

만타형 수중운동체의 사항시험에 관한 연구

이승건* · 손경호** · 이상의*** · 황성준*** · 서정호***

*부산대학교 조선해양공학과 교수, **한국해양대학교 해양시스템공학부 교수, *** 부산대학교 조선해양공학과 대학원

A Study on the Oblique Towing Test of the Manta Type UUV.

Seung-Keon Lee* · Kyung-Ho Sohn** · Sang-Eui Lee*** · Sung-Jun Hwang*** · Jung-Ho Seo***

* Professor, Department of Naval Architect and Ocean Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

** Professor, Department of Marine System Engineering, National Korea Maritime University, Pusan 606-791, Korea

*** Graduate school, Department of Naval Architect and Ocean Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

요 약 : 본 논문에서는 수중운동체의 운동수학모형 정립 및 최적제어 방안 연구를 위해, 수중운동체의 6자유도 운동 방정식을 유도하고, UUV 모형의 사항시험을 통해 6방향의 유체력을 구하였다.

핵심용어 : 수중운동체, 무차원유체력, 사항시험

Abstract : In this paper, 6-DOF motion equations of UUV (Unmanned Undersea Vehicles) are derived. Moreover, the hydrodynamic maneuvering derivatives are found from the oblique towing test of the 2m Manta type UUV model.

Key words : UUV, Hydrodynamic Derivatives, Oblique Towing Test

1. 서 론

지금까지의 수중운동체의 운동특성 분석 및 운항제어는, 설정된 항주 조건에 대한 해석과 제어를 위주로 이루어졌다. 그러나 다양한 운항조건 및 환경, 그리고 복잡한 시나리오에 의한 운항에 관한 연구개발을 위해서는 수중운동체의 저속 비선형 운동, 과도운동, 이중매질 천이운동 등의 운동특성을 분석 하고, 비선형제어, 강인제어, 최적제어 이론을 바탕으로 하는 자동 운항 및 운항 최적화에 대한 연구가 수행되어야 한다.

본 논문에서는, 그 첫 단계로써 수중운동체의 운동 특성을 파악하기 위하여, 모형시험을 통해 6방향의 유체력을 계측하였다.

2. 모형 및 사항시험 장비

2.1 Manta형 UUV의 제원

본 논문에서 채택한 Manta형 UUV(Unmanned Undersea Vehicle)의 형상은 Fig. 1과 같고, 실선의 주요 제원은 Table 1과 같다. 만타형 UUV는 모함인 잠수함의 동체 상부의 일부

로서 격납되어 있다가 필요시 잠수함으로부터 분리되어 주어진 임무 수행에 이용되는, 소형의 수중운동체이다.

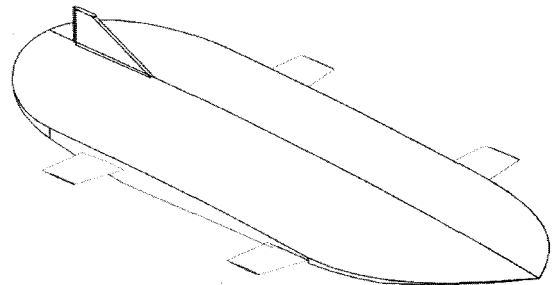


Fig. 1 Perspective view of Manta type UUV

본 연구에서는 Fig. 1과 Table 1에 제시된 만타형 수중운동체를 1/6의 축척으로 모델을 제작하였으며, 모형선에 사용된 재료는 알루미늄 6061으로써, 목형(木型, Wooden Pattern)을 만들어 사형주물(砂型鑄物, Sand Mold)로 1차 제작 후, 2차 자동 밀링하여 표면을 가공하였다. 표면은 수중용 역폭시로 밀칠(下塗, Under-Coating)한 후 4~5회 덧발라 완성하였다.

