

자항상태 VPMM 시험을 통한 무인잠수정 조종성능 추정에 관한 연구

박종열¹·이신형^{1,2,†}·이승수³·윤현규⁴·서정화⁵·이필엽⁶·김호성⁶·이한솔⁶
서울대학교 조선해양공학과¹
서울대학교 해양시스템공학연구소²
충북대학교 토목공학부³
창원대학교 산업시스템 및 조선해양 융합공학부⁴
충남대학교 선박해양공학과⁵
한화시스템 해양연구소⁶

Study on the Estimation of Autonomous Underwater Vehicle's Maneuverability Using Vertical Planar Motion Mechanism Test in Self-Propelled Condition

Jongyeol Park¹·Shin Hyung Rhee^{1,2,†}·Sungsu Lee³·Hyeon Kyu Yoon⁴·Jeonghwa Seo⁵·Phil-Yeob Lee⁶·
Ho Sung Kim⁶·Hansol Lee⁶

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University¹
Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University²
School of Civil Engineering, Chungbuk National University³
Department of Industrial Engineering and Naval Architecture, Changwon National University⁴
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam National University⁵
Naval R&D Center, Hanwha Systems Co., Ltd.⁶

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The present study aims to improve the accuracy of the maneuvering simulations based on captive model test results. To derive the hydrodynamic coefficients in a self-propelled condition, a mathematical maneuvering model using a whole vehicle model was established. Captive model tests were carried out using the Vertical Planar Motion Mechanism (VPMM) equipment. A motor controller was used to control the constant propeller revolution rate during pure motion tests. The resistance tests, self-propulsion tests, static drift tests, and VPMM tests were performed in the towing tank of Seoul National University. When the vertical drift angle changes, the gravity load on the sensors were changed. The hydrodynamic forces were deduced by subtracting the gravity load from the measured forces. The hydrodynamic coefficients were calculated using the least-square method. The simulation of the turning circle test was compared with the free-running model test result, and the error of the turning radius was 8.3 % compared to the free-running model test.

Keywords : Autonomous Underwater Vehicle(자율무인잠수정), Self-propulsion test(자항시험), Vertical Planar Motion Mechanism (VPMM, 수직면운동장치 시험), Hydrodynamic coefficient(유체력 미계수), Maneuverability(조종성능)

1. 서론

자율무인잠수정은 사전에 입력된 정보를 기반으로 자율적으로 기뢰나 해저지형을 탐색하는 임무를 수행하는 체계이다. 최근

에는 필수 요소인 광학카메라, 사이드스캔 소나, 초음파 센서 등 계측장비들의 발달로 인해 탐지능력이 고도화되어 민군 분야에서 자율무인잠수정의 활용성이 높아지고 있다.

자율무인잠수정의 동적 제어를 위해서는 적합한 동역학적 모델을 구성해야 한다. 수중운동체의 동유체력 모델에 대한 연구는

1960년대부터 이루어졌다. Gertler and Hagen (1967)은 운동 변수와 제어변수에 대한 테일러 급수 전개식을 이용하여 다항식 형태로 동유체력을 분석하였다. Feldman (1979)은 횡교차항력, 세일 와류의 영향을 고려하여 잠수함의 비선형 운동특성을 반영하도록 Gertler 모형을 보완하였다. Watt (2007)는 잠수함의 긴급부상을 모사하기 위해 수평면-연직면에 국한되지 않는 받음각을 정의하여 병진운동에 의한 감쇠력을 표현하였다.

동유체력 모델을 이루는 유체력 미계수는 동체의 형상을 고려한 추정식을 사용하거나, 실험 또는 전산유체역학 해석을 통해 얻어지게 된다. Shin and Lee (2005)는 잠수함의 긴급기동 조건을 고려한 유체력 미계수 추정 모델링을 수행하였다. 실험 또는 전산유체역학 해석을 통해 유체력 미계수를 도출하기 위해서는 평면 운동장치 시험(planar motion mechanism), 회전팔 시험(rotating arm test), 원추형시험(coning motion test) 등이 수행된다. 본 연구에서는 수직면 운동장치 시험(Vertical Planar Motion Mechanism, VPMM)을 통해 유체력 미계수를 도출하였고, 이를 바탕으로 조종성능을 추정하였다. Rhee et al. (2000)는 예인수조에서 잠수함 모형에 대한 수평면 운동장치 시험과 원추형시험을 수행하여 유체력 미계수를 도출하였다. Seol et al. (2005)은 잠수체의 심도에 따른 수평면 운동장치 시험을 수행하여 유체력 미계수의 변화에 대한 연구를 수행하였다. Jung et al. (2014)은 수중 글라이더에 대한 수직면 운동장치 시험을 수행하여 유체력 미계수를 도출하였다.

조종운동 시뮬레이션을 위한 운동방정식은 유체력을 표현하는 방법에 따라 모듈러 모델과 전선 모델로 구분한다. 모듈러 모델에서는 동체, 제어판, 추진기에 작용하는 힘과 모멘트 성분을 각각 분리하여 대입하고, 서로의 상호작용 성분을 추정하여 적용한다. Lee et al. (1997)은 모듈러 모델과 전선 모델을 이용하여 PMM 시험을 분석하였고, 두 모델 모두 시운전 결과를 잘 추정함을 확인하였다. 전선 모델의 유체력 미계수는 선체-추진기-러더가 포함된 실험으로부터 도출되었으며, 모듈러 모델의 유체력 미계수는 추진기가 없는 선체-러더의 영향만 포함하여 도출되었다. 모듈러 모델은 타의 설계에 유리하며 초기설계단계에서 조종성능을 추정하는 모델로 사용될 수 있다. 전선 모델은 동체-추진기-제어판의 작동상황을 반영한 외력 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있다.

de Barros and Dantas (2012)는 무인잠수정과 프로펠러 덕트의 상호작용이 유체력에 미치는 영향을 수치해석 시뮬레이션을 통해 분석하였으나, 로터에 의한 영향은 고려하지 않았다. 추진기가 회전하고 있는 자항 상태에서는 프로펠러로 인한 유동 가속화 및 유입류 조건에 따른 추력 불균형 등이 유체력에 영향을 미치게 된다.

모형이 작은 경우에는 추진기를 부착하지 않지만, 본 연구에서는 추진기가 무인잠수정에 미치는 영향을 고려하기 위해 동체-추진기-제어판이 모두 갖춰진 상태에서의 실험을 수행하고, 전선 모델을 적용하여 유체력을 표현하였다. 예인수조에서 자항상태의 VPMM 실험을 설계, 수행하여 유체력 미계수를 도출하였다. 우선 설계속도에 대응되는 자항점의 추진기 회전수를 도

출하기 위해 자항시험을 수행하였으며, 자항점 회전수 조건에서 VPMM 시험을 수행하였다. 선회시험에 대한 시뮬레이션을 수행하고 자유항주시험 결과와 비교하여 시뮬레이션의 정확도를 확인하였다.

