

복합항법센서를 갖는 수중운동체의 정밀 유도제어 정확도 분석

한용수* · 현철 · 정동민

Effectiveness Analysis for the Precision Guided and Controlled Underwater Vehicle system with Integrated Navigation System

Yongsu Han* · Chul Hyun · Dongmin Jeong

M&S R&D Lab, LIG Nex1, Seongnam 463-400, Korea

요 약

유도제어 시스템 체계 개발의 초기단계에는 운용 효과도 도출 및 요구사항 적합성 검토를 통한 체계 개략사양도 출을 위해 효과도 분석을 수행한다. 본 논문에서는 M&S (Modeling & Simulation)를 활용하여 항법센서 성능과 환경 영향(조류의 세기와 방향)에 따른 유도제어 시스템의 목표점 도달 정확도에 대한 운용 효과도 분석을 수행한다. 효과도 분석을 위해 6자유도 운동모델, 환경모델, 유도항법제어모델을 구성한다. 항법센서는 관성항법센서(Inertia Navigation Sensor, INS)와 도플러 속도센서(Doppler Velocity Log, DVL)로 구성하고, 환경변수는 조류(current)의 세기와 방향이다. 수치 시뮬레이션 결과는 CEP(Circular Error Probability)와 분산을 이용한 확률분석으로 분석한다. 효과도 분석 결과는 항법센서의 가격을 고려한 비용 대비 효율 분석에 활용하여 가격 대비 높은 성능의 센서 사양을 도출할 수 있다. 본 논문에서는 높은 수준의 INS와 낮은 수준의 DVL을 이용하면 가격 대비 성능이 높은 복합항법센서를 구성한다는 것을 보여준다.

ABSTRACT

To obtain the system requirement specification in the beginning of the precision guidance and control system development, the effectiveness and reliability analysis for the system are necessary. The main purpose of this research is to obtain the system requirement specification by carrying out the effectiveness analysis using the modeling and simulation(M&S) scheme. M&S model is constructed using 6-DOF dynamic model, environment model, guidance-navigation & control model. Assume that the navigation sensor is consist of inertial navigation sensor(INS) and doppler velocity log(DVL), and the speed and direction of current is environment parameter. The effectiveness analysis is carried out using circular error probability(CEP) and variance analyze scheme. Also, the effectiveness analysis is utilized for cost-performance analysis considering the cost of commercial INS and DVL sensor. This paper shows the high-level INS and the low-level DVL configure a high price-performance integrated navigation system.

키워드 : 수중운동체, Modeling & Simulation, 효과도 분석, 몬테카를로 시뮬레이션

Key word : Underwater Vehicle, Modeling & Simulation, Effectiveness Analysis, Monte-Carlo Simulation

Received 28 July 2015, Revised 17 August 2015, Accepted 02 September 2015

* Corresponding Author Yongsu Han(E-mail:Yongsu.han@lignex1.com, Tel:+82-31-8026-4272)
M&S R&D Lab, LIG Nex1, Seongnam 463-400, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2015.19.11.2751>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©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.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서론

유도제어 시스템 체계개발의 초기단계에는 운용 효과도 도출 및 요구사항 적합성 검토를 통한 체계 개략 사양도출을 위해 효과도 분석을 수행한다[1]. 본 논문에서는 M&S(Modeling and Simulation)를 활용하여 대상 무인 수중운동체의 운용 효과도 도출 및 항법센서의 가격대비 성능비 분석을 통해 센서 사양을 도출한다. 수중운동체의 효과도 분석을 위해 운동모델, 유도제어모델, 항법모델을 구성하며, 조류에 의한 영향을 분석하기 위해 조류 환경모델을 구성한다. 또한, 운용개념을 통해 운용 효과도에 영향을 미치는 변수를 선정한다. 운용 효과도는 대상 무인 수중운동체의 목표점 도달 정확도로 정의한다. 도달 정확도에 영향을 미칠 것으로 예상되는 변수는 항법센서 성능 및 조류의 세기와 방향이다. 확률분석 분야에서 널리 사용되는 몬테카를로 수치 시뮬레이션을 통해 다양한 항법센서 및 조류 변수에 대한 효과도 분석을 수행한다.

