

예인력과 피예인선의 예인 지점과 거동에 관한 연구

남택근*†

* 목포해양대학교 기관시스템공학부 교수

A Study on the Relation between Towing Force of Tow Vessel and Towing Point and Behavior of Towed Ship

Taek-Kun Nam*†

* Division of Marine Engineering, National Mokpo Maritime University, Mokpo 530-729, Korea

요 약 : 본 연구는 피예인선의 거동을 결정짓는 예인선의 힘과 작용지점의 해석에 대해 언급하고 있다. 예인대상선박의 간략화된 동역학방정식을 바탕으로 선형화기법을 적용하여 목적으로 하는 피예인선의 자세와 위치를 달성하기 위한 예인력과 예인력이 가해져야 하는 지점을 도출하였다. 이를 위해 LQR 제어기법을 적용하였으며, 수치적인 시뮬레이션을 수행하였다. 리카치방정식을 이용하여 피예인선의 자세제어를 위한 제어기 이득과 자세제어에 필요한 무게중심에서의 힘을 도출하였고, 도출한 힘과 예인지점의 역학적인 관계는 의사역행렬을 이용하여 구하였다. 이러한 해석기법을 바탕으로 피예인선을 초기위치로부터 목표위치로 예인할 때 예인지점 및 예인방식에 따른 예인력을 구할 수 있었다. 최종적으로 선박을 예인하기 위한 예인력은 예인지점과 방향에 밀접하게 연관되어 있는 것을 확인할 수 있었고 이러한 연구결과는 사고선박의 구난작업 시 예인선의 배치에도 적용이 가능할 것이다.

핵심용어 : 예인선, 예인력, 피예인선, 예인지점, 무게중심점, 해석기법

Abstract : In this paper, an analysis results of towing force and towing points which are dominating factors to determine the behavior of towed ship are introduced. The towing force and towing points to achieve the desired posture and its position of the towed vessel are derived based on simplified dynamics and linearization method. LQR algorithm for posture control is applied to linearized system and numerical simulation is also executed. Force based on COG(center of gravity) and gain of controller to achieve desired posture for target vessel are obtained by using Riccati matrix equation and pseudo inverse matrix is applied to analyze the relation between the derived force and its towing point. Based on this analysis method, towing force need to move the towed vessel from its initial position to target position can be calculated. The towing method including towing point and direction is also considered on this method. Finally, the relation between towing force and towing point is confirmed from the analysis and the results can be applied to arrangement of tug boats during salvage works.

Key Words : Tow vessel, Towing force, Towed ship, Towing point, COG, Analysis method

1. 서론

해상에서의 선박사고는 재산피해, 인명피해와 더불어 심각한 해양환경 오염을 불러오게 된다. 최근들어 우리나라의 연안에서 발생한 사고들로 인해 해상에서의 선박사고를 예방하고 사고 발생 시 신속한 대처방안의 중요성이 강조되고 있다. 사고에 대한 대처측면에서 본다면 선박 사고가 발생할 경우 사고선박을 사고장소로부터 안전한 장소로 신속하게 예인하여 2차적인 피해를 최소화하는 것은 다른 무엇보다

중요하다고 할 수 있다.

이처럼 예인선은 해상의 선박사고 현장에서 초동조치에 유용하게 이용되고, 사고의 종류 및 주변 환경에 따라 피예인선을 이동시키는 예선법이 달라지게 된다(Reid, 1994). 아울러 예선을 이용하여 피예인선을 목적하는 장소에 이동하기 위해서는 우선적으로 소요예인마력을 추정하여야 한다. 선박의 소요예인마력추정에 관한 기존연구를 살펴보면 SNAK(The Society of Naval Architects of Korea, 2009)에서는 선박의 저항에 대한 체계적인 분석을 하였고, KR, KST(2008)은 선박의 마찰저항, 조파저항, 공기저항, 기타 부가저항을 고려하여 선박의 소요 예인 마력을 추정하였다. 한편 Choi and

† tknam@mmu.ac.kr, 061-240-7225

Kim(2012)은 선체의 기본저항 이외에 바람, 표류력, 선체표면거칠기, 선체파손, 파랑, 천수효과 등에 의한 영향을 고려하여 예인저항을 도출하고 있다.

