

Manta형 무인잠수정의 부가물 형상에 따른 동유체력 특성에 관한 연구

배준영* · 손경호†

* 한국해양대학교 대학원, † 한국해양대학교 조선해양시스템공학부 교수

A Study on Hydrodynamic Force Characteristics of Manta-type Unmanned Undersea Vehicle with the Parameter of Appendage Shape

Jun-Young Bae* · Kyoung-Ho Sohn†

* Korea Maritime University Graduate school, Busan 606-791, Korea

† Dept. of Naval Architecture and Ocean Systems Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

요 약 : Manta형 무인잠수정(MUUTV)을 대상으로 회류수조에서의 모형실험을 통해 동일한 동체 모형에 대해 형상이 서로 다른 부가물을 부착했을 때의 동유체력 특성을 실험적으로 검토하였으며, 동유체력 측정 결과를 이론계산치와 비교하였다. 아울러 이를 바탕으로 운동안정성을 검토하여 최적의 부가물 형상 결정의 이론적 근거를 확립하였다.

핵심용어 : Manta형 무인잠수정, 동유체력 특성, 운동안정성, 부가물 형상

Abstract : The influence of different appendage shape on the characteristics of hydrodynamic forces on Manta-type Unmanned Undersea Test Vehicle(MUUTV) was discussed experimentally. Fuselage only MUUTV model and two types of MUUTV model with different appendage geometries were considered as the subject of discussion. Oblique tow experiment was carried out in circulating water channel with three MUUTV models. A point of difference in hydrodynamic force characteristics among three models was indicated. Furthermore, the linear hydrodynamic derivatives obtained from model experiment were compared with theoretical calculation results from slender body theory, added mass theory and etc. Based on the hydrodynamic force characteristics, motion stability of two types of MUUTV model with different appendage geometries was compared each other. Through the above analysis, the more suitable shape of appendage geometry was made clear.

Key words : Manta-type Unmanned Undersea Vehicle, Hydrodynamic force characteristics, Motion stability, Appendage shape

1. 서 론

미래의 해군력 증강을 위한 수중유도무기체계 개발의 일환으로 다양한 설계개념을 도입한 무인잠수정(Unmanned Undersea Vehicle)이 제안되고 있다(최, 2008). 미해군 소속 NUWC(Naval Undersea Warfare Center)에서는 1990년대 중반부터 Manta Test Vehicle(이하 MTV라 함)이라 불리는 가오리 형상의 무인잠수정에 대한 연구를 수행하였고, 최근까지 약 30 회 이상의 해상시험을 수행하였다(Lisiewicz and French 2000; Sirmalis et al. 2001; U.S. Navy, 2004). MTV는 평상 시에는 모함인 잠수함 동체 상부의 일부로 장착되어 있다가 필요 시에만 잠수함으로부터 분리되어 자료회득 등 수중 작전 임무 수행에 투입된다. MTV의 설계개념을 기초로 하여 손 등(2006)은 Manta형 무인잠수정(Manta-type Unmanned Undersea Test Vehicle, 이하 MUUTV라 함)을 제안하였다.

본 연구에서는 손 등(2006)이 제안한 MUUTV에 대해 부가물 형상에 따른 동유체력 특성을 연구하였다. 구체적으로, 회류수조에서의 모형실험을 통해 동일한 동체 모형에 대해 형상이 서로 다른 부가물을 부착했을 때의 동유체력 특성을 실험적으로 검토하였으며, 동유체력 측정 결과를 이론계산치와 비교하였다. 아울러 이를 바탕으로 운동안정성을 검토하여 최적의 부가물 형상 결정의 이론적 근거를 확립하고자 한다.

2. MUUTV의 기하학적 형상 및 공시 모형

Fig. 1은 MUUTV의 설계개념을 보이고 있으며 모함(잠수함)을 회전타원체(prolate ellipsoid)라 가정하고 MUUTV가 모함에 장착되었을 때 MUUTV의 상면이 모함의 일부분을 이루도록 MUUTV 본체 형상을 결정하였다.

Fig. 2는 MUUTV 동체 형상과 부가물 형상을 보이고 있다.

