

# 해석적 방법에 의한 선박 시뮬레이터용 단순 조종 모델 개발

김동진<sup>1,†</sup> · 여동진<sup>2</sup> · 이기표<sup>1</sup>  
서울대학교 조선해양공학과<sup>1</sup>  
한국해양연구원 해양시스템안전연구소<sup>2</sup>

## Development of a Simple Manoeuvring Model for Ship-handling Simulator by Analytical Methods

Dong-Jin Kim<sup>1,†</sup> · Dong-Jin Yeo<sup>2</sup> · Key-Pyo Rhee<sup>1</sup>  
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University<sup>1</sup>  
Maritime & Ocean Engineering Research Institute, KORDI<sup>2</sup>

### Abstract

In the ship-handling simulator, it is important for a ship manoeuvring model to represent the dynamic characteristic of a ship and to be simple for reducing calculation time. Especially, even if principal dimensions of a ship are given in initial design stage, or manoeuvring test data are only given by model or real ship's trials, simulations are often needed to check the manoeuvrability of a ship. In this paper, a simple manoeuvring model based on turning test data of a ship is mathematically developed. And the simulation results are verified by comparing with turning test results of a real ship.

**Keywords** : Ship-handling Simulator(선박 운항 시뮬레이터), Simple manoeuvring model(단순 조종 모델), Turning test(선회 시험)

## 1. 서론

선박 운항 시뮬레이터는 대상 선박의 항행 시나리오 재현을 통한 운항 안전성 검증, 혹은 전술 시험 및 훈련 등에 주로 이용된다. 이러한 운항 시뮬레이터는 가능한 한 선박의 움직임을 현실적으로 재현할 수 있어야 하며, 실시간 정보 처리 및 가시화를 위해 계산 시간 단축이 필수적이다. 따라서 내부의 모델은 대상 선박의 동역학 특성을 잘 반영하면서 동시에 단순하여야 한다.

대상선의 모형 시험 결과나 CFD 계산 결과가 주어져 있으면 선형 및 비선형 계수를 모두 구한 후 상세 비선형 모델을 완성하여 시뮬레이션을 실시할 수 있다. 하지만 일반적으로 초기 설계 단계에서 대상선의 주요 제원만 주어진 경우, 혹은 모형선이나 실선 조종 시험 결과만 주어진 상황에서 시뮬레이션이 필요한 경우도 많다. 이와 같이 대상 선박의 정보가 적은 상황에서도 조종 성능을 예측할 수 있는 경량화 모델이 필요하다.

단순 조종 모델에 관한 이전 연구를 보면 Nomoto, et al.(1957)에 의해 K-T모델이 제안되었고, Suh and Song(1994), Lee and Lee(1998) 등에 의해 K-T모델의 분석 및 활용이 이루어졌다. Norrbin(1965), Van Leeuwen(1970) 등은 K-T모델에 비선형 항 및 속도 변화 식을 추가하여 현실성을 높이는 연구를 수행하였다.

최근에 Yoon, et al.(2007)은 RIB형 무인 선박에 대한 수평면 조종운동 간략 모델을 제안하였다. Kim, et al.(2010)은 근사적 방법에 의한 선박의 전진속도-선회율 모델링 연구를 수행한 바 있다.

본 연구에서는 대상선의 선회 시험 정보만을 이용한 단순 조종 모델링 기법을 제안하였다. 전진 속도와 선회율을 1차 미분방정식의 해 형태로 가정하고 모델 내의 계수를 결정하는 방법을 수학적으로 전개하였다. 실선 선회 시험 정보가 주어졌을 때 제안한 모델로 선회 시뮬레이션을 수행하고 결과를 비교하여 제안한 모델의 신뢰도를 검증하였다.

## 2. 선회 시험 정보

대상 선박의 조종 성능을 판별하기 위해 일반적으로 선회 시험(Turning test)을 실시한다. 선박이 일정한 속도로 전진하다가 명령 타각이 입력되면 Fig. 1과 같은 선회 궤적을 그리게 된다. 선회 궤적 결과를 통해 전진거리(Advance), 전술직경(Tactical diameter), 정상선회반경(Steady turning radius) 등의 정보를 얻을 수 있다.

본 연구에서 제안한 단순 조종 모델 내의 계수는 대상선의 선회 시험 정보를 통해 추정하게 되며, 필요한 정보를 정리하면 Table 1과 같다.

