

Manta형 무인잠수정의 대각도 받음각을 갖는 조종운동 수학모델에 관한 연구

배준영*, 손경호†*, 김 준**

한국해양대학교*, 한국해양대학교 대학원**

A Study on Mathematical Model of Manoeuvring Motion of Manta-type
Unmanned Undersea Vehicle at Large Attack Angles

Jun-Young Bae*, Kyoung-Ho Sohn†* and June Kim**

Korea Maritime University*, Korea Maritime University Graduate School**

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 designed with the similar concept of UUV called Manta Test Vehicle(MTV), which was originally built by the Naval Undersea Warfare Center, USA(Lisiewicz and French 2000, Sirmalis et al. 2001, U.S. Navy 2004). The present study deals with evaluation of extreme motion of MUUTV at large attack angles. Extreme motion contains, for example, rising and depth change due to operation of hovering thrusters attached to MUUTV, lateral motion due to ocean current applied to MUUTV at low advance velocity, and so on. Numerical simulation technique has been utilized. The previous mathematical model on manoeuvring motion of MUUTV(Bae et al. 2009a) is basically adopted. Based on the results of present model experiment on extreme motion, the mathematical model is revised and supplemented in order to describe extreme motion. The hydrodynamic derivatives related to extreme motion are obtained from present model experiment and the other derivatives are referred to previous work(Bae et al. 2009a).

※Keywords: Unmanned Undersea Vehicle(무인잠수정), Mathematical model of manoeuvring motion(조종운동 수학모델), Large attack angles(대각도 받음각), Extreme motion(극한운동) Model experiment in circulating water channel(회류수조 모형실험)

접수일: 2009년 9월 3일, 승인일: 2010년 3월 28일

†교신저자: sohnkh@hhu.ac.kr, 051-410-4303

1. 서언

미래의 해군력 증강을 위한 수중유도무기체

개발의 일환으로 다양한 설계개념을 도입한 수중운동체 기술이 제안되고 있다(Choi 2008, Shin et al. 2005, Son et al. 2001, Yun et al. 2005). 미해군 소속 NUWC(Naval Undersea Warfare Center)에서는 1990년대 중반부터 Manta Test Vehicle(이하 MTV라 함)이라 불리는 가오리 형상의 무인잠수정에 대한 연구를 수행하였고, 최근까지 약 30회 이상의 해상시험도 실시하였다(Lisiewicz and French 2000, Sirmalis et al. 2001, U.S. Navy 2004). MTV는 평상 시에는 모함인 잠수함 동체 상부의 일부로 장착되어 있다가 필요 시에만 잠수함으로부터 분리되어 자료획득 등 수중 작전 임무 수행에 투입된다. MTV의 설계개념을 기초로 하여 Sohn et al.(2006)은 Manta형 무인잠수정(Manta-type Unmanned Undersea Test Vehicle, 이하 MUUTV라 함)을 제안하였으며, Bae and Sohn(2009a)은 모형시험과 수치 시뮬레이션 기법을 통해 MUUTV의 일반 조종운동 특성에 관해 연구하였다.

지난 연구에 이어서 본 연구에서는 MUUTV의 극한운동(extreme motion), 즉 대각도 받음각을 갖는 조종운동 특성에 관해 다루었다. 구체적으로 수직, 수평 받음각이 각각 $0^\circ \sim \pm 180^\circ$ 영역에서의 동유체력 특성과 호버링 스러스터에 의한 수직 추력 특성에 관한 모형실험을 수행하였으며, 이로부터 대각도 받음각을 갖는, 6자유도 조종운동 수학모델을 제안하였다. 아울러 수치 시뮬레이션 기법을 통해 MUUTV의 상승운동, 심도변경운동, 표류운동 등 대각도 받음각을 갖는 조종운동의 특성을 검토하였다.

2. MUUTV의 기하학적 형상

Fig. 1과 Table 1은 MUUTV의 형상과 주요 제원을 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. 1에서

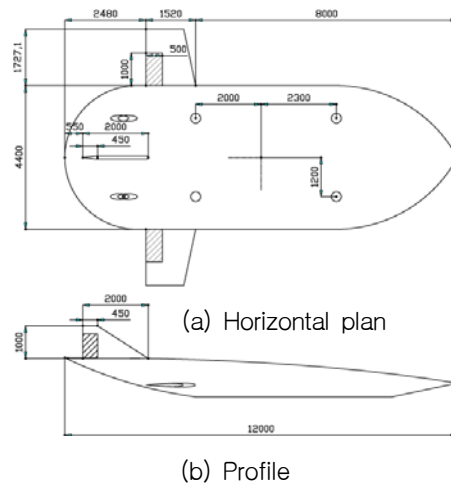


Fig. 1 Drawings of MUUTV

Table 1 Principal dimensions of MUUTV

Item	Dimension
Fuselage	
length	L = 12.0 m
breadth	B = 4.4 m
height	H = 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	0.50 m
tip chord	0.50 m
span	1.00 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)	

빗금친 부분이 수평타와 수직타를 나타내고 있다. 또한 MUUTV의 바닥에는 호버링(hovering)을 위한 4개의 스러스터(thruster)와 선미에는 추진을 위한 2개의 스러스터가 설치되어 있다.

3. 대각도 받음각을 갖는 조종운동의 수학모델

3.1 좌표계

MUUTV를 강체라 가정하고 Fig. 2와 같이 MUUTV에 고정된 직각좌표계(물체고정좌표계)를 $O-xyz$, 공간좌표계를 $O_E-X_EY_EZ_E$ 로 취한다. 물체고정좌표계의 원점은 MUUTV의 동체 중앙횡단면에서 동체 높이의 중간위치에 취하고, MUUTV의 선수방향을 x , 정횡우현방향을 y , 선저방향을 z 축의 양(+의) 방향으로 정의한다. 공간좌표계의 원점은 MUUTV의 제어장치의 작동 명령 시점으로 취한다. 본 연구에서 사용된 기호들을 Fig. 2에 나타낸다. 그리고 MUUTV에 대한 유체 유입각을 받음각이라 정의하며, Fig. 2에서 α 는 수직 받음각, β 는 수평 받음각을 나타낸다. 이하 수직 받음각은 영각으로, 수평 받음각은 사향각으로 기술하기로 한다.