* 대표저자 : 이승건(중심회원), leesk@pusan.ac.kr 051)510-2441

** 중심회원, sohnkh@mail.hhu.ac.kr 051)410-4303

*** 정회원, euui2000@pusan.ac.kr 051)510-2755

*** 정회원, gyaru@pusan.ac.kr 051)510-2755

*** 정회원, hartmann@pusan.ac.kr 051)510-2755

Table 1 Principal dimensions of Manta type UUV

Item	Dimension	Remarks	
Fuselage	Length	12.0 m	
	Breadth	4.4 m	
	Height	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	root chord	0 m	
	tip chord	3.5 m	contains vertical rudder
	span	0.97 m	
Horizontal rudder (4개)	root chord	1.0 m	
	tip chord	0.8 m	NACA0008 section form
	span	1.0 m	
Vertical rudder	chord	0.5 m	
	span	0.6 m	

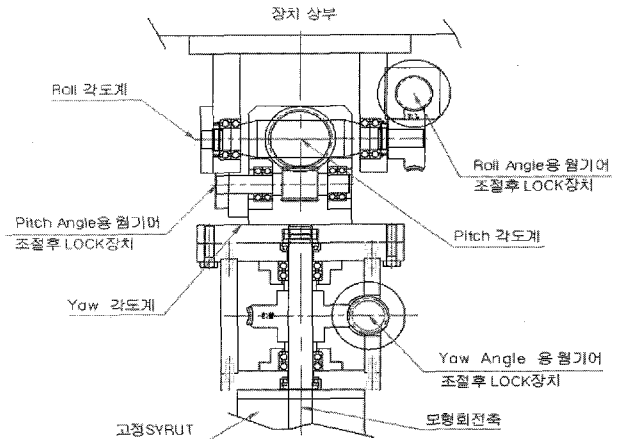


Fig. 3 The mechanism of the controller

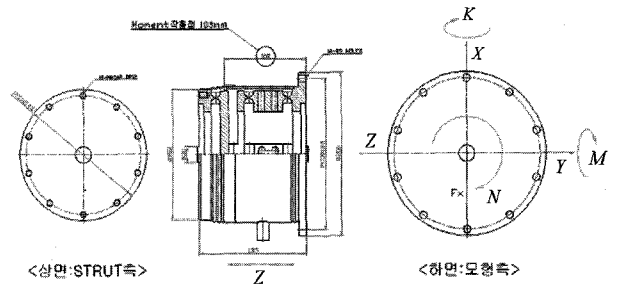


Fig. 4 6-component dynamometer

2.2 사항시험장비

Fig. 2는 사항시험 장치로서 본 연구를 위해 자체 제작되었다. Fig. 3은 사항시험 장치의 자세각 조정부의 구조를 상세히 나타내고 있으며, Fig. 4의 6분력계는 수밀형 Strain gage type이며, 모형선의 Midship으로부터 후방으로 0.1m 지점, 폭 방향 중심에 설치되며, Roll 및 Pitch 모멘트의 작용점은 바닥면에서부터 103mm 지점이며, Baseline으로부터 높이는 135mm이다. Fig. 5는 6분력계에 연결된, Dynamic DC 스트레인 앰프이다. 6분력계에서 출력되는 신호는 10 Hz 저역 통과 필터(Low pass filter)를 통과하여 A/D 변환을 거쳐 PC에 저장된다. Sampling 주파수는 100Hz 이다.

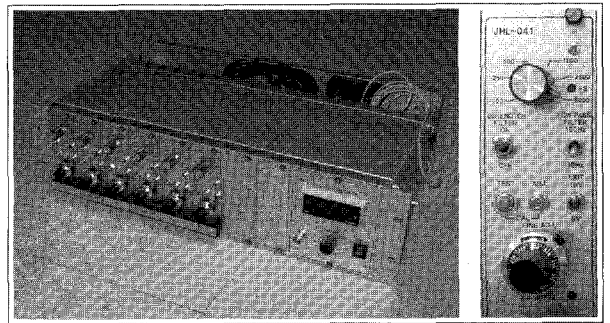


Fig. 5 Dynamic DC strain amplifier

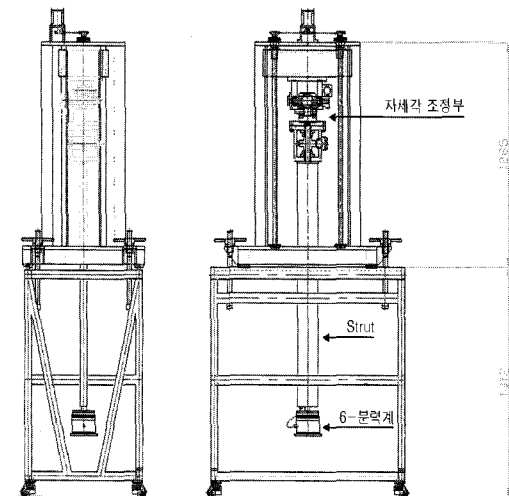


Fig. 2 Oblique model test equipment

3. 수중운동체의 모형 시험

3.1 UUV의 운동방정식

6-자유도 운동을 하는 운동체를 강체(Rigid-Body)로 간주하고, Newton의 제2법칙을 적용시켜 일반적인 6-자유도 강체 운동방정식을 얻는다. 운동체의 중심에 작용하는 힘과 모멘트를 F 와 G , 그리고 속도와 각속도를 V, w 라 하면 운동체의 운동 방정식은 다음과 같다.

