工學碩士 學位論文

Manta형 무인잠수정의 조종운동 특성에 관한 연구

A Study on Characteristics of Manoeuvrability of Manta-type Unmanned Undersea Vehicle (UUV)

指導敎授 孫 景 浩

2006年 2月

韓國海洋大學校 大學院

海洋 시 스 템 工學科

河 勝 弼

本 論文을 河勝弼의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

위원장　　현 범 수　　(인)

위　원　　조 효 제　　(인)

위　원　　손 경 호　　(인)

2005년　　12월　　26일

한국해양대학교 대학원

목 차

Abstract III

Nomenclaure IV

List of Figures V

List of Tables VI

1. 서 언 1

2. UUV의 6자유도 운동 수학모델 정립 2

2.1 Manta형 UUV의 명세 2

2.2 6자유도 운동 수학모델 정립 4

3. 선형유체력미계수의 이론적 추정법 13

3.1 선형운동방정식 13

3.2 선형유체력미계수의 이론적 추정법 13

3.2.1 관성력의 추정 13

3.2.2 감쇠유체력의 추정 16

3.2.3 제어유체력의 추정 25

3.2.4 유체력미계수의 이론추정치와 실험치의 비교 26

4. UUV의 조종응답 특성 34

4.1 동안정성 검토 34

4.2 선회성 검토 38

4.3 수직면에서의 방향안정성과 평형 잠항 조건 검토 39

4.3.1 수직면에서의 방향안정성 ····· 39
4.3.2 수직면에서의 침로유지 조건 ····· 40
4.3.3 수직면에서의 중립운항 조건 ····· 40

5. 결 론 ····· 42

참고문헌 ····· 44

Abstract

Mathematical model for coupled motions of Manta-type Unmanned Undersea Vehicle (UUV) moving with six degrees of freedom, is formulated. Furthermore, a calculation method for estimating the linear hydrodynamic derivatives acting on UUV, is proposed, and the estimated linear hydrodynamic derivatives are compared with results of captive model experiment. Based on linear dynamic model of UUV, a study was made to examine dynamic stability and turning ability in horizontal plane. And directional stability and required elevation rudder angles for neutrally operating in vertical plane, are also discussed.

Nomenclatures

L	:	UUV동체의 길이
B	:	UUV동체의 폭
D	:	UUV동체의 높이
∇	:	UUV동체의 배수용적
$O-xyz$	:	동좌표계
u, v, w	:	합속도의 x, y, z축 방향 성분
p, q, r	:	각속도의 x, y, z축 방향 성분
$x_G, 0, z_G$	:	UUV의 무게중심의 위치벡터
$x_B, 0, z_B$	:	UUV의 부심의 좌표
X, Y, Z	:	좌표원점 O에 관한 힘벡터의 방향성분
K, M, N	:	좌표원점 O에 관한 모멘트의 방향성분
$[I']$	:	관성주축에 대한 질량관성모멘트의 메트릭스
I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}	:	x, y, z축에 관한 질량관성모멘트
α	:	수직앙각
β	:	수평면 사항각
ϕ	:	횡동요 각

θ : 종동요 각

ϕ : 선수동요 각

$\boldsymbol{Gr}$: 중력

$\boldsymbol{B}$: 부력

$\boldsymbol{I}$: 관성유체력

$\boldsymbol{D}$: 감쇠유체력

$\boldsymbol{k'}$: 공간고정좌표계에서 연직하방향의 단위벡터

[E] : 공간고정좌표계를 물체고정좌표계로 바꾸어주는 변환매트릭스

F_j : j방향 부가질량력

M_j : j축 주위의 부가관성모멘트

A_{ji} : 부가질량텐서

ε_{jkl} : 부호변환기호

δ : 수직타의 방향타각

δe_1 : 선수 수평타의 승강타각

δe_2 : 선미 수평타의 승강타각

η_1, η_2 : 좌우 횡방향 자세제어용 수평타각

T_1, T_2 : 우현 및 좌현 프로펠러추력

t : 추력감소계수

y_P : 우현 프로펠러 위치의 y좌표

X_{uu} : 정상직진시 UUV에 작용하는 저항계수

Z_{uu} : UUV 동체의 상하 비대칭 형상에 기인하는 양력성 분의 유체력계수

M_{uu} : UUV 동체의 상하 비대칭 형상에 기인하는 양력성 분의 유체력계수

$(m_y)_f$: 수직평판의 횡방향 부가질량

ρ : 유체의 밀도

a_G : 기하학적 종횡비

b : 평판의 높이

A_f : 평판의 면적

a : 유효종횡비

θ : 후퇴각

X_{vv} : X를 V의 함수로 전개할 때 사용된 2차 미계수

X_{ww} : X를 W의 함수로 전개할 때 사용된 2차 미계수

Y_v : Y를 V의 함수로 전개할 때 사용된 1차 미계수

List of Figures

Fig. 1 Drawings of Manta-type UUV ····· 3
(a) Perspective view ····· 3
(b) Horizontal plan ····· 3
(c) Profile ····· 3
Fig. 2 Coordinate system and notations ····· 4
Fig. 3 Comparison of midship section of UUV fuselage with Lewis form approximation ··· 15
Fig. 4 Drawings of Manta-type UUV Appendages ····· 22
(a) Upper vertical plate ····· 22
(b) Lower vertical plate ····· 22
(c) Horizontal rudder ····· 22
Fig. 5 Depth-wise velocity distribution at working section of circulating water channel 23
Fig. 6 Comparison of experiment with calculation by whicker & Fehlner equation 25
(a) Upper vertical plate ····· 24
(b) Lower vertical plate ····· 24
(c) Horizontal rudder ····· 25
Fig. 7 Static experiment and oblique towing test results of UUV model ····· 32
(a) Surge ····· 27
(b) Sway ····· 28
(c) Heave ····· 29
(d) Roll ····· 30
(e) Pitch ····· 31
(f) yaw ····· 32

List of Tables

Table 1 Principal dimensions of Manta-type UUV ····· 2
Table 2 Principal dimensions of model fins and experimental condition ····· 21
Table 3 Theoretical calculation result of linear hydrodynamic derivatives and comparison with static experiment result. ····· 33
Table 4 Indices of dynamic stability and turning ability in vertical plane ····· 37
Table 5 Indices of dynamic stability and turning ability in horizontal plane ····· 37
Table 6 Calculation result of the condition for coursekeeping in vertical plane ···· 41
Table 7 Calculation result of the condition for neutral level flight ····· 42

1. 서 언

최근 해저 자원 개발 또는 생산 활동에 따른 수중작업의 수요 증대와 수중 유도무기 체계 개발의 일환으로 다양한 형태의 수중운동체 기술이 발전되고 있다. 특히 국내에서도 수중운동체의 운동특성과 운용시스템에 관련된 연구가 활발하게 수행되고 있다.

수중운동체의 운동특성과 관련하여 김찬기(1998)는 수중운동체의 모형시험 결과를 해석하기 위한 운동방정식의 구조 선택과 유체력미계수의 식별 방법에 관해서 연구하였고, 신용구 등(2005)은 수중운동체의 제어판에 작용하는 유체력 추정법과 제어판이 수중운동체의 동적안정성에 미치는 영향을 고찰하였다. 그리고 수중운동체의 운용시스템과 관련하여 손남선 등(2001)은 수중운동체의 충돌회피시스템 개발에 관한 연구를 수행하였고, 윤근항 등(2005)은 수중운동체의 목표추적시스템에 적합한 유도론에 관해 연구하였다.

본 논문에서는 모함인 잠수함 동체 상부의 일부로서 장착되어 있다가 필요시에만 모함으로부터 분리되어 자료 획득 등 작전 수행에 이용되는, 소형의 Manta 형상 무인잠수정(Unmanned Undersea Vehicle, 이하 UUV라 함)의 운동특성에 관한 기초적 검토를 하였다. UUV는 잠수함 동체 상부에 장착되어야 하므로 Manta 형상을 취하고 있다. 구체적으로, 본 논문에서는 Manta형 UUV의 6자유도 운동 수학모델을 정립하였으며, 선형 유체력미계수의 이론적 추정법을 확립하여 UUV의 동체와 제어판의 설계 시에 활용할 수 있도록 하였다. 아울러 본 논문에서 채택된 Manta형 UUV의 동안정성, 선회성 및 중립운항조건 등 조종응답 특성에 대해서도 검토하였다.

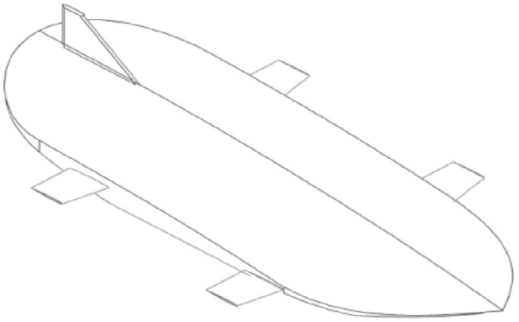
2. UUV의 6자유도 운동 수학모델 정립

2.1 Manta형 UUV의 명세

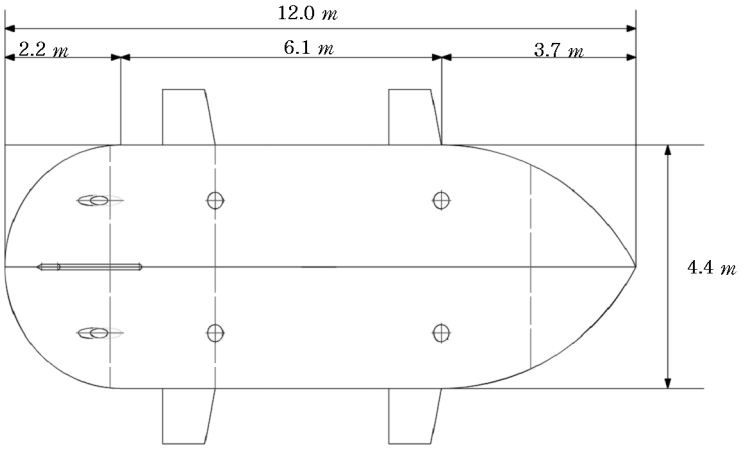
본 논문에서 채택한 Manta형 UUV의 주요목과 형상은 각각 **Table 1**, **Fig. 1**과 같다. **Fig. 1**에서 알 수 있듯이 UUV 동체 측면에는 승강 또는 자세제어를 위해 승강타가 수평으로 4개 설치되어 있다. 승강타의 단면은 NACA0008 형상을 채택한다. 그리고 수평운동의 동안정성 확보를 위해 선미 상하부에 각각 안정판을 설치하고 있으며, 하부 안정판에는 방향타가 수직으로 설치되어 있다. 아울러 바닥 4곳에 hovering을 위한 thruster와 후부 2곳에 추진을 위한 thruster가 설치되어 있다.

Table 1 Principal dimensions of Manta-type UUV

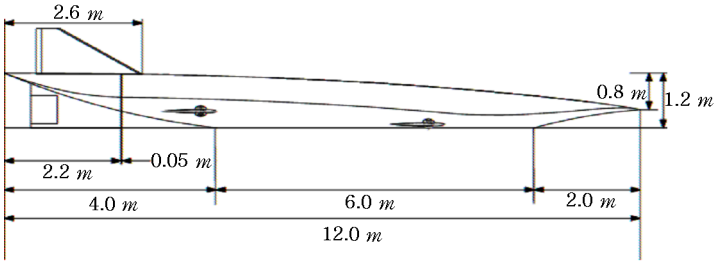
Item	Dimension	Remarks
Fuselage length	L = 12.0 m	
breadth	B = 4.4 m	
height	D = 1.2 m	
disp. vol.	∇ = 31.88 m^3	
centroid	6.333 m	distance from nose
Upper vertical plate		
root chord	2.0 m	
tip chord	0.45 m	
span	1.0 m	
Lower vertical plate		contains vertical rudder
root chord	0 m	
tip chord	3.5 m	
span	0.97 m	
Horizontal rudder		4 wings (NACA0008 section
root chord	1.0 m	form)
tip chord	0.8 m	
span	1.0 m	
Vertical rudder		
chord	0.5 m	
span	0.6 m	



(a) Perspective view



(b) Horizontal plan



(c) Profile

Fig. 1 Drawings of Manta-type UUV

2.2 6자유도 운동 수학모델 정립

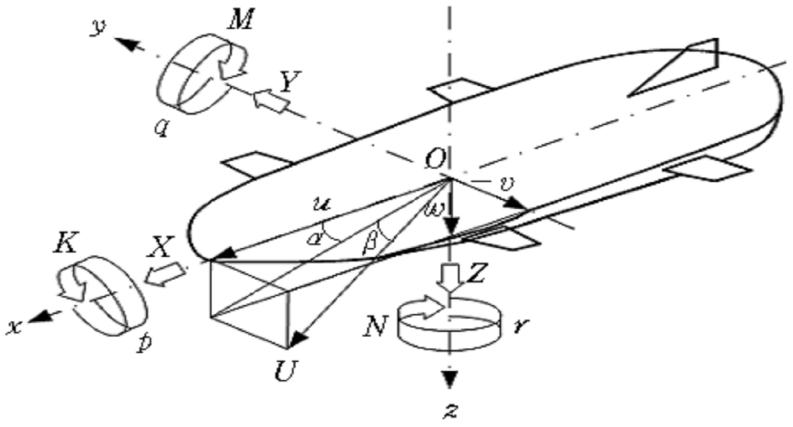


Fig. 2 Coordinate system and notations

UUV를 강체(rigid body)라 가정하고 UUV에 고정된 좌표계(동좌표계)를 $O-xyz$라 한다(**Fig. 2** 참조). 동좌표계의 원점 O는 UUV 동체 중앙횡단면에서의 동체깊이의 중간위치에 취하기로 하며, 일반적으로 이 점은 무게중심과 일치하지는 않는다. **Fig. 2**와 같이 좌표원점 O에 관한 합속도 $\boldsymbol{U}$와 각속도 $\boldsymbol{\omega}$의 x, y, z성분은 각각 다음과 같이 표시된다.

$$\boldsymbol{U}=(u, v, w) \tag{1}$$

$$\boldsymbol{\omega}=(p, q, r) \tag{2}$$

그리고 UUV의 무게중심의 위치벡터 $\boldsymbol{r}_G$는 다음과 같다.

$$\boldsymbol{r}_G=(x_G, 0, z_G) \tag{3}$$

먼저 힘에 관한 Newton의 운동방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$\boldsymbol{F}_G=\frac{d}{dt}(m\,\boldsymbol{U}_G) \tag{4}$$

여기서 첨자 G는 무게중심에 관한 값을 나타내며 d/dt 기호는 시간에 대한 1차도함수를 의미한다. m은 UUV의 질량을 나타낸다. 그리고 무게중심 위치에서의 합속도 $\boldsymbol{U}_G$와 힘 $\boldsymbol{F}_G$는 각각 다음과 같이 표시된다.

$$\boldsymbol{U}_G = \boldsymbol{U} + \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{r}_G \tag{5}$$

$$\boldsymbol{F}_G = \boldsymbol{F}_O = (X, Y, Z) \tag{6}$$

여기서 $\boldsymbol{F}_O$는 좌표원점 O에 관한 힘벡터로서 X, Y, Z의 성분값을 가진다.

