

# 일점계류된 선박의 불안정 거동 방지에 관한 연구

이승건\* · 강동훈\*\*

\* 부산대학교 조선해양공학과 교수, \*\*부산대학교 대학원 조선해양공학과

## A Study on the Control of the Slew Motion of a Single Point Moored Ship

Seung-Keon Lee\* · Dong-Hoon Kang\*\*

\* Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Pusan, 609-735, Korea

\*\* Graduate school, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Pusan, 609-735, Korea

**요 약** : 일점계류된 선박의 외력에 의한 불안정 거동을 경감시키는 방법에 대하여 검토하였다. 계류된 선박의 수치계산 시뮬레이션을 위해 조종운동방정식을 사용하였고, 선박에 가해지는 외력으로는 풍력과 파강제력이 고려되었다. 파강제력은 3차원특이점분포법에서 얻어진 주파수 전달함수로부터 시간영역해석법을 적용하였고, 풍력은 OCIMF(1994)에서 제시한 값을 사용하였다. 계류된 선박의 안전대책으로 바우스러스터를 이용한 제어방법, 두 번째 묘를 이용한 굴레(Birdle)를 씌우는 묘박법이 검토되었다.

**핵심용어** : SLEW MOTION, 일점계류, 바우스러스터, 굴레, 묘박법

**Abstract** : The slew motion of a single point moored ship by the external forces is considered to control itself. The maneuvering equations of motion are derived to express the motion of a ship. The wind forces and the wave forces are considered as the external forces of the single point moored ship in the simulation. The wave forces in the time domain analysis are generated from the frequency transfer function calculated by 3-D source distribution method. The wind forces are used the results from OCIMF(1994). To control the slew motion, the bow thruster and the bridle anchoring with 2nd anchor are used in the numerical simulation.

**Key words** : slew motion, single point moored, bow thruster, bridle, anchoring

### 1. 서 론

선박이 투묘 후 항내에 정박하는 동안, 선박은 본선의 주요 방지를 위한 안전대책과 날씨의 급변 또는 주요하는 타선의 접근으로 인한 본선과의 충돌 등의 비상시 대책이 필요하다.

항내에서 계류된 선박에 미치는 외력은 바람, 파도, 조류 등이 있고, 이들 외력으로 인해 계류된 선박의 선수가 방향을 바꾸면서 선박의 중심이  $\infty$ 자형으로 스윙하는 Slew Motion이 발생할 수 있다. Slew Motion은 계류삭에 충격적인 장력을 발생시킬 수도 있으며, 반복된 충격적인 장력은 묘쇄의 파주력을 감소시키고, 묘가 들어 일어나 주요가 발생하는 원인이 되기도 한다. 계류된 선박에 Slew Motion이 발생시, 이를 감소시켜 주묘를 예방할 수 있다면 Slew Motion의 감소방법은 안전대책중의 하나로 볼 수 있다.

비상시 대책으로서는 날씨의 급변 또는 주요하는 타선의 접근등의 위험이 예측될 경우, 시간이 주어진다면 양묘 후 선박을 안전한 위치로 피항시키고, 시간이 없을 경우에는 본선의 묘를 끊어 주요시키는 방법 또는 묘를 끊어 사묘시켜 위험을 피하는 방법 등이 있다.

본 논문에서는 파강제력과 풍력하에서 일점계류된 선박에 발생한 Slew Motion에 대하여 바우스러스터에 의한 제어와, 굴레(Bridle)를 씌우는 묘박법을 이용한 Slew Motion의 제어를 수치계산 시뮬레이션을 통하여 비교 검토하였다.

