

Manta형 무인잠수정의 조종운동 특성에 관한 연구

배준영*, 손경호†*

한국해양대학교 조선해양시스템공학부*

A Study on Manoeuvring Motion Characteristics of
Manta-type Unmanned Undersea Vehicle

Jun-Young Bae* and Kyoung-Ho Sohn†*

Dept. of Naval Architecture and Ocean Systems Engineering, Korea Maritime University*

Abstract

The authors adopt the Unmanned Undersea Vehicle(UUV), which has taken the shape of manta(Sohn et al. 2006). They call here it Manta-type Unmanned Undersea Test Vehicle(MUUTV). MUUTV is based on the same design concept as UUV called Manta Test Vehicle, which was originally built and operated by the Naval Undersea Warfare Center(Lisiewicz and French 2000, Sirmalis et al. 2001). In order to evaluate manoeuvring motion characteristics of MUUTV, numerical simulation technique has been utilized. Previous mathematical model on manoeuvring motion of MUUTV(Sohn et al. 2006) is basically adopted. Result of static experiment carried out in circulating water channel and a part of NSRDC standard model(Feldman 1979) on rotational mode are supplemented. Some of the hydrodynamic derivatives are obtained from model experiment in circulating water channel and the rest of them are estimated.

※Keywords: Unmanned Undersea Vehicle(무인잠수정), Numerical simulation(수치시뮬레이션), Manoeuvring motion characteristics(조종운동특성), Model experiment in circulating water channel(회류수조 모형실험), Motion with six degrees of freedom(6자유도 운동)

1. 서언

미래의 해군력 증강을 위한 수중유도무기체계 개발의 일환으로 다양한 형태의 수중운동체 기술

접수일: 2008년 8월 29일, 승인일: 2009년 3월 6일

†교신저자: sohnkh@hhu.ac.kr, 051-410-4303

이 발전되고 있으며, 국내에서는 수중운동체의 운동특성과 운용시스템에 관련된 연구가 활발하게 수행되고 있다(Kim 1998, Son et al. 2001, Shin et al. 2005, Yun et al. 2005, Yeo and Rhee 2005). 특히 미국의 Naval Undersea Warfare Center(이하 NUWC라 함)에서는 1990년대 중반부터 Manta Test Vehicle(이하 MTV라 함)이라 불리

는 무인잠수정에 대한 연구를 수행해 오고 있다. MTV는 NUWC에 의해 설계, 건조 및 시운전되고 있는 독특한 외형을 가진 무인잠수정으로서 평상 시에는 모함의 동체 상부의 일부로 장착되어 있다. 필요 시에만 모함으로부터 분리되어 자료 획득 등 임무 수행에 투입된다(Lisiewicz and French 2000, Sirmalis et al. 2001). MTV의 설계 및 운용 개념을 기초로 하여 Sohn et al.(2006)은 Manta형 무인잠수정(Manta-type Unmanned Undersea Test Vehicle, 이하 MUUTV라 함)의 6 자유도 운동 수학적 모델을 정립하였으며, 부가질량과 선형감쇠유체력의 이론적 추정법을 확립하여 MUUTV의 부가물 또는 제어판의 설계 시에 활용할 수 있도록 하였다. 또한 Bae et al.(2007)은 MUUTV의 운동안정성 향상을 위한 부가물의 설계 변경에 관해서도 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 운동안정성이 향상된 MUUTV를 공시모형으로 채택하여 회류수조에서 모형실험을 수행하였다. 그리고 모형실험 결과를 토대로 MUUTV의 6 자유도 운동 수학적 모델을 수정 제안하였다. 아울러 모형실험 결과와 Sohn et al.(2006)이 제안한 이론추정법에 의해 수학적 모델에서 필요로 하는 유체력미계수를 구하였으며 시뮬레이션 기법을 이용하여 MUUTV의 조종운동 특성을 검토하였다.

2. MUUTV의 기하학적 명세

Fig. 1과 Table 1은 채택된 MUUTV의 형상과 주요목 명세를 보이고 있다. MUUTV는 동체 측면 후부에 NACA0008의 단면형상을 한 2개의 수평판(horizontal plate)이 설치되어 있으며, 승강 또는 자세 제어를 위하여 수평판의 일부로서 수평타(elevator)가 부착되어 있다. 그리고 동체 상부의 뒤쪽에는 수직판(upper vertical plate)이 설치되어 있으며, 방향 제어를 위하여 수직타(rudder)가 수직판의 일부로서 부착되어 있다. Fig. 1의 (a)와 (b)에서 빗금친 부분이 각각 수평타와 수직타를 나타내고 있다. 또한 MUUTV의 바닥에는 hovering을 위한 4개의 스러스터(thruster)와 선미에는 추진을 위한 2개의 스러스터가 설치되어

있다.

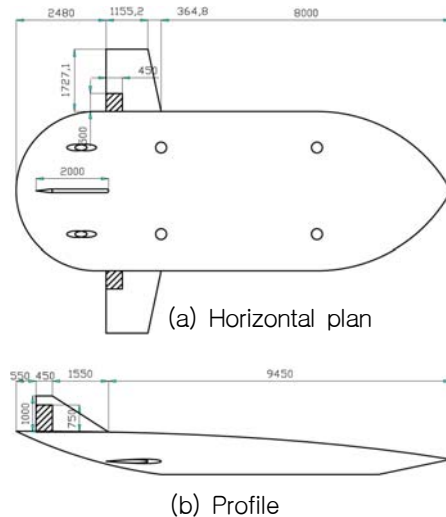


Fig. 1 Drawings of MUUTV

Table 1 Principal dimensions of MUUTV

Item	Dimension
Fuselage	
length	L = 12.0 m
breadth	B = 4.4 m
height	D = 1.2 m
disp. vol.	$\nabla = 31.88 \text{ m}^3$
centroid from nose	6.333 m
Horizontal plate (2)	
root chord	1.52 m
tip chord	1.1552 m
span	1.7271 m
Elevator (2)	
root chord	0.45 m
tip chord	0.45 m
span	0.50 m
Upper vertical plate	
root chord	2.00 m
tip chord	0.45 m
span	1.00 m
Rudder	
root chord	0.45 m
tip chord	0.45 m
span	0.75 m
Propulsion thruster (2)	
propeller diameter	0.60 m
pitch ratio	1.20
blade area ratio	0.75
number of blades	5
turning direction(looking from stern) outboard	
Hovering thruster (4)	

3. MUUTV에 작용하는 동유체력과 조종 운동 특성

3.1 좌표계

MUUTV를 강체라 가정하고 Fig. 2와 같이 MUUTV에 고정된 직각좌표계(물체고정좌표계)를 $O-xyz$, 공간고정좌표계를 $O_E-X_EY_EZ_E$ 로 취하였다. 물체고정좌표계의 원점은 MUUTV의 동체 중앙횡단면에서 동체 높이의 중간위치에 취하고, MUUTV의 선수방향을 x , 정횡우현방향을 y , 선저방향을 z 축의 양(+)의 방향으로 정의한다. 공간고정좌표계의 원점은 MUUTV의 제어판의 작동 명령시점으로 취한다. 본 연구에서 사용된 기호들을 Fig. 2에 나타낸다. 참고로, α 는 수직양각, β 는 수평사향각을 나타낸다.