2. 좌표계 및 유체력 모형

2.1 좌표계

무인잠수정의 운동을 기술하기 위하여 지구고정좌표계($O_0-x_0y_0z_0$)와 잠수체에 대해 통상적으로 사용되는 물체고정좌표계($O-xyz$)를 Fig. 1 과 같이 정의하였다.

물체고정좌표계에서 u, v, w 는 무인잠수정의 전후방향, 좌우방향, 상하방향 속도이며, p, q, r 는 횡동요, 종동요, 선수동요 각속도이다. α 는 무인잠수정의 속도(U)가 물체고정좌표계와 이루는 수직면 받음각도로 $\arcsin(w/U)$ 로 정의된다. 본 연구에서 물체고정좌표계의 원점을 동체중점으로 설정하였으며, 계측된 힘과 모멘트는 원점을 기준으로 표시하였다.

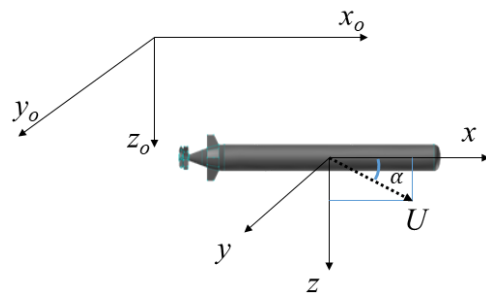


Fig. 1 Body-fixed coordinate and Earth-fixed coordinate

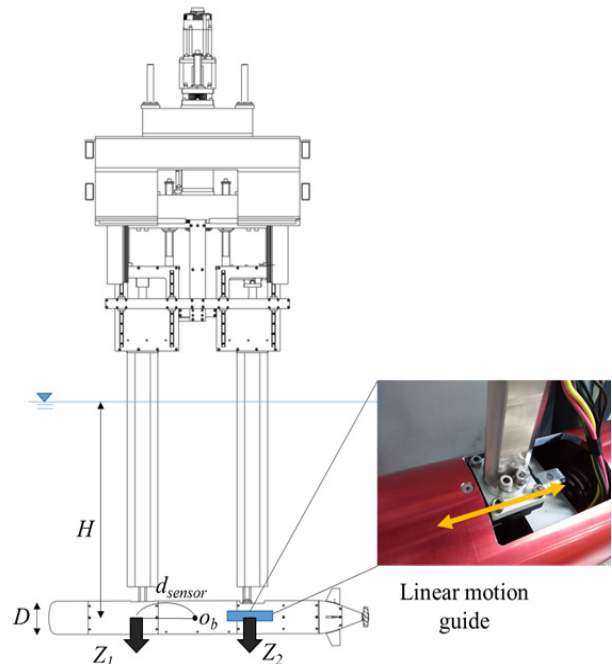


Fig. 2 Design of VPMM equipment

실험에 사용된 VPMM 장비는 Fig. 2와 같으며, 종동요 각도 변화 시에 발생하는 전후동요 방향 유격을 상쇄시키기 위해 선미 스트럿 연결부에는 Linear motion 가이드가 설치되었다. VPMM 장비는 순수 상하동요 운동/순수 종동요 운동 구현, 수직면 받음각도 조절이 가능하며, 자항 상태를 구현하기 위해 로터 회전수 제어시스템 및 자항 동력계가 설치되었다. 무인잠수정의 수심(H)은 자유수면의 영향을 받지 않도록 수심과 동체 직경 비(H/D)가 6.5가 되도록 스트럿의 길이를 설정하였다.

동체 중앙에서의 힘과 모멘트를 도출하기 위해 동체 중앙에서 같은 거리에 2축 분력계(X, Z)를 설치하였다. x 방향 분력계와 z 방향 분력계의 용량은 각각 250 N, 500 N이며, 데이터 취득 주파수는 20 Hz이다. 선수의 분력계에 작용하는 힘을 아래 첨자 1, 선미의 분력계에 작용하는 힘을 아래 첨자 2로 표시하였다. 이 때, 종동요 모멘트(M)는 동체 중심으로부터 센서 간의 거리(d_{sensor})를 이용하여 식 (1)과 같이 계산된다.

$$M = -Z_1 d_{sensor} + Z_2 d_{sensor} \quad (1)$$

2.2 유체력 모형

유체력 모형은 운동범위, 모형의 형상 및 운용 목적인 유사한 REMUS AUV에 사용된 유체력 모형을 사용하였다 (Prestero, 2001). Prestero (2001)는 선형 미계수만을 고려한 유체력 모형을 이용하여 조종 시뮬레이션을 수행하였다. 본 연구의 대상 무인잠수정은 상하, 좌우대칭 형상을 가지므로 6자유도 운동방정식을 식 (2)와 같이 간략화 할 수 있다.

$$\begin{aligned} m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + z_G(pr + \dot{q})] &= X \quad (2) \\ m[\dot{v} - wp + ur + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(pq + \dot{r})] &= Y \\ m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(pr - \dot{q})] &= Z \\ I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr - I_{xz}(\dot{r} + pq) - mz_G(\dot{v} - wp + ur) &= K \\ I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp + I_{xz}(p^2 - r^2) \\ + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] &= M \\ I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq + I_{xz}(rq - \dot{p}) + mx_G(\dot{v} - wp + ur) &= N \end{aligned}$$

여기서, m은 무인잠수정의 질량, I는 각 하첨자 축들에 대한 질량관성모멘트를 뜻하며, x_G , z_G 는 무게중심과 동체중심 사이의 거리이다. 우변의 외력 항은 모형시험을 통해 도출되었다.

계측된 힘과 모멘트는 무인잠수정의 길이(L)와 속도(U)를 이용하여 식 (3)과 같이 무차원화하였으며, 운동변수는 식 (4)와 같이 무차원화하여 유체력 미계수를 도출하였다.

$$X' = X / (0.5\rho U^2 L^2), \quad M' = M / (0.5\rho U^2 L^3) \quad (3)$$

$$u' = u / U, \quad q' = q / (U / L) \quad (4)$$

무인잠수정에 작용하는 유체력은 동체의 속도와 가속도, 제어판 받음각(δ_e)에 의한 유체력과 추력(T)의 합으로 식 (5)와 같

이 구성된다. 본 연구에서는 모든 부가물이 부착된 상태에서의 외력을 계측하여 동체-추진기-제어판 작동상황을 고려한 유체력 미계수를 도출하였다.

