

심해용 무인 잠수정의 동역학 계수의 추정에 관한 연구

백혁* · 김기훈* · 전봉환* · 이판목* · 임용곤*
*한국해양연구원 해양시스템안전연구소

Estimation of the Hydrodynamic Coefficients for the Deep-sea UUV "HEMIRE"

HYUK BAEK*, KI-HUN KIM*, BONG-HUAN JUN*, PAN-MOOK LEE* AND YONG-KON LIM**

*Ocean Engineering Research Department, KORDI/MOERI, Daejeon, Korea

KEY WORDS: Deep-sea unmanned underwater vehicle 심해무인잠수정 Hydrodynamic coefficient 동역학계수 Mathematical model 수학적 모델, System identification 시스템 식별

ABSTRACT: This paper represents the experimental identification of a finite-dimensional dynamical plant model for the HEMIRE Remotely Operated Vehicle. The experiments were conducted during sea trials in the East Sea in October 2006 and peer testing by the South Sea Research Institute in January 2007. A least-squares method was employed to identify decoupled single degree-of-freedom plant dynamical models for the X, Y, Z and heading degree-of-freedom from experimental data. The performance of the identified plant dynamical model was evaluated by directly comparing simulations of the identified plant model to the experimentally observed motion data from the actual vehicle.

1. 서 론

본 논문에서는 한국해양연구원에서 개발한 6,000m급 심해용 무인잠수정의 수학적 모델의 계수 추정에 대하여 다루었다.

원격조종무인잠수정(ROV)과 자율무인잠수정(AUV)을 정밀하게 제어하기 위해서는 수학적 모델링 기반의 제어기설계가 요구되며, 수학적 모델이 실제 무인잠수정을 묘사하는 정확도에 따라 제어기의 성능에 큰 차이를 보이게 된다. 유체동역학을 고려한 수학적 모델을 추정하는 기법에는 PMM 테스트, 수치 해석 등의 다양한 기법을 사용하는데, 최근에는 실제 모델의 입력과 출력 정보로부터 수학적 모델의 유체동역학 계수를 추정하는 시스템 식별 기법이 대두되고 있다. 시스템 식별 기법은 개발자의 개발 시간을 단축시켜 줄 뿐 아니라 실물의 정보를 바탕으로 수학적 모델을 구성하기 때문에 모델링 오차를 줄여줄 수 있는 방법으로 평가되고 있다. 반면, 시스템 식별은 실제 물리 현상을 반영하는 수학적 모델 설계와 식별에 필요한 제어 입력과 센서 출력 데이터를 얼마나 정밀하게 측정하는지에 따라 그 식별 모델의 성능이 달라질 수 있으므로 주의가 요망된다.

본 연구에서는 심해무인잠수정의 상하(Heave)운동과 선수동요(Yaw)운동에 대한 시스템 식별을 수행하고 검증하였으며,

추정된 수학적 모델의 성능을 검증하기 위하여 별도의 데이터 세트를 수치모델에 적용하여 기존 계수의 정확도를 검증하였다. 상하운동시의 입출력 데이터는 2006년 동해 실패역 성능 시험에서 CTD 센서로 측정한 심도데이터를 사용하였고, 선수동요운동시의 입출력 데이터는 2007년 남해연구소 부두에서 Octans 6000 IMU 센서로 측정한 선수각, 선수각속도 데이터를 사용하였다(백혁 등, 2007; 백혁, 2007).



Fig. 1 Photo of ROV, Hemire

교신저자 백 혁 : 대전광역시 유성구 장동 171

042-869-0436 hbaek@moeri.re.kr

Table 1 Sensors for ROV Hemire

Sensors	Maker / Model	Specifications
Altimeter	Tritech / PA500	Freq.: 500 kHz, Range: 50 m
IMU	Ixsea / Octans 6000	Resolution: 0.01 deg
CTD	Seabird / SBE49	Temperature: 1e-4 C Conductivity: 5e-5 S/m Resolution: 0.14 m Posidonia 6000
USBL Transponder	Ixsea / ET861S	Type: MFSK, Freq.: 7.5-18 kHz
DVL	RDI / WHN1200	Freq.: 1200 kHz
Forward Looking sonar	MSI 1000	Freq.: 675 kHz
Porfiling sonar	"	"
Cameras	Kongsberg / OE14-121	3CCD Camera, Digital Still Camera, SIT, Two color camera, Three mono cameras

2. 해미래의 시스템 사양

Fig. 1에 보이는 해미래의 개발로 대한민국은 세계에서 4번째 6,000m급 심해무인잠수정 보유국이 되었다. 해미래는 진수장치인 해누비와 2차 케이블을 통하여 연결되며, 해누비는 모선인 온누리호와 1차 케이블로 연결된다. 해미래는 공기 중에서 약 3,660kg에 달하며 해수 중에서는 약간의 양성 부력을 가진다.

6개의 추진기를 사용하여 4자유도의 운동을 제어할 수 있으며, 해미래의 설계 운항속도는 전진 1.5knots, 수직 1.0knots 그리고 측방 1.0knots이다. Table 1은 해미래에 탑재되어 있는 센서의 주요사양을 정리한 것이다. 자세한 해미래의 사양은 논문(이관목 등, 2006)을 참고하기 바란다.

3. 수학적 모델

심해무인잠수정의 제어를 위한 제어력은 유체동역학(가속 혹은 등속운동) 및 정역학적 힘과 같다는 물리적 의미를 가진다(Feldman 1976, Gertler and Hange 1967). 본 절에서는 심해무인잠수정 해미래의 시스템 식별을 위한 수학적 모델을 정의하고 식별 기법에 대해 소개하기로 한다.

