

## 수중추진기의 추진력 시뮬레이션 및 실험 Thrust Simulation and Experiments for Underwater Thrusters

안용석\* · 백운경\*\*\*†

Yong-Seok Ahn\* and Woon-Kyung Baek\*\*\*†

(Received 05 January 2017, Revision received 02 March 2017, Accepted 17 April 2017)

**Abstract:** In the early design stage of underwater vehicles, it is important to estimate the vehicle's underwater motion performance. The key design elements for the motion are propellers, battery power, and underwater resistance of the vehicle. Small thrusters with motor and propeller are usually used for the UUV(unmanned underwater vehicles). In this study, a multiphysics thruster model combining electro-mechanical and hydrodynamics characteristics was proposed to estimate the thruster performance. To show the applicability of the mathematical model, an sample thruster was used for the derive the unknown parameters of thruster. Hydrodynamic parameters were calculated for a 3D geometry model of the propeller by ANSYS/CFX program. Finally, Matlab/simulink program was used for the numerical simulation to predict the thruster performance from the given voltage/current input to the motor. Also, proved validity of simulation model by experiment test. Test were done by 2 mode(middle/high speed, reverse). The thruster performance curves obtained from this simulation were confirmed to be similar with experiment results.

**Key Words :** Thruster, Multiphysics model, CFD, Simulation, Experiment

### - 기호설명 -

Ra ; electric resistance [ohms]

La ; electric inductance[H]

Jm ; motot rotor mass moment of inertia [kg · m<sup>2</sup>]

Jp ; propeller mass moment of inertia [kg · m<sup>2</sup>]

Kb; Back electromotive force constant[volt/rad · sec]

Kt ; motor torque constant[N · m/ Amp]

rho ; water density[kg/m<sup>3</sup>]

A ; area of propeller[m<sup>2</sup>]

K3/K4 ; constant

R ; propeller radius[m]

p ; propeller pitch[m]

N ; reduction gear ratio

h ; constant

Q ; hydrodynamic torque [N · m]

T ; Thrust force [N]

$\omega_m$  ; Angular velocity of motor [rad/s]

\*\*\* 백운경(교신저자) : 부경대학교 기계설계공학과  
E-mail : Baekwk@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6164

\*안용석 : 부경대학교 무기체계공학협동과정

\*\*\* Woon-Kyung Baek(corresponding author) : Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University.  
E-mail : Baekwk@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6164

\*Yong-Seok Ahn : Department of Weapon Systems Engineering, Pukyong National University.

- $\omega_p$  ; Angular velocity of propeller [rad/s]
- $B_m$  ; Linear friction coefficient of motor [N.m.sec]
- $B_p$  ; Linear friction coefficient of propeller [N.m.sec]
- $C_L$  ; Lift coefficient
- $C_D$  ; Drag coefficient
- $i_a$  ; motor armature current [A]

## 1. 서 론

무인잠수정은 민수용으로는 해양과학탐사, 수중생태계 감시/보호 등으로 활용될 수 있고, 군사용으로는 정찰/감시, 대기뢰전, 대잠전, 통신 및 항해지원, 무장공격 등에 이르기까지 다양한 임무를 수행할 수 있다. 무인잠수정의 추진시스템은 주로 배터리, 모터, 및 프로펠러로 구성된다. 따라서 초기 설계단계에서 추진시스템의 전기적인 특성과 기계적인 특성, 그리고 수중에서의 유체역학적인 특성들에 대한 정확한 이해가 되어야 무인잠수정의 정밀한 운동제어가 가능하다.<sup>1)</sup> 이를 위해 Yoerger, Healey, Brown 등의 여러 연구자가 다양한 추진기 모델을 제시하고 그 모델의 타당성을 이론 및 실험으로 입증하였다.<sup>1)-2)</sup> Ahn 및 Baek은 추진기의 전기-기계적인 모터모델과 프로펠러의 유체동역학 모델을 통합한 추진기의 다물리 모델을 제안하였다.<sup>8)</sup> 제안된 모델에서 추진력을 계산하기 위하여 여러 개의 운동방정식을 세우고 수식들을 연립하여 추진력을 시뮬레이션 하였다. 연립방정식을 풀기 위한 프로그램으로는 Matlab/Simulink를 사용하였다. 또한 프로펠러의 기하학적 형상모델링 단계에서 전산유체역학 프로그램인 CFX를 사용하여 연구대상 프로펠러의 양력/항력 계수를 산출하였다. 추진기는 PWM 제어 전류량에 따라 속도가 변하고, 프로펠러의 회전방향이 정회전(전진) 및 역회전(후진)이 가능하다.

