 수 있음을 알 수 있었다. 또한, C_{wa} 를 감소(U형에 근접)시키면 선회운동에 있어서 advance 및 tactical diameter가 증가하고, 지그재그 운동에서는 track reach는 증가하지만 각 overshoot angle들은 감소한다. 이와 반대로, C_{wa} 를 증가(V형에 근접)시키면 선회운동에 있어서 advance 및 tactical diameter는 감소, 지그재그 운동에서는 track reach는 감소, 각 overshoot angle 들은 증가함을 알 수 있었다.

핵심용어 : 조종성, 천수역, 지그재그, 선회, 전산유체

Abstract : A numerical simulation studies were performed to investigate a manoeuvring characteristics as function of stern hull form with the mathematical model. In order to consider the effect of the stern hull form and obtain the manoeuvring characteristics, a parameter(C_{wa}) which is aft. water plane area coefficient is modified. Because modifying $C_{wa}(\pm 2\%)$ means that the stern hull form is modified to V-type or U-type, the numerical simulation was performed with this modified C_{wa} . A changing trend for the manoeuvring characteristics not only in deep water but also in shallow water such as directional stability, turning and zig-zag was investigated and presented as the results. Present study showed that the manoeuvrability in shallow water largely changed when the draught and water depth ratio($=d/H$) become 0.5, and the stern hull form can affect to the manoeuvrability of a vessel navigating in restricted water depth. In addition, it showed that approaching the stern hull to U-type makes the advance and tactical diameter of turning motion large and the overshoot angle of zig-zag motions small. Otherwise, it showed approaching the stern hull form to V-type makes the advance and tactical diameter of turning motion small and the overshoot angle of zig-zag motions large in the present study.

Key Words : Manoeuvring, Shallow water, Zig-zag, Turning, CFD

1. 서 론

운송효율 향상 및 물류이동의 증가로 인해 선박은 대형화 되고 이에 따라 해난사고가 일어나는 빈도 또한 증가하고 있는 추세이다. 이들 중 특히 탱커선의 사고는 적하된 원유

의 유출로 인해 해양오염이나 환경파괴의 심각한 원인이 되기도 한다. 이러한 해난사고의 주요원인으로써 인간요소, 환경요소, 선박의 고유 조종성능의 3요소가 거론되고 있는데, 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)는 해난사고를 미연에 방지할 목적으로 이들 3요소 중 선박의 고유 조종성능에 대해 조종성 기준(MSC.137)을 마련, 채택하여 모든 대형 선박이 이 기준을 만족하도록 권고하고 있다. 선박의

† sw8224.lee@samsung.com, 042-865-4366

초기 선형설계 단계 시 보다 좋은 성능을 얻기 위해 선미선형이 종종 변경되며, 이러한 변경은 선박의 조종성능에 영향을 끼치게 된다. 일반적으로 U형의 선미선형이 V형의 선미형상보다 조종성능이 좋다고 알려져 있으며, 이에 대해 Kijima and Nakiri(2003)는 선박의 길이, 폭, 흘수 및 선미형상을 표현하는 파라미터(C_{pa} :선체 후반부의 주형계수, C_{wa} :선체 후반부의 수선면적 계수) 등을 이용하여 선체가 받는 유체력을 추정하는 식을 통한 조종성 추정법에 대한 연구를 수행하였다. Lee et al.(1999)는 Mori(1995)가 제안하는 방법을 기반으로 선미 Profile까지 고려 가능한 수정된 추정법에 대한 연구를 수행하였다. 또한, Toxopeus(2006)는 세장체(Slender body theory or strip theory) 이론을 이용한 선형 유체력 미계수 추정법에 대한 연구를 수행하였다. 보다 구체적인 선미형상의 영향을 평가하기 위해 Nonaka et al.(1997)는 RANS(Reynolds-Averaged Navier Stokes) 계산을 통해 SR221A(V형), SR221B(U형) 및 SR221C(U와 V의 중간형) 선형의 선체가 받는 압력의 분포 및 유장의 차이를 구속모형 및 유동가시화 시험결과와 비교 분석하였다. Kim and Kim(2001)은 KVLCC1(V형)과 KVLCC2(U형)에 대해 구속모형시험(PMM : Planar Motion Mechanism)과 RANS 계산결과를 비교를 통해 그 원인 규명을 시도하였다. 최근에는 SIMMAN2008 Workshop(2008)을 통해 KVLCC1(V형)과 KVLCC2(U형)에 대한 조종성능 비교를 자유항주, 구속모형 시험(PMM 및 CMT), CFD(Computational Fluid Dynamics) 및 추정식을 이용한 수치시물레이션을 통해 다각도로 비교하였다.

