

## Manta형 무인잠수정의 6자유도 운동 수학모델 및 조종응답 특성

손경호<sup>†\*</sup>, 이승건<sup>\*\*</sup>, 하승필<sup>\*</sup>

한국해양대학교 해양시스템공학부<sup>\*</sup>, 부산대학교 조선해양공학과<sup>\*\*</sup>

### Mathematical Model for Dynamics of Manta-type Unmanned Undersea Vehicle with Six Degrees of Freedom and Characteristics of Manoeuvrability Response

Kyoung-Ho Sohn<sup>†\*</sup>, Seung-Keon Lee<sup>\*\*</sup> and Seung-Pil Ha<sup>\*</sup>

Korea Maritime University<sup>\*</sup>, Pusan National University<sup>\*\*</sup>

#### 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 some of 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.

※ Keywords: Manta-type unmanned undersea vehicle(Manta형 무인잠수정), Mathematical model(수학모델), Dynamics with six degrees of freedom(6자유도 운동), Manoeuvrability response(조종응답)

#### 1. 서언

최근 해저 자원 개발 또는 생산 활동에 따른 수중작업의 수요 증대와 수중 유도무기체계 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 유체력 미계수의 식별 방법에 관해서 연구하였고, 신용구 등(2005)은 수중운동체의 제어판에 작용하는 유체력 추정법과 제어판이 수중운동체의 동안정성에 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 연구에서는 모항인 잠수함 동체 상부의 일부로써 장착되어 있다가 필요 시에만 모항으로부터 분리되어 자료 획득 등 작전 수행에 이용되는, 소

접수일: 2005년 10월 17일, 승인일: 2006년 4월 28일

†교신저자: sohnkh@kmaritime.ac.kr, 051-410-4303

형의 Manta 형상 무인잠수정(Unmanned Under-sea Vehicle, 이하 UUV라 함)의 운동특성에 관한 기초적 검토를 하였다. UUV는 잠수함 동체 상부에 장착되어야 하므로 Manta 형상을 취하고 있다. 구체적으로, 본 연구에서는 Manta형 UUV의 6자유도 운동 수학적모델을 정립하였으며, 선형유체력 미계수의 이론적 추정법을 확립하여 UUV의 동체와 부가물 또는 제어판의 설계 시에 활용할 수 있도록 하였다. 아울러 본 연구에서 제안된 유체력 미계수의 이론적 추정법에 기초하여 UUV의 동안정성, 선회성 및 평형 잠항 조건 등 조종응답 특성에 대해서도 검토하였다.

2. UUV의 6자유도 운동 수학적모델 정립

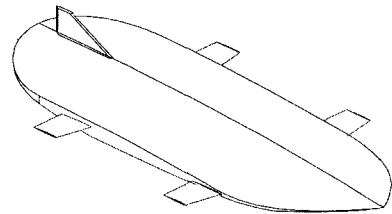
2.1 UUV의 명세

본 연구에서 채택한 UUV의 주요목과 형상은 각각 Table 1, Fig. 1과 같다. 즉, UUV 동체 측면

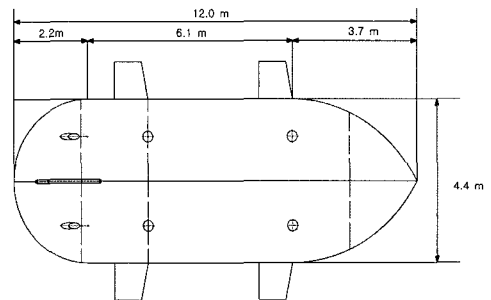
Table 1 Principal dimensions of Manta-type UUV

Item	Dimension	
Fuselage	length	$L = 12.0\ m$
	breadth	$B = 4.4\ m$
	height	$D = 1.2\ m$
	disp. vol.	$\nabla = 31.88\ m^3$
	centroid	6.333 m (from nose)
Upper vertical plate	root chord	2.0 m
	tip chord	0.45 m
	span	1.0 m
Lower vertical plate	root chord	0 m
	tip chord	3.5 m
	span	0.97 m
Horizontal rudder	root chord	1.0 m
	tip chord	0.8 m
	span	1.0 m
Vertical rudder	chord	0.5 m
	span	0.6 m

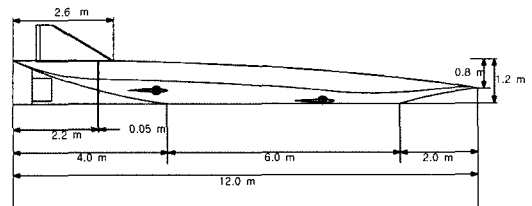
에는 승강 또는 자세 제어를 위해 수평타가 4개 설치되어 있으며, 수평타의 단면은 NACA0008 형상을 취하도록 하였다. 그리고 수평면 내에서의 동안정성 향상을 위해 동체 선미 상부와 하부에 각각 수직판을 설치하고 있으며, 하부 수직판 후단부에는 방향 제어를 위해 수직타가 설치되어 있다. 아울러 바닥 4곳에 hovering을 위한 thruster와 후부 2곳에 추진을 위한 thruster가 설치되어 있다.



(a) Perspective view



(b) Horizontal plan



(c) Profile

Fig. 1 Drawings of Manta-type UUV

2.2 6자유도 운동 수학모델 정립

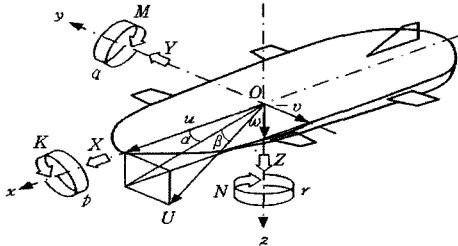


Fig. 2 Coordinate system and notation

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

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

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

그리고 UUV의 무게중심의 위치벡터  $r_G$ 는 다음과 같다.

$$r_G = (x_G, 0, z_G) \tag{3}$$

먼저 힘에 관한 Newton의 운동방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$F_G = \frac{d}{dt}(m U_G) \tag{4}$$

여기서 첨자  $G$ 는 무게중심에 관한 값을 나타내며  $d/dt$  기호는 시간에 대한 1차도함수를 의미한다.  $m$ 은 UUV의 질량을 나타낸다. 그리고 무게중심 위치에서의 합속도  $U_G$ 와 힘벡터  $F_G$ 는 각각 다음과 같이 표시된다.

$$U_G = U + \omega \times r_G \tag{5}$$

$$F_G = F_O = (X, Y, Z) \tag{6}$$

여기서  $F_O$ 는 좌표원점  $O$ 에 관한 힘벡터로서  $X, Y, Z$ 의 성분 값을 가진다. 그리고  $O - x, y, z$  축 방향 힘 성분은 무게중심  $G$ 를 지나고  $x, y, z$  축과 평행인 축 방향 힘 성분과 동일하므로  $F_O$ 와  $F_G$ 는 같다.