위에서 살펴본 기존 연구의 경우 다양한 환경 요소를 고려하여 선박의 저항을 도출할 수 있지만, 선박의 거동을 고려한 저항계산은 이루어지지 않고 있다. Nam et al.(2012)에서는 피에인선의 움직임을 구현하기 위한 제어기 구성을 제안하고 있지만 피에인선의 회전운동에 국한되고 있으며, 도출된 힘과 예인 지점과의 관계에 대해서는 다루지 않고 있다.

본 논문에서는 이러한 점에 착안하여 피에인선을 임의의 지점(자세 포함)에서 목적 지점으로 이동할 때 피에인선의 무게중심점에서 필요한 힘(x, y 축 방향의 힘 및 z 축방향의 회전 모멘트)을 도출하고, 피에인선의 예인 지점을 고려하여 예인에 필요한 각 지점의 힘을 계산하고 있다. 피에인선을 초기 위치에서 목적 지점으로까지 이동시키기 위한 무게중심점에서의 힘을 도출하기 위해 피에인선의 비선형 운동방정식에 대해 선형화 피드백제어와 LQR제어기법을 적용하였으며, 도출된 힘과 예인지점에서의 상관관계를 분석하였다. 이러한 기법을 적용하여 피에인선의 거동을 사전에 예측하고 이러한 거동에 필요한 예인지점에서의 예인력을 도출한다면 선박의 사고 현장에서 효율적으로 구난 작업을 수행할 수 있을 것이다.

2. 피에인선의 거동해석

2.1 피에인선의 운동방정식 및 예인력 도출

먼저 피에인선에 대해서는 Fig. 1과 같이 고정좌표계(O_N)와 물체좌표계(O_B)와 같은 좌표계를 이용한다.

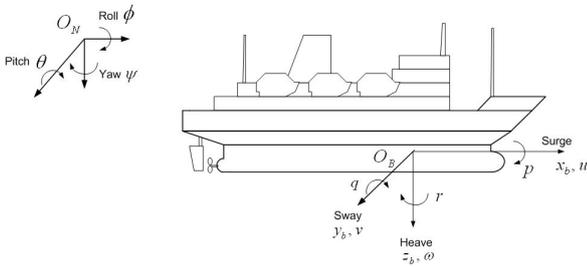


Fig. 1. Coordinate of Vessel from its Inertial Frame.

Fig. 1과 같은 선박의 운동방정식은 식(1)과 같이 표현된다 (Fossen, 1999).

$$\begin{aligned} M \dot{\nu} + C(\nu)\nu &= f \\ \dot{\eta} &= J(\theta)\nu \end{aligned} \quad (1)$$

단, $M, C(\nu), J(\theta)$ 는 각각 대상 선박의 질량과 관성, 코리올리 및 원심력(coriolis and centripetal force terms), 속도 변환 행렬을 의미한다. 여기에서 x_b, y_b 축 방향으로의 속도 u, v 와 z_b 축에 대한 각속도 r 을 고려하고, 선박 전체의 무게 중심과 물체좌표계가 일치한다고 하면 운동방정식(1)은 다음 식(2)와 같이 간략화 할 수 있다.

$$\begin{aligned} m(\dot{u} - vr) &= f_1 \\ m(\dot{v} + ur) &= f_2 \\ I_z \dot{r} &= f_3 \end{aligned} \quad (2)$$

단, m 은 선박의 질량, I_z 는 z 축 중심의 관성모멘트, f_1, f_2 는 각 축방향의 힘, f_3 는 모멘트를 의미한다.

식(2)에 $x = [u \ v \ r]^T, f = [f_1 \ f_2 \ f_3]^T$ 를 도입하면 식(3)이 얻어진다.

$$M\dot{x} = g(x) + f \quad (3)$$

단, $g(x) = [mvr \ mur \ 0]^T$ 이다.

x_b, y_b 축 방향의 힘과 z_b 축 중심의 회전력에 따른 x 의 변화를 해석하기 위해 제어력 f 를

$$f = \hat{M}\lambda - \hat{g}(x) \quad (4)$$

와 같이 구성하여 식(3)에 대입하면 식(5)와 같은 선형시스템을 얻을 수 있다.

$$\dot{x} = \lambda \quad (5)$$

단, $M(x) = \hat{M}(x), g(x) = \hat{g}(x)$ 이라고 가정 즉, 선체질량과 z 축 중심의 관성모멘트와 x_b, y_b 축 방향으로의 속도와 z_b 축 방향으로의 각속도를 알고 있는 것으로 한다.