한편, 유럽에는 항만내와 운하 등 수심이 얇은 수역이 다른 나라에 비해 많이 존재하며 많은 수의 선박이 항행하고 있기 때문에, 선박을 조종하는 항해사는 제한수역(천수역 및 협수로)에서의 조종성능을 파악하는 것이 중요시 되고 있다. 특히, 천수역에서의 조종성능은 심수역에서의 조종성능과는 크게 상이하기 때문에 항해사의 판단 실수로 인한 해난사고의 원인이 되기도 하는데, 이로 인해 유럽에서는 많은 연구기관을 통해 제한수역에서의 조종성능에 관한 연구가 끊임없이 이루어지고 있다. 그러나 이러한 연구는 제한수역에서의 선박에 작용하는 유체력에 관한 것들이 대부분으로 제한수역을 항행하는 선박의 조종성능과 선미형상의 영향을 동시에 고려한 연구는 거의 이루어 지지 않고 있다. 따라서, 본 논문은 선미형상을 고려한 천수역에서의 선박의 조종성능에 대해 앞서 언급한 Kijima and Nakiri(2003; 2004)가 제안한 유체력 추정식과 선미형상 파라미터(C_{wa})를 이용하여 각 수심에서의 선박의 조종성능에 대해 수치 시물레이션을 수행하여 초기 선형설계 단계 시 참조할 수 있는 가이드 라인을 제안하고자 한다. 먼저, 본 논문에서는 선미형상을 고려한 심수역 뿐만 아니라 천수역에서의 선체유체력 추정식의 타당성을 각 수심에서의 자유항주 시험결과와 비교를 통해 검증

하고, $C_{wa}(=A_{wa}/(L_a \times B))$, A_{wa}, L_a : 선체 후반부의 수선면적 및 선체 후반부의 길이)를 $\pm 2\%$ 변화시킴으로써 나타나는 각 수심에서의 선회 및 지그재그 조종성능변화를 알아보고자 한다.

2. 조종운동 방정식 및 수학모델

2.1 조종운동 방정식

평수 중에서의 선박의 조종운동은 일반적으로 종운동, 횡운동 및 선회운동의 연성운동으로 취급된다. 본 논문에서는 Fig. 1과 같이 좌표계를 취하여 조종운동을 나타내도록 한다. 여기서, $O-x_0y_0$ 를 공간고정 좌표계, $G-xy$ 를 선체고정 좌표계로 취한다. 이때 무차원화된 조종운동 방정식은 식(1)과 같이 나타내어 질 수 있다.