본 연구의 목적은 Hovering AUV에 대한 모델 기반 정밀운동제어를 위한 선행단계로서 앞의 연구<sup>8)</sup>에서 제안된 추진기 모델의 적합성을 실험적으로 검증하기 위함이다. 이렇게 검증된 추진기 시뮬레이션 모델은 향후 Hovering AUV 시뮬레이

션 모델의 운동방정식에 삽입되어 전체 시스템이 어떻게 거동하는가를 알 수 있게 해준다. 이상의 과정을 거쳐 전체시스템의 성능이 예측되면 바로 체계설계의 기초자료로 활용가능하게 된다. 본 연구의 구성은 계단입력에 대한 추진력 시뮬레이션 결과를 정리하였고 추진기 실험은 전진방향 1,000 RPM, 2,000 RPM, 3,000 RPM 및 후진방향 3,000 RPM에 대해 수행하였다. 그리고 시뮬레이션 결과와 실험결과 간의 유사성을 제시하고 추진기 다물리 모델에 대한 이론적인 타당성을 검증하였다.

## 2. 수중추진기의 다물리 모델이론

### 2.1 수중추진기의 일반형상

수중추진기는 크게 모터 및 모터케이스, 프로펠러, shroud 등으로 구성된다. Fig. 1은 연구대상 수중추진기의 형상이다.



Fig. 1 Appearance of Thruster

### 2.2 수중추진기의 전기-기계모델

Fig. 2는 추진기의 개념도를 보이고 있다. 추진기의 모터는 회로에 흐르는 전류, 저항, 인덕턴스, 역기전력 등으로 모델링할 수 있다. 전류가 공급되면 저항과 인덕턴스를 통과하여 아마추어를 회전시키고, 모터의 끝부분에 장착된 감속기어를 통해 프로펠러를 회전시켜 추진력을 발생시킨다.

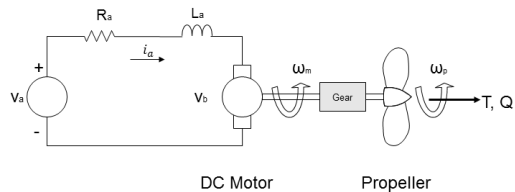


Fig. 2 Schematic of the Thruster

추진기의 회전운동은 뉴턴의 운동법칙을 적용하여 아래와 같은 운동방정식으로 표현할 수 있다.

$$\text{모터아마추어} : J_m \dot{\omega}_m + B_m \omega_m + Q = T_m \quad (1)$$

$$\text{프로펠러} : J_p \dot{\omega}_p + Q = 0 \quad (2)$$

여기서  $T_m$ 은 모터 토크,  $Q$ 는 수동역학 토크를 말한다. 또한, 키르히호프의 전류법칙을 적용하여 RLC 회로 방정식을 세우고 정리하면 다음과 같다.<sup>8)</sup>

$$\dot{i}_a = L_a^{-1}(V_a - R_a i - K_b \omega_m) \quad (3)$$

### 2.3 추진기 프로펠러의 유체동역학 모델

Fig. 3의 1번 지점에서 유입한 유체는 프로펠러 방향으로 접근함에 따라 압력에너지는 감소하는 반면 속도에너지는 증가한다. 그러나 속도는 프로펠러를 통과하는 동안 변하지 않는다. 구간 1~2 및 구간 3~4에서 베르누이 방정식을 적용하면 아래와 같다.

$$1 \text{에서 } 2 \text{구간} : P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 \quad (4)$$

$$3 \text{에서 } 4 \text{구간} : P_3 + \frac{1}{2} \rho V_3^2 = P_4 + \frac{1}{2} \rho V_4^2 \quad (5)$$

위식에서 4번 지점의 압력은 무한대로 가정한다. 즉,  $P_1 = P_4 = P_\infty$ 이며, 3번 지점에서의 유속은  $v_2 = v_3 = v_m$ 로 가정한다. 이상의 결과를 정리하면 식 (6)과 같이 쓸 수 있다.

$$P_2 - P_3 = \frac{1}{2} \rho (v_1^2 - v_4^2) \quad (6)$$

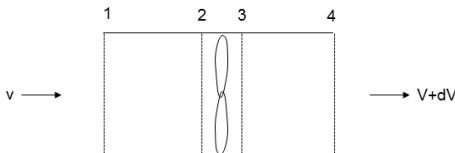


Fig. 3 Analysis area of around propeller

추진기로 유입되는 유체에 대해 베르누이 방정식과 레이놀즈의 수송정리를 이용하여 선형운동량 방정식을 유도하면 식 (7)과 같이 된다.

