

# 제한수역에서 근접 항해하는 선박의 상호작용과 안전항해거리에 관한 연구

이 춘 기\*

\* 한국해양대학교 수중운동체특화연구센터 전임연구원

A Study about the interactions of vessels running parallely in proximity to one another and safe conducting of them in restricted waterways

Chun-Ki Lee\*

\* Researcher, Underwater Vehicle Research Center, Korea Maritime University, Pusan 606-791, Korea

**요 약** : 선박이 수로 측벽부근을 항해할 경우, 수로 측벽은 선박에 작용하는 유체력과 모멘트를 유발시킨다. 이와 마찬가지로 근접 항해중인 두 선박간에도 상호간섭력이 작용한다. 수로 측벽부근을 항해하는 경우와 근접 항해중인 두 선박의 경우의 주요 차이는 선박의 경우에 비하여 수로 측벽은 길고 일정한 형태를 갖추고 있다. 두 선박간의 상호간섭력은 종방향 거리  $x_0$ , 횡방향 거리  $y_0$  및 두선박의 속도의 함수로서 가정될 수 있다. 본 연구에서는 근접 항해중인 두 선박간의 간섭력을 계산하고, 두 선박간의 횡방향 및 종방향 거리와 속도에 따른 안전 항과 거리에 대해서 검토, 고찰하였다.

**핵심용어** : 안전 항과 거리, 두 선박간의 상호간섭력, 두 선박간의 횡방향거리, 선박의 속도

**Abstract** : When a vessel passes near a channel boundary, the boundary creates forces and moments acting on the vessel. With the same reason passing of two vessels closely gives same effects to each other. The principal difference between the above two cases is that the channel boundary is long and constant shape compared to those of vessels. The interaction forces and moments between two vessels could be assumed to be functions of the longitudinal distance  $x_0$ , transverse distance  $y_0$  and speeds of the two vessels. Passage of one vessel close to another is important operationally from the viewpoint of replenishment at sea, avoidance of collisions and passage of two vessels in restricted channels. The authors studied the interactions between two vessels running closely and calculated safe conducting distances according to separated distances and speeds of the two vessels.

**Key words** : Safe conducting distance, Interaction forces between two vessels, Separated distance between two vessels, Ship's speed

## 1. 서 론

일반적으로 항행선박의 선폭에 비하여 항로 폭이 좁은 협수로나 항행선박의 흘수에 비하여 수심이 얇은 천수로와 같은 제한수역에서 선박과 선박간의 상호간섭력은 선박조종운동의 관점에서 보았을 때 상당히 중요한 문제이다. 대부분의 대형 선박들은 자선의 흘수에 비하여 수심이 상당히 깊은 대양에서 장시간 거의 같은 침로상을 항주하게 되고, 따라서 타 선박과 지근거리를 두고서 항해하는 경우는 거의 없다. 그러나 이러한 대형선박들도 항해의 시작과 끝맺음에는 연안수로에서 타 선박과 지근거리를 두고 항과하게 되고, 천수로 혹은 협수로를 항주하게 된다. 이러한 장소에서는 선박을 조종하는 조종자는 대양상에서보다 훨씬 곤란한 조선상(操船上)의 어려움을 겪게 된다. 특히 많은 선박들이 왕래하여 교통량이 폭주하는 해역에서는 근접하여 항해하는 선박과 선박간의 간섭작용과 수로 측벽 또

는 부두로 인하여 발생하는 유체력, 천수영향 및 외력 등이 복합적으로 작용하여 선박조종이 상당히 어려워지고, 선장 혹은 선박조종자의 의도와는 달리 여러 종류의 요인들이 작용하여 해양사고로 이어질 수 있는 위험성이 있다. 그렇기 때문에 해양사고 방지를 위하여 선박과 선박간의 상호간섭에 대하여 좀 더 명확하게 검토할 필요가 있다. 한편, 지금까지 근접하여 항행하는 선박과 선박간의 상호간섭력과 항행선박이 교각이나 수로 측벽으로부터 받는 간섭력의 추정에 대해서는 다수의 연구자에 의해 수행되어 왔고 (Yeung et al., 1980; Yoon, 1986; Kijima et al., 1987; Kijima et al., 1991; Yasukawa, 1991), 이들 결과를 실용화하는 연구(Yoon, 1982)가 조금씩 진전되고 있는 상황이다. 이러한 상황에서 본 연구도 제한수역에서의 해양사고 방지를 위한 움직임의 하나로 근접항행중인 선박과 선박간의 상호간섭력을 계산하고, 두 선박간의 횡방향 및 종방향 거리와 속도에 따른 안전 항과 거리에 대해서 검토, 고찰하려고 한다. 본 논