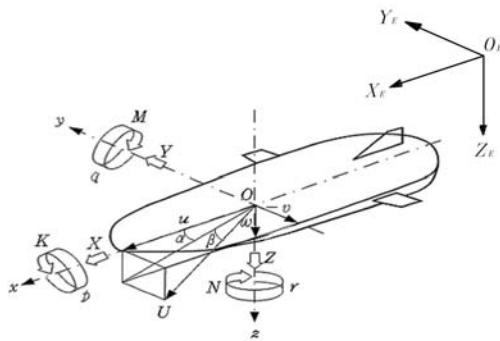


Fig. 2 Coordinate system and notation

3.2 회류수조 모형실험

MUUTV의 저항, 감쇠유체력 및 제어판의 양력을 측정하기 위하여 회류수조에서 모형실험을 수행하였다. 저항과 감쇠유체력 측정을 위하여 Fig. 1과 Table 1에 보인 MUUTV를 1/10로 축소하여 제작하였다. 또한 제어판의 양력 측정을 위하여 제어판을 포함하는 부가물(수평판)을 27/76로 축소하여 기초판과 함께 제작하였다. 실험이 수행된 회류수조는 길이 12.5 m, 폭 2.2 m, 높이 5.2 m 인 2 임펠러 방식의 수직순환형으로서, 관측부는 길이 5 m, 폭 1.8 m, 수심 0.9 m 이다. 실험점(관측부의 종방향 중심위치)의 수평방향과 수직방향에서 측정된 유속분포를 Fig. 3에 나타낸

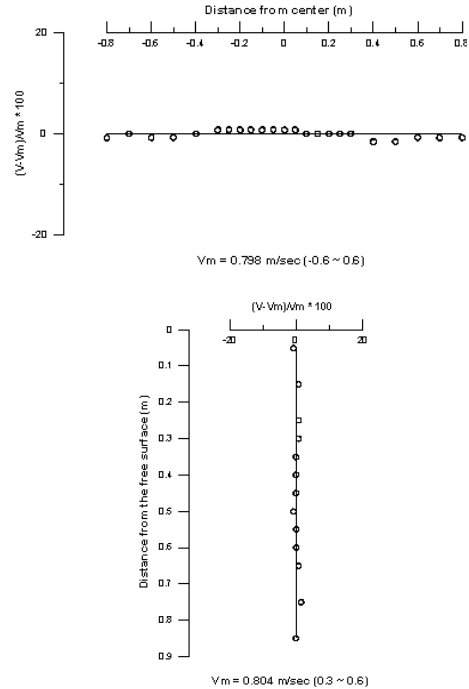


Fig. 3 Velocity distribution at working section of circulating water channel (V_m : mean velocity)

다. 전반적으로 유속분포의 균일도는 양호한 편이며 모형선 중심위치는 자유표면으로부터 약 0.45 m 아래에 위치하도록 하여 자유표면 영향을 받지 않도록 하였다.

(1) 저항시험

저항시험 결과를 Fig. 4에 나타낸다. Fig. 4에서 종축은 측정된 저항치를 $0.5\rho L^2 U^2$ (단, ρ : 유체의 밀도, L : MUUTV의 길이, U : 유체의 속도)으로 무차원화 한 값 즉, 저항계수이다. 그리고 측정된 저항계수를 마찰저항계수에 관한 Hughes 식의 실수배의 형태로 커브피팅하였다. Fig. 4에서 (1), (2)는 본 연구에서 수행된 실험결과로서 (1)은 본 연구에서 제안된 모형선에 대한 실험결과이고 (2)는 문헌(Sohn et al. 2006)에서 제안된 모형선에 대한 실험결과이다. 두 모형선은 동체 형상은 같고 부가물에 약간의 차이를 보인다. Fig. 4에서 (1), (2)의 실험결과를 비교해 보면

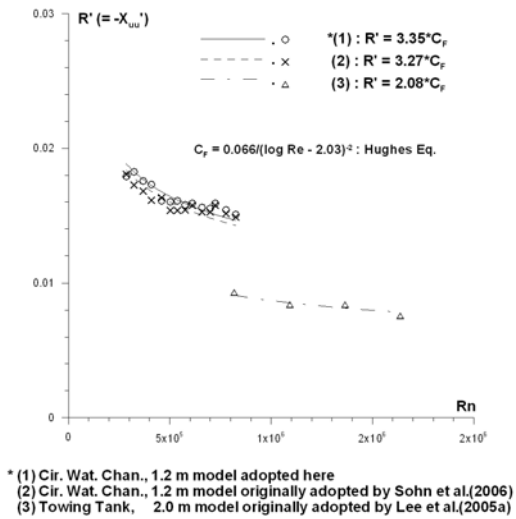


Fig. 4 Resistance coefficients and fitting lines

부가물의 차이에 기인하는 저항치의 변화는 크지 아니함을 알 수 있다. 또한 Fig. 4에서 (3)은 문헌(Lee et al. 2005a)의 예인수조 저항실험 결과로서 모형선의 형상은 (2)와 같으나 모형선의 길이가 2 m 이다. 모형선의 크기가 1.2 m, 2 m 로서 상이하지만 동일한 모형선의 저항실험 결과가 회류수조에서 측정된 값과 예인수조에서 측정된 값에 상당한 차이가 있다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 회류수조에서 측정된 저항계수는 몇 가지 수정과정을 거쳐야 한다(Tamashima et al. 1983). 즉, 회류수조에서의 축벽효과와 마찰저항의 형상계수에 관한 수정 등이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 수정작업을 거치지 않고 Fig. 4의 예인수조에서 측정된 저항계수 (3)의 결과를 실선 크기로 환산하여 MUUTV의 조종운동 수학모델에서 필요로 하는 계수 X'_{uu} 를 구하기로 한다. 즉, 다음 식과 같이 MUUTV의 저항계수는 Hughes의 마찰저항계수의 실수배로 표시된다고 가정한다(Ohkusu et al. 1987).

$$\begin{aligned}
 X'_{uu} &= - C_T(S_A/L^2) \\
 &= - (1 + k) C_F(S_A/L^2)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서 C_T 는 전저항계수, S_A 는 침수표면적,

k 는 형상계수, C_F 는 Hughes의 마찰저항계수를 의미한다. 식(1)의 k 값이 모형과 실선에서 동일하다고 간주하고 모형의 저항시험 결과로부터 k 값을 구해줌으로써 실선의 저항계수를 얻을 수 있다.

