

선박 조종 시뮬레이션을 위한 단순 기동 모델 개발

김동진^{1†} · 여동진² · 이기표¹

Development of Simple Dynamic Models for Ship Manoeuvring Simulation

Dong-Jin Kim · Dong-Jin Yeo · Key-Pyo Rhee

ABSTRACT

It is necessary for the ship dynamic models to realize ship dynamics and to achieve the real-time analysis in the manoeuvring simulation. Generally, simple dynamic models, such as 1st-order differential equation models of turning angle, turning rate, and forward speed, are used in the manoeuvring simulation for multiple ships. Ship dynamic modeling and parameter estimation methods based on its turning test results are proposed in this paper. Parameter estimation methods for the constant speed model and the speed-changing model are mathematically developed and verified by comparing with turning test results of a real ship.

Key words : Ship manoeuvring simulation, Turning test, Simple dynamic model, Parameter estimation

요 약

선박 조종 시뮬레이션을 구성하는 기동 모델은 대상 선박의 동역학적인 특성을 현실에 가깝게 구현해야 하며, 신속한 계산 및 결과 처리가 가능하여야 한다. 다중 선박을 대상으로 하는 실시간 조종 시뮬레이션에서는 계산 시간 단축을 위해 일반적으로 선회각이나 선회율, 또는 전진 속도에 대한 1차 미분방정식 모델을 사용하여 선박의 움직임을 구현하게 된다. 본 논문에서는 대상 선박의 선회 시험 정보가 주어져 있을 경우 이를 이용한 선박의 단순 기동 모델링 및 계수 추정법을 제안하였다. 전진 속도가 일정한 모델과 전진 속도의 변화를 고려한 모델의 계수 추정법을 수학적으로 전개하였으며, 실선 선회 시험 자료를 이용하여 제안된 모델의 유용성을 검증하였다.

주요어 : 선박 조종 시뮬레이션, 선회 시험, 단순 기동 모델, 계수 추정법

1. 서 론

선박의 설계 단계, 혹은 건조 후 운항 시나리오 검토 및 안전성 평가 단계에서 대상선의 움직임을 쉽고 정확하게 파악하기 위해 선박 조종 시뮬레이션이 이용된다. 조종 시뮬레이션은 여러 선박에 대한 실시간 거동 예측 및 결과 분석이 필수적이므로 내부의 기동 모델은 식이 단순하고 계산 시간이 짧아야 한다. 동시에 선박의 동역학 특성이 현실적으로 잘 반영되어야 하므로 간단하면서도 효율적인 기동 모델링이 필요하다.

선박 조종 시뮬레이션에 관련된 이전 연구를 보면 비선형 수학 모델을 기반으로 하여 손경호 등(1998), 이규동 등(2003)에 의해 PC를 이용한 시뮬레이터 개발, 양승렬 등(2004)의 선박 접이안 시뮬레이션, 이상민 등(2009)의 예부선의 운항 시뮬레이션 연구가 있다. 최근에는 김동환 등(2007), 신지환(2007)의 연구에서처럼 다중 플랫폼을 대상으로 운항 시나리오 구현 및 전술 평가를 위한 단순 기동 모델 개발이 시도되었다. 이와 같이 선형 및 비선형 유체력 미계수들을 포함하는 비선형 상세 모델에 관한 연구는 조선 분야에서 예전부터 꾸준히 이루어져 왔으나 다중 선박의 실시간 조종 시뮬레이션을 위한 경량화 모델 연구는 아직 충분하지 않은 실정이다.

본 논문에서는 다중 선박의 실시간 조종 시뮬레이션을 위한 단순 기동 모델을 개발하였다. 구체적으로 선박의 동역학 특성을 단순한 몇 가지 계수들로 반영하며, 제어

2010년 4월 9일 접수, 2010년 9월 14일 채택

¹⁾ 서울대학교 조선해양공학과

²⁾ 한국해양연구원 해양시스템안전연구소

주 저 자 : 김동진

교신저자 : 김동진

E-mail: kdj8277@snu.ac.kr

력의 영향이 역시 단순하게 추가된 1차 미분방정식 모델을 기반으로 하였다. 전진 속도가 일정한 경우와 변하는 경우 각각에 대해 모델링을 수행하고, 대상 선박의 실선 선회 시험이나 시뮬레이션 결과가 있다고 할 때 이를 통해 모델 내부의 계수들을 편리하게 추정할 수 있는 방법을 제안하였다. 마지막으로 실선 선회 시험 자료를 바탕으로 시뮬레이션을 실시하고 실선 결과와 비교하여 제안된 모델의 유용성을 검증하였다.

2. 선박 조종 시뮬레이션 모델

일반적으로 시뮬레이션에 쓰이는 기동 모델은 표 1과 같이 동역학 특성 반영 유무에 따라 크게 단순 모델과 동역학 모델로 분류할 수 있다(윤현규, 2007/2008).