$$\frac{d}{dt}(mv_{system}) = \frac{d}{dt} \left( \iiint_{cv} v_m \rho dv \right) + v_{out} \rho A V_{out} - v_{in} \rho A V_{in} \quad (7)$$

식 (7)에서 우변항의  $V$ 는 유체속도,  $dv$ 는 유체의 미소체적,  $dA$ 는 유체의 미소단면적을 나타낸다. 정리하면 다음과 같은 식 (8)로 정리된다.

$$T = \rho A L \dot{V}_m + A(P_3 - P_2) \quad (8)$$

여기서  $A$ 는 유관의 단면적,  $L$ 은 유관의 길이,  $\dot{V}_m = \frac{d}{dt}(V_m)$ ,  $V_m = \frac{1}{2}(V_4 + V_1)$ 이다.

(8) 식에 베르누이식으로부터 유도된 식 (6)을 대입하면, 아래와 같은 최종적으로 추진력에 관한 식 (9)를 얻는다.

$$T = \rho A L \dot{V}_m + 2\rho A V_m^2 \quad (9)$$

### 2.4 프로펠러 기하학적 형상모델

프로펠러에서 발생하는 추력( $F_a$ : axial force)과 접선방향 힘( $F_t$ : tangential force), 토크( $Q$ )는 아래와 같다.<sup>8)</sup>

$$F_a = Liftforce \cdot \cos\theta - Dragforce \cdot \sin\theta \quad (10)$$

$$F_t = Liftforce \cdot \sin\theta + Dragforce \cdot \cos\theta \quad (11)$$

$$Q = h \frac{1}{\cos^2\theta} (C_L \sin\theta + C_D \cos\theta) \cdot \omega_m^2 \quad (12)$$

$$Lift \ force = \frac{1}{2} \rho A V^2 C_L \quad (13)$$

$$Drag \ force = \frac{1}{2} \rho A V^2 C_D \quad (14)$$

### 2.5 프로펠러의 양력 및 항력계수

프로펠러의 양력/항력계수 산출을 위하여 ANSYS ICEMCFD 15.0을 사용하여 해석격자를

생성하였다. 유동공간에 대해서는 사면체 그리고 고체벽면에서는 해석의 정확도를 향상시키기 위하여 프리즘형태의 격자를 사용하였다. Fig. 4와 Fig. 5는 프로펠러의 속도장과 압력장을 나타내며, Fig. 6은 수중에서의 유선의 움직임을 나타낸다.

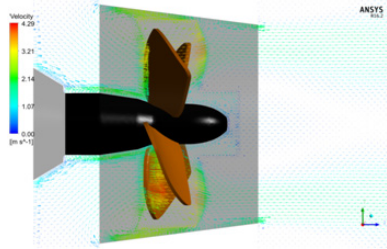


Fig. 4 Analysis of velocity vector

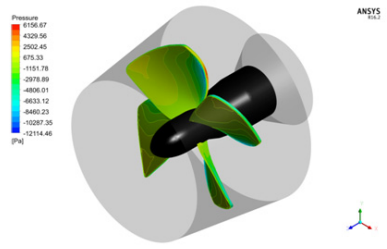


Fig. 5 Analysis of pressure field

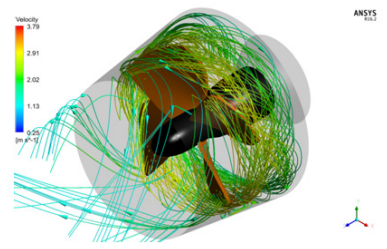


Fig. 6 Analysis of streamline

해석에 사용된 상용코드는 ANSYS CFX 16.2이고, 해석에 사용된 격자수는 약 576,000개이며 경계조건은 프로펠러 및 허브가 1,500 RPM으로 회전하는 것으로 설정하였다. 회전효과를 얻기 위하여 CFX가 제공하는 Frozen Rotor 기법을 적용하였고, k-ε 난류모델을 사용하여 유동장을 해석하였고, 수렴조건은 평균잔차 값(RMS residual)이  $10^{-4}$  이하가 되는 것으로 하였다. 경계조건은 Fig. 14와 같이 프로펠러 주변의 경계면에 대해서 유동이

Inlet, Outlet 할 수 있는 조건인 열린 면으로 처리하였다. 계산과정은 전체 항력을 구한 후 날개수 4로 나누면 1개의 날개에 대한 항력이 계산되며, 이때 양력은 자동으로 계산된다. 상기 해석결과를 바탕으로 구해진 추진력/항력을 식 (13)과 (14)에 대입하면 프로펠러의 양력계수  $C_L$ 은 0.199이고 항력계수  $C_D$ 는 0.282로 계산된다.