3.1 해미래의 좌표계

심해무인잠수정의 위치와 자세를 나타내기 위해서 지구고정좌표계와 항체고정좌표계를 정의하여야 한다. 지구고정좌표계

Table 2 Nomenclature

Degree of freedom	Force moment	Linear Velocity angular Velocity	Linear position angular position
1: Surge	$\tau_1(t)$	$v_1(t)$	$x_1(t)$
2: Sway	$\tau_2(t)$	$v_2(t)$	$x_2(t)$
3: Heave	$\tau_3(t)$	$v_3(t)$	$x_3(t)$
4: Yaw	$\tau_4(t)$	$v_4(t)$	$x_4(t)$
5: Pitch	$\tau_5(t)$	$v_5(t)$	$x_5(t)$
6: Roll	$\tau_6(t)$	$v_6(t)$	$x_6(t)$

는 수중 운동체가 출발하는 지점에 대한 해수면상의 한 점을 원점으로 하여 수중운동체가 진행하는 방향을 x 축, 해수면에 수직인 아래쪽 방향을 z 축, 그리고 오른손 법칙을 사용하여 이미 구해진 두 축으로부터 결정되는 방향을 y 축으로 정의한다. 항체고정좌표계는 지구고정 좌표계에 대해 움직이고 그 중심이 잠수정의 부력중심과 일치시킬 때 얻어지는 좌표계이다. 지구고정좌표계와 항체고정좌표계의 자세는 오일러 각으로 표시할 수 있는데, 오일러각은 지구고정좌표계의 각 축에 대하여 반시계 방향으로 회전시켜 항체고정좌표계에 일치시킬 때 얻어지는 각이다. Table 2는 해미래의 각 자유도에 대한 힘, 모멘트, 속도, 각속도, 변위 그리고 각도를 적용한 것으로 본 논문에서는 4자유도로 운동하는 해미래를 각 자유도로 작용하는 운동은 다른 자유도와의 연성을 무시한다는 전제로 각각 분리하여 실험하였다.

3.2 심해무인잠수정의 수학적 모델

해미래와 같은 심해무인잠수정의 동유체력을 모사하기 위해서는 모리슨식 형태의 상대 유속에 의한 저항력을 고려하는 다음과 같은 수학 모델이 적합하다.

$$\vec{\tau}(t) = M\vec{v} + d_Q\vec{v}|\vec{v}| + d_L\vec{v} + b \tag{1}$$

여기서 $\vec{v}(t) \in R^{6 \times 1}$ 와 $\dot{\vec{v}}(t) \in R^{6 \times 1}$ 는 각각 항체고정좌표계에서의 항체의 속도와 가속도를 나타낸다. $\vec{\tau}(t) \in R^{6 \times 1}$ 는 항체고정좌표계에서 항체의 추력을 나타낸다. M 은 항체의 가속운동과 관련된 유효질량으로써 항체의 질량과 부가질량의 합으로 정의된다. $d_Q\vec{v}|\vec{v}|$ 는 상대유속을 고려한 모리슨식 형태의 점성 저항, $d_L\vec{v}$ 는 항체 속도에 비례하는 점성저항, b 는 부력과 중력의 차이에 의한 유체정역학적 힘을 나타낸다. 식 (1)에서 고려되지 않은 테더케이블의 영향, 수심에 따른 밀도 변화, 환경외란으로 인한 하중 등은 그 복잡함에 비하여 해미래의 운동에 큰 영향을 미치지 않으므로 본 연구에서는 무시하였다. 해미래는 전후운동, 좌우운동, 상승하강운동 그리고 선수동요운동의 4자유도운동으로 제어할 수 있으며, 각 자유도간의 운

Table 3 Value of lumped parameters

Lumped parameters	Physical definition
α_i	m_i^{-1}
β_i	$-m_i^{-1}d_{Q_i}$
μ_i	$-m_i^{-1}d_{L_i}$
ν_i	$-m_i^{-1}b_i$

동을 연성되어 있지 않은 독립적인 운동이라고 가정하면 식 (2)와 같이 기술할 수 있다.

$$\tau_i(t) = m_i \dot{v}_i + d_{Q_i} v_i(t) |v_i(t)| + d_{L_i} v_i(t) + b_i, \quad (2)$$

$$m_i > 0; d_{L_i}, d_{Q_i} > 0$$

식 (2)를 $\dot{v}_i(t)$ 에 대해 정리하면 식 (3)과 같다.

$$\dot{v}_i(t) = m_i^{-1} \tau_i(t) - m_i^{-1} d_{Q_i} v_i(t) |v_i(t)| - m_i^{-1} d_{L_i} v_i(t) - m_i^{-1} b_i \quad (3)$$

여기서, $\tau_i(t)$ 는 자유도 i 에 대한 제어력이고, m_i 는 유효질량이다. $d_{Q_i} v_i(t) |v_i(t)|$ 와 $d_{L_i} v_i(t)$ 는 각각 이차점성력과 선형점성력을 나타낸다. 그리고 b_i 는 유체정역학적 힘인 부력을 나타낸다(Smallwood, 2003a). 식 (3)을 Table 3과 같이 Lumped parameters를 사용하여 치환하면 식 (4)와 같다

$$\dot{v}_i(t) = \alpha_i \tau_i + \beta_i v_i(t) |v_i(t)| + \mu_i v_i(t) + \nu_i \quad (4)$$

식 (4)에 벡터를 사용하여 기술하면 식 (5)와 같이 간단하게 나타낼 수 있다.

$$\dot{V}(t)_i = \Phi_i^T F(t)_i \quad (5)$$

여기서, Φ_i 와 $F(t)_i$ 값은 각각 식 (6)과 식 (7)로 나타낼 수 있다.