문의 목적은 제한수역에서 지근거리를 두고 항행중인 선박과 선박간의 상호간섭에 대한 수치계산을 행하고, 선박조종시물레이션을 행하여 이해하기 쉽게 설명을 하면서 조전상 상호작용에 유의하여야 할 공간적인 범위를 정하는데 있다.

## 2. 좌표계

먼저 근접하여 항행하는 두 선박을 가정하자. Fig. 1에 표시한 것처럼, 공간고정좌표계  $o-xy$ 와 근접하여 항행중인 두 선박의 선체중심을 원점으로 하는 선체고정좌표계  $o_i-x_iy_i$  ( $i=1,2$ )를 생각할 수 있다. 여기서, 추월관계에 있는 두 선박은 선속  $U_i$  ( $i=1,2$ )로 직진하는 것으로 가정하고, 피추월 선박의 선체 중심선과 추월 선박의 선체 중심선간의 횡방향거리를  $S_{P12}$ 로 하며, 피추월 선박의 선체 중심과 추월 선박의 선체 중심간의 종방향거리를  $S_{T12}$ 로 한다.

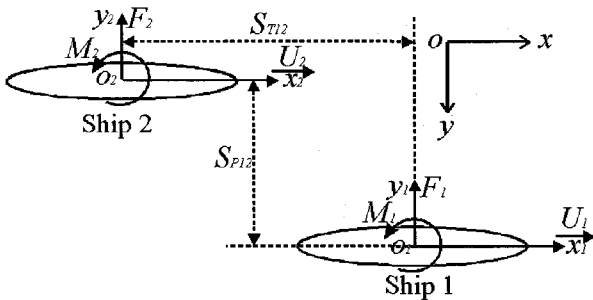


Fig. 1 Coordinate system

## 3. 두 선박간의 상호간섭력에 대한 수치계산

이 절에서는 추월관계에 놓여져 있는 두 척의 대형선박이 근접하여 항해하는 경우 근접 항행중인 선박들의 안전조종운동에 영향을 미치는 상호간섭력을 구한다. 수치계산에 필요한 대상 선박은 Table 1에 나타난 것처럼 동일한 크기의 일반 화물선으로 하였다. 또한 외력은 없다고 가정하고,  $U_1$ 을 6kt로 고정하고,  $U_2$ 를 각각 8kt, 10kt, 12kt로 하였다. 또한 두 선박간의 상호간섭력은 다음 식으로 무차원화 된다.

$$C_R = \frac{F_i}{\frac{1}{2}\rho U_i^2 L_i d}, \quad C_M = \frac{M_i}{\frac{1}{2}\rho U_i^2 L_i^2 d} \quad (1)$$

Table 1 Principal particulars

	일반 화물선
길이 $L$ (m)	155.0
폭 $B$ (m)	26.0
흘수 $d$ (m)	8.7
방형비척계수, $C_B$	0.6978

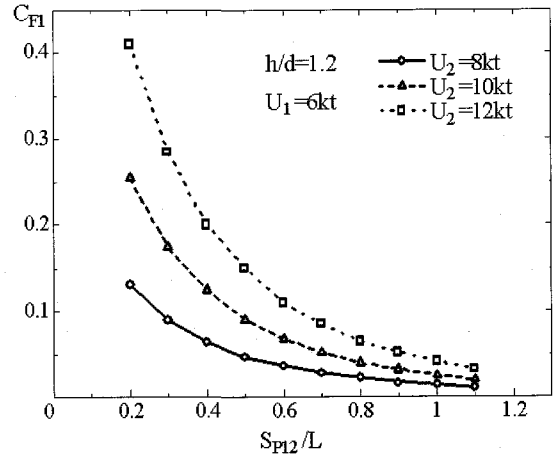


Fig. 2 Maximum lateral force coefficient acting on overtaken vessel with function of  $S_{P12}/L$