* 대표저자 : 배준영(정회원), newthousands@bada.hhu.ac.kr 051)410-4991

† 교신저자 : 손경호(중신회원), sohnkh@hhu.ac.kr 051)410-4303

부가물 형상으로는는 두 종류를 채택하였으며 Initial appendages의 경우(이하 Initial model이라 함) 동체 측면 앞뒤 양현에 각각 수평판이 설치되어 있으며, 동체 후부의 상부와 하부에 각각 수직판이 설치되어 있다. Modified appendages의 경우(이하 Modified model이라 함) 동체 측면 후부에만 양현에 각각 큰 수평판이 설치되어 있으며, 동체 후부의 하부에는 수직

판이 없고 상부에만 수직판이 설치되어 있다. MUUTV의 운동 제어를 위한 제어판(control surface)은 수평판 또는 수직판의 일부로서 장착되어 있으나 본 연구 내용과는 상관이 없으므로 여기서는 언급하지 않는다. 그리고 추진장치의 경우도 마찬가지로 이유로 언급하지 않는다. Table 1은 두 모델의 주요목 자료를 나타내고 있다.

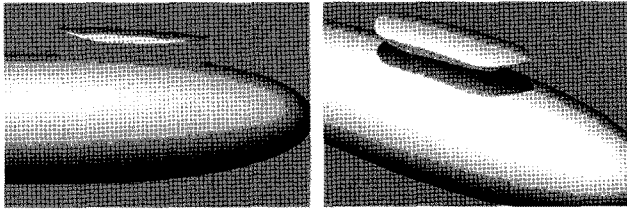


Fig. 1 Design concept of MUUTV

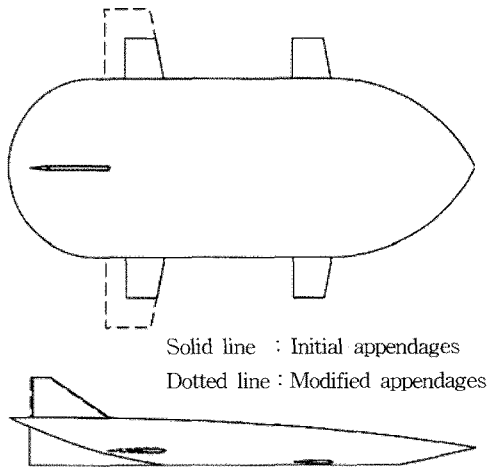


Fig. 2 Drawings of MUUTV

Table 1 Principal dimension of Initial and Modified models

Item	Initial model	Modified model
Fuselage		
length (L)	12.00 m	12.00 m
breadth (B)	4.40 m	4.40 m
height (H)	1.20 m	1.20 m
disp. vol.	31.88 m ³	31.88 m ³
centroid from nose	6.33 m	6.33 m
Fore horizontal plate (2)		
root chord	1.00 m	
tip chord	0.80 m	
span	1.00 m	
Aft horizontal plate (2)		
root chord	1.00 m	1.52 m
tip chord	0.80 m	1.15 m
span	1.00 m	1.73 m
Upper vertical plate		
root chord	2.00 m	2.00 m
tip chord	0.45 m	0.45 m
span	1.00 m	1.00 m
Lower vertical plate		
root chord	0.00 m	
tip chord	3.50 m	
span	0.97 m	

3. 동유체력 측정 결과 및 이론계산치와의 비교

3.1 좌표계

MUUTV를 강체라 가정하고 Fig. 3과 같이 MUUTV에 고정된 직각좌표계(물체고정좌표계)를 $O-xyz$ 로 취한다. 물체고정좌표계의 원점은 MUUTV의 동체 중앙횡단면에서 동체 높이의 중간위치에 취하고, MUUTV의 선수방향을 x , 정횡 우현방향을 y , 선지방향을 z 축의 양(+)의 방향으로 정의한다. 그리고 사용된 기호들도 함께 나타낸다. 참고로, α 는 수직 사향각, β 는 수평 사향각을 나타낸다.