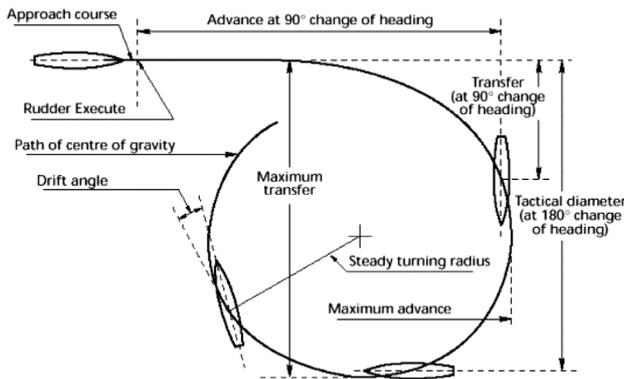


Fig. 1 Turning trajectory of a ship

Table 1 Main data of turning test

정보	기호	단위
초기속도	$V_0$	m/s
수렴속도	$V_d$	m/s
명령타각	$\delta$	rad
전진거리	$A$	m
전술직경	$D$	m
정상선회반경	$R$	m

만약 대상 선박이 초기 설계 단계라면 주요 제원을 바탕으로 부록의 식 (17)-(20)을 통해 선회 시험 정보를 추정할 수 있고, 모형선이나 실선의 선회 시험 결과가 주어져 있다면 직접 정보를 추출하여 모델링에 이용한다.

### 3. 선회율-전진속도 모델(R&S 모델)

#### 3.1 기존 모델의 특성 및 한계

Nomoto, et al.(1957)는 sway 및 yaw 선형 운동 방정식을 연성하여 식 (1)과 같은 K-T모델을 제안하였다. 식 (1)에서 변수  $r$ 은 선회율이다. 계수  $K$ 와  $T$ 는 대상선의 선회 시험이나 지그재그 시험 결과, 혹은 유체력 미계수들의 조합으로 얻을 수 있다.

$$T\dot{r} + r = K\delta \tag{1}$$

Norrbin(1965)는 식 (2)와 같이 타각 입력에 대한 선회율의 비선형적 변화를 고려하기 위해  $r^3$ 항을 추가한 식을 제안하였다.

$$T\dot{r} + r + \alpha r^3 = K\delta \tag{2}$$

Van Leeuwen(1970)은 Norrbin(1965)의 모델에 식 (3)과 같은 전진속도 방정식을 추가하여 속도 변화를 구현하였다.

$$T_V\dot{V} + V = K_V r^2 \tag{3}$$

이와 같이 기존의 단순 조종 모델은 속도 변화를 고려하지 않

거나, 혹은 계수를 결정하는 과정에서 유체력 미계수 등 많은 정보를 필요로 한다. 따라서 최소한의 정보로 현실적인 시뮬레이션이 가능한 단순 모델이 필요하다.

#### 3.2 R&S 모델

식 (1)의 K-T모델은 선회율  $r$ 이 1차 미분방정식의 해 형태이다. Yoon, et al.(2007)의 연구를 참고하여 전진속도 역시 1차 미분방정식의 해라고 가정 후 전진속도에 대한 식을 추가하면 식 (4)와 같다.

$$T_V\dot{V} + V = V_d \tag{4}$$

$$T\dot{r} + r = K\delta$$

식 (4)에서 입력 변수는 타각  $\delta$ 이고, 상태 변수는 전진속도  $V$ , 선회율  $r$ 이다.  $T_V$ ,  $T$ 는 각각 전진속도 및 선회율에 대한 시정수이며  $V_d$ 는 수렴 속도,  $K$ 는 선회 모멘트 관련 계수이다. 위의 모델을 R&S모델(Rate of turn & Speed model)이라고 명명하기로 한다.

선박의 길이  $L$ 과 초기 속도  $V_0$ 로 모델의 무차원화를 수행하면 식 (5)와 같다.

$$T_V'\dot{V}' + V' = V_d'$$

$$T'r' + r' = K'\delta'$$

$$V' = V/V_0, \quad r' = r \cdot L/V_0, \tag{5}$$

$$T_V' = T_V \cdot V_0/L, \quad T' = T \cdot V_0/L,$$

$$K' = K \cdot L/V_0, \quad \delta' = \delta, \quad t' = t \cdot V_0/L$$

이하에서는 편의상 무차원화 표기 '을 생략한다. 초기값  $V(0)=V_0$ ,  $r(0)=0$ 를 고려하면 속도 및 선회율의 해석 해는 식 (6)과 같다.