무인 수중운동체는 수중의 기뢰 탐지 및 제거 혹은 수중 지형 탐색을 위한 임무를 위해 연구되고 있다. 특히, 군사 분야에서는 기뢰 탐지 및 제거를 위한 무인 잠수정이 개발되고 있다. 본 논문에서는 원거리의 기뢰부설 예상지역을 탐색하기 위한 임무를 가정한다. 선행연구에서는 질점모델을 기반으로 항법센서 성능에 따른 효과도 분석을 수행하였다[2]. 본 논문에서는 6-자유도 모델을 기반으로 대상 무인 수중운동체의 기동 특성이 반영된 목표점 도달 정확도를 위한 효과도 분석을 수행한다.

도달정확도는 x-y축의 2차원 평면에서 목표점과의 거리오차로 정의하며, 도달 정확도는 정밀 항법 성능에 크게 좌우된다[2]. 대상 무인 수중운동체에서 사용하는 항법센서는 관성항법센서(INS)와 도플러 속도측정 센서(DVL)이다. 본 논문에서는 대상 무인 수중운동체의 운용효과도에 영향을 미칠 것으로 예상되는 INS 성능, DVL 성능, 그리고 조류의 세기 및 방향을 관찰요소로 정의하고 효과도 분석을 수행한다.

본론의 2장에서는 분석모델에 대해 기술하는데, 2.1와 2.2장에서는 대상 무인 수중운동체의 운동모델과 조류 환경모델에 대해 기술한다. 2.3장에서는 INS와 DVL 속도센서를 이용한 복합항법기법에 대해 설명하고, 2.4장에서는 유도제어기법에 대해 기술한다. 효과

도 분석을 위한 몬테카를로 수치 시뮬레이션 수행 결과는 3장에서 설명한다. 마지막으로 4장에서는 결론을 서술한다.

II. 본론

2.1. 운동모델

수중운동체의 운동을 모사하기 위해서 6자유도 운동 모델을 이용하였다[3,4]. 수중운동체에 작용하는 힘과 모멘트의 관계식으로 속도, 가속도, 각속도, 위치, 그리고 자세의 상태변수를 사용하여 비선형 미분방정식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} m[\dot{u}-vr+wq-x_G(q^2+r^2)+y_G(pq-\dot{r})+z_G(pr+\dot{q})] &= \Sigma X \\ m[\dot{v}-wp+ur-y_G(r^2+p^2)+z_G(qr-\dot{p})+x_G(qp+\dot{r})] &= \Sigma Y \\ m[\dot{w}-vq+vp-z_G(p^2+q^2)+x_G(rp-\dot{q})+y_G(rq+\dot{p})] &= \Sigma Z \quad (1) \\ I_x\dot{p}+(I_z-I_y)qr-(\dot{r}+pq)I_{xz}+(r^2-q^2)I_{yz}+(pr-\dot{q})I_{zy} &= \Sigma K \\ I_y\dot{q}+(I_x-I_z)rp-(\dot{p}+qr)I_{xy}+(p^2-r^2)I_{xz}+(qp-\dot{r})I_{yz} &= \Sigma M \\ I_z\dot{r}+(I_y-I_x)pq-(\dot{q}+rp)I_{yz}+(q^2-p^2)I_{xy}+(rq-\dot{p})I_{xz} &= \Sigma N \end{aligned}$$

2.2. 환경모델

수중운동체의 유도제어에 영향을 미치는 환경변수인 조류는 운동모델에 다음과 같은 상대속도 성분으로 표현될 수 있다[4].

$$\nu_r = \nu - \nu_c \quad (2)$$

여기서, $\nu_c = [u_c, v_c, w_c]^T$ 은 비회전 동체고정(body-fixed) 조류속도 벡터이다. ν_c 는 지구고정 조류속도 벡터, $[u_c^E, v_c^E, w_c^E]$ 을 이용하여 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} u_c \\ v_c \\ w_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\psi c\theta - s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\phi + c\psi c\phi s\theta \\ s\psi c\theta & c\psi c\phi + s\psi s\theta s\phi & -c\psi s\phi + s\psi c\phi s\theta \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\phi c\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_c^E \\ v_c^E \\ w_c^E \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} u_c^E &= V_c \cos\alpha \cos\beta \\ v_c^E &= V_c \sin\beta \\ w_c^E &= V_c \sin\alpha \cos\beta \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, $[\phi, \theta, \psi]$ 는 오일러 각, α, β 는 지구고정 좌표계를 기준으로 하는 조류의 받음각과 옆미끄럼각이며, V_c 는 평균 조류속도이다. 본 논문에서는 조류속도를 다음과 같은 1차 가우스-마코브 프로세스로 표현하였다.

$$\dot{V}_c(t) + \mu_0 V_c(t) = \omega(t) \quad (5)$$

여기서, $\omega(t)$ 는 평균이 0인 가우시안 백색 잡음, $\mu_0 \geq 0$ 는 상수이다.

