

VPMM 시험을 통한 선수부에 프로펠러를 갖는 수중운동체의 조종성능 추정

신명섭^{1*} · 김동휘^{1**} · 김아진^{***} · 황중현* · 백형민** · 김성재** · 박상준** · 최영명**** · 박홍래***** · † 김은수

*LIG nex1 연구원, **부산대학교 조선·해양공학과 대학원생, ***부산대학교 조선·해양공학과 박사후 연구원,
****부산대학교 조선·해양공학과 조교수, *****계명대학교 기계공학과 조교수, 1. 공동-1저자, † 부산대학교 조선해양공학과 부교수

Estimation of Maneuverability of Underwater Vehicles with Ahead Propeller by the Vertical Planar Motion Mechanism Test

Myung-Sub Shin^{1*} · Dong-Hwi Kim^{1**} · Jong-Hyon Hwang* · Yagin Kim^{***} · Hyung-Min Baek**
· Sung-Jae Kim** · Sang-Jun Park** · Young-Myung Choi^{****} · Hongrae Park^{*****} · † Eun-Soo Kim

*Research engineer, LIG Nex1 Co., Ltd, Korea,

**Graduate Student, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Korea

***Postdoctoral Researcher, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Korea

****Assistant Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Korea

*****Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Keimyung University, Daegu 42601, Korea

1. Co-first authors

† Associate Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Korea

요 약 : 본 연구에서는 선수부에 프로펠러를 갖는 수중운동체의 연직면 조종성능을 추정하기 위해 저항시험, 연직면 사향시험, VPMM 시험을 부산대학교 예인수조에서 수행하였다. 연직면 사향시험은 대각도에서 발생하는 횡교차력 성분을 고려하기 위해 -40도에서 40도 범위 내에서 수행하였다. 프로펠러의 회전 상태는 특정 rpm으로 회전하는 경우와 예인속도에 맞춰 자연스럽게 프로펠러가 회전하는 경우로 나눠 시험을 수행하였다. 구속모형 시험을 통해 수중운동체의 연직면 조종 유체력 미계수를 추정하였으며 최종적으로 동유체력 미계수를 기반으로 연직면 동적 안정성지수를 산정하고 프로펠러 회전 상태가 동적 안정성에 미치는 영향을 분석하였다. 본 시험 결과는 전방에 프로펠러를 갖는 수중운동체의 조종시험 참고자료로서 활용될 것으로 기대된다.

핵심용어 : 수중운동체, 동유체력 미계수, VPMM 시험, 전방 프로펠러, 연직면 동적 안정성 지수

Abstract : In this study, the resistance test, the vertical static angle of the attack test and VPMM test will be conducted to estimate the maneuverability of underwater vehicles with ahead propeller. The vertical static test will be conducted within the range of -40deg to 40deg, to investigate the cross-flow drag at high incidence angles. The tests will be conducted by dividing the propeller rotation into a case in which the propeller rotates at a specific rpm, and a case in which the propeller rotates naturally, according to the towing speed. Hydrodynamic coefficients of vertical direction will be estimated by the captive model tests. Additionally, the vertical dynamic stability index based on estimated hydrodynamic coefficients will be calculated and the impact of the propeller revolution state on the index will be investigated. The results are expected to be used as reference test data for underwater vehicles with ahead propeller.

Key words : underwater vehicle, hydrodynamic coefficient, VPMM test, ahead propeller, vertical dynamic stability index

1. 서 론

최근 해저 자원 개발 또는 생산 활동과 관련한 수중작업의 폭발적인 수요 증가를 비롯하여 수중 유도무기체계 개발의 일부로서 다양한 형태의 수중운동체 기술이 개발되고 있다. 수중운동체의 설계 시에는 저항, 자향, 조종성능 등의 유체역학적인 성능의 정도 높은 추정이 요구된다. 이 중 조종성능을 평

가하는 방법으로서 가장 정확한 방법은 실험적 시험을 수행하는 것이나 시간적, 경제적 소요 비용이 막대하므로 보통 수조 모형시험 및 전산유체해석을 통하여 동유체력 미계수를 도출하고 수중운동체의 운동방정식을 수립하는 과정을 거친다. 수중운동체의 동유체력 모델의 다양한 제안은 20세기 중반부터 시작되었다. Gertler and Hagen(1967)은 잠수함의 가장 일반적인 조종특성을 모사할 수 있는 6자유도 운동방정식을

† Corresponding author : 정희원, bblwith@pusan.ac.kr 051)510-2345

1* myungsub.shin@lignex1.com 031)8026-4867

1** 정희원, ehdgn12196@pusan.ac.kr 051)510-2345

Taylor 급수 전개를 통한 다항식 모델로서 제안하였으며, Feldman(1979)은 급격기동을 고려하여 Gertler 모형을 기반으로 횡교차항력과 세일로부터 유기되는 보오텍스의 영향을 추가한 모델을 제안하였다. Healey and Lienard(1993)는 저속 조종하는 사각단면 대형 AUV의 동유체력 모델을 제안하였으며, Watt(2007)는 수중체의 받음각을 수평면, 수직면으로 구분하지 않는 영각을 정의하여 새롭게 동유체력 모델을 제안한 바 있다. 동유체력 모델을 구성하는 동유체력 미계수는 전통적으로 수조모형시험을 통하여 도출된다. 국내에서도 많은 연구자들이 다양한 수조모형시험을 통하여 무인잠수정을 비롯한 수중운동체의 동유체력 미계수를 도출한 선례가 있다. Rhee et al.(2000), Seol(2005), Jung et al.(2014), Park et al.(2020)은 평면운동장치인 PMM(Planar Motion Mechanism)을 이용하여 잠수함 및 수중운동체의 동유체력 미계수를 추정하였다. RA(Rotating Arm) 시험을 이용한 연구로서는 Jeong et al.(2016)은 잠수함의 유체력 미계수를 추정하였으며 Han et al.(2017)은 잠수함의 세일 위치 및 제어관 형태에 따라 동유체력 미계수를 도출하고 동적 안정성을 분석하였다. Kim et al.(2012)은 CPMC(Computerized Planar Motion Carriage)를 활용하여 수중운동체의 유체력 미계수를 도출하였다. Rhee et al.(2000)은 원추형 시험 장비를 활용하여 횡동요와 연성된 유체력 미계수를 추정하였으며, Park et al.(2016)은 원추형 시험의 수행방법과 해석방법에 대해 자세히 서술하고 수중운동체의 횡동요 운동 특성을 관련 유체력 미계수 도출을 통하여 확인하였다. Park et al.(2016)은 정적영각-승강타 시험을 통해 별도의 고정타를 갖는 수중운동체의 받음각과 승강타 간의 상호작용이 제어력에 미치는 영향을 분석하였다. 이와 같이 동유체력 모델은 설계하고자 하는 수중운동체의 운용개념 및 목적과 물리적 특성을 고려하여 다양하게 정립될 수 있으며, 그에 따라 다양한 시험방법이 존재한다.