Fig. 2 ~ Fig. 3은 추월관계에 놓여져 있는 두 척의 대형선박이 지근거리를 두고서 직진하는 경우, 두 선박간의 상호간섭력에 대한 peak 변화량을 나타내고 있다. 여기서 수심  $h$ 와 흘수  $d$ 와의 비,  $h/d=1.2$ 로 하였고,  $U_1$ 을 6kt로 고정하고,  $U_2$ 를 각각 8kt, 10kt, 12kt로 하였으며, 두 선박간의 횡방향거리  $S_{P12}/L$ 을 각각 0.2~1.1까지 계산하였다.

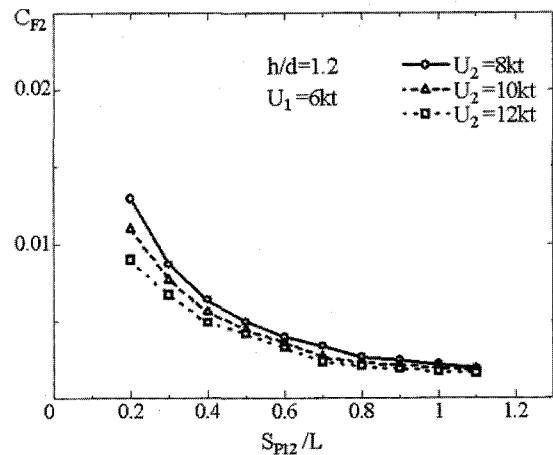


Fig. 3 Maximum lateral force coefficient acting on overtaking vessel with function of  $S_{P12}/L$

Fig. 2에서 피추월선박에 작용하는 횡방향 힘의 peak 변화량에 대한 일반적인 경향을 설명하면 다음과 같다. 두 선박간의 횡방향거리  $S_{P12}/L$ 을 0.25 (피 추월선박과 추월선박간의 내측 현측간의 거리는 12.75m)로 하였을 때에 비하여 두 선박간의 횡방향거리  $S_{P12}/L$ 을 0.5 (피 추월선박과 추월선박간의 내측 현측간의 거리는 51.5m)로 하였을 경우, 피추월선박에 작용하는 횡방향 힘의 peak 변화량은 60%정도 감소하였고, 두 선박간의 횡방향거리  $S_{P12}/L$ 을 0.7 (피 추월선박과 추월선박간의 내측 현측간의 거리는 82.5m)로 하였을 경우, 피추월선박에 작용하는 횡방향 힘의 peak 변화량은 80%정도 감소함을 알 수 있다.

Fig. 3에서도 추월선박에 작용하는 횡방향 힘의 peak 변화량에 대한 일반적인 경향은 다음과 같다. 두 선박간의 횡방향거리  $S_{P12}/L$ 을 0.25(피 추월선박과 추월선박간의 내측 현측간의 거리는 12.75m)로 하였을 때 비하여 두 선박간의 횡방향거리  $S_{P12}/L$ 을 0.5 (피 추월선박과 추월선박간의 내측 현측간의 거리는 51.5m)로 하였을 경우, 피추월선박에 작용하는 횡방향 힘의 peak 변화량은 60%정도 감소하였고, 두 선박간의 횡방향거리  $S_{P12}/L$ 을 0.7 (피 추월선박과 추월선박간의 내측 현측간의 거리는 82.5m)로 하였을 경우, 피추월선박에 작용하는 횡방향 힘의 peak 변화량은 80%정도 감소함을 알 수 있다.

Fig. 4 ~ Fig. 5는 추월관계에 놓여져 있는 두 척의 대형선박이 근접항행하는 경우, 피추월선박과 추월선박의 상호 간섭력에 대한 peak 변화량을 나타내고 있다. 여기서 횡측은 근접항행중인 두 선박간의 속도비를 표시하고 있고, 수심 h와 흘수 d와의 비,  $h/d=1.2$ 로 하였으며,  $U_1$ 을 6kt로 고정하고,  $U_2$ 를 각각 8kt, 10kt, 12kt로 하였다. 또한, 두 선박간의 횡방향거리  $S_{P12}/L$ 을 각각 0.2, 0.5, 0.8, 1.1로 계산하였다.