단순 모델은 경유점 위치 및 경유 시간, 경유 속도 등을 입력받아 이를 재현하는 모델로 대상선의 속도나 선회율의 한계 값을 필요로 할 뿐, 선체 및 제어기/추진기의 세부적인 동역학 특성은 반영되지 않는다.

동역학 모델 중 1차 미분방정식 모델은 선회각이나 선회율, 전진 속도 등의 변화를 1차 미분방정식의 해로 구하는 모델로서 선박의 동역학적 특성을 단순한 계수들로 입력 받는다. 동역학 모델 중 선형/비선형 모델은 선체뿐만 아니라 제어기/추진기의 동역학 특성까지 상세하게 구현한다. 일반적으로 다중 선박의 실시간 조종 시뮬레이션에는 단순 모델 및 1차 미분방정식 모델이 사용된다.

본 논문에서 다루는 모델은 1차 미분방정식 모델, 대상은 수상선, 운동 범위는 수평면 상으로 제한하기로 한다.

2.1 선회각 모델

선회각 모델에서는 시간에 따른 선회각 변화를 1차 미분 방정식의 해로 구한다. 목표 경로각이 미리 정해져 있을 때 사용할 수 있다. 수식으로 나타내면 식 (1)과 같으며, ψ 는 매 시간의 선회각, ψ_c 는 목표 선회각이다.

$$T_\psi \dot{\psi} = K_\psi (\psi_c - \psi) \quad (1)$$

표 1. 시뮬레이션에 사용되는 모델의 종류

단순 모델	동역학 모델
시간-위치 지정 모델, 시간-속도 지정 모델, 위치-속도 지정 모델, etc.	1차 미분방정식 모델
	선형/비선형 모델

1차 미분항인 $\dot{\psi}$ 의 계수 T_ψ 는 선회각의 시간 변화율을 나타내는 시정수이며, K_ψ 는 선회모멘트 관련 계수이다. 식 (1)의 양변을 T_ψ 로 나누면 식 (2)와 같이 계수를 C , 1개로 줄일 수 있다.

$$\dot{\psi} = C(\psi_c - \psi) \quad (2)$$

결국 초기 선회각 ψ_0 을 알 때 계수 C 와 목표 선회각 ψ_c 를 대입하고 미분방정식을 불연속적으로 풀면 매 시간마다의 선회각을 구할 수 있다.

2.2 선회율 모델 (KT 모델)

선회율 모델에서는 시간에 따른 선박의 선회율을 1차 미분 방정식의 해로 얻는다. Nomoto는 타 제어력이 포함된 선박의 좌우동요, 선수동요 선형 방정식을 연립하여 선회율에 대한 1차 미분 방정식을 제안하였고 이를 KT모델이라 명명하였다(Lewis, 1989; Fossen, 1994). 선회율 모델, 즉 KT모델은 식 (3)과 같다. r 는 선회율, δ 는 타각이다.

$$T\dot{r} + r = K\delta \quad (3)$$

T 는 시간에 대한 선회율의 변화 정도를 나타내는 시정수로서, 클수록 선회율이 느리게 감소하여 수렴한다. K 는 선회 모멘트 관련 계수로서, 동일한 타각 입력일 경우 K 가 클수록 작은 선회 직경을 얻을 수 있다.

선회율의 초기값을 알 때 계수 K 와 T 가 결정되면 식 (3)에 의해 매 시간 선회율을 계산하고, 이를 시간에 대해 적분하여 선회각을 얻을 수 있다.

2.3 전진 속도 모델

전진 속도 모델에서는 전진 속도에 대한 1차 미분방정식을 풀어 매 시간 전진 속도를 계산한다. 단독으로 사용되는 경우는 거의 없고 전진 방향 동역학 특성을 추가하기 위한 목적으로 선회각 모델, 혹은 선회율 모델과 함께 사용된다. 예를 들어 정상 선회 시의 속도 수렴 값을 알 경우 선회율 모델에 전진 속도 모델을 추가하여 전진 속도의 감소 및 수렴 특성을 반영할 수 있다. 수식으로 표현하면 식 (4)와 같다. T_v 는 시정수, V_d 는 목표 속도이다.

$$T_v \dot{V} + V = V_d \quad (4)$$

3. 전진속도가 일정한 경우의 모델링

3.1 일정 속도-선회각 모델

일정 속도-선회각 모델은 전진 속도가 V 로 고정되고 식 (2)와 같은 선회각 모델로 매 시간 선회각의 변화만을 고려하게 된다. 시뮬레이션 상황에 맞도록 목표 선회각 ψ_c 가 정해져 있다고 할 때, 계수 C 를 결정하는 과정은 다음과 같다.

우선 C 가 결정되었다고 가정하고 식 (2)를 풀면 시간에 대한 선회각 변화를 1차 미분방정식 해로 구할 수 있다. 한 예로 그림 1은 초기 선회각 $\psi_0=0^\circ$, 목표 선회각 $\psi_c=60^\circ$, $C=0.1$ 인 경우의 시간-선회각 그래프이다.