식(5)에 대한 제어기를 설계하기 위해 $q = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4 \ q_5 \ q_6]^T$

$$q_1 = \int u dt, \quad q_2 = \int v dt, \quad q_3 = \int r dt, \quad q_4 = \dot{q}_1, \quad q_5 = \dot{q}_2, \quad q_6 = \dot{q}_3 \quad (6)$$

를 도입하면 식(5)로부터

$$\dot{q} = A q + B \lambda \quad (7)$$

을 얻을 수 있다. 단, A, B 는 계수로써 구성된 행렬이다. 여기에서 상태변수 q 에 대한 목표궤도를 q_d 로 한 시스템을

$$\dot{q}_d = A q_d + B \lambda_d \quad (8)$$

과 같이 구성하고, 새로운 상태변수 및 제어입력(λ)의 목표값과의 오차를 $e = q - q_d$, $\bar{\lambda} = \lambda - \lambda_d$ 로 정의하면 오차 상태방정식(9)가 얻어진다. 단, $\lambda_d = \dot{q}_d$ 이다.

$$\dot{e} = Ae + B \bar{\lambda} \quad (9)$$

식(9)에 대해서는 $e(t) \rightarrow 0, t \rightarrow \infty$ 을 제어목적으로 하는 제어를 다양하게 설계할 수 있다. 본 연구에서는 오차와 제어입력으로 구성되어지는 평가함수

$$J = \int_0^{\infty} e^T Q e + \bar{\lambda}^T R \bar{\lambda} dt \quad (10)$$

를 최소화하기 위한 제어입력 $\bar{\lambda}$ 를 구하기 위해 LQR제어기법을 적용하였고, 식(10)의 평가함수를 최소화하는 해로써

$$\bar{\lambda} = -R^{-1} B^T P e \quad (11)$$

을 얻을 수 있다. 단, $R(3 \times 3), Q(6 \times 6)$ 는 가중치행렬이고, P 는 리카치방정식(Riccati Matrix equation)을 만족시키는 해이다. 식(11)과 같이 얻어진 피드백제어를 식(4)에 적용하면 목적으로 하는 피에인선의 거동을 달성할 수 있는 제어입력을 얻을 수 있다.

2.2 예인력과 예인지점과의 관계

피에인선의 거동을 달성하는 힘(무게중심점 기준)을 식(4)와 같이 도출할 수 있고, 이 힘과 예인지점에서의 분력에 대해 살펴보고자 한다. 무게중심을 기준으로 한 힘과 모멘트는 Fig. 2와 같이 각 지점에 가해지는 x, y 방향의 힘으로도 분산이 가능하다.

Fig. 2와 같이 선박을 크게 I, II, III, IV영역으로 나누고 각 지점에서 가해지는 힘을 x, y 축 방향으로 분류하여 $F = [f_{1x}, f_{1y}, f_{2x}, f_{2y}, f_{3x}, f_{3y}, f_{4x}, f_{4y}]^T$ 와 같이 나타내면 무게중심(C.O.G, center of gravity)과 각 예인점에서의 힘의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f = T_f F \quad (12)$$

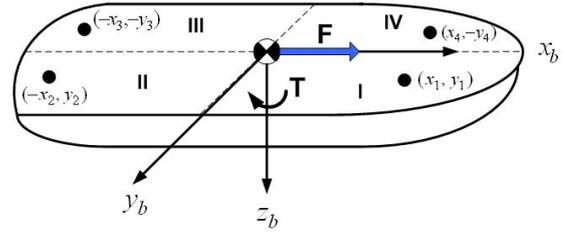


Fig. 2. Relation between forces of C.O.G and towing forces.

단, f, T_f 는 각각

$$f = [f_1, f_2, f_3]^T$$

$$T_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ y_1 & x_1 & y_2 - x_2 - y_3 - x_3 - y_4 & x_4 \end{bmatrix} \quad (13)$$

을 의미한다.

식(12)는 피에인선의 거동을 달성하는 식(4)의 힘을 각 예인지점의 힘 F 로 분산하는 관계식을 나타내고 있으며 해는

$$F = T_f^+ f \quad (14)$$

와 같이 구할 수 있다. 단, $T_f^+ = T_f^T (T_f T_f^T)^{-1}$ 인 의사역행렬(pseudo inverse matrix)이다.

