

# 모바일하버의 조종운동 수학적모델 구축 및 조종 시뮬레이션 개발에 관한 연구

정재훈† · 이승건\* · 이창훈\*\*

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

## A Study on the Development of Maneuvering Mathematical Model and Maneuvering Simulation for a Mobile Harbor

Jae-Hun Jeong† · Seung-Keon Lee\* · Chang-Hoon Lee\*\*

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

**요 약** : 세계 컨테이너 물동량의 증가와 컨테이너선의 대형화로 인해 선박과 수심이 얇은 항구 및 부두를 연결하는 새로운 개념의 해상 운송 수단이 요구되어 왔다. 본 연구에서는 모바일하버 선형과 함께, Azipod 추진기 및 선수 스러스터(Bow thruster) 등으로 구성된 모바일하버의 조종수학적모델을 구축하였다. 그리고 선체 유체력 및 Azipod 추력 등을 평가·적용하여 조종운동 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과, 모바일하버의 조종운동 시뮬레이션에 의한 선회성능과 조종제어범위를 사전에 예측할 수 있었다. 또한, 모바일하버의 직진 시험 및 선회성능 시험에 있어 양호한 결과를 얻었으며, 접안 시 Azipod 추진기와 선수 스러스터를 이용한 최적의 조종운동 시뮬레이션을 확립하였다.

**핵심용어** : 조종운동 수학적모델, Azipod 추진기, 선수 스러스터, 선회성능 시험, 조종운동 시뮬레이션

**Abstract** : Mathematical model of maneuvering motion for a Mobile Harbor is established and versatile applications to the special situations of maneuvering are attempted. The Mobile Harbor in this research has twin Azipod thruster and twin bow thruster. In order to predict the maneuverability of Mobile Harbor, a mathematical model was developed on the basis of MMG model, and some model test results were adopted for the simulation of Mobile Harbor. As a result, the turning motions of the Mobile Harbor were successfully calculated, and the optimal berthing system was completed.

**Key words** : Mathematical model, Azipod thruster, Bow thruster, Turning test, Maneuvering simulation

## 1. 서 론

모바일 하버(Mobile harbor, 이하 MH)는 바다에 정박해 있는 선박의 화물을 실어 나르는 소위 “움직이는 항구”의 개념으로 고안된 해상 운송 수단이다. 일반적으로 컨테이너를 하역하기 위해서는 초대형 컨테이너 선박에의 안전한 접안이 요구되어진다. 이에 따라, 대상선박인 초대형 컨테이너선과 MH 상호간의 접안 및 Docking 시 조종운동 및 접안 시뮬레이션이 요구된다.

MH와 같은 운동체는 비용절감의 차원에서 초기 설계 단계에서부터 선박 운동체로서 기본 성능을 만족하는가에 대한 시뮬레이션이 필수이다. 또한 일반적으로 선박에서 중요한 유체역학적 성능 중 하나인 조종성능 예측은 경제적이고 안전한 운항에 필수적이며, 그 결과들은 선박의 초기 설계 단계에서 반드시 반영되어야만 한다. 그 예로서 선형의 무차원화된 유체력 미계수를 구한 후 조종운동 시뮬레이션에 의한 조종성능

평가가 가능하다. 이와 같이 MH가 건조 이전 단계에서 선박의 조종성능을 추정해 봄으로써 상당한 비용절감의 효과를 가질 수 있게 되며 또한 시뮬레이션 과정을 통하여 여러 가지 대안에 대한 검증도 가능하게 된다.

따라서, 본 연구는 모바일하버의 선형과 함께 Azipod 추진기 및 선수 스러스터 등으로 구성하여 이에 대한 조종수학적모델을 구축하고자 하였다. 그리고 유체력 및 추력을 평가·적용한 후 모바일하버의 조종성능 평가 시스템 확립과 동시에 이를 이용한 조종운동 시뮬레이션 개발을 수행하고자 하였다.

