



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

# 조류의 영향을 받는 만타 무인잠수정의 운동 제어에 관한 연구

A Study on Motion Control of Manta-type Unmanned Undersea  
Vehicle with Influence of Current



2012년 2월

한국해양대학교 대학원

조선해양시스템공학과

김 인 철

本 論 文 을 金 仁 哲 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함 .

위원장 : 공학박사 김 준영 (인)

위 원 : 공학박사 현 범수 (인)

위 원 : 공학박사 손 경호 (인)



2012년 2월

한 국 해 양 대 학 교 대 학 원

# 목 차

Nomenclature	III
List of Figures	IV
List of Tables	V
Abstract	VI
제 1장 서론	1
제 2장 만타 무인잠수정의 형상 및 주요목	2
제 3장 6자유도 운동 수학모델	4
3.1 좌표계	4
3.2 대각도 사항시험	5
3.2.1 실험에 사용된 모형선의 명세	5
3.2.2 실험장치 및 실험방법	6
3.2.3 시험 결과 및 분석	8
3.3 4상한 영역 추진기 단독시험	10
3.3.1 실험에 사용된 모형 추진기의 명세	10
3.3.2 실험장치 및 실험방법	11
3.3.3 시험 결과 및 분석	12
3.4 만타 무인잠수정의 운동 수학모델	13
3.4.1 조류 중에서의 운동 수학모델	13
3.4.2 만타 무인잠수정에 작용하는 동유체력 미계수	18
3.4.3 수학모델의 검증	18
3.4.4 수치 시뮬레이션 기법에 의한 기본 조종운동의 검토	20

제 4장 만타 무인잠수정의 운동 제어 수치 시뮬레이션 .....	23
4.1 불균일 조류 중에서의 PD 제어 시스템 .....	23
4.2 추력 제어 .....	24
4.2.1 추력 제어 모델 .....	24
4.2.2 추력 제어 수치 시뮬레이션 결과 .....	24
4.3 수평면 운동 제어 .....	28
4.3.1 수평면 운동 제어 모델 .....	28
4.3.2 수평면 운동 제어 수치 시뮬레이션 결과 .....	29
4.4 수직면 운동 제어 .....	32
4.4.1 수직면 운동 제어 모델 .....	33
4.4.2 수직면 운동 제어 수치 시뮬레이션 결과 .....	33
제 5장 결론 .....	36
참고문헌 .....	37



## Nomenclature

$O-xyz$	The body fixed coordinate system
$O_E - X_E Y_E Z_E$	The earth fixed coordinate system
$\alpha$	Inclined angle (vertical angle of attack)
$\beta$	drift angle (horizontal angle of attack)
$\rho$	Density of water
$T$	Thrust
$K_T$	Thrust coefficient
$J$	Advance ratio
$n$	Revolution of propeller per second
$D$	Diameter of propeller
$m$	Mass
$X$	Surge force
$Y$	Sway force
$Z$	Heave force
$K$	Roll moment
$M$	Pitch moment
$N$	Yaw moment
$u$	Longitudinal velocity
$v$	Lateral velocity
$w$	Transverse velocity
$p$	Angular velocity about the $x$ direction
$q$	Angular velocity about the $y$ direction
$r$	Angular velocity about the $z$ direction
$I_{xx}$	Moment of inertia about the $x$ axis
$I_{yy}$	Moment of inertia about the $y$ axis
$I_{zz}$	Moment of inertia about the $z$ axis
$x_G$	$x$ coordinate of center of gravity



$z_G$	$z$ coordinate of center of gravity
$U_c$	Velocity of current
$\psi_c$	Angle of coming current from $X_E$ -axis
$\overline{U_c}$	Steady component of $U_c$
$\widetilde{U_c}$	Variable component of $U_c$
$\phi, \theta, \psi$	Angle of Roll, Pitch, Yaw
$\delta r$	Angle of rudder
$\delta s$	Angle of elevator
$\delta s_0$	Initial angle of elevator
$\delta r^*$	Ordered rudder angle
$Y_d'$	Non-dimensional ordered of Y-position
$\psi_d$	Ordered yaw angle
$A_1, A_2, A_3$	Control constants
$\dot{\delta r}$	Rotational velocity of rudder
$\dot{\delta r}_{\max}$	Maximum rotational velocity of rudder
$T_E$	Time constant
$\delta s^*$	Ordered elevator angle
$Z_d'$	Non-dimensional ordered depth
$\theta_d$	Ordered pitch angle
$C_1, C_2, C_3$	Control constants
$\dot{\delta s}$	Rotational velocity of elevator
$\dot{\delta s}_{\max}$	Maximum rotational velocity of elevator

## List of Figures

Fig 2.1 Design concept of Manta-type UUV.....	2
Fig 2.2 Drawing of Manta-type UUV.....	2
Fig 3.1 Coordinate system and notation .....	4
Fig 3.2 Velocity distribution at working section of circulating water channel ( $U_m$ : mean velocity).....	7
Fig 3.3 Experimental apparatus for static test at large drift angles.....	8
Fig 3.4 Non-dimensional forces and moment obtained from static test on Model-A at large drift angles and fitting lines.....	9
Fig 3.5 Non-dimensional forces and moment obtained from static test on Model-B at large drift angles and fitting lines.....	10
Fig 3.6 Experimental apparatus for propeller open water test.....	11
Fig 3.7 Four quadrants propeller open water test result.....	12
Fig 3.8 Fig 3.8 Turning motion in horizontal plane( $\delta r = 30^\circ$ ) .....	19
Fig 3.9 Zig-zag motion in horizontal plane( $30^\circ/30^\circ$ ).....	19
Fig 3.10 Turning motion in horizontal plane( $\delta r = 30^\circ$ ).....	20
Fig 3.11 Turning motion in horizontal plane in case of existence of current ( $\delta r = 30^\circ$ , $\psi_c = 45^\circ$ , $\overline{U}_c = 1$ kt).....	21
Fig 3.12 Zig-zag motion in horizontal plane( $20^\circ/20^\circ$ ).....	21
Fig 3.13 Zig-zag motion in vertical plane( $5^\circ/5^\circ$ ).....	22
Fig 3.14 Rising motion in vertical plane( $\delta s = 5^\circ$ ).....	22
Fig 4.1 Propulsion control simulation result in case of non-existence of current (0 knot $\rightarrow$ 5 knot).....	25
Fig 4.2 Propulsion control simulation result in case of non-existence of current (5 knot $\rightarrow$ 0 knot).....	25
Fig 4.3 Propulsion control simulation result in case of non-existence of current (5 knot $\rightarrow$ -3 knot).....	26
Fig 4.4 Propulsion control simulation result in case of existence of current	

(0 knot $\rightarrow$ 5 knot).....	26
Fig 4.5 Propulsion control simulation result in case of existence of current (5 knot $\rightarrow$ 0 knot).....	27
Fig 4.6 Propulsion control simulation result in case of existence of current (5 knot $\rightarrow$ -3 knot).....	27
Fig 4.7 Horizontal motion control(course change) simulation result in case of non-existence of current.....	29
Fig 4.8 Horizontal motion control(path change) simulation result in case of non-existence of current.....	30
Fig 4.9 Horizontal motion control(course keeping) simulation result in case of existence of current ( $\psi_c=90^\circ$ , $\bar{U}_c=1kt$ ).....	31
Fig 4.10 Horizontal motion control(course change) simulation result in case of existence of current ( $\psi_c=90^\circ$ , $\bar{U}_c=1kt$ ).....	31
Fig 4.11 Horizontal motion control(path change) simulation result in case of existence of current ( $\psi_c=90^\circ$ , $\bar{U}_c=1kt$ ).....	32
Fig 4.12 Vertical motion control(depth change) simulation result in case of non-existence of current.....	34
Fig 4.13 Vertical motion control(depth change) simulation result in case of existence of current ( $\psi_c=90^\circ$ , $\bar{U}_c=1kt$ ).....	35
Fig 4.14 Vertical motion control(depth keeping) simulation result in case of existence of current ( $\psi_c=90^\circ$ , $\bar{U}_c=1kt$ ).....	35

## List of Tables

Table 2.1 Principal dimension of Manta-type UUV.....	3
Table 3.1 Principal dimensions of experimental models of Manta-type UUV.....	6
Table 3.2 Condition of four quadrants propeller operation.....	12
Table 3.3 Hydrodynamic derivative acting on Manta-type UUV.....	18



# A Study on Motion Control of Manta-type Unmanned Undersea Vehicle with influence of current

In-Chul Kim

*Department of Naval architecture and Ocean Systems Engineering  
Graduate School of Korea Maritime University*

## Abstract

This is a basic study on motion control of Manta-type Unmanned Undersea Vehicle(UUV). At first irregular current will be supposed as operating environment condition of Manta-type UUV. Here irregular current is composed of two parts. One is static component and the other variable one. And then the six-degree-of-freedom motion mathematical models of manta-type UUV are suggested. For this the static model test at large angles of attack and four quadrant propeller open water test are carried out respectively. Proportional and Derivative(PD) controls are designed as control devices. The paper deals with thrust control and motion controls in horizontal plane and vertical plane respectively. Numerical simulations of motion control of manta-type UUV are carried out and the effects of motion control are discussed.

## 제 1장 서론

미래의 해군력을 증강시키기 위하여, 무인잠수정(Unmanned Undersea Vehicle, 이하 UUV라 함)을 토대로 새로운 개념 및 운항 특성을 가지는 수중 유도무기체계에 대한 개발이 일부 선진국에서 수행되고 있다.

미해군수중무기센터(Naval Undersea Warfare Center, 이하 NUWC라 함)에서는 Manta Test Vehicle(이하 MTV라 함)이라 불리는 UUV에 대한 연구를 수행하고 있다. MTV는 평상시에는 모함의 동체 상부의 일부로 장착되어 있다가 필요시에 모함으로부터 분리되어 정찰 등의 작전을 수행한다. 지금까지 이러한 독특한 설계 및 운용 개념을 가진 UUV에 대한 연구는 미국 등의 소수의 해양 선진국에서만 수행되고 있으며 국내에서는 NUWC에서 개발한 설계 개념을 기초로 배준영과 손경호(2009)가 6자유도 조종운동 수학적모델을 제안한바있다.

본 연구에서는 만타 무인잠수정의 운항자동화에 관한 기초 연구로서 만타 무인잠수정의 운동제어 시스템 구축에 관해서 검토하였다. 구체적으로 배준영과 손경호(2009)가 제안한 수학적모델을 기반으로 하여 대각도 사향시험 결과와 추진기 단독시험 결과를 활용하여 불균일 조류의 영향을 고려한 수학적모델을 새롭게 구축하고 자유항주모형시험 결과 및 시뮬레이션 결과와의 비교를 통하여 운동 수학적모델을 검증하였다. 또한 PD제어기를 설계하여 수치시뮬레이션을 통해 추력제어, 수평면 운동제어, 수직면 운동제어 등의 문제를 다루었으며 운동 제어 효과를 검토하였다.

## 제 2장 만타 무인잠수정의 형상 및 명세

본 연구에서 채택한 만타 무인잠수정의 설계 개념을 Fig 2.1에 보이고 있다. Fig 2.1에서와 같이 만타 무인잠수정은 모함인 잠수함의 동체 상부의 일부로써 장착되어 있다가 필요시에 모함으로부터 분리되어 작전을 수행한다. 그리고 만타 무인잠수정의 기하학적 형상과 주요목을 각각 Fig 2.2와 Table 2.1에 나타낸다. 만타 무인잠수정 동체 측면에는 승강과 자세 제어를 위해 수평타(Elevator)가 설치되어 있으며, 수평타의 단면은 NACA008 형상을 취한다. 그리고 동체의 선미 상부에는 수직판이 설치되어 있으며, 선미 하부에는 방향 제어를 위해 수직타(Rudder)가 설치되어 있다. 아울러 동체의 선미에 추진용 스톱스터 2개가 설치되어 있다.