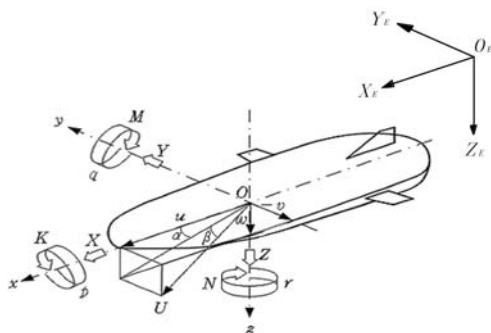


Fig. 2 Coordinate system and notation

3.2 대각도 받음각에서의 동유체력 측정

(1) 실험장치

대각도 받음각에서의 동유체력 측정 실험은 MUUTV의 실물 형상을 1/10로 축소한 모형을 이용하여 회류수조에서 실시되었다. 회류수조는 길

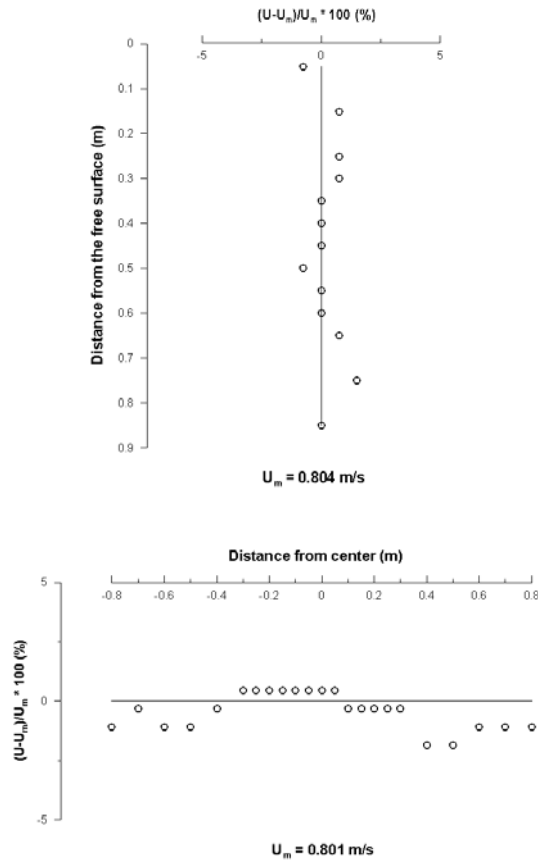


Fig. 3 Velocity distribution at working section of circulating water channel (U_m : mean velocity)

이 12.5 m, 폭 2.2 m, 높이 5.2 m 인 2임펠러 방식의 수직순환형으로서 관측부는 길이 5 m, 폭 1.8 m, 높이 1.2 m, 수심 0.9 m 이다. Fig. 3은 관측부 중앙위치에서 측정된 수직방향 유속분포도와 수심 0.45 m 위치에서의 수평방향 유속분포도를 나타내고 있다. 수심 0.3 m ~ 0.6 m 에서의 수직방향 평균유속은 0.804 m/s, 수평방향 -0.6 m ~ 0.6 m 에서의 평균유속은 0.801 m/s 이다.

Fig. 4는 대각도 수평 받음각에서의 동유체력 측정(이하 사향시험이라 함)을 위한 실험장치를 보이고 있다. 대각도 수직 받음각에서의 동유체력 측정(이하 영각시험이라 함)의 경우에는 모형을 90° 회전시켜서 모형의 측면부를 실험장치의 스

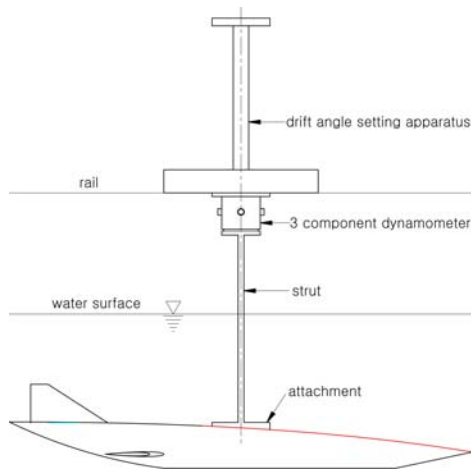


Fig. 4 Experimental apparatus for static test at large drift angles

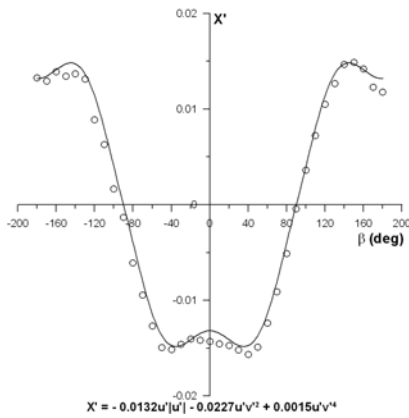
터럿(strut)과 연결하면 된다. 모형은 가능한 한 회류수조 깊이의 중간위치에 설치되어 자유표면의 영향이 최소화 되도록 하였다. 그리고 3분력계의 정격용량은 힘 5 kgf, 모멘트 1 kgf·m 이다. 사항시험 시의 평균유속은 0.8 m/s (Reynolds수 : 0.905×10^6) 이었고, 영각시험의 경우 3분력계의 정격용량 한계로 인하여 평균유속을 0.254 m/s (Reynolds수 : 0.307×10^6)로 낮추어 실험을 수행하였다.

(2) 동유체력 측정 결과

사항각의 전 영역, 즉 $\beta : 0^\circ \sim \pm 180^\circ$ 범위에서의 동유체력 측정 결과를 Fig. 5에 나타낸다. 아울러 Fig. 5에는 사항각 전 영역의 실험 결과를 표현할 수 있는 수학적모델과 수학적모델에 의한 커브피팅 결과를 함께 나타내고 있다. 수학적모델은 실험결과로부터 Fourier 급수해석을 통해 구하였다. 여기서 힘은 $0.5\rho L^2 U^2$ 으로, 모멘트는 $0.5\rho L^3 U^2$ 으로 각각 무차원화 하였으며(단, ρ : 유체의 밀도), $u' = \cos\beta$, $v' = -\sin\beta$ 이다. 한편, Fig. 5에서 Y' 와 N' 그래프에는 MUUTV 동체(fuselage)만에 작용하는 동유체력 측정 결과를 추가하여 나타내고 있으며 부가물이 있을 때의 동유체력 측정 결과와 비교하고 있다. 부가물의 유무에 따라 특히 N' 그래프에서 큰 차이를 보이고

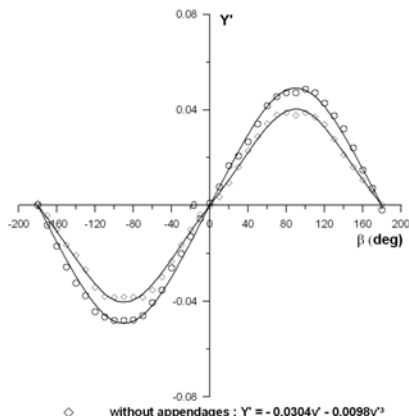
있음을 알 수 있다. 이는 부가물이 있을 때 특히 선미 수직판에 의해 MUUTV의 측면형상에 전후 비대칭성이 강하게 작용하고 있기 때문으로 생각된다. N' 그래프에서 $\beta = \pm 90^\circ$ 일 때, 즉 MUUTV가 횡방향으로 움직일 때 측면형상의 전후 비대칭성에 의해 cross-flow drag에 기인하는 큰 선수동요모멘트가 발생되고 있음을 알 수 있다. 이 영향으로 인해 선형 유체력미계수 Y'_v 는 음(-), N'_v 는 양(+)의 값을 가짐으로써 힘의 작용점이 동체 후반부에 위치하고 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 일반 수상선의 동유체력 특성과는 큰 차이를 보이고 있는 것으로 지적될 수 있다(Bae and Sohn 2009b). 한편, 사항시험에서는 MUUTV 모형에 작용하는 횡동요모멘트(K)는 직접 측정되지 아니하였으므로 횡방향힘(Y)의 작용점이 부심위치에 있다고 가정하고 Y' 의 수학적모델과 유사한 형태로 K' 의 수학적모델을 나타내기로 한다.