2.3. 항법모델

대상 수중운동체의 항법시스템은 자이로스코프와 가속도계로 구성된 관성항법장치인 INS와 DVL으로 구성된다. DVL은 도플러 효과를 이용한 속도측정 장치로 복합항법 알고리즘에서 속도를 보정한다. DVL을 이용한 복합항법시스템은 그림 1과 같이 구성된다.

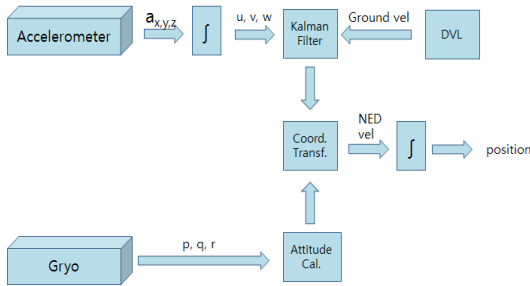


Fig. 1 Configuration of Integrated Navigation System

복합항법 시스템은 가속도계를 이용하여 동체좌표계 기준의 속도를 계산하고, DVL에서 측정된 지면속도로 보정한다. 속도추정 및 보정은 칼만필터를 이용하여 수행한다. 본 논문에서는 일반적인 재귀적 형태의 분산 시간 칼만필터를 이용하여 속도를 추정한다[5].

2.4. 유도제어모델

본 논문에서는 대상 수중운동체의 정밀 유도를 위해 시선각 유도법칙인 Lookahead-based 조종기법을 이용한다[6]. 그림 2와 같이 두 경로점의 직선 경로를 추종하는 상황을 가정하도록 하자. Lookahead-based 조종기법에서 추종해야 할 경로각 $\chi_d(e)$ 는 경로-접선각 χ_p 와

속도-경로 상대각 χ_r 의 합으로 설정한다.

$$\chi_d(e) = \chi_p + \chi_r, \quad (6)$$

$$\chi_p = \text{atan2}(y_{k+1} - y_k, x_{k+1} - x_k), \quad (7)$$

$$\chi_r(e) = \text{atan}\left(\frac{-e(t)}{\Delta}\right), \quad (8)$$

$$e(t) = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_k) & -\sin(\alpha_k) \\ \sin(\alpha_k) & \cos(\alpha_k) \end{bmatrix}^T (p^n(t) - p_k^n) \quad (9)$$

여기서, $\Delta > 0$ 은 lookahead-distance이다. 추종할 해당각 ψ_d 은 추종할 경로각과 옆미끄럼각 β 의 차로 설정한다.

$$\psi_d = \chi_d - \beta, \quad (10)$$

$$\beta = \arcsin\left(\frac{v}{U}\right) \quad (11)$$

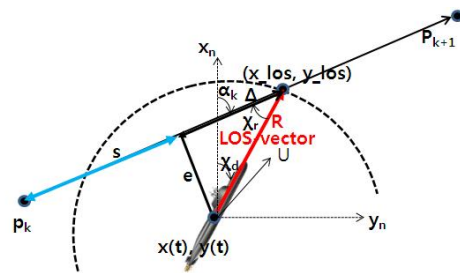


Fig. 2 Lookahead-based Guidance Law

대상 수중운동체의 심도와 heading 제어를 위해 선형가로 및 세로 운동모델과 PID제어 기법을 이용했다. 심도제어를 위해 사용한 세로운동 모델은 x축 방향 속도 u , z축 방향 속도 w , 피치 각속도 q , 피치각 θ , 심도 z 을 상태변수로 한다[3]. 수평타각 입력은 각 측정치에 제어이득을 곱하여 계산한다.

$$\delta_e = K_z(z_d - z) - K_\theta\theta - K_qq \quad (12)$$

여기서, K_z, K_θ, K_q 는 심도제어를 위한 제어이득들이며, z_d 는 명령심도 값이다.