따라서 $\boldsymbol{F}_O$는 다음 식으로 표시된다.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{F}_O &= m\frac{d}{dt}(\boldsymbol{U} + \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{r}_G) \\ &= m(\dot{\boldsymbol{U}} + \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \boldsymbol{r}_G + \boldsymbol{\omega} \times \dot{\boldsymbol{r}}_G) \end{aligned} \tag{7}$$

여기서 dot (·) 기호는 d/dt 기호와 동일하다.

다음으로 모멘트에 관한 Newton의 운동방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$\boldsymbol{M}_G = \frac{d}{dt}(\boldsymbol{ang.\ mom.})_G \tag{8}$$

여기서도 첨자 G는 무게중심에 관한 값을 나타내며 각운동량 $(\boldsymbol{ang.\ mom.})_G$는 다음과 같이 표시된다.

$$(\boldsymbol{ang.\ mom.})_G = [I']\boldsymbol{\omega} \tag{9}$$

여기서 $[I']$는 UUV의 무게중심을 지나고 x, y, z축과 평행인 축 즉, 관성주축에 대한 질량관성모멘트의 메트릭스 표현을 의미하며 구체적으로 다음과 같이 표시된다.

$$[I'] = \begin{bmatrix} I_{xx} - mz_G^2 & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} - m(z_G^2 + x_G^2) & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} - mx_G^2 \end{bmatrix} \tag{10}$$

여기서 I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}는 각각 x, y, z축에 관한 UUV의 질량관성모멘트를 의미한다. 한편, 무게중심에 관한 모멘트벡터 $\boldsymbol{M}_G$는 좌표원점 O에 관한 모멘트벡터 $\boldsymbol{M}_O$와 다음관계가 성립한다.

$$\boldsymbol{M}_G = \boldsymbol{M}_O - \boldsymbol{r}_G \times \boldsymbol{F}_O \tag{11}$$

여기서 $\boldsymbol{M}_O$는 K, M, N의 성분값을 가진다. 즉, 다음과 같이 표시된다.

$$\boldsymbol{M}_O = (K, M, N) \tag{12}$$

따라서 $\boldsymbol{M}_O$는 다음 식으로 표시된다.

$$\boldsymbol{M}_O = \frac{d}{dt}([I']\boldsymbol{\omega}) + \boldsymbol{r}_G \times \boldsymbol{F}_O \tag{13}$$

식(7)과 식(13)을 구체적으로 계산하면 $\boldsymbol{F}_O$와 $\boldsymbol{M}_O$의 각 성분별 힘과 모멘트에 관한 6자유도 운동의 기본식은 다음과 같이 정리된다(Abkowitz 1969).

$$\begin{aligned}
X &= m\{\dot{u} + qw - rv - x_G(q^2 + r^2) + z_G(pr + \dot{q})\} \\
Y &= m\{\dot{v} + ru - pw + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})\} \\
Z &= m\{\dot{w} + pv - qu - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q})\} \\
K &= I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr - m\{z_G(\dot{v} + ru - pw) + x_G z_G(pq + \dot{r})\} \\
M &= I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp + m\{z_G(\dot{u} + qw - rv) - x_G(\dot{w} + pv - qu) \\
&\qquad + x_G z_G(p^2 - r^2)\} \\
N &= I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq + m\{x_G(\dot{v} + ru - pw) + z_G x_G(rq - \dot{p})\}
\end{aligned} \tag{14}$$

다음으로, $\boldsymbol{F}_O$ 와 $\boldsymbol{M}_O$는 구성요소별로 다음과 같이 세분화한 각각의 힘과 모멘트의 합으로 표시할 수 있다.

$$\boldsymbol{F}_O = \boldsymbol{F}_{Gr} + \boldsymbol{F}_B + \boldsymbol{F}_I + \boldsymbol{F}_D + \boldsymbol{F}_C \tag{15}$$

$$\boldsymbol{M}_O = \boldsymbol{M}_{Gr} + \boldsymbol{M}_B + \boldsymbol{M}_I + \boldsymbol{M}_D + \boldsymbol{M}_C \tag{16}$$

여기서 첨자 $\boldsymbol{Gr}, \boldsymbol{B}, \boldsymbol{I}, \boldsymbol{D}, \boldsymbol{C}$는 각각 중력, 부력, 관성유체력, 감쇠유체력 및 제어유체력을 의미한다.

① 중력

$$\boldsymbol{F}_{Gr} = [E]\, mg\boldsymbol{k}' \tag{17}$$

$$\boldsymbol{M}_{Gr} = \boldsymbol{r}_G \times ([E] mg\, \boldsymbol{k}') \tag{18}$$

여기서 g는 중력가속도, $\boldsymbol{k}'$는 공간고정좌표계(정지좌표계)에서 연직하방향의 단위벡터이고, [E]는 공간고정좌표계를 물체고정좌표계(동좌표계)로 바꾸어주는 변환메트릭스(coordinate transformation matrix)로서 다음과 같다(Abkowitz 1969). 단, ϕ, θ, ψ는 Euler각을 나타낸다.

$$[\,\mathrm{E}\,] = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & \cos\theta\sin\psi & -\sin\theta \\ \sin\phi\sin\theta\cos\psi - \cos\phi\sin\psi & \sin\phi\sin\theta\sin\psi + \cos\phi\cos\psi & \sin\phi\cos\theta \\ \cos\phi\sin\theta\cos\psi + \sin\phi\sin\psi & \cos\phi\sin\theta\sin\psi - \sin\phi\cos\psi & \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix} \tag{19}$$

② 부력

$$\boldsymbol{F}_B = -[E]\, \rho g \nabla\, \boldsymbol{k}' \tag{20}$$

$$\boldsymbol{M}_B = -\boldsymbol{r}_B \times ([E] \rho g \nabla\, \boldsymbol{k}') \tag{21}$$

여기서 ρ : 유체의 밀도, ∇ : UUV의 배수용적, $\boldsymbol{r}_B$는 부심의 좌표로서 $(x_B, 0, z_B)$이다.

③ 관성유체력

관성유체력(hydro-inertial force) 또는 부가질량력(added-mass force)은 Newman(1978)에 의해 다음과 같이 표시된다.

$$F_j = -\frac{dU_i}{dt} A_{ji} - \varepsilon_{jkl} U_i \Omega_k A_{li} \tag{22}$$

$$M_j = -\frac{dU_i}{dt} A_{j+3,i} - \varepsilon_{jkl} U_i \Omega_k A_{l+3,i} - \varepsilon_{jkl} U_i U_k A_{li} \tag{23}$$

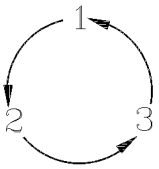
여기서 F_j는 j방향 부가질량력, M_j는 j축 주위의 부가관성모멘트, A_{ji}는 부가질량텐서 (added-mass tensor)로서 i방향 운동모드에 기인하는 j방향 부가질량을 의미한다. ε_{jkl}은 부호변환기호(alternating tensor)로서, 123, 231, 312의 경우에는 양(+)의 부호를 취하고, 132, 321, 213의 경우에는 음(−)의 부호를 취하며, 같은 숫자가 두번 겹치면 영(0)을 취하도록 정의된다. 그 외 각 부호의 의미는 다음과 같다.

$$i \ : 1\sim 6, \quad j,k,l : 1\sim 3$$

$$U_i \ : \ (U_1, U_2, U_3) \equiv (u, v, w)$$

$$(U_4, U_5, U_6) \equiv (p, q, r)$$

$$\Omega_k \ : \ (\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3) \equiv (p, q, r)$$



④ 감쇠유체력

동체(fuselage)와 제어판(control planes)에 작용하는, 유체의 점성에 기인하는 감쇠력 다음과 같이 표시한다. 단, **Fig. 7**에 표시되어 있는 유체력미계수 중 $Y_{w'}, K_{w'}, N_{w'}$는 UUV모형이 좌우대칭형이므로 실제로는 나타날 수 없는 항이라는 점을 고려하여 수학모델에서는 무시하였다.

$$\boldsymbol{F}_D = \begin{bmatrix} X_{uu}u^2 + X_{NL}(v,w) \\ Y_v v + Y_r^* r + Y_{NL}(v,r) \\ Z_{uu}u^2 + Z_w w + Z_q^* q + Z_{NL}(w,q) \end{bmatrix} \tag{24}$$

$$\boldsymbol{M}_D = \begin{bmatrix} K_p p + K_v v + K_r^* r \\ M_{uu} u^2 + M_w^* w + M_q^* q + M_{NL}(w, q) \\ N_v^* v + N_r^* r + N_{NL}(v, r) \end{bmatrix} \tag{25}$$

$$\begin{aligned} X_{NL}(v, w) &= X_{vv} v^2 + X_{ww} w^2 \\ Y_{NL}(v, r) &= Y_{v|v|} v|v| + Y_{r|r|} r|r| + Y_{v|r|} v|r| \\ Z_{NL}(w, q) &= Z_{w|w|} w|w| + Z_{q|q|} q|q| + Z_{w|q|} w|q| \\ M_{NL}(w, q) &= M_{w|w|} w|w| + M_{q|q|} q|q| + M_{q|w|} q|w| \\ N_{NL}(v, r) &= N_{v|v|} v|v| + N_{r|r|} r|r| + N_{r|v|} r|v| \end{aligned} \tag{26}$$

여기서 식(24), (25), (26)에서는 종운동군(heave-pitch)과 횡운동군(sway-yaw)의 간섭유체력은 무시하고 있으며, 유체력미계수에 붙어 있는 첨자 * 표시는 부가질량력에 의한 감쇠력과 점성감쇠력을 합한 유체력미계수와의 구분을 위해서 사용되었다(식(33), (38)참조). 그리고 X_{uu}는 정상직진시 UUV에 작용하는 저항계수, Z_{uu}와 M_{uu}는 UUV 동체의 상하 비대칭 형상에 기인하는 양력성분의 유체력계수, X_w는 수직앙각 α의 양(+), 음(−)부호에 따른 항력의 차이에 기인하는 유체력 성분을 나타낸다. 그리고 비선형유체력은 UUV의 좌우 대칭 형상을 고려하여 전후방향은 운동변수의 2차다항식으로, 그 외 유체력 성분은 운동변수의 3차 다항식의 변형된 형태로 나타 낼 수 있다.

⑤ 제어 유체력

제어판의 작동에 기인하는 유체력과 추진력을 조종성분야에서의 관례에 따라서 다음과 같이 표시한다.

$$\boldsymbol{F}_C = \begin{bmatrix} X_{\delta\delta}\delta^2 + X_{\delta e1\delta e1}(\delta e_1)^2 + X_{\delta e2\delta e2}(\delta e_2)^2 + (1-t)(T_1 + T_2) \\ Y_\delta \delta \\ Z_{\delta e1}\delta e_1 + Z_{\delta e2}\delta e_2 + Z(HT) \end{bmatrix} \tag{27}$$

$$\boldsymbol{M}_C = \begin{bmatrix} K_\delta \delta + K_{\eta 1}\eta_1 + K_{\eta 2}\eta_2 \\ M_{\delta e1}\delta e_1 + M_{\delta e2}\delta e_2 + M(HT) \\ N_\delta \delta + (1-t)(T_2 - T_1)y_p \end{bmatrix} \tag{28}$$

여기서 δ : 수직타의 방향타각(rudder angle)으로서 우현방향을 양(+)의 방향으로 취함.

$\delta e_1, \delta e_2$: δe_1은 선수 수평타의 승강타각(elevator angle), δe_2는 선미 수평타의 승강타각으로서 연직상방향을 양(+)의 방향으로 취함.

η_1, η_2 : 선수, 선미의 횡방향 자세제어용 수평타각으로서 좌우 수평타를 반대칭적으로 취함으로서 횡동요모멘트를 발생시킨다.

T_1, T_2 : 우현 및 좌현 프로펠러추력

t : 추력감소계수

y_P : 우현 프로펠러 위치의 y좌표

$Z(HT)$와 $M(HT)$는 hovering thruster에 의한 추력과 추력모멘트를 나타낸다.

이상 언급한 ①, ②, ③, ④, ⑤의 힘과 모멘트를 각 성분별로 정리하여 식(14)에 대입하면 다음과 같은 운동방정식을 얻을 수 있다.