### 2. 운동방정식

시뮬레이션에서는 선박의 수평면상의 운동(Surge, Sway, Yaw)만이 고려되었고, 선박의 운동을 표현하기 위해 조종운동방정식을 이용하였으며 외력으로는 파강제력, 풍력, 계류력과 바우스러스터의 추력을 고려하였다. 파랑 중 선박의 Slew Motion을 표현하기 위해 식(1)을 사용하였다.

$$\begin{aligned} m(\dot{u} - vr - x_G r^2) &= X_H + X_{WV} + X_{WD} + X_T \\ m(\dot{v} + ur + x_G \dot{r}) &= Y_H + Y_{WV} + Y_{WD} + Y_T \\ I_{ZZ} \dot{r} + m x_G (\dot{v} + ur) &= N_H + N_{WV} + N_{WD} + N_T \end{aligned} \quad (1)$$

$u, v, r$  은 각각 Surge 속도, Sway 속도, Yaw 각속도이고  $m, I_{ZZ}, x_G$  는 각각 배의 질량, z축에 대한 질량관성모멘트,

\* 중신회원, leesk@pusan.ac.kr 051)510-2441

\*\* 정희원, aknalee@dreamwiz.com 051)510-2755

배의 무게 중심의  $x$ 좌표를 나타낸다. 식(1)의 우변에 표기된  $X, Y$ 와  $N$ 은 각각 Surge, Sway, Yaw방향의 힘과 모멘트이고 아래첨자  $H, WV, WD, T, BT$ 는 각각 선체에 작용하는 유체력, 파강제력, 풍력, 계류삭에 작용하는 장력과 바우스리스터의 추력을 의미한다. 공간고정좌표에 대한 선박의 중심과 선수각은 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{X} &= u \cos \psi - v \sin \psi \\ \dot{Y} &= u \sin \psi + v \cos \psi \\ \dot{\psi} &= r \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $X, Y$ 는 선박중심의 좌표이고,  $\psi$ 는 선수각이며 시물레이션에 사용된 선체고정좌표계와 공간고정좌표계를 Fig.1과 같이 나타내었다.

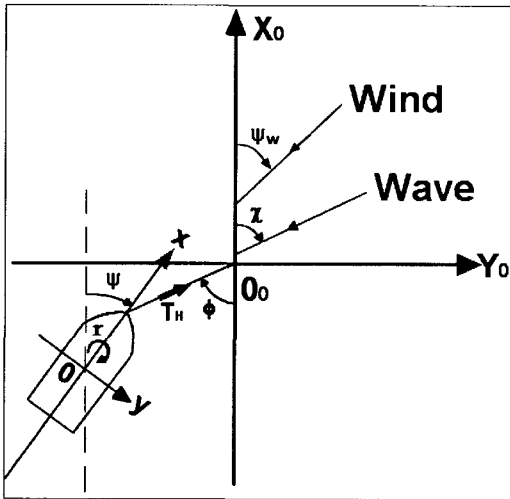


Fig. 1 Coordinate system

### 3. 선체에 작용하는 힘과 모멘트

#### 3.1 선박의 모델링

본 논문에서 사용된 선박모형은 KRISO TANKER (KVLCC2)을 1:136.75로 축소한 모형을 사용하였다. 계산에 사용된 선박의 기본제원을 Table 1에 나타냈다. 수면하의 선체표면에 620개의 패널을 분포시켰으며 분포된 모습과 법선벡터  $n$ 은 Fig.2에서 나타내었다. 수선면 상부의 중방향과 횡방향의 유효투영면적은 OCIMF(1994)에서 제시한 전형적인 VLCC의 예를 참조하여 각각  $0.171m^2, 0.061m^2$ 으로 정하였다.

Table 1 Main particulars of model ship

KRISO 300K VLCC	
Lpp(m)	2.340037
B(m)	0.424132
D(m)	0.219378
d(m)	0.148
$C_b$	0.81

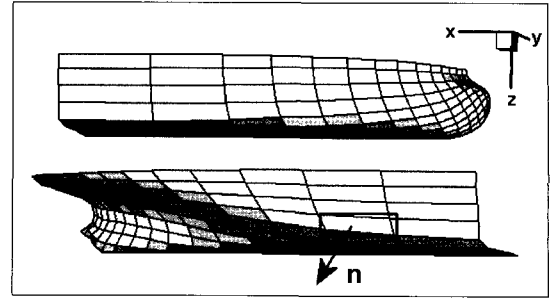


Fig. 2 Plans and Meshes for Model ship

#### 3.2 Hull 유체력의 추정

선체(bare hull)에 작용하는 유체력  $X_H$ 는 식(3)과 같이 모델화하였다.