다음으로 영각의 전 영역, 즉 $\alpha : 0^\circ \sim \pm 180^\circ$ 범위에서의 동유체력 측정 결과와 수학적모델에 의한 커브피팅 결과를 Fig. 6에 나타낸다. 여기서 $u' = \cos\alpha$, $w' = \sin\alpha$ 이다. 본 연구에서 제안된 수학적모델이 대각도 영각에 대해서 전반적으로 잘 적용될 수 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 $-20^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$ 영역, 즉 일반 조종운동 영역에서는 커브피팅 결과의 정도(accuracy)가 떨어진다는 것을 알 수 있다. 그리고 MUUTV의 상하 비대칭 형상으로 인해 α 가 양(+)인 영역과 음(-)인 영역에서 동유체력이 서로 대칭성을 보이고 있지 않다는 것을 알 수 있다. 또한 X' 그래프에서 측정 결과가 일반 양력체에 작용하는 힘의 분포와는 다른 기이한 현상을 보이고 있다. 즉, $\alpha = 120^\circ$ 부근에서 양(+)의 피크치를, $\alpha = -60^\circ$ 부근에서 음(-)의 피크치를 보이고 있다. 이러한 현상은 MUUTV 동체 하부 뒤쪽 형상과 동체 상부 앞쪽 형상이 크게 각이어져 있어서 이 부분으로 유체가 유입될 때 큰 항력이 발생되는데, $\alpha = 120^\circ$ 부근에서는 항력이 큰 추력($X' > 0$)으로 작용하고 $\alpha = -60^\circ$ 부근에서는 항력이 큰 저항($X' < 0$)으로 작용하는 데 기인된다고 생각된다. 이와 유사한 X' 분포는 수상선의



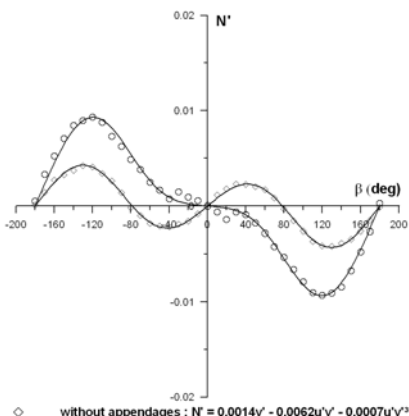
$$X' = -0.0132u[u] - 0.0227u^2v^2 + 0.0015u^4v^4$$

(a) surge force



◇ without appendages : $Y' = -0.0304v - 0.0098v^3$
 ○ with appendages : $Y' = -0.0440v - 0.0051v^3$

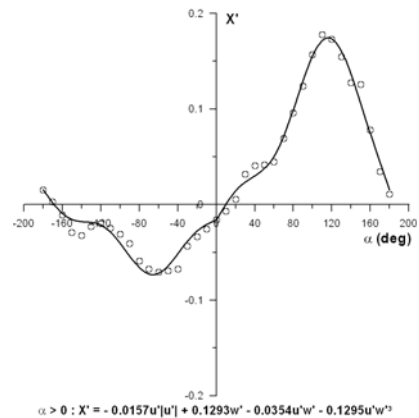
(b) sway force



◇ without appendages : $N' = 0.0014v - 0.0062u^2v - 0.0007u^4v^3$
 ○ with appendages : $N' = 0.0069v - 0.0065u^2v - 0.0016u^4v^3$

(c) yaw moment

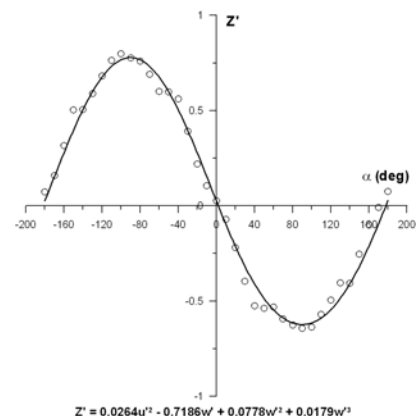
Fig. 5 Non-dimensional forces and moment obtained from static test at large drift angles and fitting lines



$$\alpha > 0 : X' = -0.0157u[u] + 0.1293w' - 0.0354u^2w' - 0.1295u^4w'^3$$

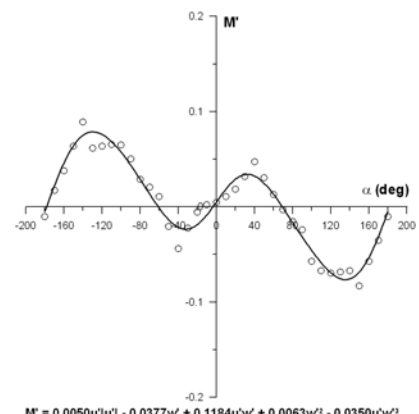
$$\alpha < 0 : X' = -0.0157u[u] + 0.0539w' - 0.0259u^2w' + 0.1000u^4w'^3$$

(a) surge force



$$Z' = 0.0264u^2 - 0.7186w' + 0.0778w'^2 + 0.0179w'^3$$

(b) heave force



$$M' = 0.0050u[u] - 0.0377w' + 0.1184u^2w' + 0.0063w'^2 - 0.0350u^4w'^3$$

(c) pitch moment

Fig. 6 Non-dimensional forces and moment obtained from static test at large inclined angles and fitting lines

수평운동의 경우 측면 형상에 전후 비대칭성이 강한 트롤러선 모형실험에서도 지적된 바 있다(Umeda and Yamakoshi 1989).

3.3 호버링 스텐스터의 작동에 의한 동유체력 측정

호버링 스텐스터의 작동에 의한 동유체력을 측정하기 위해 MUUTV의 실물 형상을 1/10로 축소 한 모형을, 사항시험에 이용한 모형과는 별도로 제작하였다. 호버링 스텐스터는 MUUTV 바닥에 수직방향으로 총 4개가 설치되어 있으나, 본 연구에서 제작한 모형에는 전방좌측(fore port side) 호버링 스텐스터 1개만을 수직 관통형으로 설치 하였다. 스텐스터로 사용된 모형 프로펠러의 주요 제원을 Table 2에 나타낸다. 그리고 호버링 스텐스터의 작동에 의한 동유체력 측정을 위한 실험장치를 Fig. 7에 나타낸다. Fig. 7에서 프로펠러 구동용 서보모터는 수밀구조 형식으로 되어 있으며, 외부로 연결된 케이블을 통해 전원 공급과 프로펠러 회전수를 제어하도록 하였다. 실험의 목적은 호버링 스텐스터의 추력 측정 뿐만 아니라 추력에 미치는 전진속도의 영향을 파악하는 데 있다. 실험은 3.2절에서 언급한 회류수조에서 실시되었으며, 추력에 미치는 전진속도의 영향을 파악하기 위해서는 모형을 회류수조 물의 흐름 방향(종방향)으로 설치하여야 하는데, 이렇게 설치함으로써 프로펠러 위치로부터 수조 관측부 측벽까지 약 0.9 m의 여유거리 밖에 없기 때문에 프로펠러 분출류(jet stream)가 수조 관측부 측벽에 부딪히게 되어 흐름의 일부가 제약을 받을 수 있다. 즉, 회류수조 측벽효과(blockage effect)가 문제될 수 있다. 먼저 이 측벽효과를 파악하기 위해서 전진속도가 0인 상태에서 모형을 종방향으로 설치했을 때(측벽효과 있음)와 횡방향으로 설치했을 때(측벽효과 없음) 각각 추력을 측정하여 이들을 Fig. 8에 비교하였다. Fig. 8에서 횡축은 프로펠러 회전수 n_H 를, 종축은 추력의 무차원치 Z_H^* (단, Fig. 2의 부호 규약에 따라 상방향 힘을 음(-)으로 정의)를 나타내고 있다. 여기서 추력 Z_H 는 $\rho n_H^2 D_H^4$ 으로 무차원화 하였다(단, D_H 는 프로펠