Fig 2.1 Design concept of Manta-type UUV

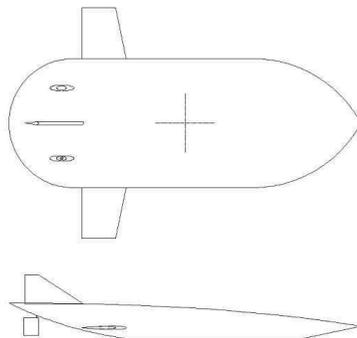


Fig 2.2 Drawing of Manta-type UUV

Table 2.1 Principal dimension of Manta-type UUV

Item	Dimension
<u>Fuselage</u>	
length	L = 12.0 m
breadth	B = 4.4 m
height	H = 1.2 m
disp. vol.	$\nabla = 31.88 \text{ m}^3$
<u>Elevator(2)</u>	
root chord	1.52 m
tip chord	1.155 m
span	1.727 m
<u>Upper vertical plate</u>	
root chord	2.00 m
tip chord	0.45 m
span	1.00 m
<u>Rudder</u>	
root chord	0.50 m
tip chord	0.50 m
span	0.60 m
<u>Propulsion thruster(2)</u>	
propeller diameter	0.60 m
pitch ratio	1.055
blade area ratio	0.73
number of blades	5
turning direction	1945 outboard

## 제 3장 6자유도 운동 수학모델

### 3.1 좌표계

만타 무인잠수정을 강체라 가정하고 Fig 3.1과 같이 만타 무인잠수정에 고정된 직각좌표계(물체고정좌표계)를  $O-xyz$ , 공간고정좌표계를  $O_E-X_EY_EZ_E$ 로 취한다. 물체고정좌표계의 원점은 만타 무인잠수정의 동체 중앙횡단면에서 동체 높이의 중간위치에 취하고, 만타 무인잠수정의 선수방향을  $x$ , 정횡 우현 방향을  $y$ , 선저방향을  $z$  축의 양(+의) 방향으로 정의한다. 공간고정좌표계의 원점은 만타 무인잠수정의 제어판의 작동 명령 시점으로 취한다. Fig 3.1에는 좌표계와 본 연구에서 사용된 각종 기호들을 나타내고 있다. 참고로,  $\alpha$ 는 수직 받음각(angle of attack in vertical plane)을,  $\beta$ 는 수평 받음각(angle of attack in horizontal plane)을 나타낸다. 이하 수직 받음각은 영각(inclined angle)으로, 수평 받음각은 사향각(drift angle)으로 기술하기로 한다. 사향각의 경우  $u' = \cos \beta$ ,  $v' = -\sin \beta$ 의 관계가 성립된다.

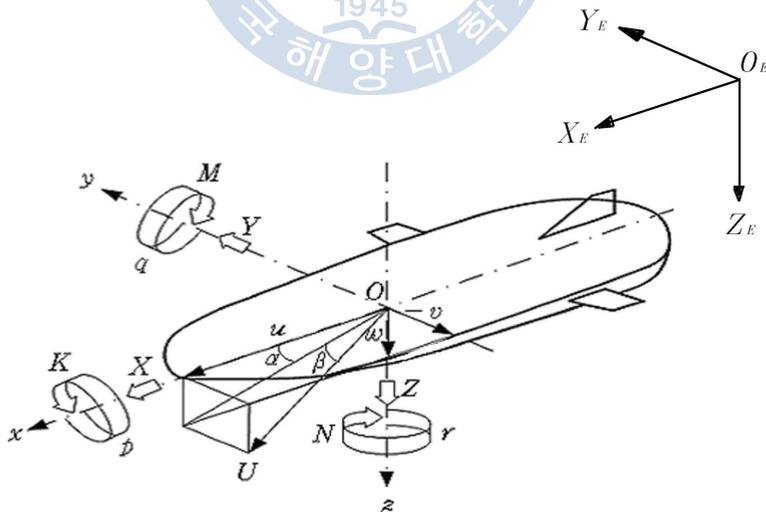


Fig 3.1 Coordinate system and notation

## 3.2 대각도 사항시험

수중운동체 즉, 만타 무인잠수정은 수중에서 운항된다고 가정하고, 운항 환경 조건으로서 조류(current)를 생각할 수 있을 것이다. 조류의 경우 만타무인잠수정에 외력으로서 직접 작용한다고 생각할 수 있으나, 이와는 다른 관점에서 수중운동체의 속도와 조류 속도의 합속도 벡터가 만타 무인잠수정에 작용한다고도 생각할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 후자의 관점에서 만타 무인잠수정의 운동 수학모델을 정립하고자 한다. 이때 조류는 임의의 방향으로 작용할 수 있으므로 수중운동체의 속도와 조류 속도의 합속도 벡터는 만타 무인잠수정에 대각도 극한 사항각으로써 작용된다. 따라서 외력으로서 조류의 속도를 고려하기 위해 대각도 사항시험이 필요하게 된다. 그리고 대각도 사항각의 영역은  $0^\circ$ 로부터  $\pm 180^\circ$ 까지의 범위가 고려 대상이 된다.

### 3.2.1 실험에 사용된 모형선의 명세

사항시험에 사용된 만타 무인잠수정 모형선으로서 2가지 형상을 채택하였으며, 이들의 주요목을 표 Table 3.1에 나타낸다. Model-A는 만타 무인잠수정 실물 형상을 1/10로 축소한 모형선으로서 길이가 1.2 m이며, Model-B는 길이 1.5 m의 자유항주시험용 만타 무인잠수정을 8/10으로 축소한 모형선으로서 길이가 1.2 m이다. Model-A와 Model-B는 대부분 같은 형상이지만, Model-B의 경우 자유항주모형시험용 설비와 계측기기의 탑재를 위해 동체 측면 높이를 크게 증가시켰으며, 아울러 짧은 시간에 자유항주 운동 계측을 해야 하므로 수직타의 성능 향상을 위해 타면적을 크게 증가시켰다. Model-A의 실험 결과는 만타 무인잠수정 실물의 운동 시뮬레이션에 이용되며, Model-B의 실험 결과는 자유항주 모형시험에 대응하는 수치 시뮬레이션에 이용하게 된다. 그리고 사항시험 시 Model-A의 경우에는 수직타가 설치되지 아니한 상태에서 실험이 수행되었다. 따라서 사항시험 결과에 미치는 수직타의 영향에 대해서는 실험 결과에 별도로 이론적으로 핀 효과를 계산하여 추가하기로 한다.

Table 3.1 Principal dimensions of experimental models of Manta-type UUV

Item	Model-A	Model-B
Fuselage		
length	1.2 m	1.2 m
breadth	0.44 m	0.44 m
height	0.12 m	0.21 m
<b>Horizontal plate(2)</b>		
root chord	0.152 m	0.152 m
tip chord	0.115 m	0.115 m
span	0.173 m	0.173 m
<b>Upper vertical plate</b>		
root chord	0.2 m	0.15 m
tip chord	0.045 m	0.034 m
span	0.1 m	0.075 m
<b>Rudder</b>		
root chord	0.05 m	0.07 m
tip chord	0.05 m	0.15 m
span	0.06 m	0.1 m

### 3.2.2 실험장치 및 실험방법

대각도 사향시험은 회류수조에서 실시되었다. 회류수조는 길이 12.5 m, 폭 2.2 m, 높이 5.2 m 치수의 2 임펠러 방식 수직순환형으로서 관측부는 길이 5.0 m, 폭 1.8 m, 높이 1.2 m, 수심 0.9 m이다. Fig 3.2는 회류수조 관측부 중앙위치에서 측정된 수직방향 유속 분포도와 수심 0.45 m 위치에서의 수평방향 유속 분포도를 나타내고 있다. 수심 0.3 m~0.6 m에서의 수직방향 평균유속은 0.804 m/s, 수평방향 -0.6 m~+0.6 m에서의 평균유속은 0.801 m/s로 측정되었다.

Fig 3.3는 대각도 사향시험을 위한 실험장치를 보이고 있다. 모형은 가능한 한 회류수조 깊이의 중간위치에 설치되어 자유표면의 영향이 최소화 되도록 하였다. 그리고 검력계(3분력계)의 정격용량은 힘 5 kgf, 모멘트 1 kgf-m이다. 실험시의 평균유속은 0.8 m/s로서 이에 대응되는 Reynolds수는  $0.905 \times 10^6$ 이다.

한편, 회류수조는 모형의 크기에 비해 수조 폭이 제한적이므로 실험 결과에 측벽효과(blockage effect)를 고려하여야 할 것으로 생각된다. 본 연구에서는 Tamura(1972)가 제안한 다음 식을 이용하여 측벽효과를 고려하였다. 단, 측벽

효과는 모형 부근에서의 유속 증가량으로써 표시된다.

$$\delta U/U = 0.85(A_M/A_T)(l/b)^{3/4} \quad (1)$$

여기서  $U$ 는 평균유속,  $\delta U$ 는 유속의 증가량,  $A_T$ 는 수조의 횡단면적,  $A_M$ 은 모형선이 설치된 상태에서의 모형선의 횡단면적,  $l$ 은 모형선이 설치된 상태에서의 모형선의 종방향 길이,  $b$ 는 수조의 폭을 나타낸다. 본 사항시험에서는  $\delta U/U$  값이 약 1.8% 정도이었으며 이를 실험 결과에 반영하였다.

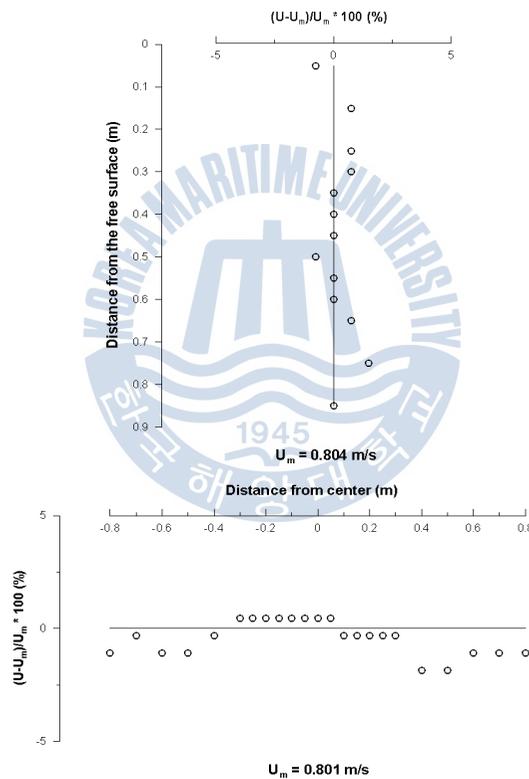


Fig 3.2 Velocity distribution at working section of circulating water channel  
( $U_m$ : mean velocity)

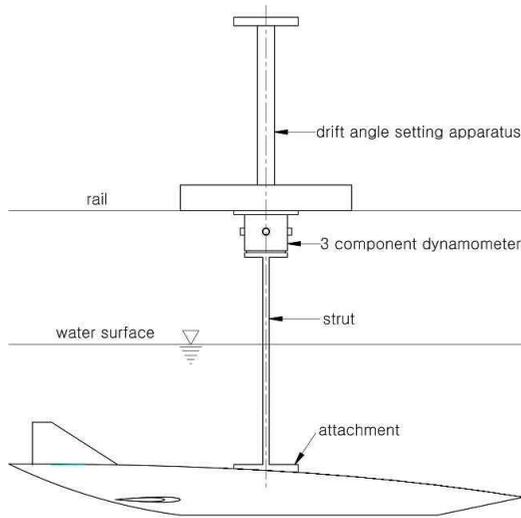
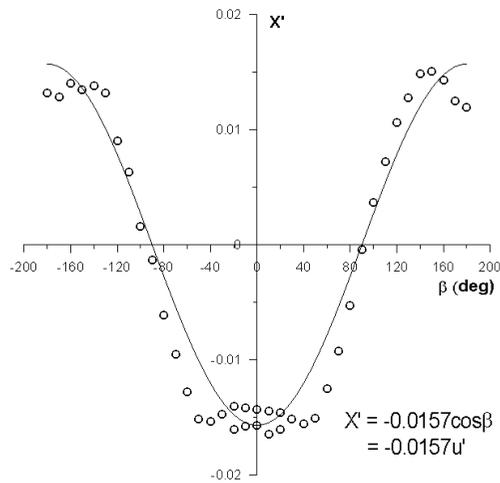