– 종운동방정식

$$
\begin{aligned}
&(m + A_{11})\dot{u} + (mz_G + A_{15})\dot{q} = F_X \\
&(m + A_{33})\dot{w} - (mx_G - A_{35})\dot{q} = F_Z \\
&(I_{yy} + A_{55})\dot{q} - (mx_G - A_{53})\dot{w} + (mz_G + A_{51})\dot{u} = M_Y
\end{aligned}
\tag{29}
$$

$$
\begin{aligned}
F_X = \; & -(m + A_{33})qw + (m + A_{22})rv \\
& + (mx_G - A_{35})q^2 + (mx_G + A_{26})r^2 - (mz_G - A_{24})pr \\
& - (m - \rho\nabla)g\sin\theta + X_{uu}u^2 + X_{\delta\delta}\delta^2 + X_{\delta e1\delta e1}(\delta e_1)^2 \\
& + X_{\delta e2\delta e2}(\delta e_2)^2 + (1-t)(T_1 + T_2) + X_{NL}(v, w)
\end{aligned}
\tag{30}
$$

$$
\begin{aligned}
F_Z = \; & -(m + A_{22})pv + (mz_G - A_{24})p^2 \\
& + (mz_G + A_{15})q^2 - (mx_G + A_{26})pr \\
& + (m - \rho\nabla)g\cos\phi\cos\theta + Z_{uu}u^2 + Z_w w + (Z_q + mu)q \\
& + Z_{\delta e1}\delta e_1 + Z_{\delta e2}\delta e_2 + Z(HT) + Z_{NL}(w, q)
\end{aligned}
\tag{31}
$$

$$
\begin{aligned}
M_Y = \; & -(mz_G + A_{15})qw + (mz_G - A_{42})rv \\
& + (mx_G + A_{62})pv + (mx_G z_G - A_{46})r^2 \\
& - (mx_G z_G - A_{64})p^2 - \{(I_{xx} + A_{44}) - (I_{zz} + A_{66})\}pr \\
& - (mz_G - \rho\nabla z_B)g\sin\theta - (mx_G - \rho\nabla x_B)g\cos\phi\cos\theta \\
& + M_{uu}u^2 + M_w w + (M_q - mx_G u)q \\
& + M_{\delta e1}\delta e_1 + M_{\delta e2}\delta e_2 + M(HT) + M_{NL}(w, q)
\end{aligned}
\tag{32}
$$

단, $Z_q = Z_q^* + A_{11}u$, $M_w = M_w^* + (A_{33} - A_{11})u$

$M_q = M_q^* + A_{35}u$ (33)

– 횡운동방정식

$$
\begin{aligned}
&(m + A_{22})\dot{v} - (mz_G - A_{24})\dot{p} + (mx_G + A_{26})\dot{r} = F_Y \\
&(I_{xx} + A_{44})\dot{p} - (mx_G z_G - A_{46})\dot{r} - (mz_G - A_{42})\dot{v} = M_X \\
&(I_{zz} + A_{66})\dot{r} - (mx_G z_G - A_{64})\dot{p} + (mx_G + A_{62})\dot{v} = M_Z
\end{aligned} \tag{34}
$$

$$
\begin{aligned}
F_Y = \; & (m + A_{33})pw - (mx_G - A_{35})pq - (mz_G + A_{15})qr \\
& + (m - \rho\nabla) g \sin\phi\cos\theta \\
& + Y_v v + (Y_r - mu)r + Y_\delta \delta + Y_{NL}(v, r)
\end{aligned} \tag{35}
$$

$$
\begin{aligned}
M_X = \; & -(mz_G - A_{24})pw + (mx_G z_G - A_{64})pq \\
& - \{(I_{zz} + A_{66}) - (I_{yy} + A_{55})\}qr - (A_{62} + A_{35})qv \\
& + (A_{26} + A_{53})rw - (A_{33} - A_{22})vw \\
& - (mz_G - \rho\nabla z_B) g \sin\phi\cos\theta + K_p p + K_v v + K_\delta \delta \\
& + (K_r + mz_G u)r + K_{\eta 1}\eta_1 + K_{\eta 2}\eta_2
\end{aligned} \tag{36}
$$

$$
\begin{aligned}
M_Z = \; & (mx_G - A_{53})pw - (mx_G z_G - A_{46})qr \\
& - \{(I_{yy} + A_{55}) - (I_{xx} + A_{44})\}pq \\
& - (A_{51} + A_{24})pu + (A_{15} + A_{42})qv \\
& + (mx_G - \rho\nabla x_B) g \sin\phi\cos\theta \\
& + N_v v + (N_r - mx_G u)r + N_\delta \delta + (1 - t)(T_2 - T_1) y_p + N_{NL}(v, r)
\end{aligned} \tag{37}
$$

단, $Y_r = Y_r^* - A_{11}u, \quad K_r = K_r^* + A_{51}u$

$N_v = N_v^* - (A_{22} - A_{11})u, \quad N_r = N_r^* - A_{26}u$ (38)

3. 선형유체력미계수의 이론적 추정법

3.1 선형운동방정식

앞에서 확립된 6자유도 운동 수학모델에서 pitch-heave 연성운동과 sway-yaw 연성운동 만을 고려 각 운동변수의 선형항만을 취하면 종운동과 횡운동의 선형연립방정식은 각각 다음과 같다.

– 종운동방정식

$$\begin{aligned}&(m+A_{33})\dot{w} - Z_w w - (mx_G - A_{35})\dot{q} - (Z_q + mU)q = Z_{\delta e1}\delta e_1 + Z_{\delta e2}\delta e_2 \\ &(I_{yy}+A_{55})\dot{q} - (M_q - mx_G U)q - (mx_G - A_{53})\dot{w} - M_w w \\ &\qquad + mg(z_G - z_B)\theta = M_{\delta e1}\delta e_1 + M_{\delta e2}\delta e_2\end{aligned} \tag{39}$$

– 횡운동방정식

$$\begin{aligned}&(m+A_{22})\dot{v} - Y_v v + (mx_G + A_{26})\dot{r} - (Y_r - mU)r = Y_\delta \delta \\ &(I_{zz}+A_{66})\dot{r} - (N_r - mx_G U)r + (mx_G + A_{62})\dot{v} - N_v v = N_\delta \delta\end{aligned} \tag{40}$$

3.2 선형유체력미계수의 이론적 추정법

3.2.1 관성력의 추정

UUV의 질량은 동체와 부가물 각각의 질량의 합으로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m = \rho \nabla + \rho \sum_i v_i \tag{41}$$

단, ρ : 유체의 밀도

∇ : 동체의 체적

v_i : i번째 부가물의 체적

UUV 동체의 질량 분포가 배수량의 종방향 분포와 같다고 가정하고, 부가물의 질량은 배수질량과 같다고 가정할 때, UUV의 관성모멘트는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{yy} = \rho \int_{-L/2}^{L/2} A(x) \cdot x^2 \, dx + \rho \sum_i v_i \, (x_i^2 + z_i^2) \tag{42}$$

$$I_{zz} = \rho \int_{-L/2}^{L/2} A(x) \cdot x^2 \, dx + \rho \sum_i v_i \, (x_i^2 + y_i^2) \tag{43}$$

단, $A(x)$: 동체의 횡단면적

x : 동체의 각 횡단면의 x좌표

x_i, y_i, z_i : i번째 부가물의 기하학적 중심위치의 x, y, z좌표

식(22) 또는 식(23)에서 정의된 부가질량계수 A_{ji}는 UUV 동체와 부가물 각각의 부가질량 또는 부가관성모멘트를 합하여 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned}
A_{22} &\equiv m_y = (m_y)_h + \sum_{i=1}^{2} (m_y)_{fi} \\
A_{26} &= A_{62} = (m_y)_h \cdot x_y + \sum_{i=1}^{2} x_{fi} \cdot (m_y)_{fi} \\
A_{66} &\equiv J_{zz} = (J_{zz})_h + \sum_{i=1}^{2} (x_{fi})^2 \cdot (m_y)_{fi} \\
A_{33} &\equiv m_z = (m_z)_h + \sum_{i=3}^{6} (m_z)_{fi} \\
A_{53} &= A_{35} = -(m_z)_h \cdot x_z - \sum_{i=3}^{6} x_{fi} \cdot (m_z)_{fi} \\
A_{55} &\equiv J_{yy} = (J_{yy})_h + \sum_{i=3}^{6} (x_{fi})^2 \cdot (m_z)_{fi}
\end{aligned} \tag{44}$$

여기서 m_y, m_z는 각각 y방향과 z방향 부가질량을 의미하며, J_{yy}, J_{zz}는 각각 y축과 z축 주위의 부가관성모멘트를 의미한다. 그리고 첨자 h는 동체, 첨자 f_i는 i번째의 부가물, x_{fi}는 i번째 부가물의 중심위치의 x좌표를 나타낸다. 그리고 부가물은 $i=1$은 상부수직판, $i=2$는 하부수직판(수직타 포함), $i=3\sim6$은 수평타를 나타낸다. 그리고 x_y, x_z는 각각 $(m_y)_h$와 $(m_z)_h$의 중심의 x좌표를 나타낸다.

① 동체의 부가질량과 부가관성모멘트

동체 횡단면을 Lewis form 근사시켜서 Lewis form에 대한 2차원 부가질량을 구하고 이들을 길이방향으로 적분한다. 즉, strip이론을 적용시킨다(Tasai and Takagi 1969). 그리고 계산된 부가질량과 부가관성모멘트에 대한 3차원 수정은 회전타원체의 3차원 수정계수를 적용시키기로 한다(Motora et al. 1982). 참고로, 동체 중앙횡단면과 이에 대응하는 Lewis form 단면과의 비교를 **Fig. 3** 에 나타낸다.

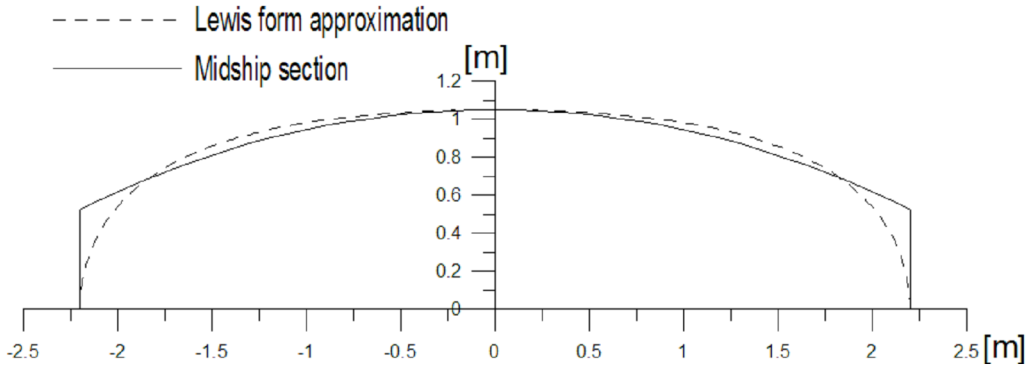


Fig. 3 Comparison of midship section of UUV fuselage with Lewis form approximation

② 부가물의 부가질량과 부가관성모멘트

동체에 부착되어 있는 수직평판의 횡방향 부가질량은 다음 식으로 주어진다(Lewis 1989).

$$(m_y)_f = \frac{\pi \rho b A_f}{(a_G^2 + 1)^{1/2}} \tag{45}$$

단, $(m_y)_f$: 수직평판의 횡방향 부가질량

ρ : 유체의 밀도

a_G : 기하학적 종횡비

b : 평판의 높이

A_f : 평판의 면적

UUV의 부가물 즉, 상부수직판과 하부수직판의 경우에는 경상효과(mirror effect)를 고려하여 기하학적 종횡비 대신에 유효종횡비를 사용하여 나타내면 $(m_y)_f$ 는 다음과 같다.

$$(m_y)_f = \frac{2\pi\rho b A_f}{(a^2+1)^{1/2}} \tag{46}$$

단, a : 유효종횡비

수평타의 경우에는 수직평판 대신에 수평평판의 종방향 부가질량 즉, $(m_z)_f$ 를 식(46)와 마찬가지로 구할 수 있다.

3.2.2 감쇠유체력의 추정

감쇠유체력미계수는 UUV 동체와 부가물에 작용하는 각각의 감쇠유체력미계수를 구해 이들을 서로 합하여 다음과 같이 구한다. 즉, 동체와 부가물 사이의 간섭유체력은 무시한다.

$$\begin{aligned}
Y_v' &= (Y_v')_h + \sum_{i=1}^{2}(Y_v')_{fi} \\
N_v' &= (N_v')_h + \sum_{i=1}^{2}(Y_v')_{fi}\cdot x_{fi}' \\
Y_r' &= (Y_r')_h + \sum_{i=1}^{2}(Y_v')_{fi}\cdot x_{fi}' \\
N_r' &= (N_r')_h + \sum_{i=1}^{2}(x_{fi}')^2\cdot(Y_v')_{fi} \\
Z_w' &= (Z_w')_h + \sum_{i=3}^{6}(Z_w')_{fi} \\
M_w' &= (M_w')_h - \sum_{i=3}^{6}(Z_w')_{fi}\cdot x_{fi}' \\
Z_q' &= (Z_q')_h - \sum_{i=3}^{6}(Z_w')_{fi}\cdot x_{fi}' \\
M_q' &= (M_q')_h + \sum_{i=3}^{6}(x_{fi}')^2\cdot(Z_w')_{fi}
\end{aligned} \tag{47}$$

여기서 첨자 h와 f는 각각 동체와 부가물을 의미하며 부가물의 경우 $i=1$은 상부수

직판, $i=2$는 하부수직판(수직타 포함), $i=3\sim6$은 수평타를 나타낸다. 그리고 x_{fi}는 i번째 부가물의 중심위치의 x좌표를 나타낸다. 그리고 유체력미계수를 구할 때 힘은 $0.5\rho L^2U^2$으로, 모멘트는 $0.5\rho L^3U^2$으로, 속도는 U로, 각속도는 U/L로, 길이는 L로 각각 무차원화 한다.