러 직경). Fig. 8에 의하면 모형을 종방향으로 설치하였을 때 회류수조 관측부 측벽 영향으로 추력이 약간 줄어든다는 것을 알 수 있다. 참고로, 전진속도 0인 상태에서 프로펠러 주요목 자료만을 이용하여 van Lammeren et al.(1969) 방법에 의해 프로펠러 단독성능을 구할 수 있으며 그 결과 Z_H^* 는 -0.29로 추정된다. 즉, 호버링 스텐스터의 추력감소계수는 약 0.17이다. 다음으로 모형을 종방향으로 설치하여 전진속도가 있는 상태에서의 추력 측정 결과를 Fig. 9에 나타낸다. 실험은 시차를 두고 2회에 걸쳐서 수행되었으며 전반적으로 재현성은 유지되고 있으나 실험점의 분산(scattering) 정도가 심하다는 것을 알 수 있다. Fig. 9에서 횡축은 전진속도를 Froude수(U/\sqrt{gL} 단, g : 중력가속도)로 나타내고 있으며, 음(-)의 값은 후진 상태를 의미한다. Fig. 9에서 후진 시보다 전진 시에 속도의 영향을 크게 받는다는 것을 알 수 있다. 이러한 현상을 Chislett(1966)은 다음과 같이 설명하였다. 호버링 스텐스터의 작동에 의해 발생된 분출류가 MUUTV 하부 주변의 주흐름과 간섭현상으로 작용하여 MUUTV 하면에 저압대(reduced pressure regions)를 형성하여 추력과 반대방향의 힘이 작용됨으로써 결과적으로 추력이 감소된 효과로 나타난다. 그리고 분출류의 영향권에 들어가는 MUUTV 하부 면적이 넓을수록 저압대가 크게 형성되므로 추력 감소 현상이 크다고 할 수 있다. 즉, Fig. 9에서 후진 시보다 전진 시에 추력감소가 크다는 것을 알 수 있다. Fig. 10은 추력에 의한 종동요멘트의 무차원치 M_H^* 에 미치는 속도 영향을 나타낸 측정 결과이다. 여기서 종동요멘트 M_H 는 $\rho n_H^2 D_H^4 L$ 로 무차원화 하였다. Fig. 11은 M_H^* 를 ($-Z_H^*$)로 나눈 값, 즉 추력의 작용점에 미치는 속도 영향을 나타낸 것이다. 이상과 같이 호버링 스텐스터의 작동에 의한 추력과 모멘트 특성을 실험적으로 고찰하였다. MUUTV에는 실제로 전방에 2개 후방에 2개 총 4개의 호버링 스텐스터가 설치되어 있는데, 이상의 실험결과로부터 유추해 보면 전방 스텐스터와 후방 스텐스터가 동시에 작동할 때에는 추력에 미치는 전진속도의 영향이 복잡하게 나타날 것으로 생각된다. 그러나 실

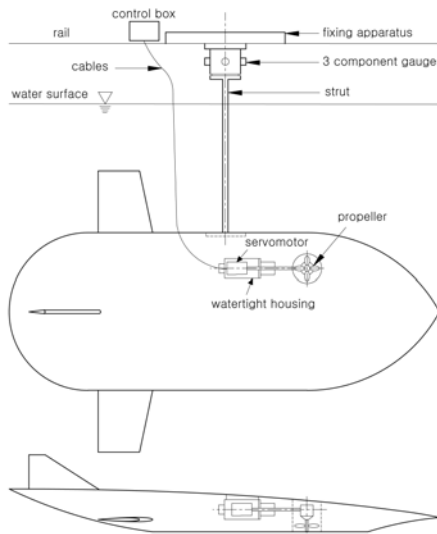


Fig. 7 Experimental apparatus for measurement of force and moment acting on MUUTV due to operation of hovering thruster

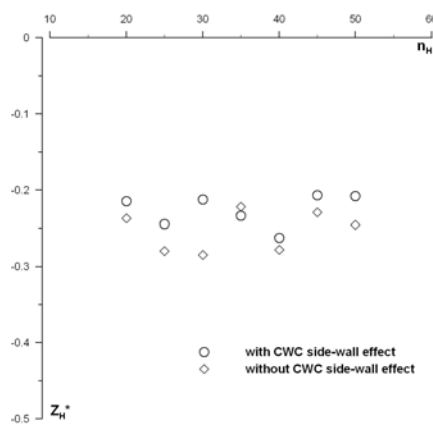


Fig. 8 CWC side-wall effect on non-dimensional heave force acting on MUUTV due to operation of hovering thruster at zero advance velocity

제 호버링 운동 시에는 전진속도가 극미속, 구체적으로 약 1 kt (Froude수 0.047) 미만으로서 추력이 속도의 영향을 크게 받지 않는 영역으로 간주하여 속도의 영향을 무시할 수 있을 것으로 생

Table 2 Principal dimensions of model propeller adopted to hovering thruster

Propeller	Dimension
diameter	0.061 m
pitch ratio	0.709
blade area ratio	0.490
number of blade	4

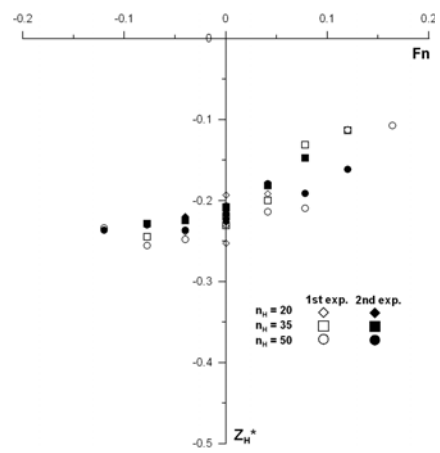


Fig. 9 Non-dimensional heave force acting on MUUTV due to operation of hovering thruster as function of Froude number

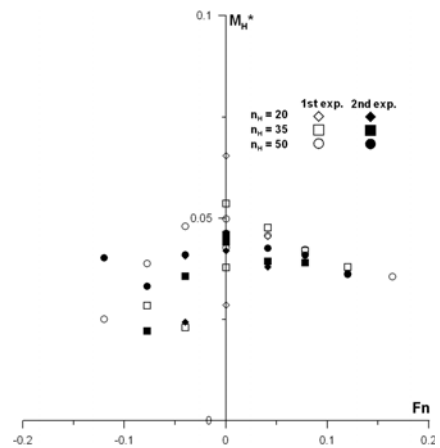


Fig. 10 Non-dimensional pitch moment acting on MUUTV due to operation of hovering thruster as function of Froude number