$$X_H = X(U) + X_u \dot{u} + (X_{vr} - Y_v)vr \quad (3)$$

$X(U)$ 는 직진시의 저항으로 식(4)로 나타낸다.

$$X(U) = \frac{1}{2} \rho S_W C_T u^2 \quad (4)$$

여기서  $\rho$ 와  $S_W$ 는 물의 밀도와 배의 침수표면적이며, 전 저항계수  $C_T$ 는 아래와 같다.

$$C_T = (1+k)C_F + C_W \quad (5)$$

여기서  $k$ 는 형상계수이고, 평판의 마찰저항계수  $C_F$ 와 조파저항을 Froude數의 4차, 5차 6차 다항식으로 근사한 조파저항계수  $C_W$ 는 다음 식으로 나타낸다.

$$\frac{0.242}{\sqrt{C_F}} = \log_{10}(R_n \times C_F) : \text{Schoenherr's formula} \quad (6)$$

$$C_F = 1.328 \cdot R_n^{-1/2} : \text{Blasius's formula} \quad (7)$$

$$C_W = C_{W4} \cdot F_N^4 + C_{W5} \cdot F_N^5 + C_{W6} \cdot F_N^6 \quad (8)$$

여기서,  $F_N$ 는 Froude number,  $R_n$ 은 Reynolds number이고, 형상계수  $k$ 와  $C_{W4}, C_{W5}, C_{W6}$ 들은 최소자승법에 의해 동시에 결정한다.

$X_w \cdot Y_v$ 는 Motora 차트(Motora, 1960)로부터 추정하고  $(X_{vr} - Y_v)$ 항은 Hasegawa 차트(Hasegawa, 1980)를 직선으로 피팅하여 식(9)같이 계산하였고,  $Y_H, N_H$ 의 선형항과 비선형항은 Inoue의 추정식(井上正裕, 貴島勝郎, 1978; 井上正裕, 平野雅祥, 1979)을 사용하여 추정하였다.

$$\frac{X'_{\nu\nu} - Y'_{\nu\nu}}{-Y'_{\nu\nu}} = 1.613C_b - 0.471 \quad (9)$$

### 3.3 파강제력의 계산

파강제력은 임의 위치  $X$  에서 한 방향의 입사파를 선수각  $0^\circ$ 부터  $180^\circ$ 까지  $15^\circ$ 간격으로 계산을 수행하였다. 계류된 선박에 작용하는 파강제력은 섭동전개를 통해 나타내어지는 힘들 중 1차력과 2차력만을 취하였으며, 주파수 영역에서의 파강제력은 3차원특이점분포법을 이용하여 구하였다.

파강제력과 모멘트의 시간이력(time history)은 주파수영역에서 구해지는 파강제력과 모멘트의 주파수전달함수를 Fourier 역변환함으로써 얻어지는 임펄스응답함수를 콘볼루션 적분하여 구하였다. 파강제력  $\{F_w(t)\}$ 와 모멘트  $\{M_w(t)\}$ 를 Volterra 급수로 표현한 후 2차항까지 취하여, 1차 및 2차 파강제력과 모멘트로 분리하면 다음과 같이 쓸 수 있다.(이 등, 2003)

$$\{F_{ex}^{(1)}(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \{h_F^{(1)}(\tau)\} \zeta(t-\tau) d\tau \quad (10)$$

$$\{F_{ex}^{(2)}(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \{h_F^{(2)}(\tau_1, \tau_2)\} \zeta(t-\tau_1) \zeta(t-\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 \quad (11)$$

$$\{M_{ex}^{(1)}(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \{h_M^{(1)}(\tau)\} \zeta(t-\tau) d\tau \quad (12)$$

$$\{M_{ex}^{(2)}(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \{h_M^{(2)}(\tau_1, \tau_2)\} \zeta(t-\tau_1) \zeta(t-\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 \quad (13)$$

여기서,  $\{h_F^{(1)}(\tau)\}$ ,  $\{h_F^{(2)}(\tau)\}$  및  $\{h_M^{(1)}(\tau)\}$ ,  $\{h_M^{(2)}(\tau)\}$ 는 각각 1차 및 2차 파강제력과 모멘트의 임펄스응답함수로서 다음과 같이 표현된다.