$$V(t) = (V_0 - V_d)e^{-\frac{t}{T_V}} + V_d \tag{6}$$

$$r(t) = K\delta(1 - e^{-\frac{t}{T}})$$

식 (6)을  $0 \leq t \leq t_f$  구간에서 시간에 대해 적분하면 임의의 시간  $t=t_f$ 일 때 선수각 및 XY 좌표를 구할 수 있다. 이는 식 (7)-(9)와 같다.

$$\Psi_f = \int_0^{t_f} r(t)dt = \int_0^{t_f} [K\delta(1 - e^{-\frac{t}{T}})]dt \tag{7}$$

$$= K\delta(t_f + Te^{-\frac{t_f}{T}} - T)$$

$$X_f = \int_0^{t_f} V(t) \cos(\Psi(t)) dt \quad (8)$$

$$= \int_0^{t_f} [(V_0 - V_d) e^{-\frac{t}{T_v} + V_d} \cdot \cos(K\delta \cdot (t + T_e^{-\frac{t}{T}} - T))] dt$$

$$Y_f = \int_0^{t_f} V(t) \sin(\Psi(t)) dt \quad (9)$$

$$= \int_0^{t_f} [(V_0 - V_d) e^{-\frac{t}{T_v} + V_d} \cdot \sin(K\delta \cdot (t + T_e^{-\frac{t}{T}} - T))] dt$$

### 4. R&S 모델의 계수 추정법

#### 4.1 계수 $V_d, K$ 추정법

수령 속도  $V_d$ 는 선회 시험 정보에서 이미 주어지거나, 혹은 부록의 식 (20)과 같이 선박 길이와 전술 직경에 대한 추정식에서 얻을 수 있다.

선회 모멘트 관련 계수  $K$ 는 다음과 같이 계산할 수 있다. 우선 정상 선회 시에는  $\dot{r}=0$ 이므로 식 (10)이 성립한다.  $r_d$ 는 정상 선회 단계에서 선회율의 수령 값이다.

$$r_d = K\delta \quad (10)$$

한편 정상 선회 단계에서 속도와 선회율이 일정하고 궤적이 완전한 원이라고 가정하면 식 (11)이 성립한다.

$$r_d = \frac{V_d}{R} \quad (11)$$

따라서 식 (10), (11)에 의해 계수  $K$ 는 식 (12)와 같이 결정된다.

$$K = \frac{V_d}{R\delta} \quad (12)$$

#### 4.2 계수 $T_v, T$ 추정법

R&S모델의 계수  $T_v, T$ 는 Fig. 2와 같은 과정으로 반복 계산을 통해 구한다.

우선 계수  $T$ 를 가정한 후 식 (7)에서 선수각이  $90^\circ$ 와  $180^\circ$ 가 되는, 즉 전진거리와 전술직경에 각각 도달하는 데에 필요한 시간  $t_A$ 와  $t_D$ 를 구한다. 식 (8)에서 좌변은 선회 시험으로부터 주어진 전진거리이며 우변은  $0 \leq t \leq t_A$  구간에서 적분을 수행한다.  $T$ 는 가정하였지만  $T_v$ 는 아직 미지수이므로  $T_v$ 에 대한 적분 방정식이 된다. 방정식을 풀어 얻은  $T_v$ 를  $T_{vA}$ 라고 한다. 마찬가지로 식 (9)에서는 전술직경 정보를 좌변에 대입하고 적분방정식을 풀어서  $T_{vD}$ 를 구할 수 있다.  $T_{vA} = T_{vD}$ 일 때 전진거리 및 전술직경 식을 동시에 만족하는 유일한  $T_v$ 를 얻게 되고 이 때 가정한  $T$ 도 두

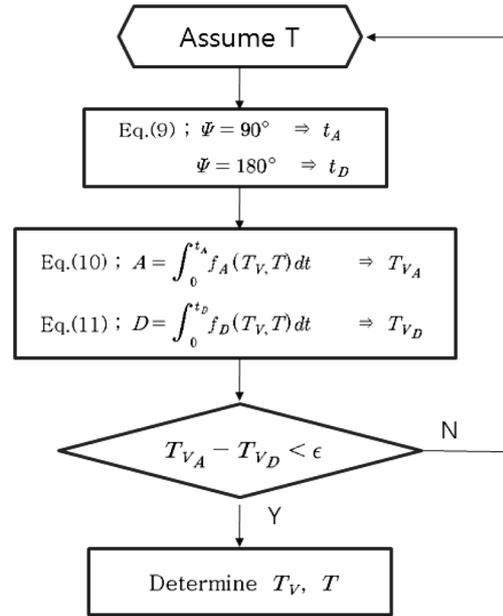


Fig. 2 Flow chart for estimating  $T_v, T$

식을 만족시키는 계수가 된다.

