소형 자율무인 수중운동체의 제어시스템 설계를 위한 통합 시뮬레이터 구축 - HILS 검증

본 연구에서는 MEMS 관성센서 기반의 소형 자율무인 수중운동체의 제어시스템 설계를 위한 소프트웨어적인 통합시뮬레이터의 구축과 이를 HILS와 연계한 제어시스템의 검증 체계를 소개한다.

■ 황종현*, 홍성경*, 조현진**
(*세종대학교 항공우주공학과, **국방과학연구소)

1. 서론

최근 MEMS 관성센서의 발전과 더불어 이를 기반으로 하는 소형/자율무인 수중운동체의 연구가 활발히 진행되고 있으며[1-2], 그에 대한 제어시스템의 통합적이고 체계적인 설계기술이 요구 되고 있다. 일반적으로 자율무인 수중운동체가 주어진 임무를 효과적으로 수행하기 위한 제어시스템은 그림 1과 같이 운동체의 자세를 측정하는 자세센서 부, 센서로부터 받은 자세정보를 이용하여 타각 명령을 만들어주는 자동조종컴퓨터 부, 그리고 주어진 타각 명령대로 타면을 움직이게 하는 구동장치부로 구성된다. 특히, 자항식 기만기와 같이 정밀도를 요하지 않는 용도의 소형/저가 자율무인 수중운동체의 경우, 제한된 허용공간과 저비용 양산단가의 조건으로 인해 소형/저가의 센서 및 구동장치가 요구된다. 이러한 조건에서 체계적인 제어시스템의 설계를 위해서는 각 구성품이 전체 시스템 성능에 미치는 영향을 정량적으로 분석하여 각 구성품의 최적사양을 도출할 수 있는 통합 시뮬레이터 구축이 우선적으로 요구된다.

한편 통합 시뮬레이터를 통한 소프트웨어적인 제어시스템의 검증에 이어서 제어시스템의 하드웨어와 소프트웨어를 통합하는 실물 시스템에 대한 효용성의 검증이 연속적 흐름상에서 이루어져야 한다[3]. 이러한 실물 통합시험의 하나인 HILS (Hardware in the Loop Simulation)는 3축 운동재현 장치와 연동하여 수중 운동체에 실제 탑재되는 하드웨어 환경을 그대로 보존한 상태에서 수중 운동체 동역학의 전체 혹은 일부만을 수학적 모델로 대체하는 실시간 실물 지상 모의시험을 의미한다. 이는 단순 소프트웨어적인 시뮬레이션 환경이 가져다 주는 제한된 상황을 뛰어 넘어, 실제 하드웨어의 불확실성을 보존한 상태에서 다양한 환경하의 제어시스템 성능을 분석할 수 있는 개발 시스템이다[4].

본 연구에서는 MEMS 관성센서 기반의 소형 자율무인 수중운동체의 제어시스템 설계를 위한 소프트웨어적인 통합시뮬레이터의 구축과 이를 HILS와 연계한 제어시스템의 검증 체계를 소개한다. 우선 MEMS 관성센서 기반의 자세센서 부와 소형/저가 구동장치 부의 성능특성 모델링, 그리고 수중운동체의 동역학 모델링과 자동조종 제어법칙 부를 모듈화하고 이들을 통합하는 제어시스템의 시뮬레이터를 구축하였다. 이 통합 시뮬레이터는 자동조종 제어법칙 설계과정과 연속적인 연계를 위하여 Matlab/ Simulink 환경으로 구축되었으며, 이 중 제어법칙과

동역학 운동방정식 모듈은 HILS수행 시 각각 자동조종컴퓨터 하드웨어와 실시간 컴퓨터로의 이식을 용이하게 하기 위하여 Matlab/Simulink의 S-function기반 C-언어로 구현하였다. 한편 통합시뮬레이터 사용자의 시각적 효과 향상을 위하여 미국해군연구소(NRL)에서 공개 프로그램으로 제공하는 'Simdis'를 접목 활용하였다[5].

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 대상으로 하는 수중 운동체의 운동방정식 모듈과 심도 및 침로제어를 위한 제어법칙 설계결과를 소개하였다. 제어시스템의 핵심 구성품인 MEMS 관성센서 기반의 AHRS 모듈과 저가/소형 구동장치의 상세 모델링과 통합시스템의 시뮬레이션을 통한 각각의 적정 사양도출을 3장과 4장에서 제시하였다. 5장에서는 통합시뮬레이터 구축환경과 HILS 결과의 예를 제시하고, 7장에서 결론을 맺는다.