식(4), (5), (6)으로부터  $F_O$ 는 다음 식으로 표시된다.

$$F_O = m(\dot{U} + \dot{\omega} \times r_G + \omega \times \dot{r}_G) \tag{7}$$

여기서 dot ( $\cdot$ ) 기호는  $d/dt$  기호와 동일하다.

다음으로 모멘트에 관한 Newton의 운동방정식은 다음과 같이 표시된다.

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

여기서도 첨자  $G$ 는 무게중심에 관한 값을 나타내며 각운동량은 다음과 같이 표시된다.

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

여기서  $[I']$ 는 UUV의 무게중심을 지나고  $x, y, z$  축과 평행인 축 즉, 관성주축에 대한 질량관성모멘트의 매트릭스 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  $x, y, z$  축에 관한 UUV의 질량관성모멘트를 의미한다.

한편, 무게중심에 관한 모멘트벡터  $M_G$ 는 좌표원점  $O$ 에 관한 모멘트벡터  $M_O$ 와 다음 관계가 성립한다.

$$M_G = M_O - r_G \times F_O \tag{11}$$

여기서  $M_O$ 는  $K, M, N$ 의 성분 값을 가진다. 즉, 다음과 같이 표시된다.

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

따라서  $\mathbf{M}_O$ 는 다음 식으로 표시된다.

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

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

$$X = m\{\ddot{u} + qw - rv - x_G(q^2 + r^2) + z_G(pr + \dot{q})\}$$

$$Y = m\{\ddot{v} + ru - pw + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(q\dot{p} + \dot{r})\}$$

$$Z = m\{\ddot{w} + pv - qu - z_G(\dot{p}^2 + \dot{q}^2) + x_G(rp - \dot{q})\}$$

$$K = I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr - m\{z_G(\dot{v} + ru - pw) + x_G z_G(\dot{p}q + \dot{r})\}$$

$$M = I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp + m\{z_G(\ddot{u} + qw - rv) - x_G(\ddot{w} + pv - qu) + x_G z_G(\dot{p}^2 - r^2)\}$$

$$N = I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq + m\{x_G(\dot{v} + ru - pw) + z_G x_G(rq - \dot{p})\} \tag{14}$$

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

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

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

여기서 첨자  $Gr, B, I, D, C$ 는 각각 중력, 부력, 관성유체력, 점성감쇠유체력 및 제어유체력을 의미하며, 이들은 순차적으로 다음과 같이 나타낼

수 있다.

① 중력

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

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

여기서  $g$ 는 중력가속도,  $\mathbf{k}'$ 는 공간고정좌표계(정지좌표계)에서 연직 하방향의 단위벡터이고,  $[E]$ 는 공간고정좌표계를 물체고정좌표계(동좌표계)로 바꾸어 주는 변환매트릭스(coordinate transformation matrix)로서 다음과 같다(Abkowitz 1969). 단,  $\phi, \theta, \psi$ 는 Euler각을 나타낸다.

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

② 부력

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

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

여기서  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $\nabla$ 는 UUV의 배수용적,  $\mathbf{r}_B$ 는 부심의 위치벡터로서  $(x_B, 0, z_B)$ 이다.

③ 관성유체력

비점성 무한유체 중에서 6자유도 운동을 하는 물체에 작용하는 관성유체력(hydro-inertial force) 또는 부가질량력(added-mass force)은 Newman(1978)에 의해 다음과 같이 표시된다.

$$F_j = -\dot{U}_i A_{ji} - \varepsilon_{jkl} U_i \Omega_k A_{li} \tag{22}$$

$$M_j = -\dot{U}_i A_{j+3, i} - \varepsilon_{jkl} U_i \Omega_k A_{l+3, i} - \varepsilon_{jkl} U_i U_k A_{li} \tag{23}$$

여기서  $F_j$ 와  $M_j$ 는 각각  $j$  방향 힘과  $j$  축 주위의 모멘트를 나타낸다.  $A_{ji}$ 는 부가질량텐서(added-mass tensor)로서  $i$  방향 운동모드에 기인하는  $j$  방향 부가질량 또는 부가관성모멘트를 의미한다.  $\varepsilon_{jkl}$ 은 부호변환기호로서 123, 231, 312의 경우에는 양(+), 132, 321, 213의 경우에는 음(-)의 부호를 취하며, 같은 숫자가 두 번 겹치면 영(0)을 취하도록 정의된다. 그 외 각 부호의 의미는 다음과 같다.

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

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

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

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

식(14)로 표시되는 6자유도 운동의 기본식을 참고하면서 식(22)와 식(23)을 이용하여 관성유체력의 각 성분을 구체적으로 구할 수 있다.

④ 점성감쇠유체력

유체의 점성에 기인하는 유체력은 실험적으로 구하게 된다. Table 1과 Fig. 1에 보인 UUV에 대해서 1/6모형(길이 2.0 m)을 제작하여 예인수조에서 수행된 정적시험 즉, 수평사향시험과 수직양각 시험의 결과와 수학모델에 의한 커브피팅 결과를 Figs. 3 ~ 7에 보인다. 이들 그림에서 힘은  $0.5\rho L^2 U^2$ 으로, 모멘트는  $0.5\rho L^3 U^2$ 으로 무차원화 하였다. 그리고 모형선의 예인속도는 1.0 m/sec로 정하였다. 실험조건으로서 UUV 동체 모형에 수직판과 수평타 등의 부가물은 부착되어 있으나, 추진 및 hovering을 위한 thruster는 설치되지 않았다. 모형실험 시 검력계는 UUV 동체중량으로부터 0.1 m 후방에 설치되었으며, 횡경사모멘트의 중심은 모형선 선저로부터 0.135 m 높이에 위치한다. Figs. 3~7의 실험자료의 커브피팅 결과로부터 점성감쇠유체력을 식(24), (25), (26)과 같이 수학모델화 한다. 단, 실험자료의 커브피팅 시에는  $Y_w', K_w', N_w'$ 가 고려되어 있으나 이들은 UUV의 형상이 좌우대칭형이므로 실제로는 나타낼 수 없는 항이라는 점을 고려하여 수학모델에서는 무

시하였다. 그리고 추후 수행예정인 PMM(Planar Motion Mechanism) 시험 등 추가 모형시험 결과에 따라서 다음에 제시된 수학모델 식(24), (25), (26)은 약간 수정될 수도 있다는 것을 명기해 둔다.