### 3. 추진력 시뮬레이션

#### 3.1 추진기 파라미터 설정

제안된 추진기 모델은 3개의 영역으로 구분된다. 즉 전기-기계모델, 유체동역학 모델, 프로펠러의 기하학적 형상모델이다. 추진력 시뮬레이션을 위한 추진기의 저항 값, 인덕턴스 값 등 Table 1의 입력 파라미터는 추진기 부품들을 실제 측정하여 산출하였다.

Table 1 Simulation parameter

Ra	0.045	La	30.4e-3
Jm	1e-5	Jp	15e-5
Bm	0.003	Bp	0.0123
Kb	0.032	Kt	0.032
rho	998	A	0.00335
L	0.05	K3	$\rho \cdot A \cdot L \cdot \gamma$
K4	$\rho \cdot A \cdot \Delta \beta$	R	0.03
p	0.0615	N	4.28
h	$\frac{0.5 \cdot (0.7 \cdot R)^3 \cdot \rho \cdot A \cdot N^2}{\rho \cdot A \cdot N^2}$		

#### 3.2 시뮬레이션 결과

입력이 계단입력 형태일 경우 추진력 응답특성은 프로펠러의 반지름, 양력계수, 항력계수의 변화에 따라 아래와 같이 나타난다.

##### 1) 프로펠러의 반지름 변화에 따른 특성

Fig. 5~Fig. 7은 프로펠러의 반지름(R)을 0.01씩 증가시키면서 시간(가로축)에 대한 전류, 추진력, 유속, 프로펠러 RPM(세로축)의 변화를 나타내었다. 프로펠러의 반경이 클수록 전류량, 추진력, 유

속은 커짐을 알 수 있다. 그러나 프로펠러의 반경은 클수록 프로펠러 RPM은 작아짐을 알 수 있다.

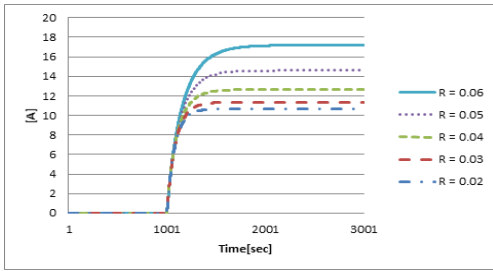


Fig. 7 Current versus time for various propeller radius

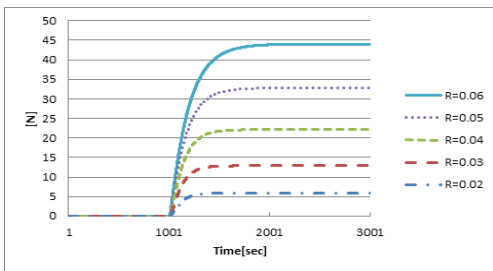


Fig. 8 Thrust versus time for various propeller radius

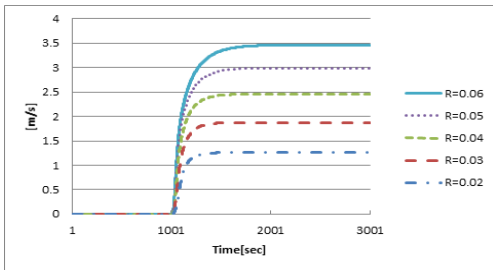


Fig. 9 Water speed versus time for various propeller radius

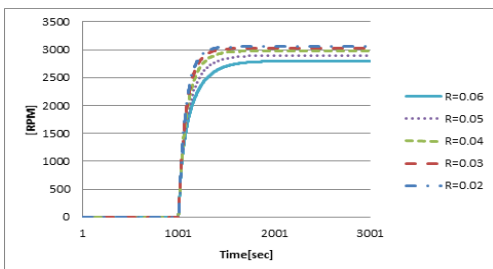


Fig. 10 Propeller speed versus time for various propeller radius

2) 양력계수( $C_L$ )의 변화에 따른 특성

Fig. 9, 10은 항력계수( $C_D$ )를 고정시키고 양력계수( $C_L$ )를 0.1씩 증가시켰을 때의 시간(가로축)에 대한 추진력, 유속(세로축)의 변화를 나타내었다. 양력계수가 커짐에 따라 추진력과 유속은 커짐을 알 수 있다.