$$\Phi_i = [m_i^{-1}, -m_i^{-1}d_{Q_i}, -m_i^{-1}d_{L_i}, -m_i^{-1}b_i]^T \quad (6)$$

$$F(t)_i = [\tau(t)_i, v_i |v_i|, v_i, 1]^T \quad (7)$$

식 (5)는 선형식이므로 해미래의 동유체력 계수 식별을 위하여 최소자승법을 이용하기로 한다. 이 방법은 제어력 $\tau(t)_i$,

속도 $v(t)_i$, 가속도 $\dot{v}(t)_i$ 그리고 각각의 자유도 i 값을 필요로 한다. n 개 시간 스텝에 대한 행렬식을 아래의 식 (8)과 식 (9)로 정의하면, 다음 식 (10)을 얻을 수 있다. 여기서 t_1, t_2, \dots, t_n 은 샘플링시각을 나타낸다.

$$\dot{\bar{V}}_i = [\dot{v}(t_1)_i, \dots, \dot{v}(t_n)_i]_{1 \times n} \quad (8)$$

$$\bar{F}_i = [F(t_1)_i, \dots, F(t_n)_i]_{4 \times n} \quad (9)$$

$$\dot{\bar{V}}_i = \Phi_i^T \bar{F}_i \quad (10)$$

\bar{F}_i 의 랭크가 4이면, Φ_i 벡터를 식 (10)으로부터 다음의 과정으로 의사역행렬로 풀 수 있다.

$$\dot{\bar{V}}_i = \Phi_i^T \bar{F}_i$$

$$\dot{\bar{V}}_i \bar{F}_i^T = \Phi_i^T \bar{F}_i \bar{F}_i^T$$

$$\dot{\bar{V}}_i \bar{F}_i^T (\bar{F}_i \bar{F}_i^T)^{-1} = \Phi_i^T \bar{F}_i \bar{F}_i^T (\bar{F}_i \bar{F}_i^T)^{-1}$$

$$\dot{\bar{V}}_i \bar{F}_i^T (\bar{F}_i \bar{F}_i^T)^{-1} = \Phi_i^T$$

미지의 파라미터 벡터 Φ_i 에 대한 최소자승법의 해는 식 (11)과 같이 주어진다.

$$\Phi_i = (\dot{\bar{V}}_i \bar{F}_i^T (\bar{F}_i \bar{F}_i^T)^{-1})^T \quad (11)$$

4. 해미래의 동역학 계수 추정

4.1 실험 개요

본 연구의 식별을 수행하기 위한 심해무인잠수정 해미래의 입출력 데이터는 2006년 10월 동해 울릉분지 약 2,000m 심도 해역에서 얻은 실험데이터와 2007년 1월 남해연구소 부두에서 수행한 실험데이터를 사용하였다.

상하운동에 대한 모델은 2006년 10월 울릉분지에서 수행한 실험데이터 중 상승, 하강 모드의 추진기 회전수와 이 때 계측된 심도 데이터를 이용하여 식별하였으며, 선수동요운동에 대한 모델은 2007년 1월 남해연구소 부두에서 수행한 선수동요운동중의 추진기 회전수와 이때 계측된 선수각과 각속도 정보를 이용하여 식별하였다. 해미래의 항법 정보를 획득하기 위한 센서는 Table 1에 자세히 나와 있다. 상하운동중의 심도(x_3) 값은 해미래에 탑재된 Seabird사의 압력계를 사용하여 계측하였고, 상하운동시의 속도와 가속도는 심도 정보에 Moving average 알고리즘을 적용한 후 수치 미분을 통하여 계산하였다. 또한 해미래의 선수동요운동중의 선수각(x_4)과 선수각속도(v_4) 정보는 해미래에 탑재된 고정밀 IMU Octans 6000을 사용하여 계측하였으며, 선수각가속도 값은 계측된 선수각속도 값을 수치 미분하여 구하였다.

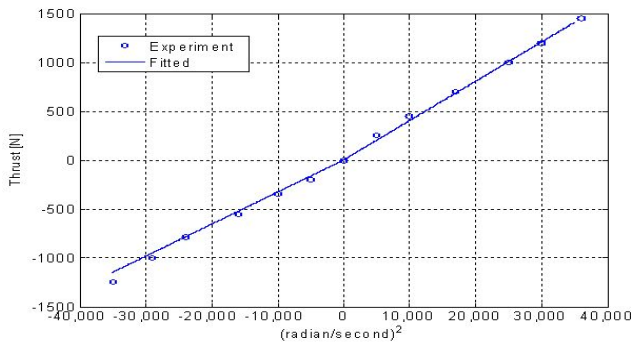


Fig. 2 Hemire thruster data : Bollard pull thrust in Newtons as a function of the square of the propeller angular velocity in [(radians/second)²]. ©WHOI

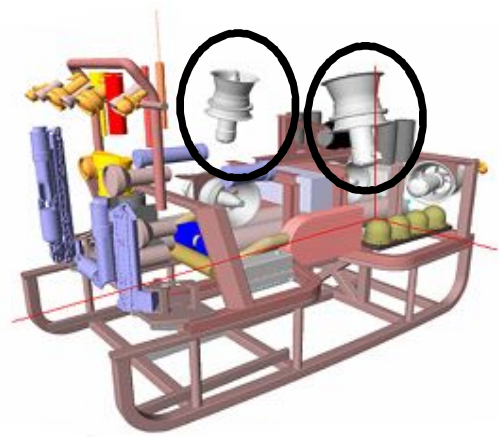


Fig. 3 Vertical thruster arrangement of ROV, Hemire

해미래의 추진기는 Kollmorgen사의 내압 3상 Brushless DC 모터와 Innerspace사의 덕트 프로펠러를 조립하여 사용하고 있으며, 총 6개의 추진기가 장착되어 있다. 진후 방향을 제어하기 위하여 후미부에 두 개, 횡방향운동과 선수동요운동을 제어하기 위하여 횡방향에 두 개, 상하운동을 제어하기 위하여 두 개의 추진기를 상부에 배치하고 있다. Fig. 2는 2001년 12월 4일 WHOI(Woods Hole Oceanographic Institution)의 Matthew Naiman이 획득한 실험 결과로써 해미래에 사용된 추진기 1개에 대한 정방향과 역방향 회전시의 각속도 제곱에 대한 볼라드 풀 추력을 도시한 값이다. 정방향 회전시의 추력이 역방향 회전시의 추력보다 강한 것을 알 수 있으며, Fig. 2의 실험 데이터를 선형으로 구간을 나누어 피팅한 결과는 다음 식 (12), 식 (13)과 같다(Smallwood, 2003b).

$$\text{Forward : } T_f = 0.0402 \times n^2 \tag{12}$$

$$\text{Reverse : } T_r = 0.0328 \times n^2 \tag{13}$$

위의 두 식에서 T_f 와 T_r 은 정방향과 역방향의 추력을 각각 나타내고, n 은 추진기의 회전각속도를 나타낸다.