하지만 실제 계산을 할 때 식 (8), (9)를  $T_v$ 에 대한 적분 방정식 형태로 풀면 수식이 복잡하여, 해를 구하는데 많은 시간이 소요되며 해를 찾을 수 없는 경우도 발생한다. 따라서 다음과 같은 근사적 방법을 이용하는 것이 바람직하다.

예를 들어  $T_v=2, T=2, V_d=0.6, K=0.60$ 이고  $\delta=35^\circ$ 일 때 시간에 대한  $r$ 과 이를 시간 적분한  $\Psi$ 의 그래프는 Fig. 3과 같다.

실제 식 (8), (9)의 적분 방정식의 삼각함수 내에 들어있는  $\Psi$ 는  $t$ 에 대한 다항식과 지수식의 합으로 복잡한 형태이지만, Fig. 3의  $\Psi$  그래프를 볼 때 시간에 대한 완만한 곡선이기 때문에 몇 개의

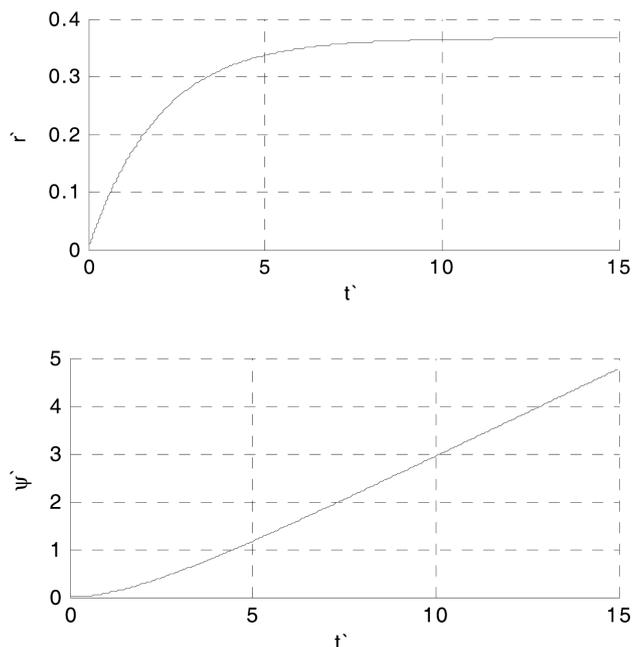


Fig. 3 Time histories of  $r'$  and  $\Psi''$

시간 구간별로 단순 1차식 근사를 하더라도 그 오차가 매우 작다고 예상할 수 있다.

Ogata(1990)에 의하면 1차 미분방정식 시스템을 라플라스 변환하였을 때 전달 함수가 식 (13)과 같다면, 단위 계단 응답(Unit step response)은 Fig. 4처럼 도시화할 수 있다.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{Ts + 1} \quad (13)$$

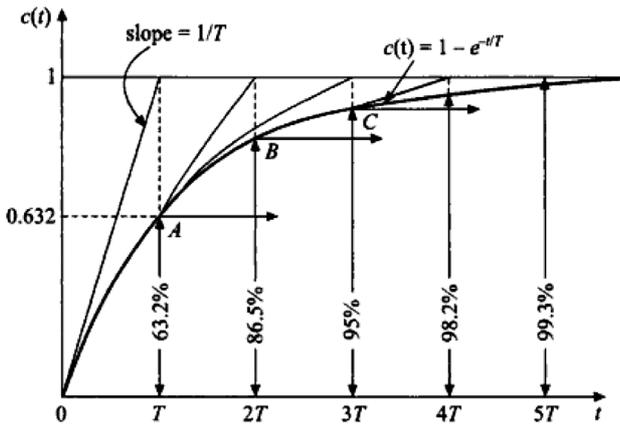


Fig. 4 Unit-step response of a first order system

Fig. 4에서  $t > 5T$ 일 경우 목표 수렴 값의 99.3% 이상이므로 거의 수렴했다고 볼 수 있다.