$$\begin{aligned} X &= X_{uu}u^2 + X_{ww}w^2 + X_{\delta_e\delta_e}\delta_e^2 + T \quad (5) \\ Z &= Z_w w + Z_{w|w}|w| + Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_q q + Z_{q|q}|q| \\ &\quad + Z_{\dot{q}}\dot{q} + Z_{\delta_e}\delta_e + Z_{\delta_e|\delta_e}|\delta_e| \\ M &= M_w w + M_{w|w}|w| + M_{\dot{w}}\dot{w} + M_q q + M_{q|q}|q| \\ &\quad + M_{\dot{q}}\dot{q} + M_{\delta_e}\delta_e + M_{\delta_e|\delta_e}|\delta_e| \end{aligned}$$

본 연구에 사용된 무인잠수정은 수중정보 탐색용으로 급격한 기동이 발생하지 않는 점을 고려하여 운동의 연성항은 고려하지 않았다. 추력 항은 프로펠러 단독성능 시험과 자항시험 결과를 이용하여 식 (6)과 같이 구성하였다. 추력감소비(t)는 자항시험 결과로부터 도출되었으며, 추력계수(K_T)는 프로펠러 단독성능 시험을 통해 식 (7)와 같이 도출되었다. 이 때, n은 로터의 회전수, D_p 는 로터의 직경이다.

$$T = -(1 - t)K_T(J_p)\rho n^2 D_p^4 \quad (6)$$

$$K_T(J_p) = -0.2489J_p^2 - 0.2491J_p + 0.7102 \quad (7)$$

전진비(J_p)는 추진기 위치에서의 반류계수(w_p)를 이용하여 식 (8)과 같이 계산된다. 본 연구의 대상 모형인 어뢰형 무인잠수정은 선박에 비하여 직진성이 보장되어, 반류계수는 직진 시 값으로 일정하다고 가정하였고, 직진 시의 반류계수인 w_{p0} 값을 사용하였다.

$$J_p = \frac{u(1 - w_{p0})}{nD_p} \quad (8)$$

3. 모형시험 방법

3.1 실험 모형

대상 무인잠수정에 대해 축척비 1:1로 제작된 모형을 예인수조 실험에 사용하였다. 다만 모형시험을 위해 동체 표면은 단순화하였다. 동체 길이와 직경비(L/D)는 10.0이다. 모형시험이 수행된 4 knots 선속 조건에서 동체의 길이로 계산한 레이놀즈 수는 4.12×10^6 이다. 국부 레이놀즈 수가 작은 선수부에서는 층류와 천이영역이 발달할 것으로 예상되나, 실제 무인잠수정과 크기가 동일하기 때문에 난류 촉진장치는 부착하지 않았다.

추진 시스템은 전방 스테이터와 로터로 구성되며, Fig. 3과 같다. 전방 스테이터는 로터에 의해 발생하는 토크 불균형을 감소시키고, 이물질 유입에 따른 유동 장애를 최소화시키는 역할을 한다.

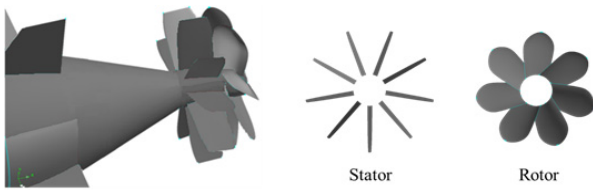


Fig. 3 Propulsion system of AUV

Table 1 Principal dimensions of AUV

Main particulars	Value
Length of the vehicle [L]	2.0 m
Diameter of the vehicle [D]	0.2 m
Surface area of each control fin [S_c]	$5.8896 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
Diameter of the stator [D_s]	0.18 m
Diameter of the rotor [D_p]	0.17 m

실험 모형에 대한 주요 제원은 Table 1과 같다. 주요 제원들 중 무인잠수정의 길이(L)와 로터의 직경(D_p)을 무차원화 시에 사용하였다. 스테이터의 날개 개수는 9개, 로터의 날개 개수는 7개이며, 스테이터와 로터의 직경은 각각 0.18 m, 0.17 m이다.

3.2 모형시험 조건

무인잠수정의 저항, 추진, 조종성능을 확인하고자 모형시험 조건을 설정하였으며, 전체 시험 항목은 Table 2와 같다. 순수 상하동요 시험에서는 무차원화된 상하방향 가속도(w'_{dot})를 이용하여 시험조건을 나타내었으며, 순수 종동요 시험에서는 무차원화된 종동요 각속도(q')를 이용하여 시험조건을 표시하였다.

Table 2 Test conditions

Test type	Test condition
Resistance test	$U = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 \text{ knots}$
Self-propulsion test	$U = 4 \text{ knots}$ $n = 6, 7, 8, 9, 10 \text{ rps}$
Static drift test	$U = 4 \text{ knots}$ $\alpha = \pm(2, 4, 6, 8, 12, 16, 20)^\circ$
Control surface test	$U = 4 \text{ knots}$ $\delta_e = \pm(3, 6, 9, 12, 15)^\circ$
Pure heave test	$U = 4 \text{ knots}$ $w'_{dot} = 0.0411, 0.0784, 0.1208, 0.1507$
Pure pitch test	$U = 4 \text{ knots}$ $q' = 0.0411, 0.0784, 0.1207$

저항시험을 제외한 모든 시험에서 추진기가 부착된 자향 상태에서 실험이 수행되었다. 유체력 미계수가 도출되는 수직면 사향시험, 제어판 시험, 순수 상하동요 시험, 순수 종동요 시험에서 예인속도는 4 knots 로 고정되었다. 순수 상하동요 시험에서는 무차원화된 상하동요 가속도 값이 0.04 - 0.15인 범위

서 4가지 주파수 조건에 대해 실험을 수행하였다. 순수 종동요 시험에서는 무차원화된 종동요 각속도 값이 0.04 - 0.12인 범위에서 3가지 주파수 조건에 대해 실험을 수행하였다.

4. 모형시험 결과

4.1 저항시험

추진기가 부착되지 않은 무인잠수정 모형을 1 - 7 knots 범위에서 1 knots 간격으로 예인할 때 작용하는 외력을 측정하였다.