본 연구에서는 수조모형시험 중 VPMM 시험을 통하여 수중운동체의 수직면과 관련한 동유체력 미계수를 추정하였다. 대상 선형은 일반적인 수중운동체의 형태와는 다르게 전방에 추진기가 위치하며 모든 시험은 프로펠러가 부착되어 회전하는 상태로 수행되었다. 프로펠러 회전 속도는 두 가지로 나누어 특정 rpm인 500rpm으로 프로펠러가 회전하는 경우와 예인 속도에 맞춰 자연스럽게 프로펠러가 회전하는 경우인 'windmill 상태'에 대해 시험을 수행하였다. 최종적으로 두가지 프로펠러 운용 상황에서 추정된 동유체력 미계수를 도출하였다. 또한 본 수중운동체의 연직면 동적 안정성 지수를 산정하고 운용 상황에 따른 연직면 동적 안정성을 비교하였다.

2. 수학적 모델링

2.1 좌표계와 운동방정식

수중운동체의 운동을 기술하기 위해 지구고정 좌표계

($O_0-X_0Y_0Z_0$)와 수중운동체의 물체 고정좌표계($O-xyz$) Fig. 1과 같이 설정하였다. 수중운동체의 선수 방향을 x 축의 (+), 아래쪽 방향을 z 축의 (+) 방향으로 정의한다. ϕ, θ, ψ 는 각각 수중운동체의 roll, pitch, yaw에 해당하는 오일러 각도이고 u, v, w 는 각각 수중운동체의 surge, sway, heave 방향 속도이다. p, q, r 은 roll, pitch, yaw방향 각속도를 의미한다. 설정한 좌표계를 고려하여 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 VPMM 장비 전후 strut에 각각 로드셀을 부착시켜 Surge, Heave 방향 힘 X_1, X_2, Z_1, Z_2 을 계측하였다. Even keel 상태에서 지구 고정좌표계에 대해 수중운동체에서 측정되는 힘과 모멘트는 식(1)과 같이 계산할 수 있다.

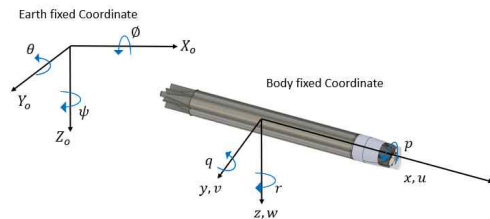


Fig. 1 Coordinate definition

$$\begin{aligned} Z &= Z_1 + Z_2 \\ M &= -Z_1 l_1 + Z_2 l_2 \end{aligned} \quad \text{식(1)}$$

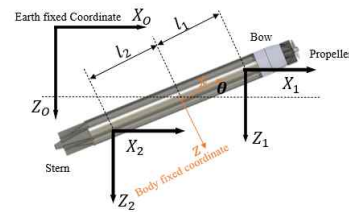


Fig. 2 Load cell location and force measurement according to pitch angle.

힘과 모멘트는 지구고정좌표계($O_0-X_0Y_0Z_0$)에서 측정되므로 이를 물체고정좌표계($O-xyz$)로 변환하면 종동요 시 수중운동체가 받는 힘과 모멘트를 식(2)와 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} Z_E &= (X_1 + X_2) \sin\theta + (Z_1 + Z_2) \cos\theta \\ M_E &= -(X_1 \sin\theta + Z_1 \cos\theta) l_1 + (X_2 \sin\theta + Z_2 \cos\theta) l_2 \end{aligned} \quad \text{식(2)}$$

본 연구의 운동방정식으로는 Gertler & Hagen(1967)이 제안한 모델을 채택하였고, 해당 운동방정식의 heave motion equation과 pitch motion equation은 각각 식(3)과 식(4)와 같다. 수중운동체의 속도, 각속도, 힘 그리고 모멘트의 결과를 무차원화 하는데에는 모형체의 길이를 무차원화 parameter로 사용하는 Prime System I (SNAME, 1950)을 채택하였다.

$$\begin{aligned}
 & m[\dot{w} - uq + vp + x_G(pr - \dot{q}) + y_G(qr + \dot{p}) - z_G(p^2 + q^2)] \\
 &= \frac{\rho}{2} L^4 [Z_q \dot{q} + Z_{pp} p^2 + Z_{pr} pr + Z_{rr} r^2] + \frac{\rho}{2} L^3 [Z_w \dot{w} + Z_{vp} vp + Z_{vr} vr] \\
 &+ \frac{\rho}{2} L^3 [Z_q uq + Z_{q|\delta_s} u|q|\delta_s + Z_{w|q} \frac{w}{|w|} |(v^2 + w^2)|q] \\
 &+ \frac{\rho}{2} L^2 [Z_* u^2 + Z_w uw + Z_{w|w} w |(v^2 + w^2)|^{1/3}] \\
 &+ \frac{\rho}{2} L^2 [Z_{|w} u|w| + Z_{ww} w (v^2 + w^2)^{1/4}] \\
 &+ \frac{\rho}{2} L^2 [Z_{vv} v^2 + Z_{\delta_s} u^2 \delta_s + Z_{\delta_b} u^2 \delta_b] \\
 &+ (W - B) \cos \theta \cos \phi + \frac{\rho}{2} L^3 Z_{qn} uq (\eta - 1) \\
 &+ \frac{\rho}{2} L^2 [Z_{wn} uw + Z_{w|\eta} w |v^2 + w^2|^{1/2} + Z_{\delta_s \eta} \delta_s u^2] (\eta - 1) \quad \text{식(3)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & I_{yy} \dot{q} + (I_{xx} - I_{zz}) pr - I_{xy} (qr + \dot{p}) + I_{yz} (pq - \dot{r}) \\
 &+ I_{xz} (p^2 - r^2) - m[x_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{w} - vr + wq)] \\
 &= \frac{\rho}{2} L^5 [M_q \dot{q} + M_{pp} p^2 + M_{pr} pr + M_{rr} r^2 + M_{q|q} q|q] \\
 &+ \frac{\rho}{2} L^4 [M_w \dot{w} + M_q uq + M_{vp} vp + M_{vr} vr] \\
 &+ \frac{\rho}{2} L^4 [M_{q|\delta_s} u|q|\delta_s + M_{w|q} |(v^2 + w^2)^{1/2}|q] \\
 &+ \frac{\rho}{2} L^3 [M_* u^2 + M_w uw + M_{w|w} w |(v^2 + w^2)^{1/2}|] \\
 &+ \frac{\rho}{2} L^3 [M_{|w} u|w| + M_{ww} w (v^2 + w^2)^{1/2}] \\
 &+ \frac{\rho}{2} L^3 [M_{vv} v^2 + u^2 (M_{\delta_s} \delta_s + M_{\delta_b} \delta_b)] \\
 &- (x_G W - x_B B) \cos \theta \cos \phi - (z_G W - z_B B) \sin \theta \\
 &+ \frac{\rho}{2} L^4 [M_{qn} uq (\eta - 1) + \frac{\rho}{2} L^3 [M_{w\eta} uw + M_{\delta_s \eta} u^2 \delta_s] (\eta - 1) \quad \text{식(4)}
 \end{aligned}$$

m 은 수중운동체의 질량이고, x_G, y_G, z_G 는 물체고정좌표계 원점으로부터 각 축 방향 무게중심 위치까지의 거리를 뜻한다. I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} 는 물체고정좌표계 원점으로부터 각 축의 질량관성모멘트를 의미한다. W 는 수중운동체의 무게를 의미하며 B 는 수중운동체에 작용하는 부력을 의미한다. Z_w 와 Z_w 는 각각 수중운동체의 상하동요 가속도 및 속도에 의해 발생하는 heave방향 힘을 의미한다. Z_q 는 종동요 각가속도에 의해 발생하는 heave방향 힘을, Z_q 는 종동요 각속도에 의해 발생하는 heave방향 힘을 의미한다. M_w 와 M_w 는 각각 상하동요 가속도와 속도에 의해 발생하는 pitch 방향 모멘트를 의미한다. M_q 는 종동요 각가속도로 인한 pitch방향 모멘트를 M_q 는 종동요 속도로 인해 발생하는 pitch방향 모멘트를 의미한다. Z_E 는 수중운동체에 대해 heave 방향으로 작용하는 모든 외력을 의미