## 2. 조종운동 수학적모델

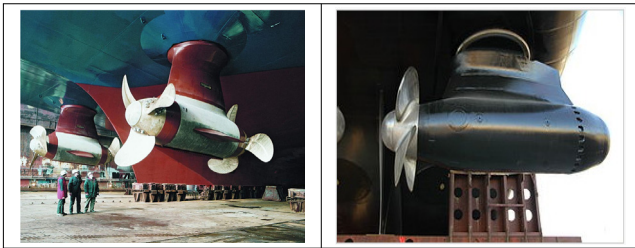
### 2.1 Azipod 시스템

Azipod 추진기는 타가 필요없이 전방위로 회전할 수 있는 Pod 형태의 프로펠러 형상을 의미한다. 이것은 고정된 프로펠

† 교신저자 : 연회원, wave0120@pusan.ac.kr 051)510-2755  
\* 종신회원, leesk@pusan.ac.kr 051)510-2441  
\*\* 연회원, huni206@pusan.ac.kr 051)510-2755

리와 타 시스템보다 더욱 뛰어난 조종성능을 가지고 있으며 주로 고속여객선에 이용된다. 특히 가장 큰 장점은 전기적인 효율이 높고, 선박 공간 활용도도 뛰어나며 유지비용이 적게 드는 점이다. 또한, Azipod 추진기를 가지는 선박은 협수로 또는 항행위험요소가 상당히 존재하는 수역에서는 예인선(Tug Boat)이 필요하지만, 일반적으로 부두 접안시에는 예인선의 도움없이 자유로운 조종과 안전한 접안이 가능한 것으로 알려져 있다.

Azipod는 쉽게 움직일 수 있는 Pod와 결합하여 전기적으로 운용되는 프로펠러로 구성된 수중 추진기이다. Pod의 프로펠러는 마치 견인되어 가는 형상과 같지만 보통 전방을 향하고 있고 다른 프로펠러보다도 더욱 효율적이다. 장착된 축 둘레로 회전할 수 있기 때문에 Pod는 360°로 추력을 이용할 수 있다. 그리고 Azipod 추진기는 선박들이 진진하는 것과 같이 쉽게 뒤로도 운항할 수 있게 하며 매우 뛰어난 조종성을 부여한다.



또한, Azipod는 Shaft와 엔진의 간편한 설치와 소음과 진동에 탁월한 기능을 가지는 장점이 있다. 더욱이, 항구에서 저속시 조종성능은 매우 뛰어나며, 크루저선, 쇄빙선 그리고 극지선박 등에 적용되어 오고 있다.

본 연구에서는, 모바일하버에 Azipod 시스템을 적용하여 Twin Azipod 형태를 구성하였으며 모바일하버의 조종성능을 예측하기 위해 개발되었다. 그리고 프로펠러 추력은 프로펠러 단독시험(Propeller Open Water Test) 단독 실험에 의한 결과(Tanaka, 2009)를 활용하였다.