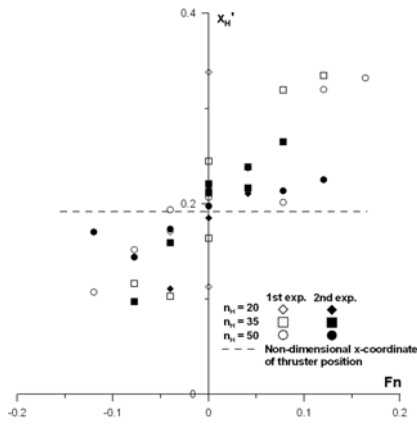


Fig. 11 Non-dimensional x-coordinate of application point of Z_H as function of Froude number

각된다. 따라서 본 연구에서는 호버링 스러스터의 작동에 의한 동유체력을 다음과 같이 간단한 형태로 수학모델화 한다. 즉, 추력 특성 Z_H^* 는 설치 위치와 전, 후진 속도에 따라 변화하지 않으며, Z_H^* 의 작용점은 호버링 스러스터의 기하학적 설치 위치에 있다고 간주한다.

3.4 6자유도 운동 수학모델

Bae and Sohn(2009a)은 Manta형 무인잠수정의 일반 조종운동 수학모델을 제안한 바 있다. 대각도 받음각을 갖는 조종운동 수학모델은 Bae and Sohn(2009a)의 연구결과에 3.2절에서 언급한 대각도 받음각에서의 동유체력 측정 결과와 3.3절에서 언급한 호버링 스러스터의 작동에 의한 추력 측정 실험 결과를 반영하여 정립하기로 한다. 또한 MUUTV가 함속도 0인 상태에서 수직면 또는 수평면 내에서 회전운동을 하는 경우에는 회전각속도의 제곱에 비례하는 동유체력모멘트가 회전운동과 반대방향으로 작용하게 되는데, 이러한 영향을 수평면에서는 $N_{r|r}|r|$, 수직면에서는 $M_{q|q}|q|$ 의 형태로 표현하여 수학모델에 포함시키기로 한다. 제안된 6 자유도 수학모델을 식(1)~(6)에 나타낸다. 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 각

각 무게중심의 x , z 좌표와 부심의 x , z 좌표를 의미한다. 또한 ϕ , θ 는 횡동요각, 종동요각을 나타내며 $\dot{(\cdot)}$ 기호는 시간미분을 의미한다. X_{P1} 과 X_{P2} 는 선미의 우현과 좌현에 설치되어 있는 추진용 스러스터의 추력을 의미하고, n_p 은 매 초당 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. 단, 횡동요 제어를 위해 좌, 우현 수평타를 서로 반대칭적으로 취할 때에는 η_s 라 표현하며, 우현타 상방향, 좌현타 하방향일 때를 양(+)의 방향으로 정의한다. y_H 는 우현측 호버링 스러스터의 y 좌표, x_{H1} 과 x_{H3} 는 각각 전방, 후방 측 호버링 스러스터의 x 좌표, y_P 는 우현측 추진용 스러스터의 y 좌표이다.

- Surge force equation

$$\begin{aligned}
 m[\dot{u} - vr + wq - x_G(\dot{q}^2 + r^2) + z_G(pr + \dot{q})] = & \\
 & \frac{\rho}{2} L^4 (X_{qq}' \dot{q}^2 + X_{rr}' r^2 + X_{pr}' pr) \\
 & + \frac{\rho}{2} L^3 (X_u' \dot{u} + X_{vr}' vr + X_{wq}' wq) \\
 & + \frac{\rho}{2} L^2 (X_{uu}' u|u| + X_{uvv}' \frac{uv^2}{U} + X_{uvvv}' \frac{uv^4}{U^3} \\
 & + X_w' wU + X_{uw}' uw) \\
 & + \frac{\rho}{2} L^2 (X_{uww}' \frac{uw^3}{U^2} + X_{\delta_r \delta_r}' u^2 \delta_r^2 \\
 & + X_{\delta_s \delta_s}' u^2 \delta_s^2 + X_{\eta_s \eta_s}' u^2 \eta_s^2) \\
 & - (W - B) \sin \theta + (X_{P1} + X_{P2}) \quad (1)
 \end{aligned}$$

단, $X_P = \rho n_p^2 D_p^4 (1-t) K_P$

- Sway force equation

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

- Heave force equation

$$m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + \dot{q}^2) + x_G(pr - \dot{q})] =$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\rho}{2} L^4 (Z'_q \dot{q} + Z'_{pp} p^2 + Z'_{pr} pr) \\
& + \frac{\rho}{2} L^3 (Z'_w \dot{w} + Z'_{vp} vp + Z'_q uq) \\
& + \frac{\rho}{2} L^2 (Z'_u |u| + Z'_w wU + Z'_{ww} w^2 + Z'_{www} \frac{w^3}{U} \\
& + Z'_{\delta s} u^2 \delta s) + (W - B) \cos \theta \cos \phi \\
& + (Z_{H1} + Z_{H2} + Z_{H3} + Z_{H4})
\end{aligned} \quad (3)$$

단, $Z_H = \rho n_H^2 D_H^4 Z_H^*$

- Roll moment equation

$$\begin{aligned}
I_{xx} \dot{p} + (I_{zz} - I_{yy}) q r - m [z_G (\dot{v} - wp + ur) \\
+ x_G z_G (\dot{r} + pq)] = \\
\frac{\rho}{2} L^5 (K'_p \dot{p} + K'_r r + K'_{qr} qr + K'_{p|p|} p|p|) \\
+ \frac{\rho}{2} L^4 (K'_p up + K'_r ur + K'_v v + K'_{wp} wp \\
+ K'_{vq} vq + K'_{wr} wr) \\
+ \frac{\rho}{2} L^3 (K'_v vU + K'_{vvv} \frac{v^3}{U} + K'_{vw} vw + K'_{\delta r} u^2 \delta r \\
+ K'_{\eta s} u^2 \eta s) - (z_G W - z_B B) \cos \theta \sin \phi \\
+ (Z_{H1} - Z_{H2} + Z_{H3} - Z_{H4}) y_H
\end{aligned} \quad (4)$$

- Pitch moment equation

$$\begin{aligned}
I_{yy} \dot{q} + (I_{xx} - I_{zz}) pr + m [z_G (\dot{u} - vr + wq) \\
- x_G (\dot{w} - uq + vp) + x_G z_G (p^2 - r^2)] = \\
\frac{\rho}{2} L^5 (M'_q \dot{q} + M'_{pr} pr + M'_{rr} r^2 + M'_{pp} p^2 + M'_{q|q|} q|q|) \\
+ \frac{\rho}{2} L^4 (M'_w \dot{w} + M'_q uq + M'_{vr} vr + M'_{vp} vp) \\
+ \frac{\rho}{2} L^3 (M'_u |u| + M'_w wU + M'_{uw} uw + M'_{ww} w^2) \\
+ \frac{\rho}{2} L^3 (M'_{www} \frac{w^3}{U} + M'_{\delta s} u^2 \delta s) \\
- (x_G W - x_B B) \cos \theta \cos \phi - (z_G W - z_B B) \sin \theta \\
- (Z_{H1} + Z_{H2}) x_{H1} - (Z_{H3} + Z_{H4}) x_{H3}
\end{aligned} \quad (5)$$