$$\{h_F^{(1)}(\tau)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \{H_F^{(1)}(\omega)\} e^{-i\omega\tau} d\omega \quad (14)$$

$$\{h_F^{(2)}(\tau_1, \tau_2)\} = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [\{H_F^{(2)}(\omega_1, \omega_2)\}] e^{-i(\omega_1\tau_1 + \omega_2\tau_2)} d\omega_1 d\omega_2 \quad (15)$$

$$\{h_M^{(1)}(\tau)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \{H_M^{(1)}(\omega)\} e^{-i\omega\tau} d\omega \quad (16)$$

$$\{h_M^{(2)}(\tau_1, \tau_2)\} = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [\{H_M^{(2)}(\omega_1, \omega_2)\}] e^{-i(\omega_1\tau_1 + \omega_2\tau_2)} d\omega_1 d\omega_2 \quad (17)$$

여기서,  $\{H_F^{(1)}(\omega)\}$ ,  $\{H_M^{(1)}(\omega)\}$ 는 1차 파강제력과 모멘트의 주파수전달함수이고,  $\{H_F^{(2)}(\omega_1, \omega_2)\}$ ,  $\{H_M^{(2)}(\omega_1, \omega_2)\}$ 는 각각 2차 파강제력과 모멘트의 주파수전달함수이다.

파강제력은 0.1초간격으로 선박의 위치와 입사각에 따라 계

산하여 시뮬레이션에 사용하였다. 계산에 사용된 규칙파를 한 지점에서 1000초 동안 계산한 평균 2차파력을 도식화하여 Fig.3에 나타내었다.

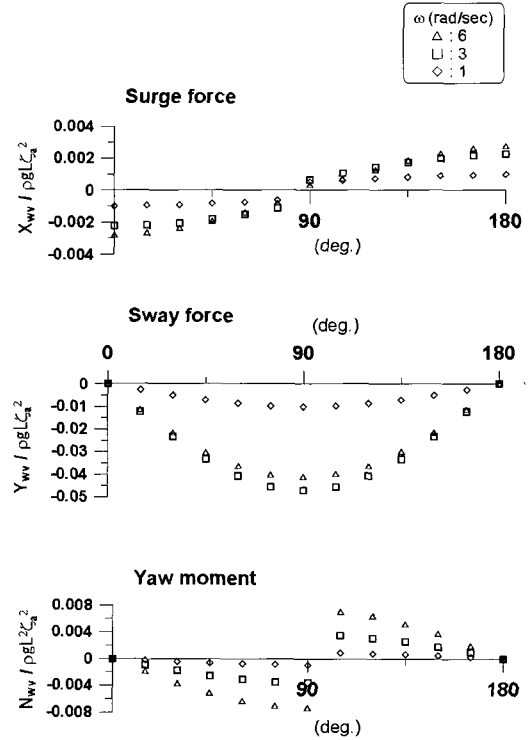


Fig. 3 Mean 2nd order forces in regular waves

### 3.4 풍력의 계산

바람의 속도는 일정하다고 가정하였고, 바람에 의한 힘과 모멘트를 식(18)과 같이 나타내었다.

$$\begin{aligned} X_{WD} &= \frac{1}{2} \rho_a A_f C_{WDX} U_{WR}^2 \\ Y_{WD} &= \frac{1}{2} \rho_a A_s C_{WDY} U_{WR}^2 \\ N_{WD} &= \frac{1}{2} \rho_a A_s C_{WDN} U_{WR}^2 \end{aligned} \quad (18)$$

$\rho_a$ ,  $A_f$ ,  $A_s$ ,  $U_{WR}$ ,  $L_{BP}$ 는 각각 공기밀도, 정면과 측면에서 수선면 위의 선박의 유효투영면적, 선박과 바람의 상대속도, 선박의 수선간장을 나타낸다. 계수  $C_{WDX}$ ,  $C_{WDY}$ ,  $C_{WDN}$ 은 OCIMF(1994)에서 제시한 값을 사용하였다. 선박과 바람의 상대속도와 상대각도를 식(19),식(20)로 정의한다.