$$m \frac{dV_c}{dt} = F \tag{1}$$

$$\frac{dh}{dt} = G \tag{2}$$

여기서 m 은 운동체의 질량(Mass), h 는 각운동량(Angular Moment)을 나타낸다.

운동체의 각운동량 h 와 운동체에 작용하는 유체력을 계산하기 위한 각종 변수들은 운동체에 고정된 동좌표계에서 표현하는 것이 편리하다. 그러므로 Fig. 6에서와 같이 직교좌표계 $X_B Y_B Z_B$ (Body-fixed reference Frame)를 도입하고, 그 원점을 운동체의 질량 중심(Center of Gravity)에 일치시켜 고정한다.

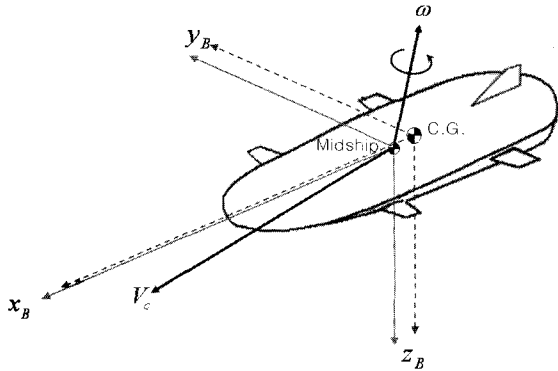


Fig. 6 Coordinate system

식 (1)과 (2)의 좌변에 표현된 미분은 관성계에 관한 벡터의 시간 변화율이다. 따라서, 시간 미분을 할 때 V_c 나 h 등이 동좌표계로 기술된 경우, 좌표축의 방향 역시 시간변화 함을 고려해야한다. 이 조건을 (1),(2)식에 적용하면 식(3),(4)과 같이 표현된다.

$$m \left(\frac{d\vec{V}_c}{dt} + \vec{\omega} \times \vec{V}_c \right) = \vec{F} \quad (3)$$

$$\frac{d\vec{h}}{dt} + \vec{\omega} \times \vec{h} = \vec{G} \quad (4)$$

일반적으로 선체중심(midship)과 질량중심(C.G.)은 일치하지 않으므로 동좌표계의 중심을 선체중심에 고정하고 ($x_G, z_G \neq 0$), 위식을 다시 각방향 성분으로 분해하면, 수중운동체의 6-자유도 방정식이 식(5),(6)과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} m[\dot{u} + qw - rv - x_G(q^2 + r^2) + z_G(pr + \dot{q})] &= X \\ m[\dot{v} + ru - pw - z_G(qr + \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] &= Y \\ m[\dot{w} + pv - qu - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp + \dot{q})] &= Z \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} + I_{yy})qr - m[z_G(\dot{v} + ru - pw) + x_G z_G(pq + \dot{r})] &= K \\ I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} + I_{zz})rp + m[z_G(\dot{u} + qw - rv) - x_G(\dot{w} + pv + qu) + x_G z_G(p^2 + r^2)] &= M \\ I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq + m[x_G(\dot{v} + ru - pw) + z_G x_G(rq - \dot{p})] &= N \end{aligned} \quad (6)$$

3.2 시험조건 및 방법

6분력계의 Calibration을 실시하여 Calibration Factor를 구하고, 사항 시험 장치 및 모형선을 예인전차에 설치하여 직진 시험을 시행하였다.

직진시험은 모형선의 자세각 ϕ, θ, ψ 를 모두 0° 로 하여, 예인 속도를 0.6m/s에서 1.4m/s까지, 0.2m/s 단위로 변화시키면서 각각의 6분력을 측정하여 사항시험을 위한 예인속도 U_0 를 결정하였다.