4.2 해미래의 상하운동 방정식 식별

상하방향 추진기는 Fig. 3과 같이 두 개의 추진기가 상부에 같은 방향으로 설치되어 있다. 정방향 회전시 하강하며, 역방향 회전시 상승한다. 추력을 구하기 위해서 동해 실험역 성능 시험 데이터의 추진기 회전수를 회전각속도로 변환하여 식 (14)와 식 (15)에 입력하면 해미래의 상승과 하강시의 추력을 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} M_{cw} &= T_{f1} + T_{f2} \\ &= 0.0402 \times n_1^2 + 0.0402 \times n_2^2 \end{aligned} \tag{14}$$

식 (14)의 M_{cw} 는 두 개의 수직추진기가 정방향으로 회전할 때

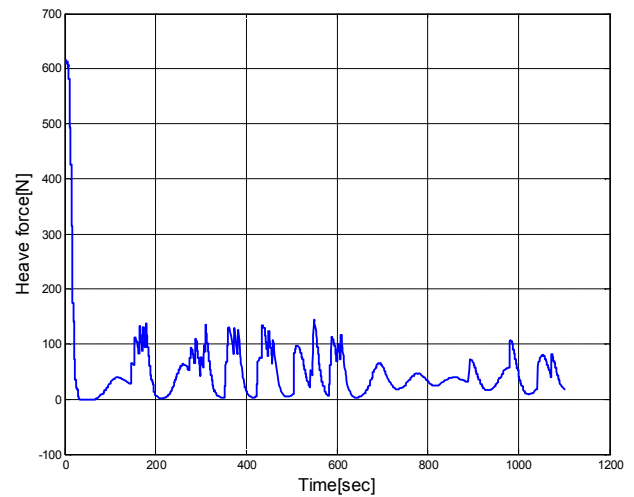


Fig. 4 Generated heave force[N] during the heave control

의 추력을 나타내며, T_{f1} 과 T_{f2} 의 합으로 계산한다. n_1 과 n_2 는 각각의 추진기 회전각속도를 나타낸다. 역방향으로 회전 할 때의 추력은 식 (15)와 같다.

$$\begin{aligned} M_{cw} &= T_{r1} + T_{r2} \\ &= 0.0328 \times n_1^2 + 0.0328 \times n_2^2 \end{aligned} \tag{15}$$

식 (15)의 M_{cw} 는 두 개의 수직추진기가 역방향으로 회전할 때의 추력을 나타내며, T_{r1} 과 T_{r2} 의 합으로 계산한다. 동해 실험역 성능 시험에서 얻은 상하운동중의 수직추진기 모터 회전수를 회전각속도로 변환하고, 식 (14)와 식 (15)에 입력하여 계산한 추력은 Fig. 4와 같다. x 축은 시간을 나타내고, y 축은 추진기의 추력[N]을 나타낸다.

추진기의 상하운동 제어시 해미래의 상하운동 응답은 압력계로 계측하였다. 압력계의 샘플링 주파수는 16[Hz]이며 실험에서는 2[Hz]로 저장하였다.

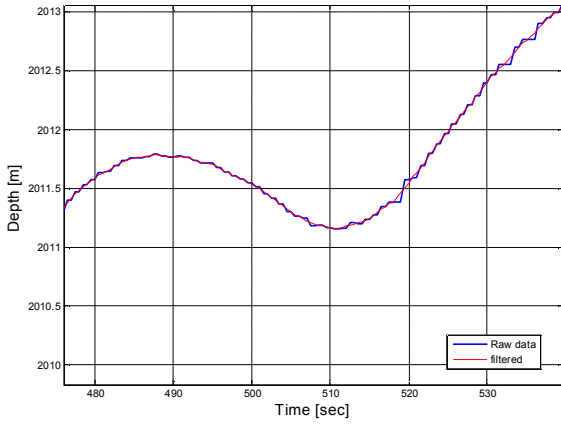


Fig. 5 comparison of raw data with filtered data

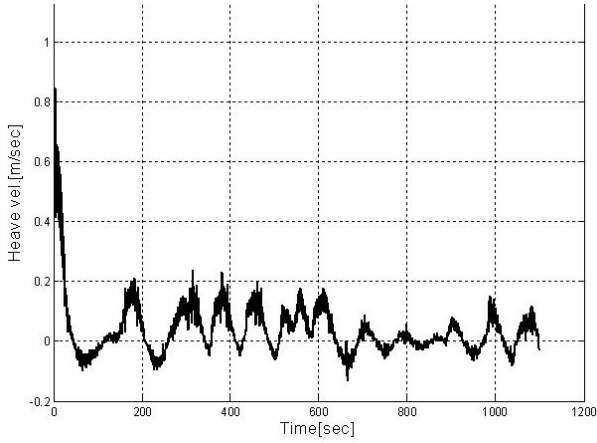


Fig. 6 Generated heave velocity [m/s]