2.2 좌표계와 운동방정식

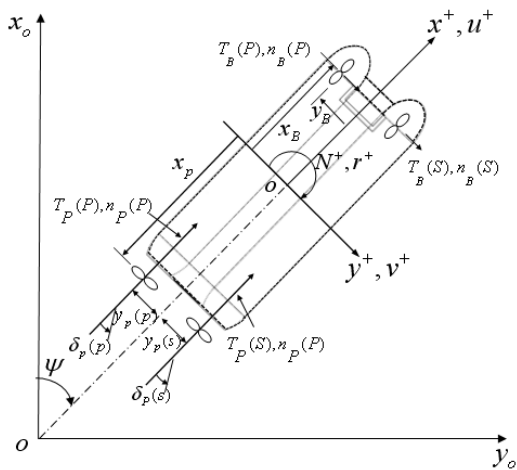


Fig. 1 Coordinate system

Fig. 1은 선박에 적용된 좌표계로,  $O-x_0, y_0$ 는 공간 좌표계이고  $O-x, y$ 는 선체중심고정 좌표계로써 우수계로 적용되었다. 여기서  $u$ 는 Surge 방향의 속도,  $v$ 는 Sway 방향의 속도이다.  $N, r$ 과  $\psi$ 는 각각 Yaw 방향의 좌표, 각속도와 회두각이며  $\delta$ 는 Pod 각을 나타낸다. 또한,  $T, n$ 은 추력과 프로펠러회전수를 각각 나타내며, 팔호속의 P와 S는 각각 좌현(Port)과 우현(Starboard) 그리고 아래첨자 P와 B는 Azipod 추진기의 선미 프로펠러(Propeller)와 선수 스러스터(Bow thruster)를 각기 의미한다.

본 연구에 사용된 선박의 제원은 Table 1과 같다.

Table 1 Particulars of Mobile Harbor

ITEMS	DIMENSIONS
Length, Overall	77.17M
LBP	70.00M
Breadth	31.00M
Breadth of Side Hull	11.00M
Depth	10.50M
Draft	5.50M
Displacement	7,124Ton
Deadweight	4,258Ton
Container Capacity	252TEU
Design Speed	8.0Knots
Propulsion System	- Stern Azimuth Propeller(2sets) - Bow thruster(2sets)
Endurance	100 N.M
Hull Form	Catamaran

이를 바탕으로 선박의 운동방정식은 3자유도 운동방정식을 사용하였으며 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 m(\dot{u}-vr) &= X & (1) \\
 m(\dot{v}+ur) &= Y \\
 I_{zz}\dot{r} &= N
 \end{aligned}$$

여기서  $m$ 은 선체의 질량이고,  $I_{zz}$ 는  $z$ 축의 질량관성모멘트이다. 그리고 Surge, Sway, Yaw 방향에 대해 좌변의  $\dot{u}, \dot{v}, \dot{r}$ 은 각각 가속도와 각가속도를 나타내며, 우변의  $X, Y, N$ 은 각각 힘과 모멘트 성분으로서 MMG(Mathematical Model Group) 수학적모델로부터 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 m(\dot{u}-vr) &= X_H + X_P + X_B \\
 m(\dot{v}+ur) &= Y_H + Y_P + Y_B & (2) \\
 I_{zz}\dot{r} &= N_H + N_P + N_B
 \end{aligned}$$

하첨자 H, P, B는 각각 선체(Hull), Azipod 프로펠러, 선수 스러스터(Bow thruster)를 나타낸다.

각 외력항에 대해 구분하여 다시쓰면, 선체 유체력은

$$\begin{aligned}
 X_H &= X_u \dot{u} + (X_v - Y_v)vr + X_{vv}v^2 + X_{rr}r^2 + X(u) \\
 Y_H &= Y_v \dot{v} + Y_r \dot{r} + Y_r ur + Y_v v + Y_r r + Y_{vvv}v^3 + Y_{vvr}v^2r + Y_{vrr}vr^2 + Y_{rrr}r^3 \\
 N_H &= N_v \dot{v} + N_r \dot{r} + N_v v + N_r r + N_{vvv}v^3 + N_{vvr}v^2r + N_{vrr}vr^2 + N_{rrr}r^3
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

이고, Azipod 추진기의 추력항은 다음과 같이 구성하였다.

$$\begin{aligned}
 X_p &= T_p^{(P)} \cos \delta^{(P)} + T_p^{(S)} \cos \delta^{(S)} \\
 Y_p &= T_p^{(P)} \sin \delta^{(P)} + T_p^{(S)} \sin \delta^{(S)} \\
 N_p &= T_p^{(P)} \sin \delta^{(P)} \cdot x_p + T_p^{(S)} \sin \delta^{(S)} \cdot x_p \\
 &\quad + T_p^{(P)} \cos \delta^{(P)} \cdot y_p^{(P)} + T_p^{(S)} \cos \delta^{(S)} \cdot y_p^{(S)}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