직진시험에서 결정한 예인속도 U_0 로 모형선을 예인하고, 모형선의 자세각을 변화시키면서 사항시험을 수행하여, 식(5)와 식(6)의 외력 X, Y, Z, K, M, N 을 측정하였다. 측정된 유체력을 무차원화하여 각 자유도별 유체력미계수들을 추정하였다. 아래의 Table 2 사항시험 조건을 나타내고 있다.

Table 2 Conditions of the model test

Parameters	
예인 속도(U_0)	1.0 m/sec
레이놀즈 수(R_n)	1.75×10^6
몰수 심도	UUV중심이 수면하 0.77m에 위치
자세각 변화	$\phi = 0^\circ \sim \pm 10^\circ (\Delta\phi = 5^\circ)$ $\theta = 0^\circ \sim \pm 10^\circ (\Delta\theta = 5^\circ)$ $\psi = 0^\circ \sim \pm 10^\circ (\Delta\psi = 5^\circ)$

4. 시험 결과 및 해석

4.1 직진 시험

사항 시험을 수행하기 위한 적절한 예인 속도 U_0 를 결정하기 위해 자세각을 변화하지 않은 채로 직진시험을 수행하였다. 모형선 예인 속도를 0.6m/s에서 1.4m/s까지, 0.2m/s 단위로 변화시키면서 각각의 6분력을 측정하였다.

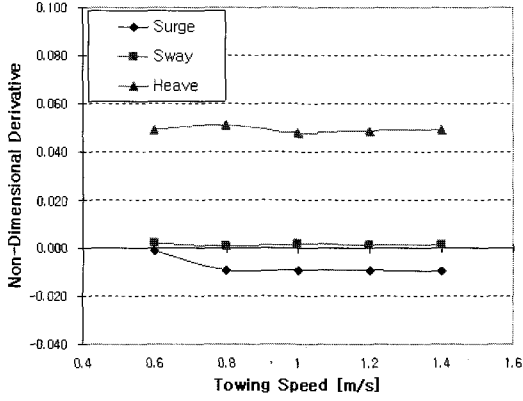
직진시험으로 구한 각 분력을 다음의 식으로 무차원화 하였다.

$$X' = X / \frac{1}{2} \rho L^2 U^2, Y' = Y / \frac{1}{2} \rho L^2 U^2, Z' = Z / \frac{1}{2} \rho L^2 U^2 \quad (7)$$

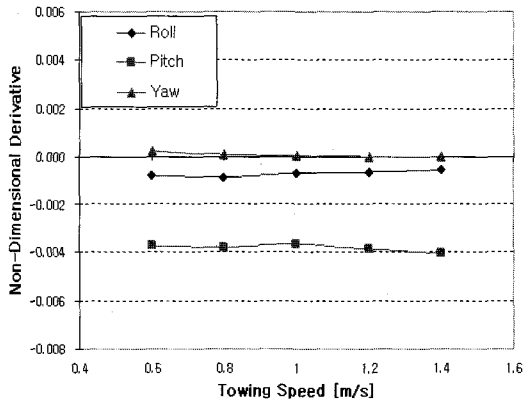
$$K' = K / \frac{1}{2} \rho L^3 U^2, M' = M / \frac{1}{2} \rho L^3 U^2, N' = N / \frac{1}{2} \rho L^3 U^2 \quad (8)$$

단, L 은 모형선의 길이, ρ 는 유체 밀도, U 는 예인속도.

Fig. 7은 식(7)과 (8)에 의해 속도별 무차원 유체력 계수를 나타내고 있다.



(a) Force



(b) Moment

Fig. 7 Towing test of UUV

4.2 사항 시험

직진시험을 통해 예인속도 U_0 를 1.0 m/s 로 정하고 사항시험을 수행하였다.

1) Case 1 ($\phi = 0^\circ$ Series)

Roll 각을 0° 로 고정하고, Pitch 각과 Yaw 각을 각각 -10° 에서 $+10^\circ$ 로 5° 씩 변화시키면서 모형을 예인하여 6분력을 측정하였다.