3. 예인 시뮬레이션 및 분석

3.1 예인작업 시뮬레이션

앞절에서는 선체의 운동방정식과 선박의 거동을 달성하기 위한 선형화 피드백 제어기법 및 무게중심점과 예인지점에서의 힘의 분력 관계에 대해 살펴보았다. 본절에서는 이러한 해석을 바탕으로 하여 정지되어 있는 선박을 원하는 방향으로 예인할 경우 예인작업에 소요되는 힘에 대해 언급하고자 한다.

Fig. 3(a)는 피에인선의 초기 자세를 나타내고 있으며 Fig. 3(b)는 초기자세로부터 피에인선의 선수방향에 두 척의 예인선을 연결하여 예인하는 모습을 나타내고 있다. 즉, 초기의 피에인선을 이동시키기 위해 필요한 무게중심점에서의 힘을 도출하고 선수방향에 예인지점을 정했을 경우 예인점에서의 분력을 살펴보고자 하는 것이다.

이러한 피에인선의 움직임을 살펴보기 위해 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션을 수행하였고, 시뮬레이션을 수행하기 위한 선박의 체적, 관성력 및 전체길이는 각각 $m = 364,780 [kg]$,

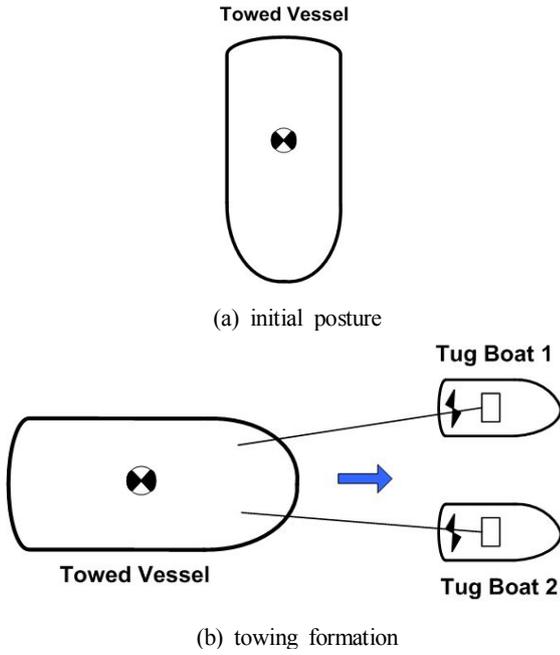


Fig. 3. Initial and desired posture of towed vessel.

$I_z = 4.584 \times 10^7 [kgm^2]$, $LOA = 52.5 [m]$ 와 같다(Perez, 2005). 대상선박의 위치 및 자세의 초기값과 목표치는 각각 다음과 같이 설정하였다.

$$\begin{aligned} q_0 &= [0 \ 0 \ -\pi/2 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ q_d &= [t \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]^T \end{aligned} \quad (15)$$

목표치 q_d 에서 알 수 있듯이 선체는 초기 자세로부터 x 축 방향으로 시간에 비례하여 이동하고 이동 속도는 $1 \ m/s$ 이다. 이러한 제어목적을 달성하기 위한 시뮬레이션을 수행하였고, 시뮬레이션 결과는 Fig. 4 ~ Fig. 9와 같다. 단, 시뮬레이션에서의 파라미터는

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} 0(3 \times 3) & I(3 \times 3) \\ 0(3 \times 3) & 0(3 \times 3) \end{bmatrix}, \quad B = [0(3 \times 3) \ I(3 \times 3)], \\ Q &= I(6 \times 6), \quad R = 0.9 * I(3 \times 3) \end{aligned} \quad (16)$$

로 하였고, 제어게인값은

$$K = \begin{bmatrix} 1.0541 & 0 & 0 & 1.7942 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0541 & 0 & 0 & 1.7942 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0541 & 0 & 0 & 1.7942 \end{bmatrix} \quad (17)$$

를 적용하였다. 여기에서 Q, R 은 각각 가중치 행렬(weight matrix)을, K 는 LQR게인을 의미한다.

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 시간에 대한 상태변수의 변화와 제어입력의 변화를 나타내고 있다. Fig. 4로부터 대상선박이 x_b 축으로 시간에 비례해서 이동하는 것을 알 수 있고, z_b 축 기준회전각은 초기값 $-\pi/2 = -1.5708 \ [rad]$ 에서 0° 방향 즉, x_b 축방향으로 수렴하는 것을 알 수 있다.