그리고 선수 스러스터의 추력항은  $x$ 방향에 대해서는 0이며  $y$ 방향으로만 작용하여 다음과 같이 간단히 표현된다.

$$\begin{aligned}
 X_B &= 0 \\
 Y_B &= T_B^{(P)} + T_B^{(S)} \\
 N_B &= T_B^{(P)} x_B + T_B^{(S)} x_B
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

### 2.3 유체력 평가

#### 1) Hull 유체력

본 연구에서는 MH의 Hull 유체력 계수를 Table 2에서 보여주는 바와 같이 적용하였으며 무차원화 형식은 Table 3과 같이 정리하였다. 이 결과(Lee,1988)는 광폭을 가지는 화물선에 대해 수행되었던 CMT(Circular Motion Test) 결과로서 본 연구의 선형인 Twin Hull과 다소 차이가 있을 수 있으나 광폭의 수선면을 갖는 유사 모형으로 간주하여, 조종시물레이션에 대한 초기 단계로서 우선 활용하였다.

Table 2 Hydrodynamic derivatives(bare hull)

Surge Force	$X_u'$	-0.02656	Yaw Moment	$N_v'$	0.01149
	$X_{vv}'$	-0.1361		$N_r'$	-0.00862
	$X_{vr}'$	-0.0267		$N_v'$	-0.04186
	$X_{rr}'$	-0.03882		$N_r'$	-0.03587
Sway Force	$Y_v'$	-0.1495		$N_{vvv}'$	0.1310
	$Y_r'$	0.00171		$N_{vvr}'$	-0.2597
	$Y_v'$	-0.2656		$N_{vrr}'$	0.05773
	$Y_r'$	0.05912		$N_{rrr}'$	-0.0067
	$Y_{vvv}'$	-0.7712			
	$Y_{vvr}'$	-0.5397			
	$Y_{vrr}'$	-0.2374			
	$Y_{rrr}'$	0.01481			

Table 3 Nondimensional form

$$\begin{aligned}
 m' &= m / (0.5\rho \cdot L_{PP}^2 \cdot d) \\
 I_{zz}' &= I_{zz} / (0.5\rho \cdot L_{PP}^4 \cdot d) \\
 u', v' &= u, v / U \\
 r' &= r / (U / L_{PP}) \\
 X', Y' &= X, Y / (0.5\rho \cdot L_{PP} \cdot d \cdot U^2) \\
 N' &= N / (0.5\rho \cdot L_{PP}^2 \cdot d \cdot U^2)
 \end{aligned}$$

#### 2) Azipod 추력

##### ① Propeller 추력의 추정

2축선의 Propeller 유효반류  $(1-w_p)$ 는 1축선의 경우와 상당히 다른 형태를 보인다. Propeller 위치에서 기하학적 횡유입유속  $v_p$ 는

$$v_p = -\sin \beta + x_p r \tag{6}$$

여기서  $\beta$ 는 횡표류각,  $x_p$ 는 Propeller  $x$  좌표,  $r$ 은 선회각속도이다.

1축선의 경우  $v_p=0$ 인 경우  $(1-w_p)$ 는 최소값을 갖고  $|v_p|$ 가 커짐에 따라 증가하는 경향을 보이나 2축선의 경우 좌, 우 Propeller의  $(1-w_p)$ 가  $y$ 축에 비대칭인 형태를 보인다(Lee,1988).