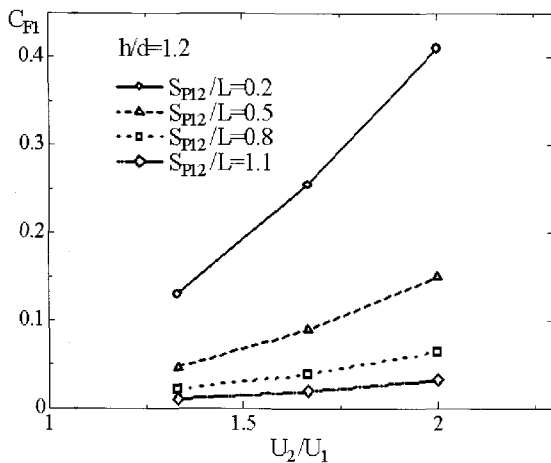


Fig. 4 Maximum lateral force coefficient acting on overtaken vessel with function of  $U_2/U_1$

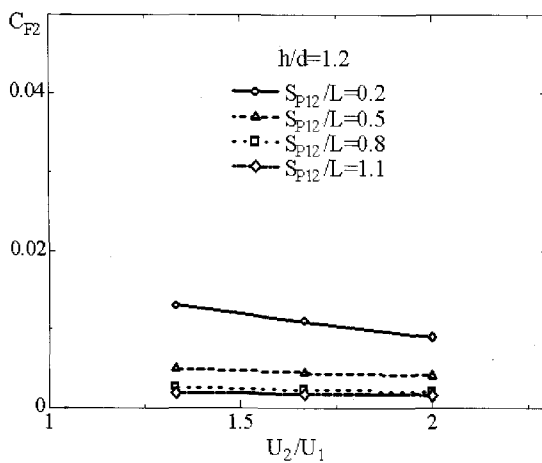


Fig. 5 Maximum lateral force coefficient acting on overtaking vessel with function of  $U_2/U_1$

Fig. 4에서 두 선박간의 속도비( $U_2/U_1$ )가 증가함에 따라 피추월선박에 작용하는 횡방향 힘의 peak 변화량도 증가함을 알 수 있고, 두 선박간의 횡방향거리  $S_{P12}/L=0.2$ 의 경우에는 속도비가 증가함에 따라 횡방향 힘의 peak 변화량도 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 두 선박간의 횡방향거리  $S_{P12}/L=0.5$  이상인 경우에는 속도비에 상관없이 횡방향 힘의 peak 변화량이 상당히 완만해짐을 알 수 있다.

또한, Fig. 5에서 두 선박간의 속도비( $U_2/U_1$ )가 증가함에 따라 추월선박에 작용하는 횡방향 힘의 peak 변화량은 감소함을 알 수 있고, 두 선박간의 횡방향거리  $S_{P12}/L=0.2$ 의 경우에는 속도비가 증가함에 따라 횡방향 힘의 peak 변화량이 완만하게 감소하는 것을 알 수 있다. 한편 두 선박간의 횡방향거리  $S_{P12}/L=0.5$  이상인 경우에는 속도비에 따라 횡방향 힘의 peak 변화량이 크게 변하지 않음을 알 수 있다.

#### 4. 선박조종시물레이션 결과 및 고찰

##### 4.1 추월관계에서의 선박조종시물레이션

이 절에서는 제한수역에서 추월관계에 놓여져 있는 두 척의 대형선박이 근접하여 항해하는 경우, 조선(操船)상 상호작용에 유의하여야 할 공간적인 범위를 정하기 위하여 선박조종시물레이션을 행하였다. 선박조종시물레이션은 앞에서 계산되진 두 선박간의 횡방향 및 종방향 거리와 속도비에 따른 상호 간섭력을 변수로 하여 행하여졌고, 외력으로서 상호간섭력만을 고려한 선박조종수학모델(Kijima et al., 1990)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$(m'_i + m'_{x_i}) \left( \frac{L_i}{U_i} \right) \left( \frac{\dot{U}_i}{U_i} \cos \beta_i - \dot{\beta}_i \sin \beta_i \right) + (m'_{y_i} + m'_{y_i}) r'_i \sin \beta'_i = X'_{H_i} + X'_{P_i} + X'_{R_i} \quad (2)$$