- Yaw moment equation

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

$$+ (X_{P2} - X_{P1}) y_P \quad (6)$$

4. 대각도 받음각을 갖는 조종운동의 수치 시뮬레이션

4.1 유체력미계수 등

질량, 질량관성모멘트 및 부심의 위치는 CAD 상용 프로그램인 CATIA를 이용하여 MUUTV 형상으로부터 구하였다. 단, 질량분포는 균일하며 무게 중심은 부심보다 0.2 m 아래(실물 기준)에 있는 것으로 가정하였다. 부가질량과 부가관성모멘트는 strip 이론을 적용하여 구하였다(Sohn et al. 2006). 감쇠유체력미계수의 경우 속도 관련 유체력미계수는 3.2절에서의 실험결과를 이용하였고, 각속도 관련 선형 유체력미계수는 Lewis(1989)의 방법에 따라 동체의 경우에는 세장체이론(slender body theory)을 적용하고 부가물의 경우에는 Whicker and Fehlner(1958) 추정식을 이용하여 각각의 동유체력을 구하여 합산한다(Sohn et al. 2006). 세장체이론을 적용할 때 effective trailing edge의 위치는 3.2절에서의 동유체력 측정 결과와 부가물의 설치위치, 크기 등을 고려하여 추정하였다. 그리고 각속도 관련 비선형 유체력미계수 $N'_{r|r|}$ 와 $M'_{q|q|}$ 를 구하기 위해서는 $U = 0$ 인 상태에서 강제구속모형시험(예, yaw rotating test (Takashina 1986))을 수행하여야 하는데 본 연구에서는 별도의 실험은 수행하지 않고 cross-flow 모델을 적용하여 추정하기로 한다(Takashina 1986).

$$N'_{r|r|} = -\frac{1}{32} \left(\frac{H}{L} \right) C_{D0} \quad (7)$$

$$M'_{q|q|} = -\frac{1}{32} \left(\frac{B}{L} \right) C_{D1} \quad (8)$$

여기서 C_{D0} 와 C_{D1} 은 cross-flow 항력계수(단, C_{D0} 는 $0.5\rho L H U^2$, C_{D1} 는 $0.5\rho L B U^2$ 으로 무차원화)로서 3.2절의 $\beta = \pm 90^\circ$ 와 $\alpha = \pm 90^\circ$ 일 때의 동유체력 측정치로부터 구한다. 그 결과 $C_{D0} = 0.5$, $C_{D1} = 1.9$ 이다. 본 연구에서는 C_{D1} 이 C_{D0} 에 비해 큰 값으로 측정되었다는 것을 알

수 있다. 이러한 측정 결과는, 물론 모형의 측면과 평면 형상의 차이에도 기인될 수 있겠지만, Reynolds수의 영향에도 기인될 것으로 생각된다. 왜냐하면 3.2절에서 언급한 바와 같이 본 연구에

서의 영각시험은 비교적 낮은 Reynolds수에서 실험이 수행되었는데, 일반적으로 cross-flow 항력 계수는 Reynolds수의 영향을 크게 받을 것으로 생각되기 때문이다. 따라서 영각시험 결과(Fig. 6)는 대각도 상태에서 동유체력이 약간 과대한 값으로 평가되었다는 것을 지적해 둔다. 제어유체력은 제어판의 양력 측정 실험 결과(Bae and Sohn 2009a)와 Whicker and Fehlner(1958) 추정식으로부터 구하였다. 그리고 수치 시뮬레이션을 MUJTV의 실물 스케일로 수행하기 위해서 실물의 저항계수 X_{uu}' 를 Bae and Sohn(2009a)에서 제안한 방법에 따라 구하였으며, 마찬가지로 이유로 사항시험과 영각시험 결과의 surge 관련 유체력미계수도 X_{uu}' 에 비례하여 실물 스케일로 환산하여 구하기로 한다. 또한 호버링 스러스터의 추력 특성은 3.3절의 실험결과(Fig. 8에서 측벽효과가 없을 때의 Z_H^* 값의 평균치)를 이용하였고, 추진용 프로펠러의 추력계수 K_P 는 Wageningen B-screw series의 프로펠러 특성 추정식으로부터 구하였다(van Lammeren et al. 1969). 그리고 추력감소계수와 반류계수는 각각 수상선박에 대한 추정식으로부터 구하였다(Lewis 1989). Table 3에 유체력미계수 등의 값을 나타낸다.

Table 3 Hydrodynamic derivatives and other coefficients for numerical simulation

Derivative	Value	Derivative	Value
m'	0.03685	Z_{ww}'	0.01795
I_{zz}'	0.00034	$Z_{\dot{z}}'$	-0.02005
I_{yy}'	0.00170	$Z_{\dot{z}s}'$	0.01697
I_{zz}'	0.00200	Z_H^*	-0.24
x_G'	-0.02766	K_r'	-0.00159
z_G'	0.02569	K_r''	0.00000
x_B'	-0.02766	K_v'	-0.00034
z_B'	0.00903	$K_{p p }'$	0.00000
x_{H1}'	0.192	K_{wp}'	0.00034
x_{H3}'	-0.167	$K_{\dot{w}r}'$	0.00345
y_H'	0.10	$K_{\dot{w}q}'$	-0.00500
y_P'	0.10	K_{wr}'	0.00500
$X_{\dot{z}}'$	-0.00184	$K_{\dot{w}u}'$	-0.07861
X_{wq}'	-0.09747	K_p'	-0.00597
X_{rr}'	0.01886	K_v''	0.00040
X_{qq}'	-0.00730	K_{uvv}'	0.00005
X_{rr}'	-0.00230	K_r''	-0.00010
X_{pr}'	0.00034	$K_{\dot{s}r}'$	-0.00041
X_{vu}'	-0.00453	K_{qs}'	0.00346
X_{uvv}'	-0.00762	$M_{\dot{z}}'$	-0.00461
X_{uvvv}'	0.00028	$M_{\dot{z}''}$	-0.00730
$X_w' (\alpha > 0)$	0.03730	$M_{\dot{w}r}'$	-0.00034
$(\alpha < 0)$	0.01555	$M_{\dot{w}p}'$	-0.00230
$X_{uw}' (\alpha > 0)$	-0.01038	$M_{\dot{w}r}''$	0.00000
$(\alpha < 0)$	-0.00739	$M_{\dot{w}p}''$	0.00000
$X_{uwuw}' (\alpha > 0)$	-0.03713	$M_{\dot{w}q}'$	-0.02177
$(\alpha < 0)$	0.02875	$M_{\dot{w}r}''$	-0.00113
$X_{\dot{s}r\dot{s}r}'$	-0.00228	$M_{\dot{z}''}$	0.00499
$X_{\dot{s}s\dot{s}s}'$	-0.00733	$M_{\dot{w}''}$	-0.03772
$X_{\dot{q}s\dot{q}s}'$	-0.00733	M_{uw}'	0.11838
$Y_{\dot{z}}'$	-0.01886	M_{uw}''	0.00629
$Y_{\dot{p}}'$	-0.00034	M_{uwuw}'	-0.03499
$Y_{\dot{r}}'$	0.00230	$M_{\dot{z}''}$	-0.00287
$Y_{p p }'$	0.00000	$M_{\dot{s}s}'$	0.00463
Y_{wp}'	0.09747	N_r'	-0.00117
Y_{pq}'	0.00730	N_p'	0.00000
Y_p'	0.00000	N_v'	0.00230
Y_r'	0.01069	N_{wp}'	-0.00730
Y_v'	-0.04400	$N_{\dot{w}r}'$	0.00000
Y_{uvv}'	-0.00511	$N_{\dot{w}p}'$	-0.00156
$Y_{\dot{s}r}'$	-0.00502	$N_{\dot{p}q}'$	-0.00302
$Z_{\dot{z}}'$	-0.09747	N_r''	-0.00034
$Z_{\dot{z}''}$	-0.00730	N_{vq}'	0.00034
Z_{vp}'	-0.01886	N_v''	0.00692
Z_{pp}'	-0.00034	N_{uv}'	-0.00648
Z_{pr}'	0.00230	N_{uvvv}'	-0.00161
Z_r'	0.02642	N_r''	-0.00388
Z_u'	-0.71865	$N_{\dot{s}r}'$	0.00218
Z_{ww}'	0.07781		