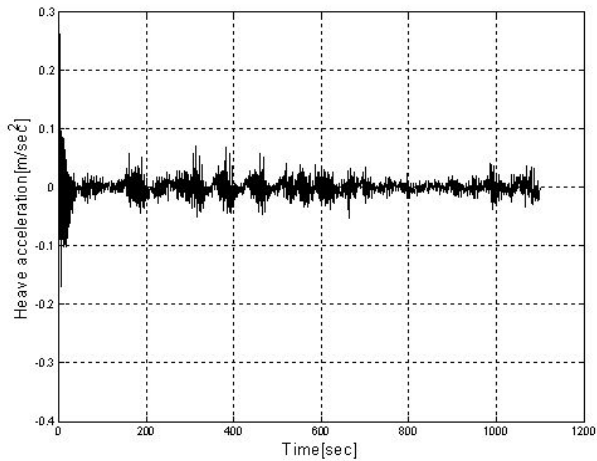


Fig. 7 Generated heave acceleration [m/s²]

이 실험 데이터를 미분에 사용하기 위하여 스무딩 알고리즘을 적용시켰다. Fig. 5는 심도 데이터의 일부를 확대한 그림이며, 계단모양의 실험데이터가 필터의 사용으로 스무딩 되었음을 확인할 수 있다. 심도 데이터를 수치 미분하면 속도 $v(t)_i$ 로 나타

Table 4 Estimated lumped parameters for heave control motion

Lumped parameters	Physical definition	Estimated value
α_3	m_3^{-1}	0.0002286
β_3	$-m_3^{-1}d_{Q3}$	-0.4085016
μ_3	$-m_3^{-1}d_{L3}$	-0.0485241
ν_3	$-m_3^{-1}b_3$	-0.0069048

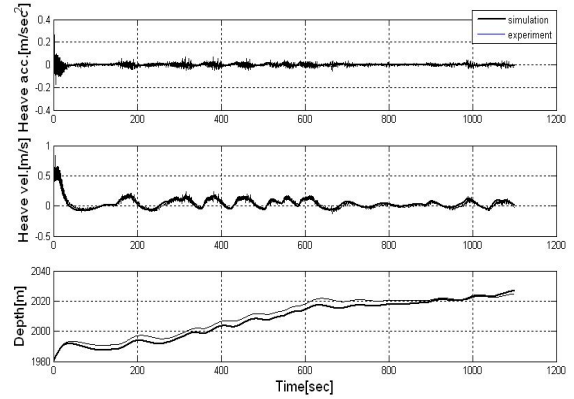


Fig. 8 x_3 DOF: Verification of identified model with experimental results

낼 수 있고, Fig. 6과 같이 나타난다. Fig. 7은 속도 데이터를 필터링한 후 수치 미분하여 계산한 가속도 $\dot{v}(t)_i$ 이다.

위의 과정을 통해 상하운동 방정식의 식별에 필요한 식 (9)의 $F(t)_i$ 성분인 제어력 $\tau(t)_i$, 속도 $v(t)_i$, 가속도 $\dot{v}(t)_i$ 값을 해미래의 추진기 회전각속도와 압력계에서 계측된 심도 값으로부터 확보하였다. 이 데이터를 식 (11)에 대입하여 최소자승법을 사용하여 식별을 수행하면 벡터 ϕ_3 의 성분인 Table 4에 있는 Lumped parameters를 구할 수 있다.

4.3 상하운동 방정식의 식별모델 분석

4.2절에서 추정된 계수와 모델의 유효성을 검증하기 위하여 Table 4의 Lumped parameters를 이용하여 수치모델을 구성하고 동해 실험역 성능시험데이터의 제어력을 입력하여 시뮬레이션한 결과와 동해 실험역 성능시험데이터의 실제 계측치를 Fig. 8에서 비교하였다. x 축은 시간을 나타내고, y 축은 위로부터 각각 수직방향의 가속도, 수직방향의 속도 그리고 심도를 나타낸다.

식별을 통해 구한 속도 값을 v_{model_i} 라 하고, 실험역 실험에서 계측된 속도 값을 v_{p_i} 라고 하면 각 자유도 i 에 대한 오차의 평균치 e_i 는 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$e_i = \text{mean}(|v_{model_i} - v_{p_i}|) \quad (16)$$

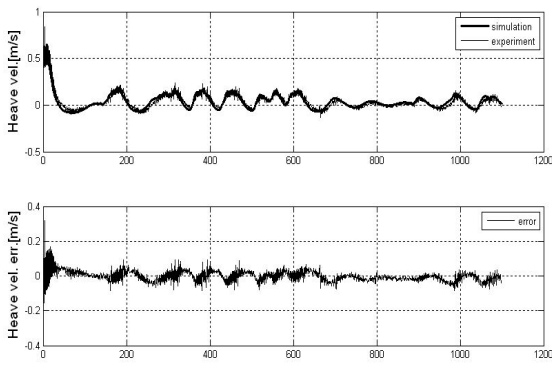


Fig. 9 x_3 DOF: Error of identified model with experimental results

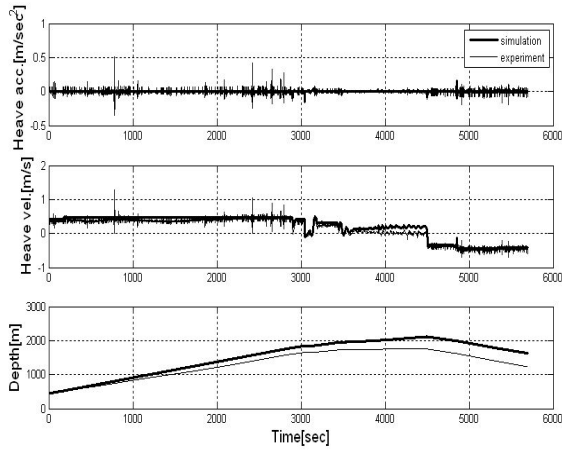


Fig. 10 Verification of identified model with experimental results

Fig. 9의 위 그림은 Fig. 8에서 비교된 속도 데이터를 나타내고, 아래 그림은 시뮬레이션 값과 실제계측치의 차이를 나타낸다. 상하운동에서의 오차 평균치인 e_3 값은 0.024417[m/s]로 계산되었다. 이차점성력 값은 $1786.9[N/(m/s)^2]$ 로 나타났으며, 유효질량 m_3 는 4374[kg]으로 식별되었다. 해미레의 질량이 3660[kg]이므로 부가질량이 약 714[kg] 정도로 추정되었음을 알 수 있다. 부력은 약 30.20[N]으로 추정되었다.