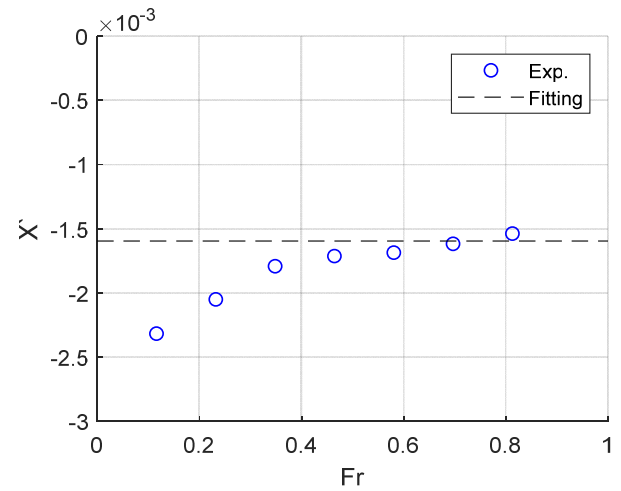


Fig. 4 Resistance test results

저항시험에서 계측된 전후동요 힘은 식 (9)와 같으며, 모든 속도 조건의 결과를 이용하여 X_{uu} 를 일정한 상수가 아닌 속도의 함수인 $X_{uu}(u)$ 로 모델링하였다. 프루드 수가 0.4 이상에서는 $X_{uu}(u)$ 가 Fig. 4의 점선으로 표시한 값에 수렴하였다.

$$X = X_{uu}(u)u^2 \tag{9}$$

4.2 자향시험

실제 잠수정의 크기와 모형 잠수정의 운용 조건, 크기가 동일하기 때문에, 자향점은 레이놀즈 수 차이에 따른 예인력을 보정해줄 필요 없이 동체 전체에 대한 외력이 0 N이 되는 지점으로 정하였다. 4 knots 선속에 대해 자향시험을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 예인속도는 4 knots로 고정되었으며, 로터 회전수(n)를 변경하여 전진비($J=U/nD_p$)에 대한 결과를 표시하였다.

로터 회전수가 증가함에 따라 무인잠수정에 작용하는 차원화된 외력의 합이 선형적으로 증가하는 것을 확인하였다. 내삽을 통해 자향점 회전수를 도출하였으며, 4 knots 선속을 유지하기 위한 로터 회전수는 8.01 rps이다. 유체력 미계수 도출을 위한 구속모형시험에서 로터 회전수는 8.01 rps로 고정하여 시험을 수행하였다.

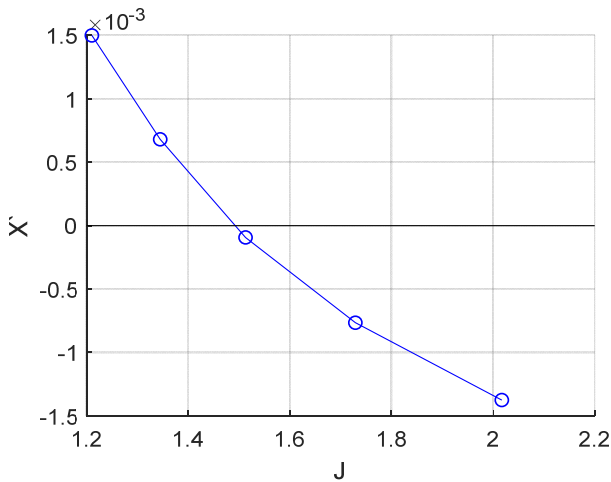


Fig. 5 Self-propulsion test results

4.3 수직면 사향시험

구속모형시험을 위한 모형의 내부 질량 분포는 실제 무인잠수정과 달라서, 종동요 각도 변화 시에는 모형의 무게와 부력 차이로 인한 하중 변화를 고려해야 한다. 모형잠수정에 부착된 센서는 물체고정좌표계를 기준으로 힘을 계측하기 때문에, 종동요 각도 변경 시에 각 센서에 작용하는 하중의 크기는 식 (10)과 같이 변하게 된다. 이 때, W는 모형잠수정의 무게, B는 모형잠수정의 부력, θ 는 종동요 각도이다.

$$X_{HS} = -(W - B)\sin\theta, Z_{HS} = (W - B)\cos\theta \quad (10)$$

종동요 각도가 변하는 수직면 사향시험과 순수 종동요 시험에서는 유체력 이외에 정적 불평형력이 센서에 계측되며, 계측된 힘에서 정적 불평형력을 제외한 순수한 유체력을 이용하여 결과를 분석하여야 한다. 정지된 상태에서 종동요 각도를 2° 간격으로 변경하며 X_{HS} 와 Z_{HS} 를 계측하였다.

종동요 각도 변화에 따라 발생하는 모멘트는 식 (11)과 같으며, 정지된 상태에서 종동요 각도를 변경하며 M_{HS} 를 계측하였다. 종동요 각도가 변화하는 모형시험에서는 계측된 결과에서 X_{HS} , Z_{HS} , M_{HS} 에 의한 영향을 소거하여 유체력 미계수를 도출하였다.

$$M_{HS} = -(z_G W - z_B B)\sin\theta - (x_G W - x_B B)\cos\theta \quad (11)$$

상하동요 속도에 의한 전후동요 힘, 상하동요 힘, 종동요 모멘트는 식 (12)와 같으며, 실험결과와 유체력 미계수를 이용한 추세선 결과는 Fig. 6에 나타내었다.

$$\begin{aligned} X &= X_{uu}u^2 + X_{ww}w^2 \\ Z &= Z_w w + Z_{|w|}w|w| \\ M &= M_w w + M_{|w|}w|w| \end{aligned} \quad (12)$$

계측된 힘과 모멘트 결과는 무차원화하여 나타내었으며, 무

차원화된 상하동요 속도는 $\sin(\alpha)$ 로 정의된다. Fig. 6의 외력들은 수직면 받음각 변화에 따른 동체 유체력 변화뿐만 아니라, 유입류 조건 변화에 따른 추력 감소 및 축기진력에 의한 모멘트 변화도 포함되었다. 수직면 받음각이 발생하여 추진기로 유입되는 유동이 불균일해짐에 따라 추진기가 부착되지 않은 상태에 비해 추가적인 유체력이 작용하게 된다. 수직면 받음각이 10도 이상일 때 상하동요 힘과 종동요 모멘트 결과의 비선형성이 확인되며, 이는 대각도에 따른 유동분리 현상으로 사료된다.

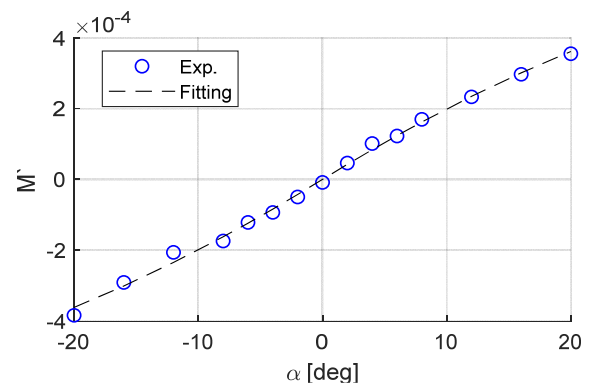
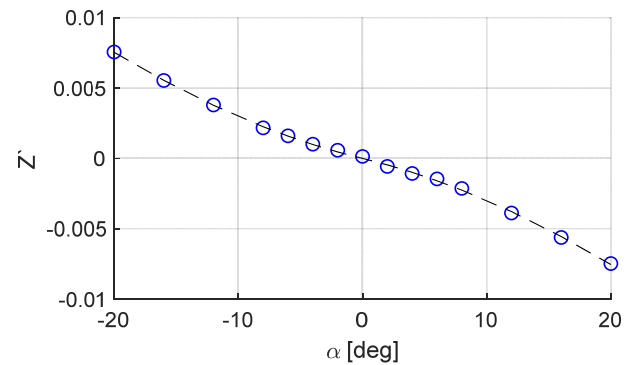
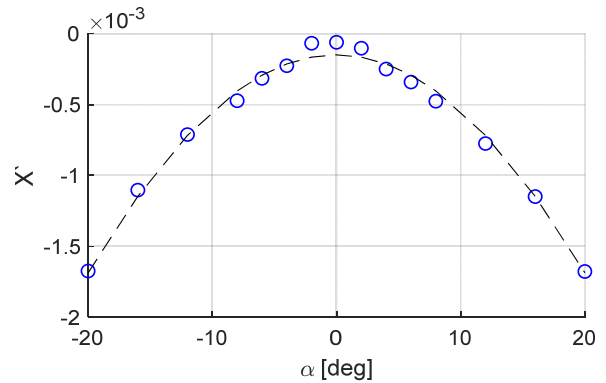