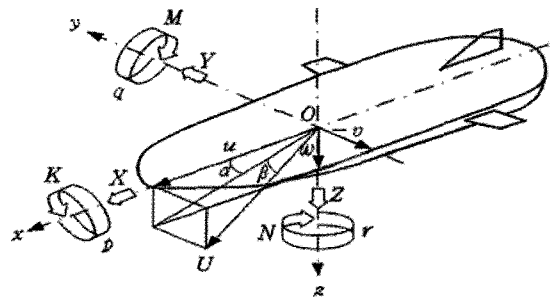


Fig. 3 Coordinate system and notation

3.2 실험장치

MUUTV에 작용하는 동유체력을 측정하기 위해서는 구속모형실험을 수행하여야 한다. 구속모형실험에는 사향시험(oblique tow test)과 PMM(Planar Motion Mechanism)시험 및 RA(Rotating Arm)시험 등이 있다. 본 연구에서는 회류수조에서 사향시험만을 수행하였으며 횡방향속도 v 와 수직방향속도 w 와 관련된 동유체력을 측정하였다. 수평회전각속도 r 과 수직회전각속도 q 와 관련된 동유체력은 이론계산법에 의해 추정하기로 한다. 회류수조에서 모형실험을 수행하기 위해 Fig. 2와 Table 1에 보인 MUUTV를 1/10로 축소한 모형을 제작하였다. 실험이 수행된 회류수조는 길이 12.5 m, 폭 2.2 m, 높이 5.2 m인 2 임펠러 방식의 수직순환형으로서, 관측부는 길이 5 m, 폭 1.8 m, 수심 0.9 m이다. Fig. 4는 관측부 중앙위치에서 측정된 수직방향 유속분포도와 수평방향 유속분포도(단, 수심 0.45 m 위치)를 나타내고 있다. 전반적으로 유속분포의 균일도는 양호한 편이라 생각된다. Fig. 5는 수평 사향시험을 위한 실험장치를 보이고 있다. 수직 사향시험의 경우에는 모형선을 90° 회전시켜서 모형선의 측면부를 실험장치의 strut과 연결하면 된다. Fig. 5에서 모형은 회류수조 깊이의 중간 위치에

설치되어 실험 시 자유표면의 영향이 최소화 되도록 하였다. 그리고 3 분력계의 정격용량은, 힘은 5 kgf 이고 모멘트는 1 kgf · m 이다. 수평 사향시험 시의 평균유속은 0.80 m/s (Reynolds수 : 0.905×10^6) 이었고, 수직 사향시험의 경우 3 분력계의 정격용량의 한계로 인하여 유속을 0.33 m/s (Reynolds 수 : 0.37×10^6) 로 낮추어 실험을 수행하였다.

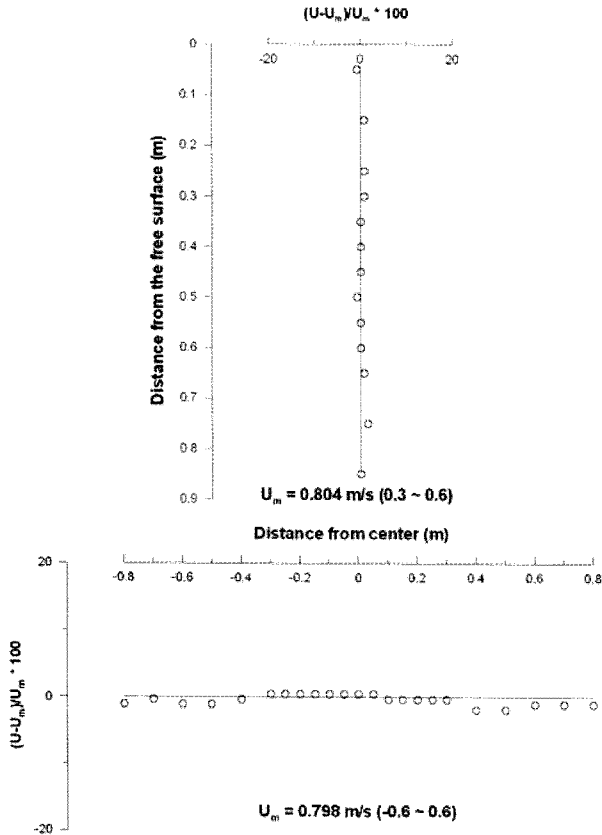


Fig. 4 Velocity distribution at working section of circulating water channel (U_m : mean velocity)