R&S모델의 선화율  $r$  역시 식 (13)과 같은 전달 함수를 갖는 미분방정식의 해이므로 위와 같은 형태로 최종 선화율에 수렴하며,  $r$ 을 시간 적분한  $\Psi$  역시 같은 경향으로 수렴할 것이다. 따라서  $\Psi$ 를 구간별 선형화 할 때도  $r$  관련 시정수  $T$ 를 기준으로 Fig. 4와 같이 선화 초기에 시간  $T$  간격으로  $t=5T$ 까지 다섯 구간 선형화하고 그 이후는 선형으로 근사할 수 있다. 실제 계산을 수행했을 때 초반에는  $r$ 과  $\Psi$ 의 변화가 급격하기 때문에 처음  $0 \leq t < T$  구간을  $0 \leq t < 0.5T$ ,  $0.5T \leq t < T$  두 구간으로 더 세분화하였다.

예를 들어  $T_1=2$ ,  $T_2=2$ ,  $V_d=0.6$ ,  $K=0.6$ ,  $\delta=35^\circ$ 일 때  $\Psi$ 의 해석 해와 구간별 선형 근사 직선을 비교하면 Fig. 5와 같다. 또한  $\Psi$ 의 해석 해와 구간별 선형 근사 해에 따른 선화 시뮬레이션 결과를 Fig. 6처럼 비교할 수 있다. 결론적으로  $\Psi$ 의 해석 해에 의한 선화 궤적은 구간별 선형 근사한  $\Psi$ 에 의한 궤적과 오차 1% 내외로 거의 같기 때문에  $\Psi$ 를 구간별로 선형화하여도 무리가 없다.

한 예로 Fig. 2의 과정에 따라 먼저  $T$ 를 가정하고 식 (7)로부터  $t_A$ ,  $t_D$ 를 구했을 때 가정한  $T$ 와  $t_A$ ,  $t_D$ 의 대소 관계가 식 (14)와 같다고 가정한다.

$$\begin{aligned} T < t_A < 2T \\ 3T < t_D < 4T \end{aligned} \quad (14)$$

식 (8), (9)에서 전진거리와 전술직경의 적분방정식은 식 (15), (16)처럼 전개된다.