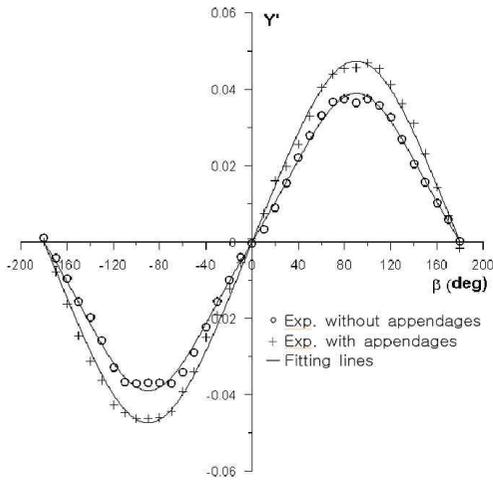
Fig 3.3 Experimental apparatus for static test at large drift angles

### 3.2.3 시험 결과 및 분석

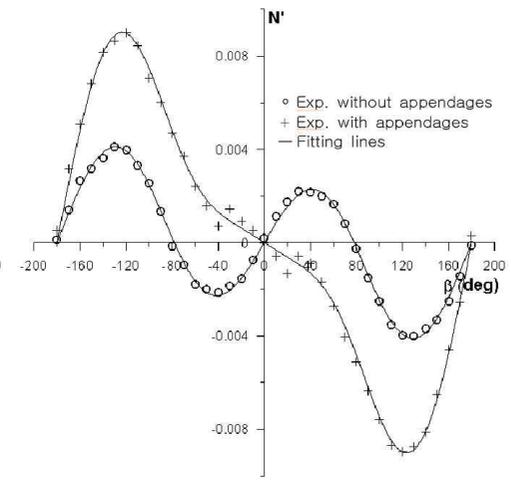
대각도 사향시험에서 구한 동유체력 측정 결과에 측벽효과를 고려하여 무차원화된 형태로 힘과 모멘트를 Fig 3.4, Fig. 3.5에 나타낸다. 아울러 수학모델에 의한 커브핏팅 결과를 함께 나타낸다. 여기서 힘은  $0.5\rho L^2 U^2$ 으로, 모멘트는  $0.5\rho L^3 U^2$ 으로 각각 무차원화 하였다(단,  $\rho$ : 유체의 밀도,  $L$ : 모형길이).



(a) surge force

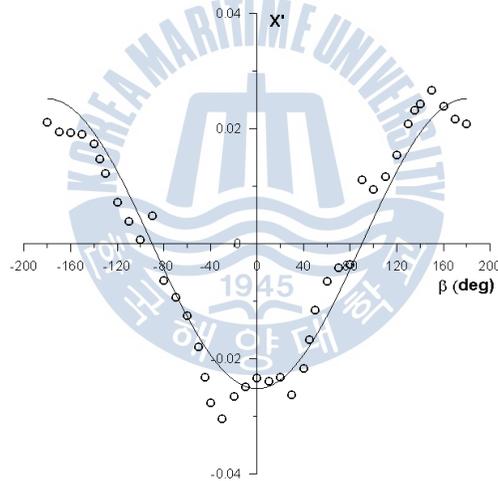


(b) sway force



(c) yaw moment

Fig 3.4 Non-dimensional forces and moment obtained from static test on Model-A at large drift angles and fitting lines



(a) surge force

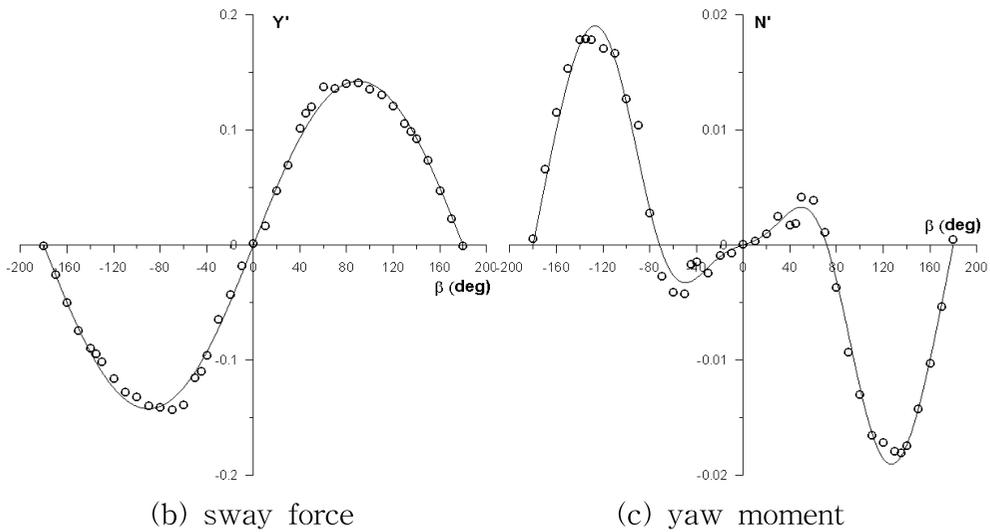


Fig. 3.5 Non-dimensional forces and moment obtained from static test on Model-B at large drift angles and fitting lines

### 3.3 4상한 영역 추진기 단독시험

#### 3.3.1 실험에 사용된 모형 추진기의 명세

Table 2.1에 나타난 만타 무인잠수정의 실물 추진기를 1/8로 축소한 모형을 이용하여 4상한 영역 추진기 단독시험을 수행하였다. 모형 추진기의 직경은 0.074 m이고, 그 밖에 추진기의 특성은 Table 2.1에 나타난 바와 같다.

#### 3.3.2 실험장치 및 실험방법

추진기 단독시험은 Fig 3.6에 보인 실험장치를 이용하여 회류수조에서 수행되었다. 회류수조는 앞에서 언급된 사항시험에 사용된 것과 동일하다. 추진기 단독시험용 open-boat는 길이 1.0 m, 폭 0.2 m, 높이 0.4 m의 유선형 원통형이며, boat 내부에는 추력 측정용 검력계와 추진기 회전용 서보모터가 설치된다.

실험 시 open-boat는 모형 추진기 후방 0.3 m 거리에 위치하도록 설치하였으며, 수면으로부터 추진기 중심까지의 깊이는 0.25 m가 되게 하였다. 이때 추진기

회전수는 최저 15 rps에서 최고 30 rps까지 5 rps 간격으로, 그리고 유속은 매 회전수마다 최저 0.3 m/s에서 최고 0.8 m/s까지 0.1 m/s 간격으로 설정하였다.

실험방법은 추진기를 특정한 회전수로 회전시킨 상태에서 유속을 변화시켜 추력을 측정한다. 실험 시 유속을 변화시킬 때마다 추진기를 0점 회전수(2.5 rps)로 회전시켜 0점 출력  $x_{T0}$ 를 측정하며 원하는 유속과 회전수가 정상상태가 되었을 때 평균 출력  $x_T$ 을 측정한다. 측정된 값들을 다음 식을 이용하여 추력을 구한다.

$$T = \alpha_T(x_T - x_{T0}) + T_0 \quad (3)$$

여기서  $T$ 는 추력,  $\alpha_T$ 는 검정(calibration) 상수,  $x_T$ 는 특정 유속, 특정 회전수에서의 출력,  $x_{T0}$ 는 0점 출력,  $T_0$ 는 0점 추력을 나타낸다.

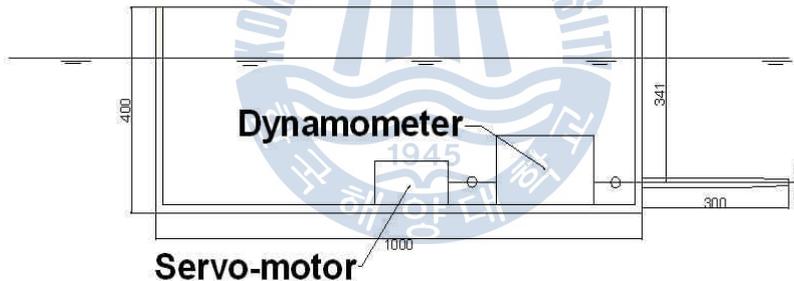


Fig 3.6 Experimental apparatus for propeller open water test

### 3.3.2 시험 결과 및 분석

추진기 단독시험 결과를 선속과 프로펠러 작동 방향에 따른 4상한 영역  $K_T - J$  곡선으로 정리하여 Fig 3.7에 나타낸다. 여기서  $K_T$ 는 추력을  $\rho^2 D^4$ 으로 무차원화 한 값이고,  $J$ 는 전진상수로서  $J = u_p / (nD)$ 이다. 단,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $n$ 은 추진기 회전수,  $D$ 는 추진기 직경,  $u_p$ 는 추진기에의 유입속도이다. 그

리고 4상한 영역은 수중운동체의 진행 방향과 추진기 회전 방향에 따라 Table 3.2와 같이 구분되며, 각 상한별로 실험 결과를 커브핏팅하여 식(4)과 같이 나타낸다. 단,  $K_T$ 에 붙어있는 첨자 1, 2, 3, 4는 각각 제1상한, 제2상한, 제3상한, 제4상한의 영역을 의미한다.

$$K_{T1} = -0.5266J^2 - 0.2875J + 0.5209 \quad (4)$$

$$K_{T2} = -1.2917J^2 - 0.1675J + 0.5209$$

$$K_{T3} = 0.7669J^2 + 0.0254J - 0.3879$$

$$K_{T4} = 0.6449J^2 + 0.185J - 0.3923$$

Table 3.2 Condition of four quadrants propeller operation

Quadrant	Speed	RPS
1st quadrant	ahead	ahead
2nd quadrant	astern	ahead
3rd quadrant	ahead	astern
4th quadrant	astern	astern

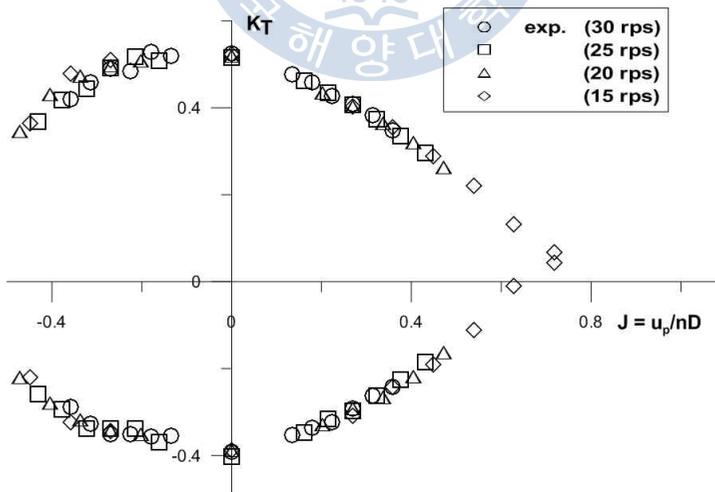


Fig 3.7 Four quadrants propeller open water test result

### 3.4 만타 무인잠수정의 운동 수학모델

#### 3.4.1 조류 중에서의 운동 수학모델

Fig 3.1의 좌표계와 기호를 사용할 때 만타 무인잠수정의 6자유도 운동 수학 모델을 구축하기 위한 기본식은 다음과 같다(Abkowitz 1969).

$$m[\dot{u} - vr + wq - x_G(\dot{q}^2 + r^2) + z_G(pr + \dot{q})] = X \quad (5)$$

$$m[\dot{v} - wp + ur + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(pq + \dot{r})] = Y$$

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

$$I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr - m[z_G(\dot{v} - wp + ur) + x_Gz_G(\dot{r} + pq)] = K$$

$$I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})pr + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp) + x_Gz_G(p^2 - r^2)] = M$$

$$I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) + z_Gx_G(qr - \dot{p})] = N$$

여기서  $m$  은 질량을,  $I_{xx}$ ,  $I_{yy}$ ,  $I_{zz}$  는  $x$ ,  $y$ ,  $z$  축에 관한 질량관성모멘트를,  $x_G$ ,  $z_G$  는 각각 무게중심의  $x$ ,  $z$  좌표를 의미한다.