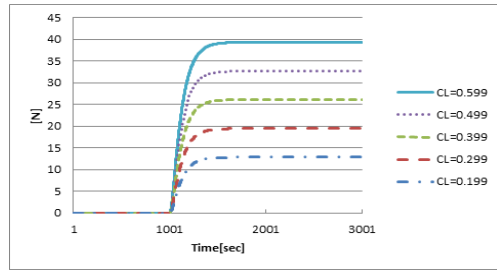


Fig. 11 Thrust versus time for various  $C_L$  (@  $C_D$  0.282)

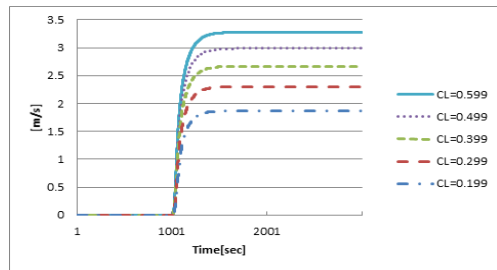


Fig. 12 Water speed versus time for various  $C_L$  (@  $C_D$  0.282)

3) 항력계수( $C_L$ )의 변화에 따른 특성

Fig. 11~Fig. 13은 양력계수( $C_L$ )를 고정시키고 항력계수( $C_D$ )를 0.1씩 증가시켰을 때 시간(가로축)

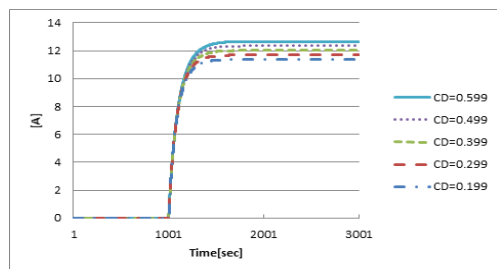


Fig. 13 Current versus time for various  $C_D$  (@  $C_L$  0.199)

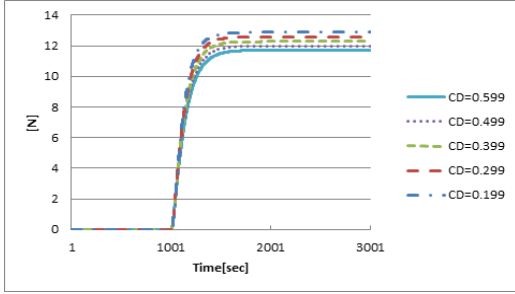


Fig. 14 Thrust versus time for various  $c_D$  (@  $c_L$  0.199)

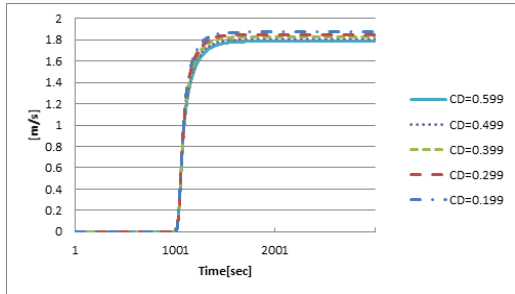


Fig. 15 Water speed versus time for various  $c_D$  (@  $c_L$  0.199)

에 대한 전류/추진력/유속(세로축)의 변화를 나타낸다. Fig. 11은 항력계수가 증가하면 전류값이 커짐을 나타낸다. 또한 Fig. 12, 13은 항력계수가 높아질수록 추진력과 유속은 작아짐을 나타낸다.

## 4. 추진기 실험

### 4.1 실험장치

실험장치의 하드웨어로는 추진기(Cross bow Inc\_400 HFS-L), 수조(2,400 mm×1,800 mm×750 mm), DATA 수집장치(HBM Inc.\_Mx840A), Thruster Controller(TEXAS INSTRUMENTS Inc\_DRV 8301/DRV8312), 유속측정장치(flow watch), DC Power supply(30vdc 10A), 노트북(삼성SENS R410, LG XNOTE R590), 압력센서 등이다. 소프트웨어 프로그램은 압력센서 운용프로그램 CatmanAP V3.5.1와 추진기의 속도제어 프로그램인 InstaSPIN-BLDC로 구성된다. Fig. 14는 실험장치의 구성도이다.