Fig. 6 Static drift test results

4.4 제어판 시험

제어판 시험에서는 좌우 제어판의 받음각(δ_0)을 3도 간격으로 동일하게 변경하였으며, 그에 따른 외력을 계측하였다. 제어판 받음각에 의한 전후동요 힘, 상하동요 힘, 종동요 모멘트는 식 (13)과 같이 구성하였으며, 실험결과와 유체력 미계수를 이

용한 추세선 결과는 Fig. 7에 나타내었다.

$$\begin{aligned} X &= X_{\delta_e} \delta_e^2 \\ Z &= Z_{\delta_e} \delta_e + Z_{\delta_e|\delta_e} |\delta_e| \\ M &= M_{\delta_e} \delta_e + M_{\delta_e|\delta_e} |\delta_e| \end{aligned} \quad (13)$$

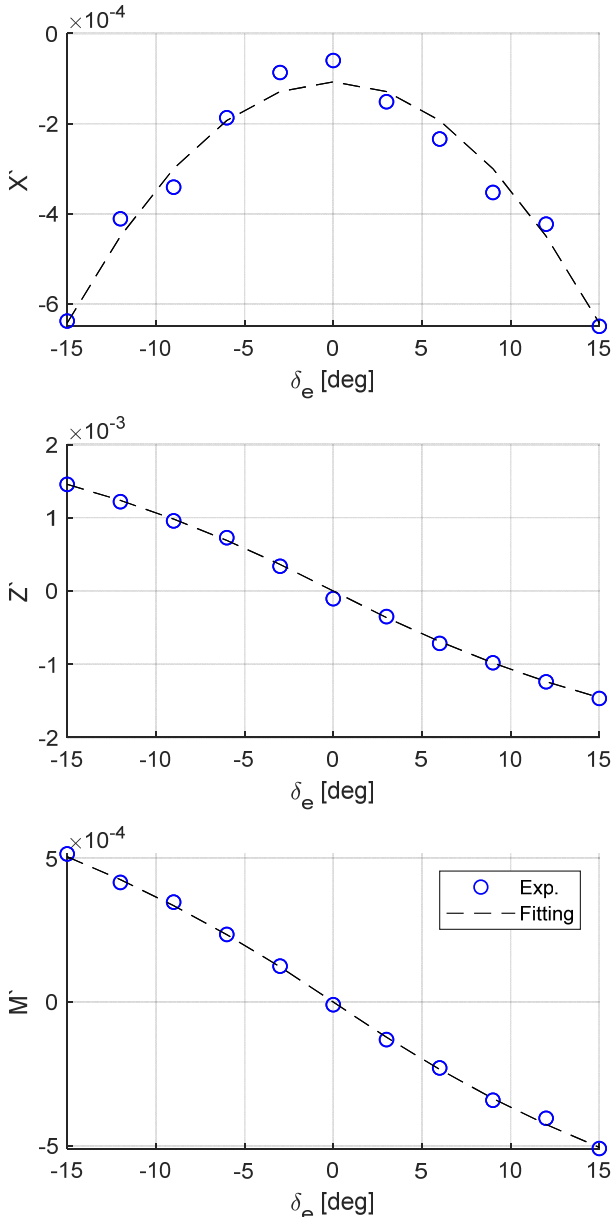


Fig. 7 Control surface test results

자항 상태에서는 로터 회전으로 인한 유동 가속화가 예상되며, 로터 앞에 위치한 제어판의 국부 유속에 영향을 미치게 된다. 제어판의 국부 유속이 증가할 시에 제어판에 의한 항력, 양력, 모멘트가 증가하게 되며, 동체에 작용하는 전체 외력을 계측하여 이러한 영향이 유체력 미계수에 포함되도록 하였다. 제어판의 받음각이 10도 이상일 때 상하동요 힘과 중동요 모멘트 결과의 비선형성이 확인되며, 이는 대각도에 따른 유동분리 현상으로 사료된다.

4.5 순수 상하동요 시험

순수 상하동요 시험에서는 일정 속도로 모형을 예인하면서 중동요 없이 오직 상하로만 동요시키며, 힘과 모멘트를 계측하였다. 상하동요 진폭은 0.05 m로 고정되었으며, 상하동요 운동의 주파수 조건을 변경하며 실험을 수행하였다. 순수 상하동요 시 상하동요 변위, 속도, 가속도는 식 (14)와 같다.

$$\begin{aligned} z &= z_0 \sin \omega t, \quad w = z_0 \omega \cos \omega t, \quad \dot{w} = -z_0 \omega^2 \sin \omega t \\ \theta &= q = \dot{q} = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

상하동요에 의해 발생하는 외력을 속도와 가속도에 의한 항으로 나누어 분석하였다. 속도에 의한 외력은 수직면 시험으로부터 도출되었으므로, 가속도에 의한 외력만을 추출하여 가속도 관련 미계수를 도출하였다.