다음으로 조류 중에서의 운동 수학모델을 정립하기 위해 조류의 영향을 검토해 본다. 조류는 수평면 내에서의 2차원 조류만을 생각하며, 불균일류라 가정한다. 조류에 기인하는 힘과 모멘트를 별도의 외력항으로 고려하지 아니하고, 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 입사 방향까지의 각도)을  $\psi_c$ 라 하면 다음 관계식이 성립한다.

$$u = u^* + U_c \cos(\psi_c - \psi) \quad (6)$$

$$v = v^* + U_c \sin(\psi_c - \psi)$$

여기서  $u, v$ 는 대수속도의  $x, y$  성분을,  $u^*, v^*$ 는 대지속도의  $x, y$  성분을 나타낸다. 조류는 불균일류이므로 이를 정상성분과 변동성분으로 구분하여 다음과 같이 나타낸다.

$$U_c = \overline{U_c} + \widetilde{U_c} \quad (7)$$

여기서  $\overline{U_c}$ 는 정상성분,  $\widetilde{U_c}$ 는 변동성분을 나타내며, 변동성분은  $-0.2\overline{U_c} \leq \widetilde{U_c} \leq +0.2\overline{U_c}$ 의 범위에 있는 난수(random number)를 취하는 것으로 가정하고, 매 5초 간격으로 변화하는 것으로 가정한다.

식(6)을 시간미분하면 다음 관계식이 성립한다.

$$\dot{u} = \dot{u}^* + U_c r \sin(\psi_c - \psi) \quad (8)$$

$$\dot{v} = \dot{v}^* - U_c r \cos(\psi_c - \psi)$$

배준영과 손경호(2009)가 제안한 수학모델에 대각도 사항시험 결과의 커브핏팅 모델과 추진기 단독시험 결과 그리고 조류의 영향까지 고려하여 만타 무인 잠수정의 6자유도 운동 수학모델을 다음과 같이 정리한다.

- Surge equation

$$(m' - X_u')L \cdot \dot{u}^* + m' z_G' L^2 \cdot \dot{q} = \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
& (X_{wq}' - m')L \cdot wq + (m' + X_{vr}')L \cdot vr \\
& + (m'x_G' + X_{qq}')L^2 \cdot q^2 + (m'x_G' + X_{rr}')L^2 \cdot r^2 \\
& + (X_{pr}' - m'z_G')L^2 \cdot pr + X_u' uU + X_{ww}w^2 \\
& + X_{\delta r \delta r}' \cdot u^2 \delta r^2 + X_{\delta s \delta s}' \cdot u^2 (\delta s o + \delta s)^2 \\
& + X_{\eta s \eta s}' \cdot u^2 \eta s^2 + \frac{1}{0.5 \rho L^2} \cdot (X_{P1} + X_{P2}) + (X_u' - m')L U_c \cdot r \sin(\psi_c - \psi)
\end{aligned}$$

- Sway equation

$$\begin{aligned}
& (m' - Y_v')L \cdot \dot{v}^* - (m'z_G' + Y_p')L^2 \cdot \dot{p} + (m'x_G' - Y_r')L^2 \cdot \dot{r} = \quad (10) \\
& (m' + Y_{vp}')L \cdot wp + (Y_{pq}' - m'x_G')L^2 \cdot pq \\
& + Y_{p|p}'L^2 \cdot p|p| - m'z_G'L^2 \cdot qr + (Y_r' - m')L \cdot ur + Y_p'L \cdot up \\
& + Y_v' \cdot vU + Y_{vvv}' \cdot \frac{v^3}{U} + Y_{\delta r}' \cdot u^2 \delta r + (m' - Y_v')L U_c \cdot r \cos(\psi_c - \psi)
\end{aligned}$$

- Heave equation

$$\begin{aligned}
& (m' - Z_w')L \cdot \dot{w} - (m'x_G' + Z_q')L^2 \cdot \dot{q} = \quad (11) \\
& (Z_{vp}' - m')L \cdot vp + (m'z_G' + Z_{pp}')L^2 \cdot p^2 \\
& + m'z_G'L^2 \cdot q^2 + (Z_{pr}' - m'x_G')L^2 \cdot pr \\
& + (m' + Z_q')L \cdot uq + Z_*' \cdot u^2 \\
& + Z_w' \cdot ww + Z_{ww}' \cdot w^2 + Z_{www}' \cdot \frac{w^3}{U} + Z_{\delta s}' \cdot u^2 (\delta s o + \delta s)
\end{aligned}$$

- Roll equation

$$(I_{xx}' - K_p')L^2 \cdot \dot{p} - (m'x_G'z_G' + K_r')L^2 \cdot \dot{r} - (m'z_G' + K_v')L \cdot \dot{v}^* = \quad (12)$$

$$(K_{wp}' - m'z_G')L \cdot wp + m'x_G'z_G'L^2 \cdot pq$$

$$+ K_{p|p|}'L^2 \cdot p|p| + [K_{qr}' - (I_{zz}' - I_{yy}')]L^2 \cdot qr$$

$$+ K_{vq}'L \cdot vq + K_{wr}'L \cdot wr$$

$$+ K_{vw}' \cdot vw + m'(z_B' - z_G')Lg \cdot \cos \theta \sin \phi$$

$$+ K_p'L \cdot up + K_v' \cdot vU + K_{vvv}' \cdot \frac{v^3}{U} + (m'z_G' + K_r')L \cdot ur$$

$$+ K_{\delta r}' \cdot u^2 \delta r + K_{\eta s}' \cdot u^2 \eta s$$

$$- (m'z_G' + K_v')LU_c \cdot r \cos(\psi_c - \psi)$$

- Pitch equation

$$(I_{yy}' - M_q')L^2 \cdot \dot{q} - (m'x_G' + M_w')L \cdot \dot{w} + m'z_G'L \cdot \dot{u}^* = \quad (13)$$

$$- m'z_G'L \cdot wq + (m'z_G' + M_{vr}')L \cdot vr + (m'x_G' + M_{vp}')L \cdot vp$$

$$+ (m'x_G'z_G' + M_{rr}')L^2 \cdot r^2 + (M_{pp}' - m'x_G'z_G')L^2 \cdot p^2$$

$$+ [M_{pr}' - (I_{xx}' - I_{zz}')]L^2 \cdot pr + M_{q|q|}'L^2 \cdot q|q|$$

$$+ (M_q' - m'x_G')L \cdot uq + M_{*}' \cdot u|u| + M_w' \cdot uw + M_{ww}' \cdot w^2 + M_{www}' \cdot \frac{w^3}{U}$$

$$+ M_{\delta s}' \cdot u^2(\delta s_o + \delta s) + m'(z_B' - z_G')Lg \cdot \sin \theta + m'(x_B' - x_G')Lg \cdot \cos \theta \cos \phi$$

$$- m'z_G'LU_c \cdot r \sin(\psi_c - \psi)$$

- Yaw equation

$$\begin{aligned}
& (I_{zz}' - N_r')L^2 \cdot \dot{r} - (m'z_G'x_G' + N_p')L^2 \cdot \dot{p} + (m'x_G' - N_v')L \cdot \dot{v}^* = \quad (14) \\
& (N_{wp}' + m'x_G')L \cdot wp + (N_{qr}' - m'z_G'x_G')L^2 \cdot qr + N_{r|r}'L^2 \cdot r|r| \\
& + [N_{pq}' - (I_{yy}' - I_{xx}')]L^2 \cdot pq + (N_r' - m'x_G')L \cdot ur \\
& + N_p' L \cdot up + N_{vq}' L \cdot vq + N_v' \cdot vU + N_{uv}' \cdot uv + N_{vvv}' \cdot \frac{v^3}{U} + N_{uvvv}' \cdot \frac{uv^3}{U^2} \\
& + N_{\delta r}' \cdot u^2 \delta r + m'(x_G' - x_B')Lg \cdot \cos \theta \sin \phi \\
& + \frac{1}{0.5\rho L^2} \cdot y_P'(X_{P2} - X_{P1}) + (m'x_G' - N_v')LU_c \cdot r \cos(\psi_c - \psi)
\end{aligned}$$

여기서  $\phi$ ,  $\theta$ 는 각각 횡동요각, 종동요각을 나타낸다.  $X_{P1}$  과  $X_{P2}$  는 추력을 의미한다.  $\delta r$  과  $\delta s$  는 각각 수직타와 수평타의 타각을 의미하며,  $\delta s_0$ 는 직진을 위한 초기타각으로서  $Z_s'$ ,  $M_s'$ 의 영향을 상쇄하기 위한 것이다. 수직타는 우현방향을 양(+)<sup>1</sup>의 방향, 수평타는 상방향을 양(+)<sup>1</sup>의 방향으로 정의한다. 단, 횡동요 제어를 위해 좌, 우현 수평타를 서로 반대칭적으로 취할 때에는  $\eta s$ 라 표현하며, 우현타 상방향, 좌현타 하방향일 때를 양(+)<sup>1</sup>의 방향으로 정의한다.  $y_P$  는 우현측 추진용 스러스터의  $y$  좌표이다.

### 3.4.2 만타 무인잠수정에 작용하는 동유체력 미계수

식(9)~식(14)에서 언급된, 만타 무인잠수정의 6자유도 운동 수학모델에서의 유체력미계수를 배준영과 손경호(2009)의 연구와 대각도 사항시험 결과의 커브 핏팅 모델, 그리고 추진기 단독시험 결과로부터 구하여 Table 3.3에 나타낸다.

Table 3.3 Hydrodynamic derivative acting on Manta-type UUV

Der.	Value	Der.	Value	Der.	Value	Der.	Value
$m'$	0.03685	$Y_{plpl}'$	0.00000	$K_{plpl}'$	0.00000	$M_{ww}'$	-0.04080
$I_{xx}'$	0.00034	$Y_{wp}'$	0.09747	$K_{wp}'$	0.00032	$M_{www}'$	0.22741
$I_{yy}'$	0.00170	$Y_{pq}'$	0.00730	$K_{qr}'$	0.00325	$M_q'$	-0.00287
$I_{zz}'$	0.00200	$Y_p'$	0.00000	$K_{vq}'$	-0.00460	$M_{\delta s}'$	0.02189
$x_G'$	-0.02766	$Y_r'$	0.01233	$K_{wr}'$	0.00460	$N_r'$	-0.00136
$z_G'$	0.02569	$Y_v'$	-0.04586	$K_{vw}'$	-0.07778	$N_p'$	0.00000
$x_B'$	-0.02766	$Y_{vvv}'$	-0.00493	$K_p'$	-0.00597	$N_v'$	0.00270
$z_B'$	0.00903	$Y_{\delta r}'$	-0.00342	$K_v'$	0.00035	$N_{wp}'$	-0.00730
$X_u'$	-0.00184	$Z_w'$	-0.09747	$K_{vvv}'$	-0.00002	$N_{qr}'$	0.00000
$X_{wq}'$	-0.09747	$Z_q'$	-0.00730	$K_r'$	-0.00010	$N_{r r}'$	-0.00053
$X_{vr}'$	0.01970	$Z_{vp}'$	-0.01886	$K_{\delta r}'$	0.00006	$N_{pq}'$	-0.00302
$X_{qq}'$	-0.00730	$Z_{pp}'$	-0.00034	$K_{\eta s}'$	0.00346	$N_p'$	-0.00032
$X_{rr}'$	-0.00270	$Z_{pr}'$	0.00230	$M_q'$	-0.00461	$N_{vq}'$	0.00032
$X_{pr}'$	0.00032	$Z_s'$	0.02642	$M_w'$	-0.00730	$N_v'$	0.00979
$X_u'$	-0.00453	$Z_w'$	-0.69427	$M_{vr}'$	-0.00032	$N_{uv}'$	-0.00632
$X_{uw}'$	0.05610	$Z_{ww}'$	-0.53911	$M_{vp}'$	-0.00270	$N_{vvv}'$	-0.00196
$X_{\delta r \delta r}'$	-0.00166	$Z_{wvw}'$	-1.82877	$M_{rr}'$	0.00000	$N_{wvv}'$	-0.00144
$X_{\delta s \delta s}'$	-0.03635	$Z_q'$	-0.02005	$M_{pp}'$	0.00000	$N_r'$	-0.00467
$X_{\eta s \eta s}'$	-0.03635	$Z_{\delta s}'$	0.09228	$M_{q q}'$	-0.00740	$N_{\delta r}'$	0.00164
$Y_v'$	-0.01970	$K_p'$	-0.00160	$M_{pr}'$	-0.00113		
$Y_p'$	-0.00032	$K_r'$	0.00000	$M_s'$	0.00499		
$Y_r'$	0.00270	$K_v'$	-0.00032	$M_w'$	0.06413		