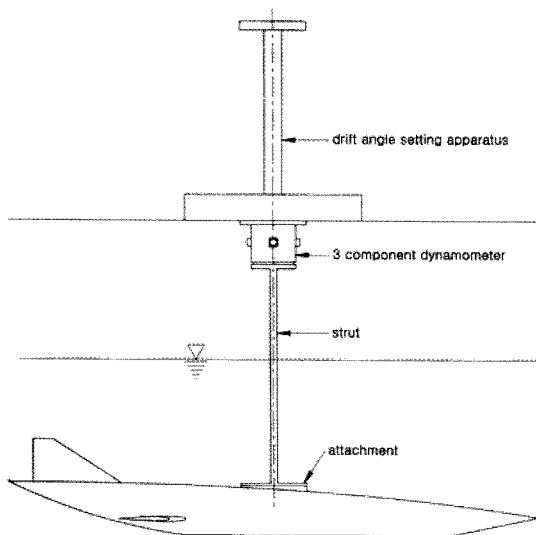


Fig. 5 Experimental apparatus for oblique tow test (Modified model)

3.3 동유체력 측정 결과

Fig. 6과 Fig. 7은 수평 사향시험 결과(단, $u' = \cos \beta$, $v' = -\sin \beta$)와 커브핏팅 결과를, Fig. 8과 Fig. 9는 수직 사향 시험 결과(단, $u' = \cos \alpha$, $w' = \sin \alpha$)와 커브핏팅 결과를 보이고 있다. 커브핏팅은 최소자승법을 적용하여 배 등(2009)이 제안한 수학모델로부터 구하였고, MUUTV의 동체 상하 비대칭 형상에 기인하는 양력성분 유체력은 배제하였다. 실험은 동체 단독모델, Initial model, Modified model 세 종류에 대해 수행되었다. 여기서 힘은 $0.5\rho L^2 U^2$ 으로, 모멘트는 $0.5\rho L^3 U^2$ 으로 무차원화 하였다. 단, ρ 는 유체의 밀도, U 는 합속도이다. Fig. 6과 Fig. 7의 수평 사향시험 결과로부터 다음 사항을