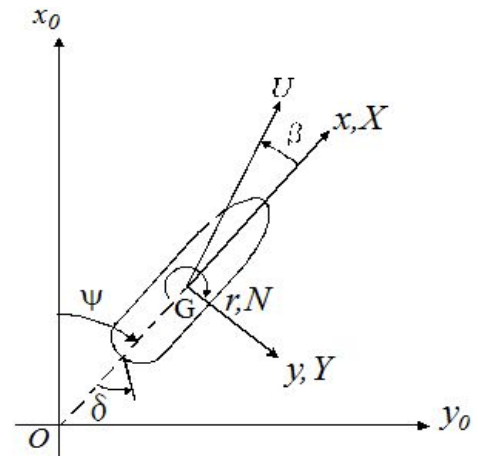


Fig. 1. Coordinate systems.

$$\begin{aligned}
 (m' + m'_x) \left(\frac{L}{U} \right) \left(\frac{\dot{U}}{U} \cos \beta - \dot{\beta} \sin \beta \right) + (m' + m'_y) r' \sin \beta &= X' \\
 -(m' + m'_y) \left(\frac{L}{U} \right) \left(\frac{\dot{U}}{U} \sin \beta + \dot{\beta} \cos \beta \right) + (m' + m'_x) r' \cos \beta &= Y' \\
 (I_{zz}' + i_{zz}') \left(\frac{L}{U} \right)^2 \left(\frac{\dot{U}}{L} r' + \frac{U}{L} \dot{r}' \right) &= N'
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서, m', m'_x, m'_y : 선체질량, X, Y 방향의 부가질량, I_{zz}, i_{zz} : 선체의 관성모멘트 및 부가 관성모멘트, U : 선속, β : 편각, r' : 선회 각속도, L, d : 선체 길이 및 흘수이고, “'”은 무차원치를 나타낸다. 식(1) 우변의 외력항 X', Y', N' 에 대해서는 MMG(Manoeuvring Mathematical model Group)형으로 다음과 같이 표현한다(Kijima and Nakiri, 2003).

$$\begin{aligned} X' &= X_H' + X_P' + X_R' \\ Y' &= Y_H' + Y_R' \\ N' &= N_H' + N_R' \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, 첨자 H, P, R 은 각각 선체, 프로펠러, 타를 나타낸다.

2.2 선체에 작용하는 유체력의 수학모델

식(2) 우변의 외력항은 Kijima and Nakiri(2003)가 제안한 선미형상을 고려한 추정식에 의해 구해진다. 선미형상을 고려한 선체에 작용하는 유체력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} X_H' &= X_{\beta r}' r' \sin \beta + X_{uu}' \cos^2 \beta \\ Y_H' &= Y_{\beta}' \beta + Y_r' r' + Y_{\beta\beta}' \beta|\beta| + Y_{rr}' r'|r'| \\ &\quad + (Y_{\beta\beta r}' + Y_{\beta r r}') \beta r' \\ N_H &= N_{\beta} + N_r r' + N_{\beta\beta} \beta|\beta| + N_{rr}' r'|r'| \\ &\quad + (N_{\beta\beta r}' \beta + N_{\beta r r}') \beta r' \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $Y_{\beta}', Y_r', N_{\beta}', \dots, N_{\beta\beta r}'$ 등은 각각 유체력 미계수를 나타내는 변수로써, Mori(1995)가 제안한 선미선형을 나타내는 파라미터를 사용하여 표현되어 진다(Kijima and Nakiri, 2003). 위의 식(3)에서의 각 유체력 미계수는 심수역에서의 선미형상의 영향이 고려된 추정식으로 Kijima and Nakiri(2004)는 이러한 유체력 미계수에 수심대 흘수비에 대한 함수로 표현되는 수정계수를 고려함으로써 천수역에서의 유체력 미계수를 추정하였다. 본 논문에서는 일례를 다음과 같이 나타내었다.

$$\begin{aligned} Y_{\beta}'(h) &= \left\{ \frac{1}{(1-h)^a} - h \right\} \times f(h) \times Y_{\beta}'(\infty) \\ N_{\beta}'(h) &= \left\{ \frac{1}{(1-h)^a} - h \right\} \times f(h) \times N_{\beta}'(\infty) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, $h=d/H$, d : 흘수, H : 수심, " (∞) "는 심수에서 유체력을 의미한다. 또한, $(1/(1-h)^a - h) \times f(h)$ 는 수심의 영향을 고려하기 위한 수정계수로써 Kijima and Nakiri(2004)는 이들 수정계수를 선체 주요목(L, B, d, C_B) 및 선미형상 파라미터로 정리한 회귀식을 제안하였다.