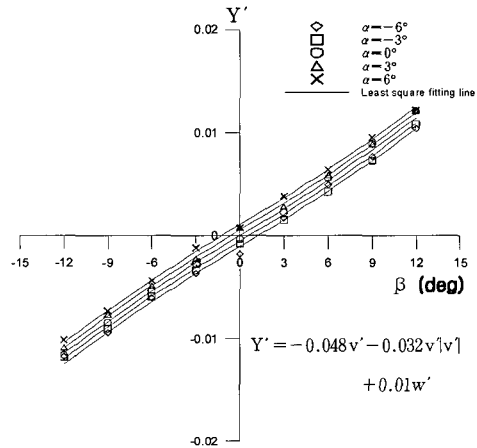


Fig. 3 Sway force obtained from static experiment and least square fitting line

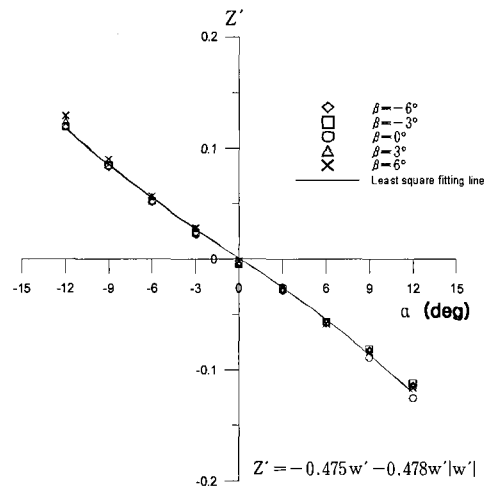


Fig. 4 Heave force obtained from static experiment and least square fitting line

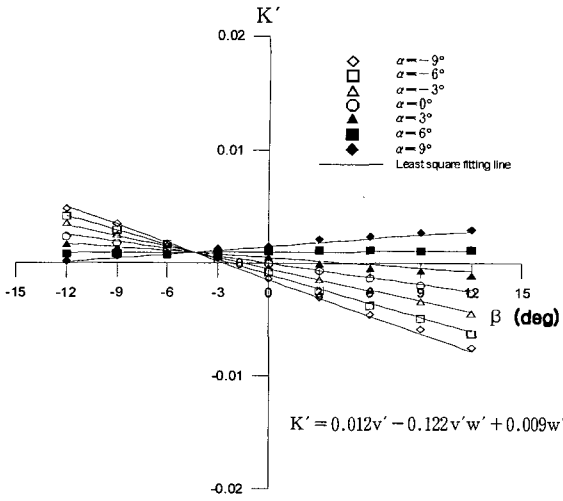


Fig. 5 Roll moment obtained from static experiment and least square fitting line

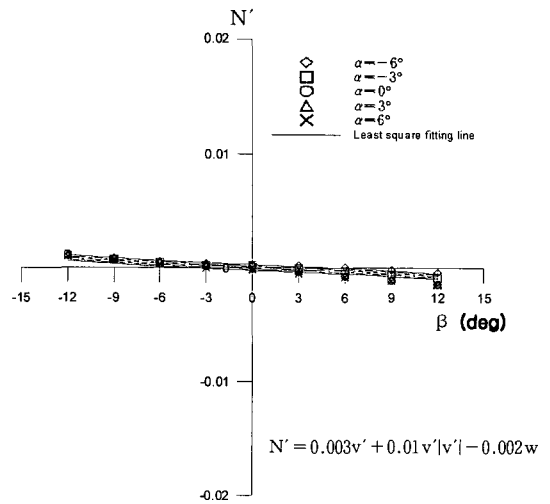


Fig. 7 Yaw moment obtained from static experiment and least square fitting line

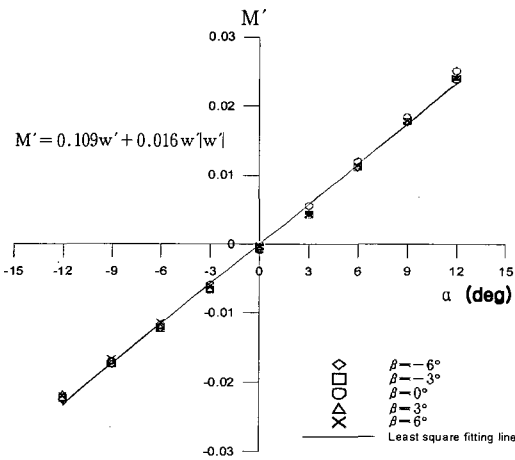


Fig. 6 Pitch moment obtained from static experiment and least square fitting line

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

$$M_D = \begin{bmatrix} K_p \dot{\beta} + K_v v + K_r^* r \\ M_{uu}u^2 + M_w^* w + M_q^* q + M_{NL}(w, q) \\ N_v^* v + N_r^* r + N_{NL}(v, r) \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$X_{NL}(v, w) = X_{vv}v^2 + X_{ww}w^2$$

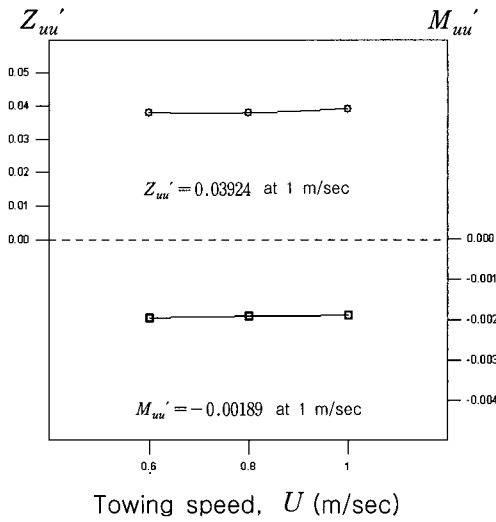
$$Y_{NL}(v, r) = Y_{v|v}|v| + Y_{r|r}|r| + Y_{v|r}|v|r$$

$$Z_{NL}(w, q) = Z_{w|w}|w| + Z_{q|q}|q| + Z_{w|q}|w|q|$$

$$M_{NL}(w, q) = M_{w|w}|w| + M_{q|q}|q| + M_{w|q}|w|q|$$

$$N_{NL}(v, r) = N_{v|v}|v| + N_{r|r}|r| + N_{v|r}|v|r| \quad (26)$$

여기서  $X_{uu}$ 는 정상직진 시 UUV에 작용하는 저항 계수를 나타낸다. 그리고 일부 유체력미계수에 표시한 첨자 \* 표시는 부가질량력에 의한 감소력과 점성감쇠력을 합한 유체력미계수와와의 구분을 위해서 사용되었다(식(33), (38) 참조). 비선형유체력은 UUV의 좌우대칭 형상을 고려하여 전후방향 힘은 운동변수의 2차 다항식으로, 그 외 유체력 성분은 운동변수의 3차 다항식의 변형된 형태로 나타낼 수 있다



**Fig. 8** Heave force and pitch moment coefficients obtained from straight-line towing experiment

(Feldman 1979).  $Z_{uu}$ 와  $M_{uu}$ 는 정상직진 시 UUV 동체의 상하 비대칭 형상에 기인하는 양력성분의 유체력계수를 나타내며, 모형선의 예인속도에 따른 직진시험 결과를 Fig. 8에 나타낸다. 단, 실험조건과 검력계의 설치 위치 등은 정적시험 시와 동일하다.