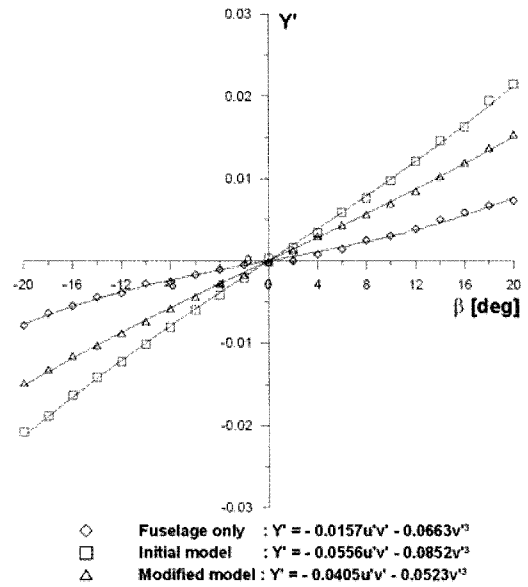


Fig. 6 Non-dimensional sway forces and least square fitting lines

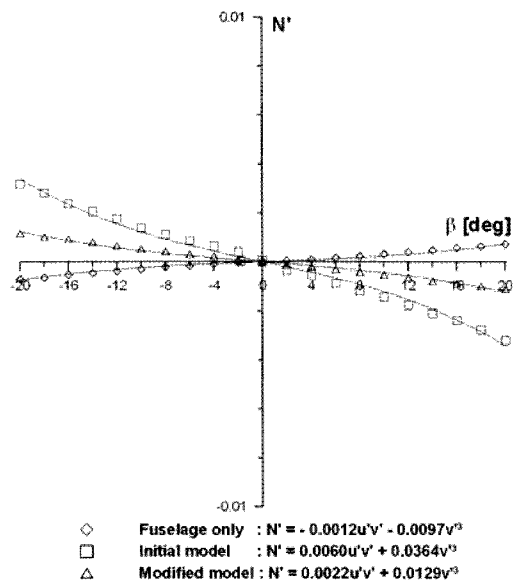


Fig. 7 Non-dimensional yaw moments and least square fitting lines

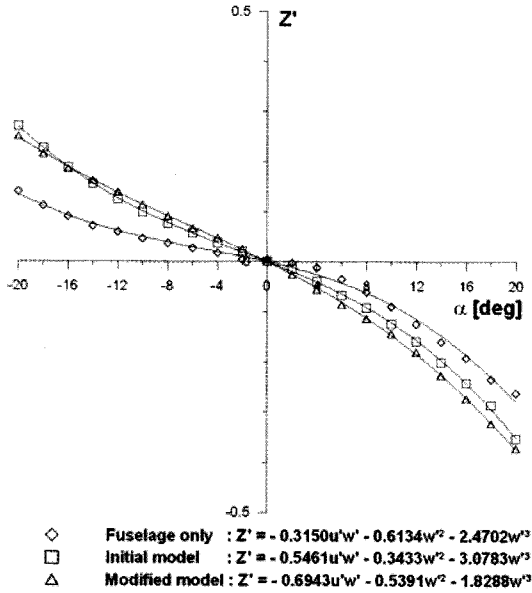


Fig. 8 Non-dimensional heave forces and least square fitting lines

알 수 있다. 일반적으로 sway damping lever (N_v'/Y_v') 값은 양(+)의 부호를 갖는 것이 바람직하다. 즉, 힘의 작용점이 동체 중앙부 앞쪽에 있는 것이 바람직하네, MUUTV의 경우에는 동체 단독모델의 실험 결과에서는 이러한 경향을 보이고 있으나 Initial model과 Modified model에서는 후반부의 큰 측면적으로 인해 sway damping lever가 음(-)의 부호 즉, 힘의 작용점이 동체 중앙부 뒤쪽에 있다는 것을 알 수 있다. 이는 수평운동 시에 안정화 경향이 너무 강해서 사향각 β 를 감소시키려는 효과로 작용하여 조종운동을 방해하게 된다. 이러한 경향은 Initial model이 Modified model 보다 더욱 강하게 나타나고 있음을

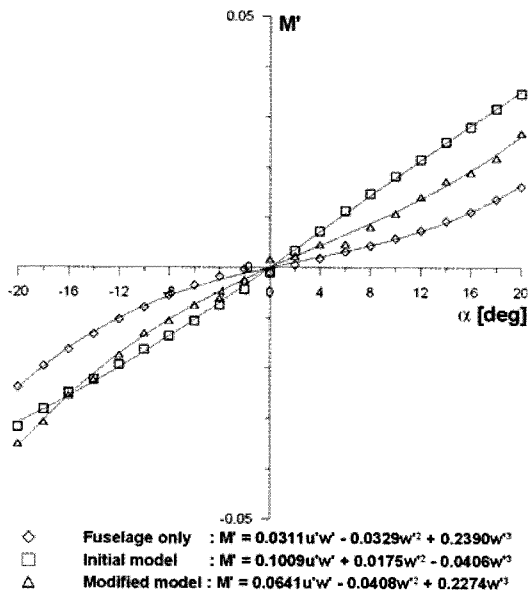


Fig. 9 Non-dimensional pitch moments and least square fitting lines

음을 알 수 있다. Fig. 8과 Fig. 9의 수직 사향시험 결과로부터는 다음 사항을 알 수 있다. heave damping lever ($M_w'/(-Z_w')$) 값이 양(+)이므로 힘의 작용점이 동체 중앙부 앞쪽에 있다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 blunt 형상의 경우 운동안정성이 불안정한 경향을 보이는데 MUUTV의 경우 Initial model이 Modified model 보다 운동 불안정성 경향에 더욱 크게 기여하고 있음을 알 수 있다. 즉, Initial model의 heave damping lever 값이 Modified model에서의 값보다 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

한편, MUUTV의 운동안정성은 속도 v 와 w 이외에 회전각 속도 r 과 q 와도 관계가 있으므로 종합적인 운동 안정성 검토를 제4장에서 언급하기로 한다.