상하동요 힘과 중동요 모멘트는 가속도에 의한 1차식으로 식 (15)와 같이 구성하였으며, 아래첨자 acc는 가속도 성분에 해당하는 힘과 모멘트를 의미한다. 계측된 상하동요 힘에는 질량 성분이 포함되기 때문에 식 (15)와 같이 실험 모형의 질량에 의한 영향을 소거하여 유체력 미계수를 도출하였다. 각 시험에서 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform, FFT)을 통해 얻어진 유체력 미계수와 상하동요 가속도의 진폭을 이용하여 가속도

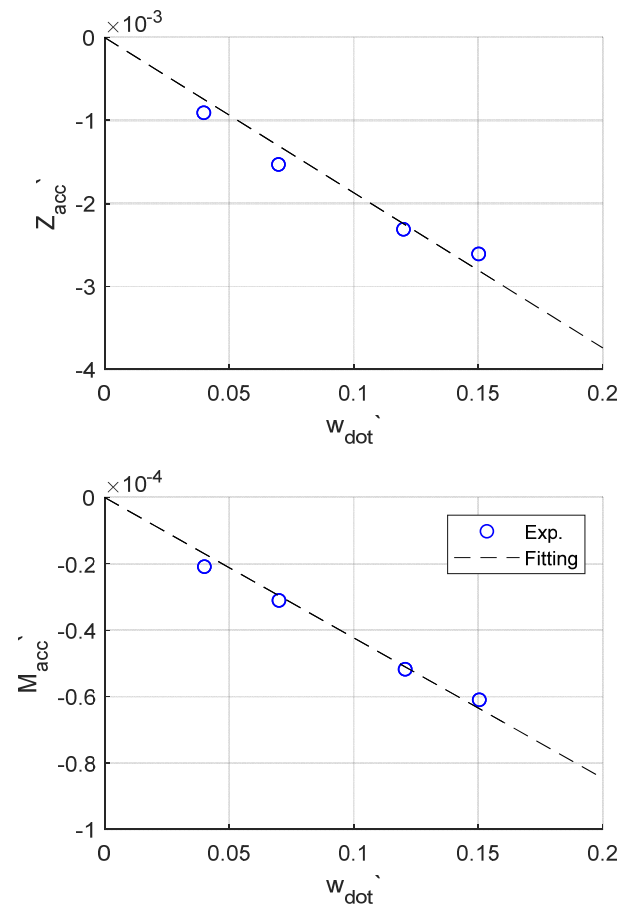


Fig. 8 Pure heave test results

성분에 대한 힘과 모멘트를 계산하고 이를 Fig. 8에 나타내었다. 전체 시험 조건에 대한 유체력 미계수는 최소 자승법을 이용하여 도출하였다.

$$Z_{acc} = (Z_w - m)\dot{w} \quad (15)$$

$$M_{acc} = M_w \dot{w}$$

자항 상태에서는 추진기의 부착으로 인한 선미의 부가질량 성분이 증가할 것으로 예상되며, 이는 상하동요 힘과 종동요 모멘트 가속도 성분에 영향을 미칠 것으로 예상된다.

4.6 순수 종동요 시험

순수 종동요 시험에서는 일정 속도로 모형을 예인하면서 상하동요 속도가 발생하지 않도록 종동요 각도를 변화시키며 힘과 모멘트를 계측하였다. 상하동요 진폭은 0.05 m로 순수 상하동요 시험과 동일하며, 종동요 운동의 주파수 조건을 변경하며 실험을 수행하였다. 순수 종동요 시 상하동요 변위와 종동요 변위는 식 (16)과 같다.

$$z = z_0 \sin \omega t, \quad w = U \sin \theta + z_0 \omega \cos \omega t \times \cos \theta \quad (16)$$

$$\theta = -\theta_0 \cos \omega t, \quad q = \theta_0 \omega \sin \omega t, \quad \dot{q} = \theta_0 \omega^2 \cos \omega t$$

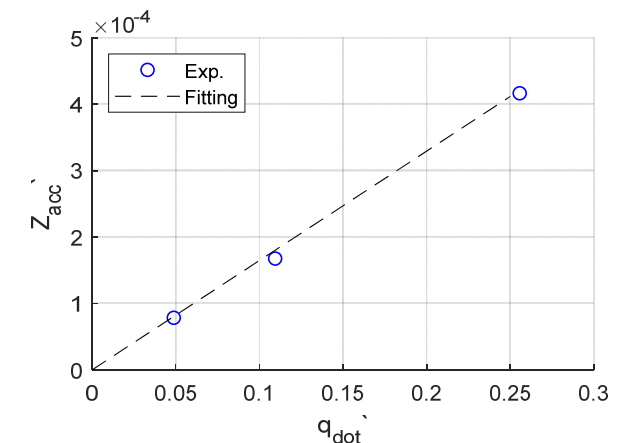
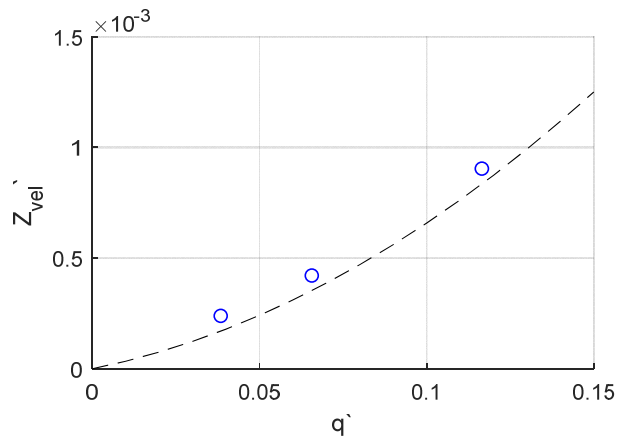


Fig. 9 Pure pitch test results - Heave force

순수 종동요 시험에서는 종동요 각속도, 각가속도에 의한 미계수를 추출하였으며, 종동요 각도 변화에 의한 하중 변화를 제외한 외력만을 사용하였다. 순수 종동요 시험이 수행된 3가지 주파수 조건에서 속도 성분(vel)과 가속도 성분(acc)을 분리하였다. 계측된 종동요 모멘트에는 실험 모형의 질량관성모멘트 성분이 포함되기 때문에 식 (17)과 같이 질량관성모멘트에 의한 영향을 소거하여 유체력 미계수를 도출하였다.

본 연구에 사용된 무인잠수정은 수중정보 탐색용으로 급격한 기동이 발생하지 않는 점을 고려하여 운동의 연성항 및 운동 범위를 고려할 때 영향이 작은 $\chi_{\alpha\alpha}$ 항은 고려하지 않았다.

$$Z_{vel} = Z_q q + Z_{q\dot{q}} q \dot{q} \quad (17)$$

$$M_{vel} = M_q q + M_{q\dot{q}} q \dot{q}$$

$$Z_{acc} = Z \dot{q}$$

$$M_{acc} = (M_q - I_y) \dot{q}$$

각 시험에서 도출된 유체력 미계수 값과 속도 성분, 가속도 성분의 진폭을 곱한 결과를 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다. 전체 시험 조건에 대한 유체력 미계수 도출 시에는 최소 자승법을 이용하였다. 종동요 각속도에 의해 로터의 상부와 하부에 불균일한 유입류가 들어오게 되며, 로터에 의한 부가질량 증가로 인한 유체력 변화가 예상된다. 동체에 작용하는 전체 외력을 계측하여 이러한 영향을 포함한 유체력 미계수를 도출하였다.