$$-(m'_i + m'_{y_i}) \left( \frac{L_i}{U_i} \right) \left( \frac{\dot{U}_i}{U_i} \sin \beta_i + \dot{\beta}_i \cos \beta_i \right) + (m'_{x_i} + m'_{x_i}) r'_i \cos \beta'_i = Y'_{H_i} + Y'_{R_i} + Y'_{I_i} \quad (3)$$

$$(I'_{z_{zi}} + i'_{z_{zi}}) \left( \frac{L_i}{U_i} \right)^2 \left( \frac{\dot{U}_i}{L_i} r'_i + \frac{U_i}{L_i} \dot{r}'_i \right) = N'_{H_i} + N'_{R_i} + N'_{I_i} \quad (4)$$

여기서,  $m'_i$ 은  $i$  번째 선박의 무차원화된 질량을 의미하고,  $m'_{x_i}$ ,  $m'_{y_i}$ 는  $i$  번째 선박의 무차원화된 부가질량의  $x$ ,  $y$  축 성분을 의미하며,  $\beta_i$ 는  $i$  번째 선박의 편각을 나타낸다. 또한 첨자  $H, P, R, I$ 는 선체, 프로펠러, 타 및 두 선박간의 상호간섭력을 의미하고, 침로유지를 위한 타각 제어는 식(5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\delta_i = \delta_{o_i} - K_1 (\psi_i - \psi_{o_i}) - K_2 r'_i \quad (5)$$

여기서,  $\delta_i, \psi_i, r_i'$  는  $i$  번째 선박의 타각, 회두각 및 무차원화된 각속도를 의미하고, 첨자 '0'는 초기값을 나타내고 있다.

Fig. 6 및 Fig. 7은 추월관계에 놓여져 있는 두 척의 대형선박이 근접항행하는 경우, 추월선박과 피추월선박의 궤적 및 타각과 회두각에 대한 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 여기서 수심  $h$ 와 흘수  $d$ 와의 비,  $h/d=1.2$ 로 하였고,  $U_1$ 을 6kt,  $U_2$ 를 8kt로 하였으며, 두 선박간의 횡방향거리  $S_{P12}/L$ 을 각각 0.3~0.7까지 계산하였다. 또한 상수  $K_1=K_2=5.0$ 으로 계산하였고, 침로유지를 위한 타각  $\delta_{max}$ 는 10도로 하였다.

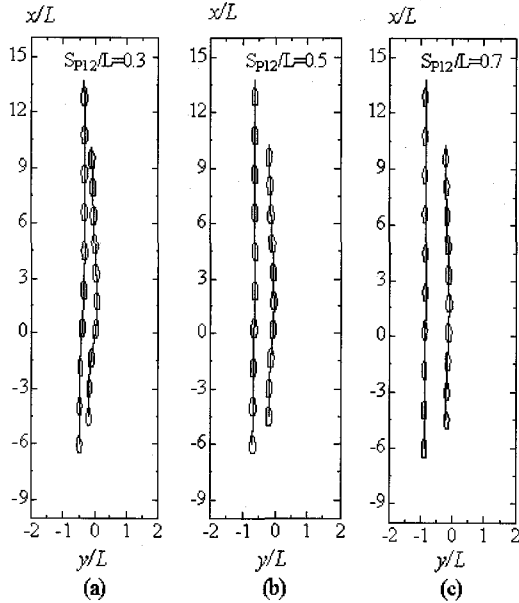
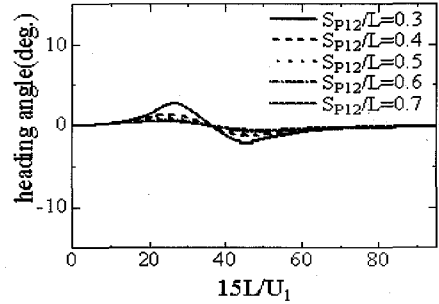
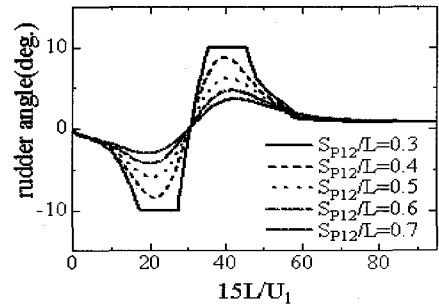