침로제어를 위해 사용한 가로운동 모델은 y축 방향 속도 v , 롤 각속도 p , 요 각속도 r , 롤 각 ϕ , 요 각 ψ 을 상태변수로 한다[3]. 세로운동에서 롤과 요축 운동은 서로 연성되지 않았다고 가정하고 롤과 침로제어를 설계하였다. 롤과 침로제어를 위한 타각입력은 다음과 같다.

$$\delta_a = K_\phi \phi - K_p p, \tag{13}$$

$$\delta_r = K_\psi (\psi_d - \psi) - K_r r \tag{14}$$

여기서, K_ϕ , K_p , K_ψ , K_r 는 침로제어를 위한 제어이득들이며, ψ_d 는 명령 침로각이다.

III. 수치 시뮬레이션

분석모델은 MATLAB Simulink를 이용하여 모델화하였고, 수치 시뮬레이션을 위한 시간간격은 0.01초이다. 본 논문에서 고려한 INS와 DVL 속도센서 성능은 표 1, 2와 같다.

주행속도는 국방임무용으로 개발된 무인 잠수정 사례[9]를 바탕으로 설정하고, 주행거리는 5, 10km, 조류의 세기는 3, 6노트, 조류 방향은 앞/뒤/옆 방향을 고려하였다. 몬테카를로 수치 시뮬레이션은 각 조합에 대해 100회 수행하여 통계분석을 하였다. 몬테카를로 수치 시뮬레이션 결과는 CEP(Circular Error Probability, 50%)로 살펴보았다.

Table. 1 INS Sepcification[7]

INS	Lv. 1 (LN-251)		Lv. 2 (HG-1700)	
	Accel.	gyro	Accel.	gyro
update rate	100Hz	100Hz	100Hz	100Hz
noise	0.1e-3g	0.125rad/ \sqrt{hr}	0.1e-3g	0.125rad/ \sqrt{hr}
scale-factor error	500ppm	150ppm	500ppm	150ppm
bias	0.5mg	0.1°/hr	1mg	1.0°/hr

Table. 2 DVL Specification[8]

DVL	update rate	scale-factor error	noise	bias
Lv. 1	2Hz	0.2%	0.0099%	0.001%
Lv. 2	2Hz	1.0%	0.0144%	0.002%

항법센서 성능에 따른 운용효과도 분석을 위해서 각 각 두 가지 수준의 INS와 DVL 속도센서를 이용하여, 총 4가지 조합에 대해 몬테카를로 수치 시뮬레이션을 수행하였다. DVL은 주행 전구간에서 사용하였고, 조류가 없는 상황을 가정하였다.

표 3과 그림 3에서 볼 수 있듯이, INS 성능이 동일한 경우에 성능이 좋은 DVL을 이용하면 CEP가 줄어드는 것을 볼 수 있다. 그러나 동일한 수준의 INS 이용 시에 DVL 성능향상에 의해 CEP가 줄어드는 양보다, 동일한 수준의 DVL 이용 시에 INS 성능향상에 의해 CEP가 줄어드는 양이 크다. 다시 말해, INS 성능이 목표점 도달 정확도에 더욱 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 또한, DVL에 의한 CEP 감소(목표점 도달 정확도 향상) 효과는 INS 성능 수준이 낮아질수록, 그리고 거리가 멀어질수록 크게 나타난다. 시간이 지날수록 INS의 적분오차가 커져서 추정하는 속도의 오차가 커지지만, DVL에서 추정하는 속도의 오차는 동일한 수준으로 유지되기 때문이다. 결국, 낮은 성능의 INS를 이용하여 장거리 주행할 경우에 목표점 도달 정확도를 높이기 위해서는 DVL이 필요하다. 10km 주행시에 50% 확률로 100m 이내에 도달하기 위해서는 0.1deg/hr 수준의 INS와 1.0% 수준의 DVL이 필요하다. 만약, 1.0deg/hr 수준의 INS를 이용하여 10km 주행에 50% 확률로 200m 이내에 도달하기 위해서는 0.2% 수준의 DVL이 필요하다.