상대속도:

$$\begin{aligned} U_{WR} &= \sqrt{(u_w + u)^2 + (v_w + v)^2} \\ u_w &= U_w \cos(\psi_w - \psi) \\ v_w &= U_w \sin(\psi_w - \psi) \end{aligned} \quad (19)$$

상대각도:

$$\psi_{WR} = \tan^{-1} \left\{ \frac{v_w + v}{u_w + u} \right\} \quad (20)$$

여기서,  $U_w$ 와  $\phi_w$ 는 각각 절대풍속과 절대풍향각을 나타내며,  $u_w$ 와  $v_w$ 는 바람의 종방향과 횡방향의 속도이다.

### 3.5 계류력의 계산

시뮬레이션에서 계류선에 걸리는 장력은 정적해석법을 사용하여 구하였다. 즉, 계류선의 동적 거동을 무시하고 매 순간 선박의 위치에 따른 계류력을 식(21)과 같이 계산하여 운동방정식에 포함시켰다. 여기에서 계류선은 현수선을 이룬다고 가정하며 계류선의 관성과 탄성은 무시하였다. 장력수평성분  $T_H$ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다(Faltinsen, 1990).

$$T_H = \frac{w \left\{ x_a - l + h \sqrt{1 + \frac{2T_H}{wh}} \right\}}{\cosh^{-1} \left\{ 1 + \frac{wh}{T_H} \right\}} \quad (21)$$

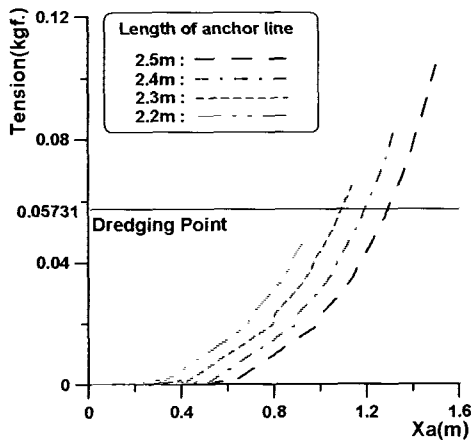


Fig. 4 horizontal tension of 2nd anchor lines

여기서,  $w$ 는 수면아래의 계류선의 단위 길이당 하중이고,  $x_a$ 는 앵커와 선박의 취부점의 수평거리,  $l$ 은 계류선의 총길이,  $h$ 는 수심을 나타낸다. 시뮬레이션에 사용된 계류선은 길이 4m, 재질은 강철체인, 단위길이당 수중무게는 0.00874 kgf 라고 두었다. Fig. 4에 두 번째 묘에서의 계류선의 총길리와 거리  $x_a$ 를 고려한 수평장력을 나타내었다. 묘와 선박의 고정점 사이의 거리가 구해지면 선박의 운동을 고려하여 장력  $T_H$ 의 수평성분은 반복법에 의해 계산하였다. 묘의 무게는 0.382kgf 로 두었고, 주묘저항은 묘의 무게의 1.5배로 가정하였다.

### 3.6 바우스러스터의 추력

바우스러스터의 추력은 소형 프로펠러를 선수에 횡방향으

로 배치하여 식(22)를 이용하여 계산하였다.

$$F_T = K_T \rho n^2 D_P^4 \quad (22)$$

여기서  $K_T$ 는 추력계수,  $\rho$ 는 밀도,  $n$ 은 프로펠러의 회전수,  $D_P$ 는 프로펠러의 직경을 나타낸다. 시뮬레이션에 사용된 프로펠러의  $D_P$ 는 0.03m이고, 중앙에서 선수로 1.1m지점에 배치하였다.

## 4. 계산결과 및 고찰

제어 전의 초기조건으로 파고 0.03m,  $\omega=6\text{rad/sec}$ ,  $\chi=0^\circ$ 인 규칙파와 풍속 0.4m/s,  $\phi_w=45^\circ$ 의 바람 아래에서, 첫 번째 계류선의 길이가 8m로 일점계류된 선박에 가해지는 비선형 파강제력과 풍력이 고려되었다. 초기조건아래에서 Slew Motion 이 발생한 모습을 Fig. 5에 나타내었다.