**⑤ 제어유체력**

제어판의 작동에 기인하는 유체력과 추진력은 조종성 분야에서의 관례에 따라서 다음과 같이 표시한다.

$$F_C = \begin{bmatrix} X_{\delta\delta}\delta^2 + X_{\delta b\delta b}(\delta b)^2 + X_{\delta s\delta s}(\delta s)^2 + (1-t)(T_1 + T_2) \\ Y_{\delta}\delta \\ Z_{\delta b}\delta b + Z_{\delta s}\delta s + Z(HT) \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$M_C = \begin{bmatrix} K_{\delta}\delta + K_{n_b}n_b + K_{n_s}n_s \\ M_{\delta b}\delta b + M_{\delta s}\delta s + M(HT) \\ N_{\delta}\delta + (1-t)(T_2 - T_1)y_p \end{bmatrix} \quad (28)$$

여기서  $\delta$ 는 수직타의 방향타각(rudder angle)으로서 우현방향을 양(+)의 방향으로 취한다.  $\delta b, \delta s$ 는 선수, 선미 수평타의 승강타각(elevator angle)으로서 상방향을 양(+)의 방향으로 취한다.  $n_b, n_s$ 는 선수, 선미의 횡방향 자세제어용 수평타각으로서 좌우 수평타를 반대칭적으로 취함으로써 횡동요모멘트를 발생시킨다. 즉, 선수, 선미의 좌우 수평타는 승강제어 뿐만 아니라 자세제어 용도로도 이용된다.  $T_1, T_2$ 는 우현 및 좌현 프로펠러 추력을 나타내고,  $t$ 는 추력감소계수,  $y_p$ 는 우현 프로펠러 위치의  $y$  좌표이다.  $Z(HT)$ 와  $M(HT)$ 는 hovering thruster에 의한 추력과 추력모멘트를 나타낸다.

이상 언급한 ①, ②, ③, ④, ⑤의 힘과 모멘트를 각 성분별로 구하고 이들을 식(14) 좌변에 대입한 후에 정리하면 UUV의 6자유도 운동 수학적 모델을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

**- 종운동방정식**

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

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

$$\begin{aligned} F_Z &= -(m + A_{22})pw + (mz_G - A_{24})p^2 \\ &+ (mz_G + A_{15})q^2 - (mx_G + A_{26})pr \\ &+ (m - \rho \nabla)g \cos \phi \cos \theta \\ &+ Z_{uu}u^2 + Z_{ww}w + (Z_q + m)uq \\ &+ Z_{\delta b}\delta b + Z_{\delta s}\delta s + Z(HT) + Z_{NL}(w, q) \end{aligned} \quad (31)$$

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

단,

$$\begin{aligned}
 Z_q &= Z_q^* + A_{11}u \\
 M_w &= M_w^* + (A_{33} - A_{11})u \\
 M_q &= M_q^* + A_{35}u
 \end{aligned} \tag{33}$$

**- 횡운동방정식**

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

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

$$\begin{aligned}
 M_X = & -(mz_G - A_{24})pw + (mx_G z_G - A_{64})pq \\
 & - \{(I_{zz} + A_{66}) - (I_{yy} + A_{55})\}qr \\
 & - (A_{62} + A_{35})qv
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + (A_{26} + A_{53})rw - (A_{33} - A_{22})vw \\
 & - (mz_G - \rho \nabla z_B)g \sin \phi \cos \Theta \\
 & + K_p \dot{p} + K_v v + (K_r + mz_G u)r + K_\delta \delta \\
 & + K_{nb} nb + K_{ns} ns
 \end{aligned} \tag{36}$$

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

단,

$$\begin{aligned}
 Y_r &= Y_r^* - A_{11}u \\
 K_r &= K_r^* + A_{51}u \\
 N_v &= N_v^* - (A_{22} - A_{11})u \\
 N_r &= N_r^* - A_{26}u
 \end{aligned} \tag{38}$$

**3. 선형유체력미계수의 이론적 추정법**

**3.1 선형운동방정식**

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

**- 종운동방정식**

$$\begin{aligned}
 (m + A_{33})\ddot{w} - Z_w w - (mx_G - A_{35})\dot{q} \\
 - (Z_q + mU)q &= Z_{\delta b} \delta b + Z_{\delta s} \delta s \\
 (I_{yy} + A_{55})\dot{q} - (M_q - mx_G U)q - (mx_G - A_{53})\dot{w} \\
 - M_w w + mg(z_G - z_B)\Theta &= M_{\delta b} \delta b + M_{\delta s} \delta s
 \end{aligned} \tag{39}$$



- 횡운동방정식

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

3.2 선형유체력미계수의 이론적 추정법

(1) 부가질량과 부가관성모멘트의 추정

식(22)와 식(23)에서 정의된 부가질량(부가관성 모멘트까지를 포함하는 포괄적 의미로 사용됨)은 다음과 같이 구한다. 즉, UUV 동체와 부가물에 작용하는 각각의 부가질량을 구해 이들을 서로 합한다(Lewis 1989).

$$\begin{aligned}
 A_{22} &\equiv m_y = (m_y)_h + \sum_{f=1}^2 (m_y)_{fi} \\
 A_{26} = A_{62} &= (m_y)_h \cdot x_y + \sum_{f=1}^2 x_{fi} \cdot (m_y)_{fi} \\
 A_{66} &\equiv J_{zz} = (J_{zz})_h + \sum_{f=1}^2 (x_{fi})^2 \cdot (m_y)_{fi} \\
 A_{33} &\equiv m_z = (m_z)_h + \sum_{f=3}^6 (m_z)_{fi} \\
 A_{53} = A_{35} &= -(m_z)_h \cdot x_z - \sum_{f=3}^6 x_{fi} \cdot (m_z)_{fi} \\
 A_{55} &\equiv J_{yy} = (J_{yy})_h + \sum_{f=3}^6 (x_{fi})^2 \cdot (m_z)_{fi}
 \end{aligned} \tag{41}$$

여기서  $m_y$ ,  $m_z$ 는 각각  $y$ 방향과  $z$  방향 부가질량을 의미하며,  $J_{yy}$ ,  $J_{zz}$ 는 각각  $y$  축과  $z$  축 주위의 부가관성모멘트를 의미한다. 그리고 첨자  $h$ 는 동체, 첨자  $f_i$ 는  $i$ 번째의 부가물,  $x_{fi}$ 는  $i$ 번째 부가물의 중심위치의  $x$  좌표를 나타낸다. 그리고 부가물은  $i = 1$ 은 상부수직판,  $i = 2$ 는 하부수직판(수직타 포함),  $i = 3 \sim 6$ 은 수평타를 나타낸다. 그리고  $x_y$ ,  $x_z$ 는 각각  $(m_y)_h$ 와  $(m_z)_h$ 의 중심의  $x$  좌표를 나타낸다.