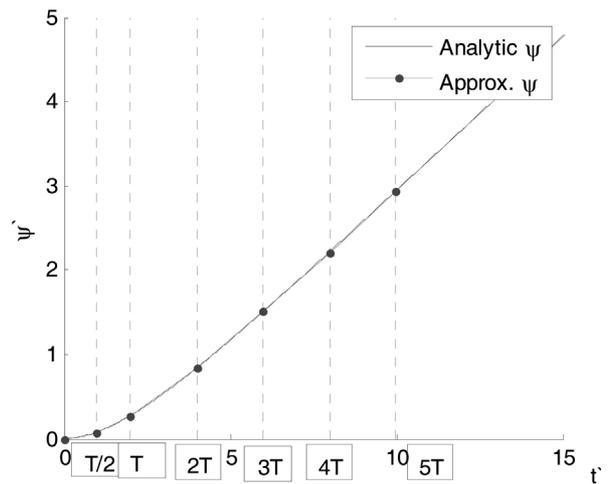


Fig. 5 Analytic and approx. value of  $\Psi$

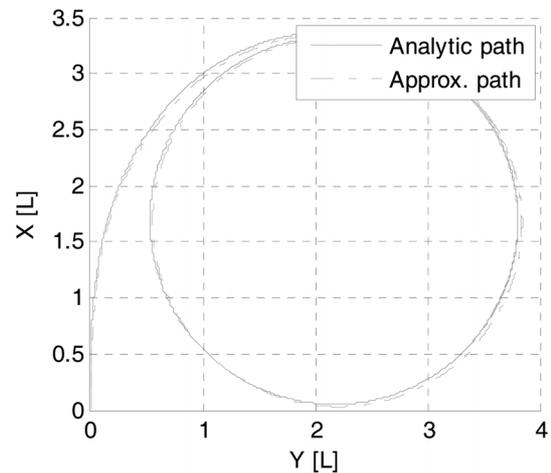


Fig. 6 Analytic and approx. path

$$\begin{aligned} A = & \int_0^{T/2} [ ((V_0 - V_d)e^{-\frac{t}{T_v}} + V_d) \cdot \cos(\alpha_1 t + \beta_1) ] dt \\ & + \int_{T/2}^T [ ((V_0 - V_d)e^{-\frac{t}{T_v}} + V_d) \cdot \cos(\alpha_2 t + \beta_2) ] dt \quad (15) \\ & + \int_T^{t_A} [ ((V_0 - V_d)e^{-\frac{t}{T_v}} + V_d) \cdot \cos(\alpha_3 t + \beta_3) ] dt \\ D = & \int_0^{T/2} [ ((V_0 - V_d)e^{-\frac{t}{T_v}} + V_d) \cdot \sin(\alpha_1 t + \beta_1) ] dt \\ & + \int_{T/2}^T [ ((V_0 - V_d)e^{-\frac{t}{T_v}} + V_d) \cdot \sin(\alpha_2 t + \beta_2) ] dt \\ & + \int_T^{2T} [ ((V_0 - V_d)e^{-\frac{t}{T_v}} + V_d) \cdot \sin(\alpha_3 t + \beta_3) ] dt \quad (16) \\ & + \int_{2T}^{3T} [ ((V_0 - V_d)e^{-\frac{t}{T_v}} + V_d) \cdot \sin(\alpha_4 t + \beta_4) ] dt \\ & + \int_{3T}^{t_D} [ ((V_0 - V_d)e^{-\frac{t}{T_v}} + V_d) \cdot \sin(\alpha_5 t + \beta_5) ] dt \end{aligned}$$

식 (15), (16)에서  $\alpha_i, \beta_i$ 는  $\Psi$ 를 구간별로  $t$ 에 대해 1차식 근사하였을 때 일차항 계수 및 상수항이다. 이와 같이 구간별로 적분을 수행하여 더해야 하는 번거로움이 있으나 적분방정식의 삼각함수 내부가 1차식으로 단순화되어 계산 프로그램으로 적분 방정식을 전개할 때 훨씬 안정적이다.

식 (15), (16)과 같은 방법으로 식을 전개하고 방정식을 풀어  $T_{V_a}, T_{V_b}$ 를 얻고 두 값의 차이가 허용 오차 이내일 경우 전진거리와 전술직경 식을 동시에 만족하는  $T_V$ 라고 결정한다. 또한 이 때 가정한  $T$  역시 두 식을 만족하는 값으로 결정할 수 있다.

### 5. R&S모델의 검증

Kijima, et al.(2003)의 연구 중에 모형선의 선회 시험 및 시뮬레이션 결과로부터 선회 정보를 발췌하면 Table 2와 같다.

선회 수렴 속도  $V_a$ 의 경우 Kijima, et al.(2003)의 연구에서처럼 선회 시험 결과에 정확히 제시되어 있으면 그 값을 그대로 사용하고, 만약 주어지지 않았을 경우 부록의 식 (20)을 사용하여 추정하는 것을 권장한다. 단, 대상선이 쌍축선박이면 Lyster and Knights(1979)의 연구를 참고하여 쌍축선박에 적용되는  $V_a$  계산 식을 사용해야 한다.

주어진 정보를 기초로 R&S모델의 계수를 구할 수 있다. 계수  $V_a'$ 는  $V_a/V_0$ 이므로 Table 2에서 바로 구하고, 계수  $K'$ 는 식 (12)를 통해 계산한다. 계수  $T_V', T$ 는 Fig. 2에서 제시된 바와 같이 식

Table 2 Kijima, et al.(2003)'s turning test results

Model Ship(L=2.5m)					
$V_0$	$V_a$	$\delta$	$A$	$D$	$R$
0.77m/s	0.39m/s	35°	7.5m	7.5m	3.1m

Table 3 Coefficients of R&S model(based on Kijima, et al.(2003)'s results)

$V_a'$	$K'$	$T_V'$	$T$
0.50	0.66	2.00	1.98

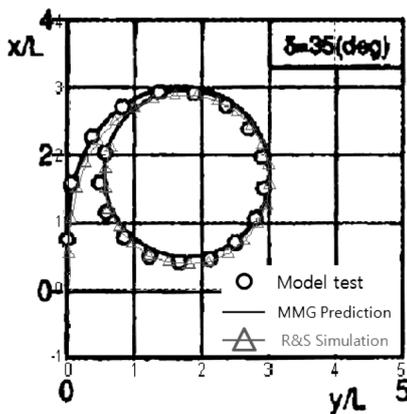


Fig. 7 Comparison of turning trajectory with Kijima, et al.(2003)'s results

(7), (8), (9)에 Table 2의 선회 시험 정보를 대입한 후 반복법을 사용하여 구한다. 최종적으로 얻은 계수는 Table 3과 같다.