(2) 정적시험

MUUTV에 작용하는 감쇠유체력을 실험적으로 구하기 위하여 수평사향시험과 수직양각시험을 수행하였다. Fig. 5는 실험장치를 보이고 있다. Fig. 5에서 3 분력계의 정격용량은, 힘은 5 kgf 이고, 모멘트는 1 kgf · m 이다. 수평사향시험 시의 평균유속은 0.80 m/sec (Reynolds수 : 0.37×10^6) 이었고, 수직양각시험의 경우 3 분력계의 정격용량의 한계로 인하여 유속을 0.33 m/sec (Reynolds수 : 0.15×10^6)로 낮추어 실험을 수행

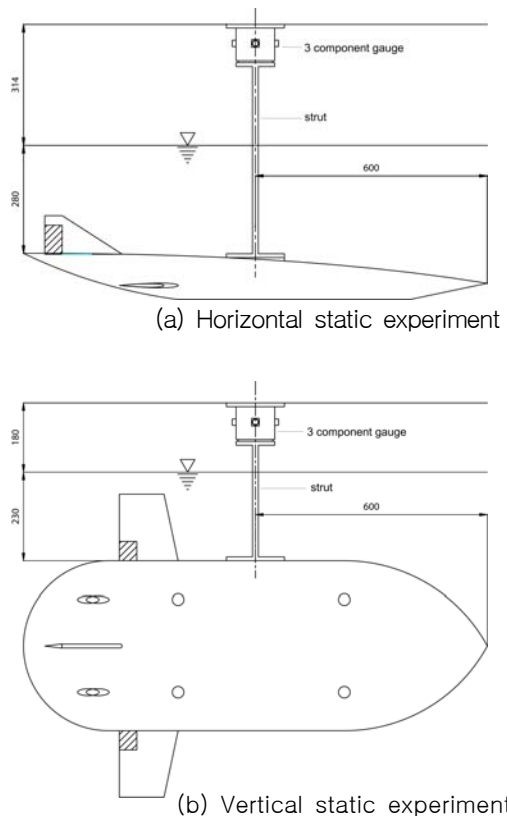


Fig. 5 Experimental apparatus for static experiment

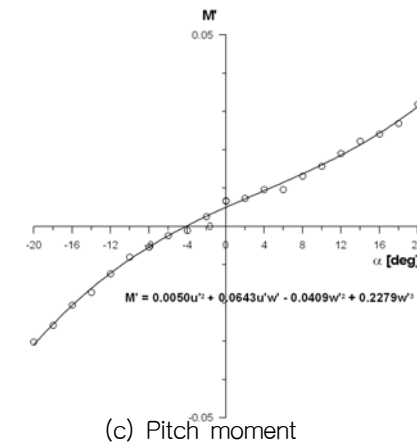
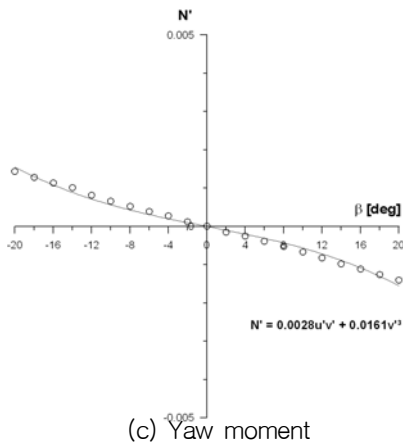
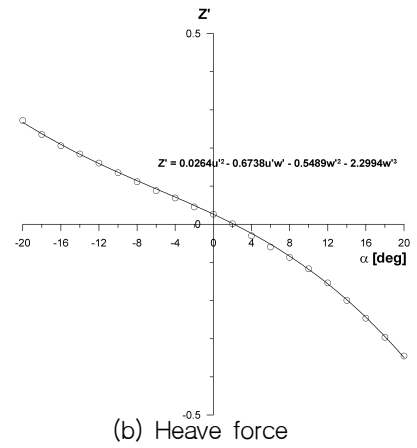
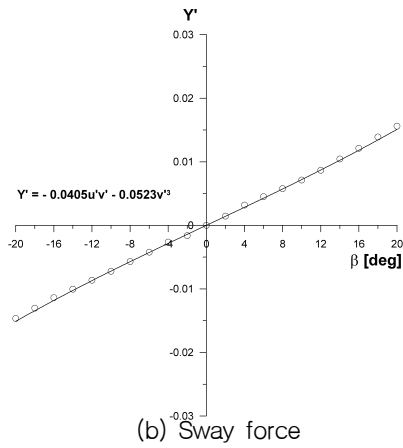
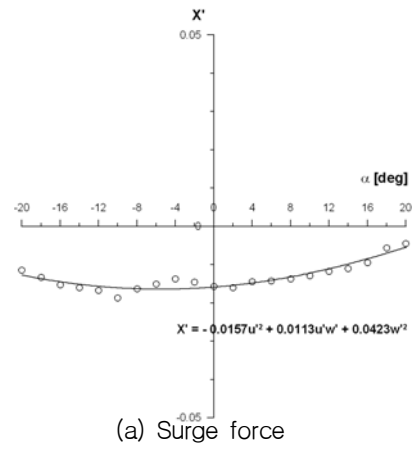
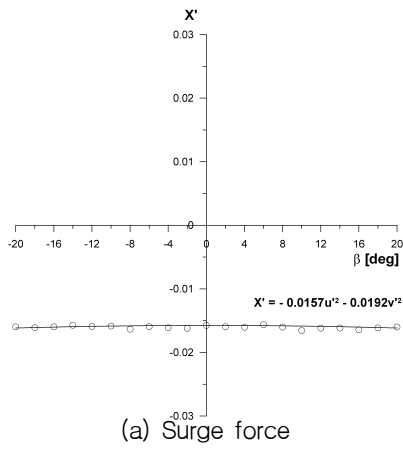


Fig. 6 Non-dimensional forces and moment obtained from horizontal static experiment and least square fitting lines

Fig. 7 Non-dimensional forces and moment obtained from vertical static experiment and least square fitting lines

하였다. 정적시험 시 MUUTV의 동체에 수직판과 수평판 등의 부가물은 부착되어 있으나, 추진 및 hovering을 위한 스러스터는 설치되어 있지 않다. Fig. 6과 Fig. 7은 정적시험 결과와 수학모형을 적용한 커브피팅을 보이고 있다. 여기서 힘은 $0.5\rho L^2 U^2$ 으로, 모멘트는 $0.5\rho L^3 U^2$ 으로 무차원화 하였다.