Table. 3 Result based on Integrated Navigation sensor effect (10km)

INS	0.1 deg/hr		1.0		
	DVL	0.2 %	1.0	0.2	1.0
CEP(50%)		51(m)	79	157	258
σ (65%)		56	87	214	293
case		casea 1	case 2	case 3	case 4

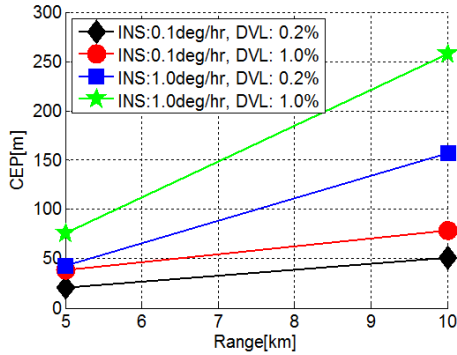


Fig. 3 Result based on Integrated Navigation sensor effect (CEP)

조류의 세기와 방향에 대한 운용효과도를 분석하기 위해서 0.1deg/hr 수준의 INS와 0.2% 수준의 DVL 센서를 고려하였고, 각 조합에 대해 100회의 몬테카를로 수치 시뮬레이션을 수행하였다. DVL은 주행 전구간에서 사용하였다. 조류의 세기는 3/6노트, 조류의 방향은 앞/뒤/옆 방향을 가정하였다. 앞의 조류방향은 조류가 수중운동체 진행방향의 앞에서 뒤쪽 방향으로 흐르는 것을 의미한다.

조류가 진행방향의 뒤에서 앞으로 작용할 경우, 수중운동체의 운동을 도와주는 상황이 되어 좀 더 빠르게 목표점에 도달할 수 있다.

이는 주행시간이 짧아지고 항법오차가 적게 쌓인다는 것을 의미한다. 조류의 방향이 이와 반대일 경우, 주행시간이 길어져서 항법오차가 상대적으로 많이 쌓일 것으로 예상할 수 있다. 표 4와 그림 4에서 확인할 수 있듯이, 조류가 뒤에서 앞으로 작용할 경우에 오차가 가장 작았고, 이와 반대방향의 조류에서 오차가 가장 크게 나타났다. 조류의 세기가 크면 이러한 경향이 더욱 크게 나타난다.

Table. 4 Result based on current effect (10km)

Direction	vel	0 kts	3	6
0 deg	CEP(m)	51	47	46
90	CEP	51	53	58
180	CEP	51	58	69
270	CEP	51	52	58

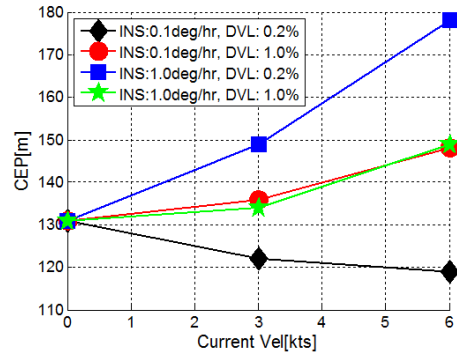


Fig. 4 Result based on current effect (CEP)

몬테카를로 수치 시뮬레이션을 통해 알 수 있듯이 정밀 유도제어를 위해서는 고성능의 관성항법센서가 필요하며, 상대적으로 낮은 수준의 관성항법센서를 이용할 경우에는 DVL가 필요하다. 또한, 동일한 거리를 주행할 경우에 주행시간이 짧을수록 오차가 작았다. 이는 일반적으로 알려진 항법오차와 작동시간과의 관계에서 기인한다.

그림 5는 가격상승율에 대한 성능비율을 도시한 것이다. 본 논문에서 고려한 INS와 DVL 가격수준은 INS의 경우에 0.1deg/hr급 1억여원, 1.0deg/hr급은 3천여만원, DVL의 경우에 0.2%급은 3천여만원, 1.0%급은 1.5천여만원이다.

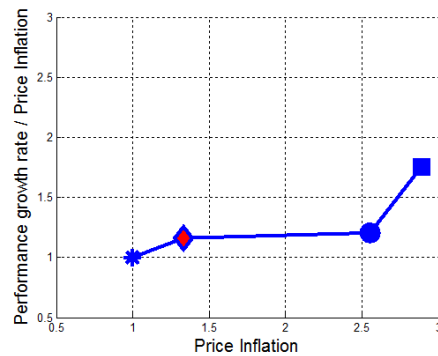


Fig. 5 Price vs. Performance

가장 저렴한 INS와 DVL 복합항법(조합 4)의 가격과 성능을 기준으로 가격상승율에 대한 성능 향상율의 비이다.