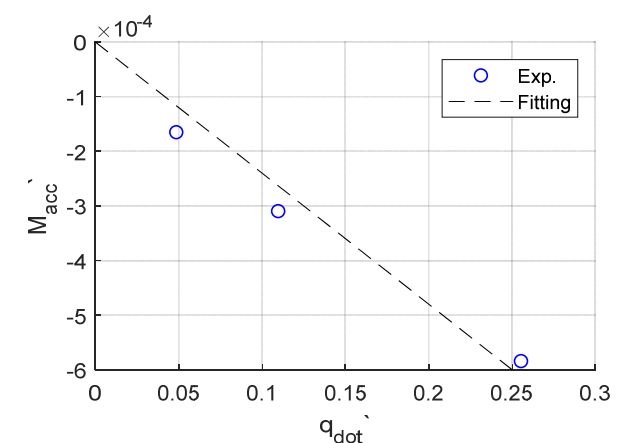
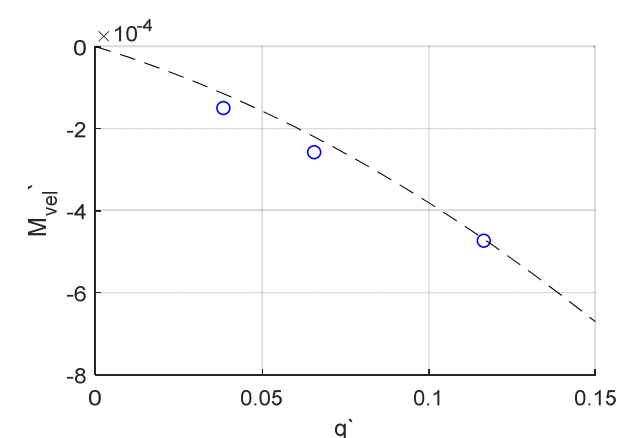


Fig. 10 Pure pitch test results - Pitch moment

순수 종동요 시험에서 전후동요 힘의 변화는 정적하중의 변화가 지배적으로 계측되었으며, 종동요 속도에 의한 $X_{\dot{q}_q}$ 항의 경향성은 확인되지 않았다. 종동요 각도 변화 시에 x축 방향으로 이동하는 LM 가이드가 z축 방향으로 힘을 받게 되면 x축으로 미끄럽게 이동하지 못하여 미세한 힘의 경향성을 추정하지 못 하는 것으로 판단된다.

5. 조종 시뮬레이션

앞서 도출된 유체력 미계수들을 이용하여 선회시험에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 상하, 좌우 대칭 형상을 고려하여 수직면 유체력 미계수들을 수평면 유체력 미계수로 변환하여 사용하였다. 좌우의 제어판은 동일한 각도로 변경하며, 횡동요가 발생하지 않는 3자유도 운동을 구현하였다. 전방 스테이터가 로터에 의해 발생하는 토크 불균형을 감소시키기 때문에, 횡동요 운동은 발생하지 않는다고 가정하였다.

시뮬레이션에 사용된 유체력 미계수는 Table 3과 같으며, 도출된 유체력 미계수의 타당성을 검증하기 위해 Park et al. (2017)의 결과와 비교하였다. Park et al. (2017)은 L/D가 10.9 인 잠수함에 대해 예인수조 모형시험을 통해 유체력 미계수를 도출하였으며, 그 결과를 Table 3에 아래 첨자 Park로 표시하였다. 선행연구의 잠수함의 L/D는 10.9, 본 연구의 무인잠수정

의 L/D는 10.0으로 비슷하나, 잠수함은 중앙에 세일이 부착되어 있어 형상의 차이가 존재한다.

선행연구에서는 추진기가 부착되지 않은 동체-제어판에 대해 실험을 수행하여 추진기에 의한 영향이 고려되지 않았다. 본 연구에 사용된 무인잠수정의 L/D가 작고 상대적으로 직경이 크기 때문에, X_{uu} 미계수는 선행연구에 비해 증가하였고, Z_w , M_w 미계수는 양력이 감소함에 따라 그 크기가 감소하였다. Park et al. (2017)의 연구에서는 무차원화된 w인 $\sin(\alpha)$ 를 사용하지 않고 수직면 받음각도(α)로 유체력 미계수를 도출하였으나, 수직면 받음각이 작은 경우에는 결과의 차이가 미미하다. 선행연구와는 유체력 미계수의 차이가 존재하나, 전반적인 크기가 비슷하고 잠수체의 세일 존재 유무, L/D 차이, 추진기 영향에 의한 유체력의 차이가 필수적이라 본 연구에서 도출된 유체력 미계수들이 타당하다고 볼 수 있다.

대상 무인잠수정에 대한 조종 시뮬레이션 결과를 자유항주 시험 결과와 비교하였다. 자유항주시험에 사용된 무인잠수정은 길이 2 m로 모형시험과 동일한 축척비를 가지며, 축척효과에 대한 고려 없이 결과의 비교가 가능하다. 로터 회전수 500 rpm, 타각 10도 선회시험에 대한 시뮬레이션과 자유항주시험 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 파란색 실선 궤적은 Table 3의 유체력 미계수들을 이용한 시뮬레이션 결과이며, 검은색 점선 궤적은 (주)한화시스템에서 수행한 자유항주시험 결과이다.

Table 3 Hydrodynamic coefficients

Parameter	Value	Parameter	Value	Parameter	Value
X_{uu}	-1.5949 e-03	Z_w	-1.2180 e-02	M_w	1.2393 e-03
$X_{uu, Park}$	-1.264 e-03	$Z_{\alpha, Park}$	-2.110 e-02	$M_{\alpha, Park}$	4.295 e-03
X_{ww}	-1.3159 e-02	$Z_{w w }$	-2.8815 e-02	$M_{w w }$	-5.3309 e-04
		$Z_{\dot{w}}$	-1.8705 e-02	$M_{\dot{w}}$	-4.2291 e-04
		$Z_{\dot{w}, Park}$	-1.247 e-02	$M_{\dot{w}, Park}$	-8.671 e-04
		Z_q	3.0738 e-03	M_q	-2.4774 e-03
		$Z_{q, Park}$	-5.636 e-03	$M_{q, Park}$	-3.177 e-03
		$Z_{q q }$	3.5095 e-02	$M_{q q }$	-1.3316 e-02
		$Z_{\dot{q}}$	1.6460 e-03	$M_{\dot{q}}$	-2.3970 e-03
		$Z_{\dot{q}, Park}$	1.978 e-03	$M_{\dot{q}, Park}$	-2.349 e-03
$X_{\delta_e \delta_e}$	-7.8056e-03	Z_{δ_e}	-7.2833 e-03	M_{δ_e}	-2.4393 e-03
		$Z_{\delta_e \delta_e }$	6.5666 e-03	$M_{\delta_e \delta_e }$	1.9534 e-03