Fig. 6 Ship trajectories with function of  $S_{P12}/L$

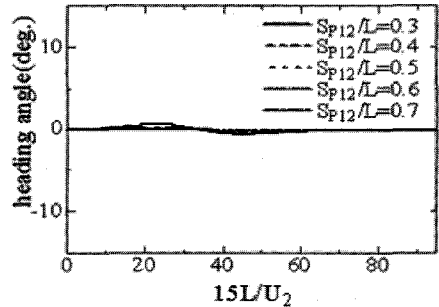
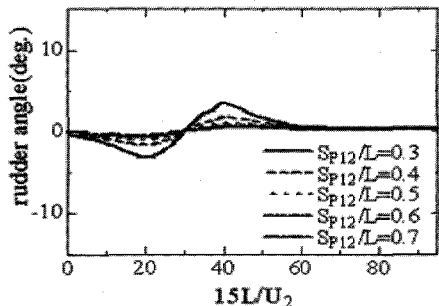
( $h/d=1.2, U_1 = 6kt, U_2 = 8kt, K_1 = K_2 = 5.0, \delta_{max} = 10^\circ$ )

Fig. 6에서 두 선박간의 횡방향거리  $S_{P12}/L$ 을 0.3 (피 추월선박과 추월선박간의 내측 현측간의 거리는 20.5m)으로 하였을 경우 선박조종시뮬레이션에 대한 일반적인 경향은 다음과 같다. 피추월선박의 선수가 추월선박의 선미부분에 왔을 지점에서 간섭력으로 인하여 서서히 원침로상에서 벗어나기 시작하고, 두 선박이 정형으로 완전하게 일직선상이 되는 지점에서 선박조종의 침로유지에 영향을 주는 최대 횡력이 나타남을 알 수 있다. 또한 피추월선박의 선미가 추월선박의 선수를 지나면서 두 선박의 상호간섭력은 서서히 사라지고 두 선박은 원침로를 유지하면서 항해하는 것을 알 수 있다. 한편 두 선박간의 횡방향거리  $S_{P12}/L$ 을 0.5 (피 추월선박과 추월선박간의 내측 현측간의 거리는 51.5m)로 하였을 경우, 두 선박은 최대 타각 10도의 범위 내에서 충분히 원침로를 유지하면서 항해 가능함을 알 수 있다. 이것은 피 추월선과 추월선간의 내측 현측간의 거리가 50m 이상이 되었을 경우, 두 선박의 내측 현측간의 거리가 12.75m인 경우와 비교하여 60% 정도 감소되는 두 선박간의 간섭력이 대형선박의 선박조종운동에 거의 영향을 주지 않기 때문으로 판단된다.

Fig. 7에서 추월선박과 피추월선박의 회두각과 침로유지를 위한 타각의 결과에서 나타나듯이, 추월선박의 경우는 최대 타각 5도의 범위내에서 원침로를 유지하면서 충분히 항해 가능함을 알 수 있다. 그리고 두 선박간의 횡방향거리  $S_{P12}/L$ 을 0.4 (피 추월선박과 추월선박간의 내측 현측간의 거리는 36m) 이상인 경우, 피추월선박 역시 최대타각 10도의 범위내에서 원침로를 유지하면서 충분히 항해 가능함을 알 수 있다. 그러나 횡방향거리  $S_{P12}/L$ 가 0.3 (피 추월선박과 추월선박간의 내측 현측간의 거리는 20.5m)인 경우, 원침로 유지에 필요한 최대타각 10도를 잡는 시간영역이 길어짐을 알 수 있다.