초기 선회각에서 목표 선회각의 99%까지 도달하는 데 걸린 상승 시간을 T_r 이라고 하면 평균 선회율 r_m 은 식 (5)와 같다.

$$r_m \approx (\psi_c - \psi_0) / T_r \quad (5)$$

초기 선회각 $\psi_0=0^\circ$, 목표 선회각 $\psi_c=60^\circ$ 일 때 C 를 0.01부터 0.4까지 변화시키면서 평균 선회율 r_m 을 계산하면 그림 2처럼 선형적인 비례 관계이다.

다른 초기 선회각 및 목표 선회각에 대해서도 계수 C 와 평균 선회율 r_m 간의 관계를 도출한 후 이를 일반화하면 식 (6)과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$C \approx \frac{4.5 r_m}{\psi_c - \psi_0} (= \frac{4.5}{T_r}) \quad (6)$$

따라서 선박의 평균 선회율 r_m , 혹은 상승 시간 T_r 을 알면 선회각 모델의 계수 C 를 결정할 수 있다.

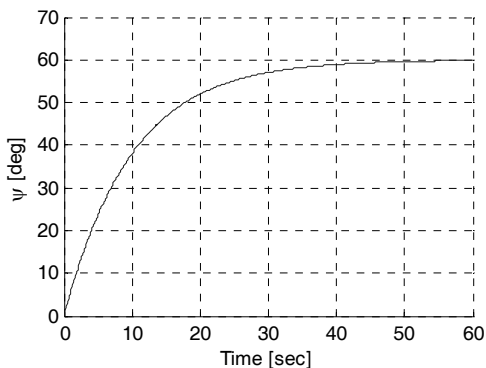


그림 1. 시간에 대한 선회각 변화

선박의 선회 궤적을 원으로 가정할 때, 선회 속도가 V (m/s)로 일정하고, 선회 직경을 D (m), 선회율을 r (rad/s)이라고 하면 선회율과 선회 직경의 관계식은 식 (7)과 같다.

$$r = \frac{2 \cdot V}{D} \quad (7)$$

대상 선박의 선회 시험 결과가 주어져 있다면, 식 (7)에서 선회 속도 및 선회 직경으로부터 선회율을 얻고 이를 식 (6)에 대입하여 계수 C 를 구할 수 있다.

3.2 일정 속도-선회율 모델

식 (3)의 선회율 모델을 완성하려면 계수 K , T 를 결정해야 한다. Nomoto에 의해 제안된 경험식에 의하면 대상 선박의 전진 속도와 입력 타각이 정해져 있을 때, 선회 직경 D , 선체 길이 L , 배수용적 ∇ , 타의 면적 A_R 정보를 이용하여 계수 K 와 T 를 구할 수 있다.

전진 속도 V 가 일정하고 타각 δ 가 고정되어 정상 선회를 할 경우 선회율이 일정하므로 식 (3)에서 $\dot{r}=0$ 이다. 따라서 $r=K\delta$ 로 단순화되고 이를 식 (7)에 대입하여 K 에 대한 계산식 (8)을 도출할 수 있다.

$$K = \frac{2V}{D\delta} \quad (8)$$

계수 T 에 대한 경험식은 Nomoto가 식 (9)와 같이 제안하였다.

$$T = \frac{L\nabla}{4V^2 A_R} K \quad (9)$$

타의 면적이 없을 경우 식 (10)처럼 근사할 수 있다.

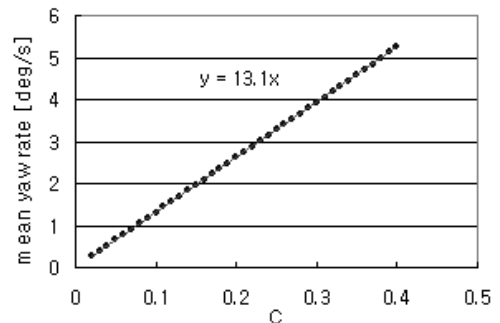


그림 2. C 와 r_m 의 관계 그래프($\psi_c=60^\circ$ 일 경우)

T_m 은 선박의 평균 흘수이다.

$$A_R \approx 0.025 L T_m \quad (10)$$

이 밖에도 Nomoto에 의하면 모형 시험 등을 통해 대상선의 유체력 미계수를 알고 있을 경우 계수 K 와 T 를 식 (11), (12)와 같이 구할 수도 있다.

$$K = \frac{N_\delta}{-N_r} \quad (11)$$

$$T = \frac{I_z - N_r}{-N_r} \quad (12)$$

N_r , N_r 은 각각 선수동요의 부가관성모멘트 및 감쇄계수이며 N_δ 는 타각에 대한 선수동요모멘트 계수이다. I_z 는 선수동요 관성모멘트로서 정보가 없을 경우 식 (13)과 같이 근사할 수 있다. $Mass$ 는 대상선의 질량이다.

$$I_z \approx Mass \cdot (0.4L)^2 \quad (13)$$

4. 전진속도 변화를 고려한 모델링

4.1 전진 속도-선회율 모델

선박 기동 모델링 시 선회각, 혹은 선회율 모델에 전진 속도의 1차 미분방정식 모델을 추가하여 전진 속도 변화를 고려할 수 있다.