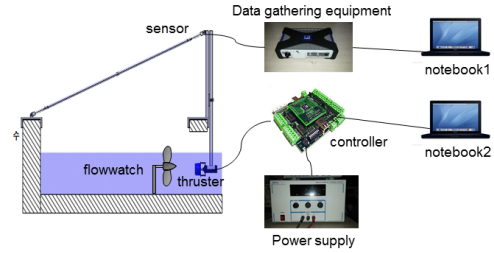


Fig. 16 Thruster testing facility

### 4.2 실험결과

1) Fig. 15~Fig. 17은 1,000 RPM에서의 시간에 대한 추진력의 크기를 표시한다. 청색선은 실제 측정된 데이터이다. 이때 데이터는 0.02초마다 측정하였다. 붉은선(굵은실선)은 실험데이터를 이동평균(60개)한 값이다. 추진력 실험 결과는 Table 2와 같다.

Table 2 Experiment results(@ 1,000 RPM)

	voltage	ampere	water speed	RPM	thrust
1st	12.1	0.924	0.69	1,048	1.706
2nd	12.1	0.921	0.69	1,030	1.722
3rd	12.1	0.925	0.69	1,045	1.742
average				1,041	1.723

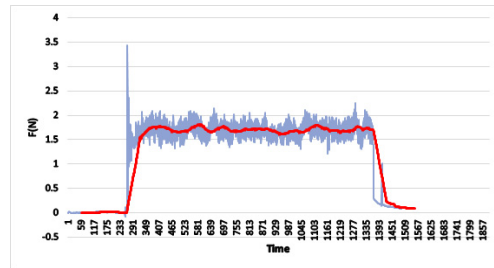


Fig. 17 Thrust vs. Time(@1,000 RPM 1st)

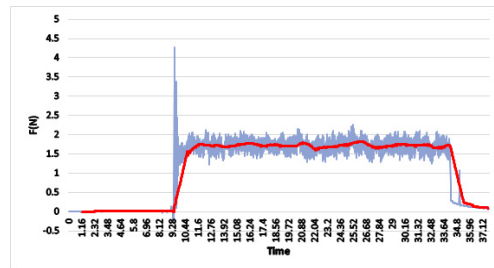


Fig. 18 Thrust vs. Time(@1,000 RPM 2nd)

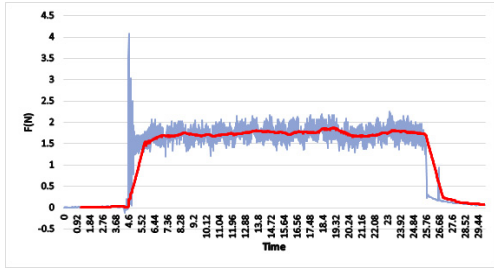


Fig. 19 Thrust vs. Time(@ 1,000 RPM 3rd)

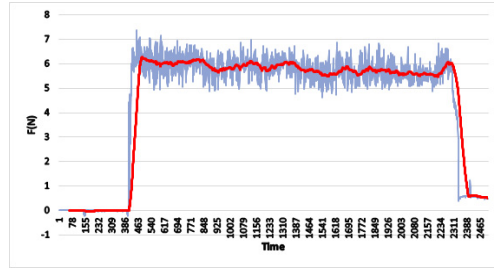


Fig. 22 Thrust vs. Time(@ 2,000 RPM 3rd)

2) Fig. 18~Fig. 20은 2,000 RPM에서의 시간에 대한 추진력의 크기를 표시한다. 추진력 실험 결과는 Table 3과 같다.

3) Fig. 21~Fig. 23은 3,000 RPM에서의 시간에 대한 추진력의 크기를 표시한다. 추진력 실험 결과는 Table 4와 같다.

Table 3 Experiment results(@ 2,000 RPM)

	voltage	ampere	water speed	RPM	thrust
1st	12.1	3.62	1.38	2,013	6.153
2nd	12.1	3.57	1.30	2,040	5.870
3rd	12.1	3.57	1.33	2,068	5.832
average					5.952

Table 4 Experiment results(@ 3,000 RPM)

	voltage	ampere	water speed	RPM	thrust
1st	12.1	10.40	1.72	3,061	11.929
2nd	12.1	10.42	1.69	3,150	12.115
3rd	12.1	10.43	1.69	3,092	12.149
average				3,101	12.064

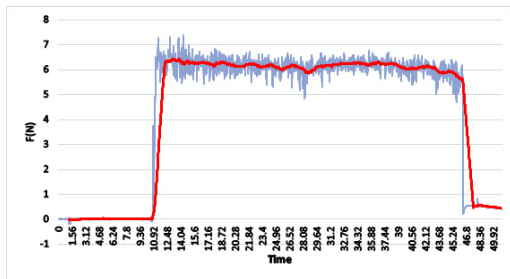


Fig. 20 Thrust vs. Time(@ 2,000 RPM 1st)