(3) 제어판의 양력 측정

MUUTV에는 수평타와 수직타가 설치되어 있는데 이들은 각각 수평판과 수직판의 일부로서 후부에 위치하고 있다. 수평타와 수직타의 양력 특성을 파악하기 위하여 수평타를 포함하는 수평판을 기초판과 함께 Fig. 8과 같이 제작하였으며(축척비 : 27/76), 이것은 기초판(Ground Board, 이하 GB라 함), 고정부(Fixed Part, 이하 FP라 함)와 가동부(Movable Part, 이하 MP라 함)로 구성되어 있다. MP에 작용하는 양력에 미치는 FP의 영향을 파악하기 위해 FP는 분리가 가능하도록 제작하였다. 그리고 실험결과를 다음 식으로 표시되는 Whicker/Fehlner 식과 비교하였다(Whicker and Fehlner 1958).

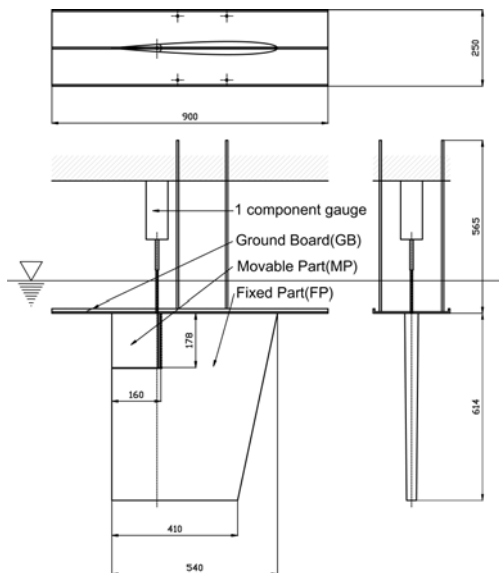


Fig. 8 Drawings of horizontal plate with elevator and experimental apparatus

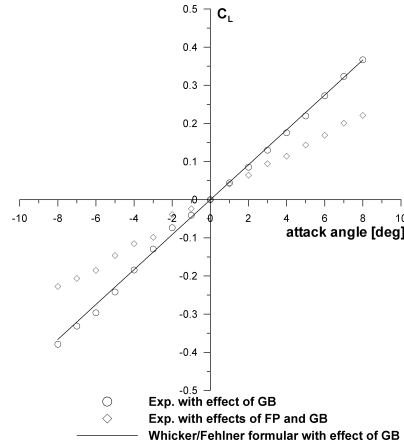


Fig. 9 Experiment of lift characteristics on elevator(movable part) of horizontal plate

$$\partial C_L / \partial \delta = \frac{0.9 \times 2\pi \times a}{\cos \Lambda \sqrt{\frac{a^2}{\cos^4 \Lambda} + 4 + 1.8}} \quad (2)$$

여기서 δ 는 제어판의 각도, $\partial C_L / \partial \delta$ 는 $\delta = 0^\circ$ 일 때의 C_L 곡선의 기울기를 나타낸다. 그리고 a 는 유효종횡비, Λ 는 후퇴각(sweep angle)을 나타낸다. Fig. 9에 실험결과와 식(2)에 의한 추정치를 비교하여 나타낸다. 실험치는 $0.5\rho AU^2$ (단, A : 타의 면적)으로 무차원화 하였다. Fig. 9에서 GB만 있는 경우에는 경상효과를 고려한 Whicker/Fehlner 식에 의한 추정치가 실험치와 잘 일치하고 있다. 한편, GB와 FP가 함께 설치된 경우에는 본 실험결과로부터 양력계수를 구하여 제어판의 유체력미계수를 얻는다.

3.3 6자유도 운동 수학모델

본 연구에서는 다음과 같이 6 자유도 운동 수학 모델을 정립하였다. 먼저 관성유체력의 경우에는 Sohn et al.(2006)의 연구 결과를 그대로 이용하였다. 단, 부가질량계수 형태의 표현(Newman 1978)이 아니고 유체력미계수 형태로 나타낸다. 그리고 감쇠유체력에서 정적운동 모드의 경우에는 실험결과(Fig. 6, Fig. 7)로부터 직접 수학모형을

구하였으며, 동적운동 모드의 경우에는 Feldman (1979)의 잠수함 표준 수학기초론을 참고하였다. 특히, 각속도 관련 유체력미계수의 고차항은 Feldman(1979)과 Sen(2000)의 연구결과에 따라 무시하기로 한다. 이렇게 해서 정립된 6 자유도 운동 수학기초론을 식(3)~(8)에 보인다. 여기서 m , W , B 는 질량, 무게, 부력을 의미하며, I_{xx} , I_{yy} , I_{zz} 는 x , y , z 축에 관한 질량관성모멘트를, x_G , z_G , x_B , z_B 는 각각 무게중심의 x , z 좌표와 부심의 x , z 좌표를 의미한다. 또한 ϕ , θ 는 횡동요각, 종동요각을 나타내며 $\dot{(\cdot)}$ 기호는 시간미분을 의미한다. T_{p1} 과 T_{p2} 는 선미의 우현과 좌현에 설치되어 있는 추진용 스러스터의 추력을 의미하고, n_p 은 매초당 프로펠러 회전수, D_p 는 프로펠러의 직경, t 는 추력감소계수, K_p 는 추력계수를 나타낸다. δ_r 과 δ_s 는 각각 수직타와 수평타의 타각을 의미하며, 수직타는 우현방향을 양(+)의 방향, 수평타는 상방향을 양(+)의 방향으로 정의한다. y_p 는 우현측 추진용 스러스터의 y 좌표이다. 부가질량계수 A_{ji}' 는 i 방향 운동모드에 기인하는 j 방향의 부가질량 또는 j 축 주위의 부가관성모멘트의 무차원치를 의미한다(Newman 1978).