일반적으로 조종 시뮬레이션에 앞서 대상선의 조종성능을 파악하고 내부 모델에 반영하기 위한 목적으로 실선 조종 시험이나 시뮬레이션이 선행된다. 대표적인 조종 시험인 선회 시험(Turning test)은 전진 속도의 뚜렷한 감소 및 수렴을 확인할 수 있어서 이를 통해 1차 미분방정식 모델의 계수 추출이 유리하며, 한편 정상 선회 운동의 구현은 선회각 모델보다 선회율 모델이 적합하다. 따라서 이하 연구의 범위를 선회 시험을 바탕으로 한 전진 속도-선회율 모델링으로 한정한다.

우선 전진 속도-선회율 모델을 수식화하면 식 (14)와 같다. V 는 전진 속도, r 은 선회율, V_d 는 수렴 속도, T_v , T 는 각각 전진 속도와 선회율 관련 시정수, K 는 선회 모멘트 관련 계수, δ 는 타각이다.

$$\begin{aligned} T_v \dot{V} + V &= V_d \\ T \dot{r} + r &= K\delta \end{aligned} \quad (14)$$

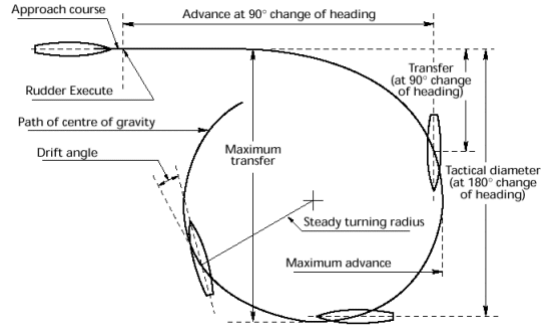


그림 3. 선회 시험 용어 정의

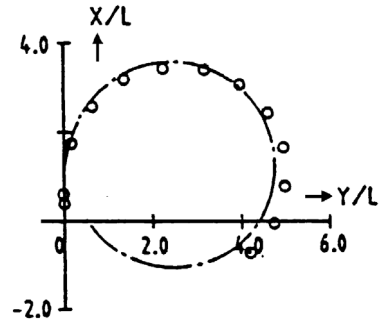


그림 4. 선회 궤적의 예

선회 시험의 궤적 및 관련된 주요 용어는 그림 3과 같이 정리할 수 있다.

그림 3에서 전진 길이(Advance)는 타각 입력이 시작된 이후부터 선수각이 90°가 될 때까지 전진 방향 이동 거리이고, 전술 직경(Tactical diameter)은 타각 입력 시작 위치부터 선수각이 180°가 될 때까지의 횡방향 이동거리이다. 그리고 정상 선회 반경(Steady turning radius)은 선박의 속도 및 선회율이 일정한 값으로 수렴한 후 생성되는 선회 궤적의 반지름이다.

선회 궤적 그래프와 선회 중 시간에 대한 전진 속도/선회율 그래프 예는 그림 4, 그림 5와 같다(貴島 勝郎 등, 1987).

그림 4, 그림 5처럼 선회 시 궤적과 속도에 대한 모든 정보가 주어진다면 전진속도-선회율 모델을 완성하기 쉽다. 하지만 일반적으로 선회 시험에서 공개되는 정보는 그림 4와 같은 선회 궤적에 추가로 초기 속도, 수렴 속도, 그리고 명령 타각 정도이다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 최소한의 선회 정보만 갖고 있는 경우, 전진속도-선회율 모델의 계수를 결정하는 방법을 제안하기로 한다.

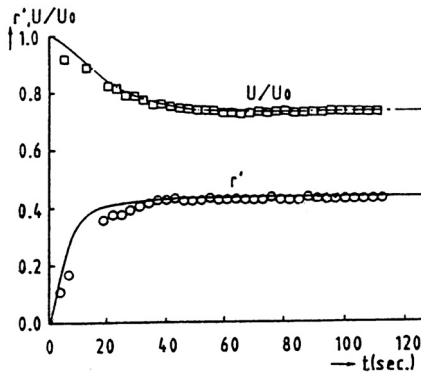


그림 5. 선회 시 시간에 대한 전진 속도 및 선회율의 변화 그래프 예

표 2. 주요 기호 정의

1) 선회 궤적 그래프	
	<p>A(전진 거리) D_T(전술 직경) R(정상 선회 반경)</p>
2) 시간-전진속도/선회율 그래프	
	<p>V_0(초기 속도) V_c(수렴 속도) r_c(수렴 선회율) t_v(속도 수렴 시간) t_r(선회율 수렴 시간)</p>
3) 전진속도-선회율 모델	
$T_v \dot{V} + V = V_d$ $T_r \dot{r} + r = K\delta$	<p>T_v(속도 시정수) V_d(목표 속도) T_r(선회율 시정수) K(선회 모멘트 계수)</p>

이하에서 사용할 용어 및 기호를 다시 정리하면 표 2와 같다.