Fig. 7, Fig. 8에서 R&S 모델로 구한 선회 궤적 및 전진 속도, 선회율의 시간 변화를 Kijima, et al.(2003)의 결과와 비교하였다. 주어진 선회 정보와 비교할 때 전진거리는 3.2% 감소하고, 전술직경은 1.1% 증가하여 그 오차가 작다. 속도와 선회율 역시 모델 단순화의 한계로 선회 초기에 약간의 차이를 보이나, 상승 시간 및 수렴 값이 Kijima, et al.(2003)의 결과와 상당히 유사함을 확인할 수 있다.

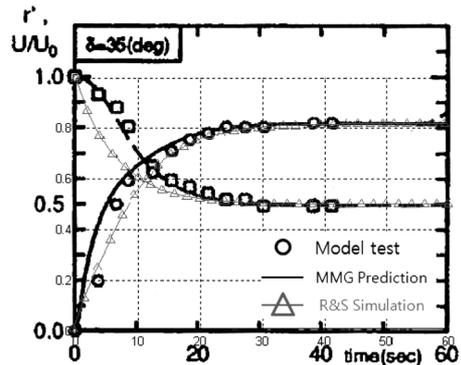


Fig. 8 Comparison of time histories of speed and rate of turn with Kijima, et al.(2003)'s results

### 6. 결론

본 연구에서는 대상선의 선회 시험 정보가 주어진 경우 선회 운동을 현실적으로 추정할 수 있는 단순 조종 모델을 제안하였다.

전진 속도와 선회율을 1차 미분방정식의 해 형태로 단순화하면 총 네 개의 계수를 포함하는 'R&S모델'이 성립된다. 대상 선박의 선회 시험에서 초기 속도, 수렴 속도, 명령 타각, 전진거리, 전술직경, 정상선회반경 정보를 추출한다면 이를 통해 모델 내의 계수를 결정할 수 있다.

전진 속도와 선회율에 대한 1차 미분방정식을 풀어 해석 해를 구할 수 있으며, 전진거리 및 전술직경이 시정수  $T_V, T$ 에 대한 함수이므로 반복 계산을 통해 식을 만족하는 시정수를 결정할 수 있다. 계산을 신속하고 안정적으로 수행할 수 있도록 선수각의 구간별 선형화 방법을 제안하였다. 한편 수렴 속도  $V_a$  및 선회 모멘트 계수  $K$ 는 주어진 선회 정보로부터 간단하게 결정할 수 있다.

실제 선박의 선회 시험 정보만을 가지고 제안한 모델로 시뮬레이션 한 후 실제 결과와 비교하였을 때 상당히 유사한 결과를 얻음으로써 R&S 모델의 정확성을 검증하였다.

본 연구에서 제안한 모델은 M&S(Modeling & Simulation) 분야에서 대상선의 모델링에 이용될 수 있다. 또한 부록에 인용한 바와 같이 주요 제원과 전진거리, 전술직경 등의 관계가 통계적으로 주어져 있다면, 선박의 초기 설계 단계에서 조종 성능을 미리 추정하는 방안이 될 수 있다. 이후 계수들의 수정 및 보완을 통해 임의의 타각 입력이 가능한 모델로의 발전이 필요하다.

## 부 록

Lyster and Knights(1979)는 선박 주요 제원에 대한 전진거리, 전술직경, 정상선회반경, 그리고 선회 시 속도 감소비 추정식을 제안하였다. 단축(single screw) 선박과 쌍축(twin screw) 선박에 대한 통계 처리를 분류하여 수행하였고, 그 중에 단축 선박에 대한 식을 인용하면 식 (17)-(20)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{2R}{L} = & 4.19 - 203 \frac{C_B}{\delta} + 47.4 \frac{Trim}{L} - 13.0 \frac{B}{L} + \frac{194}{\delta} \\ & - 35.8 \frac{SpCh}{LT_d}(ST-1) + 3.82 \frac{SpCh}{LT_d}(ST-2) \\ & + 7.79 \frac{A_B}{LT_d} + 0.70 \left( \frac{T_d}{T_L} - 1 \right) \left( \frac{\delta}{|\delta|} \right) (ST-1) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\frac{D}{L} = 0.910 \frac{2R}{L} + 0.424 \frac{V_0}{\sqrt{L}} + 0.675 \quad (18)$$