(a) Time history of overtaken vessel



(b) Time history of overtaking vessel

Fig. 7 Time histories with function of  $S_{P12}/L$

( $h/d=1.2, U_1 = 6kt, U_2 = 8kt, K_1 = K_2 = 5.0, \delta_{max} = 10^\circ$ )

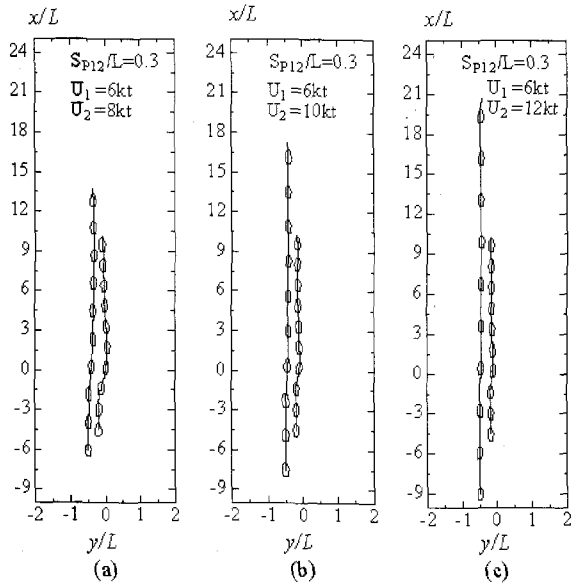
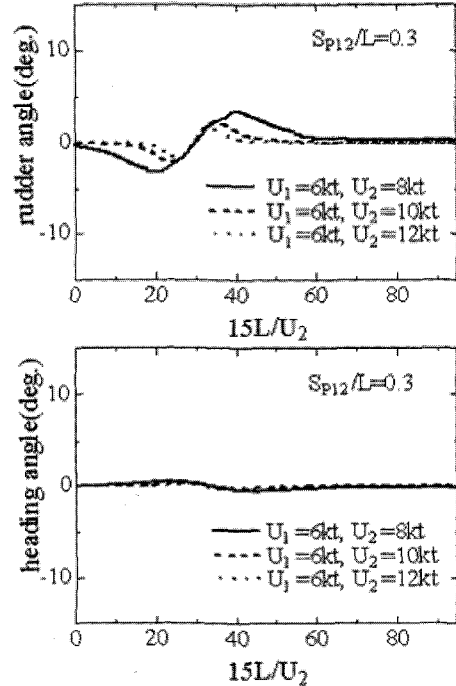


Fig. 8 Ship trajectories with function of  $U_2/U_1$   
( $h/d=1.2, S_{P12}/L=0.3, K_1=K_2=5.0, \delta_{max}=10^\circ$ )

Fig. 8 및 Fig. 9는 두 선박간의 속도비를 변수로 하였을 경우의 추월선박과 피추월선박의 궤적 및 타각과 회두각에 대한 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 여기서 수심  $h$ 와 흘수  $d$ 와의 비,  $h/d=1.2$ 로 하였고, 두 선박간의 횡방향거리  $S_{P12}/L$ 을 0.3으로 가정하였다. 또한 상수  $K_1=K_2=5.0$ 으로 가정하였고, 침로유지를 위한 타각  $\delta_{max}$ 는 10도로 하였다.

Fig. 8에서 최대타각 10도의 범위내에서 항해중인 두 선박의 속도비가 증가함에 따라 원침로로부터 벗어나는 두 선박의 최대 정횡거리는 짧아지는 것을 알 수 있다.



(b) Time history of overtaking vessel

Fig. 9 Time histories with function of  $U_2/U_1$   
( $h/d=1.2, S_{P12}/L=0.3, K_1=K_2=5.0, \delta_{max}=10^\circ$ )

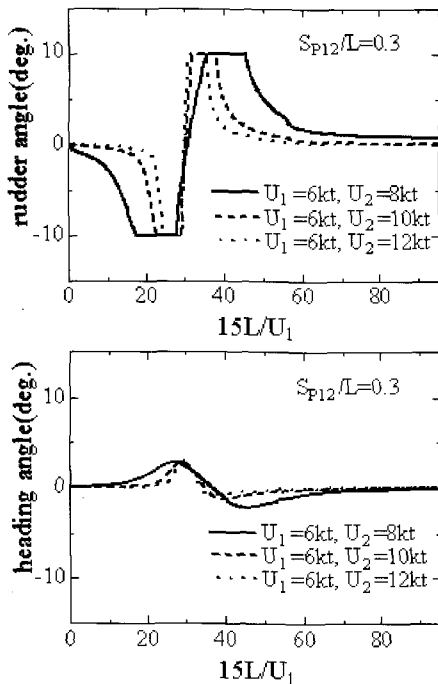
또한 Fig. 9에서 두 선박의 속도비가 증가함에 따라 침로유지를 위한 피추월선박의 최대타각 10도를 잡는 시간영역이 짧아짐을 알 수 있다. 그러나 추월선박의 경우는 이 연구에서 가정되어진 속도비에 상관없이 5도 정도의 범위내에서 충분히 침로유지가 가능함을 보여주고 있다.