4.2 전진 속도-선회율 모델의 계수 추정법

선회 시험으로 얻는 최소한의 변수들과 이를 통해 추정해야 하는 계수를 다시 정리하면 표 3과 같다.

선회 수렴 속도 V_c 가 주어져 있다면 이는 곧 전진 속도 모델의 목표 속도이므로 식 (15)가 성립한다.

표 3. 주어진 변수 및 추정할 계수

선회 시험에서 주어진 변수	A, D_T, R (V_0, V_c, δ are given)
모델 내에서 추정할 계수	T_v, V_d, T_r, K

$$V_d = V_c \tag{15}$$

그리고 식 (8)과 같은 원리에 의해 선회 모멘트 계수 K 는 식 (16)과 같이 표현할 수 있다.

$$K = \frac{V_c}{R\delta} \tag{16}$$

두 시정수 T_v, T_r 는 주어진 모든 변수들과 총체적으로 연관되어 있다. 편의상 우선 시간-전진 속도/선회율 그래프에서의 수렴 시간 t_v, t_r 와 전진 속도-선회율 모델 내의 계수 T_v, T_r 간의 관계를 알아보기로 한다.

식 (14)를 식 (2)의 형태로 바꾸면 식 (17)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{1}{T_v}(V_d - V) \\ \dot{r} &= \frac{1}{T_r}(K\delta - r) \end{aligned} \tag{17}$$

식 (2)와 (6)을 참고하면 t_v, t_r 를 식 (18)처럼 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} t_v &= 4.5 T_v \\ t_r &= 4.5 T_r \end{aligned} \tag{18}$$

이하에서 시정수를 물리적인 시간 개념으로 이해하기 쉽게 다루기 위해 T_v, T_r 대신 t_v, t_r 를 사용하여 수식을 전개하기로 한다.

전진 거리 A 와 전술 직경 D_T 는 만약 V_0, V_c, r_c ($= V_c/R$)가 정해지면 t_v, t_r 에 대하여 대체적으로 평면 분포이다. 그림 6, 그림 7이 한 예이다.

평면의 방정식은 한 직선 위에 있지 않은 3차원 상의 세 점이 주어졌을 때 유일하게 결정된다. (t_v, t_r, A)이 각각 (100, 100, A_1), (200, 100, A_2), (100, 200, A_3)일 때 이 세 점을 지나는 평면의 방정식은 식 (19)와 같다.

$$A = \frac{(A_2 - A_1)}{100} t_v + \frac{(A_3 - A_1)}{100} t_r + 3A_1 - A_2 - A_3 \tag{19}$$

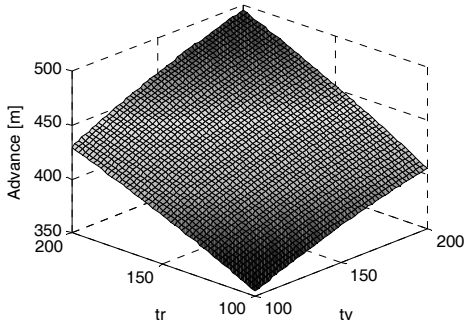


그림 6. t_v, t_r 에 대한 전진 거리 분포 예
($V_0=10\text{m/s}, V_c = 5\text{m/s}, r_c=1.75\text{deg/s}$)

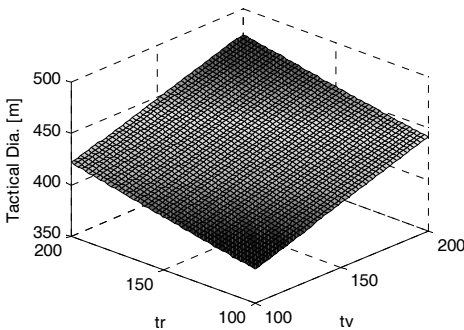


그림 7. t_v, t_r 에 대한 전술 직경 분포 예
($V_0=10\text{m/s}, V_c = 5\text{m/s}, r_c=1.75\text{deg/s}$)

같은 방법으로 세 점 $(100, 100, D_1), (200, 100, D_2), (100, 200, D_3)$ 을 지나는 평면의 방정식은 식 (20)과 같다.

$$D_T = \frac{(D_2 - D_1)}{100} t_v + \frac{(D_3 - D_1)}{100} t_r + 3D_1 - D_2 - D_3 \quad (20)$$

선회 시험에서 전진 거리 A 와 전술 직경 D_T 가 주어질 때 식 (19)와 식 (20)의 각 계수들을 결정한 후 두 식을 연립하면 t_v, t_r 을 구할 수 있다.