$$\frac{A}{L} = 0.519 \frac{D}{L} + 1.33 \quad (19)$$

$$\frac{V_d}{V_0} = 0.074 \frac{D}{L} + 0.149 \quad (20)$$

식 (17)-(20)에서  $R, D, A$ 는 각각 정상선회반경, 전술직경, 전진거리이고,  $V_0, V_d$ 는 각각 초기 속도, 선회 시 수렴 속도이다.  $L$ 은 수선간 길이,  $C_B$ 는 방형계수,  $\delta$ 는 타각,  $B$ 는 선폭,  $ST$ 는 선미 타입(closed stern이면 1, open water stern이면 2),  $NR$ 은 타의 개수,  $T_d$ 는 선회 시 흘수,  $T_L$ 은 설계 흘수,  $Sp$ 는 타의 스펠길이,  $Ch$ 는 타의 코드길이이다.  $A_B$ 는 대상선의 측면도에서 F.P.(forward perpendicular) 앞쪽 선수부의 흘수 아래 면적을 나타낸다. F.P.를 기준으로 선수가 앞쪽으로 돌출되어 있으면 양이고, F.P.보다 선수가 뒤쪽에 있으면 비어있는 면적을  $A_B$ 로 하며 부호는 음이다.

Table 4 Dimension ranges of single screw ships(Lyster and Knights(1979))

Parameter	Single screw	
	Minimum	Maximum
$L$ (ft) ( $L_{pp}$ )	180	1080
$C_B$	0.56	0.87
$\delta$ (deg)	10	45
$B/L$	0.11	0.18
$T_{rim}/L$	0	0.05
$Sp \cdot Ch/(LT_d)$	0.01	0.04
$A_B/(LT_d)$	-0.11	0.04
$V_0/\sqrt{L}$	0.2	1.0
$T_d/T_L$	0.5	1.0

예를 들어 구상 선수는  $A_B$ 가 대부분 양이고 경사 선수(raked stem)는 음의 값을 가진다. 모든 변수들의 길이 단위는 feet, 속도 단위는 knots를 사용하였다.

통계 처리에 사용된 단축 선박 제원의 범위를 Table 4에 정리하였다.

## 후 기

본 연구의 일부는 서울대학교 BK21해양기술인력양성사업단 및 해양시스템공학연구소(RIMSE)의 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- Kijima, K. & Nakiri, Y., 2003. On the Practical Prediction Method for Ship Manoeuvring Characteristics. Proceedings of MARSIM '03.
- Kim, D.J. Yeo, D.J. & Rhee, K.P., 2010. Development of Simple Dynamic Models for Ship Manoeuvring Simulation. *Journal of the Korea Society for Simulation*, 19(3), pp.17-25.
- Lee, S.K. & Lee S.J., 1998. Evaluation of Course-keeping Quality of a Ship by Zig-Zag Test. *Journal of the Society of Naval Architecture of Korea*, 35(1), pp.54-60.
- Lyster, C.A. & Knights, H.L., 1979. *Prediction Equations for Ship's Turning Circles*. Transactions of North East Coast Institution of Engineers and Shipbuilders, pp.217-232.
- Nomoto, K, Taguchi, T. Honda, K. & Hirano, S., 1957. *On the Steering Qualities of Ships*. *International Shipbuilding Progress*, 4(35), pp.354-370.
- Norrbin, N., 1965. *Zig-zag Test Technique and Analysis with Preliminary Statistical Results*. SSPA Allmann Report, 12.
- Ogata, K., 1990. *Modern Control Engineering*. Prentice-Hall, Inc., USA, pp.254-257.
- Suh, S.H. & Song, Y.G., 1994. Study on the Control Algorithms for the Auto-Pilot System. *Journal of the Society of Naval Architecture of Korea*, 31(2), pp.38-44.
- Van Leeuwen, G., 1970. *A Simplified Non-linear Model of a Manoeuvring Ship*. Report No.262, Shipbuilding Laboratory, University of Tech. Delft.
- Yoon, H. K. et al., 2007. A Simplified Horizontal Maneuvering Model of a RIB-Type Target Ship. *Journal of the Society of Naval Architecture of Korea*, 44(6), pp.572-578.