3. 시뮬레이션 계산 및 검토

본 논문에서는 앞서 언급한 천수역에서의 선미형상을 고려한 수학모델의 타당성을 검토하기 위해 일본 큐슈대학교

에서 실시한 자유항주 모험시험결과와 비교 검토를 수행하였다(Kijima and Nakiri, 2004). 대상 모형선은 Table 1에 표시한 4척으로 각각 화물선, 탱커선, VLCC 및 컨테이너선을 나타낸다. 시뮬레이션 계산은 만재 흘수선 상태로 수심 대 흘수비 H/d 는 6.0, 2.0, 1.5, 1.3, 1.1의 5가지 상태에서 수행되었다. 또한 선속은 천수역에서 항행한다는 것을 가정으로 하여 6노트로써 외란은 없는 것으로 가정하였다.

Table 1. Main particulars of the model ships

| | Cargo | Bulk carrier | VLCC | Container |
|--------------|-------|--------------|-------|-----------|
| $L_{bp} [m]$ | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 3.0 |
| $B [m]$ | 0.419 | 0.448 | 0.408 | 0.435 |
| $T [m]$ | 0.140 | 0.114 | 0.170 | 0.163 |
| $C_B [-]$ | 0.698 | 0.812 | 0.831 | 0.572 |

Table 1에 표시한 4척에 대해 자유항주 모험시험 결과와 시뮬레이션 계산 결과와의 비교를 Fig. 2 ~ Fig. 4에 표시하였다. 이들 그림에서 선박의 속도 저하는 초기 진입속도(U_0)로 무차원화 되었다. 본 논문에서는 모든 수심에서의 결과를 나타내지 않았지만, 자유항주 결과와 잘 일치함을 확인 할 수 있었다. 따라서, 본 논문에서 사용하는 수학모델이 천수역에서의 선미형상을 고려한 선박의 조종운동을 추정하는데 유용함을 검증할 수 있었다.

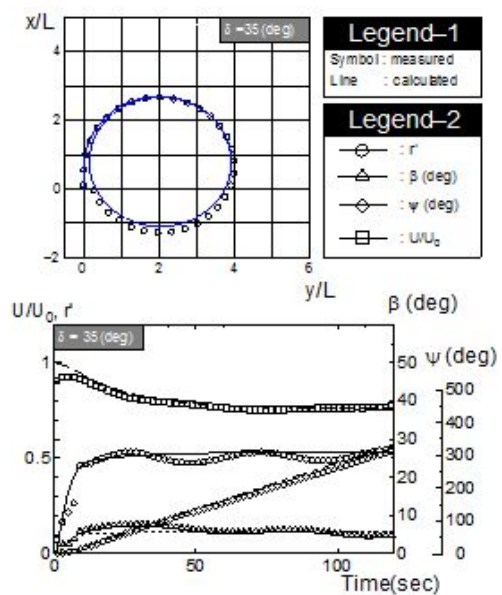


Fig. 2. Comparison of turning trajectories and time histories ($H/d=1.5$, Cargo).

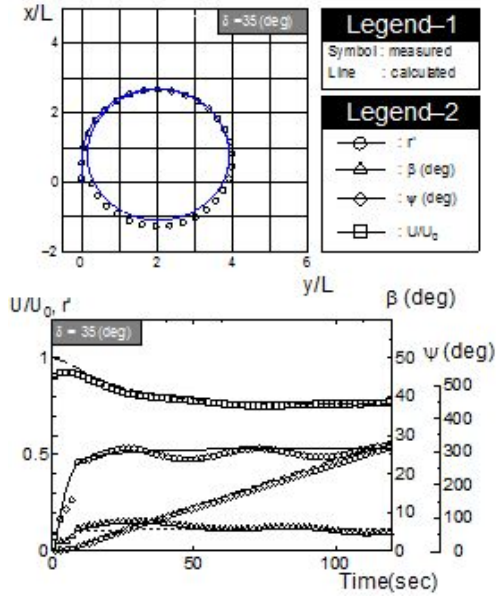


Fig. 3. Comparison of turning trajectories and time histories (H/d=1.5, Cargo).