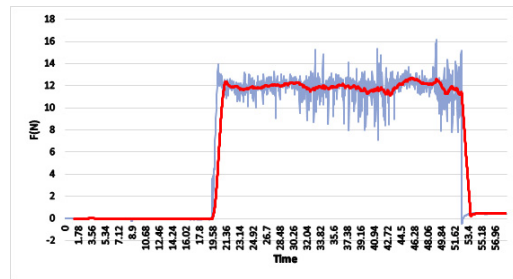


Fig. 23 Thrust vs. Time(@ 3,000 RPM 1st)

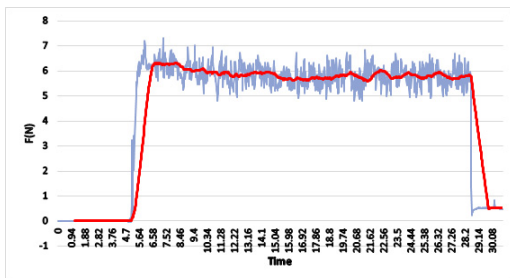


Fig. 21 Thrust vs. Time(@ 2,000 RPM 2nd)

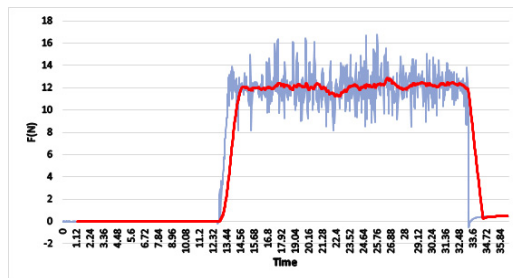


Fig. 24 Thrust vs. Time(@ 3,000 RPM 2nd)



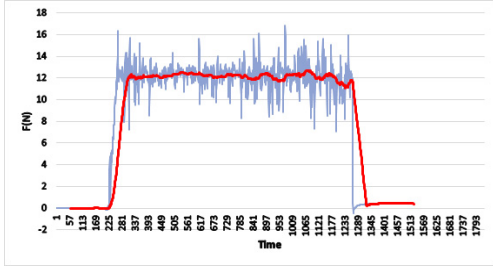


Fig. 25 Thrust vs. Time(@ 3,000 RPM 3rd)

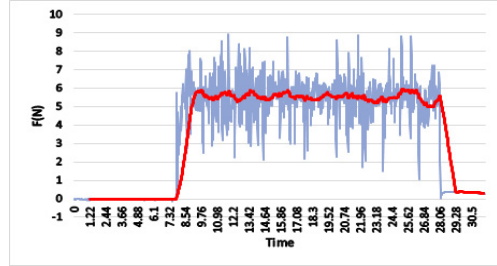


Fig. 28 Thrust vs. Time(@Reverse 3,100RPM 3rd)

4) Fig. 24~Fig. 26은 역회전(후진)에서의 추진력을 나타낸다. Duty Cycle -0.7에서 최대추진력(후진)이 발생하였으며, 추진력 실험 결과는 Table 5와 같다.

Table 5 Experiment results(Reverse)(@ 3,100RPM)

	voltage	ampere	water speed	RPM	thrust
1st	12.1	10.42	0.30	3,159	5.81
2nd	12.1	10.42	0.30	3,126	5.83
3rd	12.0	10.43	0.30	3,158	5.57
average				3,147	5.74

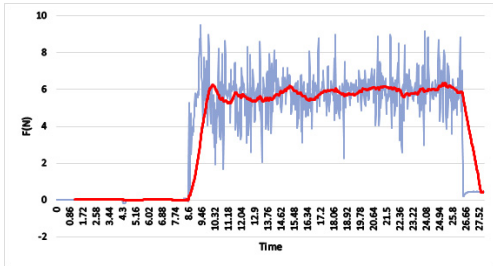


Fig. 26 Thrust vs. Time(@Reverse 3,100 RPM 1st)

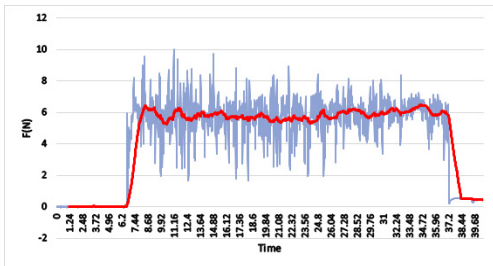


Fig. 27 Thrust vs. Time(@Reverse 3,100 RPM 2nd)