### 3.4.3 6자유도 운동 수학적모델 검증

본 연구에서 구축한 6자유도 운동 수학적모델의 검증을 위하여 Model-B와 같은 형상을 갖는 자유항주모형시험을 통하여 수학적모델을 검증하였다. 김준영과 고성협(2011)은 본 연구에서 다른 Model-B와 같은 형상의 Model을 사용하여 자유항주모형시험을 수행하였다. 자유항주모형시험은 실험역에서 수행되었으며 자유항주모형의 속도는 0.4m/s이다. Fig. 3.8, Fig. 3.9는 자유항주모형시험결과와 Model-B의 수치시뮬레이션 결과의 비교이다. 실험결과와 시뮬레이션결과는 차이를 보이고 있지만 자유항주모형시험이 실험역에서 수행되면서 조류와 같은 외부환경으로부터의 영

향을 줄일 수 있다면 시뮬레이션 결과와 유사한 성능을 갖게 될 수 있다고 생각된다.

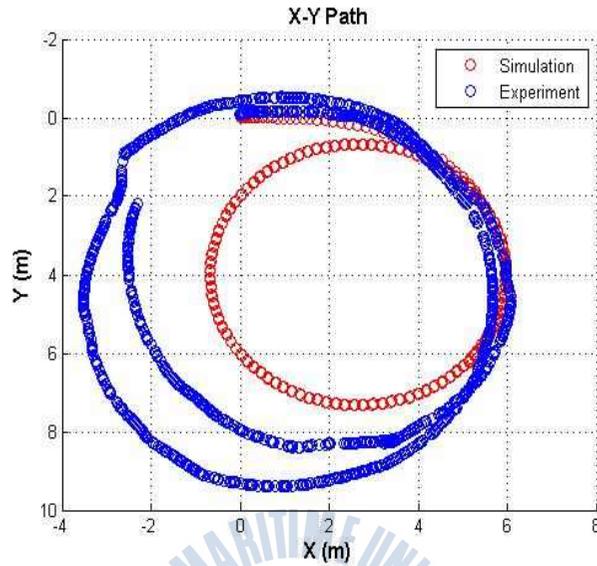


Fig 3.8 Turning motion in horizontal plane( $\delta r = 30^\circ$ )

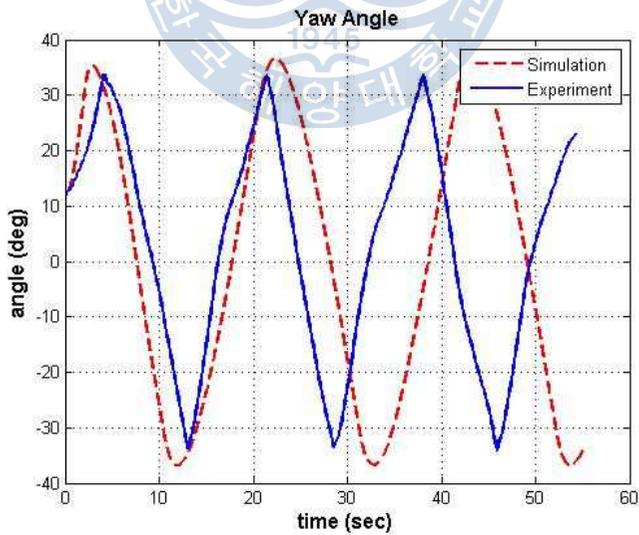


Fig 3.9 Zig-zag motion in horizontal plane( $30^\circ/30^\circ$ )

### 3.4.4 수치 시뮬레이션 기법에 의한 기본 조종운동의 검토

만타 무인잠수정 실물에 대해 수치 시뮬레이션을 수행하여 기본 조종운동을 검토한다. 수치 시뮬레이션에서 만타 무인잠수정의 초기속도를 5 kt로 설정한다. 그리고 정상 직진 시에 동체 형상의 상하 비대칭에 기인하는 동유체력 즉,  $Z^*$ ,  $M^*$ 의 영향은 고려하지 않는다.

#### 1) 수평운동

수치 시뮬레이션 항목으로서 수평운동의 경우에는 선회와 지그재그 운동을 채택한다. Fig 3.10과 Fig 3.11는 수직타각이  $30^\circ$ 일 때의 선회운동을 나타내는데, Fig 3.10은 조류가 없을 때이고 Fig 3.11는 조류가 있을 때(유향각( $\psi_c$ ):  $45^\circ$ , 조류의 정상속도( $\overline{U}_c$ ): 1 kt)의 결과이다. Fig 3.12은  $20^\circ/20^\circ$  지그재그 운동의 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

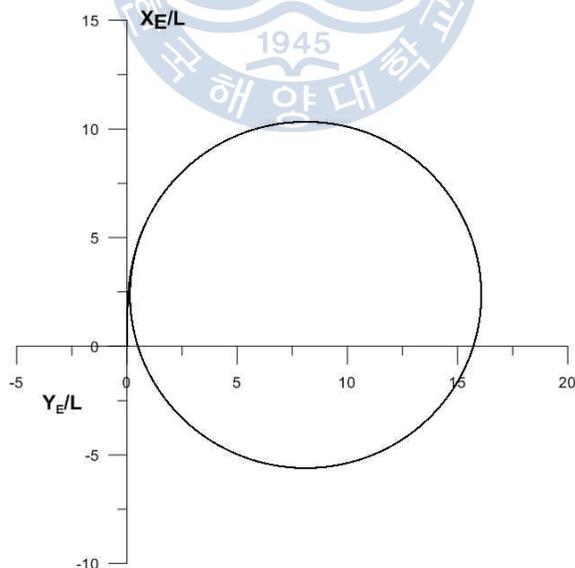


Fig 3.10 Turning motion in horizontal plane( $\delta r = 30^\circ$ )

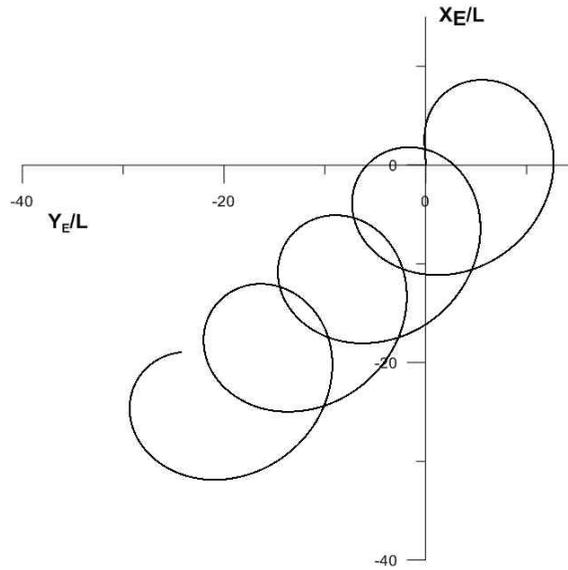


Fig 3.11 Turning motion in horizontal plane in case of existence of current

$$(\delta r = 30^\circ, \psi_e = 45^\circ, \bar{U}_e = 1 \text{ kt})$$

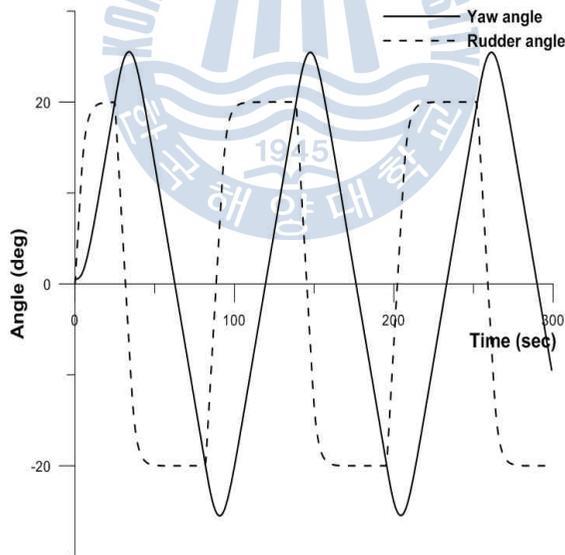


Fig 3.12 Zig-zag motion in horizontal plane(20°/20°)

2) 수직운동

수치 시뮬레이션 항목으로서 수직운동의 경우에는 지그재그 운동과 부상 운동을 채택한다. Fig 3.13은 수직방향의  $5^\circ/5^\circ$  지그재그 운동을, Fig 3.14는 수평 타각  $5^\circ$ 일 때의 부상 운동의 수치 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 수평타의 타면적이 굉장히 크기 때문에 소각도 타각을 취하도록 하였으며, 만타 무인잠수정의 평면이 blunt한 형상이고 타효가 좋아서 운동 응답이 굉장히 빠르게 일어나고 있다는 것을 알 수 있다.

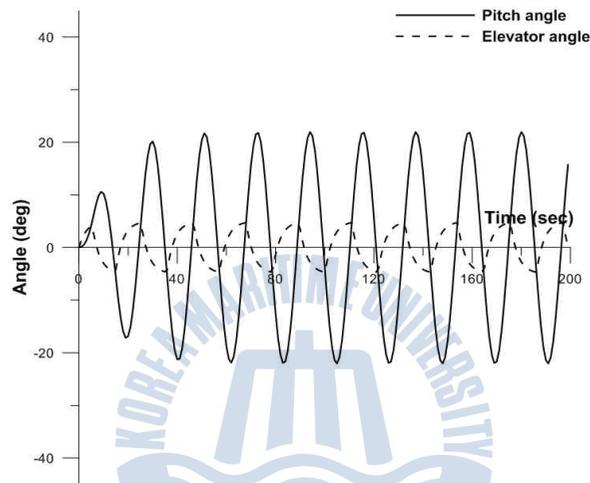


Fig 3.13 Zig-zag motion in vertical plane( $5^\circ/5^\circ$ )

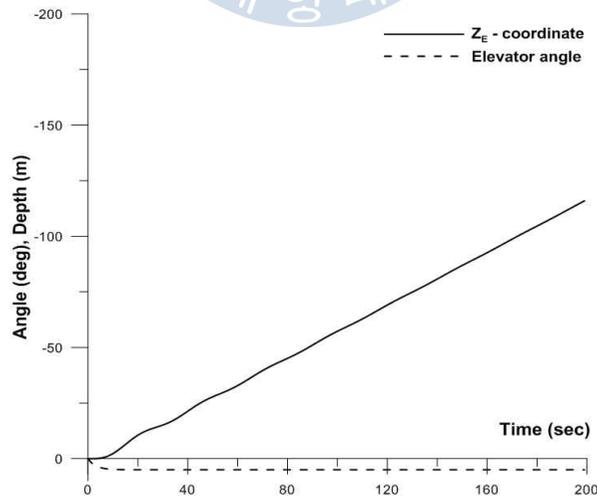


Fig 3.14 Rising motion in vertical plane( $\delta s = 5^\circ$ )

## 제 4장 만타 무인잠수정의 운동제어 수치 시뮬레이션

### 4.1 불균일 조류 중에서의 PD 제어 시스템

제3절에서 다룬 6자유도 운동 수학적모델과 만타 무인잠수정 실물에 작용하는 유체력 미계수를 이용하여 PD 제어 시스템을 설계하였으며, 불균일 조류 중에서의 수치 시뮬레이션 기법을 적용하여 제어의 효과를 검토하였다. PD 제어 시스템은 추력 제어, 수평면 운동 제어, 수직면 운동 제어에 각각 적용되었다.