① 동체의 감쇠유체력미계수

동체의 감쇠유체력은 세장체이론(slender body theory)을 이용하여 다음과 같이 계산한다(Newman 1978). 세장체이론은 횡운동에 대해서 다음과 같이 적용되며, 종운동은 이에 준해서 구하기로 한다. 횡운동의 경우 동체 각 횡단면에서의 속도퍼텐시얼을 다음과 같이 표시한다.

$$\Phi=-(v+xr)\phi(x;y,z) \tag{48}$$

여기서 $\phi(x;y,z)$는 단위속도의 횡운동에 의한 속도퍼텐시얼을 나타내며, 단면 형상만의 함수이다. 단면에 작용하는 압력의 식은 다음과 같이 표시된다.

$$P\approx-\rho(\frac{\partial}{\partial t}-U\frac{\partial}{\partial x})\Phi \tag{49}$$

따라서 단면에 작용하는 횡방향힘은 다음과 같이 표시된다.

$$\Delta Y=-\int_c P\cos(\widehat{ny})\,ds=\int_c P(\frac{\partial\phi}{\partial n})\,ds \tag{50}$$

단, 법선 n은 동체표면으로부터 외향으로 취해지며, 선적분 c는 동체 횡단면의 윤곽선에 대해서 수행된다. 식(48), (49)을 식(50)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\Delta Y &= -(\frac{\partial}{\partial t}-U\frac{\partial}{\partial x})(v+xr)\,m_y^{2D}(x)\\ &= -(\dot{v}+x\dot{r})m_y^{2D}(x)+Uv\frac{\partial}{\partial x}\{m_y^{2D}(x)\}+Ur\frac{\partial}{\partial x}\{x\cdot m_y^{2D}(x)\}\end{aligned} \tag{51}$$

여기서 $m_y^{2D}(x)$는 동체 횡단면에 작용하는 2차원 부가질량을 의미하며 다음 식으로 표시된다.

$$m_y^{2D}(x) = -\rho \int_c \phi \frac{\partial \phi}{\partial n} ds = \frac{1}{2} \rho \pi D^2 C(x) \tag{52}$$

여기서 $C(x)$는 횡방향 관성계수이며, 동체 횡단면을 Lewis form 근사시켜서 strip이론에 의해 구한다(Tasai and Takagi 1969). 그리고 3차원 동체에 작용하는 횡방향힘과 회두모멘트는 다음과 같이 계산된다.

$$Y = \int_L \Delta Y \, dx \quad , \quad N = \int_L x \cdot \Delta Y \, dx \tag{53}$$

식(51)를 식(53)에 대입하여 힘과 모멘트를 구체적으로 계산하면 가속도 관련 계수는 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} m_y^* &= \int_L m_y^{2D}(x) \, dx \\ J_{zz}^* &= \int_L m_y^{2D}(x) \cdot x^2 dx \\ x_y &= \left\{ \int_L m_y^{2D}(x) \cdot x \, dx \right\} / \, m_y^* \end{aligned} \tag{54}$$

여기서 첨자 * 표시는 부가질량 또는 부가관성모멘트에 3차원 수정을 하지 아니하였다는 의미로 사용되고 있다. 그리고 속도 관련 항 즉, 감쇠유체력 (Y_s, N_s)성분은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} Y_s &= \rho U v \frac{\pi}{2} D^2 [\, C(x)]_{x_0}^{L/2} + \rho U r \frac{\pi}{2} D^2 [x \cdot C(x)]_{x_0}^{L/2} \\ &\approx -\rho U v \frac{\pi}{2} D^2 C_{x0} + \rho U r \frac{\pi}{2} D^2 (-x_0 C_{x0}) \\ &= \frac{1}{2} \rho L^2 U v \left\{ -\pi \left(\frac{D}{L} \right)^2 C_{x0} \right\} + \frac{1}{2} \rho L^3 U r \left\{ -\pi x_0' \left(\frac{D}{L} \right)^2 C_{x0} \right\} \end{aligned} \tag{55}$$

$$N_s = \rho U v \frac{\pi}{2} D^2 \int_L x \frac{\partial}{\partial x} C(x) \, dx + \rho U r \frac{\pi}{2} D^2 \int_L x \frac{\partial}{\partial x} \{ x C(x) \} \, dx$$

$$
\begin{aligned}
&\approx \rho U v \frac{\pi}{2} D^2 \left\{ - x_0 C_{x0} - \int_L C(x) dx \right\} + \rho U r \frac{\pi}{2} D^2 \left\{ - (x_0)^2 C_{x0} - \int_L x\, C(x) dx \right\} \\
&= \frac{1}{2} \rho L^3 U v \left\{ - \pi x_0' (\frac{D}{L})^2 C_{x0} - \pi (\frac{D}{L})^2 \int_L \frac{C(x)}{L}\, dx \right\} \\
&\quad + \frac{1}{2} \rho L^4 U r \left\{ - \pi (x_0')^2 (\frac{D}{L})^2 C_{x0} - \pi (\frac{D}{L})^2 \int_L \frac{C(x)}{L} \cdot (\frac{x}{L}) dx \right\} \qquad (56)
\end{aligned}
$$

여기서 x_0는 조종운동에 의해 동체가 wake 중에 놓여짐으로써 양력을 발생시키지 아니하는 동체 후반부의 최초의 위치 즉, 박리점(separation point)을 나타낸다. Newman(1978)은 이 점을 effective trailing edge라 정의하였다. 그리고 C_{x0}는 x_0위치에서의 횡방향 관성계수 $C(x_0)$를 의미하는데, 실제로는 실험정수라 생각할 수 있다. 따라서 식(55), (56)로부터 감쇠유체력미계수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$
\begin{aligned}
&(Y_v')_h = -\pi (D/L)^2 k_0 \ , (Y_r')_h = x_0' (Y_v')_h \\
&(N_v')_h = x_0' (Y_v')_h - (m_y^*)' \ , (N_r')_h = (x_0')^2 (Y_v')_h - (m_y^*)' x_y'
\end{aligned} \qquad (57)
$$

여기서 유체력은 $0.5 \rho L^2 U^2$으로, 유체력모멘트는 $0.5 \rho L^3 U^2$으로 각각 무차원화 하였다. 그리고 C_{x0}대신에 실험정수라는 의미로 k_0를 사용하여 표현하였다. 식(57)는 slender body theory에 관한 Newman(1978)의 교과서에서 표현되고 있는 식과 근본적으로는 동일하다. 한편, 식(57)는 strip적 방법으로 구한 감쇠유체력을 나타내고 있는데, 부가질량 성분의 경우 3차원 수정을 필(畢)하고, 아울러 strip 방법에서는 무시되고 있는 전후방향 부가질량까지를 고려하면 감쇠유체력미계수는 다음과 같이 정리된다(식(33), (38) 참조).

$$
\begin{aligned}
&(Y_v')_h = -\pi (D/L)^2 k_0 \ , (Y_r')_h = x_0' (Y_v')_h - (m_x')_h \\
&(N_v')_h = x_0' (Y_v')_h - (m_y')_h + (m_x')_h \ , (N_r')_h = (x_0')^2 (Y_v')_h - (m_y')_h x_y'
\end{aligned} \qquad (58)
$$

식(58)에서 동체의 x방향 부가질량 $(m_x')_h$는 회전타원체의 x방향 부가질량으로부터 추정한다(Motora et al. 1982). 그리고 x_0는 동체 측면도에서 동체깊이가 최대가 되는 최초 위치의 x좌표를 취하기로 하고, 이 값은 $x_0' = -0.167$이다. 실험정수 k_0는 소종횡비익(low aspect ratio wing)의 양력계수에 관한 Jones의 이론식을 참고하여 동체 측면의 가시면적비(可視面積比)를 취하기로 한다(Lewis 1989, Ohkusu et al. 1987).

종운동의 유체력미계수는 같은 방법에 의해서 구하면 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$(Z_w')_h = -\pi(B/L)^2 k_1 \ , (Z_q')_h = -x_1'(Z_w')_h + (m_x')_h$$
$$(M_w')_h = -x_1'(Z_w')_h + (m_z')_h - (m_x')_h \ , (M_q')_h = (x_1')^2(Z_w')_h - (m_z')_h x_z' \quad (59)$$

여기서 x_1은 종운동에서의 effective trailing edge의 x좌표로서, x_1값을 정확하게 추정하기 위해서는 흐름가시화 실험 등에 의존해야 하지만, 본 논문에서는 간단히 UUV 평면도상의 선수 수평타의 끝부분 위치에서 박리가 일어난다고 가정한다. 이 값은 구체적으로 $x_1' = 0.108$이다. 실험정수 k_1은 근사적으로 1.0으로 취한다(Ohkusu et al. 1987).

② 부가물의 감쇠유체력미계수

부가물중 수직평판에 기인하는 횡방향의 유체력미계수 $(Y_v')_f$는 다음 식으로 표현된다(Lewis 1989).

$$(Y_v')_f = -(\frac{A_f}{L^2})(\frac{\partial C_L}{\partial \beta})_f \quad (60)$$

여기서 A_f는 수직평판의 면적이고, C_L은 양력계수로서 $L_f/(0.5\rho A_f U^2)$ (단, L_f : 수직평판에 작용하는 양력)이고 β는 앙각을 나타낸다. 그리고 $(\partial C_L/\partial\beta)_f$는 β에 대한 C_L곡선에서 $\beta = 0$일 때의 C_L곡선의 경사를 나타낸다. 수평평판(수평타)에 기인하는 종방향의 유체력미계수 $(Z_w')_f$도 마찬가지 방법에 의해서 구할 수 있다. $(Y_v')_f$와 $(Z_w')_f$가 구해지면 식(47)에 의해 그밖의 유체력미계수도 전부 구할 수 있다. 그리고 평판 또는 타에 작용하는 양력계수의 경사 $(\partial C_L/\partial\beta)_f$는 다음 식으로 주어지는 Whicker 및 Fehlner의 이론식에 의해 구한다(Lewis 1989). 이 식은 종횡비의 고저는 물론 후퇴익 등 다양한 측면 형상을 취하는 익(翼)에 대해서도 실험치와 거의 일치하는 양력계수를 추정할 수 있도록 한다(Lewis 1989).

$$(\frac{\partial C_L}{\partial \beta})_f = \frac{0.9 \times 2\pi \times a}{\cos\theta\sqrt{\frac{a^2}{\cos^4\theta} + 4 + 1.8}} \quad (61)$$

단, a : 유효종횡비

θ : 후퇴각(sweep angle of the quarter-chord line)

β : 앙각

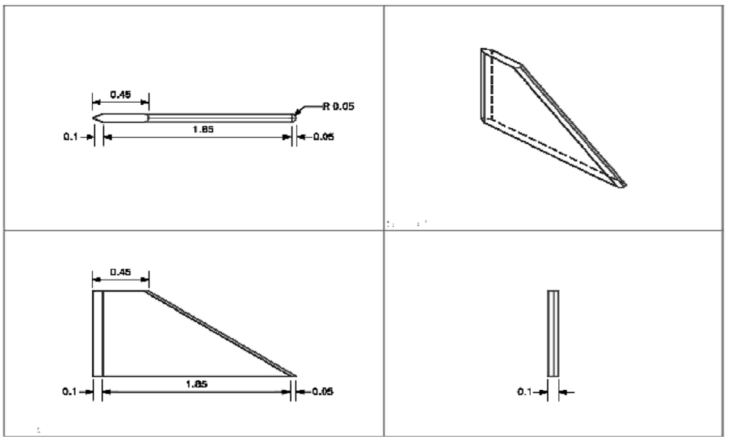
③ 부가물의 양력특성에 관한 모형실험

양력계수의 경사에 관한 Whicker 및 Fehlner의 이론식(Lewis 1989)의 유용성을 확인하기 위해 UUV에 부착되어 있는 수직평판과 수평타에 대해 회류수조에서 모형실험을 수행하여 그 결과를 비교해 보기로 한다. 실험에 이용한 수직평판과 수평타는 실물의 1/6모형으로서 치수와 실험조건 등은 **Table 2**와 같다. 상하 수직평판과 수평타의 형상은 **Fig. 1**에 보이고 있다. 단, 하부수직평판은 수직타를 포함하고 있으며, 수평타의 익형상은 NACA 0008과 같다.

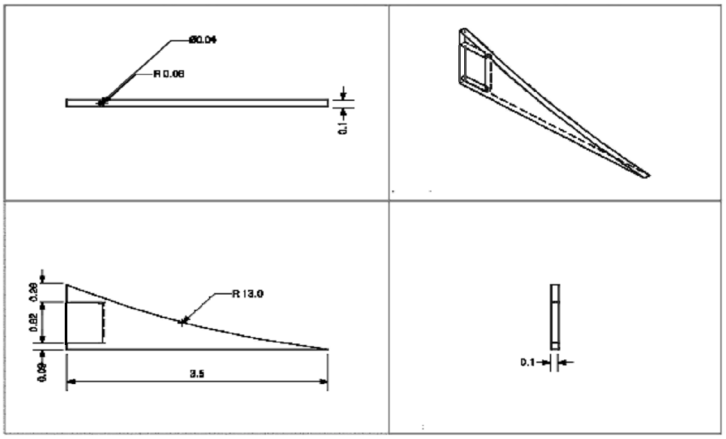
Table 2 Principal dimensions of model fins and experimental condition

	Mean chord length	Span	Area	Reynolds No.	Water velocity
Upper vertical plate	0.204 m	0.166 m	0.034 m^2	1.244×10^5	0.59790 $m/\sec$
Lower vertical plate	0.291 m	0.161 m	0.047 m^2	1.244×10^5	0.41915 $m/\sec$
Horizontal rudder	0.15 m	0.166 m	0.025 m^2	1.244×10^5	0.81314 $m/\sec$

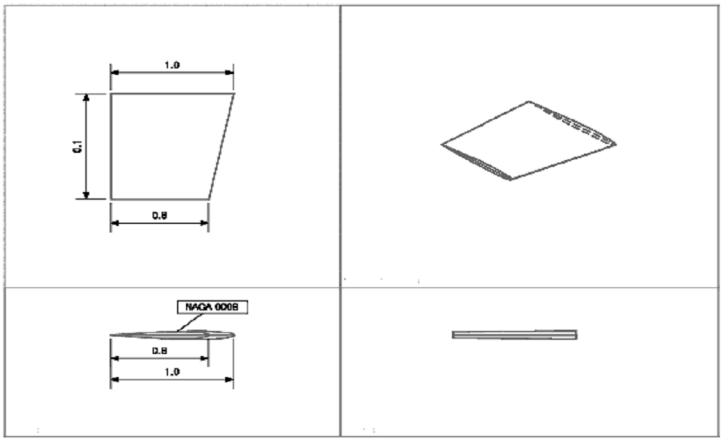
Table 2에서 Reynolds 수는 $R_n = Uc/\nu$와 같이 정의된다(단, U : 유속, c : 평균코드길이, ν : 동점성계수). Okada는 회류수조에서의 타단독성능 실험결과를 비교, 분석하여 Reynolds 수가 0.1×10^6이상이면 척도효과가 무시된다고 하였다(Okada 1958). 본 실험에서의 Reynolds 수는 이 수치를 초과하고 있으므로 척도효과는 무시될 수 있다고 생각된다. 모델형상은 **Fig. 4**와 같다. 회류수조의 working section에서 수조 깊이에 따른 유속분포는 **Fig. 5**와 같고 모형평판 또는 모형타는 회류수조의 자유표면으로부터 35 cm 깊이 위치에 설치되었다. 모형실험 결과는 **Fig. 6**와 같고, 아울러 Whicker & Fehlner의 이론식에 의한 계산치를 실험치와 비교하였다.