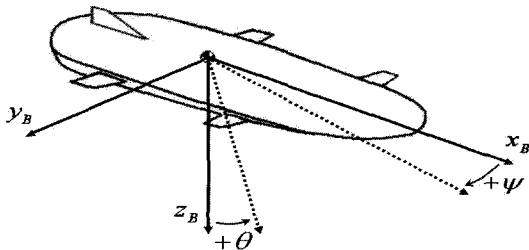


Fig. 8 The variation of the angle at $\phi = 0^\circ$ series

2) Case 2 ($\theta = 0^\circ$ Series)

Pitch 각을 0° 로 고정하고, Roll 각과 Yaw 각을 각각 -10° 에서 $+10^\circ$ 로 5° 씩 변화시키면서 모형을 예인하여 6분력을 측정하였다.

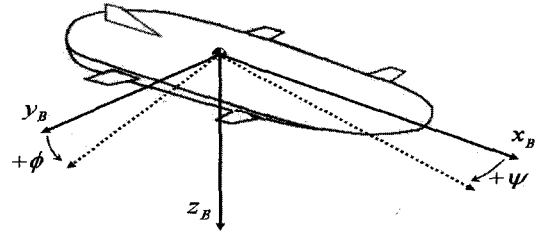


Fig. 9 The variation of the angle at $\theta = 0^\circ$ series

3) Case 3 ($\psi = 0^\circ$ Series)

Yaw 각을 0° 로 고정하고, Roll 각과 Pitch 각을 각각 -10° 에서 $+10^\circ$ 로 5° 씩 변화시키면서 모형을 예인하여 6분력을 측정하였다.

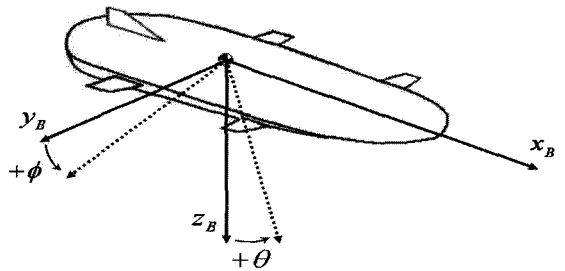


Fig. 10 The variation of the angle at $\psi = 0^\circ$ series.

4.3 무차원 유체력 계수 도출

사항시험을 통해 측정한 6분력을 식(7) 및 식(8)과 같이 무차원화하고, 무차원화한 속도성분 u', v', w' 에 대해 최소자승 방법으로 Curve Fitting을 하여 각 성분의 무차원 유체력계수를 추정하였다.

오일러 각에 의한 지구고정 좌표계와 물체 고정좌표계 사이의 속도성분 변환 식(Fossen, 1995)은 식(9)과 같다.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_\theta C_\psi & C_\theta S_\psi & -S_\theta \\ S_\theta S_\phi C_\psi - C_\theta S_\psi & S_\theta S_\phi S_\psi + C_\theta C_\psi & S_\theta C_\phi \\ C_\theta S_\phi C_\psi + S_\theta S_\psi & C_\theta S_\phi S_\psi - S_\theta C_\psi & C_\phi C_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ v_y \\ w_z \end{bmatrix} \quad (9)$$

이때, u, v, w 는 각각 선체고정 좌표계에서의 속도 성분이고, u_x, v_y, w_z 는 각각 지구고정 좌표계에서의 속도 성분이다. 또한 C_θ, S_θ 는 $\cos\theta, \sin\theta$ 를 의미한다.

실험조건에 의해 $u_x = U_0 = 1\text{m/s}$ 이고 $v_y = w_z = 0$ 이므로, 좌표변환된 속도성분은 식(10)과 같이 결정되며, 또한, 속도 성분의 무차원화는 식(11)과 같다.

$$\begin{aligned} u &= U_0 \cos\theta \cos\psi \\ v &= U_0 \sin\phi \sin\theta \cos\psi - U_0 \cos\phi \sin\psi \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} w &= U_0 \cos\phi \sin\theta \cos\psi + U_0 \sin\phi \sin\psi \\ u' &= u/U_0, v' = v/U_0, w' = w/U_0 \end{aligned} \quad (11)$$

4.4 사향시험 결과

1) Case 1 ($\phi = 0^\circ$ Series)

$$Y' = Y'_v v' + Y'_w w' + Y'_{uu} u'^2 + Y'_{uuv} u'^2 v' + Y'_{uov} u'^2 v' + Y'_{vvv} v'^2 w' + Y'_{vov} v'^2 w'$$