### 4.2 추력 제어

#### 4.2.1 추력 제어 모델

만타 무인잠수정의 추력 제어를 위해 다음과 같이 추진기 명령 회전수의 제어 모델을 설정한다.

$$\dot{n}^* = n - G_n(u^* - u_d^*) \quad (15)$$

여기서  $n^*$ 는 추진기 명령 회전수(rps)를,  $u_d^*$ 는 목표속도의  $x$  성분으로서 대지속도를,  $u^*$ 는 실제속도의  $x$  성분으로서 대지속도를,  $G_n$ 은 제어상수를 의미한다.

그리고 추진기 축(shaft)의 응답모델을 다음과 같이 상정한다.

$$T_M \dot{n} + n = n^* \quad (16)$$

단,  $|\dot{n}| \leq \dot{n}_{\max}$

여기서  $T_M$ 은 시정수,  $\dot{n}_{\max}$ 는 매초당 회전수 변화율의 최대값을 의미한다.

#### 4.2.2 추력 제어 수치 시뮬레이션 결과

추력 제어에 관한 수치 시뮬레이션은 다음과 같이 조류의 유무에 따른 3 가지 유형의 시나리오에 대하여 수행되었다. 조류는 선수방향에서 작용하며, 조류의 정상성분 속도는  $\bar{U}_c = 1 \text{ kt}$ , 변동성분의 속도 범위는  $-0.2 \text{ kt} \leq \tilde{U}_c \leq 0.2 \text{ kt}$  라 가정한다.

- ① 정지 상태에서 5 kt로 전진 항행 명령
- ② 5 kt 속도의 전진 항행 상태에서 정지 명령
- ③ 5 kt 속도의 전진 항행 상태에서 -3 kt 속도의 후진 항행 명령

상기 3가지 유형의 시나리오에 대해, 조류가 없을 때의 추력 제어 수치 시뮬레이션 결과는 순서대로 Fig 4.1, Fig 4.2, Fig 4.3과 같다. 조류가 없을 때는 명령한 속도로 빠르게 수렴되는 것을 알 수 있다. 그림 Fig 4.2에서는 긴 과도상태를 피하기 위해  $u^*$ 가 0.5 kt보다 작아질 때 명령 회전수  $n^*$ 를 0으로 설정되도록 하였다. 조류가 있을 때의 추력 제어 수치 시뮬레이션 결과는 순서대로 Fig 4.4, Fig 4.5, Fig 4.6과 같다. 조류가 있을 때에도 명령한 속도로 빠르게 수렴은 되지만 조류의 변동성분으로 인해 계속 약간의 떨림 현상을 보이는 것을 알 수 있다.

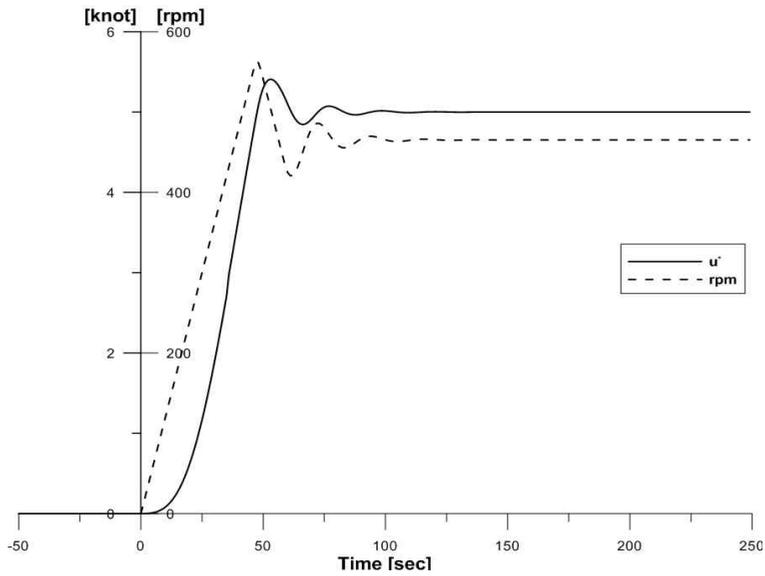


Fig 4.1 Propulsion control simulation result in case of non-existence of current (0 knot  $\rightarrow$  5 knot)

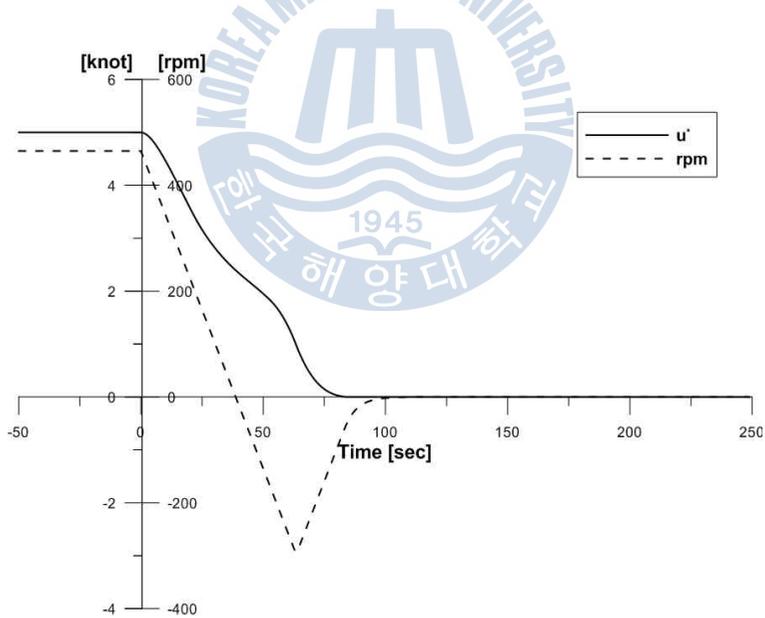


Fig 4.2 Propulsion control simulation result in case of non-existence of current (5 knot  $\rightarrow$  0 knot)

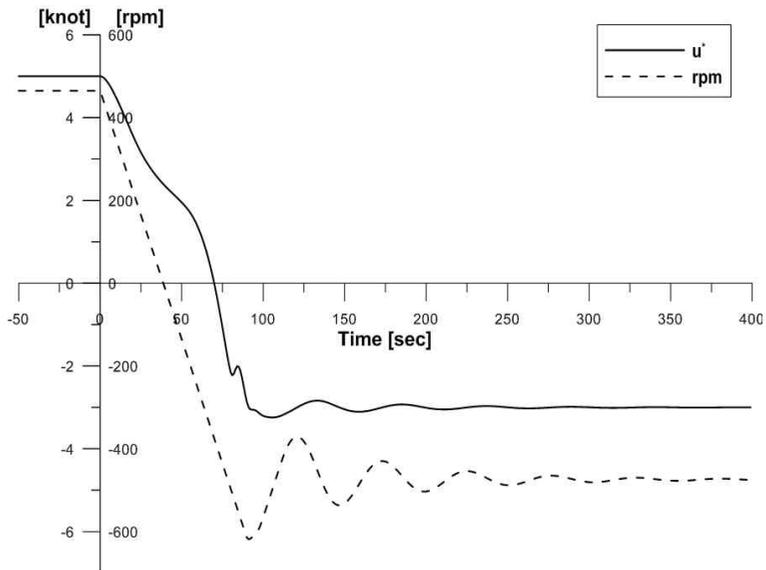


Fig 4.3 Propulsion control simulation result in case of non-existence of current (5 knot  $\rightarrow$  -3 knot)

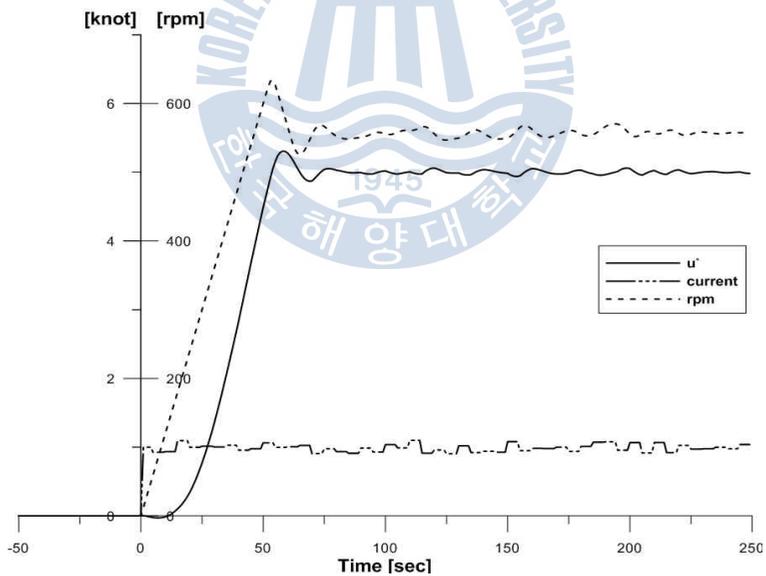


Fig 4.4 Propulsion control simulation result in case of existence of current (0 knot  $\rightarrow$  5 knot)

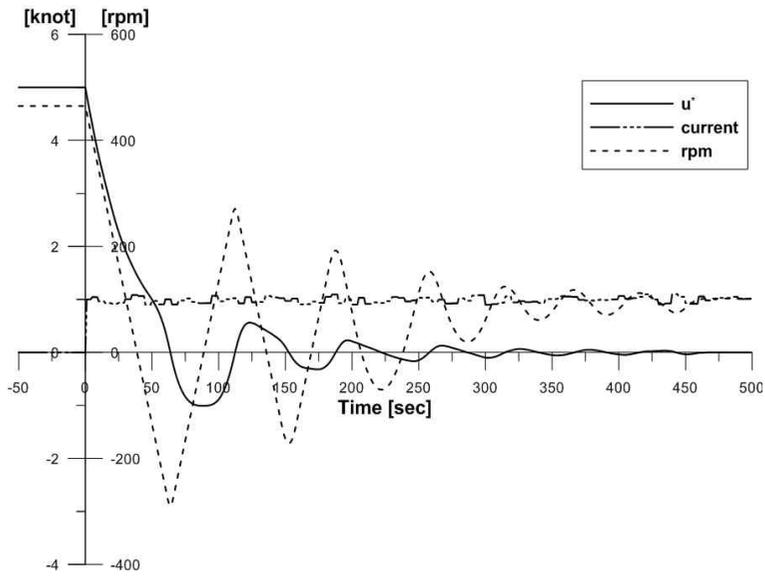


Fig 4.5 Propulsion control simulation result in case of existence of current (5 knot  $\rightarrow$  0 knot)

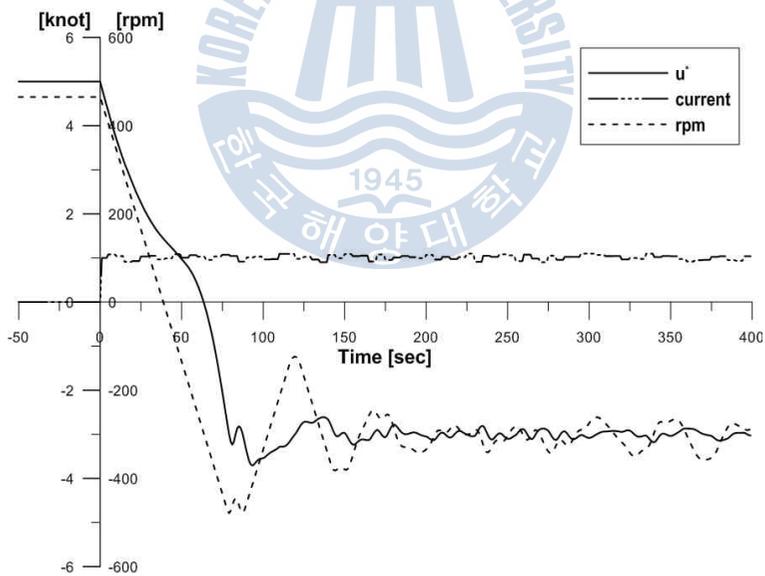


Fig 4.6 Propulsion control simulation result in case of existence of current (5 knot  $\rightarrow$  -3 knot)

### 4.3 수평면 운동 제어

### 4.3.1 수평면 운동 제어 모델

수평면 운동 제어를 위해 다음과 같이 명령 수직타각(방향타각)의 제어모델을 설정한다.

$$\delta r^* = -A_1(Y' - Y_d') - A_2(\psi - \psi_d) - A_3 r \quad (17)$$

여기서  $\delta r^*$ 은 명령 수직타각을,  $Y_d'$ 는 공간좌표계에서의 목표 횡이동거리의 무차원치를,  $\psi_d$ 는 공간좌표계에서의 목표 침로각을,  $A_1, A_2, A_3$ 는 제어상수를 의미한다.