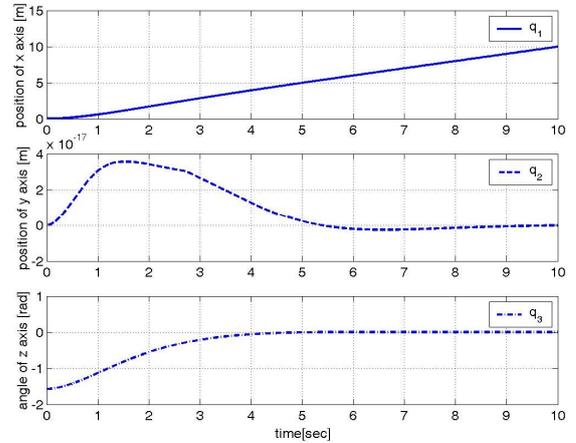


Fig. 4. Time evolution of states(q_1, q_2, q_3).

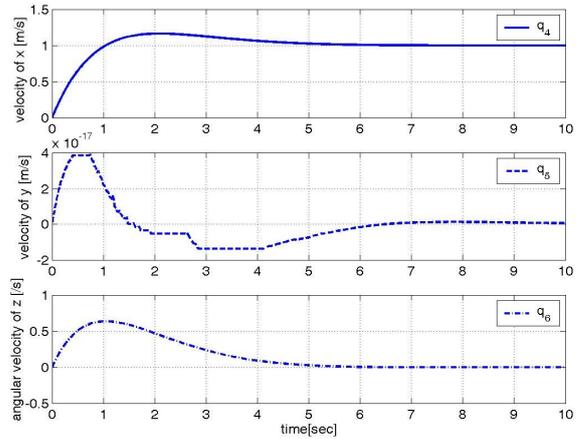


Fig. 5. Time evolution of the states(q_4, q_5, q_6).

Fig. 5는 이러한 움직임에 대한 속도성분 u, v, r 의 변화를 나타내고 있다. x_b 축 방향으로의 이동 속도는 $1 \ m/s$ 에 수렴하고 있으며, y_b 축 방향으로의 이동 속도와 z_b 축 방향 기준 각속도는 0 으로 수렴하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 4 ~ Fig. 5와 같은 움직임을 만들어내는 힘 즉, x_b, y_b 축 방향으로의 힘과 z_b 축 중심으로의 모멘트를 나타내고 있다. 초기에 무게중심을 기준으로 회전하기 위해 필요한 모멘트는 $f_x = \alpha(t), f_y = \beta, \tau_z = \gamma(t)$ 에 의해 얻어지는 것을 알 수 있다. 초기 자세로부터 선체를 회전시키기

에인력과 피에인선의 예인 지점과 거동에 관한 연구

위해 f_x 와 τ_z 에 큰 힘이 소요되고 있으며, y_b 축 방향의 힘 f_y 는 일정한 크기의 힘이 지속적으로 가해지고 있음을 알 수 있다. Fig. 6에서의 값들을 살펴보면 $|f_x|_{\max} = 7 \times 10^5 [N]$, $|f_y|_{\max} = 200 [N]$, $|\tau_z|_{\max} = 8 \times 10^7 [Nm]$ 를 보이고 있다. 이 값들은 정지되어 있는 대상선박을 움직이기 위한 초기의 힘임을 알 수 있다.

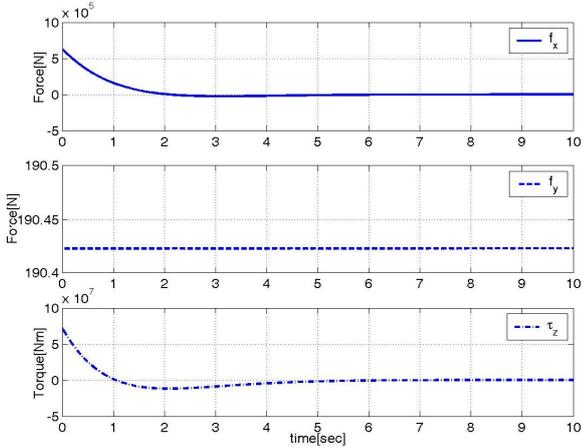


Fig. 6. Time evolution of the inputs.