따라서, Propeller 반류가 최소가 되는 횡유입속도  $v_p^*$ 를 다음과 같이 정의하여

$$v_p^* = \left| \frac{y_p}{x_p} \right| \tag{7}$$

$x_p$  : Midship에서 Propeller 까지  $x$ 좌표

$y_p$  : Midship에서 Propeller 까지  $y$ 좌표

$$(1-w_p)^P = c(v_p - v_p^*)^2 + (1-w_{p_0})$$

$$(1-w_p)^S = c(v_p + v_p^*)^2 + (1-w_{p_0}) \tag{8}$$

와 같이 수학 모델화할 수 있다. 여기서,  $v_p$ 에 관한 2차식을 사용한 것은  $v_p^*$ 나  $-v_p^*$ 에서 최소가 되는 가장 간단한 형태의 함수이기 때문이다. 식(8)에서는 Lee(1988)의 이축이타선에 관한 실험에 의한 계수  $c=0.6$ 을 사용하였다. 여기서, 첨자 P는 Port Side를, S는 Starboard Side를 의미한다.

본 연구에서는 Azipod 추진기에 대한 추력계수는 Tanaka(2009)가 수행한 프로펠러 단독특성 실험 중 Pusher mode(Table 4)를 채택하여 그에 대한 결과를 활용하였다.

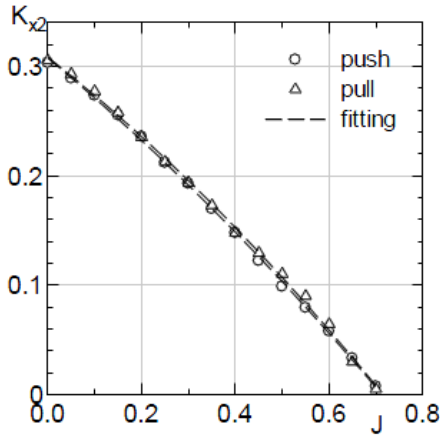


Fig. 2 Thrust open water characteristics (for podded propeller model)

$$K_{x2} = T_{x2} / (\rho \cdot n_p^2 \cdot D_p^4) \quad (9)$$

여기서,  $T_{x2}$  : 계측된 추력,  $\rho$  : 물의 밀도,  $n_p$  : 프로펠러 회전수,  $D_p$  : 프로펠러 직경.

$$K_{x2} = a_0 + a_1 J + a_2 J^2 \quad (10)$$

여기서,  $J = u / (n_p \cdot D_p)$  : 전진비 (Advance ratio)

$a_0, a_1, a_2$  : 프로펠러 단독특성에 의한 상수

Table 4 Coefficients of thrust open water characteristics for Azipod propeller models

	$a_0$	$a_1$	$a_2$
pusher for starboard	0.303	-0.321	-0.204
pusher for port	0.293	-0.365	-0.108
puller for starboard	0.303	-0.348	-0.115
puller for port	0.317	-0.341	-0.112

### 3. 조종운동 시뮬레이션

본 연구의 수치계산에 있어서, 실제로는 조타기의 특성에 따라 명령 Pod각과 실제 Pod각에 차이가 있을 수 있으나 여기서는 계산의 편의를 위해 명령 Pod각을 내리는 순간, 바로 조종이 이루어진다고 가정하였다. 또한, 모바일하버와 같은 특수선의 경우, 별도의 조종성 기준이 없으므로 통상 직진성능 시험과 선회성능 시험 등의 항목으로 나누어 다음과 같이 수행하였다.

#### 3.1 직진시험 (Straight ahead ability)

본 절에서는  $\delta^{(P,S)} = 0^\circ$ 로 하여 직진시의 경우 Pod 프로펠러

회전수에 따른 추력과 속도변화를 계산한 후, 속도변화에 대한 Track Reach를 구하였다.

후절의 선회시험에 앞서, 우선 직진시험을 통해 Azipod 추진기의 추력에 의해 MH의 속도가 시간에 따라 어떻게 변화하는지 그리고 프로펠러 RPS(Revolutions per second)에 따른 속도변화를 추정하고 이를 통해 적절한 속도와 RPS를 선정하여 후절의 선회 시뮬레이션에 반영하고자 하였다(Fig.3 참조).