- Surge force equation

$$\begin{aligned}
 m[\dot{u} - vr + wq - x_G(\dot{q}^2 + r^2) + z_G(\dot{p}r + \dot{q})] = & \\
 + \frac{\rho}{2} L^4 [X_{qq}' \dot{q}^2 + X_{rr}' r^2 + X_{pr}' pr] & \\
 + \frac{\rho}{2} L^3 [X_u' \dot{u} + X_{vr}' vr + X_{wq}' wq] & \\
 + \frac{\rho}{2} L^2 [X_{uu}' u^2 + X_{vv}' v^2 + X_w' uw + X_{ww}' w^2] & \\
 + \frac{\rho}{2} L^2 [X_{\delta_r \delta_r}' u^2 \delta_r^2 + X_{\delta_s \delta_s}' u^2 \delta_s^2] & \\
 + (T_{p1} + T_{p2}) - (W - B) \sin \theta & \quad (3)
 \end{aligned}$$

여기서

$$\begin{aligned}
 X_{qq}' &= -A_{35}', \quad X_{rr}' = A_{26}', \quad X_{pr}' = A_{24}' \\
 X_u' &= -A_{11}', \quad X_{vr}' = A_{22}', \quad X_{wq}' = -A_{33}' \\
 T_{p1} &= T_{p2} = \rho n_p^2 D_p^4 (1-t) K_p
 \end{aligned}$$

- Sway force equation

$$\begin{aligned}
 m[\dot{v} - wp + ur + z_G(\dot{q}r - \dot{p}) + x_G(\dot{p}q + \dot{r})] = & \\
 + \frac{\rho}{2} L^4 [Y_r' \dot{r} + Y_p' \dot{p} + Y_{p|p}' p|p + Y_{pq}' pq] & \\
 + \frac{\rho}{2} L^3 [Y_v' \dot{v} + Y_{wp}' wp + Y_r' ur + Y_p' up] & \\
 + \frac{\rho}{2} L^2 [Y_v' uv + Y_{vv}' \frac{v^3}{U} + Y_{\delta_r}' u^2 \delta_r] & \\
 + (W - B) \cos \theta \sin \phi & \quad (4)
 \end{aligned}$$

여기서

$$\begin{aligned}
 Y_r' &= -A_{26}', \quad Y_p' = -A_{24}', \quad Y_{pq}' = A_{35}' \\
 Y_v' &= -A_{22}', \quad Y_{wp}' = A_{33}'
 \end{aligned}$$

- Heave force equation

$$\begin{aligned}
 m[\dot{w} - uq + vp - z_G(\dot{p}^2 + \dot{q}^2) + x_G(\dot{p}r - \dot{q})] = & \\
 + \frac{\rho}{2} L^4 [Z_q' \dot{q} + Z_{pp}' p^2 + Z_{pr}' pr] & \\
 + \frac{\rho}{2} L^3 [Z_w' \dot{w} + Z_{vp}' vp + Z_q' uq] & \\
 + \frac{\rho}{2} L^2 [Z_w' u^2 + Z_w' uw + Z_{ww}' w^2 + Z_{www}' \frac{w^3}{U}] & \\
 + \frac{\rho}{2} L^2 [Z_{\delta_s}' u^2 \delta_s] + (W - B) \cos \theta \cos \phi & \quad (5)
 \end{aligned}$$

여기서

$$\begin{aligned}
 Z_q' &= -A_{35}', \quad Z_{pp}' = -A_{24}', \quad Z_{pr}' = -A_{26}' \\
 Z_w' &= -A_{33}', \quad Z_{vp}' = -A_{22}'
 \end{aligned}$$

- Roll moment equation

$$\begin{aligned}
 I_{xx} \dot{p} + (I_{zz} - I_{yy}) \dot{q}r - m[z_G(\dot{v} - wp + ur) & \\
 + x_G z_G(\dot{r} + pq)] = & \\
 + \frac{\rho}{2} L^5 [K_p' \dot{p} + K_r' \dot{r} + K_{qr}' qr + K_{p|p}' p|p] & \\
 + \frac{\rho}{2} L^4 [K_p' up + K_r' ur + K_v' \dot{v} + K_{wp}' wp & \\
 + K_{vq}' vq + K_{wr}' wr] & \\
 + \frac{\rho}{2} L^3 [K_v' uv + K_{vw}' vw + K_{\delta_r}' u^2 \delta_r] & \\
 - (z_G W - z_B B) \cos \theta \sin \phi & \quad (6)
 \end{aligned}$$

여기서

$$\begin{aligned}
 K_p' &= -A_{44}', \quad K_r' = -A_{46}' \\
 K_v' &= -A_{42}', \quad K_{wp}' = A_{24}' \\
 K_{qr}' &= A_{55}' - A_{66}', \quad K_{wr}' = A_{26}' + A_{53}' \\
 K_{vq}' &= -(A_{62}' + A_{35}') \\
 K_{vw}' &= A_{22}' - A_{33}'
 \end{aligned}$$

- Pitch moment equation

$$\begin{aligned}
 I_{yy} \dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})pr + m[z_G(\dot{u} - vr + uq) \\
 - x_G(\dot{w} - uq + vp) + x_G z_G(p^2 - r^2)] = \\
 + \frac{\rho}{2} L^5 [M'_q \dot{q} + M'_{pr} pr + M'_{rr} r^2 + M'_{pp} p^2] \\
 + \frac{\rho}{2} L^4 [M'_w \dot{w} + M'_u uq + M'_{vr} vr + M'_{vp} vp] \\
 + \frac{\rho}{2} L^3 [M'_k u^2 + M'_w uw + M'_{ww} w^2 + M'_{www} \frac{w^3}{U}] \\
 + \frac{\rho}{2} L^3 [M'_{\delta_s} u^2 \delta_s] - (x_G W - x_B B) \cos \theta \cos \phi \\
 - (z_G W - z_B B) \sin \theta
 \end{aligned} \tag{7}$$

여기서

$$\begin{aligned}
 M'_q &= -A_{55}', \quad M'_{pr} = A_{66}' - A_{44}' \\
 M'_{rr} &= -A_{46}', \quad M'_{pp} = A_{64}', \quad M'_w = -A_{53}' \\
 M'_{vr} &= -A_{42}', \quad M'_{vp} = A_{62}'
 \end{aligned}$$

- Yaw moment equation

$$\begin{aligned}
 I_{zz} \dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) \\
 + z_G x_G(qr - \dot{p})] = \\
 + \frac{\rho}{2} L^5 [N'_r \dot{r} + N'_p \dot{p} + N'_{pq} pq + N'_{qr} qr] \\
 + \frac{\rho}{2} L^4 [N'_v \dot{v} + N'_r ur + N'_p up + N'_{vp} vp + N'_{vq} vq] \\
 + \frac{\rho}{2} L^3 [N'_v uv + N'_{vv} \frac{v^3}{U} + N'_{\delta_r} u^2 \delta_r] \\
 + (T_{p2} - T_{p1})y_p + (x_G W - x_B B) \cos \theta \sin \phi
 \end{aligned} \tag{8}$$