하며 M_E 는 수중운동체에 pitch방향으로 작용하는 모멘트를 의미한다. 이 외 유체력 미계수와 관련한 설명은 Gertler and Hagen(1967)에 상세히 기술되어있다.

본 시험에서는 기술된 6자유도 운동방정식 중, 순수 상하동요를 통해 Z_w, Z_w, M_w, M_w 를 도출하였으며, 순수 종동요를 통해 $Z_q, Z_q, Z_{q|\delta_s}, M_q, M_q, M_{q|\delta_s}$ 를 도출하였다.

2.2 연직면 정적시험

연직면 정적 시험(Vertical static test)은 수중 운동체에 다양한 받음각을 부가한 후, 일정 속도로 예인하여 측정된 유체력을 통해 관련 미계수를 추정하는 시험이다. 본 시험에서는 surge force와 heave force 그리고 pitch moment의 결과를 통해 선형, 비선형 미계수를 추정하였다. Surge force의 경우 식(5)로서 heave force와 pitch moment는 각각 식(6), 식(7)과 같이 모델링하였다.

$$X' = X_{uu} u'^2 + X_{ww} w'^2 + X_* u'^2 \quad \text{식(5)}$$

$$Z' = Z'_w w' + Z'_{w|w} w|w| + Z_* u'^2 \quad \text{식(6)}$$

$$M' = M'_w w' + M'_{w|w} w|w| + M_* u'^2 \quad \text{식(7)}$$

$X_{uu} u'$ 은 저항시험을 통해 추정된 미계수를 이용하였다. 연직면 정적 시험을 통해서선 상하동요 속도에 따른 미계수인 X_{ww} 와 X_* 을 추정하였다. Z_w 와 M_w 는 선형감쇠력계수를 모델링하기 위해 도입하였으며 $Z_{w|w} w|w|$ 와 $M_{w|w} w|w|$ 는 비선형 횡교차력 성분을 모델링하기 위해 도입하였다. Z_* 와 M_* 은 상하 비대칭 형상에 의한 영향을 모델링하기 위해 도입한 미계수이다. 해당 미계수들의 추정에는 최소 자승법을 이용하였다.

2.3 VPMM 시험

2.3.1 Pure heave test

순수 상하동요 시험(Pure heave test)은 수중운동체를 종동요 시키지 않은 채, 선체 중심에 정현적 운동을 부가한다. 그러므로 종동요 각속도(q)와 각가속도(\dot{q})를 식(8)과 같이 나타낼 수 있으며, 식(9)는 중심 궤적의 상하동요 변위(z)와 속도(\dot{z}) 및 가속도(\ddot{z})를 나타낸 것이다.

$$\theta = q = \dot{q} = 0 \quad \text{식(8)}$$

$$z = z_0 \sin \omega t, \quad \dot{z} = w = z_0 \omega \cos \omega t, \quad \ddot{z} = \dot{w} = -z_0 \omega^2 \sin \omega t \quad \text{식(9)}$$

식(8)과 식(9)를 식(3), 식(4)에 대입하면 식(10), 식(11)과 같이 정리할 수 있다.

$$m\dot{w} = Z_w \dot{w} + Z_w uw + Z_{w|w}|w|w| + Z_* u^2 + Z_{HS} + Z_E \quad \text{식(10)}$$

$$-m x_G \dot{w} = M_w \dot{w} + M_w uw + M_{w|w}|w|w| + M_* u^2 + M_{HS} + M_E \quad \text{식(11)}$$

Z_{HS} 와 M_{HS} 는 정유체력을 의미한다. 연직면 정적 시험에서 얻어진 미계수 $Z_w, Z_{w|w}, Z_*$ 와 $M_w, M_{w|w}, M_*$ 에 관련한 유체력을 순수 상하동요 시험에서 제외하여 부가질량에 해당하는 식(12)와 식(13)으로 정리한 후 Z_w, M_w 을 추정하였다.

$$(Z_w - m)\dot{w} = -Z_w uw - Z_{w|w}|w|w| - Z_* u^2 - Z_{HS} - Z_E \quad \text{식(12)}$$

$$(M_w + m x_G)\dot{w} = -M_w uw - M_{w|w}|w|w| - M_* u^2 - M_{HS} - M_E \quad \text{식(13)}$$

2.3.2 Pure pitch test

순수 종동요 시험(Pure pitch test)은 수중운동체의 종동요 각이 중심궤적의 접선각과 일치하도록 운동을 부가하여 시행한다. 상하동요 속도와 가속도인 w, \dot{w} 는 식(14)처럼 항상 0으로 고정되고, 발생하는 종동요각을 θ 라 한다면, 식(15)과 같이 설정될 수 있다.

$$w = \dot{w} = 0 \quad \text{식(14)}$$

$$\theta = \theta_0 \cos \omega t, \quad \dot{\theta} = \dot{q} = -\theta_0 \omega \sin \omega t, \quad \ddot{\theta} = \dot{q} = -\theta_0 \omega^2 \cos \omega t \quad \text{식(15)}$$

θ_0 는 초기 종동요 각진폭이다. 식(14)와 식(15)를 식(3)과 식(4)에 대입하면 식(16)과 식(17)으로 정리할 수 있으며, 식(18)과 식(19)에서 양 변에 $[\dot{q} \ uq \ q|q|]$ 의 의사 역행렬을 취해 관련 유체력 미계수를 추정할 수 있다.

$$-m uq - m x_G \dot{q} - m z_G \dot{q} = Z_q \dot{q} + Z_q uq + Z_{q|q}|q|q| + Z_* u^2 + Z_{HS} + Z_E \quad \text{식(16)}$$

$$I_{yy} \dot{q} + m z_G \dot{q} + m x_G uq = M_q \dot{q} + M_q uq + M_{q|q}|q|q| + M_* u^2 + M_{HS} + M_E \quad \text{식(17)}$$

$$[\dot{q} \ uq \ q|q|] \begin{bmatrix} Z_q \\ Z_q \\ Z_{q|q} \end{bmatrix} = -m uq - m x_G \dot{q} - m z_G \dot{q} - Z_* u^2 - Z_{HS} - Z_E \quad \text{식(18)}$$

$$[\dot{q} \ uq \ q|q|] \begin{bmatrix} M_q \\ M_q \\ M_{q|q} \end{bmatrix} = I_{yy} \dot{q} + m z_G \dot{q} + m x_G uq - M_* u^2 - M_{HS} - M_E \quad \text{식(19)}$$