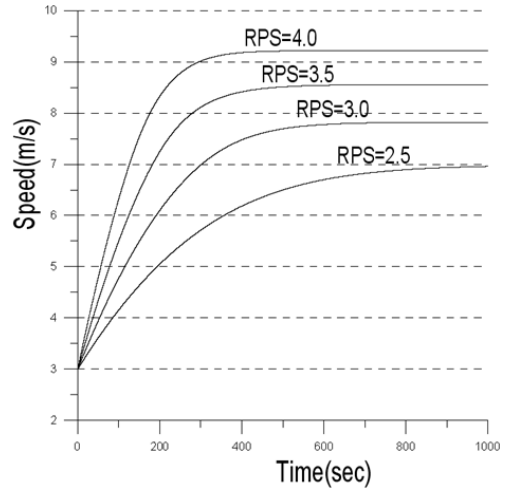


Fig. 3 Comparison of the MH speed and propeller revolution

Fig.4에서는 좌우현 양측의 Pod각을  $0^\circ$ 로 하고 속도를 변화시켰을 경우, MH가 속도증가에 따라 전진거리가 각각 2.8km, 3.3km로 증가하였으며, 좌우현 대칭성을 가지고 직진 시뮬레이션이 원활히 이루어지고 있음을 보여주고 있다.

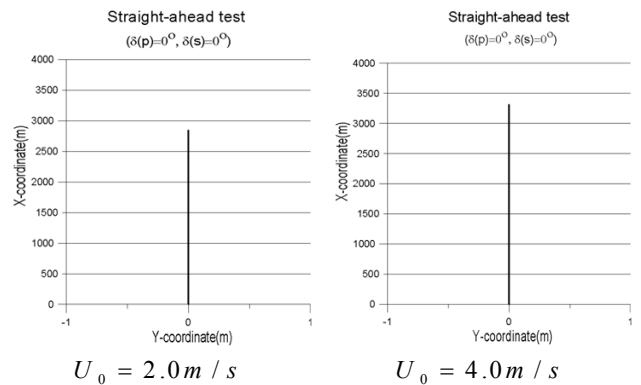


Fig. 4 Simulated result of straight-ahead test

#### 3.2 선회성능 시험 (Turning Ability)

전진거리 Ad(Advance)는 선체가 원점으로부터 x축 방향으로 진행하면서  $\delta = 35^\circ$  Turning을 수행할 경우, 선회각  $\psi = 90^\circ$ 가 될 때의 x좌표(전진거리)를 나타내며, 전술직경 DT(Tactical Diameter)는  $\psi = 180^\circ$ 가 될 때의 y좌표를 나타낸다.

본 절에서는 MH의 운항 또는 접안시 자유로운 조종 제어를 위해 양측 Pod각에 따른 선회성능 시험을 수행하였다. Fig.5는 양측 Pod각을 35°로 동일하게 하였을 경우 선회성능 시험에 대한 결과를 나타내고 있으며, 초기속도 3.0m/s에 대한 전진거리가 227m, 전술직경이 352m로 나타났다. 일반적인 선박에 대한 IMO 조종성 기준과 비교해 본다면, Ad의 경우 4.5L 미만으로서 만족하고 DT의 경우 5.0L을 약간 초과하고 있으며, 이것은 본 MH의 선형 특성에 기인한 것으로 보여진다. Fig.5의 우측의 그림은 선회 시 초기에 속력이 조금 증가하였다가 점점 감소함으로써 선체의 저항에 의한 속도감소가 일어나는 현상이 잘 나타난다. 여기서 Ishibashi et al(2000) 논문으로부터 수치시물레이션과 자유항주실험에 의한 선회시험 결과와 비교해보면, 최초 약 50초 동안 속도가 약간 증가하였다가 감소하는 현상을 나타냄으로서 본 결과와 유사한 경향을 보여주고 있다.