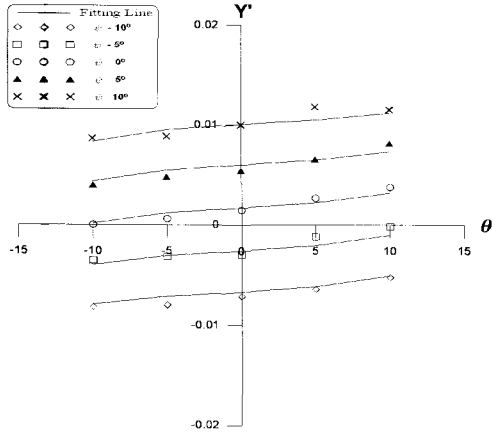


Fig. 11 Oblique Towing Test of UUV (Y Force)

$$N' = N'_v v' + N'_w w' + N'_{uv} u'v' + N'_{vw} v'w' + N'_{uw} u'w'$$

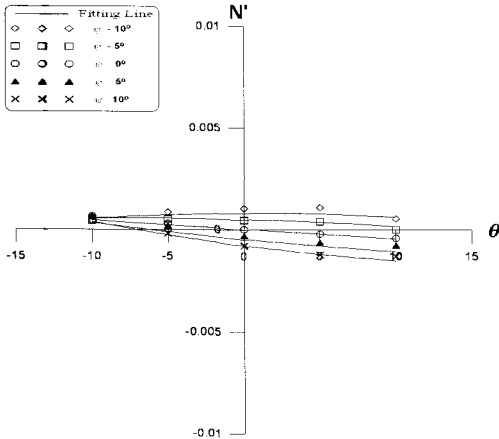


Fig. 12 Oblique Towing Test of UUV (N Moment)

2) Case 2 ($\theta = 0^\circ$ Series)

$$Y' = Y'_v v' + Y'_w w' + Y'_{uu} u'^2 + Y'_{uuv} u'^2 v' + Y'_{uov} u'^2 w' + Y'_{vvv} v'^2 w' + Y'_{vov} v'^2 w'$$

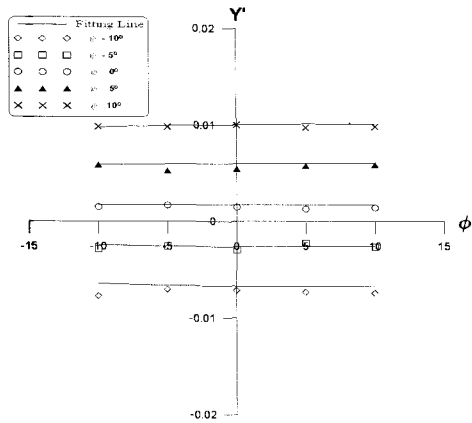


Fig. 13 Oblique Towing Test of UUV (Y Force)

$$N' = N'_v v' + N'_w w' + N'_{uv} u'v' + N'_{vw} v'w' + N'_{uw} u'w'$$

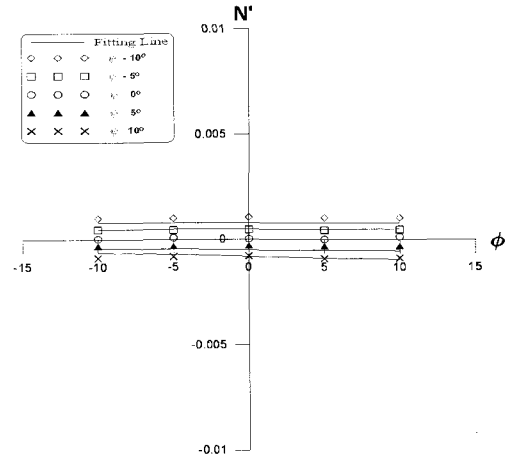


Fig. 14 Oblique Towing Test of UUV (N Moment)

3) Case 3 ($\psi = 0^\circ$ Series)

$$Y' = Y'_v v' + Y'_w w' + Y'_{uu} u'^2 + Y'_{uuv} u'^2 v' + Y'_{uov} u'^2 w' + Y'_{vvv} v'^2 w' + Y'_{vov} v'^2 w'$$