### 4.3 실험결과 분석

실험결과를 요약하면 다음과 같다. 전진(1,000 RPM/2,000 RPM/3,000 RPM)에서의 추진력은 Table 3, 4, 5와 같으며, 1,000 RPM에서는 실험 값과 시뮬레이션 값이 다소 차이를 보이고 있으나, 2,000 RPM, 3,000 RPM 영역에서는 시뮬레이션과 실험 값이 잘 일치하고 있다. 후진에서의 추진력 결과는 Table 5와 같으며, 전진에서보다 약 41.6%의 추진력 크기를 가진다. 또한 Table 6에서는 실험 값과 시뮬레이션 값을 비교하였다.

Table 6 Thruster(Experiment vs. Simulation)

	1,000 RPM	2,000 RPM	3,000 RPM
experiment[N]	1.723	5.951	12.064
simulation[N]	1.512	5.998	12.570

## 5. 결 론

본 연구에서는 무인잠수정의 추진기에 대하여 기계-전기모델과 유체동역학 모델 그리고 프로펠러의 기하학적 모델을 통합한 다물리 모델에 대한 시뮬레이션을 수행하였고, 그 결과를 검증하기 위하여 실제 추진기를 사용한 실험을 수행하였다. 실험결과 제시된 다물리 추진기 모델에 대한 시뮬레이션 값과 실험 값이 유사하다고 인정할 만한 범위 내에 있음을 확인하였고 아래와 같은 결론을 얻었다.

1) 프로펠러 회전수 1,000 RPM에서의 실험 값과 시뮬레이션 값은 다소 오차가 발생하였으며, 이는 프로펠러 회전 시 모터 샤프트 축의 마찰 저



항력이 최대로 작용하는 회전수가 되기 때문에 오차가 발생하는 것으로 예상된다.

2) 프로펠러 회전수 2,000 RPM에서는 실험 값과 시뮬레이션 값의 오차율이 0.78%로 나타났고 3,000 RPM에서는 오차율 4.02%로 나타났다. 이는 시뮬레이션에서 몇 가지 가정을 하였고, 실험에서도 측정오차 발생가능성이 있음을 감안 할 경우 이 정도의 오차는 인정할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구의 결과는 무인잠수정의 모델기반 정밀 운동제어를 위해 정확한 운동방정식을 수립하고 무인잠수정의 수중운동을 시뮬레이션하기 위한 기초자료로 사용될 수 있다.

## 후 기

이 논문은 산업통상자원부 및 한국산업기술진흥원의 재원으로 지역산업거점기관지원사업의 지원을 받아 수행한 연구임(N0000706).

## References

1. Dong H. Shin, Seol B. Bae, Woon K. Baek, and Moon G. Joo, "Way-point tracking of AUV using fuzzy PD controller", Journal of Korean Institute of Information Technology, Vol. 11, No. 5, pp. 1-7, May 2013.
2. Dyna R.YOERGER, and JOHN G.COOKE, "The influence of thruster dynamics on underwater vehicle behavior and their incorporation into control system design", IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING, Vol. 15, No. 3, pp. 167-178, July 1990.
3. Louis L. Whitcomb, and Dana R.Yoerger, "Comparative experiments in the dynamics and model-based control of marine thruster", Proceedings of MTS/IEEE OCEANS'95.
4. Louis L. Whitcomb, and Dana R. Yoerger, "Development, comparison, and preliminary experimental validation of nonlinear dynamic thruster models", IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING, Vol. 24, No. 4, pp. 481-494, October 1999.
5. Louis L. Whitcomb, and Dana R.Yoerger, "Preliminary experiments in model-based thruster control for underwater vehicle positioning", IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING, Vol. 24, No. 4, pp. 495-506, October 1999.
6. James P. Brown, "Four quadrant dynamic model of the AUV II thruster", Master's Thesis in mechanical engineering, Naval postgraduate school, 1993.
7. A. J. Healey, and S. M. Rock, "Toward an improved understanding of thruster dynamics for underwater vehicles", IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING, Vol. 20, No. 4, pp. 354-361, October 1995.
8. Yong seok, Ahn, and Woon Kyung Baek, "Multi-Physics model for unmanned underwater vehicle thruster", Journal of Korean Institute of Information Technology. Vol. 14, No. 6, June 30, 2016.