식 (19), (20)의 각 계수에 포함된 $A_i, D_i (i=1,2,3)$ 는 V_0, V_c, r_c 에 대한 함수이다. 반복 계산을 수행해보면 $A_i, D_i (i=1,2,3)$ 는 대체적으로 R 에 대한 1차식 형태를 보이며, 1차항 계수는 거의 일정하고 상수항은 V_0, V_c 에 대해 일정한 경향으로 조금씩 변화한다.

이는 전진 거리 A 와 전술 직경 D_T 가 정상 선회 반경 R 에 의해 지배적으로 결정되고 초기 속도나 수렴 속도 등에 관련된 나머지 작은 항에 의해 추가로 가감된다고

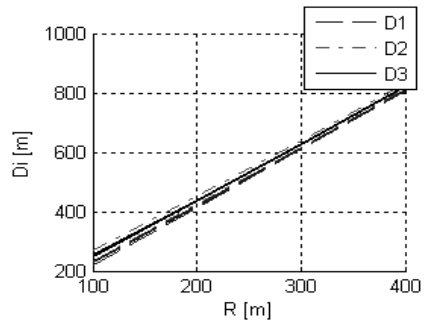
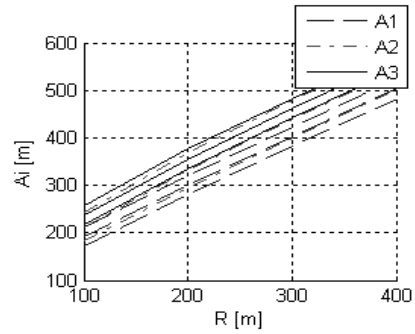


그림 8. $A_i, D_i (i=1,2,3)$ 분포
($V_c=6\text{m/s}$ and $V_0=8\text{m/s}$ (lower), 10m/s (middle), 12m/s (upper) 일 경우)

볼 수 있다. 마치 테일러 급수 전개를 할 때 1차 선형항이 지배적이고 나머지 비선형항이 작은 비중으로 추가적인 정밀도에 기여하는 것에 비유할 수 있다.

$A_i, D_i (i=1,2,3)$ 의 분포 예로 그림 8은 수렴 속도 $V_c = 6\text{m/s}$ 로 고정되어 있을 때, 초기 속도 V_0 를 8, 10, 12m/s로 설정할 경우 정상 선회 반경 R 의 변화에 대한 $A_i, D_i (i=1,2,3)$ 의 분포이다. 또한 그림 9는 초기 속도 $V_0 = 10\text{m/s}$ 로 고정되어 있을 때, 수렴 속도 V_c 를 4, 6, 8m/s로 설정할 경우 R 에 대한 $A_i, D_i (i=1,2,3)$ 의 분포이다. 초기 속도와 수렴 속도가 커질수록 A_i, D_i 함수식의 상수항은 증가하지만 1차항 계수는 거의 일정하다는 것을 확인할 수 있다. 수식화하면 식 (21)과 같다.

$$A_i = \alpha_i R + \beta_i \quad (21)$$

$$D_i = \gamma_i R + \delta_i \quad (i=1,2,3)$$

$\alpha_i, \gamma_i = \text{constant},$
 $\beta_i, \delta_i = \text{function of } V_0, V_c$

그림 8, 그림 9 등의 그래프에서 식 (21)의 각 1차항 계수를 구하면 표 4와 같다.

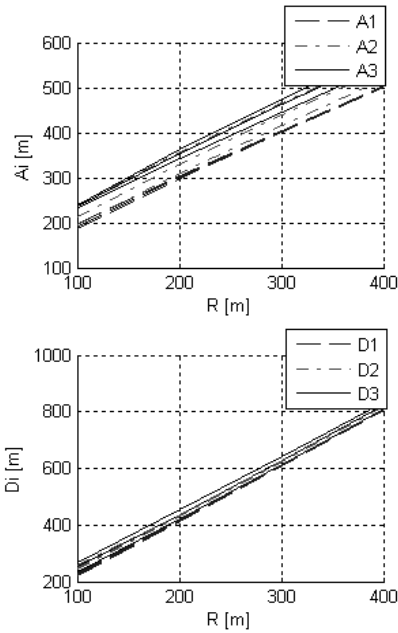


그림 9. A_i, D_i ($i=1,2,3$) 분포 ($V_0=10\text{m/s}$ and $V_c=4\text{m/s}$ (lower), 6m/s (middle), 8m/s (upper) 일 경우)

표 4. 식 (21)의 1차항 계수 값

α_1	α_2	α_3
1.127	1.290	1.227
γ_1	γ_2	γ_3
1.862	1.863	1.847

그림 8과 9에서 상수항 β_i, δ_i ($i=1,2,3$)는 V_0 와 V_c 가 증가할 때 대체적으로 비례하여 증가한다. 따라서 β_i, δ_i ($i=1,2,3$)를 V_0 와 V_c 의 일차식의 합으로 가정할 수 있다. 수식으로 나타내면 식 (22)와 같으며 각 계수들을 구하여 표 5에 정리하였다.