(a) Upper vertical plate



(b) Lower vertical plate



(c) Horizontal rudder

Fig. 4 Drawings of Manta-type UUV Appendages

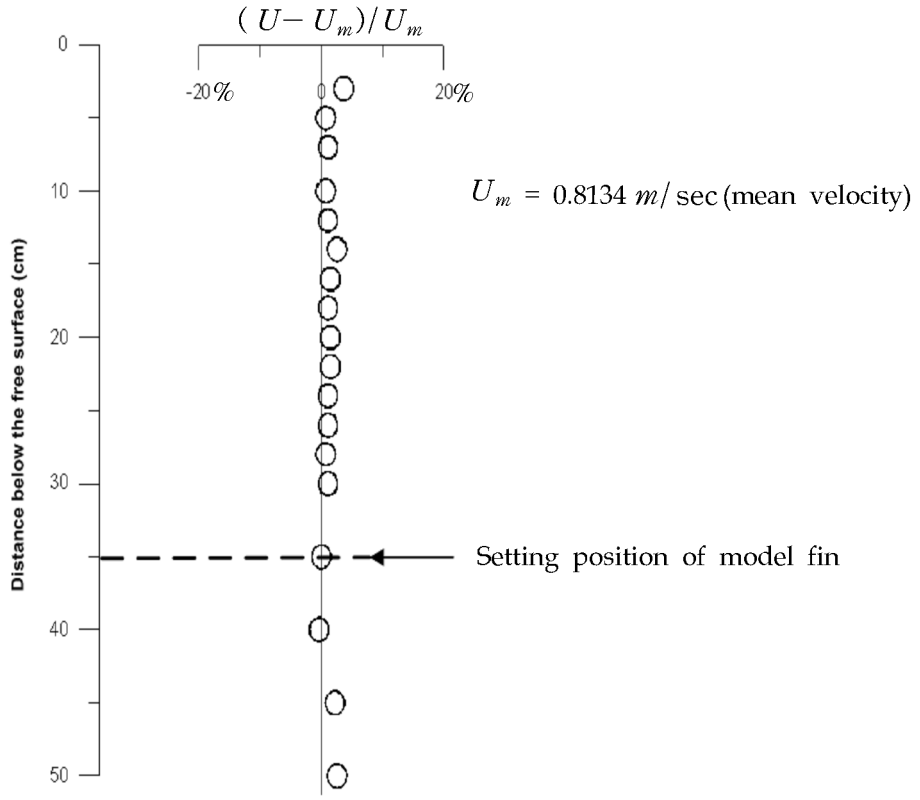
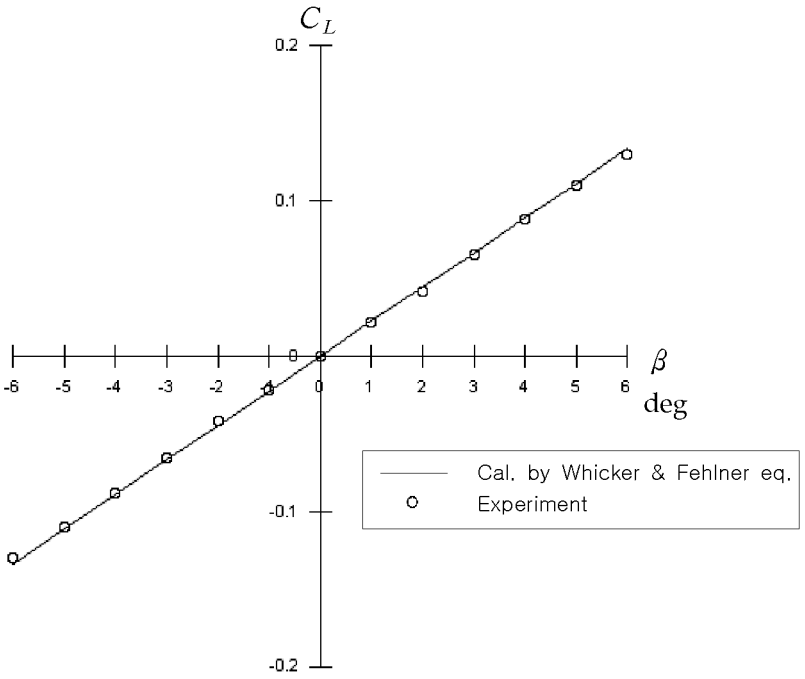
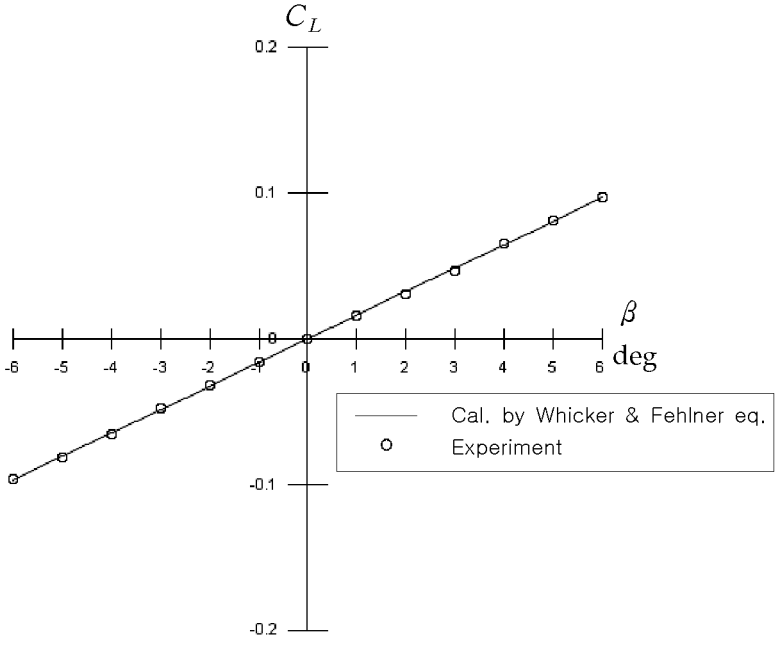


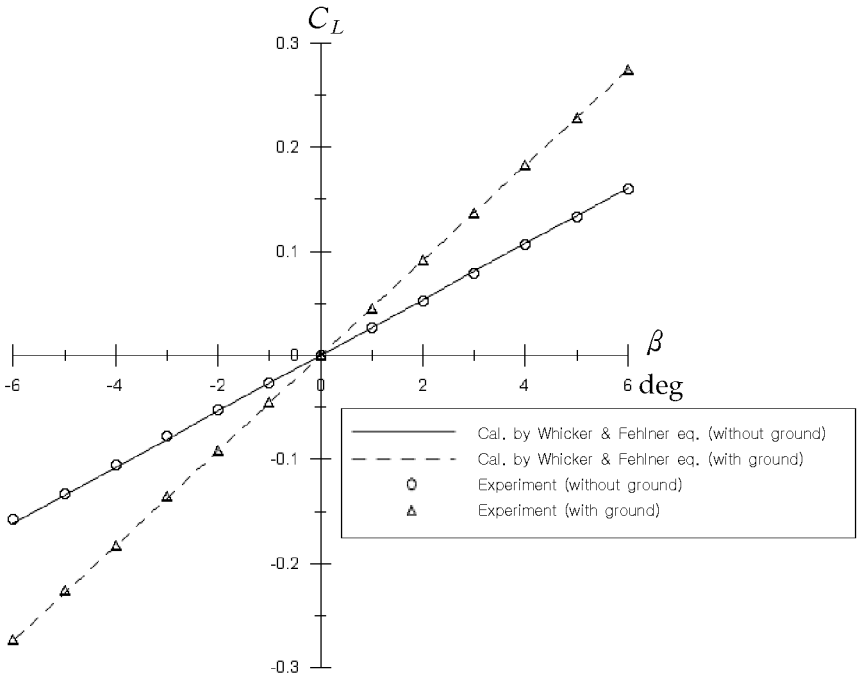
Fig. 5 Depth-wise velocity distribution at working section of circulating water channel



(a) Upper vertical plate



(b) Lower vertical plate



(c) Horizontal rudder

Fig. 6 Comparison of experiment with calculation by whicker & Fehlner equation

Fig. 6로부터 Whicker 및 Fehlner의 이론식은 후퇴익 등 여러 형태의 평판 또는 타(rudder)의 양력경사계수의 추정에 유용함을 알 수 있다.

3.2.3 제어유체력의 추정

① 수직타(방향타)에 기인하는 유체력미계수

방향타각 δ에 기인하는 유체력미계수 Y_δ'와 N_δ'는 다음과 같이 계산된다. 단, 우현타각을 양(+)의 방향으로 취한다.

$$Y_\delta' = Y_\delta/(\frac{1}{2}\rho L^2 U^2) = -(\frac{A_R}{L^2})(\frac{\partial C_L}{\partial \delta})_0 \tag{62}$$

$$N_\delta' = N_\delta/(\frac{1}{2}\rho L^3 U^2) = -x_R'(\frac{A_R}{L^2})(\frac{\partial C_L}{\partial \delta})_0 \tag{63}$$

단, x_R' : 수직타의 압력중심의 x좌표의 무차원치

A_R : 수직타의 측면적

$(\frac{\partial C_L}{\partial \delta})_0$: 양력경사계수로서 식(61)를 이용하여 계산한다.

② 수평타(승강타)에 기인하는 유체력미계수

UUV에 설치된 수평타는 좌우현에 각각 2개씩 전부 4개가 설치되어 있다. 그리고 승강타각 δe는 연직상방향을 양(+)의 방향으로 취한다.

$$Z_{\delta e1}' = Z_{\delta e1}/(\frac{1}{2}\rho L^2 U^2) = 2(\frac{A_{R1}}{L^2})(\frac{\partial C_L}{\partial \delta e_1})_0 \quad (64)$$

$$Z_{\delta e2}' = 2(\frac{A_{R2}}{L^2})(\frac{\partial C_L}{\partial \delta e_2})_0$$

$$M_{\delta e1}' = M_{\delta e1}/(\frac{1}{2}\rho L^3 U^2) = -x_{R1}' \cdot Z_{\delta e1}' \quad (65)$$

$$M_{\delta e2}' = -x_{R2}' \cdot Z_{\delta e2}'$$

단, x_{R1}', x_{R2}' : 승강타로 이용되는 선수, 선미 수평타의 압력중심의 x좌표의 무차원치

A_{R1}, A_{R2} : 선수, 선미 수평타의 측면적

$(\frac{\partial C_L}{\partial \delta e_1})_0, (\frac{\partial C_L}{\partial \delta e_2})_0$: 양력경사계수로서 식(61)를 이용하여 계산한다.

3.2.4 유체력미계수의 이론추정치와 실험치의 비교

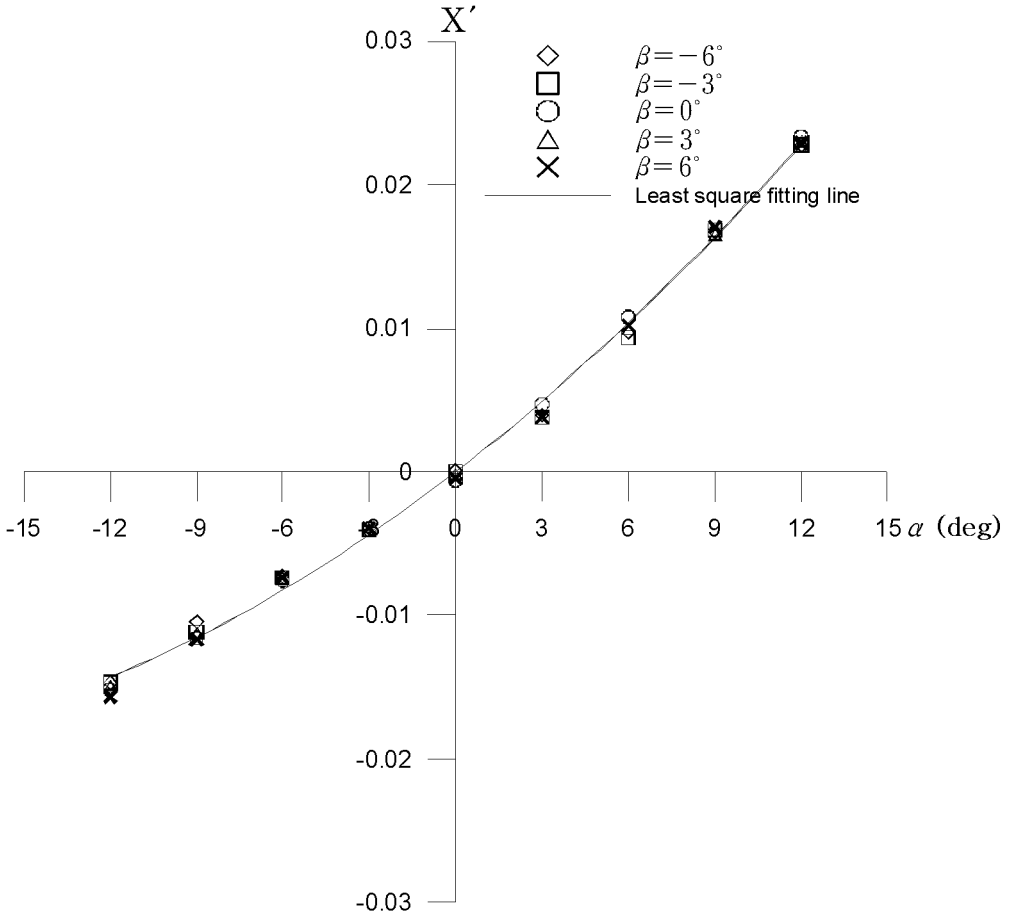
Table 1과 **Fig. 1**에 보인 UUV에 대해서 이상 언급한 이론적 추정법에 의해 구해진 선형유체력미계수와 구속모형시험 결과 **Fig. 7**로부터 구한 값을 함께 **Table 3**에 나타낸다. 그리고 UUV의 1/6모형(길이 2.0 m)을 이용하여 예인수조에서 수행된 정적시험 즉, 사항시험과 수직앙각시험에 의한 실험결과를 **Fig. 7**에 나타낸다. **Fig. 7**에 나타낸 실험결과는 UUV 모형의 동체중앙으로부터 0.1 m 후방에서 유체력이 측정되었다. 따라서 동체중앙에서의 유체력미계수는 실험결과를 수정해야 한다. **Fig. 7**에 나타낸 실험결과로부터 직접 구한 선형유체력미계수와 동체중앙에서의 유체력미계수로 변환된 값을 각각 **Table 3**에 나타낸다. 단, 실험결과는 수평방향 사항시험과 수직앙각시험을 각각 3° 간격으로 $-12°$ 로부터 $+12°$ 까지 측정한 자료를 $\psi(\beta)$와 $\theta(\alpha)$만을 파라미터로