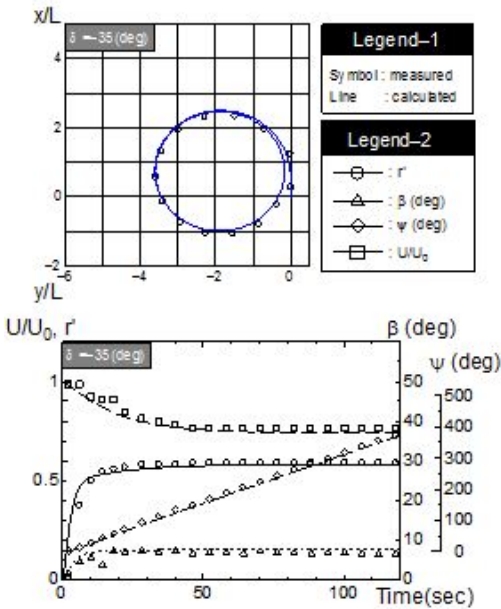


Fig. 4. Comparison of turning trajectories and time histories (H/d=2.0, VLCC).

4. 선미형상의 변화에 따른 천수역에서의 조종 운동

앞에서 언급한 천수역에서의 선미형상을 고려한 선체에 작용하는 유체력의 추정식은 선미형상을 나타내는 파라미터의 함수로써 식(4)와 같이 표현이 가능하였다. 본 절에서

는 선미형상의 변화에 따른 조종운동의 변화를 살펴 보기 위해 모든 선박 주요 제원 및 파라미터들은 고정하고 선체 후반부의 수선면적을 나타내는 계수 C_{wa} 만을 변화시키기로 한다. C_{wa} 의 변화에 따른 선미형상의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 C_{wa} 를 2% 감소시키면 선미형상은 U형 가까워지고, 2% 증가시키면 선미형상은 V형에 가까워진다고 가정한다.

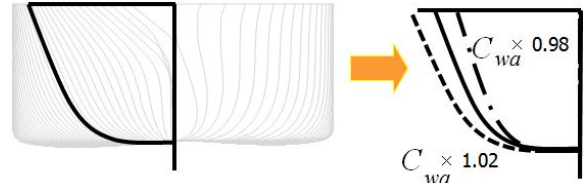


Fig. 5. Layout of stern hull form change.

4.1 침로안정성

각 선형의 C_{wa} 의 변화에 따른 각 수심에서의 침로안정성의 변화를 보기 위해 다음과 같은 침로안정성 지수의 각 수심별 변화를 살펴보았다.

$$\Delta = -Y_{\beta}' \{ Y_r' - (m' + m_x') \} \left[\frac{N_r'}{Y_r' - (m' + m_x')} - \frac{N_{\beta}'}{Y_{\beta}'} \right] \quad (5)$$

$$= -Y_{\beta}' \{ Y_r' - (m' + m_x') \} [l_r' - l_{\beta}']$$

여기서, l_r', l_{β}' 는 각각 모멘트 레버 및 횡력 레버이다. 위 식(5)에서 안정성지수 Δ 가 양수이면 침로안정하고, 음수이면 침로불안정 하다고 할 수 있다. Fig. 6은 Table 1에 표시한 4척의 $l_r' - l_{\beta}'$ 의 C_{wa} 에 따른 변화를 나타낸다.