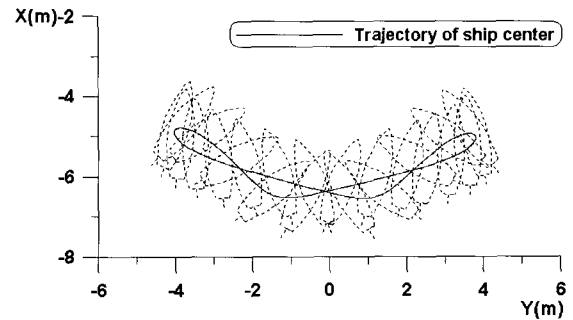


Fig. 5 Trajectory of ship before the control

### 4.1 바우스러스터를 이용한 Slew Motion의 제어

바우스러스터의 최대회전수는 15rps로 설정하였고, 선수의 각속도를 바우스러스터의 회전방향을 제어하는 기준으로 정하였다. Fig. 6에 바우스러스터의 사용 전후의 선수각과 바우스러스터의 추력을 나누어 보이고, Fig. 7에 바우스러스터를 가동한 후의 선박을 궤적을 나타내었다.

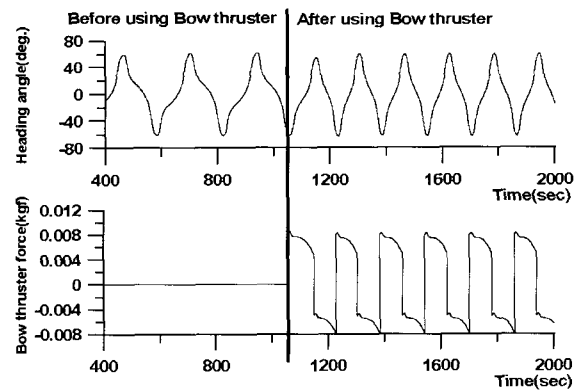


Fig. 6 Heading angle and bow thruster force

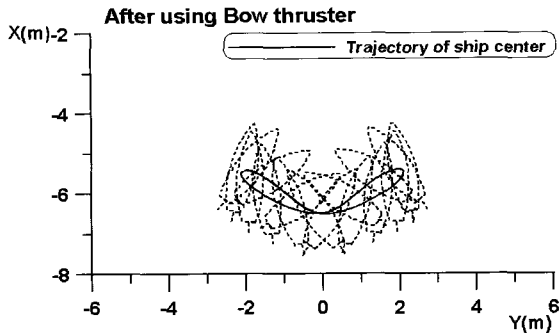


Fig. 7 Trajectory of ship after using bow thruster

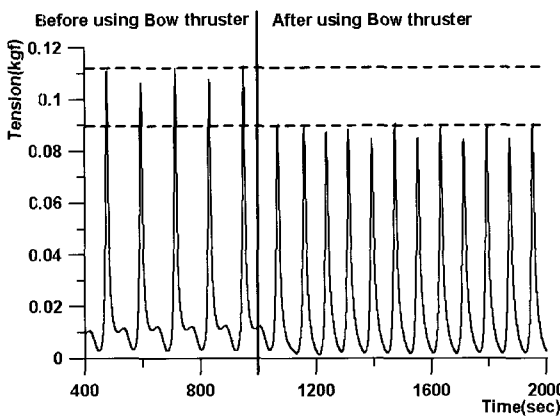


Fig. 8 Tension on 1st anchor line after using bow thruster

Fig.8에서는 바우스러스터를 이용한 Slew Motion의 제어 전과 후의 첫 번째 계류삭에 걸리는 수평장력을 비교해 보았다. 시뮬레이션의 1000초에서 바우스러스터는 가동되었으며 제어 전에 비해 약 20%정도 감소하는 모습을 보이고 있다.