3.4 동유체력의 이론계산치와의 비교

손 등(2006)은 MUUTV의 선형 유체력미계수의 이론적 추정법에 관해 제안한 바 있으며, 선형 감쇠유체력미계수는 MUUTV 동체와 부가물에 작용하는 각각의 감쇠유체력미계수를 구해 이들을 합산하여 구하였다. 동체에 작용하는 감쇠유체력은 Newman(1978)의 세장체이론(slender body theory)과 부가질량이론(added mass theory) 및 Jones의 소중형비 양력면 이론을 이용하였다. 그리고 부가물에 작용하는 감쇠유체력은 평판의 양력계수에 관한 Whicker/Fehner(1958)식을 이용하였다. 구체적으로 동체에 작용하는 선형 유체력미계수는 다음 식에 의해 구한다.

$$\begin{aligned}
 (Y_v')_h &= -\frac{\pi}{2} \left(\frac{H}{L}\right) k_0 \lambda_0 \\
 (Y_r')_h &= x_0'(Y_v')_h - (m_x')_h \\
 (N_v')_h &= x_0'(Y_v')_h - (m_y')_h + (m_x')_h \\
 (N_r')_h &= (x_0')^2(Y_v')_h - (m_y')_h x_y' \\
 (Z_w')_h &= -\frac{\pi}{2} \left(\frac{B}{L}\right) k_1 \lambda_1 \\
 (Z_q')_h &= -x_1'(Z_w')_h + (m_x')_h \\
 (M_w')_h &= -x_1'(Z_w')_h + (m_z')_h - (m_x')_h \\
 (M_q')_h &= (x_1')^2(Z_w')_h - (m_z')_h x_z'
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 Y_v' , Y_r' 등은 $Y_v' = \partial Y'/\partial v'$, $Y_r' = \partial Y'/\partial r'$ (단, $v' = v/U$, $r' = r(L/U)$) 등과 같이 정의되는 선형 유체력미계수로서 예를 들면 Y_v' 의 경우 Fig. 6의 커브피팅 수학모델에서 $u'v'$ 의 계수에 해당된다. 그리고 $(Y_v')_h$ 에서와 같이 아래 첨자 h 는 동체를 의미한다. m_x' , m_y' 는 각각 동체 종방향과 횡방향 부가질량계수를, x_y' , x_z' 는 각각 m_y' 의 중심과 m_z' 의 중심의 x 좌표의 무차원치를, k_0 , k_1 은 각각 동체 측면적비와 평면적비를 나타낸다. λ_0 , λ_1 은 각각 동체 측면형상과 평면형상의 유효중형비를, x_0 , x_1 은 각각 수평운동과 수직운동 시의 effective trailing edge 즉, 박리점(separation point)의

x 좌표의 무차원치를 나타낸다. 일반적으로 실험에 의존하지 않고 x_0, x_1 의 위치를 정확하게 추정하는 방법은 알려져 있지 않다. Johnson(1951)은 회전타원체에 대한 실험 결과 박리점의 위치가 동체 중앙으로부터 뒤쪽으로 $(0.2 \sim 0.3)L$ 만큼 떨어진 곳에 있다는 것을 밝혔다. 본 연구에서도 MUUTV 동체만에 작용하는 동유체력 추정 시에는 Johnson(1951)의 실험 결과를 이용한다. 그러나 부가물이 설치된 경우에는 수평운동에서는 상부 수직판의 전단부 위치를 박리점으로 가정하며, 수직운동에서는 수평판의 위치와 크기를 고려하여 박리점 위치를 결정한다. 구체적으로, 동체 단독모델에서는 $x_0' = -0.3, x_1' = -0.2$, Initial model에서는 $x_0' = -0.283, x_1 = 0.108$, Modified model에서는 $x_0' = -0.288, x_1' = 0.0$ 으로 취하였다. 그리고 부가물에 작용하는 유체력미계수는 다음 식에 의해 구한다. 예를 들면 수직판의 경우

$$(Y_v')_{fi} = - \left(\frac{A_{fi}}{L^2} \right) \left(\frac{\partial C_L}{\partial \beta} \right)_{fi} \quad (2)$$

여기서 아래 첨자 fi 는 i 번째 수직판을 의미하며, A_{fi} 는 i 번째 수직판의 면적, C_L 은 양력계수를 나타낸다. 수평판의 경우에도 식(2)와 마찬가지로 계산된다. 그리고 양력계수의 경사 $(\partial C_L / \partial \beta)_{fi}$ 는 Whicker/Fehlner(1958) 식에 의해 구한다.