$$\begin{aligned} \beta_i &= a_i V_0 + b_i V_c + c_i, \\ \delta_i &= d_i V_0 + e_i V_c + f_i \quad (i = 1, 2, 3) \end{aligned} \quad (22)$$

결국 식 (21), (22)와 표 4, 5로부터 A_i, D_i ($i=1,2,3$)를 구하여 식 (19), (20)의 우변 계수들에 대입하고 좌변의 A, D_T 는 선회 시험 정보에서 직접 얻은 후 두 식을 연립하면 t_v, t_r 을 도출할 수 있다. 단, 표 4, 5의 계수들은 초기 속도가 10m/s 내외이고 정상 선회 반경이 100~

표 5. 식 (22)의 계수 값

a_1	a_2	a_3
16.458	22.679	18.306
b_1	b_2	b_3
-6.892	-17.797	-1.369
c_1	c_2	c_3
27.508	39.276	36.882
d_1	d_2	d_3
7.401	16.491	5.918
e_1	e_2	e_3
3.595	-9.117	12.310
f_1	f_2	f_3
-8.297	13.326	-0.054

표 6. 모델링에 필요한 실선 선회 정보

V_0	V_c	δ
0.8 m/s	0.6 m/s	35°
A	D_T	R
10.80 m	14.25 m	6.84 m

표 7. 전진 속도-선회율 모델의 각 계수 값

T_v	V_d	T	K
21.927	0.600	2.897	0.144

400m 정도인 경우이므로 이를 벗어나는 선박을 대상으로 할 경우 새로운 계수 도출이 필요하다.

마지막으로 식 (18)에 의해 t_v, t_r 로부터 전진 속도-선회율 모델 내의 시정수 T_v, T 를 결정한다.

4.3 전진 속도-선회율 모델의 검증

제안된 모델의 실효성을 검증하기 위해 실선 선회 시험 자료와 모델링에 의한 계산 결과를 비교하기로 한다. 4.1절에서 실선 선회 자료의 예로 들었던 그림 4(貴島 勝郎 등, 1987)에서 모델링에 필요한 정보를 취하면 표 6과 같다.

표 6의 정보를 바탕으로 4.2절에서 제안한 전진 속도-선회율 모델의 계수 추정법에 따라 계수를 추출하면 표 7과 같다.

계수를 결정한 후 전진 속도-선회율 모델을 풀어서 선회 궤적을 시뮬레이션 할 수 있으며 이를 원래 실선 선회

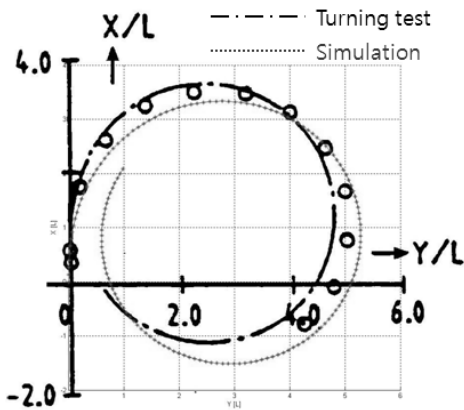


그림 10. 실선 시험 결과와 시뮬레이션 결과의 비교

표 8. 시뮬레이션에 의한 선회 궤적 결과

A	D_T	R
10.03 m	15.81 m	6.84 m

궤적과 한 그래프에 도시화하면 그림 10과 같다. 그래프의 X, Y 좌표는 대상선의 길이로 무차원화 하였다.

시뮬레이션으로 구한 궤적의 전진 거리, 전술 직경, 정상 선회 반경을 표 8처럼 수치적으로 정리할 수 있다.

그림 10에서 실선의 선회 궤적과 시뮬레이션으로 구한 선회 궤적이 상당히 유사한 것을 알 수 있으며, 표 6과 표 8을 비교하여 전진 거리 및 전술 직경의 오차를 계산하면 전진 거리는 7.1%, 전술 직경은 10.9%이다. 전진 속도 및 선회율을 변화를 1차 미분방정식의 해로 단순히 근사한 것과 계수 추정 과정에서 상승 시간에 대한 전진 거리 및 전술 직경의 분포를 완전한 평면으로 가정한 것 등이 오차 발생의 요인이다.

5. 결 론

본 논문에서는 선회각, 선회율, 전진속도 등에 대한 1차 미분방정식 모델을 이용하여 다중 선박의 실시간 조종 시뮬레이션을 위한 모델링 방법을 제안하였다.

전진 속도가 일정하다고 가정하고 대상선의 선회 직경 정보만 주어질 경우 선회각, 또는 선회율 모델 내의 계수를 결정하는 방법을 정립하였다. 선회율 모델링 과정에서는 Nomoto의 KT모델을 일부 인용하였다.