선정하여 최소좌승법에 의한 선형 근사로써 구한 것 이다(단, $u' = \cos\theta\cos\phi$, $v' = -\sin\phi$, $w' = \sin\theta\cos\phi$). 유체력미계수의 이론계산치와 동체중앙에서의 유체력 미계수로 변환된 실험결과를 비교해 보면 양자가 어느정도 일치하고 있음을 알 수 있으며, 본 논문에서 제안된 이론추정식은 실험치의 확인 또는 동안정성 검토 등 기초조사에 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

(a) Surge

$$X' = X_{uu}'u'^2 + X_w'w' + X_{ww}'w'^2 + X_{vv}'v'^2$$

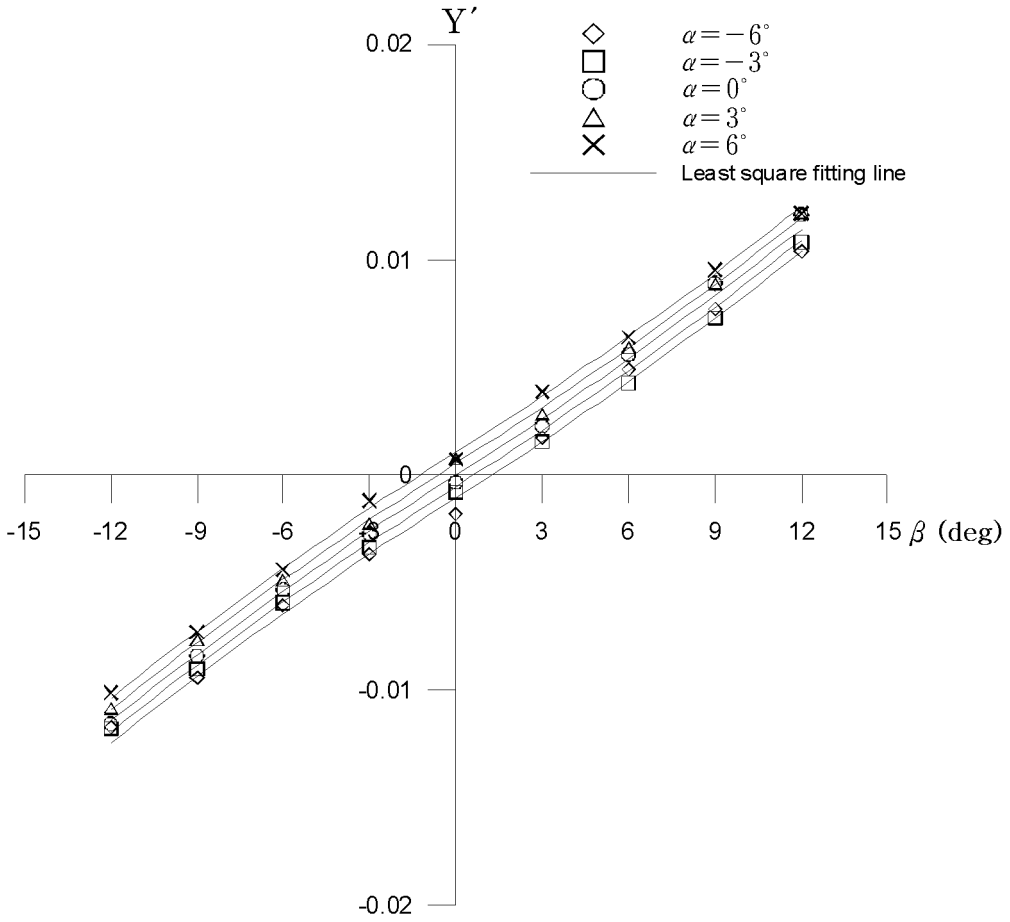
x_{uu}'	x_w'	x_{ww}'	x_{vv}'
-0.007039	0.089370	0.091360	-0.007360



(b) Sway

$$Y' = Y_v'v' + Y_w'w' + Y_{vv}'v'|v'|$$

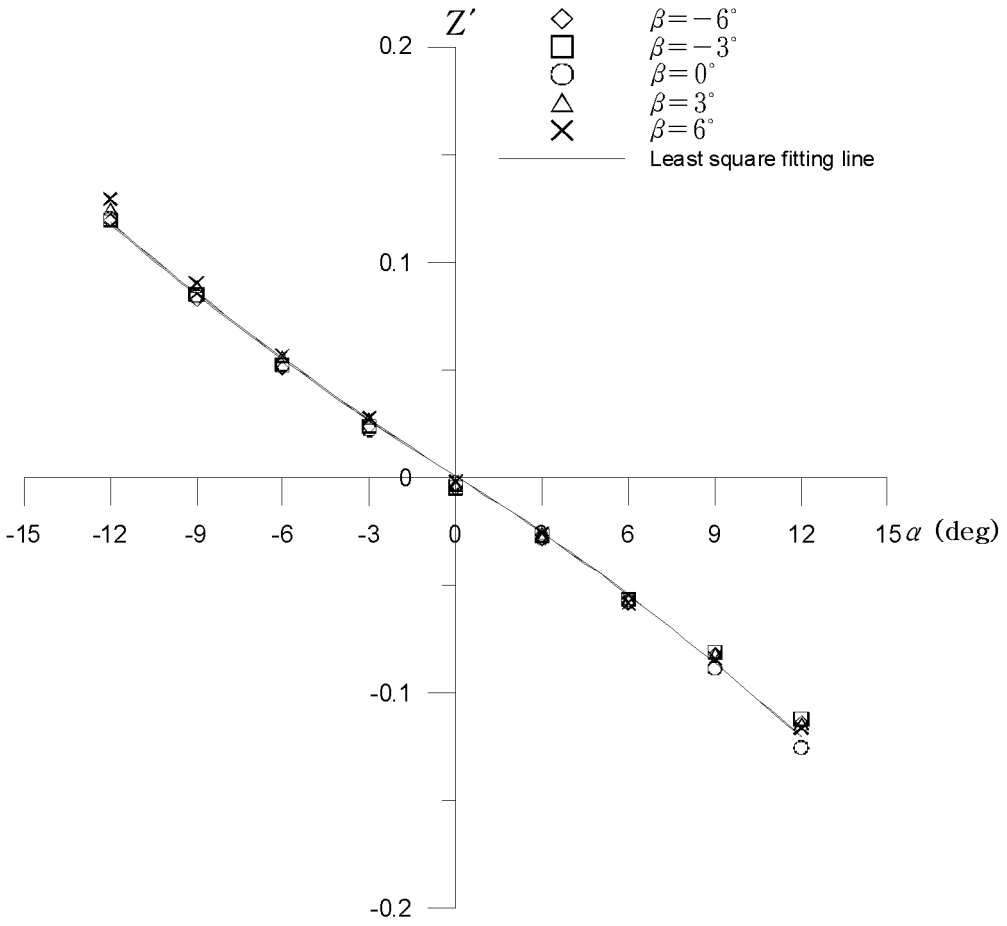
Y_v'	Y_w'	Y_{vv}'
−0.048187	0.010176	−0.031928



(c) Heave

$$Z' = Z_{uu}'u'^2 + Z_w'w' + Z_{ww}'w'|w'|$$

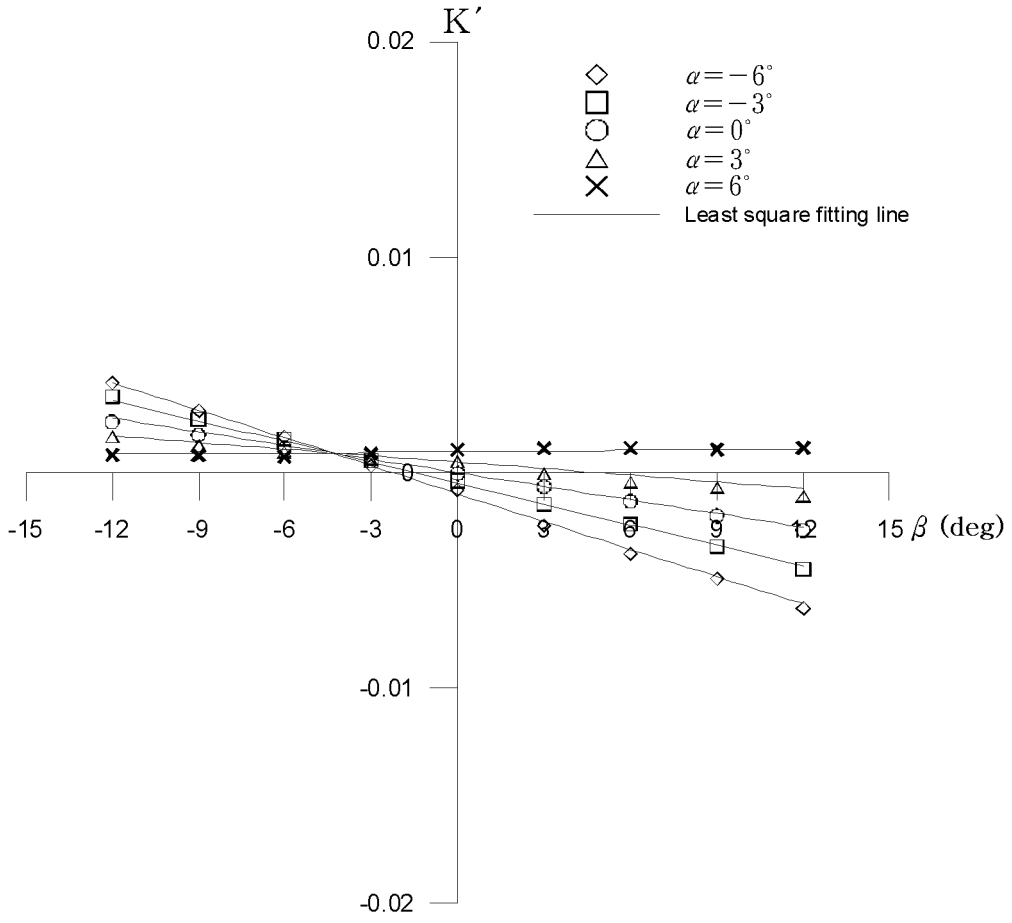
Z_{uu}'	Z_w'	Z_{ww}'
0.042610	−0.475055	−0.477644



(d) Roll

$$K' = K_v'v' + K_w'w' + K_{vw}'v'w'$$

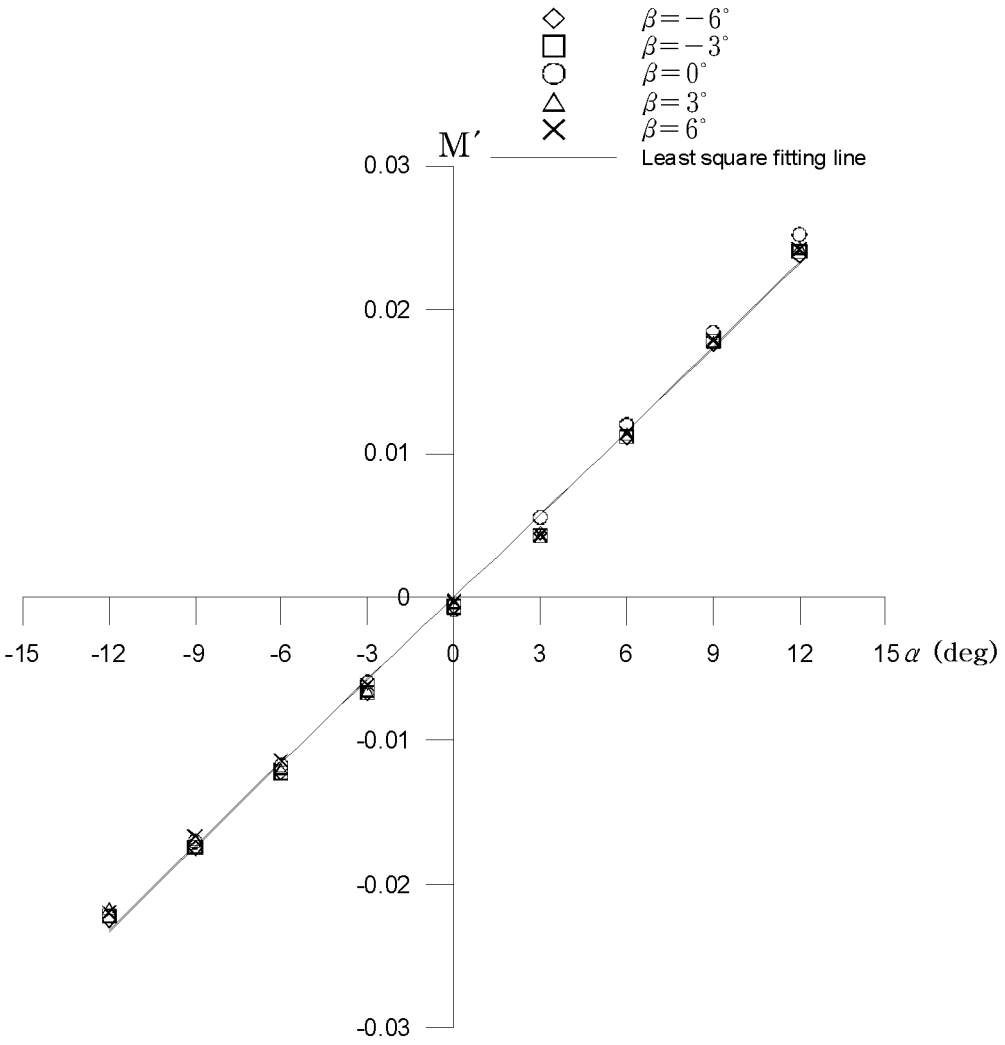
K_v'	K_w'	K_{vw}'
0.012356	0.009149	−0.126509