식(1), (2)를 합산함으로써 MUUTV에 작용하는 유체력미계수를 구할 수 있으며, 예를 들면 Y_v', N_v' 의 경우 다음과 같이 계산된다.

Table 2 Theoretical calculation results of linear hydrodynamic derivatives and comparison of some of them with model experiments

Derivatives	Fuselage only		Initial model		Modified model	
	cal.	exp.	cal.	exp.	cal.	exp.
Y_v'	-0.0101	-0.0157	-0.0527	-0.0556	-0.0371	-0.0405
N_v'	-0.0094	-0.0012	0.0058	0.0060	0.0002	0.0022
Z_v'	-0.2112	-0.3150	-0.4879	-0.5461	-0.5147	-0.6943
M_w'	0.0324	0.0311	0.1181	0.1009	0.0528	0.0641
Y_r'	0.0012		0.0164		0.0107	
N_r'	-0.0004		-0.0060		-0.0039	
Z_r'	-0.0404		0.0453		-0.0201	
M_q'	-0.0061		-0.0048		-0.0029	

$$\begin{aligned} Y_v' &= (Y_v')_h + \sum_i (Y_v')_{fi} \\ N_v' &= (N_v')_h + \sum_i (Y_v')_{fi} \cdot x_{fi}' \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 x_{fi}' 는 i 번째 수직판의 중심의 x 좌표의 무차원치를 의미한다. 그의 선형유체력미계수도 식(3)과 유사한 형태로 표현된다(손 등 2006).

본 연구에서 모형실험 대상으로 한 3 종류의 모델에 대해 각각 선형 유체력미계수를 이론 계산한 결과를 Table 2에 정리하였다. 아울러 실험결과도 함께 비교하였다. Figs. 6~9에 보인 실험결과로부터 얻은 선형 유체력미계수의 값이 이론계산치와 크게 어긋나지 아니함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 직접 실험을 수행하지 못한 회전각속도(r, q) 관련 유체력미계수의 값도 이론계산에 의해 어느 정도 추정 가능함을 알 수 있다.

4. 운동안정성 검토

배 등(2007)은 MUUTV의 운동안정성 향상을 위한 부가물의 설계 변경 기법에 관한 연구를 수행하였다. 배 등(2007)의 검토 기법에 따라서 본 연구에서 채택한 Initial model과 Modified model에 대해 각각 운동안정성을 비교 검토한다. 잠수정의 경우 수평운동안정성은 직선운동안정성(straight-line stability)을 의미하며 수직운동안정성은 방향안정성(directional stability)을 의미한다. 즉, 두 운동의 특성방정식이 서로 상이하며 수직운동이 더욱 복잡하다. 먼저 수평운동 안정의 조건은 다음과 같다.

$$0 < G_h = 1 - \frac{l_v'}{l_r'} < 1 \quad (4)$$

여기서 G_h 는 수평운동안정성지수이다. 그리고 l_v' 와 l_r' 는 각각 sway damping lever와 yaw damping lever의 무차원치로서 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} l_v' &= N_v' / Y_v' \\ l_r' &= (N_r' - m x_G') / (Y_r' - m') \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 m' 는 질량계수(질량을 $0.5\rho L^3$ 으로 무차원화한 값), x_G' 는 무게중심의 x 좌표의 무차원치이다. Table 2의 유체력미계수(이론계산치)를 이용하여 G_h 를 계산한 결과 Initial model의 경우 1.46, Modified model의 경우 1.04이다. 두 종류의 모델 모두 G_h 값이 1 이상으로서 운동안정성이 바람직하지는 않다. 즉, G_h 값이 1 이상이면 운동의 안정화 경향이 너무 강해서 조종운동이 제약받게 된다. 이러한 현상은 3.3절에서 언급한 동유체력 특성과도 일치함을 알 수 있다. 그리고 두 모델 중 Modified model은 Initial model보다 운동학적 견지에서 양호함을 보이고 있다.