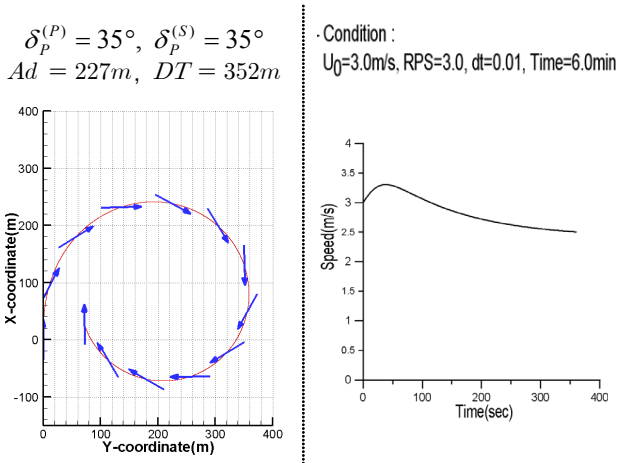


Fig. 5 Simulated result of turning circle test

### 3.3 Pod각 5°간격별(5°~15°) 선회시험 및 속도변화 예측

Fig. 6은 Pod 각별 선회성능 시험으로서 5°씩 증가할 경우 전진거리와 전술직경이 짧아지고 선회가 빨리 이루어짐을 알 수 있다. 또한 시간에 따른 속도변화는 초기에 증가하면서 일정하게 유지되고 Pod각이 클수록 초기 안정 시간이 짧아지고 속도가 작아짐을 보인다.

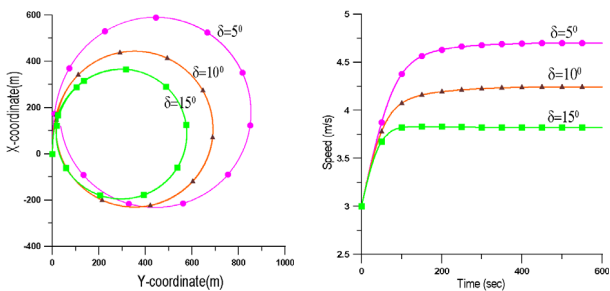


Fig. 6 Simulated result of turning circle test

### 3.4 Pod 추진기 일축기관 정지시 선회성능 시험

운항 시 일축 기관의 고장을 가정하여 나머지 일축기관을 사용하였을 경우 선회성능 시험을 수행하였으며, 초기속도는 3.0 m/s, RPS는 3.0으로 하였다. Fig.7은 우현기관 정지를 가정하였을 때의 시물레이션을 나타내며 양측 모두 사용했을 때의 선회성능과 비교하면 Ad는 약 66m 크게, DT는 약 44m 크게 나타나 일축기관만으로도 충분히 선회가 잘 이루어지고 있음을 보여주고 있다.