그리고 조타기(steering gear)의 응답모델을 다음과 같이 상정한다.

$$\begin{aligned} T_E \dot{\delta r} + \delta r &= \delta r^* \\ |\dot{\delta r}| &< \dot{\delta r}_{\max} \end{aligned} \quad (18)$$

여기서  $\delta r$ 은 수직타각을,  $\dot{\delta r}$ 는 수직타의 각속도를,  $\dot{\delta r}_{\max}$ 는 수직타의 각속도의 최대값을,  $T_E$ 는 시정수를 의미한다.

### 4.3.2 수평면 제어 수치 시뮬레이션 결과

수평면 운동 제어의 경우에도 조류가 없을 때와 조류가 있을 때에 대하여 각각 수행되었다. 수치 시뮬레이션은 초기속도 5 kt의 직진 상태에서 명령이 이루어지도록 하였다. 그리고 대각도 조타로 인해 조타기에 과도한 동력이 걸리지 않도록 하기 위해 명령 수직타각의 최대값을 20°로 제한하였다.

#### 1) 조류가 없을 때의 수평면 운동 제어

조류가 없을 때의 수평면 운동 제어 수치 시뮬레이션은 침로 변경과 진로 변경 두 가지 상황에 대해 수행되었다. 침로 변경의 경우 조류에 의한 영향이 없기 때문에 PD 제어 모델에서  $A_1$  항을 제외하고  $A_2, A_3$  항만을 사용하여 제어한다. 진로 변경의 경우에는 두 단계로 나누어서 제어한다. 먼저 제1단계로서  $|Y'|$ 가  $0.8|Y'_d|$ 보다 작을 경우에는  $A_2, A_3$  항을 사용하여 제어하며,  $\psi_d$ 는  $30^\circ$ 를 설정한다. 제2단계로서  $|Y'|$ 가  $0.8|Y'_d|$ 보다 클 경우에는  $A_1, A_2, A_3$  항 전체를 사용하여 제어하며,  $\psi_d$ 는  $0^\circ$ 를 설정한다. Fig 4.7과 Fig 4.8은 조류가 없을 때의 수평면 운동 제어 수치 시뮬레이션의 결과이다.

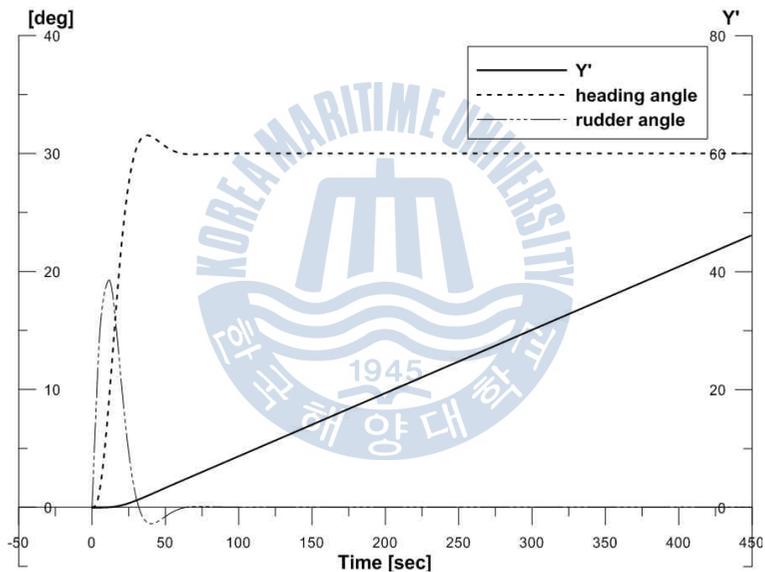


Fig 4.7 Horizontal motion control(course change) simulation result in case of non-existence of current

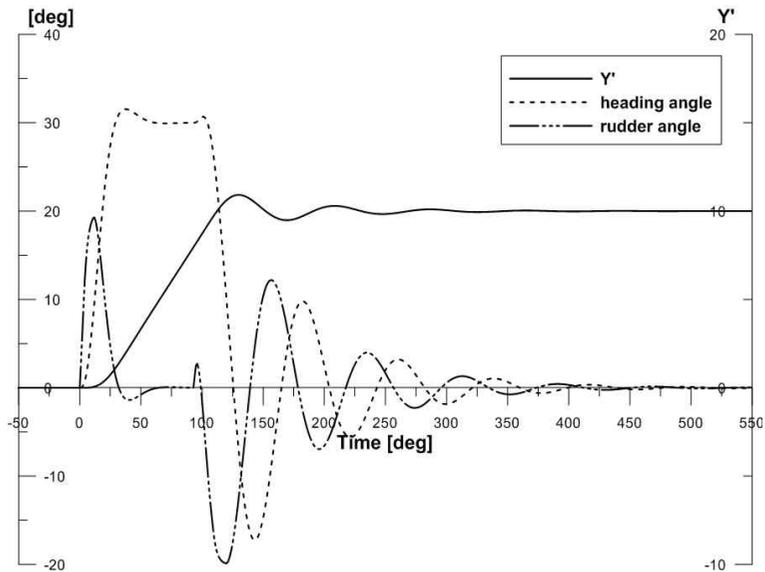


Fig 4.8 Horizontal motion control(path change) simulation result  
in case of non-existence of current

## 2) 조류 중에서의 수평면 운동 제어

조류가 있을 때의 수평 운동 제어 수치 시뮬레이션은 침로 유지, 침로 변경, 진로 변경에 대하여 수행되었다. 이때에는 조류의 영향으로 횡이동이 발생되므로  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  항을 모두 사용하여 제어하며, 침로 변경의 경우에는 목표 횡이동거리  $Y_d'$ 를  $(X' - X_0') \tan \psi_d$ 로 대체한다. 진로 변경의 경우에는 조류가 없을 때와 동일하게 제어를 한다. 조류는 초기 직진방향에서 관측했을 때 우측  $90^\circ$  방향으로부터 작용하며 조류의 정상성분 속도는  $\bar{U}_c = 1 \text{ kt}$ , 변동성분의 속도 범위는  $-0.2 \text{ kt} \leq \tilde{U}_c \leq 0.2 \text{ kt}$  라 가정한다. 수치 시뮬레이션의 결과를 Fig 4.9, Fig 4.10, Fig 4.11에 각각 나타낸다. 계산 결과를 보면 선수각이 명령한 선수각보다 약  $10^\circ$  더 커진 상태로 수렴되며 이 각도는 조류 속도와 선속의 합속도 방향의 각도이다. 따라서 조류가 있을 때의 선수각은 명령한 선수각에 조류 속도와 선속의 합속도 방향의 각도만큼 더해준 선수각에 수렴된다.

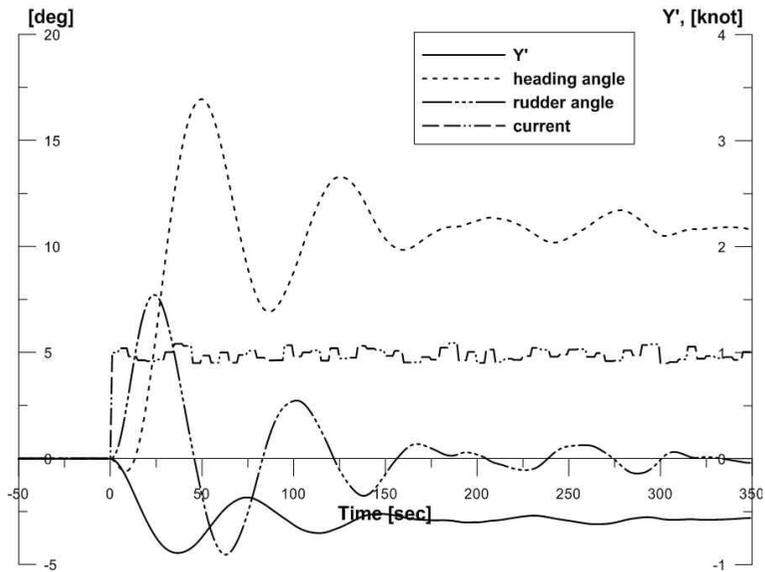


Fig 4.9 Horizontal motion control(course keeping) simulation result  
in case of existence of current ( $\psi_c=90^\circ$ ,  $\bar{U}_c=1kt$ )

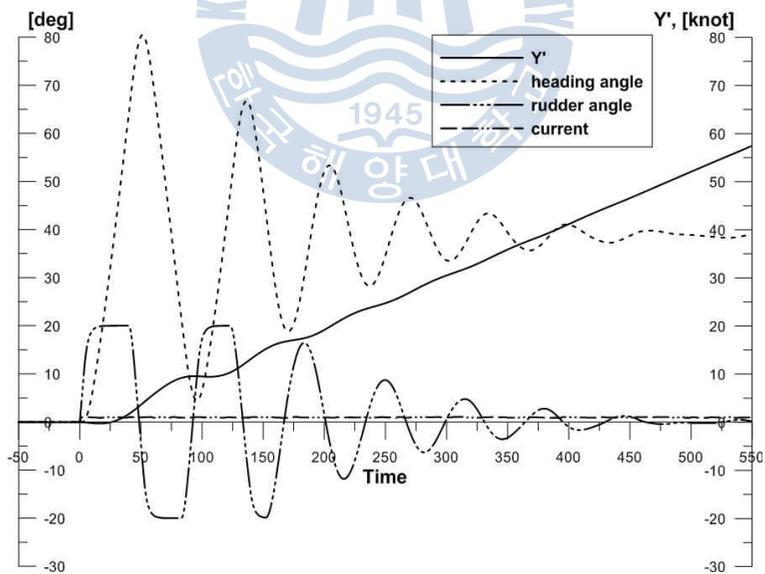


Fig 4.10 Horizontal motion control(course change) simulation result  
in case of existence of current ( $\psi_c=90^\circ$ ,  $\bar{U}_c=1kt$ )

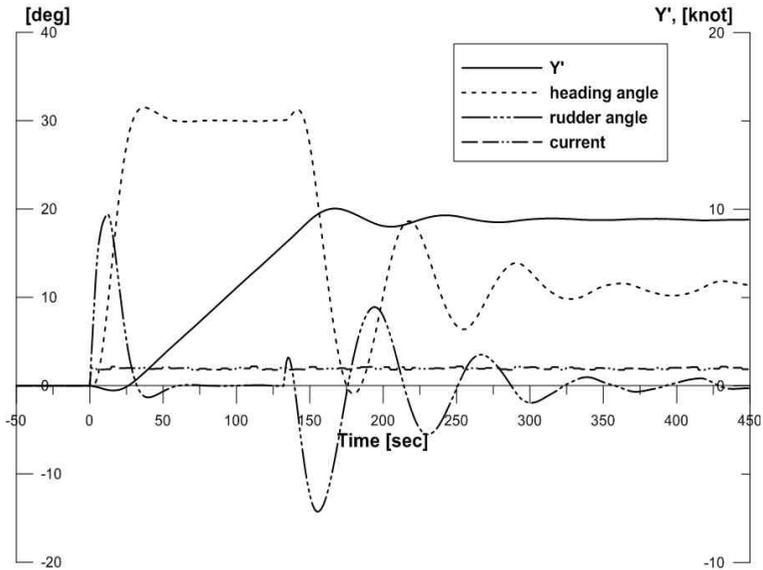


Fig 4.11 Horizontal motion control(path change) simulation result  
in case of existence of current ( $\psi_c=90^\circ$ ,  $\bar{U}_c=1\text{kt}$ )

## 4.4 수직면 운동 제어

### 4.4.1 수직면 운동 제어 모델

수직면 운동 제어를 위해 다음과 같이 명령 수평타각(승강타)의 제어 모델을 설정한다.

$$\delta s^* = -C_1(Z' - Z'_d) - C_2(\theta - \theta_d) - C_3 \dot{\theta} \quad (19)$$

여기서  $\delta s^*$ 는 명령 수평타각을,  $Z'_d$ 는 목표 심도의 무차원치를,  $\theta_d$ 는 목표 종동요각을,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ 는 제어상수를 의미한다.