4.2절에서 추정된 계수와 모델의 유효성을 검증하기 위하여 Table 4의 Lumped parameters를 이용하여 수치모델을 구성하고 별도의 검증용 데이터의 제어력을 입력하여 시뮬레이션한 결과와 별도의 검증용 데이터의 실제 계측치를 Fig. 10에서 비교하였다. Fig. 10은 위로부터 각각 상하운동시의 가속도, 속도, 심도를 도시한 결과이다. Fig. 11의 위 그림은 Fig. 10의 속도 시뮬레이션 결과와 실험에서 계측한 속도 값의 차이를 도시한 것이다.

오차 평균치인 e_3 가 0.078183[m/s]로 Fig. 9의 오차 평균치 e_3 0.024417[m/s]보다 다소 증가하였으나 비교적 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었다.

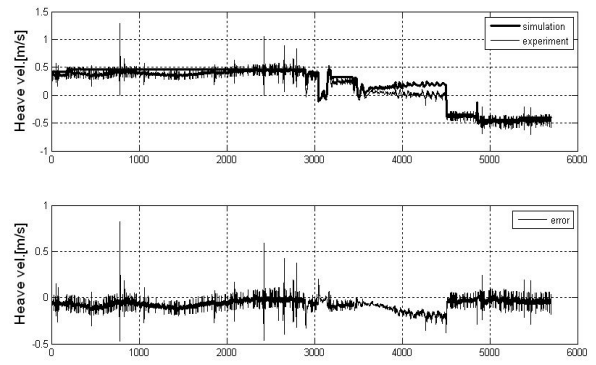


Fig. 11 Error of identified model with experimental results

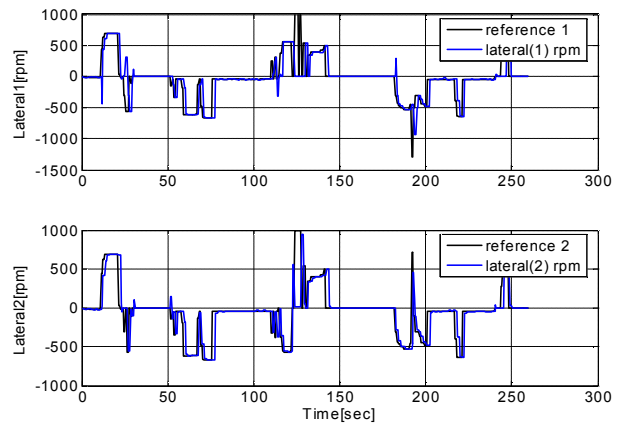


Fig. 12 Input data: the command signal and the feedback signal from generated lateral thrusters rpm

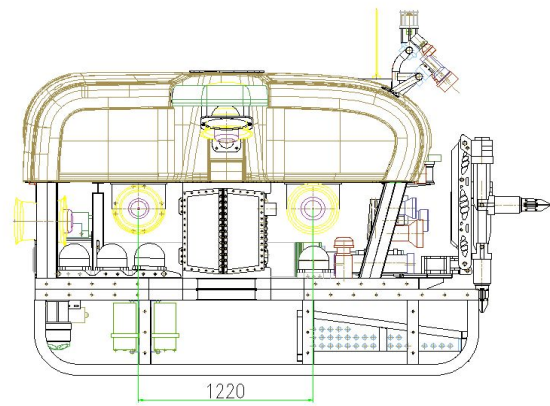


Fig. 13 Lateral thruster arrangement of Hemire ROV

4.4 선수동요운동 방정식 식별

남해연구소 부두에서 계측한 선수동요운동시의 추진기 회전수를 Fig. 12에 나타내었다. 이 값을 회전각속도로 변환하여 식 (17)과 식 (18)에 입력하면 선수동요운동 모멘트를 계산할 수 있는데, 이때 필요한 횡방향추진기 사이의 거리 l 값은 Fig. 13의 설계 도면에 나타나 있는 1.22[m]이다.

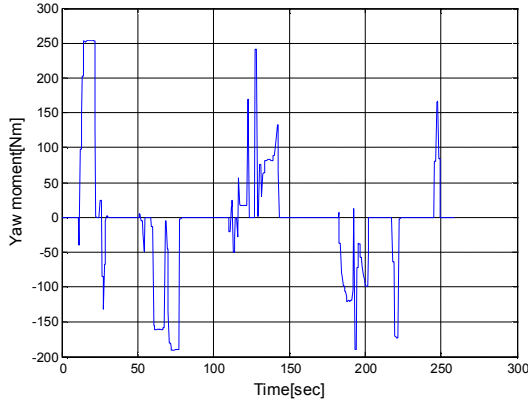


Fig. 14 Generated yaw moment[Nm] during the heading control

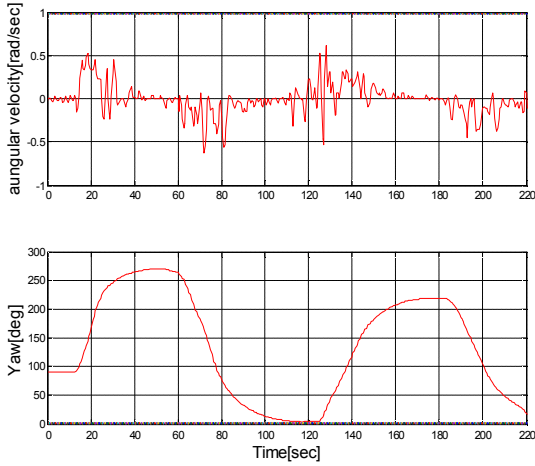


Fig. 15 Output data: generated yaw angle[deg] and yaw angular velocities[rad/sec]