다음으로 수직운동안정성은 보다 복잡한 형태로 주어지는데 안정의 조건은 다음과 같다.

$$G_v = \frac{a_1 a_2}{a_0 a_3} - 1 > 0 \quad (6)$$

여기서 G_v 는 수직운동안정성지수이다. 그리고 a_0, a_1, a_2, a_3 는 특성방정식의 계수들로서 유체력미계수로써 구성된다(배 등 2007). a_2 와 a_3 는 MUUTV의 속도의 함수로써 표시되며, 따라서 G_v 도 속도의 함수로써 주어진다. Table 2의 유체력미계수

(이론계산치)와 손 등(2006)이 제안한 부가질량계산법에 따라 G_v 를 계산한 결과 Initial model의 경우 -4.80, Modified model의 경우 0.50이다. 단, 이때 MUUTV의 실물(full scale) 속도를 2 m/s (3.9 kt)라 가정하였고, 부심이 무게중심 위쪽 0.2 m 높이에 위치(즉, 안정한 유체정역학적 모멘트를 가짐)한다고 가정하였다. Initial model은 불안정 경향을 보이는 반면 Modified model은 안정화 경향을 보이므로 운동안정성 견지에서 Modified model이 더 바람직함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 Manta형 무인잠수정(MUUTV)의 동체 단독 모델, Initial model 및 Modified model 세 종류에 대해 동유체력 특성을 회류수조 실험을 통해 검토하였다. 아울러 선형 유체력미계수의 이론계산 기법을 적용하여 실험결과와의 비교를 통해 이론계산 기법의 유용성을 확인하였다. 또한 유체력미계수의 이론계산치를 이용하여 Initial model과 Modified model의 운동안정성을 검토한 결과 Modified model이 수평운동과 수직운동 모두에서 운동안정성 견지에서 보다 양호한 모델임을 알 수 있었다.

후 기

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

참 고 문 헌

- [1] 배준영, 손경호, 권형기, 이승건(2007), "Manta형 무인잠수정의 동안정성 향상을 위한 부가물의 설계 변경에 관한 연구", 대한조선학회 논문집, 제 44권, 제 3호, pp. 323-331.
- [2] 배준영, 손경호(2009), "Manta형 무인잠수정의 조종운동 특성에 관한 연구", 대한조선학회 논문집, 제 46권, 제 2호, pp. 113-124.
- [3] 손경호, 이승건, 하승필(2006), "Manta형 무인잠수정의 6자유도 운동 수학모델 및 조종응답 특성", 대한조선학회 논문집, 제 43권, 제 4호, pp. 399-413.
- [4] 최중락(2008), "무인잠수정(UUV) 개발추세 및 핵심기술 분석", 국방기술플러스, Vol. 65, 국방과학연구소.
- [5] Johnson, J.L.(1951), "The Static Stability Derivatives of a Series of Related Bodies of Revolution", DTMB Report C-383.
- [6] Lisiewicz, J.S. and French, D.W.(2000), "Manta Test Vehicle At-Sea Test Results and Technology Demonstration Plans", Proceedings, Undersea Defense Technology Conference, Europe.

- [7] Sirmalis, J.E.(2001), "Pursuing the MANTA Vision : Recent At-Sea Technology Demonstration Results", Proceedings, Undersea Defense Technology Conference, Hawaii.
- [8] U.S. Navy(2004), "The Navy Unmanned Undersea Vehicle(UUV) Master Plan".
- [9] Whicker, L.F. and Fehlner, L.F.(1958), "Free Stream Characteristics of a Family of Low Aspect Ratio Control Surfaces", DTMB Report 933.

원고접수일 : 2009년 5월 7일

심사완료일 : 2009년 6월 24일

원고채택일 : 2009년 6월 30일