여기서

$$\begin{aligned}
 N'_r &= -A_{66}', \quad N'_p = -A_{64}', \quad N'_{qr} = A_{46}' \\
 N'_{pq} &= A_{44}' - A_{55}', \quad N'_v = -A_{62}' \\
 N'_p &= -(A_{51}' + A_{24}'), \quad N'_{wp} = -A_{53}' \\
 N'_{vq} &= A_{15}' + A_{42}'
 \end{aligned}$$

3.4 유체력미계수 등

질량, 질량관성모멘트 및 부심의 위치는 상용 프로그램인 Catia를 이용하여 구하였다(Lee et al. 2005b). 단, 무게중심은 부심보다 0.2 m 아래(실선 기준)에 있는 것으로 가정하였다. 부가질량과 부가관성모멘트는 strip이론을 적용하여 구하였다(Sohn et al. 2006). 감쇠유체력미계수의 일부는 3.2절의 정적시험을 통하여 구하였고, 실험에 의해 구하지 못한 감쇠유체력미계수는 Lewis(1989)의 방법에 따라 동체의 경우에는 세장체이론(slender body theory)을 적용하였고 부가물의 경

우에는 Whicker/Fehlner 식(Whicker and Fehlner 1958)을 이용하여 구하였다. 세장체이론을 적용할 때 effective trailing edge의 위치는 3.2절의 정적 시험을 통하여 추정하였다. 제어유체력은 3.2절의 제어판의 양력 측정 실험결과로부터 구하였다. 또한 프로펠러의 추력계수 K_P 는 van Lammeren

Table 2 Hydrodynamic derivatives and other coefficients for numerical simulation

Der.	Value	Der.	Value
m'	0.036854	Z'_{ww}	-0.515486
I'_{xx}	0.000341	Z'_{www}	-2.299410
I'_{yy}	0.001699	Z'_q	-0.012499
I'_{zz}	0.002003	Z'_{δ_s}	0.004803
x'_G	-0.027659	K'_p	-0.001594
z'_G	0.025691	K'_r	0.000000
x'_B	-0.027659	K'_v	-0.000338
z'_B	0.009025	$K'_{ p }$	0.000000
x'_H	0.288437	K'_{wp}	0.000338
x'_B	-0.164501	K'_{vr}	0.003445
y'_H	0.272727	K'_{vq}	-0.004999
y'_P	0.272727	K'_{wr}	0.004999
X'_u	-0.001843	K'_{ww}	-0.078608
X'_{vq}	-0.097472	K'_{vp}	-0.005973
X'_{vr}	0.018864	K'_v	0.000055
X'_{qq}	-0.007301	K'_r	-0.000004
X'_{rr}	-0.002301	K'_{δ_r}	-0.000408
X'_{pr}	0.000338	M'_q	-0.004611
X'_{uu}	-0.004530	M'_w	-0.007301
X'_{vv}	-0.019240	M'_{vr}	-0.000338
X'_w	0.011327	M'_{vp}	-0.002301
X'_{ww}	0.042278	M'_{rr}	0.000000
$X'_{\delta_r \delta_r}$	-0.002278	M'_{pp}	0.000000
$X'_{\delta_s \delta_s}$	-0.002350	M'_{pr}	-0.001129
Y'_v	-0.018864	M'_s	0.004986
Y'_p	-0.000338	M'_w	0.064282
Y'_r	0.002301	M'_{ww}	-0.040892
$Y'_{ p }$	0.000000	M'_{yww}	0.227935
Y'_{wp}	0.097472	M'_q	-0.007865
Y'_{pq}	0.007301	M'_{δ_s}	0.001319
Y'_p	0.000000	N'_r	-0.001165
Y'_r	0.008262	N'_p	0.000000
Y'_v	-0.040476	N'_v	0.002301
Y'_{vv}	-0.052331	N'_{wp}	-0.007301
Y'_{δ_r}	-0.005016	N'_{qr}	0.000000
Z'_w	-0.097472	N'_{pq}	-0.003016
Z'_q	-0.007301	N'_p	-0.000338
Z'_{vp}	-0.018864	N'_{vq}	0.000338
Z'_{vp}	-0.000338	N'_v	0.002811
Z'_{pr}	0.002301	N'_{vv}	0.016131
Z'	0.026419	N'_r	-0.002777
Z'_w	-0.673837	N'_{δ_r}	0.002184

B-Screw Series의 프로펠러 특성으로부터 구하였다(van Lammeren et al. 1969). 그리고 추력감소 계수 t 와 반류계수(wake fraction)는 각각 수상선 박에 대한 추정식으로부터 구하였다(Lewis 1989). Table 2에 유체력미계수 등의 값을 나타낸다.

3.5 조종운동 시뮬레이션

수직타와 수평타에 적용되는 조타기의 수학모델은 다음과 같다.

$$T_E \dot{\delta} + \delta = \delta^* \quad : (|\delta^* - \delta| \leq T_E |\dot{\delta}_{\max}|)$$

$$\dot{\delta} = \text{sign}(\delta^* - \delta) |\dot{\delta}_{\max}| \quad : (|\delta^* - \delta| > T_E |\dot{\delta}_{\max}|) \quad (9)$$

여기서 T_E 는 시정수, δ^* 는 명령타각, $\dot{\delta}_{\max}$ 는 최대타각속도를 의미한다. T_E 는 1 sec, $\dot{\delta}_{\max}$ 는 3 deg/sec로 가정한다. Fig. 1에서 정의한 물체 고정좌표계와 공간고정좌표계 사이에는 다음 관계가 성립된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_E \\ \dot{Y}_E \\ \dot{Z}_E \end{bmatrix} = [E]^t \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (10)$$

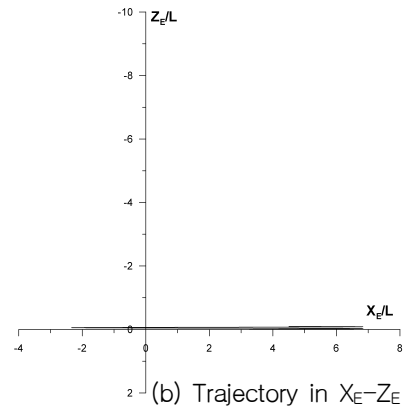
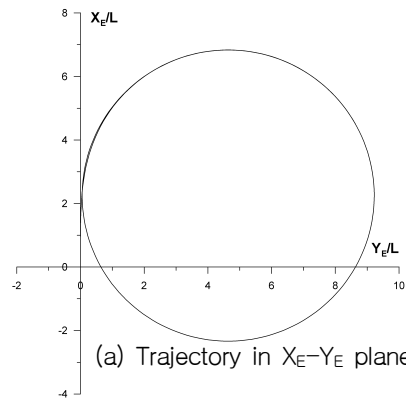
여기서 $[E]^t$ 는 공간고정좌표계를 물체고정좌표계로 바꾸어 주는 변환행렬($[E]$ 의 전치행렬(transposition matrix)이다(Abkowitz 1969). 그리고 Euler 각속도와 물체고정좌표계의 각속도 사이에는 다음 관계가 성립된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi \sec \theta & \cos \phi \sec \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (11)$$