해미래의 선수동요운동을 제어하는 횡방향추진기는 중앙에서 1.22[m]의 거리를 두고 서로 반대 방향으로 설치되어 있다. 두 개의 추진기가 정방향으로 회전할 때는 해미래가 시계방향으로 회전하며, 역방향으로 회전할 때는 반 시계방향으로 회전한다. 정방향으로 회전할 때의 회전모멘트는 식 (17)로 나타낼 수 있다.

$$T_{cw} = \frac{l}{2} T_{f1} + \frac{l}{2} T_{f2} = 0.024522(n_1^2 + n_2^2) \tag{17}$$

횡방향추진기가 역방향으로 회전할 때는 해미래가 반시계방향으로 회전하며, 식 (18)과 같이 모멘트를 계산한다.

$$T_{ccw} = \frac{l}{2} T_{r1} + \frac{l}{2} T_{r2} = 0.019398(n_1^2 + n_2^2) \tag{18}$$

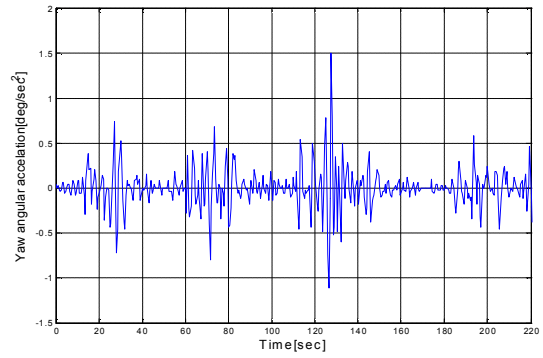


Fig. 16 Output data: calculated yaw angular accelerations

Table 5 Estimated lumped parameters for yaw control motion

Lumped parameters	Physical definition	Estimated value
α_4	m_4^{-1}	0.0006693
β_4	$-m_4^{-1}d_{Q4}$	-0.3331706
μ_4	$-m_4^{-1}d_{L4}$	-0.4265716
ν_4	$-m_4^{-1}b_4$	-0.0019203

식 (17)과 식 (18)의 입력 값인 n 값은 추진기의 회전각속도를 나타낸다. Fig. 12의 추진기 회전수를 회전각속도로 변환하여 식 (17)과 식 (18)에 입력하면, 선수동요운동중의 모멘트 [Nm]를 구할 수 있다. 그 결과 값은 Fig. 14에서 도시하였다. x 축은 시간을 나타내고 y 축은 모멘트를 나타낸다.

Fig. 15는 남해연구소 부두에서 수행한 선수동요운동 제어시의 해미래에서 계측된 선수동요운동 응답을 보여준다. 위로부터 각각 선수각속도, 선수각 변화를 나타낸다.

해미래에 탑재된 고정밀 IMU Octans 6000을 사용하여 선수동요운동시의 선수각도와 선수각속도를 계측하였고, 선수각가속도는 선수각속도 정보를 수치 미분하여 추출하였다. Fig. 15를 수치미분하여 추출한 해미래의 선수각가속도 값은 Fig. 16과 같다.

위의 과정을 통해 선수동요운동 방정식의 식별에 필요한 식 (9)의 $F(t)_i$ 성분인 모멘트 $\tau(t)_i$, 속도 $v(t)_i$, 가속도 $\dot{v}(t)_i$ 값을 해미래의 추진기 회전수와 IMU Octans 6000센서에서 계측된 값으로부터 구할 수 있다. 이 값들을 식 (11)에 대입하여 최소자승법으로 식별을 수행하면 벡터 Φ_4 의 성분인 Table 5에 있는 Lumped parameters를 구할 수 있다.

4.5 선수동요운동 식별모델 분석

4.4 절에서 추정된 계수와 모델의 유효성을 검증하기 위하여 Table 5의 Lumped parameters를 이용하여 수치모델을 구성하고 Fig. 14의 모멘트를 입력하여 얻은 응답결과와 남해연구소 부두실험 결과에서 계측된 데이터를 Fig. 17에 비교하였다. x 축은 시간을 나타내고, y 축은 위로부터 각각 선수각가속도, 선수각속도 그리고 선수각도를 나타낸다.