3. 시험 준비

3.1 시험 장비

3.1.1 VPMM 장비 및 예인수조

VPMM은 strut이 수직으로 수중운동체를 지지하도록 설계되었으며, 수직방향의 받음각을 비롯하여 상하동요 및 종동요 운동을 구현할 수 있어 수직면과 관련한 유체력 미계수를 추정할 수 있다. 또한 추진기 장착이 가능하여 저항 및 추진 시험 또한 수행이 가능하다. 더불어 장착하는 모형을 90도로 회전시킬 경우, HPMM 시험 또한 가능하다는 장점이 있다. VPMM 모형의 단점으로는 수직 받음각 구현의 제한이 있어 비선형 운동에 대한 미계수 획득이 제한적인 점을 고려하여 부산대학교 VPMM 모형의 경우 수직 받음각을 $-40\text{deg} \sim 40\text{deg}$ 까지 구현이 가능할 수 있도록 장비를 개선하였다.

모든 시험은 부산대학교의 예인수조에서 수행하였으며 VPMM 시험장비 및 예인수조의 사양은 Table 1에 정리하였다. Fig. 3은 VPMM 시험 장비와 부산대학교 예인수조이다.

Table 1 Characteristics of PNU model basin & VPMM

Categories	Specification
Model basin	
Max. towing speed	3.0 m/s
Size of model basin	100(L)×8(B)×3.5(D) m
VPMM	
Number of struts	2 EA
Range of angle of attack	-40~40 deg
Distance between 2 struts	0.5 m

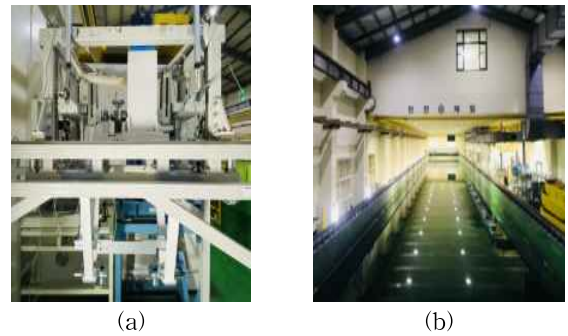


Fig. 3 (a) VPMM facility (b) PNU Model basin

3.1.2 로드셀

VPMM 스트럿과 수중운동체의 결합부분인 선수, 선미부분에는 Surge 방향의 힘과 Heave 방향의 힘을 계측할 수 있는 2축 로드셀을 설치하였고 각 방향 별 $F_x=1000N, F_z=1000N$ 까지 계측 가능하다. Fig. 4는 각각 선수, 선미에 설치되는 로드셀의 스냅샷이며 선미 로드셀의 경우 LM 가이드를 설치하여 종동요 운동 및 받음각 인가가 가능하도록 하였다.



Fig. 4 Fore load cell (left) Rear load cell (right)

3.1.3 수중운동체 모형준비

본 시험에서 사용된 수중운동체 일부의 제작 형상과 모형은 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(c)에서 동체에 길게 파인 부분은 수직 받음각의 $-40\text{deg} \sim 40\text{deg}$ 구현을 위해 가공한 부분이며, 시험 시 필요한 부분을 제외하고는 3D 프린터를 통해 맞춤형 부품을 이용하여 유동의 출입을 최소화하였다. 수중운동체의 제원은 보안사항임을 고려하여 기재하지 않았다. Fig. 6은 windmill 상태에서 받음각 35deg 연직면 정적시험을 수중촬영한 스냅샷이다.

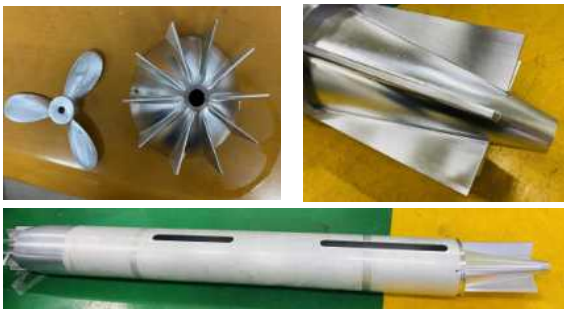


Fig. 5 (a) Propeller and stator (b) Aft part (c) Model



Fig. 6 Underwater snapshot of vertical static test ($\alpha = 35\text{deg}$)

3.1.4 심도

심도는 Fig. 7과 같이 수면과 수중운동체 중심까지의 높이 (H)와 수중운동체의 정면 직경(D)에 대한 비로써 정의할 수 있다. 도시된 부분은 수중운동체의 전면부이다. 본 시험에서 물수 깊이는 자유표면 효과를 배제할 수 있도록 심도 7.5로 설정하였다.(Seol(2005))

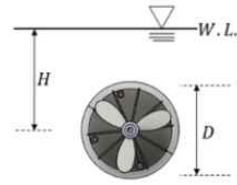


Fig. 7 Depth ratio

3.2 시험 조건

3.2.1 Resistance test

Resistance test의 시험 조건은 Table 2와 같으며 추진기를 장착하지 않은 'bare hull', 500rpm으로 회전하는 'rpm'과 수중운동체를 예인할 때 유동에 따라 프로펠러가 자유롭게 회전하도록 하는 상태인 'windmill', 총 세 가지 경우에 대하여 저항 시험을 수행하였다.

Table 1 Test condition of resistance test

H/D	Propeller state	Towing speed(U)
7.5	bare hull	0.25, 0.5, 0.75, 1.0 m/s
	winmill	0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 3.0 m/s
	rpm (500rpm)	

3.2.2 Vertical static test

Vertical static test의 경우 총 16개의 받음각에 대해 실험을 진행하였으며 상세한 시험 조건은 Table 3과 같다.

Table 2 Test condition of vertical static test

H/D	Attack angle (α)	Propeller state	Towing speed (U)
7.5	± 40	windmill rpm (500rpm)	1.5 m/s
	± 35		
	± 25		
	± 16		
	± 8		
	± 4		
	± 2		
0			

3.2.3 Pure heave test

Pure heave test의 경우 동요 진폭은 0.05m, 예인속도는 1.5m/s로 고정된 채 동요 주파수만을 조절하여 시험을 수행하였다. 상세한 시험 조건은 Table 4와 같다.

Table 3 Test condition of pure heave test

H/D	Propeller state	Amplitude (z_0)	Towing speed (U)	\dot{w}'
7.5	windmill rpm (500rpm)	0.05 m	1.5 m/s	0.1097
				0.0702
				0.0487
				0.0358
				0.0274

3.2.4 Pure pitch test

Pure pitch test의 경우, 예인속도와 진폭을 고정한 채 동요 주파수 및 부가 진폭을 조절하여 시험을 진행하였다. 상세한 시험 조건은 Table 5와 같다.