Fig. 7은 Fig. 6의 8초~10초에 해당하는 결과값을 출력한 것이다. Fig. 7에서는 초기값이 큰 관계로 상대적으로 작은 값을 나타내는 후반부에는 값들이 0에 수렴하는 형태를 나타내고 있어 각 축방향으로의 힘들을 살펴보기 위해 시간축을 설정해 그래프로 나타낸 것이다.

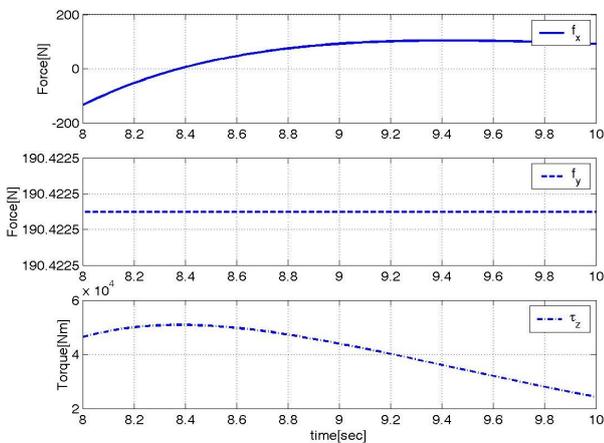


Fig. 7. Time evolution of the inputs(8~10 sec).

위의 시뮬레이션을 통해 구해진 힘과 모멘트는 피에인선을

에인하는 예선의 배치와 연계하여 해석이 가능할 것이다. 즉, 예선의 위치 및 작용하는 힘의 크기에 의해 피에인선의 거동이 결정되므로, 피에인선의 움직임에 필요한 힘을 도출함으로써 예인 작업에 필요한 예선의 척수와 소요 마력 및 배치위치에 대한 기준을 정할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 2.2절에서의 해석결과와 식(14)을 이용하면 각 예인점에서의 분력을 알 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 6의 힘을 피에인선의 선수방향 두 지점으로 나누어 나타내고 있다. 결론적으로 선수방향 두 지점에 Fig. 8과 같은 에인력을 가하면 Fig. 6과 같은 힘이 무게중심점에 가해지게 되고 이러한 힘에 의해 Fig. 4 ~ Fig. 5 및 Fig. 10과 같은 선박의 거동이 이루어지게 된다.

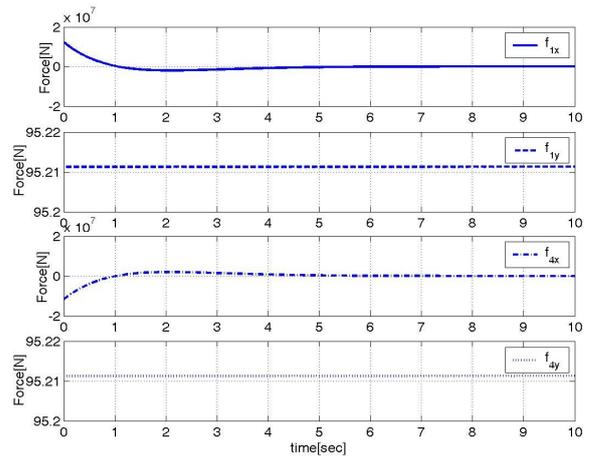


Fig. 8. Time evolution of the inputs.

Fig. 8에서 f_{1x}, f_{4x} 의 경우 초기값과의 큰 차이에 의해 2초 이후에는 0에 수렴하는 것으로 보이나 실제 값은 그렇지 않다.

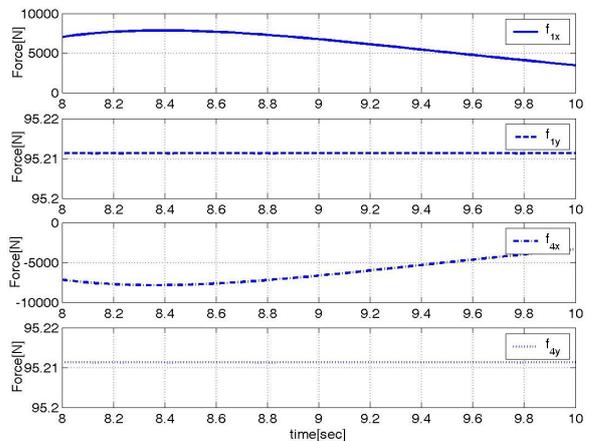


Fig. 9. Time evolution of the inputs(8~10 sec).