(e) Pitch

$$M' = M_{uu}'u'^2 + M_w'w' + M_{ww}'w'|w'|$$

M_{uu}'	M_w'	M_{ww}'
−0.000486	0.108835	0.016486



(f) yaw

$$N' = N_v'v' + N_w'w' + N_{vv}'v'|v'|$$

N_v'	N_w'	N_{vv}'
0.003411	−0.002472	0.009500

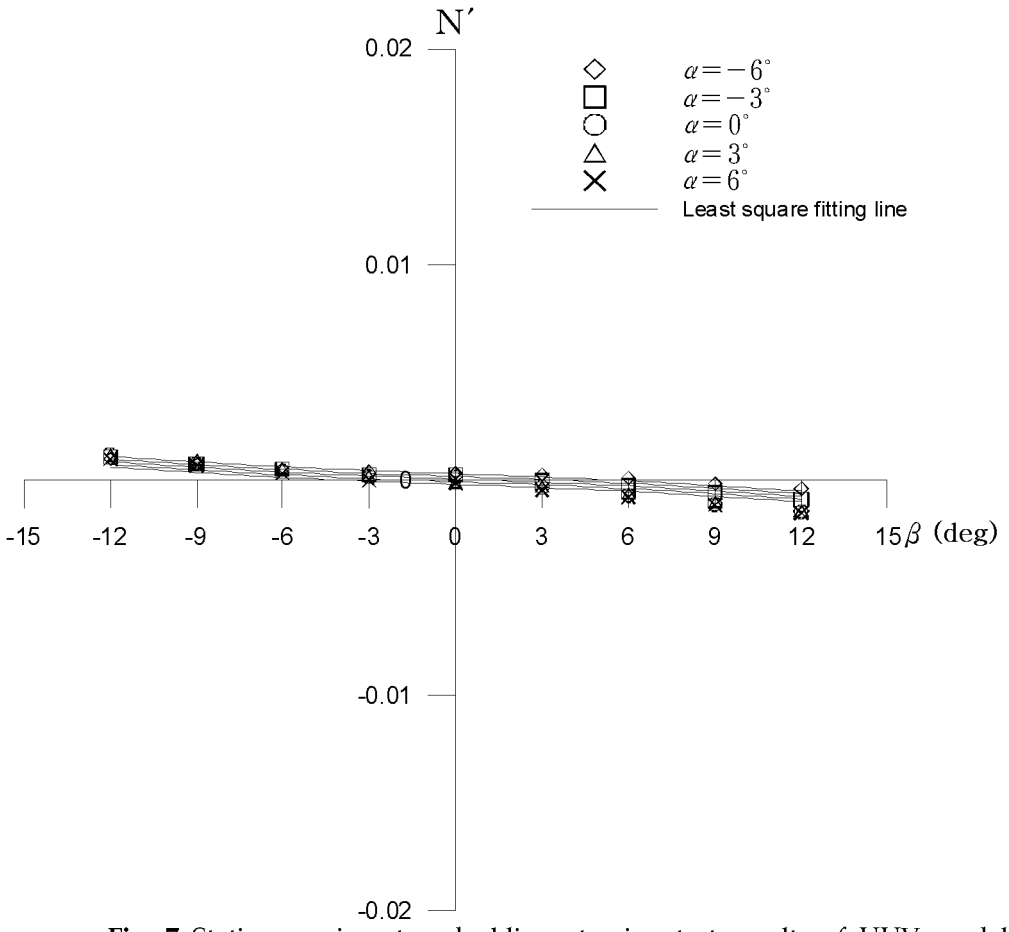


Fig. 7 Static experiment and oblique towing test results of UUV model

Table 3 Theoretical calculation result of linear hydrodynamic derivatives and comparison with static experiment result.

Hydrodynamic derivatives	Theoretical calculation	Transf. from experiment	Experiment
m'	0.037482		
I_{yy}'	0.001801		
I_{zz}'	0.001814		
m_y'	0.024853		
J_{zz}'	0.001993		
m_z'	0.079330		
J_{yy}'	0.002763		
m_x'	0.005535		
Y_v'	−0.051282	−0.048187	−0.048187
N_v'	0.006448	0.005821	0.003411
Y_r'	0.009755		
N_r'	−0.004668		
Z_w'	−0.487901	−0.475055	−0.475055
M_w'	0.106493	0.085083	0.108835
Z_q'	0.048975		
M_q'	−0.005018		
Y_δ'	−0.003421		
N_δ'	0.001497		
$Z_{\delta e1}'$	0.032766		
$Z_{\delta e2}'$	0.032766		
$M_{\delta e1}'$	−0.004782		
$M_{\delta e2}'$	0.006958		
Z_{uu}'		0.039242	0.039242
M_{uu}'		0.000069	−0.001893
※	Origine is located at midship of UUV		Origine is located at a distance 0.1 m backward from midship of UUV model

4. UUV의 조종응답 특성

4.1 동안정성 검토

Manta형 UUV가 제어장치 고정상태에서 정상직전잠항 중 미소교란에 의한 운동이 발생되었을 때 수직방향 및 수평방향의 동적 안정성 문제를 검토해 본다.

① 수직운동의 동안정성

Pitch-heave의 선형운동방정식인 식(39)에서 제어장치 고정상태이고 동적 안정성만을 검토하기 위해 유체정역학적 힘(복원력항)의 영향을 무시하고, 수식을 무차원화하여 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}&(m'+A_{33}')\dot{w}'-Z_{w}'w'-(m'x_{G}'-A_{35}')\dot{q}'-(Z_{q}'+m')q'=0\\&(I_{yy}'+A_{55}')\dot{q}'-(M_{q}'-m'x_{G}')q'-(m'x_{G}'-A_{53}')\dot{w}'-M_{w}'w'=0\end{aligned} \tag{66}$$

식(66)의 해(解)는 일반적으로 다음과 같은 형식으로 표시된다.

$$w'=c_1e^{\lambda t'}\quad,\quad q'=c_2e^{\lambda t'} \tag{67}$$

식(67)를 식(66)에 대입하여 행렬식 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix}(m'+A_{33}')\lambda-Z_{w}', & -(m'x_{G}'-A_{35}')\lambda-(Z_{q}'+m')\\-(m'x_{G}'-A_{53}')\lambda-M_{w}', & (I_{yy}'+A_{55}')\lambda-(M_{q}'-m'x_{G}')\end{bmatrix}\begin{bmatrix}c_1\\c_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0\\0\end{bmatrix} \tag{68}$$

식(68)을 만족하기 위해서는 계수행렬이 0이 되어야 한다.

$$\begin{bmatrix}(m'+A_{33}')\lambda-Z_{w}', & -(m'x_{G}'-A_{35}')\lambda-(Z_{q}'+m')\\-(m'x_{G}'-A_{53}')\lambda-M_{w}', & (I_{yy}'+A_{55}')\lambda-(M_{q}'-m'x_{G}')\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0\\0\end{bmatrix} \tag{69}$$

식(69)은 다음과 같은 λ의 2차방정식이 된다.

$$A\lambda^2 + B\lambda + C = 0 \tag{70}$$

여기서

$$\begin{aligned} A &= (m' + A_{33}')(I_{yy}' + A_{55}') - (m'x_G' - A_{35}')(m'x_G' - A_{53}') \\ B &= -(m' + A_{33}')(M_q' - m'x_G') - (I_{yy}' + A_{55}')Z_w' \\ &\quad - (m'x_G' - A_{53}')(Z_q' + m') - M_w'(m'x_G' - A_{35}') \\ C &= (M_q' - m'x_G')Z_w' - M_w'(Z_q' + m') \end{aligned} \tag{71}$$

식(71)에 Routh-Hurwitz 안정판별조건을 적용시키면 다음 조건일 때에 안정한 시스템이 된다.

$$A > 0, \quad B > 0, \quad C > 0 \tag{72}$$

한편, 식(71)에서 계수 A의 우변 첫항은 우변 둘째항에 비해 크고, 계수 B의 경우에는 우변 첫째, 둘째 항이 세째, 네째 항에 비해 크므로, $A > 0$, $B > 0$으로 간주할 수 있을 것이다. 따라서 안정의 조건은 다음에 의해 결정된다.

$$C = (M_q' - m'x_G')Z_w' - M_w'(Z_q' + m') > 0 \tag{73}$$

3.2절에서 제안한 유체력미계수의 이론적 추정법을 이용하여 수직운동의 동적 안정성 지수 C를 계산한 결과를 **Table 4**에 나타낸다. 본 논문에서 채택한 Manta형 UUV의 경우 $C < 0$으로서 동적 불안정 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

② 수평운동의 동안정성

sway-yaw의 선형운동방정식인 식(40)을 무차원화하여 표현하고 $\delta = 0$ 라 두면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &(m' + A_{22}')\dot{v}' - Y_v'v' + (m'x_G' + A_{26}')\dot{r}' - (Y_r' - m')r' = 0 \\ &(I_{zz}' + A_{66}')\dot{r}' - (N_r' - m'x_G')r' + (m'x_G' + A_{62}')\dot{v}' - N_v'v' = 0 \end{aligned} \tag{74}$$

수직운동에서와 마찬가지 방법에 의해 식(74)로부터 고유치 λ에 관한 2차방정식을 다

음과 같이 구할 수 있다.

$$A_1\lambda^2 + B_1\lambda + C_1 = 0 \tag{75}$$

여기서

$$\begin{aligned} A_1 &= (m' + A_{22}')(I_{zz}' + A_{66}') - (m'x_G' + A_{26}')(m'x_G' + A_{62}') \\ B_1 &= -(m' + A_{22}')(N_r' - m'x_G') - (I_{zz}' + A_{66}')Y_v' \\ &\quad + (m'x_G' + A_{62}')(Y_r' - m') + N_v'(m'x_G' + A_{26}') \\ C_1 &= Y_v'(N_r' - m'x_G') - N_v'(Y_r' - m') \end{aligned} \tag{76}$$

식(76)에 Routh-Hurwitz 안정판별조건을 적용시켜 안정의 조건을 구하면 다음과 같다.

$$A_1 > 0, \quad B_1 > 0, \quad C_1 > 0 \tag{77}$$

수직운동에서와 마찬가지 이유로 $A_1 > 0$, $B_1 > 0$ 이므로 안정의 조건은 다음에 의해 결정된다.

$$C_1 = Y_v'(N_r' - m'x_G') - N_v'(Y_r' - m') > 0 \tag{78}$$

수평운동의 동적 안정성지수 C_1을 계산한 결과를 **Table 5**에 나타낸다. Manta형 UUV의 경우 $C_1 > 0$으로서 동적 안정의 경향을 나타내고 있다.

Table 4 Indices of dynamic stability and turning ability in vertical plane

Coefficients	Fuselage	Fuselage+Appendages
m'	0.036897	0.037482
I_{yy}'	0.001749	0.001801
x_G'	−0.027763	−0.030475
$A_{33}'(=m_z')$	0.068587	0.079330
$A_{55}'(=J_{yy}')$	0.002406	0.002763
$A_{35}'=A_{53}'$	0.002084	0.002441
Z_w'	−0.422370	−0.487901
M_w'	0.108668	0.106493
Z_q'	0.051150	0.048975
M_q'	−0.002842	−0.005018
$Z_{\delta e2}'$		0.032766
$M_{\delta e2}'$		0.006958
C	−0.008800	−0.007316
Stability	Unstable	Unstable
K		−0.940902

Table 5 Indices of dynamic stability and turning ability in horizontal plane

Coefficients	Fuselage	Fuselage+Appendages
m'	0.036897	0.037482
I_{zz}'	0.001749	0.001814
x_G'	−0.027763	−0.030475
$A_{22}'(=m_y')$	0.014377	0.024853
$A_{66}'(=J_{zz}')$	0.000474	0.001993
$A_{26}'=A_{62}'$	−0.000463	−0.004452
Y_v'	−0.020120	−0.051282
N_v'	−0.005482	0.006448
Y_r'	−0.002174	0.009755
N_r'	−0.000098	−0.004668
Y_δ'		−0.003421
N_δ'		0.001497
C_1	−0.000233	0.000360
Stability	Unstable	Stable
K_1		0.152107

4.2 선회성 검토

① 수직운동의 선회성

종운동의 선형연립방정식인 식(39)을 무차원화한 후 w'를 소거하여 pitch 모드만의 운동방정식으로 나타내면 다음과 같다. 단, 식(39)에서 유체정역학적 힘(복원력항)은 생략하며, 승강타는 선미 수평타만을 이용한다고 가정한다.

$$A\ddot{q}' + B\dot{q}' + Cq' = D\delta e_2' + E\delta e_2 \tag{79}$$

여기서 A, B, C는 식(71)에서 정의한 바와 같으며, D와 E는 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} D &= (m' x_G' + A_{35}')Z_{\delta e2}' - M_{\delta e2}'(m' + A_{33}') \\ E &= Z_{\delta e2}' M_w' - Z_w' M_{\delta e2}' \end{aligned} \tag{80}$$

승강타각이 $\delta e_2 = \delta e_{20}$(일정치)일 때 UUV의 종동요각속도 q'는 일정치 $K\delta e_0$에 수렴한다. 단, K는 $K = E/C$ 로서 유체력미계수만에 의해 결정되며, 수직방향의 선회의 강도를 나타내는 지수 즉, 선회성지수이다.

Table 4에 수직운동의 선회성지수 K의 계산결과를 보이고 있는데, K는 음(−)의 값을 나타내고 있다. 즉, Manta형 UUV가 동적으로 불안정한($C<0$) 경우에 $K<0$으로서 수직운동의 정상선회특성을 나타내는 $q' - \delta e_2$곡선이 히스테리시스루프를 이룬다는 것을 암시하고 있다.

②수평운동의 선회성

횡운동의 선형연립방정식인 식(40)를 무차원화한 후 v'를 소거하여 yaw 모드만의 운동방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$A_1\ddot{r}' + B_1\dot{r}' + C_1 r' = D_1\delta' + E_1\delta \tag{81}$$

여기서 A_1, B_1, C_1은 식(76)에서 정의한 바와 같으며, D_1과 E_1은 다음과 같이 표시된다.

$$D_1 = (m' + A_{22}')N_\delta' - Y_\delta'(m' x_G' + A_{62}')$$
$$E_1 = Y_\delta' N_v' - Y_v' N_\delta' \tag{82}$$

방향타각이 $\delta = \delta_0$(일정치)일 때 UUV의 회두각속도 r'는 일정치인 $K_1\delta_0$에 수렴한다. 단, K_1는 $K_1 = E_1/C_1$ 으로서 유체력미계수만에 의해 결정되며, 수평방향의 선회성지수를 나타낸다.

Table 5에 수평운동의 선회성지수 K_1의 계산결과를 보이고 있는데, K_1은 양(+)의 값을 나타내고 있다. 즉, Manta형 UUV가 동적으로 안정한($C_1 > 0$) 경우에 $K_1 > 0$으로서 수직운동의 정상선회특성을 나타내는 $r' - \delta$곡선의 원점에서의 기울기가 K_1임을 알 수 있다.