식(3)~(8)로부터 $\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r}$ 을 구해 이들을 각각 수치적분법에 의해 운동변수의 시간이력 $\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r}$ 을 구하고 식(10)과 식(11)로부터 운동계적의 공간좌표(X_E, Y_E, Z_E)와 Euler 각(ϕ, θ, ψ)을 구하는 수순으로 수치 시뮬레이션이 수행된다. 여기서 수치적분법은 Runge

-Kutta-Gill 방법을 이용하였고 계산은 0.1 sec 시간간격으로 하였다. 또한 수치 시뮬레이션 시에, 다음 가정을 적용하였다.

- ① 운동 시뮬레이션은 실선 스케일로 수행하며, 초기속도(U_0)는 5 kt로 설정한다. 이에 대응하는 프로펠러 회전수는 5.66 rps이다.
- ② 대각도 종경사 시의 정복원모멘트가 정확하게 알려져 있지 아니하므로 수직운동의 경우, 중성평형(neutral equilibrium) 상태로 간주한다.
- ③ 정상직진 시 MUUTV 동체의 상하 비대칭 형상에 기인하는 동유체력미계수 Z^*, M_s^* 의 영향은 무시한다.



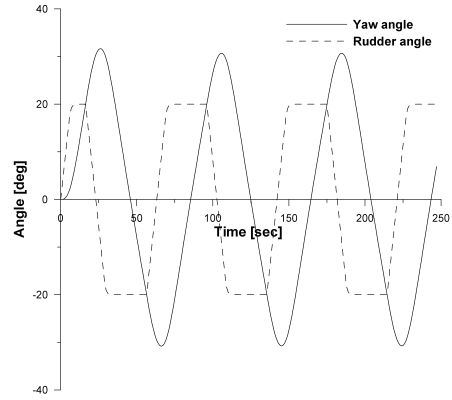
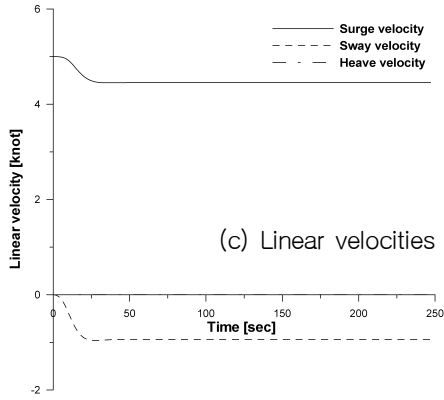


Fig. 11 Horizontal zigzag manoeuvre(20° / 20°)

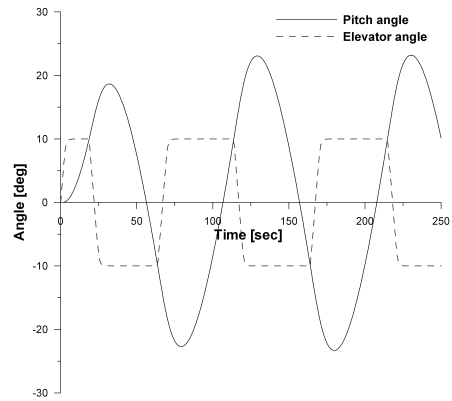
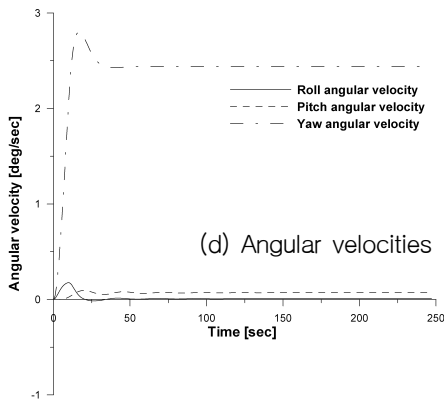


Fig. 12 Vertical zigzag manoeuvre(10° / 10°)

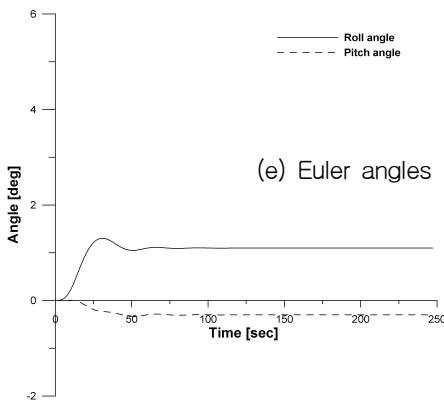


Fig. 10 Horizontal turning manoeuvre

수치 시뮬레이션 항목으로서 수평운동의 경우에는 선회와 지그재그 운동을, 수직운동의 경우에는 지그재그, 부상 및 미앤더(meander) 운동을 채택한다. Fig. 10은 수평선회운동, Fig. 11은 수평지

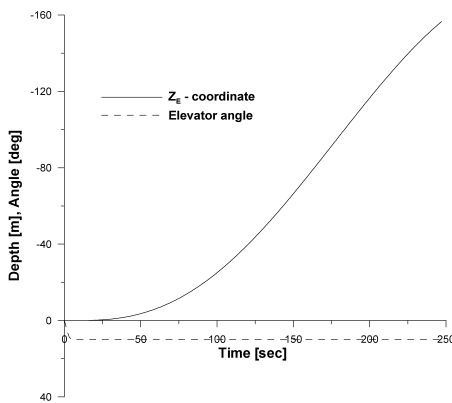


Fig. 13 Rise due to elevator

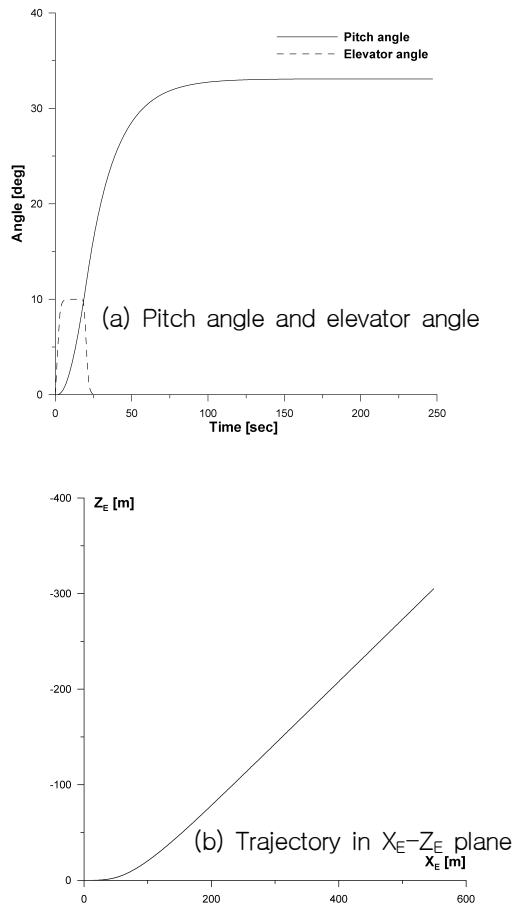


Fig. 14 Vertical meander manoeuvre(10°)