① 동체의 부가질량과 부가관성모멘트

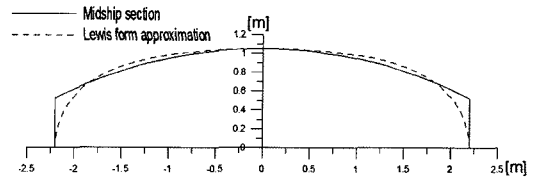


Fig. 9 Comparison of midship section of UUV fuselage with Lewis form approximation

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. 9에 나타낸다.

② 부가물의 부가질량과 부가관성모멘트

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

$$(m_y)_f = \frac{2\pi\rho bA_f}{(a^2 + 1)^{1/2}} \tag{42}$$

- 단,  $(m_y)_f$  : 수직평판의 횡방향 부가질량
- $\rho$  : 유체의 밀도
- $a$  : 유효종횡비
- $b$  : 평판의 높이
- $A_f$  : 평판의 면적

수평타의 경우에는 수직평판 대신에 수평평판의 종방향 부가질량 즉,  $(m_z)_f$ 를 식(42)와 마찬가지로 구할 수 있다.

(2) 감쇠유체력의 추정

감쇠유체력미계수는 UUV 동체와 부가물에 작용하는 각각의 감쇠유체력미계수를 구해 이들을 서로 합하여 다음과 같이 구한다(Lewis 1989).

$$\begin{aligned}
 Y_v' &= (Y_v')_h + \sum_{fi=1}^2 (Y_v')_{fi} \\
 N_v' &= (N_v')_h + \sum_{fi=1}^2 (Y_v')_{fi} \cdot x_{fi}' \\
 Y_r' &= (Y_r')_h + \sum_{fi=1}^2 (Y_v')_{fi} \cdot x_{fi}' \\
 N_r' &= (N_r')_h + \sum_{fi=1}^2 (x_{fi}')^2 \cdot (Y_v')_{fi} \\
 Z_w' &= (Z_w')_h + \sum_{fi=3}^6 (Z_w')_{fi} \\
 M_w' &= (M_w')_h - \sum_{fi=3}^6 (Z_w')_{fi} \cdot x_{fi}' \\
 Z_q' &= (Z_q')_h - \sum_{fi=3}^6 (Z_w')_{fi} \cdot x_{fi}' \\
 M_q' &= (M_q')_h + \sum_{fi=3}^6 (x_{fi}')^2 \cdot (Z_w')_{fi}
 \end{aligned} \tag{43}$$

여기서 첨자  $h$  와  $fi$  의 의미는 식(41)에서와 같다. 그리고 유체력미계수를 구할 때 힘은  $0.5\rho L^2 U^2$  으로, 모멘트는  $0.5\rho L^3 U^2$  으로, 속도는  $U$  로, 각 속도는  $U/L$  로, 길이는  $L$  로 각각 무차원화 한다.

① 동체의 감쇠유체력미계수

동체의 감쇠유체력은 세장체이론(slender body theory)을 이용하여 다음과 같이 구하기로 한다. Newman(1978)은 세장체이론을 적용시켜 횡운동 유체력미계수를 다음과 같이 표시하였다. 단, 여기서는 세장체이론에서는 무시되고 있는 동체 길이 방향의 부가질량까지를 함께 고려하였다.

$$\begin{aligned}
 (Y_v')_h &= -m_y^{2D}(x_0)/(1/2\rho L^2) \\
 (Y_r')_h &= x_0'(Y_v')_h - (m_x')_h \\
 (N_v')_h &= x_0'(Y_v')_h - (m_y')_h + (m_x')_h \\
 (N_r')_h &= (x_0')^2(Y_v')_h - (m_y')_h x_y'
 \end{aligned} \tag{44}$$

여기서  $m_y^{2D}(x_0)$  는  $x_0$  위치에서의 동체 횡단면에 작용하는 2차원 부가질량을 의미한다. 그리고 부가 질량계수  $(m_x')_h$  와  $(m_y')_h$  는  $0.5\rho L^3$  으로 무차

원화 하였다.  $x_0$  는 조종운동에 의해 동체가 wake 중에 놓여짐으로써 양력을 발생시키지 아니하는 동체 후반부의 최초의 위치 즉, 박리점(separation point)을 나타낸다. Newman(1978)은 이점을 effective trailing edge라 정의하였다.  $x_0'$  는  $x_0$  의 무차원치를 의미한다. 선형 유체력미계수의 추정 정도(accuracy)는  $x_0$  의 위치 결정에 귀착되는데, 일반적으로 실험에 의존하지 않고  $x_0$  를 정확하게 추정하는 것은 곤란하다. 본 연구에서는 선형 유체력 미계수의 개략적인 값의 추정에 목표를 두고 있기 때문에  $x_0$  의 위치를 다음과 같이 가정하기로 한다. 즉, UUV 동체 측면도에서 동체깊이가 최대가 되는 최초 위치의  $x$  좌표를  $x_0$  값으로 취하기로 한다. 그리고 이 값은 구체적으로  $x_0' = -0.167$  이다. 또한 식(44)에 나타난  $(Y_v')_h$  값을 구하기 위해서는  $m_y^{2D}(x_0)$  를 먼저 구해야 하는데, 본 연구에서는  $m_y^{2D}(x_0)$  를 직접 구하는 대신에 소종횡비의(low aspect ratio wing)의 양력계수에 관한 Jones의 이론식을 적용시켜  $(Y_v')_h$  를 다음과 같이 구하기로 한다(Lewis 1989).

$$(Y_v')_h = -\pi(D/L)^2 k_0 \tag{45}$$

여기서  $k_0$  는 UUV의 동체 측면적비(측면적을  $LD$  로 나눈 값)로서  $k_0 = 0.64$  이다. 그리고 Jones의 이론식을 적용시킬 때 동체 상하부에 부착된 수직평판의 영향 등을 고려하여 유효종횡비를  $2D/L$  로 가정하였다.