4.3 수직면에서의 방향안정성과 평형 잠항 조건 검토

4.3.1 수직면에서의 방향안정성

heave-pitch 연성운동을 나타내는 식(39)에서 $\dot{q} = \dot{\theta}$, $\ddot{q} = \theta$, $\delta e_1 = 0$, $\delta e_2 = 0$ 라 두고 운동방정식을 무차원화 하여 표시한 후에 특성방정식을 구하면 3차 대수방정식을 얻을 수 있다. 특성방정식에 Routh-Hurwitz 안정성 판별 조건을 적용하면 동적 안정의 조건은 다음의 식(83), (84), (85), (86), (87)을 동시에 만족하여야 한다.

$$a_0 = (m' + A_{33}')(I_{yy}' + A_{55}') - (m' x_G' - A_{53}')(m' x_G' - A_{35}') > 0 \tag{83}$$

$$a_1 = -(m' + A_{33}')(M_q' - m' x_G') - Z_w'(I_{yy}' + A_{55}') - (m' x_G' - A_{53}')(Z_q' + m') - M_w'(m' x_G' - A_{35}') > 0 \tag{84}$$

$$a_2 = (m' + A_{33}')(z_G' - z_B')m'\left(\frac{gL}{U^2}\right) + Z_w'(M_q' - m' x_G') - M_w'(Z_q' + m') > 0 \tag{85}$$

$$a_3 = -Z_w'(z_G' - z_B')m'\left(\frac{gL}{U^2}\right) > 0 \tag{86}$$

$$a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0 \tag{87}$$

여기서 a_0, a_1, a_2, a_3는 3차 대수방정식으로 표시 되는 특성방정식의 각 계수를 나타내며, a_2와 a_3는 UUV의 잠항속도 U의 함수로 주어진다. 식(83)~(87)의 조건을 전부 만족할 때 UUV는 수직면 내에서 방향안정성(directional stability)을 보인다. 즉, UUV는 일시적으로 미소 교란이 작용하였다가 제거되면 원래의 침로와 다른 깊이에서 새로운 수평침로로 복귀한다는 것을 의미

한다. 본 논문에서 채택한 UUV는 안정한 유체정역학적 복원모멘트를 가지는 경우로서 부심이 무게중심 위쪽 0.2 m 높이에 위치한다고 가정할 때, 식(83) ~(87)의 조건을 모두 만족하는 속도 영역은 $U \leqq 0.645$ m/sec 이었다. 따라서 UUV는 0.645 m/sec 이하의 극미속 잠항 시에만 방향안정성의 경향을 보인다는 것을 알 수 있다. 단, 안정성 평가 시 유체력미계수는 이론계산치를 사용하였다.

4.3.2 수직면에서의 침로유지 조건

Manta형 UUV는 유체력미계수 Z_{uu}'와 M_{uu}'로 인해 제어판 고정상태에서는 정상 수평 직진 잠항을 하지 못한다. UUV의 동좌표계 $O-xyz$의 x축이 수평 평형상태를 유지하기 위해서는 수직방향의 표류각(수직앙각)과 대응 승강타각이 요구된다. 이 상태에서의 종운동방정식은 다음과 같다. 단, 승강타는 선수, 선미 수평타를 모두 이용한다고 가정한다.

$$\begin{aligned} Z_{uu}'u'^2 + Z_w'w' + Z_{\delta e1}'\delta e_1 + Z_{\delta e2}'\delta e_2 = 0 \\ M_{uu}'u'^2 + M_w'w' + M_{\delta e1}'\delta e_1 + M_{\delta e2}'\delta e_2 = 0 \end{aligned} \tag{88}$$

단, w' : 수직방향 속도성분의 무차원치

수직표류각을 α라 하면 $u' = \cos\alpha$ $w' = \sin\alpha$ 인데, α가 미소한 값이라 가정하면 $u' \approx 1.0$, $w' \approx \alpha$ 라 간주할 수 있다. 따라서 식(88)은 다음과 같이 간략화하여 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} Z_{uu}' + Z_w'\alpha + Z_{\delta e1}'\delta e_1 + Z_{\delta e2}'\delta e_2 = 0 \\ M_{uu}' + M_w'\alpha + M_{\delta e1}'\delta e_1 + M_{\delta e2}'\delta e_2 = 0 \end{aligned} \tag{89}$$

식(89)에는 미지수가 3개 있으므로 선수 승강타각 δe_1값을 특정한 값으로 생각하고, 미지수를 α, δe_2라 간주하여 이들에 관해서 풀면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{M_{\delta e2}'(Z_{uu}' + Z_{\delta e1}'\delta e_1) - Z_{\delta e2}'(M_{uu}' + M_{\delta e1}'\delta e_1)}{Z_{\delta e2}'M_w' - Z_w'M_{\delta e2}'} \\ \delta e_2 &= \frac{M_w'(Z_{uu}' + Z_{\delta e1}'\delta e_1) - Z_w'(M_{uu}' + M_{\delta e1}'\delta e_1)}{Z_w'M_{\delta e2}' - Z_{\delta e2}'M_w'} \end{aligned} \tag{90}$$

δe_1 값을 $-35°$ 로부터 $5°$ 간격으로 $+35°$ 까지 변화시킬 때 각각의 δe_1값에 대응하는 α값과 δe_2 값을 식(90)을 이용하여 구하면 Table 6과 같다. 단, 승강타각 관련 유체력미계수는 이론계산치를 사용하였으며, $Z_{w}', M_{w}', Z_{uu}', M_{uu}'$값은 실험치를 사용하였다.

Table 6 Calculation result of the condition for coursekeeping in vertical plane

δe_1	α	δe_2
-35 [deg]	0.3 [deg]	-28.7 [deg]
-30	0.7	-29.2
-25	1.0	-29.6
-20	1.3	-30.0
-15	1.6	-30.4
-10	1.9	-30.9
-5	2.2	-31.3
0	2.5	-31.7
5	2.9	-32.1
10	3.2	-32.6
15	3.5	-33.0
20	3.8	-33.4
25	4.1	-33.8
30	4.4	-34.2
35	4.8	-34.7

Table 6으로부터 본 논문에서 채택한 Manta형 UUV는 수직표류각 α와 선수 승강타각 δe_1, 선미 승강타각 δe_2값을 유지한 채 정상 수평 잠항이 가능함을 알 수 있다.

4.3.3 수직면에서의 중립운항 조건

전 항에서는 Manta형 UUV가 수직표류각을 가지는 경우를 검토하였는데, 만약 수직표류각을 가지지 아니하는 경우 즉, UUV가 상승하거나 하강하지 않고 똑바로 나아가기 위해서는 대응 승강타각이 얼마가 요구되는지를 검토해 본다. 이러한 상태를 중립운항(neutral level flight) 상태라 정의하며, 이때의 종운동방정식은 다음과 같다. 단, 승강타는 선수, 선미 수평타를 모두 이용한다고 가정한다.

$$\begin{aligned} Z_{uu}' + Z_{\delta e1}'\delta e_1 + Z_{\delta e2}'\delta e_2 = 0 \\ M_{uu}' + M_{\delta e1}'\delta e_1 + M_{\delta e2}'\delta e_2 = 0 \end{aligned} \tag{91}$$

식(91)에서 δe_1, δe_2에 관해서 풀면 다음과 같다.

$$\delta e_1 = \frac{Z_{\delta e2}' M_{uu}' - Z_{uu}' M_{\delta e2}'}{Z_{\delta e1}' M_{\delta e2}' - Z_{\delta e2}' M_{\delta e1}'}$$
$$\delta e_2 = \frac{Z_{uu}' M_{\delta e1}' - Z_{\delta e1}' M_{uu}'}{Z_{\delta e1}' M_{\delta e2}' - Z_{\delta e2}' M_{\delta e1}'} \quad (92)$$

식(92)로부터 δe_1, δe_2값을 구하면 **Table 7**과 같다. 단, 여기서도 승강타각 관련 유체력미계수는 이론계산치를 사용하였으며 Z_{uu}'와 M_{uu}'값은 실험치를 사용하였다.

Table 7 Calculation result of the condition for neutral level flight

δe_1	δe_2
−40.3[deg]	−28.3 [deg]

선수, 선미 승강타각의 최대각을 35° 라 가정할 때, **Table 7**로부터 본 논문에서 채택한 Manta형 UUV는 수직면에서의 중립운항이 불가능함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 모함인 잠수함 동체 상부의 일부로서 정착되어 있다가 필요시에만 모함으로부터 분리되어 자료획득 등 작전수행에 이용되는, 소형의 Manta 형상 무인잠수정(Unmanned Undersea Vehicle, 이하 UUV라 함)의 운동특성에 관한 기초적 검토를 하였다. UUV가 중성부력(Neutral Buoyancy)상태일 때 UUV를 강체로 가정하여 동좌표계의 기하학적인 중심과 무게중심이 일치하지 않는데 기인하여 힘과 모멘트를 Newton의 운동량 법칙에서 Euler의 6자유도 방정식으로 각성분별 정리하여 확립하였다(Abkowitz 1969). 또한, 구성요소별로 중력, 부력, 관성유체력, 감쇠유체력 및 제어유체력으로 세분화하여 각각의 힘과 모멘트의 합으로 표시하여 Euler의 6자유도 방정식과 합하여 UUV의 6자유도 운동 수학모델을 정립하였다. 선형유체력미계수의 이론적 추정법 확립하는 수순으로 관성력추정은 UUV의 형상을 고려한 Simpson 제2법칙을 적용시켜 계산하였고, 감쇠유체력의 추정은 Slender Body Theory 이론(Newman 1978)과 소종횡비익(Low Aspect Ratio Wing)의 양력계수에 관한 Jones의 이론식을 적용시켜 구하였다. 선형 유체력미계수의 추정정도는 박리지점 위치 결정과 항력에 귀착되는데, 일반적으로 실험에 의존하지 않고 정확하게 추정하는 것은 곤란하다. 본 논문에서는 선형 유체력미계수의 개략적인 값의 추정에 목표를 두고 있기 때문에 박리지점의 위치는 UUV의 형상을 고려하여 평면도 상의 선수 수평타의 끝부분 위치와 깊이의 최대가 되는 지점을 취하였으며 항력은 무시하였다. 향후에 전산유체프로그램을 통한 정확한 위치를 파악과 항력을 첨가한다면 이론적으로 더욱 정확한 추정이 가능 할 것으로 본다. 그리고 제어유체력의 추정으로 부가물의 양력계수의 경사는 Whicker and Fehlner의 이론식을 적용시켜 구하였다. Whicker and Fehlner의 이론식의 유용성을 확인하기 위해 UUV에 부착되어 있는 수직평판과 수평타에 대해 회류수조에서 모형실험을 수행하여 그 결과를 비교한 결과 실험치와 거의 일치하는 양력계수를 추정할 수 있었으며, 종횡비의 고저는 물론 후퇴익 등 다양한 측면 형상을 취하는 익에 대해서도 유용함을 알 수 있었다. 유체력미계수의 이론추정치와 실험치의 비교해 보면 양자가 어느 정도 일치하고 있음을 알 수 있으며, 본 논문에서 제안된 이론추정식이 실험치의 확인 및 동안정성 검토 등 기초조사에 활용될 수 있을 것으로 생각된다. 이론적인 유체력미계수를 바탕으로 UUV의 동안정성, 선회성 및 중립운항조건 등 조종응답 특성을 검토하였다. 동안정성은 제어장치 고정상태에서 정상직진잠항 중 미소교란에 의한 운동이 발생되었을 때 수직방향 및 수평방향의 동적 안정성 고려하였다. 선회성은 종운동의 선형연립방정식을 무차원화한 후 pitch 모드만의 운동방정식으로 나타내어 승강타는 선미 수평타만 이용하여 선회성 지수를 검토와 횡운동의 선형연립방정식 무차원화한 후 yaw 모드만의 운동방정식으로 나타내어 선회성지수를 검토 하였다. UUV가 상하비대칭 형상에 기인한 힘과

모멘트로 인하여 제어판 고정상태에서는 정상 수평 직진 잠항을 하지 못한다. 따라서 수평 평행상태를 유지하기 위해서 필요한 수직방향의 앙각과 대응 승강타각 조건을 검토 하였다. 또한, UUV가 수직앙각을 가지지 아니하는 경우 즉, UUV가 상승하거나 하강하지 않고 똑바로 나아가기 위해서 필요한 대응 승강타각의 조건을 검토 하였다. 본 논문결과를 토대로 Manta형 UUV의 유체역학적 최적설계, 구속모형실험에 의한 수학모델의 보완 등에 관한 추가논문이 수행되어야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

- 김찬기, 1998, "몰수체 모형시험 해석을 위한 운동방정식의 구조 선택 및 계수 식별 결합법", 대한조선학회논문집, 제35권, 제2호, pp. 20－28.
- 손남선, 이기표, 이상무, 여동진, 2001, "수중운동체의 충돌회피시스템에 관한 연구", 대한조선학회논문집, 제38권, 제4호, pp. 23－29.
- 신용구, 임경식, 이승건, 2005, "수중함의 함미타 효율추정을 위한 수학모델링에 관한 연구", 대한조선학회논문집, 제42권, 제3호, pp. 190－196.
- 윤근항, 이기표, 여동진, 2005, "수중운동체의 목표추적시스템에 적합한 유도론 선정에 대한 연구", 대한조선학회논문집, 제42권, 제4호, pp. 299－306.
- Abkowitz, Martin A., 1969, "Stability and Motion Control of Ocean Vehicles", The MIT Press, Cambridge.
- Lewis, Edward V., 1989, "Principles of Naval Architecture", Vol. Ⅲ, 2nd Revision, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Jersey City.
- Motora, S., Koyama, T., Fujino, M., and Maeda, H., 1982, "Dynamics of Ship and Marine Structures", Seisandou, Tokyo.
- Newman, J. N., 1978, "Marine Hydrodynamics", The MIT Press, Cambridge.
- Ohkusu, M., Kashiwagi, M. and Koterayama, W., 1987, "Hydrodynamics of a Depth Controlled Towed Vehicle", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 162, pp. 99－109.
- Okada, S., 1958, "On the Results of Open Test of Model Rudders (Hydrodynamica Research of Ship's Rudder — the Second Report)", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 103, pp. 91－98.
- Tasai, F. and Takagi, M., 1969, "Theory and Calculation on Motion Response of Ships in Reguler Waves", Symposium on Seakeeping Qualities, The Society of Naval Architects of Japan, pp. 1－52.