Table 4 Test condition of pure pitch test

H/D	Propeller state	Amplitude (θ_0 °)	Towing speed (U)	q'
7.5	windmill rpm (500rpm)	4.2	1.5 m/s	0.1821
		3.8		0.1458
		3.6		0.1316
		3.2		0.1040
		2.6		0.0696
		2.2		0.0498
		1.9		0.0374
		1.7		0.0291
		1.4		0.0211

4. 시험 결과

4.1 Resistance test

저항시험을 통하여 유체력 미계수 X_{uu}' 을 추정하였다. Fig. 8에는 각각 예인속도 U 에 따른 저항 X 를 도시하였다. 흑색 결과는 bare hull, 청색 결과가 rpm 상태 그리고 녹색 결과가 windmill 상태 결과이다. 각 저항시험 결과는 $X_{uu}'u^2$ 으로 curve fitting하였으며 rpm상태의 경우 intercept를 고려하여 fitting하였다. Bare hull 상태와 비교하여, windmill 상태의 경우 더 큰 저항이 도출되었는데, 이는 프로펠러에 의한 저항증가라 판단되었다. 프로펠러가 회전하는 rpm 상태와 windmill 상태를 비교하였을 때 rpm 상태에서 더 작은 X_{uu}' 이 도출되었다. Fig. 8를 통해 도출한 미계수를 통하여 추정한 결과가 실제 데이터를 잘 모사함을 확인할 수 있다.

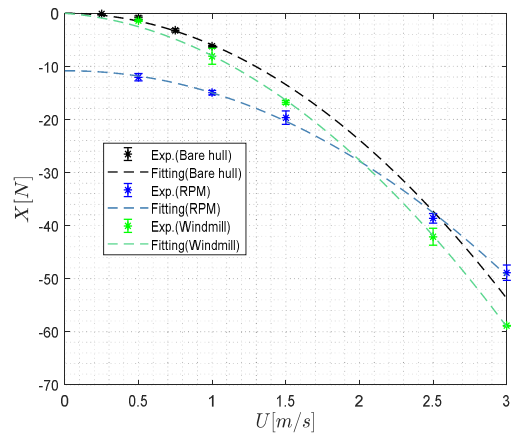


Fig. 8 Experimental result and curve fit of resistance test

4.2 Vertical static test

4.2.1 Surge force

Vertical static test에서 측정된 surge force의 경우 Fig. 9에 도시하였다. 연직면 사향각 30deg, 35deg, 40deg에서는 급격하게 변하여 예상치 못한 결과가 도출되었기 때문에 surge force 대한 curve fitting은 일괄적인 경향성이 도출되었다고 판단된 -16deg~16deg 범위 내에서 진행하였으며, 해당 범위 내에서는 미계수를 통해 재생산한 힘이 취득 데이터를 잘 모사하였다. rpm 상태에서 추정된 X_{ww}' 이 windmill 상태에서 추정된 결과에 비해 더 컸는데, 이는 가속화된 주위 유동이 surge force에 미치는 영향이 연직면 받음각이 커질수록 증가했기 때문이라 사료되었다.

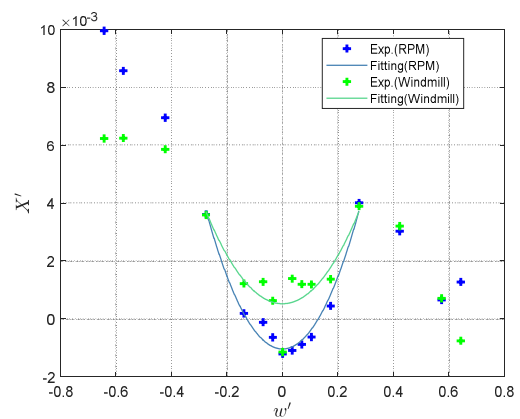


Fig. 9 Experimental result and curve fit of vertical static test - surge force

4.2.2 Heave force

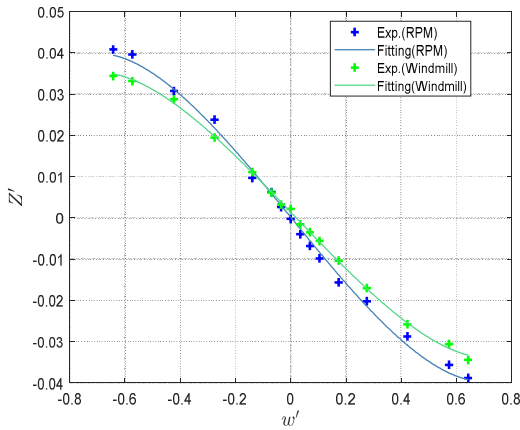


Fig. 10 Experimental result and curve fit of vertical static test - heave force

Fig. 10에는 연직면 받음각에 따라 수중운동체에 작용하는 heave force를 도시하였다. Heave force 결과를 식(6)에 의해 곡선맞춤 하였고, 유체력미계수를 이용하여 재생산한 힘의 결과가 취득한 데이터를 잘 묘사함을 Fig.11을 통해 알 수 있다. Z_w' 은 선형 유체감쇠력에 해당하므로 운동방향과 힘이 반대 방향으로 작용하는 것을 의미하는 음수 부호를 띄는 것이 물리적으로 타당하다(Fossen(1994)). 프로펠러 상태에 관계없이 동일한 부호의 결과가 도출되었으며 받음각이 대각도로 갈수록 비선형성이 뚜렷해지는데, 이는 대각도에 따른 유동분리 현상이 원인으로 사료된다. 선형 유체감쇠력 성분인 Z_w' 와 횡교차력을 모델링하기 위해 도입한 $Z_{w|w|}'$ 모두 windmill 상태에서의 결과가 rpm 상태에서의 결과보다 더 크게 도출되었다. 이는 500rpm으로 회전하는 프로펠러로부터 가속된 후류가 수중운동체를 따라 흐르는 주위 유동의 모멘텀을 증가시키게 되고 그로 인해 상하동요 속도에 따른 heave force를 증가시킨 것으로 판단된다.

4.2.3 Pitch moment

Fig. 11에는 연직면 각도에 따라 수중운동체에 작용하는 pitch moment에 대해 식(7)을 이용하여 curve fitting하였다. Fig. 11을 통해 유체력미계수를 이용하여 재생산한 힘의 결과가 취득한 데이터를 잘 묘사함을 알 수 있다. 프로펠러 상태에 상관없이 받음각이 대각도로 갈수록 비선형성이 뚜렷해지는데, 이는 heave force와 마찬가지로 대각도에 따른 유동분리 현상이 원인으로 사료되며 대각도에서 windmill과 rpm 상태 간 heave force차이가 pitch moment의 차이로도 나타났다. M_w' 의 경우 양수의 결과가 도출되었는데, 이는 수중운동체의 선수의 영향이 우세함을 의미하며 프로펠러와 선수 stator가

있는 본 수중운동체 형상 특성이 원인이라 판단되었다. windmill과 rpm 상태 사이 M_w' 는 큰 차이가 없었으나 대각도로 갈수록 rpm상태에서 발생한 종동요 모멘트가 windmill 상태에 비해 급격하게 증가하는 경향성을 보였고, 이로 인해 비선형 감쇠모멘트인 $M_{w|w|}'$ 미계수의 결과가 20%정도 차이를 보였다.