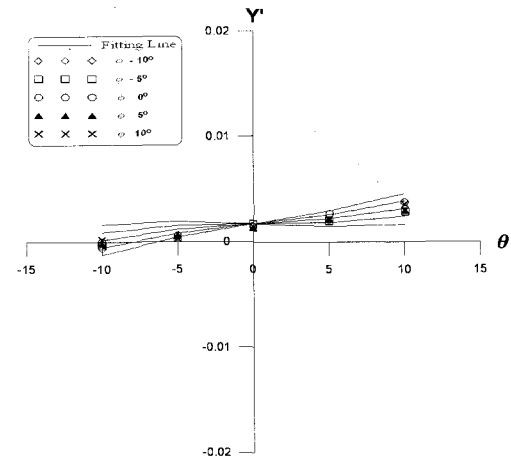


Fig. 15 Oblique Towing Test of UUV (Y Force)

$$N' = N'_v v' + N'_w w' + N'_{uv} u'v' + N'_{vw} v'w' + N'_{uw} u'w'$$

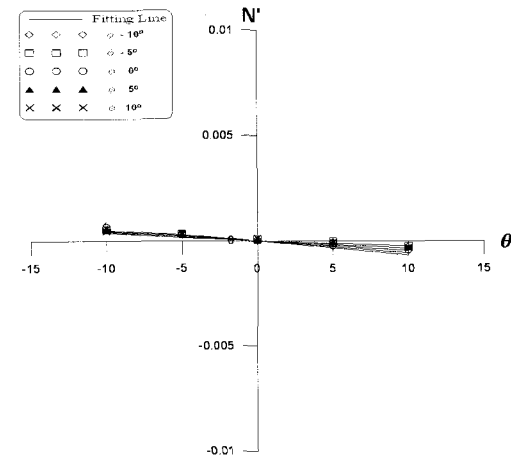


Fig. 16 Oblique Towing Test of UUV (N Moment)

5. 사항시험 결과 분석

Fig. 1과 Table 1 보인 UUV 모델의 사항시험을 통해 구해진 유체력 미계수는 Table 3 나타낸다.

그리고 본 연구에서 수행된 사항시험은 UUV 모형의 동체 중앙으로부터 0.1 m 후방에 6분력계를 설치하여 유체력을 측정하였다. 또한 횡요 및 종동요 모멘트의 작용점은 선저 Baseline으로부터 0.135m 높이에 위치한다.

Table 3 The hydrodynamic derivatives result of the oblique towing test

Surge		Sway		Heave	
X'_{vw}	-0.01558745	Y'_v	-0.25569756	Z'_u	0.05195799
X'_{uw}	0.10622219	Y'_w	-0.0085458	Z'_v	0.18706832
X'_{vu}	-0.00923463	Y'_{uu}	0.00152828	Z'_w	-0.55938459
X'_{vv}	-0.00751184	Y'_{uv}	0.21156224	Z'_{uv}	-0.20435160
X'_{ww}	0.11039679	Y'_{uw}	0.01953400	Z'_{vw}	0.12962159
		Y'_{vv}	-0.01962974		
		Y'_{vw}	0.30671499		
Roll		Pitch		Yaw	
K'_v	-0.05857004	M'_u	-0.00288206	N'_v	-0.08300116
K'_w	0.02861499	M'_v	-0.00080282	N'_w	-0.00634453
K'_{uv}	0.07278611	M'_w	0.11066101	N'_{uv}	0.08895570
K'_{uw}	-0.10868190			N'_{vw}	0.00378606
K'_{vw}	-0.02013904			N'_{ww}	0.01668234

6. 결 론

UUV 모델의 사항시험이 성공적으로 이루어 졌으며, 유체력 미계수로 변환된 실험결과는 앞으로의 운동시뮬레이션에 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

단, 모형시험 결과 얻어진 유체력을 Fitting 하는데 사용된 수학적모델은, 추후 좀 더 개선이 필요하다.

후 기

본 연구는, 국방부/국방과학연구소를 통한 수중운동체 특화 연구센터 지원금에 의한 연구임을 밝힌다.

참고 문헌

- [1] 이승건(1998), “선박운동·조종론”, 부산대학교출판부,
- [2] 加藤寛一郎, 大屋昭男, 昞澤研治(1997), “航空機 力學 入門”, 東京大學出版府
- [3] 小山健夫, 藤野正隆, 前田久明(1990), “船體와 海洋構造物의 運動學”, 淵鏡文化社
- [4] Thor I. Fossen(1995), “Guidance and Control of Ocean Vehicles”, John Wiley & Sons.

원고접수일 : 2005년 9월 8일

원고채택일 : 2005년 10월 28일