2. 수중운동체의 모델링 및 제어법칙 설계

2.1 수중운동체의 동역학 모델링

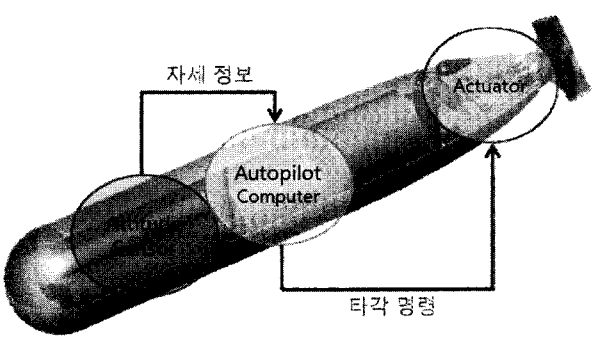


그림 1. 자율무인수중운동체의 통합자세제어기 구성

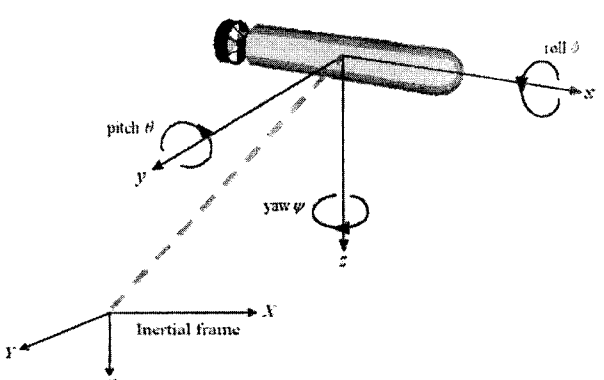


그림 2. 동체고정 좌표계 및 지표고정 좌표계

6자유도 운동을 하는 수중운동체는 그림 2와 같이 지표고정 좌표계와 동체고정 좌표계를 이용하여 표현될 수 있다. 이때 지표고정 좌표계에서는 수중운동체의 위치와 오일러각이 표현되고, 동체고정 좌표계에서는 선속도 및 각속도를 표현한다.

뉴튼의 제2법칙으로부터 유도된 비선형 방정식은 다음과 같은 형태로 표현이 가능하다.

$$M\dot{\upsilon} + C(\upsilon)\upsilon + D(\upsilon)\upsilon + g(\eta) = B(\upsilon)u \qquad (1)$$

이때, M은 유체역학에 의한 힘과 모멘트, C는 회전력에 의한 힘과 모멘트, D는 항력에 의한 힘과 모멘트, g는 중력과 부력에 의한 힘과 모멘트, B는 제어판에 의한 영향을 의미한다. 또한 υ는 동체고정 좌표계에서 표현되는 선속도 및 각속도를, η는 지표고정 좌표계에서 표현되는 동체의 위치 및 오일러각을 의미한다[6-7]. 일반적으로 수중운동체 비선형 운동방정식을 구현하기 위한 유체계수들은 수조실험을 통하여 구해진다. 본 논문에서는 각 유체계수의 구체적인 수치는 생략하였다.

본 논문의 통합시뮬레이터에서는 HILS와의 연계를 고려하여 수중운동체의 비선형 운동방정식 모듈을 실시간 컴퓨터로의 이식을 용이하게 하기 위하여 그림 3과 같이 Matlab/Simulink 'S-function' 기반의 C-언어로 구현하였다. 이와 같이 구현한 수중운동체 동역학 모델링 모듈의 입력 및 주요 출력 변수의 정의는 그림 3과 같다.

2.2 제어법칙 설계

제어법칙 설계를 위하여 수중운동체의 비선형 운동방정식을

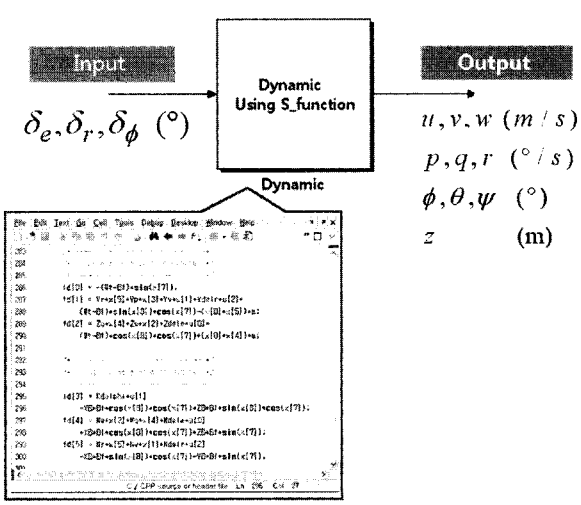


그림 3. C- code기반의 수중운동체 동역학 모델 모듈

종방향과 횡방향으로 나누고 일정 속도와 심도에서의 평형조건에서 선형화된 상태공간방정식은 (2) 와 (3)과 같다. [7]