그재그운동, Fig. 12는 수직지그재그운동, Fig. 13은 부상운동, Fig. 14는 수직미안더운동의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. Fig. 14의 (b)를 통하여 중성평형 상태에서 MUUTV가 수직면 내에서 직선운동안정성(straight-line stability)을 가지고 있다는 것을 알 수 있다. 만약 중성평형 상태를 가정하지 않고 유체정역학적 모멘트를 고려하였다면 방향안정성(directional stability)를 갖게 되어 일정한 수심을 유지하게 될 것으로 예상된다.

4. 결 언

본 연구에서 채택한 MUUTV 형상을 대상으로 회류수조에서 잠수체의 정적 모형실험 기법을 확

립하였다. 또한 기존의 수학모델(Sohn et al. 2006)에 본 실험결과와 Feldman(1979)의 연구결과를 적절히 보완함으로써 새로이 수정된 운동 수학모델을 제안하였다. 이를 토대로 수치 시뮬레이션 기법을 적용하여 MUUTV의 조종운동 특성을 규명하였다. 단, 이 결과는 추후 자유항주 모형실험에 의한 검증이 필요하다. 그리고 본 연구에서 채택한 MUUTV 형상은 중성평형 상태에서 수직면 직선운동 안정성을 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

앞으로 MUUTV의 조종운동 특성 중 hovering 스러스터의 사용과 함께 대각도 극한운동(extreme motion)의 조종특성에 관한 연구가 추가되어져야 할 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 방위사업청/국방과학연구소에 의해 한국해양대학교에 설치된 수중운동체특화연구센터의 연구비 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- Abkowitz, M.A., 1969, Stability and Motion Control of Ocean Vehicles, The MIT Press, Cambridge.
- Bae, J.Y., Sohn, K.H., Kwon, H.K. and Lee, S.K., 2007, "A Study on Changes in Appendage Design for Improvement of Dynamic Stability of Manta-type Unmanned Undersea Vehicle," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 44, No. 3, pp. 323-331.
- Feldman, J., 1979, DTNSRDC Revised Standard Submarine Equations of Motion, Report No. DTNSRDC/SPD-0393-09, Washington, D.C.
- Kim, C.K., 1998, "The Combined Method of Structure Selection and Parameter Identification of Equations of Motion to Analyze the Model Tests of a Submerged

- Body,” *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 35, No. 2, pp. 20–28.
- Lee, S.K., Sohn, K.H., Lee, S.E., Hwang, S.J. and Seo, J.H., 2005a, “A Study on the Oblique Towing Test of the Manta Type UUV,” *Journal of Korea Navigation and Port Research*, Vol. 29, No. 8, pp. 679–684.
 - Lee, S.S., Hwang, Y.J. and Kim, H.J., 2005b, CATIA V5 Release 14, Gyeongsang National University Press.
 - Lewis, E.V., 1989, *Principles of Naval Architecture*, Vol. III, 2nd Revision, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Jersey City.
 - Lisiewicz, J.S. and French, D.W., 2000, “Manta Test Vehicle At-Sea Test Results and Technology Demonstration Plans,” *Proceedings, Undersea Defense Technology Conference, Europe*.
 - Newman, J.N., 1978, *Marine Hydrodynamics*, The MIT Press, Cambridge.
 - Ohkusu, M., Kashiwagi, M. and Koterayame, W., 1987, “Hydrodynamics of a Depth Controlled Towed Vehicle,” *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 162, pp. 99–109.
 - Sen, D., 2000, “A Study on Sensitivity of Maneuverability Performance on the Hydrodynamic Coefficients for Submerged Bodies,” *Journal of Ship Research*, Vol. 44, No. 3, pp. 186–196.
 - Shin, Y.K., Lim, K.S. and Lee, S.K., 2005, “A Research of the Mathematical Modeling for the Estimation of Underwater Vehicle's Tail Plane Efficiency,” *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 42, No. 3, pp. 190–196.
 - Sirmalis, J.E., Lisiewicz, J.S. and Gagliardi, T.C., 2001, “Pursuing the MANTA Vision : Recent At-Sea Technology Demonstration Results,” *Proceedings, Undersea Defense Technology Conference, Hawaii*.
 - Sohn, K.H., Lee, S.K. and Ha, S.P., 2006, “Mathematical Model for Dynamics of Manta-type Unmanned Undersea Vehicle with Six Degrees of Freedom and Characteristics of Manoeuvrability Response,” *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 43, No. 4, pp. 399–413.
 - Son, N.S., Rhee, K.P., Lee, S.M. and Yeo, D.J., 2001, “A Design of Collision Avoidance System of an Underwater Vehicle,” *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 38, No. 4, pp. 23–29.
 - Tamashima, M., Matsui, S. and Ogura, M., 1983, “Quantitative Measurements with Small Models of Ships in a Circulating Water Channel,” *Experiments in Fluids*, pp. 135–142.
 - van Lammeren, W.P.A., van Manen, J.D. and Oosterveld, M.W.C., 1969, “The Wageningen B-Screw Series,” *Transaction of SNAME*, Vol. 77, pp. 269–317.
 - Whicker, L.F. and Fehner, L.F., 1958, *Free-stream Characteristics of a Family of Lowaspect Ratio Control Surfaces*, DTMB Report 933.
 - Yeo, D.J. and Rhee, K.P., 2005, “A Study on the Sensitivity Analysis of Submersibles' Manoeuvrability,” *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 42, No. 5, pp. 458–465.
 - Yun, K.H., Rhee, K.P. and Yeo, D.J., 2005, “A Study on the Guidance Law Suitable for Target Tracking System of an Underwater Vehicle,” *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 42, No. 4, pp. 299–306.



< 배 준 영 > < 손 경 호 >