4.2 조종운동 시뮬레이션

Table 3의 자료와 식(1)~(6)을 이용하여 MUJTV의 실물 스케일로 수치 시뮬레이션을 수행한다. 수치 시뮬레이션의 최종 결과는 운동계적을 공간좌표(X_E, Y_E, Z_E)와 Euler각(ϕ, θ, ψ)으로써 표시하게 된다. 대각도 받음각을 갖는 조종운동을 다루기 위해 수직운동의 경우에는 호버링 스러스터에 의한 부상운동과 심도변경운동을, 수평운동의 경우에는 조류에 의한 표류운동을 수치 시뮬레이션 항목으로 채택한다.

(1) 호버링 스러스터에 의한 부상운동과 심도 변경운동

호버링 스러스터의 프로펠러 명령회전수에 대한 실제 회전수는 다음과 같이 응답하는 것으로 가정한다.

$$T_M \dot{n}_H + n_H = n_H^* \quad (9)$$

여기서 T_M 은 시정수($T_M = 3$ sec), n_H^* 는 명령 회전수(rps), n_H 는 실제 회전수(rps)를 의미한다. 먼저 부상운동 시뮬레이션 결과를, 자세와 위치를

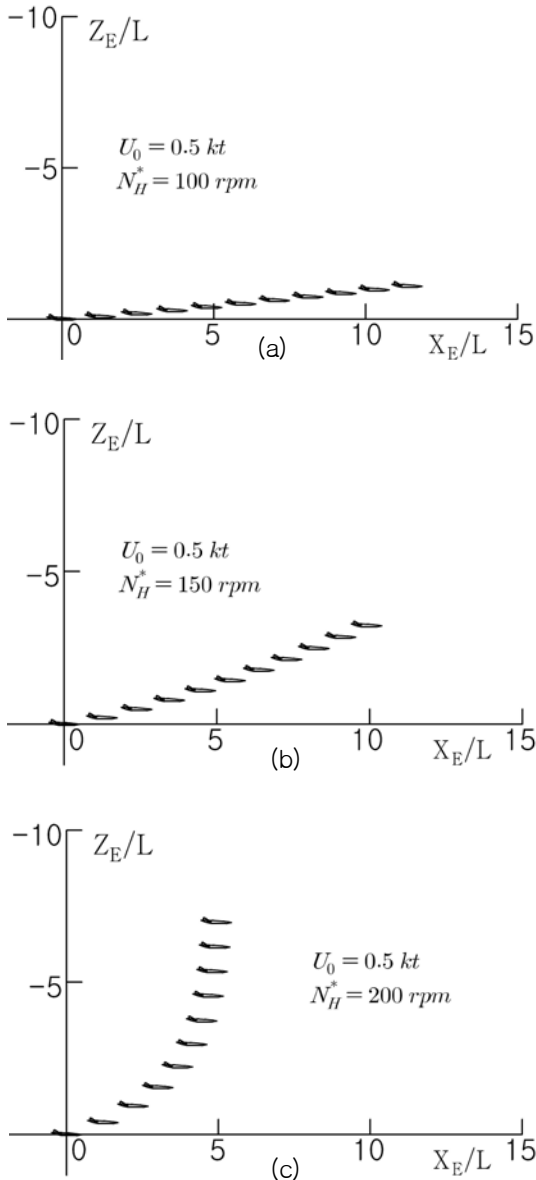


Fig. 12 Rising motion due to operation of hovering thrusters of MUUTV with initial advance velocity

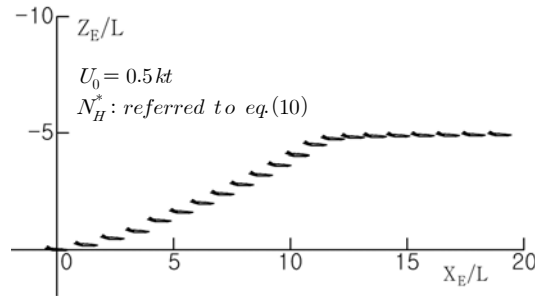


Fig. 13 Depth change motion due to operation of hovering thrusters of MUUTV with initial advance velocity

고려한 MUUTV 형상으로서 매 60 초 간격으로 Fig. 12에 나타낸다. 초기속도(U_0)는 $0.5 kt$ 이고 호버링 스러스터용 프로펠러의 매 분당 명령회전수(N_H^* 로 표기함)를 100, 150, 200 rpm 으로 가정했을 때의 계산결과를 비교해서 나타낸다. 명령회전수가 증가할수록 부상속도가 빨라지면서 전진속도가 감소한다는 것을 알 수 있다. 이것은 부상속도가 빨라질수록 큰 저항증가를 나타내는 영각 범위에 들어가기 때문이라 생각된다(Fig. 6(a)참조). 다음으로 수직 상방향으로의 심도변경운동 시뮬레이션 결과를 매 60 초 간격으로 Fig. 13에 나타낸다. 초기속도는 $0.5 kt$ 이고 호버링 스러스터용 프로펠러의 명령회전수는 다음과 같이 자동 조정되는 것으로 간주한다.

$$\begin{aligned} N_H^* &= 150 & : Z_2 \geq 0.9 Z_1 \\ N_H^* &= -20(Z_1 - Z_2) & : Z_2 < 0.9 Z_1 \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 Z_1, Z_2 는 각각 수직방향의 심도변경 목표위치(좌표)와 수직방향의 실제위치(좌표)를 나타내며 이들은 상방향이 음(-)의 값이다. 식(10)은, 실제위치가 목표위치의 90% 까지 움직일때에는 명령회전수가 일정하고 목표높이의 90% 를 초과했을 때는 목표위치와 실제위치의 차이에 비례해서 명령회전수가 결정된다는 것을 의미한다. Fig. 13 은 Z_1 값을 $-60 m (-5L)$ 로 가정했을 때의 계산결과이다. Fig. 13을 보면 목표위치 $-5L$ 에서 최종적으로 잘 수렴하고 있다는 것을 알 수 있다.