종운동 시의 유체력미계수도 같은 방법에 의해서 식(44), 식(45)와 유사하게 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 (Z_w')_h &= -\pi(B/L)^2 k_1 \\
 (Z_q')_h &= -x_1'(Z_w')_h + (m_x')_h \\
 (M_w')_h &= -x_1'(Z_w')_h + (m_z')_h - (m_x')_h \\
 (M_q')_h &= (x_1')^2(Z_w')_h - (m_z')_h x_z'
 \end{aligned} \tag{46}$$

여기서  $x_1$  은 종운동에서의 effective trailing edge 의  $x$  좌표이다.  $x_1$  값을 정확하게 추정하기 위해서

는 흐름가시화 실험 등에 의존해야 하지만, 본 연구에서는 간단히 UUV 평면도 상의 선수 수평타의 후단부 위치에서 박리가 일어난다고 가정한다. 이 값은 구체적으로  $x_1' = 0.108$  이다. 그리고  $k_1$ 은 UUV의 동체 평면적비로서 UUV의 평면 형상을 고려하여 이 값을 근사적으로 1.0으로 취한다(Ohkusu et al. 1987).

② 부가물의 감쇠유체력미계수

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

$$(Y_v')_f = -\left(\frac{A_f}{L^2}\right)\left(\frac{\partial C_L}{\partial \beta}\right)_f \quad (47)$$

여기서  $A_f$ 는 수직평판의 면적이고,  $C_L$ 은 양력계수로서  $L_f / (0.5\rho A_f U^2)$  (단,  $L_f$ : 수직평판에 작용하는 양력)이고  $\beta$ 는 수평사향각을 나타낸다. 그리고  $(\partial C_L / \partial \beta)_f$ 는  $\beta$ 에 대한  $C_L$ 곡선에서  $\beta = 0^\circ$  일 때의  $C_L$ 곡선의 경사를 나타낸다. 수평타에 기인하는 종방향의 유체력미계수  $(Z_w')_f$ 도 마찬가지로 방법에 의해서 구할 수 있다. 그리고 평판 또는 타에 작용하는 양력계수의 경사는 다음 식으로 주어지는 Whicker/Fehlner의 추정식에 의해 구한다(Lewis 1989).

$$\left(\frac{\partial C_L}{\partial \beta}\right)_f = \frac{0.9 \times 2\pi \times a}{\cos \Theta \sqrt{\frac{a^2}{\cos^4 \Theta} + 4 + 1.8}} \quad (48)$$

단,  $a$ : 유효중형비,  $\Theta$ : 후퇴각(sweep angle)

양력계수의 경사에 관한 Whicker/Fehlner의 추정식의 유용성을 확인하기 위해 Table 1과 Fig. 1에 나타난 UUV의 상부 및 하부 수직평판과 수평타의 1/6 모형을 제작하여 회류수조에서 모형실험을 수행하여 그 결과를 계산치와 비교해 보았다. 그 결과 Whicker/Fehlner의 추정식은 후퇴각 등 여러 형태의 평판 또는 타의 양력경사계수의 추정에 유용함을 알 수 있었다. 실험결과와 일례로서 수평타에 대한 것을 Fig. 10에 보인다. Fig. 10에는 타가 단독으로 놓여 있을 때와 경상효과를 고

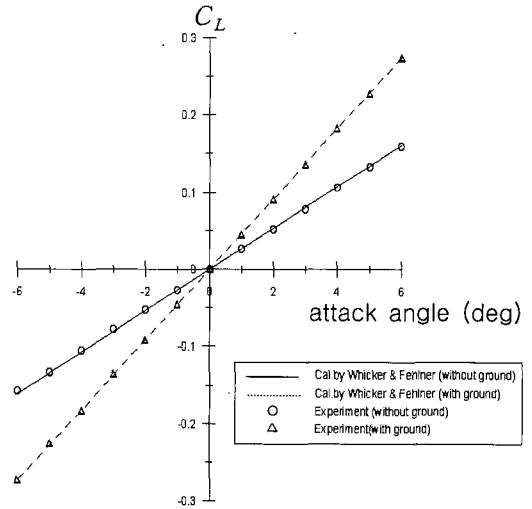


Fig. 10 Comparison of experiment on lifting force acting on horizontal rudder with calculation by Whicker/Fehlner equation

려한 경우를 동시에 보이고 있다. 단, 실험치는 타에 작용하는 직압력(normal force)을 측정하여 무차원화 하였기 때문에 양력계수  $C_L$ 과는 다소 차이가 있을 것으로 예상되지만 그 차이는 미소할 것으로 간주하여 별도의 수정을 하지 않았다.

(3) 제어유체력의 추정

① 수직타(방향타)에 기인하는 유체력미계수

방향타각  $\delta$ 에 기인하는 유체력미계수  $Y_\delta'$ 와  $N_\delta'$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$Y_\delta' = -\left(\frac{A_R}{L^2}\right)\left(\frac{\partial C_L}{\partial \delta}\right)_0 \quad (49)$$

$$N_\delta' = -x_R'\left(\frac{A_R}{L^2}\right)\left(\frac{\partial C_L}{\partial \delta}\right)_0$$

단,  $x_R'$ : 수직타의 압력중심의  $x$  좌표의 무차원치

$A_R$ : 수직타의 측면적

$(\partial C_L / \partial \delta)_0$ : 양력경사계수로서 식(48)을 이용하여 계산한다.

② 수평타(승강타)에 기인하는 유체력미계수

승강타각  $\delta b$ ,  $\delta s$  에 기인하는 유체력미계수는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} Z_{\delta b}' &= 2\left(\frac{A_{Rb}}{L^2}\right)\left(\frac{\partial C_L}{\partial \delta b}\right)_0 \\ Z_{\delta s}' &= 2\left(\frac{A_{Rs}}{L^2}\right)\left(\frac{\partial C_L}{\partial \delta s}\right)_0 \\ M_{\delta b}' &= -x_{Rb}' \cdot Z_{\delta b}' \\ M_{\delta s}' &= -x_{Rs}' \cdot Z_{\delta s}' \end{aligned} \quad (50)$$

단,  $x_{Rb}'$ ,  $x_{Rs}'$  : 승강타로 이용되는 선수, 선미 수평타의 압력중심의  $x$  좌표의 무차원치  
 $A_{Rb}$ ,  $A_{Rs}$  : 선수, 선미 수평타의 측면적  $\left(\frac{\partial C_L}{\partial \delta b}\right)_0, \left(\frac{\partial C_L}{\partial \delta s}\right)_0$  : 양력경사계수로서 식 (48)을 이용하여 계산한다.

**(4) 유체력미계수의 이론추정치와 실험치의 비교**

Table 1과 Fig. 1에 보인 UUV에 대해서 이상 언급한 이론적 추정법에 의해 구해진 선형유체력 미계수와 정적시험 결과(Fig. 3, Fig. 4, Fig.6, Fig.7)로부터 구한 선형유체력미계수를 함께 Table 2에 나타낸다. 단, 모형실험 시 검력계는 UUV 동체중앙으로부터 0.1 m 후방에 설치되었으므로 Table 2에 나타낸 실험치는 검력계로부터 직접 측정된 값을 동체중앙에서의 값으로 수정한 것이다.