그러나, 바우스러스터를 사용하기 위해서는 바우스러스터의 예열 및 바우스러스터를 가동하기 위한 전기적인 동력이 필요하다. 이를 위해 선박은 묘박 중에 발전기 등의 추가적인 기기의 가동이 필요하기 때문에, 바우스러스터를 이용한 Slew Motion의 제어는 현재의 묘박시스템에는 적용하는데 어려움이 따른다. 이와 같은 문제점 때문에, 현재 실무에서는 굴레를 씌우는 묘박법이 많이 사용되고 있고, 아래에 굴레를 씌우는 묘박법에 대하여 시뮬레이션해 보았다.

#### 4.2 굴레를 씌우는 묘박법에 의한 Slew Motion의 제어

굴레를 씌우는 묘박법은 두 번째 묘를 이용하여 계류된 선박에 Slew Motion이 발생시, 선수의 궤적을 한정시키는 방법이다. 시뮬레이션에서는 Slew Motion이 발생 후에 두 번째 묘를 투하시키고 묘채를 1~2샤클정도(실선기준) 내어주고 묘가 해저에 고정시의 파주력과 묘를 끌게 함으로써 얻어지는 주요 저항이 계산에 사용되었다.(윤점동, 2002)

선수의 궤적을 따라 투묘가 가능하기 때문에 두 번째 묘의 투묘점을 정하기 위해 Fig.9의 ①선수궤적의 중심, ②첫 번째 묘와 선수궤적의 최대점, ③선수궤적의 중심과 선수궤적의 최대점에서 시뮬레이션을 수행하였다.

투묘 후의 두 번째 묘의 궤적을 Fig.10에 나타내었다. 두 번째 묘는 투묘된 후, 선수의 운동에 의해 주요 후에 투묘점과는 상관없이, 두 번째 계류삭의 길이에 따라 일정한 궤적으로 이동하였다.