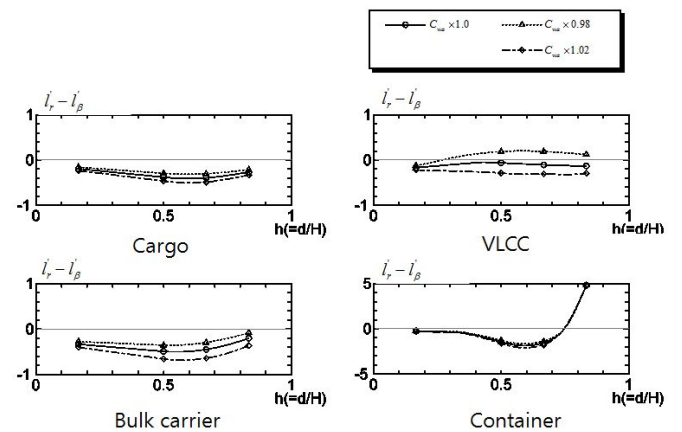


Fig. 6. Effect of C_{wa} on dynamic stability lever.

이들 결과들로부터 4척 모두 C_{wa} 가 감소한 경우가 수심이 얇아짐에 따라 침로안정이 되고 C_{wa} 가 증가하는 경우는 침로불안정이 되는 것을 볼 수 있다.

즉,

- C_{wa} 감소 → U형 선미형상 → 침로안정
- C_{wa} 증가 → V형 선미형상 → 침로불안정

또한, 각각의 선형에 대하여 수심별 침로안정성의 변화를 살펴보면 VLCC를 제외한 선형의 경우 d/H 가 0.5까지 수심이 얇아짐에 따라 침로안정성은 불안정해지고 보다 얇아짐에 따라 침로안정성은 안정해지는 것을 볼 수 있다. 컨테이너 선의 경우는 그 증가 경향이 다른 3척(Cargo, Bulk carrier, VLCC) 보다 급격히 변화함을 볼 수 있다.

4.2 선회 및 지그재그 운동

C_{wa} 의 변화에 따른 각 수심에서의 선회 및 지그재그 운동의 변화를 살펴보기 위해 앞절에서와 마찬가지로 방법론으로 수치 시뮬레이션을 수행한 결과를 Fig.7과 8에 나타내었다.

Fig. 7~Fig. 8에 나타난 바와 같이 선회운동에 대해 살펴보면, advance는 C_{wa} 가 감소할 경우 증가하고 C_{wa} 가 증가할 경우 감소하는 경향을 보였다. 또한, tactical diameter 역시, C_{wa} 가 증가할 경우 감소, 감소할 경우 증가하는 경향을 보였다. 추가적으로, cargo 및 bulk carrier의 경우 수심이 얇아짐에 따라 advance는 변화가 없고 tactical diameter가 증가하는 경향을 보였으며, container의 경우 d/H 가 0.5까지는 advance와 tactical diameter 모두 증가하다가 d/H 가 0.5에서 약 0.667 부

근까지 감소, 0.667 보다 큰 영역에서 다시 증가하는 복잡한 경향을 보인다. VLCC의 경우 cargo 및 bulk carrier와 비슷한 경향을 보이지만 advance가 수심에 따라 증가하는 경향을 보인다. 다음으로 지그재그에 대해 살펴보면, C_{wa} 가 감소하면 10°/10° 지그재그의 track reach, 1st와 2nd overshoot angle, 20°/20° 1st overshoot angle 모두 감소하고, C_{wa} 가 증가하면 그 반대 경향을 보임을 알 수 있다. 또한 선형 별로 살펴보면, cargo와 container 선의 경우 d/H 가 0.5까지 track reach와 20°/20° 지그재그의 1st overshoot angle은 별다른 변화가 없고, 10°/10° 지그재그의 1st overshoot angle와 2nd overshoot angle은 증가하는 경향을 보인다. d/H 가 0.5 보다 작아지는 즉, 얇아지는 경우는 작아지는 경향을 보인다. Bulk carrier와 VLCC의 경우 10°/10°의 1st overshoot angle에서 급격한 변화를 보인