(2) 조류에 의한 표류운동

조류는 수평면 내에서의 2 차원 조류만을 생각한다. 조류에 기인하는 힘은 식(1)~(6)에서 별도의 외력항으로써 고려할 필요없이 운동변수 u, v 를 상대유속 즉, 대수속도라 정의함으로써 다음과 같이 조류의 영향이 포함될 수 있다. 공간좌표계 $O_E - X_E Y_E Z_E$ 에서 조류의 유속을 U_c , 유향각(X_E 축으로부터 조류의 방향까지의 각도)을 ψ_c 라 하면

$$\begin{aligned} u &= u^* + U_c \cos(\psi_c - \psi) \\ v &= v^* + U_c \sin(\psi_c - \psi) \end{aligned} \quad (11)$$

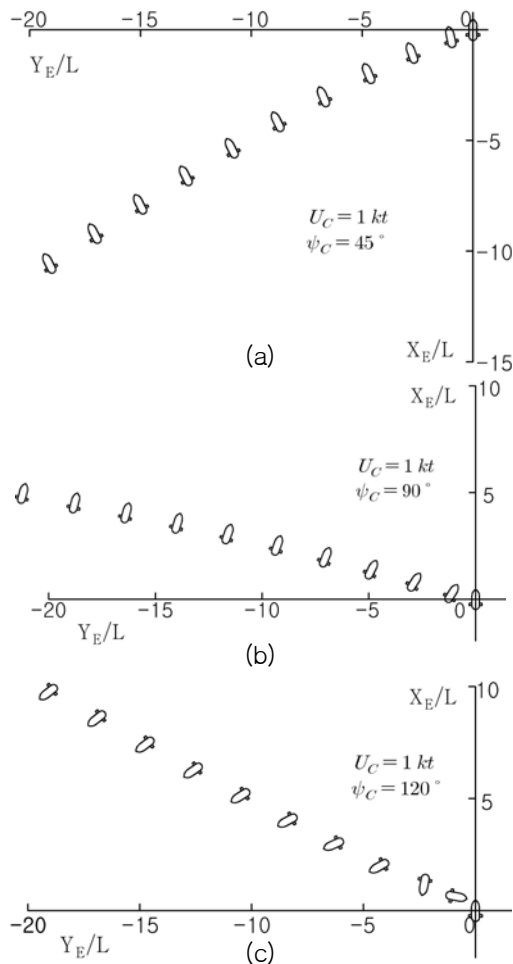


Fig. 14 Drifting motion due to horizontal current applied to MUUTV without initial advance velocity

의 관계가 성립된다. 여기서 u, v 는 대수속도, u^*, v^* 는 대지속도를 나타낸다. 식(11)로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{u} &= \dot{u}^* + U_c r \sin(\psi_c - \psi) \\ \dot{v} &= \dot{v}^* - U_c r \cos(\psi_c - \psi) \end{aligned} \quad (12)$$

식(12)의 관계를 식(1)~(6)에 대입하여 u^*, v^*, w, p, q, r 를 구해줌으로써 운동계적의 공간좌표(X_E, Y_E, Z_E)와 Euler각(ϕ, θ, ψ)을 구할 수 있다.

조류에 기인하는 수평 표류운동 시뮬레이션 결과를 매 60 초 간격으로 Fig. 14에 나타낸다. MUUTV의 초기속도는 0 이고, 조류의 속도는 1 kt, 유향각은 45, 90, 120 deg로 가정했을 때의 계산결과를 비교해서 나타낸다. Fig. 14에서 최종적으로는 조류에 의한 외력과 표류에 기인하는 동유체력이 서로 평형을 이루게 되는데, 최종 상태에서 MUUTV의 자세는 조류의 유향각에 따라서 상이함을 알 수 있다. 이것은 유향각에 따라서 초기에 MUUTV에 작용하는 선수동요모멘트의 크기가 상이하기 때문이라 생각된다. 특히 유향각이 120 deg 일 때 최대 크기의 양(+)의 선수동요모멘트가 작용함으로써(Fig. 5(c) 참조) 우현측으로의 회두운동이 빠르게 일어나고 있다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서 채택한 무인잠수정 MUUTV를 대상으로 회류수조에서의 모형실험을 통해 수직, 수평 대각도 받음각을 받을 때의 동유체력 특성과 호버링 스러스터의 추력 특성을 규명하였다. 또한 실험결과를 토대로 일반 조종운동에 적용한 수학모델(Bae and Sohn 2009a)에 적용함으로써 대각도 극한운동에 대한 수학모델을 제안하였다. 그리고 수치 시뮬레이션 기법을 적용하여 MUUTV의 호버링 운동(부상운동과 심도변경운동) 및 조류에 의한 수평 표류운동 등, 대각도 받음각을 갖는 조종운동 특성을 검토하였다.

앞으로 자유항주 모형실험을 통해 본 연구에서 제안된 수학적모델의 검증과 보완에 관한 연구가 추가되어야 할 것으로 생각된다.

후 기

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

참 고 문 헌

- Bae, J.Y., and Sohn, K.H., 2009a, "A Study on Manoeuvring Motion Characteristics of Manta-type Unmanned Undersea Vehicle", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 46, No. 2, pp. 114-126.
- Bae, J.Y., and Sohn, K.H., 2009b, "A Study on Hydrodynamic Force Characteristics of Manta-type Unmanned Undersea Vehicle with the Parameter of Appendage Shape", Journal of Navigation and Port Research, Vol. 33, No. 5, pp. 309-314.
- Chislett, M.S. and Bjorheden, O., 1966, "Influence of Ship Speed on the Effectiveness of a Lateral-thrust Unit", Hydro-OG Report Hy-8.
- Choi, J.R., 2008, "Analysis on Development Trend and Core Technology of Unmanned Underwater Vehicle", Defense Science & Technology Plus, Vol. 65, Agency for Defense Development.
- 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.
- 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.
- Takashina, J., 1986, "Ship Manoeuvring Motion due to Tugboats and Its Mathematical Model", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, No. 160, pp. 93-104.
- Umeda, N. and Yamakoshi, Y., 1989, "Hydrodynamic Forces Acting on a Longitudinally Non-symmetric Ship under Manoeuvring at Low Speed", Journal of the Kansai Society of Naval Architects, Vol. 127-138(in Japanese).
- U.S. Navy, 2004, "The Navy Unmanned Undersea Vehicle(UUV) Master Plan".
- 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 Fehlner, L.F., 1958, "Free Stream Characteristics of a Family of

Low Aspect Ratio Control Surfaces for Application to Ship Design”, DTRC Report 933.

- 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>



<김 준>