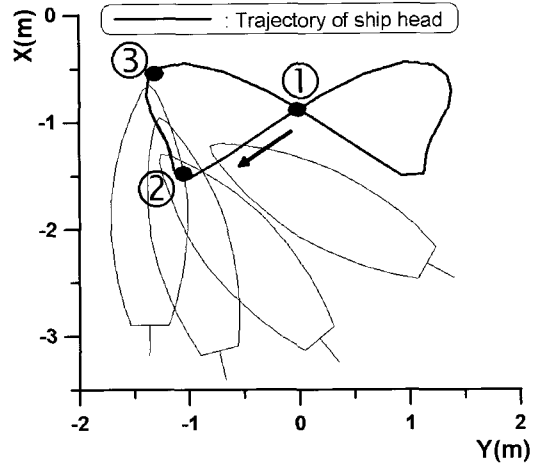


Fig. 9 Possible anchoring point

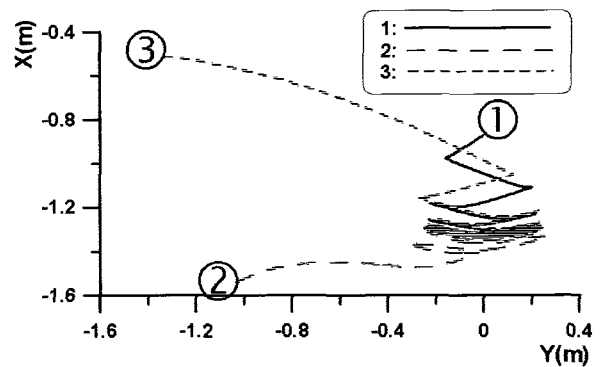


Fig. 10 Trajectory of the 2nd anchor after anchoring

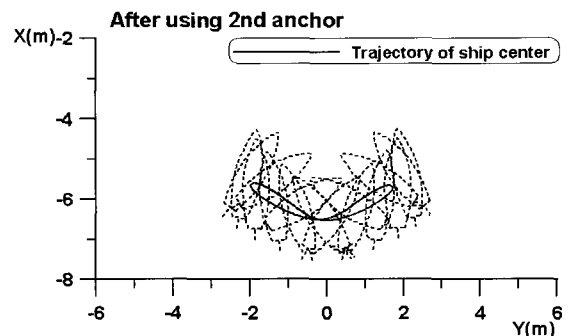


Fig. 11 Trajectory of ship after using 2nd anchor

Fig.11에 두 번째 묘를 사용한 굴레를 씌우는 묘박법에 의한 제어 이후의 선박의 궤적을 나타낸 모습이다. 두 번째 묘가 선수의 궤적을 제한하기 때문에 Fig.10에 비해 선박의 궤적이 감소하는 모습을 보여주고 있다. 이 때의 첫 번째 계류삭에 걸리는 수평장력을 Fig.12에 나타내었다. 제어 전과 비교하여 약 25%의 수평장력이 감소되었다.

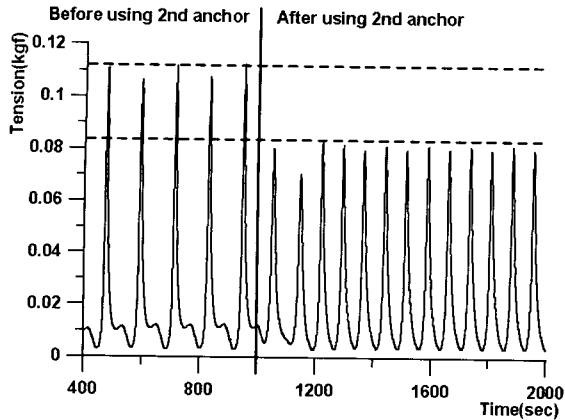


Fig. 12 Tension on 1st anchor line after using 2nd anchor

## 5. 결 론

본 논문에서는 일점계류된 선박에 Slew Motion이 발생시, 바우스러스터에 의한 제어방법과, 굴레(Bridle)를 씌우는 묘박법을 사용하여 제어하는 시뮬레이션을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 바우스러스터를 이용하여 계류된 선박에 발생한 Slew Motion를 제어하고, 계류삭에 걸리는 수평장력을 감소시킬 수 있었다.

(2) 묘박 중에 항상 스러스터의 워밍업이 필요한 바우스러스터 제어법에 비해서, 비교적 작업이 간단한 굴레를 씌우는 묘박법으로 Slew Motion의 제어가 가능하였다.

(3) 시뮬레이션이 결과, 바우스러스터에 의한 제어보다, 굴레를 씌우는 묘박법의 경우가 주 계류삭에 걸리는 수평장력의 감소에 더 효과적임을 알았다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2000-00320) 지원으로 수행되었음.

## 참 고 문 헌

- [1] 김동훈, 이승건 (2001) "바람과 파랑을 고려한 계류시 선박의 거동 해석," 2001년 대한조선학회 춘계학술대회논문집, pp.128-pp.131
- [2] 윤점동 (2002) "선박조종의 이론과 실무," 세종출판사, pp.2-26
- [3] 이승건, 조효재, 강동훈 (2003) "불규칙파중의 1점계류 선박의 거동해석에 관한 연구," 한국항해항만학회지, 제 27권 제1호, pp.55-61
- [4] 小保方準, 佐木紀雄 (1982) "一点係留時の船体振れまわり運動とその安定性について," 關西造船學會論文集, 第 186号
- [5] 井上正裕, 貴島勝郎 (1978) "トリム時の船体操縦微係数の推定," 西部造船會々報, 第55号
- [6] 井上正裕, 平野雅祥 (1979) "操縦時船体に働く横力・モーメントの非線型項について," 西部造船會々報, 第58号
- [7] Hasegawa, K. (1980) "On a Performance Criterion of Autopilot Navigation," JKSNAJ, No.178, pp. 93-104
- [8] Motora, S. (1960) "On the Measurement of Added Mass and Added Moment of Inertia for Ship Motions," Journal of the Society of Naval Architects of Japan, No.106, pp.59-62
- [9] OCIMF (1994) "Prediction of Wind and Current Loads on VLCCs(2nd)," Witherby, pp.3-28
- [10] O.M. Faltinsen (1990) "Sea loads on ships and offshore structures," cambridge university press, pp.257-270

원고접수일 : 2003년 3월 29일

원고채택일 : 2003년 5월 29일