Fig. 9는 Fig. 8의 8~10초에 해당하는 데이터를 그래프를 나타낸 것이다.

Fig. 10은 시뮬레이션을 통해 얻어진 선박의 거동을 애니메이션으로 나타낸 것이다. 그림으로부터 초기 자세에서 x_b 축 방향으로 목적 궤도를 따라 선박이 이동하고 있는 것을 알 수 있다.

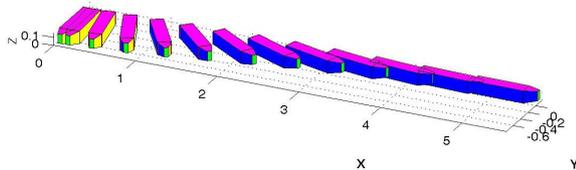


Fig. 10. Behavior of towed ship.

본 연구에서는 선박 및 주변 환경으로부터의 외력 즉, 유체력, 바람, 선체표면 거칠기, 파랑 등을 직접적으로 고려하지 않았지만 이러한 항목들에 대해서는 식(1)과 식(2)에 외력을 반영할 수 있다.

4. 결론

본 연구는 선박의 예인 시 피예인선의 움직임에 필요한 무게중심점에서의 힘을 도출하여 예인 지점에 따른 분력을 해석적으로 구하였다. 연구를 통해 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 선박의 운동방정식에 대해 피드백 선형화와 LQR제어기법을 적용하여 추종제어(tracking control)를 행하였고, 시뮬레이션을 통해 선박의 움직임을 구현하기 위한 힘을 도출할 수 있었다. 시뮬레이션 결과로부터 선박의 초기 자세(위치 포함)에서 목적으로 하는 자세를 갖추기 위해 큰 힘이 발생함을 알 수 있었고, 이러한 부분은 예인 작업에 있어서도 예인선의 소요마력을 산정할 때 동적인 요소를 고려할 필요가 있음을 의미한다.

(2) 선체를 회전시키면서 일정방향으로 이동시키기에 있어 y_b 축 방향의 힘은 일정한 상태에서 x_b 축으로의 힘이 변화되며, 두 힘의 합력이 최종적으로 예인방향을 결정하고 있음을 알 수 있다.

(3) 피예인선의 무게중심점에서 도출된 힘을 선수 혹은 선미 방향의 예인점 기준으로 한 분력을 계산하였다. 피예인선을 예인하기 위해서는 예인선과 피예인선을 예인선에 의해 연결하고 예인선을 통해 예인력을 가하게 되는 데 본 연구를 통해 얻어진 해석법을 적용하여 피예인선의 소요마력과 예인선의 배치에 따른 각 예인선에서의 예인력을 계산할 수 있다.

(4) 선박의 총저항이 도출되었을 경우 선박을 예인하기 위해 필요한 예인선의 척수, 배치 등을 포함한 예인시나리오의 작성에 응용이 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 해양수산부 소관 연구개발사업 “지능형 해양구난 핵심기술개발(No. D10811511H360000170)”의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

References

- [1] Choi, H. J. and E. C. Kim(2012), Development of the Ship Resistance Calculation Program for Prediction of Towing forces for Damaged Ships, Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, Vol. 15, No. 2, pp. 150-155.
- [2] Fossen, T. I.(1999), Guidance and Control of Ocean Vessels, John Wiley & Sons, pp. 1-54.
- [3] KR, KST(2008), A Study on the Safety Management Policy for Large Tug and Barge, MOMAF, pp. 4-20.
- [4] Nam, T. K., C. H. Jung and H. J. Choi(2012), A Study on the Force and Momentum of Vessels by Tug, Joint conference of KAOSTS, pp. 2333-2338.
- [5] Perez, Tristan(2005), Ship Motion Control, Springer, pp. 46-92.
- [6] Reid, G. H.(1994), Shiphandling with Tugs, Cornell Maritime Press, pp. 170-184.
- [7] The Society of Naval Architects of Korea(2009), Ship's resistance and propulsion, Jisung Publishing Co., pp. 16-86.

원고접수일 : 2013년 09월 25일

원고수정일 : 2013년 10월 25일 (1차)

2013년 11월 13일 (2차)

게재확정일 : 2013년 12월 26일