실제로 선박이 타각을 변경하여 선회할 때는 전진 속도가 변화한다. 따라서 선회율 모델에 전진 속도 모델을

추가하여 전진 속도의 변화를 고려할 수 있는 전진 속도-선회율 모델을 제안하였다. 대상선의 선회 시험에서 초기 속도 및 수렴 속도, 명령 타각이 주어지고, 선회 궤적을 통해 전진 길이, 전술 직경, 정상 선회 반경을 얻었다고 가정할 때 전진 속도-선회율 모델의 각 계수들을 결정할 수 있는 추정식을 수학적으로 전개하고, 실선 시험 자료를 이용하여 모델의 유용성을 검증하였다.

본 연구에서는 명령 타각이 일정할 때 시간에 대한 전진 속도와 선회율 변화를 1차 미분방정식의 해 형태로 가정하였다. 따라서 실선 시험이나 상세 시뮬레이션 등에 의한 결과를 완벽하게 재현하기에는 한계가 있다. 그러나 대상선의 거동을 근사적으로 구현하며 빠른 계산 및 처리가 필요한 조종 시뮬레이션에는 유용하게 사용될 수 있다고 판단된다.

추후에는 Zig-Zag 실선 시험 정보 등을 이용하여 명령 타각이 시간에 대해 변하는 경우 대상선의 궤적을 유사하게 재현할 수 있는 모델링 관련 연구가 필요할 것이다.

후 기

본 연구는 LIG넥스원 과제 ‘수상수중 무기체계 기동모델 개발’과 관련하여 수행되었으며, LIG넥스원, 서울대학교 BK21해양기술인력양성사업단 및 해양시스템공학연구소(RIMSE), 그리고 공동 연구를 수행한 한국해양연구원 해양시스템안전연구소의 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김동환, 신지환, 김찬기, “교전수준 잠수함 표준모델 개발 방안 연구,” *한국시뮬레이션학회 논문지*, 16(4), pp. 1-12, 2007년.
2. 손경호, 이성욱, “PC를 이용한 선박 조종 시뮬레이터의 개발에 관한 연구,” *해양안전학회지*, 4(2), pp. 25-33, 1998년.
3. 신지환, “교전수준 어뢰체계 표준모델 개발 방안 연구,” *한국시뮬레이션학회 논문지*, 16(3), pp. 19-28, 2007년.
4. 이상민, 조상희, “선박조종시뮬레이터를 활용한 예부선의 유체력 간섭 특성에 관한 연구,” *해양환경안전학회지*, 15(1), pp. 57-62, 2009년.
5. Fossen, T. I., *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Wiley & Sons, 1994.
6. Lewis, E. V., *Principles of Naval Architects Volume III -Motions in Waves and Controllability*, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1989.
7. 윤현규, “FFX-1 전장환경에서 탐지체계 모델링 기법 연구

- (1차년도 중간보고서),” *국방과학연구소 기술보고서*, 2007년.
8. 윤현규, “FFX-1 전장환경에서 탐지체계 모델링 기법 연구 (2차년도 중간보고서),” *국방과학연구소 기술보고서*, 2008년.
 9. 양승렬, 손경호, 이희용, 하문근, 김현수, 이진호, 임남균, “선박 접이안 조종 시뮬레이터 개발에 관한 연구,” *대한조선학회 추계학술대회 논문집*, pp. 57-62, 2004년.
 10. 이규동, 임정빈, 정중식, 박성현, 김창경, 심영호, 최기영, “PC 기반 가상현실 선박조종 시뮬레이터,” *해양환경안전학회 추계학술발표회 논문집*, pp. 53-57, 2003년.
 11. 貴島 勝郎, 芳村 康男, 深澤 塔一, “浅水域および低速時における操縦特性,” *運動性能研究委員会・第4回シンポジウム*, pp. 133-189, 1987.



김 동 진 (kdj8277@snu.ac.kr)

2005 서울대학교 조선해양공학과 학사
2005~현재 서울대학교 조선해양공학과 석박통합과정

관심분야 : 모델링&시뮬레이션, 고속선, 선박 내항성능



여 동 진 (lonepier@moeri.re.kr)

1997 서울대학교 조선해양공학과 학사
1999 서울대학교 조선해양공학과 석사
2005 서울대학교 조선해양공학과 박사
2005~현재 한국해양연구원 해양시스템안전연구소 선임연구원

관심분야 : 수중운동체, 선박 조종성능, 모델링&시뮬레이션



이 기 표 (kprhee@snu.ac.kr)

1972 서울대학교 조선해양공학과 학사
1974 서울대학교 조선해양공학과 석사
1977 서울대학교 조선해양공학과 박사
1978~1983 서울대학교 조선해양공학과 조교수
1983~1988 서울대학교 조선해양공학과 부교수
1988~현재 서울대학교 조선해양공학과 교수

관심분야 : 선박 내항 및 조종성능, 모델링&시뮬레이션