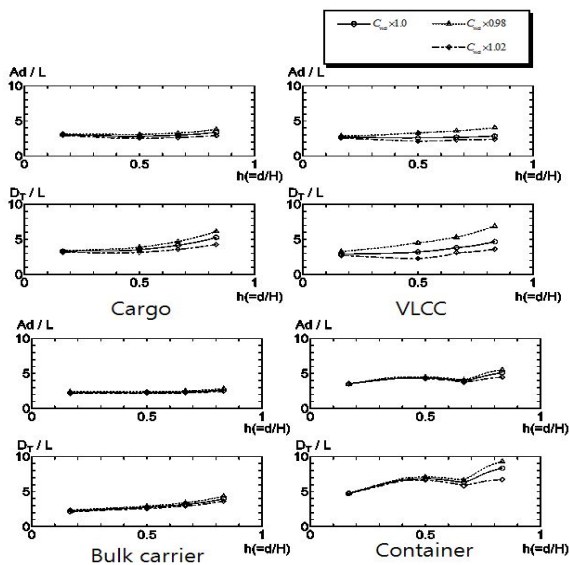


Fig. 7. Effect of C_{wa} on advance and tactical diameter.

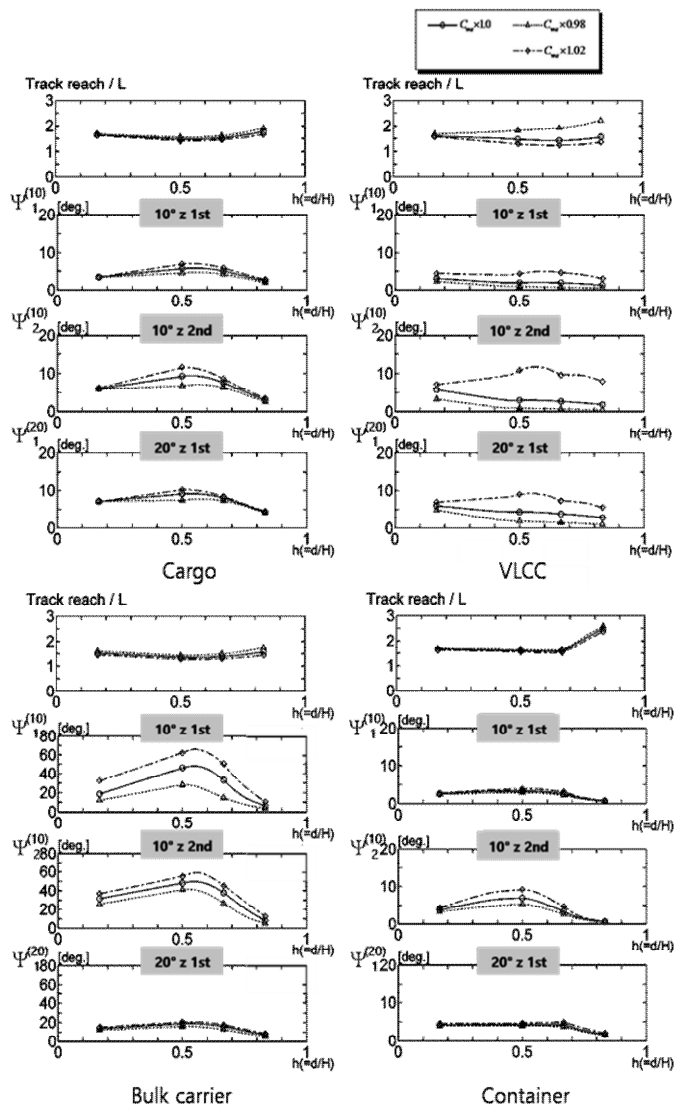


Fig. 8. Effect of C_{wa} on track reach and overshoot angle.