조합 2의 경우, 가격이 1.33배 늘었고 성능(도달 정확도)은 1.64배 향상되어 성능지수가 1.23 (=1.64/1.33)이다. 조합2의 경우, 성능이 3.27배 향상하였으나, 가격도 2.56배 높아져서 성능지수가 1.28이다. 성능이 향상된 만큼 가격도 높아졌다는 것이다. 조합4의 경우, 성능지수가 1.75이다. 4가지 조합을 살펴보면, DVL 성능수준(가격)을 높이면 성능지수가 상승하게 된다(조합1에서2 그리고 조합3에서 조합4). 결국, 가격과 성능을 고려한다면 INS보다 DVL 성능수준(가격)을 높이는 것이 유리하며, 요구되는 목표점 도달 정확도 수준에 따라 INS 수준을 선택해야 한다고 볼 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 무인 수중운동체의 운용효과도 분석을 위해 수중운동체의 기동모델과 환경모델을 설계하였고, 운용효과도에 영향을 미칠 것으로 예상되는 변수를 정의하고 몬테카를로 수치 시뮬레이션을 통해 분석하였다.

가격 대비 성능비를 고려한 정밀 유도제어를 위해서는 높은 수준의 DVL이 필요하며, 관성항법센서 수준은 필요한 유도제어 성능에 맞게 선택하면 된다. 또한, 조류 방향에 따라 목표점 도달 정확도가 달라지는 결과를 얻었다.

본 논문의 수치 시뮬레이션에서는 운용 전 구간에서 DVL 속도센서를 사용한다고 가정하였지만, 실제 운용 환경에서는 전구간 사용이 제한될 수 있다. 따라서, DVL 운용구간에 따른 운용효과도를 분석해야 한다. 또한, 실제 해저지형 정보를 활용한 분석이 필요할 것으로 보인다.

REFERENCES

- [1] M. Anders, "A Homing Torpedo the Effect of the Tactical Situation and the Torpedo Parameters on the Torpedo Effectiveness," Master's thesis, Naval Postgraduate school, Monterey, CA., 1977.
- [2] S. P. Hong, Y. S. Han, "Performance Analysis of Navigation System for Guidance and Control of High Speed Underwater Vehicle System," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, Vol. 17, No. 9, pp. 2227~2232, Sep. 2013.
- [3] S. Y. Yang, M. H. Lee, "A Study on the Design of a Path Tracker and Depth Controller for Autonomous Underwater Vehicles," *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, Vol. 4, No. 1, pp. 45-55, Feb. 1998.
- [4] T. I. Fossen., *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, JOHN WILEY and SONS, Chicheste, England, 1994.
- [5] J. Bjorn, G. Kenneth, S. Kristian, "dvl velocity aiding in the hugin 1000 integrated inertial navigation system," *Modeling, Identification and Control*, vol. 24, no. 4, pp. 223-235, 2004.
- [6] T. I. Fossen, *Guidance and Control of Vehicles - Chapter 10: Guidance Systems*, Lecture Note, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2013.
- [7] Data sheet for the HG1700 Inertial Measurement Unit. Honeywell Inc. [Internet]. Available: <https://aerospace.honeywell.com/>.
- [8] Data sheet for the NavQuest 600 - Doppler Velocity Log (DVL). LinkQuest Inc. [Internet]. Available: http://www.link-quest.com/html/models_nq.htm.
- [9] A. R. Hwang, N. H. Ahn, S. I. Yoon, "Development of Attitude Heading Reference System based on MEMS for High Speed Autonomous Underwater Vehicle," *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 19, No. 6, Dec. 2013.



한용수(Yongsu Han)

2006.2. 서울대학교 항공공학과 공학석사
2012.2. 서울대학교 항공공학과 공학박사
2012~현재, LIG넥스원(주) 선임연구원
※관심분야 : Modeling and Simulation



현철(Chul Hyun)

2001.2 서울대학교 전기공학부 학사
2011.2 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사
2011~현재 LIG넥스원(주) 선임연구원
※관심분야: 수중운동체 제어 및 항법 시스템, 관성센서



정동민(Dongmin Jeong)

2008.02 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 학사
2010.02 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 석사
2010~현재 LIG넥스원
※관심분야: 국방 M&S, 수중음향탐지, 센서신호처리