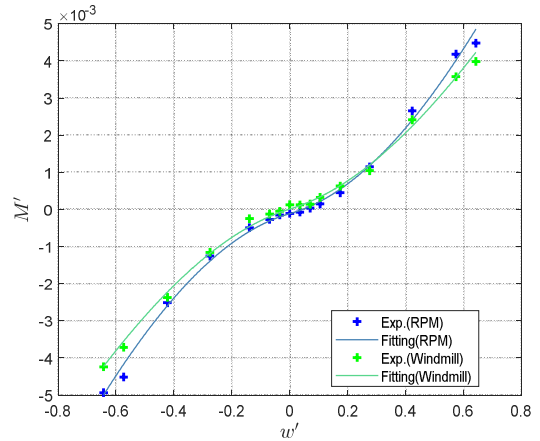


Fig. 11 Experimental result and curve fit of vertical static test - pitch moment

4.3 Pure heave test

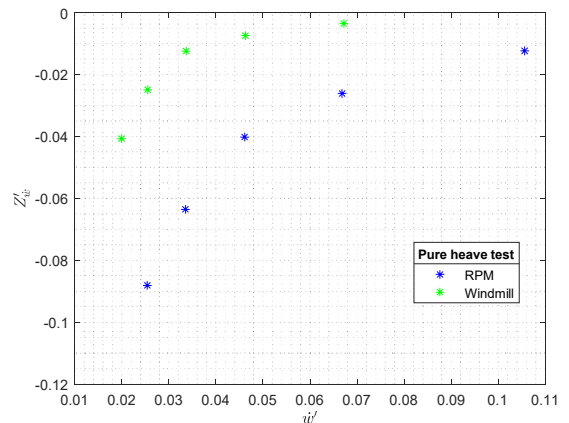


Fig. 12 Experimental result of pure heave test - Z_w'

Fig. 12 에는 동요 가속도 진폭 \dot{w}' 에 따른 유체력 미계수에 해당하는 Z_w' 을, Fig. 13에는 M_w' 을 도시하였다. Z_w' 의 부호는 음수가 도출되었는데, 이는 수중에서 가속운동으로 인해 발생하는 부가질량의 의미를 고려하였을 때 물리적으로 타당한 결과이다(Fossen(1994)). 상하동요 가속도에 의해 발생하는 종동요 모멘트 성분인 M_w' 의 경우 양수의 결과가 나왔는데, 이는 양의 z방향으로 가속할 때 선수의 영향이 우세함

을 의미한다. 일정한 유체력 미계수들이 도출될 것이라는 기대와 달리 상기 두 유체력 미계수 모두 동요 주기에 의존하는 frequency dependence 경향이 보였다. 일반적으로 frequency dependence는 자유표면 변형 등에 의해 발생하는 memory effect와 선체 부가물에서 유기되는 vortex등이 해당 현상의 원인으로 지목된다(Fossen(1994)).

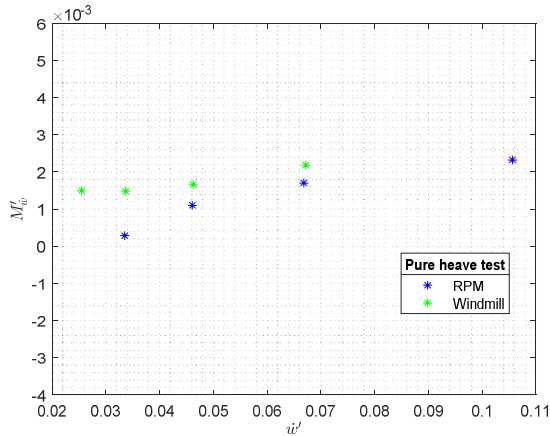


Fig. 13 Experimental result of pure heave test - M_w'

본 시험은 Seo(2005)에서 제시하는 동유체력 미계수가 자유표면의 영향을 받지 않는 심도를 넘어 심도 7.5에서 진행하였기 때문에 자유표면에 의한 영향은 주요 원인이 아니라 판단하였다. 수중운동체의 형상 특성상 전방프로펠러가 부착되어 있기 때문에 이로 인한 강한 반류의 영향과 프로펠러 후방으로 이어지는 팁 형상들로부터 유기되는 보오텍스등이 동체에 직접적으로 영향을 미쳤을 것으로 예상된다. 특히 동요 주기가 긴 장 주기 시험 결과의 경우 Z_w' 이 크게 변하는 것을 통해 프로펠러 회전으로 인한 영향이 동요주기가 느린 조건에서 더 많은 영향을 미친 것으로 사료된다.

4.4 Pure pitch test

Pure pitch test의 경우 종동요 각속도와 관련된 성분과 각속도 성분으로 나누어 식 (20)~(23)과 같이 명칭하여 각 운동성분에 대한 힘과 모멘트를 도출하고 곡선맞춤하였다.

$$Z_{acc}' = (Z_q' + m' x_G') \dot{q}' \quad \text{식(20)}$$

$$M_{acc}' = (M_q' - I_{yy}') \dot{q}' \quad \text{식(21)}$$

$$Z_{vel}' = (Z_q' + m') u q' + Z_{q|q}' q | q' \quad \text{식(22)}$$

$$M_{vel}' = (M_q' - m' x_G') u q' + M_{q|q}' q | q' \quad \text{식(23)}$$

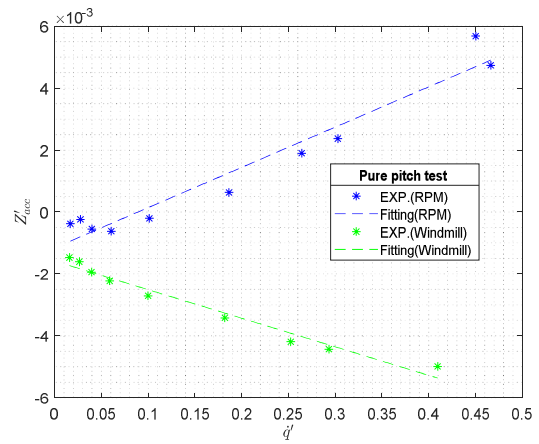


Fig. 14 Experimental result and curve fit of pure pitch test - Z_{acc}'

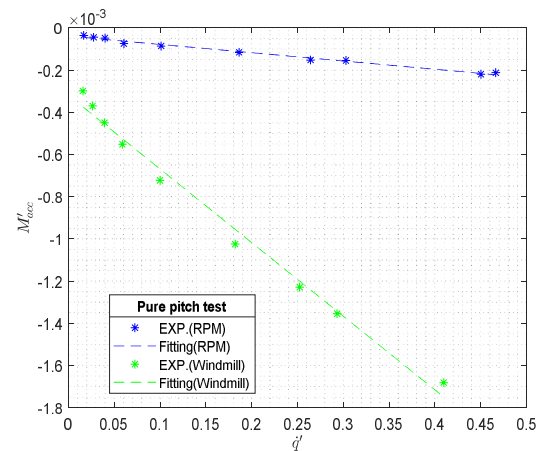


Fig. 15 Experimental result and curve fit of pure pitch test - M_{acc}'

Fig. 14에는 종동요 각속도에 의한 heave force 성분을 Fig. 15에는 pitch moment에 성분을 도시하였다. Fig. 14에서는 프로펠러의 상태에 따라 상이한 경향성을 확인할 수 있는데, 청색 결과에 해당하는 rpm 상태의 결과는 녹색 결과에 해당하는 windmill 상태와 비교하여 정반대의 부호를 가진 Z_q' 가 도출이 되었다. 이는 500rpm으로 프로펠러를 회전시킴에 따라 종동요 운동 시 선체 전후 압력분포에 크게 영향을 준 것으로 예상된다. 부가관성모멘트에 해당하는 M_q' 의 경우 Fig. 15의 fitting 기울기로서 추정할 수 있는데, 두 케이스 모두 음에 해당하는 결과가 도출되었으며, 부가관성모멘트가 가지는 의미를 고려하였을 때 해당 부호는 물리적으로 타당하다(Fossen(1994)). 프로펠러 회전상태에 따른 M_q' 의 미계수 order의 차이를 설명하기 위해서는 수중운동체 주위의 유동장 분석 및 volume solution을 면밀히 검토할 수 있는 추후 연구가 필요하다고 판단되었다.