### 5. 결 론

이 연구에서는 협수로 혹은 천수로와 같은 제한수역에서 추월관계에 놓여져 있는 두 척의 대형선박이 근접하여 항행하는 경우, 선박과 선박간의 상호간섭력을 계산하고, 두 선박간의 횡방향 및 종방향 거리와 속도비를 변수로 하여 선박조종시뮬레이션을 행하였으며, 시뮬레이션 결과를 토대로 조선상 상호작용에 유의하여야 할 부분에 대해서 검토, 고찰하였다. 검토 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째 간섭력만을 고려하였을 때, 피 추월선박과 추월선박간의 내측 현측간의 거리를 12.75m로 가정한 경우에 비하여 피 추월선박과 추월선박간의 내측 현측간의 거리를 51.5m로 하였을 경우, 피추월선박에 작용하는 횡방향 힘의 peak 변화량은 60%정도 감소하였고, 내측 현측간의 거리를 82.5m로 하였을 경우, peak 변화량은 80%정도 감소함을 알았다.

둘째 두 선박간의 속도비( $U_2/U_1$ )가 증가함에 따라 피추월선박에 작용하는 횡방향 힘의 peak 변화량도 증가함을 알았고, 횡방향거리  $S_{P12}/L=0.5$  이상인 경우에는 속도비에 상



(a) Time history of overtaken vessel

관없이 횡방향 힘의 peak 변화량이 상당히 완만해짐을 알 수 있다.

셋째 두 선박간의 횡방향거리  $S_{P12}/L$  가 0.5 이상인 경우, 서행중인 두 선박은 최대타각 10도의 범위 내에서 충분히 원침로를 유지하면서 항해 가능함을 알았다.

넷째 서행중인 피 추월선과 추월선간의 내측 현측간의 거리가 50m 이상이 되었을 경우, 상호간섭력은 선박조종운동에 크게 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

다섯째 최대타각 10도의 범위내에서 항해중인 두 선박의 속도비가 증가함에 따라 원침로로부터 벗어나는 두 선박의 최대정황거리는 짧아지는 것을 알았다.

마지막으로 본 연구에서는 외력으로서 간섭력만을 다루고 바람과 조류를 고려하지 않았으나 앞으로의 연구과제로서 바람과 조류를 고려한 선박조종운동시뮬레이션을 행할 필요가 있을 것으로 사료된다.

### 참고 문헌

- [1] Kijima, K. and Qing, H.(1987), "Manoeuvring Motion of a Ship in the Proximity of Bank Wall", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 162.
- [2] Kijima, K., Nakiri, Y., Tsutsui, Y., Matsunaga, M. (1990). "Prediction Method of Ship Maneuverability in Deep and Shallow Waters". Proceedings of MARSIM and ICSM 90, pp. 311-318.
- [3] Kijima, K., Furukawa, Y. and Qing, H.(1991), "The Int-eraction Effects between Two Ships in the Proximity of Bank Wall", Trans. of the West-Japan Society of Naval Architects, Vol. 81.
- [4] Yasukawa, W.(1991), "Bank Effect on Ship Manoeuvrability in a Channel with Varying Width", Trans. of the West-Japan Society of Naval Architects, Vol. 81.
- [5] Yeung, R. W. and Tan, W. T.(1980), "Hydrodynamic Interactions of Ships with Fixed Obstacles", Journal of Ship Research, Vol. 24.
- [6] Yoon, J. D., Park, S. K.(1982), "A Study on the Approaching Distance in Taking Action to Avoid Collision", 한국항해학회지, 제6권 제1호.
- [7] Yoon, J. D.(1986) "선박간의 상호작용과 안전조선에 관한 연구", 한국항해학회지, 제10권 제1호.

원고접수일 : 2005년 10월 10일

원고채택일 : 2005년 10월 27일