그리고 조타기(steering gear)의 응답모델을 다음과 같이 상정한다.

$$T_E \dot{\delta s} + \delta s = \delta s^* \quad (20)$$

$$|\dot{\delta s}| < \dot{\delta s}_{\max}$$

여기서  $\delta s$ 은 수평타각을,  $\dot{\delta s}$ 는 수평타의 각속도를,  $\dot{\delta s}_{\max}$ 는 수평타의 각속도의 최대값을,  $T_E$ 는 시정수를 의미한다.

#### 4.4.2 수직면 제어 수치 시뮬레이션 결과

수직면 운동 제어의 경우에도 조류가 없을 때와 조류가 있을 때에 대하여 각각 수행되었다. 수치 시뮬레이션은 초기속도 5 kt의 직진 상태에서 명령이 이루어지도록 하였다. 그리고 대각도 조타로 인해 조타기에 과도한 동력이 걸리지 않도록 하기 위해 명령 수평타각의 최대값을  $15^\circ$ 로 제한하였다. 또한 정상 직진 시에 만타 무인잠수정 동체 형상의 상하 비대칭에 기인하는 동유체력 즉,  $Z^*$ ,  $M^*$ 의 영향을 상쇄시키기 위해서 수평타의 초기 타각을  $-13.8^\circ$ 로 설정하였다.

##### 1) 조류가 없을 때의 수직면 운동 제어

조류가 없을 때의 수직면 운동제어는 심도 변경에 대하여 수행되었다. 심도 변경은 두 단계로 나누어서 제어한다. 먼저 제1단계로서  $|Z'|$ 가  $|Z_d'|$ 보다 작을 경우에는 PD 제어 모델에서  $C_1$ 항만을 사용하여 제어한다. 제2단계로서  $|Z'|$ 가  $|Z_d'|$ 보다 클 경우에는  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ 항 전체를 사용하여 제어하며,  $\theta_d$ 는  $0^\circ$ 를 설정한다. Fig 4.12는 조류가 없을 때의 수직면 운동제어 수치 시뮬레이션의 결과이다.

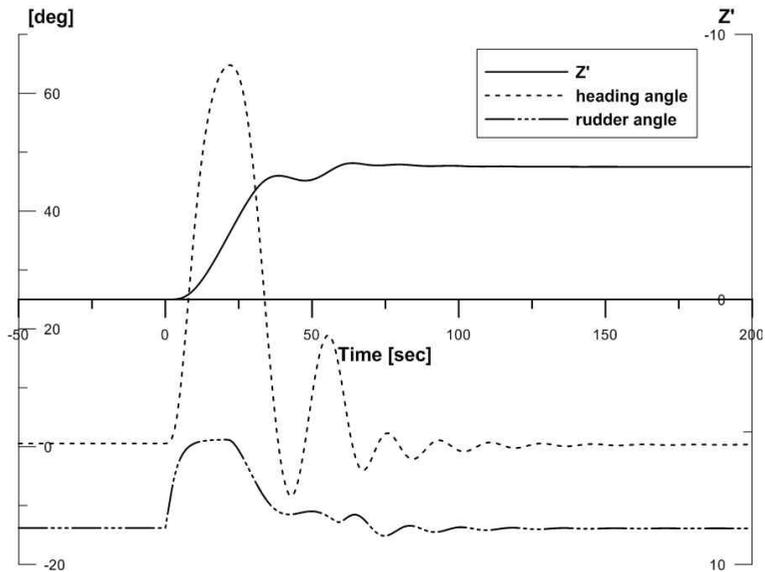


Fig 4.12 Vertical motion control(depth change) simulation result  
in case of non-existence of current

## 2) 조류 중에서의 수직면 운동 제어

조류가 있을 때의 수직면 운동 제어 수치 시뮬레이션은 심도 변경, 심도 유지에 대하여 수행되었다. 조류는 수평면 운동에 대해서만 작용하기 때문에 심도 변경 운동의 경우에는 조류가 없을 때와 동일하게 제어를 한다. 그리고 심도 유지 제어의 경우에는 PD 제어 모델에서  $C_2$ ,  $C_3$ 항을 사용하여 제어한다. 수치 시뮬레이션의 결과를 Fig 4.13, Fig 4.14에 나타낸다.

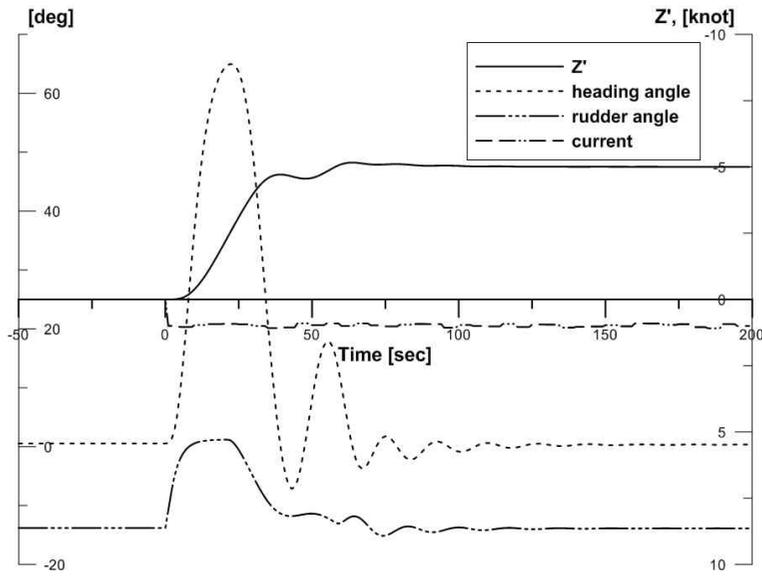


Fig 4.13 Vertical motion control(depth change) simulation result in case of existence of current ( $\psi_c=90^\circ$ ,  $\bar{U}_c=1kt$ )

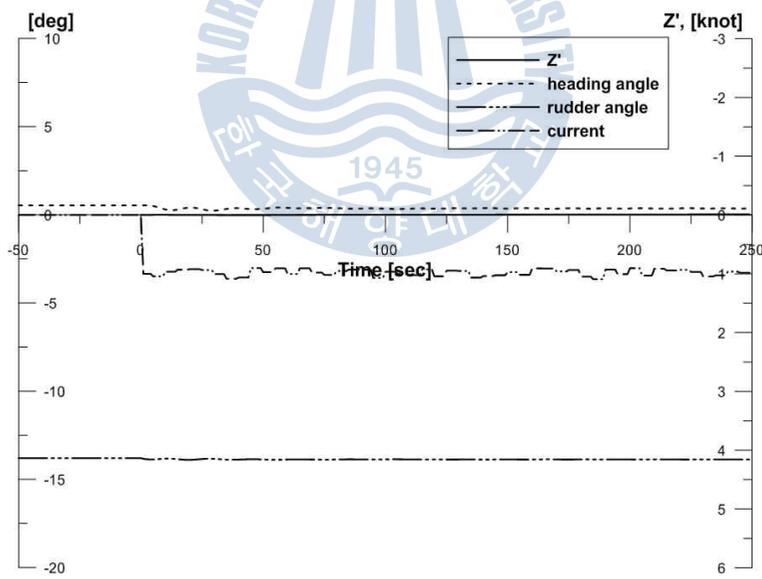


Fig 4.14 Vertical motion control(depth keeping) simulation result in case of non-existence of current ( $\psi_c=90^\circ$ ,  $\bar{U}_c=1kt$ )

## 제 5장 결론

본 연구에서는 조류의 영향을 받는 만타 무인잠수정의 운동 제어에 관해 논하였다. 대각도 사향시험과 4상한 영역 추진기 단독시험을 수행하여, 배준영과 손경호(2009)의 연구에서 개발된 만타 무인잠수정의 6자유도 운동 수학모델을 새롭게 제안하였으며, 아울러 만타 무인잠수정의 운항 환경 조건으로서 불균일 조류의 영향을 고려할 수 있는 수학모델을 구축하였다. 그리고 자유항주모형시험 결과와 수치시물레이션 결과와의 비교를 통하여 수학모델을 검증하였다. 또한 불균일 조류 중에서 운항되는 만타 무인잠수정의 추력 제어, 수평면 운동 제어 및 수직면 운동 제어를 위해 PD 제어기를 구축하였으며, 만타 무인잠수정 실물의 6자유도 비선형 운동 수치 시물레이션을 수행하였으며, 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 불균일 조류의 영향을 고려한 만타 무인잠수정의 6자유도 운동 수학모델 구축하였고, 수치시물레이션 프로그램을 개발하였다.
- (2) 자유항주모형시험 결과와 이에 대응하는 수치시물레이션결과를 비교하여 제안한 수학모델을 검증하였다.
- (3) 불균일 조류 중에서 운항되는 만타 무인잠수정의 추력 제어, 수평면 운동 제어, 수직면 운동 제어를 위하여 PD제어기를 구축하였으며, 수치 시물레이션 기법을 통해 제어의 효과를 확인하였다.

앞으로 PD제어기 이외에 Fuzzy제어, Sliding mode제어 등을 적용한 제어기 구축이 필요 할 것이라 생각한다.

## 참고문헌

- [1] Tamura, K., 1972, "Study on the Blockage correction", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 131, pp. 17-28.
- [2] Newman, J. N., 1978, Marine Hydrodynamics, The MIT Press, Cambridge.
- [3] Strom-Tejsen, 1965, "A Digital Computer Techique for Prediction of Standard Maneuvers of Surface Ships", Report No. 2130, Hydromechanics Laboratory Research and Development.
- [4] Vennard, J. K. and Street, R. L., 1982, Elementary Fluid Mechanics, 6th Edition, John Wiley & Sons, pp. 628-634.
- [5] Abkowitz, Martin A., 1969, Stability and Motion Control of Ocean Vehicles, The MIT Press, Cambridge.
- [6] 배준영, 손경호, 2009, "Manta형 무인잠수정의 조종운동 특성에 관한 연구," 대한조선학회 논문집, 제46권 제2호.
- [7] 손경호, 이승건, 하승필, 2006, "Manta형 무인잠수정의 6자유도 운동 수학적 모델 및 조종응답 특성," 대한조선학회 논문집, 제43권, 제4호.
- [8] U.S. Navy, 2004, "The Navy Unmanned Undersea Vehicle(UUV) Master Plan".