Fig. 16에는 종동요 각속도에 관련한 감쇠계수에 해당하는 성분을 도시하였다. fitting을 통해 도출가능한 Z_q' 은 프로펠러 상태가 크게 영향을 미치지 않은 채 유사한 결과가 추정되었으며 양수로서의 결과가 도출되었다. 이는 수중운동체가 종동요 운동할 때 작용하는 유체력이 선수부분이 우세함을 의미한다. 작용하는 유체력의 비선형성을 모델링하고자 $Z_{q|q}$ ' 성분을 도입하였으나 그림 16을 통해 선형성분이 지배적임을 확인할 수 있다.

Fig. 17에는 종동요 각속도에 관련한 감쇠모멘트 성분을 도시하였으며, Fig. 16과 마찬가지로 fitting을 이용하여 도출가능한 M_q' 는 프로펠러 상태와 관계없이 음수의 결과가 도출되었다. 해당 성분이 종동요 운동시 발생하는 감쇠모멘트인 점을 고려하면 해당 결과가 물리적으로 타당함을 알 수 있다. 해당 미계수는 windmill 상태에서 더 크게 추정되었다. 종동요 감쇠모멘트 또한 비선형성을 모델링하고자 $M_{q|q}$ '을 도입하였으나 선형성분이 지배적임을 확인할 수 있다.

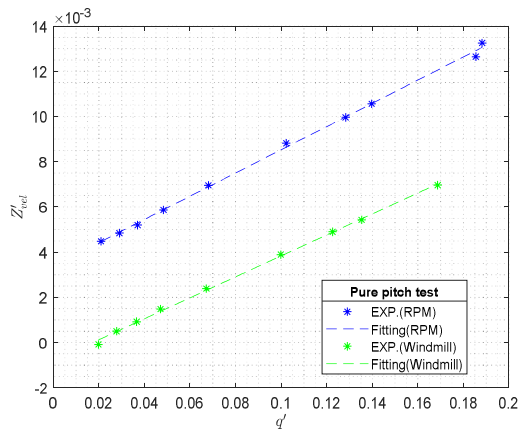


Fig. 16 Experimental result and curve fit of pure pitch test

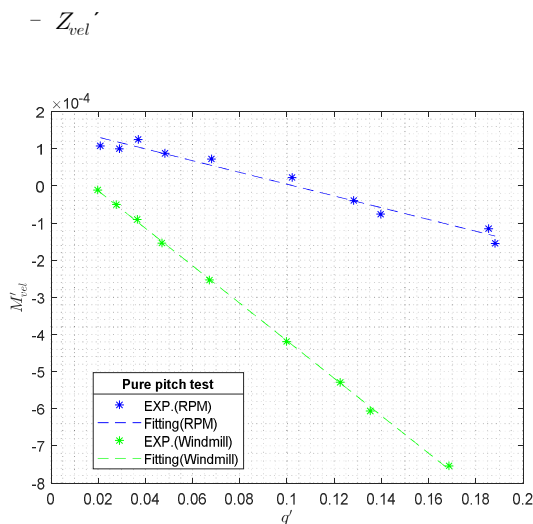


Fig. 17 Experimental result and curve fit of pure pitch test

4.5 Dynamic stability in the vertical plane

조종시험들로부터 도출한 유체력 미계수를 통하여 수직면 동적 안정성 지수를 산출할 수 있으며 식(24)와 같이 구할 수 있다. Ray et al.(2008)은 잠수함의 안정성 허용범위를 Table 6과 같이 제안하고 있으며, 이 허용범위들은 안정성 분석과 함께 초기설계 단계에서 함수제어판 및 함미타와 같이 고정식 또는 제어식 부가물 등에 요구되는 크기를 결정하는데 사용되어진다.

$$G_v = 1 - \frac{M_w'(Z_q' + m')}{Z_w'(M_q' - m'x_G')} \quad \text{식(24)}$$

Table 5 Recommended range of stability indices

Parameter	Expression	Acceptable range
Vertical stability index	G_v	0.5 - 0.8
Horizontal stability index	G_h	0.2 - 0.4

본 수중운동체 모형에 대하여 연직면 동적 안정성 지수를 도출하기 위해 선형구간에 해당하는 소각도에 한 해 선형계수만을 도출하였으며, 선형구간은 -4deg ~ 4deg로 설정하였다. Fig. 18, Fig. 19에는 해당 범위의 결과를 도시하였다. Z_q' 과 M_q' 의 경우 pure pitch test에서 도출한 결과를 이용하였다. 지수 산정 결과는 Table 7과 같다.