Table 2에 보인 정적시험 결과와 이론계산치를 비교해 보면 양자가 어느정도 일치하고 있음을 알 수 있으며, 본 연구에서 제안된 이론추정식은 실험치의 확인 또는 동안정성 검토 등 기초 조사에 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

**4. UUV의 조종응답 특성**

**4.1 수평면에서의 동안정성과 선회성 검토**

sway-yaw 연성운동을 나타내는 식(40)을 이용하여 수평면내에서 동안정성(dynamic stability)과 선회성(turning ability)을 검토해 본다. 식(40)을 무차원화 하여 표시한 후 방향타각이 0° 인 상태

**Table 2** Theoretical calculation results of linear hydrodynamic derivatives and comparison of some of them with static experiment results

Derivatives	Calculation	Experiment
$m'$	0.037389	
$I_{yy}'$	0.001798	
$I_{zz}'$	0.001807	
$m_x'$	0.005535	
$m_y'$	0.024853	
$m_z'$	0.079330	
$J_{yy}'$	0.002763	
$J_{zz}'$	0.001993	
$Y_v'$	-0.051282	-0.048187
$N_v'$	0.006448	0.005821
$Y_r'$	0.009755	
$N_r'$	-0.004668	
$Z_w'$	-0.487901	-0.475054
$M_w'$	0.106493	0.085083
$Z_q'$	0.048975	
$M_q'$	-0.005018	
$Y_{\delta}'$	-0.003421	
$N_{\delta}'$	0.001497	
$Z_{\delta b}'$	0.032766	
$Z_{\delta s}'$	0.032766	
$M_{\delta b}'$	-0.004782	
$M_{\delta s}'$	0.006958	

에서 특성방정식을 구하여 Routh-Hurwitz 안정성 판별 조건을 적용시켰을 때 동적 안정의 조건은 다음과 같다(Lewis 1989).

$$C = Y_v'(N_r' - m'x_G') - N_v'(Y_r' - m') > 0 \quad (51)$$

여기서  $C$ 는 동안정성지수를 의미하며,  $C$ 가 양 (+)일 때 UUV는 수평면 내에서 직선운동안정성(straight-line stability)을 갖는다. 그리고 식(40)

을 무차원화 하여 표시한 후  $v'$  를 소거하여 방향 타각에 대한 yaw모드의 응답특성을 나타내는 미분방정식 즉,  $\delta$  에 관한  $r'$  의 2계 선형미분방정식으로부터 정상선회특성곡선( $\delta - r'$  곡선)의 원점에서의 기울기를 나타내는 선회력지수  $K$  는 다음과 같이 표시된다.

$$K = \frac{Y'_\delta N'_v - Y'_v N'_\delta}{C} \quad (52)$$

여기서  $C$  는 식(51)에서 정의된 동안정성지수이다. 본 연구에서 채택한 UUV의 동안정성지수  $C$  와 선회력지수  $K$  를 계산하기 위해 Table 2에 나타난 유체력미계수 중 이론계산치를 이용하기로 한다. 계산 결과  $C = 0.000360 > 0$ ,  $K = 0.1521$ 이다. 따라서 본 연구에서 채택한 UUV의 경우 동적 안정성 경향을 보이고는 있으나  $Y'_v < 0$ ,  $N'_v > 0$ 으로써 즉, sway damping 착력점이 동체중앙 뒤쪽에 위치함으로써 선회성이 나빠질 것으로 예상된다. 이것은 조종성능 관점에서 바람직한 현상이라고는 볼 수 없다.

## 4.2 수직면에서의 동안정성과 평형 잠항 조건 검토

### (1) 수직면에서의 동안정성

heave-pitch 연성운동을 나타내는 식(39)에서  $q = \dot{\theta}$ ,  $\dot{q} = \ddot{\theta}$ ,  $\delta b = 0$ ,  $\delta s = 0$  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(53), (54), (55), (56), (57)을 동시에 만족하여야 한다(Kuo 1967).

$$a_0 = (m' + A_{33}')(I_{yy}' + A_{55}') - (m'x'_G - A_{53}')(m'x'_G - A_{35}') > 0 \quad (53)$$

$$a_1 = -(m' + A_{33}')(M'_q - m'x'_G) - Z'_w(I_{yy}' + A_{55}')$$

$$\begin{aligned} & -(m'x'_G - A_{53}')(Z'_q + m') \\ & - M'_w(m'x'_G - A_{35}') > 0 \end{aligned} \quad (54)$$

$$\begin{aligned} a_2 = & (m' + A_{33}')(z'_G - z'_B)m' \left( \frac{gL}{U^2} \right) \\ & + Z'_w(M'_q - m'x'_G) - M'_w(Z'_q + m') > 0 \end{aligned} \quad (55)$$

$$a_3 = -Z'_w(z'_G - z'_B)m' \left( \frac{gL}{U^2} \right) > 0 \quad (56)$$

$$a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0 \quad (57)$$

여기서  $a_0, a_1, a_2, a_3$  는 3차 대수방정식으로 표시 되는 특성방정식의 각 계수를 나타내며,  $a_2$  와  $a_3$  는 UUV의 잠항속도  $U$  의 함수로 주어진다. 식(53)~(57)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 의미한다. 본 연구에서 채택한 UUV는 안정한 유체정역학적 복원모멘트를 가지는 경우로서 부심이 무게중심 위쪽 0.2 m 높이에 위치한다고 가정할 때, 식(53), (54), (56)의 조건은 항상 만족되고 있다. 따라서 수직면에서의 동안정성 조건은 식(55), (57)에 귀착되며, 이 조건을 만족하는 속도영역은  $U \leq 0.645$  m/sec 이다. 즉, UUV는 0.645 m/sec 이하의 극미속 잠항 시에만 방향안정성의 경향을 보인다는 것을 알 수 있다. 단, 동안정성 검토 시 유체력미계수는 이론계산치를 사용하였다.