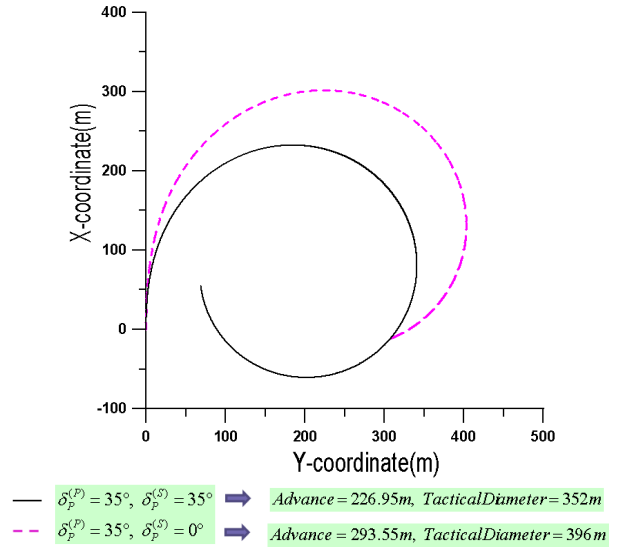


Fig. 7 Simulated result of turning circle test

### 3.5 Pod 추진기와 선수 스러스터를 이용한 조종 시물레이션

우선, Pod 추진기만을 사용하였을 경우, 선회시험과 Pod 추진기와 선수 스러스터를 함께 사용하였을 경우의 선회시험을 실시하여 그 결과를 비교해 보았다. 먼저, 5°에서 35°까지 5°간격으로 총 7가지의 경우에 대해 시물레이션을 실시하였으며 초기조건은 선속 3.0m/s, RPS 3.0으로 동일하게 수행하였다. 그 결과 Fig.8과 같이 Pod 추진기와 선수 스러스터를 함께 사용하였을 경우, AD와 DT가 현격히 짧아짐으로서 선회성능이 현저히 좋아지는 것으로 나타났다.

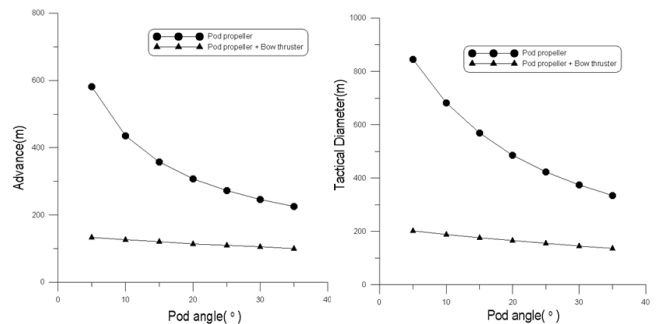


Fig. 8 Advance and tactical diameter variation in terms of pod angle

## 4. 결 론

본 연구는 2-Azipod와 2-Bow Thruster 시스템을 가지는 MH의 조종 수학모델을 구축하였고, 선회시험 등에 의한 조종 시뮬레이션 한 결과 타당한 결과를 얻었으며, 특히 선수 스러스터와 Pod 추진기의 적절한 운용으로 효율적인 조종 시뮬레이션을 수행하였다. 본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 새로운 개념의 선형인 MH에 대한 조종 수학모델이 이전 MMG모델에 수정을 가하여 완성·구축되었다.

(2) 선미 양측에 설치된 Pod 추진기에 의한 직진 및 선회시험 등의 조종 시뮬레이션한 결과, 기존 논문과 비교하여 유사한 양상을 보임으로서 양호한 결과를 얻었으며 시뮬레이션이 원활히 잘 이루어지는 것으로 나타났다.

(3) MH의 이측 Pod 추진기와 이측 선수 스러스터를 이용한 최적의 조종운동 시뮬레이션을 개발·확립하였다.

향후, 모형선 제작 및 수조시험 등으로 MH에 관한 정확한 유체력 추정에 관한 연구가 필요하며, 이를 이용한 운항 안전성 및 접안 안전성 검토에 적극 활용될 것이다.

## 후 기

본 연구는 부산대학교 자유과제 학술연구비 지원으로 수행되었음.

## 참 고 문 헌

- [1] 이승건(2009),“선박운동·조종론”
- [2] Ishibashi, A., Kobayashi, H.(2000), "A Study on ship maneuvering characteristics of ship with twin-propellers and twin-rudders in shallow water", Journal of the Tokyo University of Mercantile Marine. Natural Sciences, NO.51, PAGE.129-138.
- [3] Lee, S. K(2003) "Assessment of a mathematical model for the maneuvering motion of a twin-hull twin-rudder ship" ISP Vol.50 No.2
- [4] Tanaka, S., Hirata, N., Yasukawa, H. (2009),, "Hydrodynamic forces investigation on a ship with azimuthing propellers in maneuvering motions", MARSIM '09, Panama,.

---

원고접수일 : 2010년 5월 4일  
심사완료일 : 2010년 9월 20일  
원고채택일 : 2010년 9월 28일