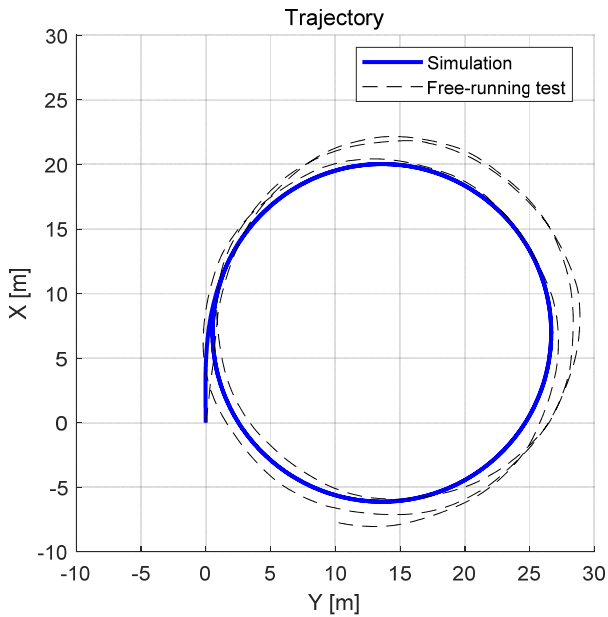


Fig. 11 Turning circle simulation and free-running test results

선회시험 시뮬레이션과 자유항주시험에서 로터 회전수는 500 rpm으로 유지되었다. 유체력 미계수가 도출된 구속모형시험에서는 4 knots 선속의 자항점인 480 rpm에서 모든 시험이 수행되었다. 구속모형시험과 자유항주시험의 로터 회전수 차이가 4% 이내이고, 궤적을 확인하였을 때 모형시험에서 추정된 추진기의 영향이 실제 운용상황을 잘 묘사함을 확인하였다. 자유항주시험에서는 외란의 영향으로 인해 불균일한 힘이 발생할 수 있으며, 이로 인해 종동요, 횡동요 각도가 발생하여 6자유도 운동을 하게 된다. 시뮬레이션 시에는 종동요, 횡동요 운동을 무시한 3자유도 운동방정식을 이용하였고, 비선형 항의 영향이 작을 것으로 가정하여 무시하였다. 시뮬레이션에서 계산된 선회 반지름은 13.07 m로 6.54 L 에 해당되며, 자유항주시험에서 측정된 선회 반지름은 14.25 m로 7.13 L에 해당된다. 자유항주시험 결과와 비교하였을 때, 본 연구에서 수행된 조종 시뮬레이션이 실제 상황을 잘 묘사함을 확인하였다.

6. 결론

본 논문에서는 무인잠수정의 저항, 추진, 조종성능 평가를 위한 자항 중 VPMM 시험을 수행하였으며, 자항 중 유체력 미계수를 도출하여 조종 시뮬레이션의 정확도를 높이고자 하였다. 서울대학교 예인수조에서 LM 가이드를 이용한 VPMM 장비를 도입하여 실험을 설계 및 수행하였다.

순수 종동요 시험에서 전후동요 힘은 정적하중의 변화가 지배적으로 예측되었으며, 대상 AUV의 종동요 기동이 큰 각속도 범위에서 발생하지 않으므로 매우 작은 영향을 보일 것으로 판단된다. 작은 종동요 운동 범위를 고려한 시험에서도 종동요 운동에 의한 전후동요 힘의 경향성이 명확히 나타나지 않아, X_{qq}

항은 유체력 모델에 고려하지 않았다.

수직면 받음각 변화 시에는 추진기로 유입되는 유동의 변화로 인해 추력이 감소하고 축기진력 특성이 변화하게 되는데, 무인잠수정에 작용하는 전체 외력을 계속하여 자항 상태에서 추진기 작동상황을 고려한 유체력 미계수를 도출하였다. 도출된 유체력 미계수들을 기반으로 한 시뮬레이션을 이용하여 대상 무인잠수정의 조종성능을 실제 상황과 유사하게 예측할 수 있었으며, 실제 운용상황에서 무인잠수정의 거동에 대한 근거자료로 사용할 수 있다. 횡동요 운동과 비선형 항들에 대한 정밀한 유체력 모델링을 수행하면 시뮬레이션의 정확도가 더 확보될 것으로 예상된다.

후기

본 연구는 한화시스템(주) “수조 모형 시험을 통한 도킹용 무인잠수정 조종 성능 해석 위탁 연구(과제번호: 0668-20180177)”, “6자유도 시뮬레이션을 통한 도킹용 무인잠수정 조종 성능 해석 위탁 연구(과제번호: 0668-20180178)”의 지원으로 수행된 연구결과 중 일부를 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- De Barros, E.A. & Dantas, J.L.D., 2012. Effect of a propeller duct on AUV maneuverability. *Ocean Engineering*, 42, pp.61-70.
- Feldman, J., 1979. *Revised Standard Submarine Equations of Motion*, DTNSRDC/SPD-0393-09.
- Gertler, M. & Hagen, G.R., 1967. *Standard equation of motion for submarine simulation*. NSRDC-Report SR 009 01 01, Task 0102. Maryland: David W. Taylor Naval Ship R&D Center.
- Jung, J.W., Jeong, J.H., Kim, I.G. & Lee, S.K., 2014. Experimental study on hydrodynamic coefficients of autonomous underwater glider using vertical planar motion mechanism test. *Journal of the Korean Society of Ocean Engineers*, 28(2), pp.119-125.
- Lee, H.Y., Yum, D.G., Shin, S.S., & Lee, T.I., 1997. Prediction of Manoeuvrability using PMM model tests - Comparative study of mathematical models. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 34(2), pp. 48-55
- Park, J.Y., Kim, N., & Shin, Y.K., 2017. Experimental study on hydrodynamic coefficients for high-incidence-angle maneuver of a submarine. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 9(1), pp.100-113.
- Prestero, T.T.J., 2001. *Verification of a 6-degree of freedom simulation model for the REMUS AUV*.
- Rhee, K.P., Yoon, H.K., Sung, Y.J., Kim, S.H. & Kang, J.N., 2000. An experimental study on hydrodynamic coefficients

of submerged body using planar motion mechanism and coning motion device. *International Workshop on Ship Maneuverability*, pp.1–20.

Seol, D.M., Rhee, K.P., & Yeo, D.J., 2005. An experimental study of the submerged depth effect on the manoeuvrability in a horizontal plane of an underwater vehicle. *Journal of the Korean Society of Ocean Engineers*, 42(6), pp.551–558.

Shin, Y.K., & Lee, S.K., 2005. A study on the modeling of hydrodynamic coefficient for the emergency maneuver simulation of underwater vehicle. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 42(6), pp. 601–607.

Watt, G.D., 2007. *Modelling and Simulating Unsteady Six Degrees-of-freedom Submarine Rising Maneuvers*. DRDC Atlantic TR 2007–008.