다. 특히, 이 두선형은 선미형상의 변화에 따른 10°/10° 지그재그의 1st와 2nd overshoot angle의 변화폭이 수심에 따라 크게 나타나는 특징을 보인다.

5. 결론

선미형상을 고려한 조종성능을 심수역 뿐만 아니라 천수역에 대해서 수치 시뮬레이션을 통해 검토하였다. 선미형상을 나타내는 파라미터 중 C_{wa} 를 변화시킴으로써 각 수역에서의 침로안정성, 선회 및 지그재그 성능이 어떤 변화를 보이고 그 경향이 어떻게 변화하는 지를 검토하였다. 선박의 조종성능 관점에서 흘수 대 수심의 비(=d/H)가 0.5 부근에서의 조종성능에 큰 변화를 가져오는 중요 지점임을 알 수 있었고, 비대선(VLCC, 탱커 등)과 세장선(컨테이너)의 경우 선미형상의 변화에 따라 조종성능의 변화 정도가 많은 차이를 가질 수 있음을 알 수 있었다. 또한, C_{wa} 를 감소(U형에 근접)시키면 선회운동에 있어서 advance 및 tactical diameter가 증가하고, 지그재그 운동에서는 track reach는 증가하지만 각 overshoot angle들은 감소한다. 이와 반대로, C_{wa} 를 증가(V형에 근접)시키면 선회운동에 있어서 advance 및 tactical diameter는 감소, 지그재그 운동에서는 track reach는 감소, 각 overshoot angle들은 증가함을 알 수 있다. 본 연구에서 얻어진 결과들은 초기 설계 단계에서 천수역에서의 조종성능에 대한 검토 시 유용한 자료로써 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 항 후에는 좀더 많은 경우에 대한 연구를 통해 본 논문에서 제안한 방법의 신뢰도를 확인할 필요가 있을 것으로 사료된다.

Method for Ship Manoeuvrability in Restricted Water”, Transaction of the West-Japan Society of Naval Architects, No. 107, pp. 37-54.

- [5] Mori, S.(1995), “Note of Ship Form Design(24)”, FUNE-NO-KAGAKU, Vo1. 48, pp. 40-49.
- [6] Nonaka, K., T. Haraguchi, T. Numura, M. Ueno, T. Fujiwara, M. Makino, Y. Kodama and Y. Yoshino(1997), “Research on Flow Field around a Ship in Manoeuvring Motion”, Papers of Ship Research Institute, Vo1. 34, No. 5, pp. 1-68.
- [7] SIMMAN2008, Workshop proceedings, Volume I : Summary (2008), Test Cases, Methods 14th-16th and Papers, Copenhagen April, www.simman2008.dk.
- [8] Toxopeus, S. L.(2006), “Validation of slenderbody method for prediction of linear manoeuvring coefficients using experiments and viscous-flow calculations”, In: Proceedings of the seventh ICHD international conference on hydrodynamics, University of Naples “Federico II”, Ischia, pp. 589-598.

Received : 2015. 09. 01.

Revised : 2015. 10. 05.

Accepted : 2015. 10. 27.

References

- [1] Kijima, K. and Y. Nakiri(2003), “On the Practical Prediction Method for Ship Manoeuvring Characteristics”, Transaction of the WestJapan Society of Naval Architects, No. 105, pp. 21-31.
- [2] Kim, S. Y. and Y. G. Kim(2001), “Computation of Viscous Flows around a Ship with a Drift Angle and the Effects of Stern Hull Form on the Hydrodynamic Forces”, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 38, No. 3, pp. 1-13.
- [3] Lee, S. K., J. Y. Choi, Y. S. Seo and W. J. Lee(1999), “A Study on the Prediction of the Maneuverability of Ships at Initial Design Stage, Considering Stern Form”, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 36, No. 2, pp. 72-76.
- [4] Kijima, K. and Y. Nakiri(2004), “On the Practical Prediction