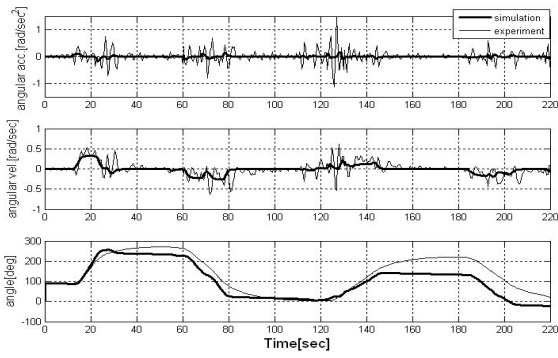


Fig. 17 Verification of identified model with experimental results

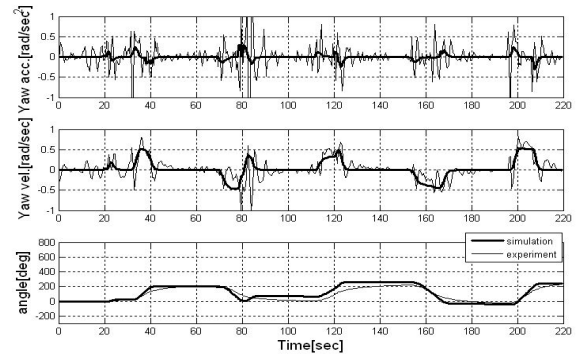


Fig. 19 Verification of identified model with experimental results

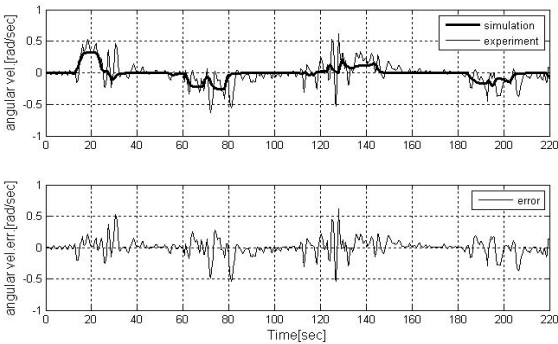


Fig. 18 Error of identified model with experimental results

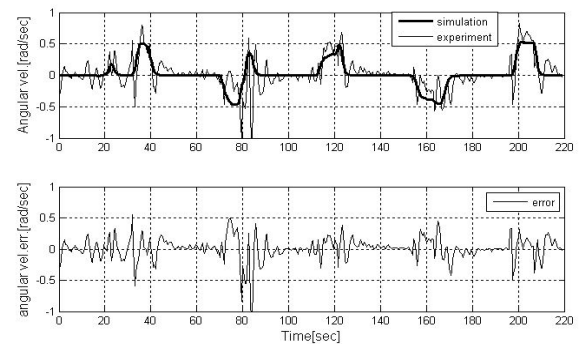


Fig. 20 Error of identified model with experimental results

Fig. 18의 위 그림은 Fig. 17에서 비교된 선수각속도 데이터를 나타내고, 아래 그림은 시뮬레이션 값과 실제계측치의 차이를 나타낸다. 선수동요운동시의 선수각속도에 대한 오차 평균치 e_4 는 식 (16)에 의해 0.1353[rad/s]로 나왔다. 선수동요운동시의 이차점성력 값은 497.789[Nm/(m/s)²]로 나타났고, 유효 질량 m_4 는 1494[kg·m²], 유체정역학적 모멘트는 2.869[Nm]로 추정되었다.

추정된 모델을 검증하기 위하여 Table 5의 계수추정에 사용되지 않은 별도의 검증용 데이터를 사용하여 모델을 통한 시뮬레이션 결과와 실험에서 얻은 계측치를 Fig. 19에서 비교하였다. x 축은 시간을 나타내고, y 축은 위로부터 각각 선수각가속도, 선수각속도 그리고 선수각도를 나타낸다. Fig. 19에서 비교된 선수각속도 데이터를 Fig. 20에서 나타내고, 아래 그림은 두 값의 오차를 나타낸다. 이 실험에서의 오차 평균치 $error_4$ 는 0.1187[rad/s]이고, Fig. 18의 오차 평균치보다 낮게 나타났다.

시스템 식별의 경우, 수학적 모델의 타당성과 계측 데이터의 정확성이 완성된 모델의 수준을 결정짓게 된다. 본 연구에서는 해미래의 고정밀 제어기 설계를 위한 수학적 모델 구성을 위한 기초 연구로서 남해연구소 부두시험과 동해의 실험역 성능 시험 중 획득한 입출력 데이터를 사용하여 식별에 요구되는 각각의 항법 정보를 계측 혹은 계측 데이터로부터 계산 한 후, 다변수 최소자승법을 사용하여 수학 모델의 계수를 추정하였다.

또한 식별된 모델의 성능을 검증하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였으며 그 결과 타당한 수학적 모델과 계수가 추정되었음을 확인할 수 있었다.

향후 연구로는 비연성 수학적 모델에 해미래의 연성 운동을 더욱 잘 모사할 수 있도록 비선형 항을 포함하도록 수학 모델을 개선하고, 해미래의 계측센서 및 항법 정밀도와 갱신률을 향상시켜서 시스템 식별에 사용하기에 보다 적합한 양질의 입출력 데이터를 확보하여 지속적인 시스템 식별 연구를 수행할 예정이다.

5. 결 론

본 논문에서는 심해무인잠수정 해미래의 제어기 설계를 위한 수학적 모델을 제안하고, 다변수 최소자승법에 기반한 시스템 식별 기법에 대하여 다루었다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 지원으로 수행된 차세대 심해무인잠수정 개발(6)의 연구 결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 이관목, 이종무, 전봉환, 최현택, 이계홍, 김시문, 김덕진, 조성권, 박동원, 홍석원, 양승일, 임용곤, 한상철, 구범모, 이상열, 서영우 (2006). "심해탐사용 무인잠수정 해미래의 시스템 개요", 한국해양공학회, Vol 1, No 1, pp 1886-1891.
- 백혁, 김기훈, 전봉환, 이관목, 임용곤, 박연식 (2007). "심해무인잠수정 해미래를 위한 수학적모델 계수추정", 2007 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, Vol 1, No 1, pp 790.
- 백혁 (2007). 입출력 계측치를 이용한 수중로봇 모델의 동역학 계수 추정, 경상대학교 정보통신학과 석사학위 논문.
- Feldman, J.P. (1976). DTNSRDC Revised Standard Submarine Equations of Motions of Motion. Technical Report, David Taylor Naval Ship Research and Development Center. Defense Technical Information Center document #A071804.
- Gertler, M. and Hange, G. (1967). Standard Equations of Motion for Submarine Simulation. Technical Report, David Taylor Naval Ship Research and Development Center. Defense Technical Information Center document #653861.
- Smallwood, D.A. and Whitcomb, L.L. (2003b). "Preliminary Identification of a Dynamical Plant Model for the JASON 2 Underwater Robotic Vehicle", In Proceedings of IEEE/MTS OCEANS 2003, San Diego, CA.

2008년 4월 19일 원고 접수

2008년 7월 29일 최종 수정본 채택