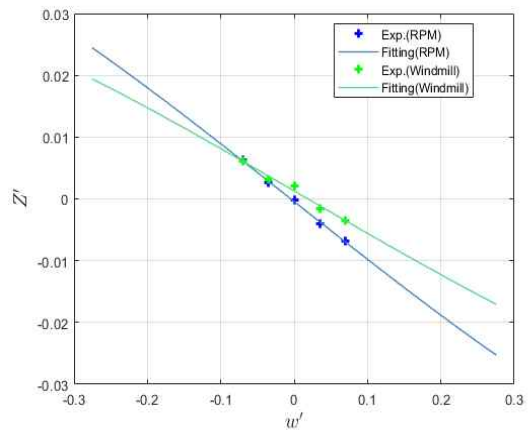


Fig. 18 Estimation of Z_w' in small α range

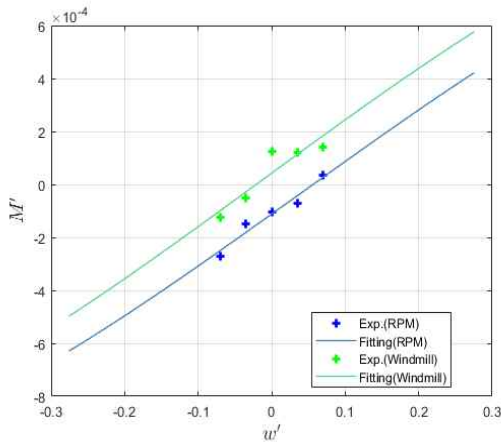


Fig. 19 Estimation of M_w' in small α range

Table 6 Dynamic stability index in the vertical plane

	rpm	windmill
G_v	0.2954	0.7335

산출 결과 rpm 상태에서는 acceptable range에 못 미치는 0.2954의 결과가 도출되었다. 자항 회전 수 혹은 windmill 상태가 아닌 특정 rpm으로 회전하였기 때문에, 전방 프로펠러가 동체에 미치는 후류의 영향이 연직면 동적 안정성 저하에 크게 영향을 미치는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 전방에 프로펠러가 부착된 수중운동체의 조종성능 평가를 위한 저항시험 및 VPMM 시험을 수행하였으며 일련의 모든 시험은 부산대학교 예인수조에서 수행되었다. 시험은 예인속도에 따라 프로펠러를 자유롭게 회전시키는 windmill 상태와 특정 rpm으로 고정하여 회전시키는 rpm 상태 두 경우로 나누어 시험을 진행하였으며, 각 실험 간 프로펠러 상태에 따른 결과의 차이점을 기술하였다. 특히 해당 차이는 종방향 각가속도 운동 성분에서 크게 나타났는데, 각가속도 운동에 따른 heave force의 경우 미계수 부호가 바뀌었으며 이는 프로펠러 회전 상태에 따라 수중운동체 주위 압력분포가 크게 바뀐 것이 원인이라 사료되었다. 전방에 프로펠러가 부착된 수중운동체의 경우, 후방 프로펠러와 달리 프로펠러로부터 가속된 후류와 프로펠러로부터 이어지는 팁과 같은 형상에 의해 유기되는 와류가 동체로 직접적으로 전해지기 때문에 상하방향 부가질량이 장주기에서 수렴하지 않는 등 기존의 수중체 시험결과들과 상이한 경향성이 관찰되는 경우가 존재하였다. 추후 전산유체해석등을 통해 유동현상들을 함께 분석하는 과정을 수행한다면 본 논문에서 나타난 현상들에 대한 원인을 심도있게 규명할 수 있을 것이라 판단된다. 현재까지

본 수중운동체의 형상과 유사한 형상에 대한 조종시험의 결과가 존재하지 않기 때문에, 추후 유사한 형상에 대한 연직면 조종시험을 수행할 경우, 본 시험 결과가 기초 참고자료로서 유용하게 활용될 것이라 기대된다.

후 기

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)과 BK21 4단계 친환경 스마트 조선해양공학과 교육연구단의 지원을 받아 연구되었음.

References

- [1] Feldman, J.(1979), "DTNSRDC Revised Standard Submarine Equations of Motion". DTNSRDC SPD-0303-09.
- [2] Fossen, T. I.(1994), "Guidance and Control of Ocean Vehicles", Wiley, New York.
- [3] Gertler, M. and Hagen, G. R.(1967), "Standard Equations of Motion for Submarine Simulation", NSRDC-Report SR 009 01 01,Task 0102.
- [4] Han, J. H., Jeong, J. H., Lee, S. B., Jang, K. Y. and Lee, S. K.(2017), "Dynamic Stability Analysis of a Submarine by Changing Conning Tower Position and Control Planes", Journal of Navigation and Port Research, 41(6), pp. 389-394.
- [5] Healey, A. J. and Lienard, D.(1993), "Multivariable Sliding-Mode Control for Autonomous Underwater Vehicles". IEEE Journal of Ocean Engineering, 18(3), pp. 327-339.
- [6] Jeong, J. H., Han J. H., Ok, J., Kim, H. D., Kim, D. H., Shin, Y. K. and Lee, S. K.(2016) "Prediction of Hydrodynamic Coefficients for Underwater Vehicle using Rotating Arm Test", Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 30, No. 1, pp. 25-31.
- [7] Jeon, M. J., Yoon, H. K., Hwang, J. H. and Cho, H. J.(2017), "Study on Maneuvering Characteristics of Submerged Body by changing its Design Parameters". Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 31(2), pp. 155-163.
- [8] Jung, J. W., Jeong, J. H., Kim, I. G. and Lee, S. K.(2014a), "Estimation of Hydrodynamic Derivatives of Submarine Model by Using VPMM Test". Journal of Navigation and Port Research, Vol. 39(3), pp. 173-178.
- [9] Jung, J. W., Jeong, J. H., Kim, I. G. and Lee, S. K.(2014b), "Experimental Study on Hydrodynamic Coefficients of

- Autonomous Underwater Glider Using Vertical Planar Motion Mechanism Test”, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 28(2), pp. 119–125.
- [10] Kim, Y. G., Yeo, D. J., Kim, S. Y., Yun, K. H. and Oh, B. I.(2009), “Prediction of Maneuverability of KCS by CPMC Captive Model Test”, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 46(6), pp. 553–561.
- [11] Kim, Y. G., Yun, G. H., Kim, S. Y. and Kim, D. J.(2012), “Captive Model Test of Submerged Body Using CPMC”, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 49(4), 296–303.
- [12] Lee, T. I. and Kwon, S. H.(2002), “A Study on Practical PMM Test Technique for Ship Maneuverability Using System Identification Method”. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 16(6), pp. 25–31.
- [13] Park, J. Y., Kim, N. Y., Rhee, K. P., Yoon, H. K., Kim, C. K., Jung, C. M., Ahn, K. S. and Lee, S. K.(2015), “Study on Coning Motion Test for Submerged Body”, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 29(6), pp. 436–444.
- [14] Park, J. H., Shin, M. S., Choi, J. Y., Hwang, J. H., Shin, Y. H. and Kim, Y. G.(2016), “An Experimental Study on Effect of Angle of Attack on Elevator Control Force for Underwater Vehicle with Separate Fixed Fins”, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 30(4), pp. 243–252.
- [15] Park, J. Y., Rhee, S. H., Lee, S. S., Yoon, H. K., Seo, J. H., Lee, P. Y., Kim, H. S. and Lee, H. S.(2020), “Study on the Estimatio of Autonomous Underwater Vehicle’s Maneuverability Using Vertical Planar Motion Mechanism Test in Self-Propelled Condition”. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 57(5), pp. 287–296.
- [16] Ray, A. V., Singh S. N. and Sen, D.(2008), “Manoeuvring studies of underwater vehicles—a review”, In: *Transactions of royal institution of naval architects*, Vol. 150.
- [17] Rhee, K. P., Yoon, H. K., Sung, Y. J., Kim, S. H. and Kang, J. N.(2000). “An Experimental Study on Hydrodynamic Coefficients of Submerged Body Using Planar Motion Mechanism and Coning Motion Device“, In *International Workshop on Ship Maneuverability*, pp. 1–20.
- [18] Seol, D. M.(2005). *An Experimental Study of the Depth Effect on the Manoeuvrability in a Horizontal Plane of the Submerged Body*. Seoul National University, Master Thesis.
- [19] SNAME(1950), “Nomenclature for Treating the Motion of a Submerged Body Through a Fluid”. The Society of Naval Architects and Marine Engineerings, Technical and Research Bulletin, No. 1–5, pp. 1–15.
- [20] Watt, G. D.(2007), “Modelling and Simulating Unsteady Six Degrees-of-freedom Submarine Rising Maneuvers”. DRDC Atlantic TR 2007–008.

Received 31 March 2022

Revised 25 April 2022

Accepted 14 June 2022