### (2) 수직면에서의 수평 평형자세 유지 조건

Manta형 UUV는 유체력미계수  $Z'_{uu}$  와  $M'_{uu}$  로 인해 제어판 고정상태에서는 정상 수평 직진 잠항을 하지 못한다. 만약 UUV가 종동요각  $\theta = 0^\circ$  인 상태에서 안정하게 정적 평형을 유지하고 있다고 가정할 때 UUV가 계속해서 이 자세를 유지하기 위해서는 수직방향의 양각과 대응승강타각이 요구된다. 이 상태에서의 종운동방정식은 다음과 같다. 단, 승강타는 선수, 선미 수평타를 모두 이용한다고 가정한다.

$$\begin{aligned} Z_{uu}'u'^2 + Z_w'w' + Z_{\delta b}'\delta b + Z_{\delta s}'\delta s &= 0 \\ M_{uu}'u'^2 + M_w'w' + M_{\delta b}'\delta b + M_{\delta s}'\delta s &= 0 \end{aligned} \quad (58)$$

여기서  $w'$ 는  $z$ 축 방향 속도성분의 무차원치이다. 초기 평형자세를 유지하기 위해 필요한 수직 양각을  $\alpha_0$ 라 하면  $u' = \cos\alpha_0$ ,  $w' = \sin\alpha_0$ 인데,  $\alpha_0$ 가 미소한 값이라 가정하면  $u' \approx 1.0$ ,  $w' \approx \alpha_0$ 라 간주할 수 있다. 따라서 식(58)은 다음과 같이 간략화 하여 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} Z_{uu}' + Z_w'\alpha_0 + Z_{\delta b}'\delta b + Z_{\delta s}'\delta s &= 0 \\ M_{uu}' + M_w'\alpha_0 + M_{\delta b}'\delta b + M_{\delta s}'\delta s &= 0 \end{aligned} \quad (59)$$

식(59)에는 미지수가 3개 있으므로 선수 승강타각  $\delta b$  값을 특정한 값으로 생각하고, 미지수를  $\alpha_0$ ,  $\delta s$ 라 간주하여 이들에 관해서 풀면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= \frac{M_{\delta s}'(Z_{uu}' + Z_{\delta b}'\delta b) - Z_{\delta s}'(M_{uu}' + M_{\delta b}'\delta b)}{Z_{\delta s}'M_w' - Z_w'M_{\delta s}'} \\ \delta s &= \frac{M_w'(Z_{uu}' + Z_{\delta b}'\delta b) - Z_w'(M_{uu}' + M_{\delta b}'\delta b)}{Z_w'M_{\delta s}' - Z_{\delta s}'M_w'} \end{aligned} \quad (60)$$

식(60)에서  $\delta b$  값을  $-35^\circ$ 로부터  $5^\circ$  간격으로  $35^\circ$  까지 변화시킬 때 각각의  $\delta b$  값에 대응하는  $\alpha_0$  값과  $\delta s$  값을 구할 수 있으며, 모든 경우에  $\alpha_0$  값은 대략  $1^\circ \sim 5^\circ$  범위,  $\delta s$  값은 대략  $-30^\circ$  정도에서 수평 평형자세 유지가 가능함을 알 수 있었다.

### (3) 수직면에서의 중립운항 조건 검토

전 항에서는 UUV가 수직양각을 가지는 경우를 검토하였는데, 만약 수직양각을 가지지 아니하는 경우 즉, UUV가 수직면 내에서 상승하거나 하강하지 않고 똑바로 나아가기 위해서는 대응 승강타각이 얼마가 요구되는지를 검토해 본다. 이러한 상태를 중립운항(neutral level flight) 상태라 정의하며, 중립운항을 위한 대응타각  $\delta b$  과  $\delta s$  는 다음 식으로 계산된다.

$$\begin{aligned} \delta b &= \frac{Z_{\delta s}'M_{uu}' - Z_{uu}'M_{\delta s}'}{Z_{\delta b}'M_{\delta s}' - Z_{\delta s}'M_{\delta b}'} \\ \delta s &= \frac{Z_{uu}'M_{\delta b}' - Z_{\delta b}'M_{uu}'}{Z_{\delta b}'M_{\delta s}' - Z_{\delta s}'M_{\delta b}'} \end{aligned} \quad (61)$$

식(61)에 의해  $\delta b$ ,  $\delta s$  를 계산한 결과  $\delta b = -40.3^\circ$ ,  $\delta s = -28.3^\circ$  이었다. 단, 승강타각 관련 유체력미계수는 이론계산치를 사용하였으며  $Z_{uu}'$ 와  $M_{uu}'$  값은 실험치를 사용하였다. 따라서 선수, 선미 승강타각의 최대각을  $35^\circ$  라 가정할 때 본 연구에서 채택한 UUV는 수직면에서의 중립 운항이 불가능함을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 Manta형 UUV의 운동특성 규명과 관련하여 6자유도 운동 수학모델을 정립하였으며, 선형유체력미계수의 이론적 추정법을 확립하여 UUV의 동체와 부가물 또는 제어판의 설계에 활용하도록 하였다. 또한 UUV의 동안정성, 선회성 및 평형 잠항 조건 등 조종응답 특성을 검토하였다.

본 연구결과를 토대로 Manta형 UUV의 부가물 또는 제어판의 운동학적 최적 설계, 구속모형실험에 의한 수학모델의 보완 등에 관한 추가연구가 수행되어야 할 것으로 생각된다.

## 후 기

본 연구는 방위사업청/국방과학연구소에 의해 한국해양대학교에 설치된 수중운동체특화연구센터(UVRC)의 연구비 지원으로 수행되었음.

## 참 고 문 헌

- 김찬기, 1998, "물수체 모형시험 해석을 위한 운동방정식의 구조 선택 및 계수 식별 결함법," 대한조선학회 논문집, 제 35권, 제 2호, pp. 20-28.
- 손남선, 이기표, 이상무, 여동진, 2001, "수중

- 운동체의 충돌회피시스템에 관한 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 38권, 제 4호, pp. 23-29.
- 신용구, 임경식, 이승건, 2005, “수중함의 함미타 효율추정을 위한 수학적모델링에 관한 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 42권, 제 3호, pp. 190-196.
  - 윤근항, 이기표, 여동진, 2005, “수중운동체의 목표추적시스템에 적합한 유도론 선정에 대한 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 42권, 제 4호, pp. 299-306.
  - Abkowitz, Martin A., 1969, Stability and Motion Control of Ocean Vehicles, The MIT Press, Cambridge.
  - Feldman, J., 1979, DTNSRDC Revised Standard Submarine Equations of Motion, Report No. DTNSRDC/SPD-0393-09, Wash-ington, D.C.
  - Kuo, B.C., 1967, Automatic Control Systems, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J.
  - Lewis, Edward V., 1989, Principles of Naval Architecture, Vol. III, 2nd Revision, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Jersey City.
  - Matora, S., Koyama, T., Fujino, M., and Maeda, H., 1982, Dynamics of Ship and Marine Structures, Seisandou, Tokyo(in Japanese).
  - 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.
  - Tasai, F. and Takagi, M., 1969, “Theory and Calculation on Motion Response of Ships in Regular Waves,” Symposium on Seakeeping Qualities, The Society of Naval Architects of Japan, pp. 1-52.



< 손 경 호 >



< 이 승 건 >



< 하 승 필 >