$$\begin{bmatrix}\dot{w}\\ \dot{q}\\ \dot{\theta}\\ \dot{z}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-4.4422 & 1.8283 & 0 & 0\\ 1.2607 & -2.1526 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 1 & 0 & -8.2304 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}w\\ q\\ \theta\\ z\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}-11.1619\\ -4.4783\\ 0\\ 0\end{bmatrix}\delta e \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix}\dot{v}\\ \dot{r}\\ \dot{\psi}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-4.4325 & 1.8284 & 0\\ -1.1033 & 2.0878 & 0\\ 0 & 1 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v\\ r\\ \psi\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}11.1377\\ -4.8738\\ 0\end{bmatrix}\delta r \quad (3)$$

여기서 상태변수 w,q,θ,z,v,r,ψ 와 제어입력 δe 와 δr 의 정의는 그림 3과 같다.

본 논문에서는 심도(z) 제어법칙과 침로(ψ)제어법칙을 설계하였으며, 설계과정은 Matlab 근궤적법 설계 GUI Tool인 'Rltool' 과 연계하여 설계할 수 있도록 구현하였다.

심도제어기의 구조는 그림 4와 같이 안정성 증대를 위한 피치각속도(q)와 고유진동수 증대를 위한 피치각(θ)을 내부루프로 하고, 최종적으로 심도(z)를 외부루프로 하는 형태를 기본으로 취하였다. 최종적인 제어법칙은 (4)와 같다.

$$\delta e = K_q K_\theta K_z (z_c - z) - K_q K_\theta \theta - K_q q \quad (4)$$

그림 5는 근궤적법을 이용하여 선정한 제어이득의 계단명령에 대한 시뮬레이션 결과이다. 초기 언더슈트 현상은 종방향 수중운동체의 비최소위상(non-minimum phase)시스템 특성에 기인한다.

침로제어기의 구조는 그림 6과 같이 안정성 증대를 위한 요각속도(r)를 내부루프로 하고, 침로(ψ)를 외부루프로 하여 명령을 추종하고 대여폭을 증대시키는 형태를 기본으로 취하였다. 최종적인 제어법칙은 (5)와 같다.

$$\delta r = K_\psi K_r (\psi_c - \psi) - K_r r \quad (5)$$

그림 7은 근궤적법을 이용하여 선정한 제어이득의 계단명령에 대한 시뮬레이션 결과이다.

한편 롤의 안정화를 위해서는 상태피드백(롤각 ϕ, 롤각속도 p)제어형태를 취하였으며, 그 때의 제어법칙은 (6)과 같다.

$$\delta\phi = -K_\phi \phi - K_p p \quad (6)$$

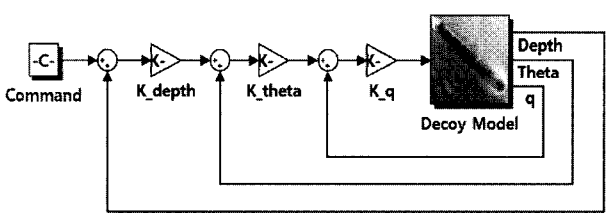


그림 4. 심도제어기 구조

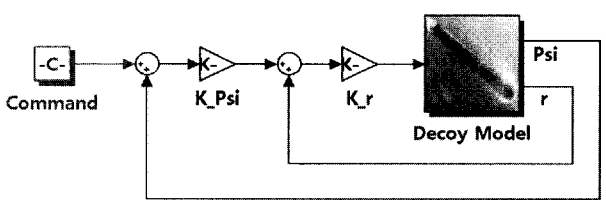


그림 6. 침로제어기의 블록 선도

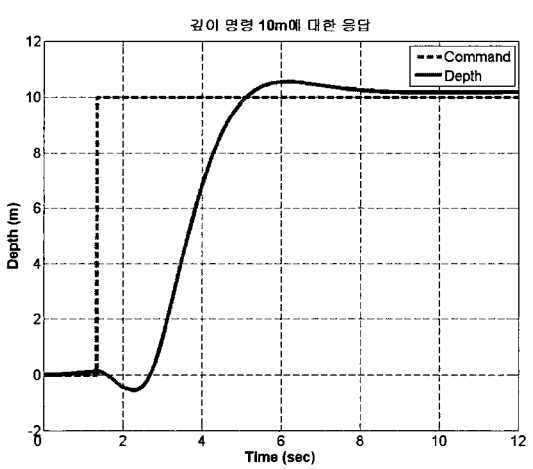


그림 5. 심도 명령 10m에 대한 시응답

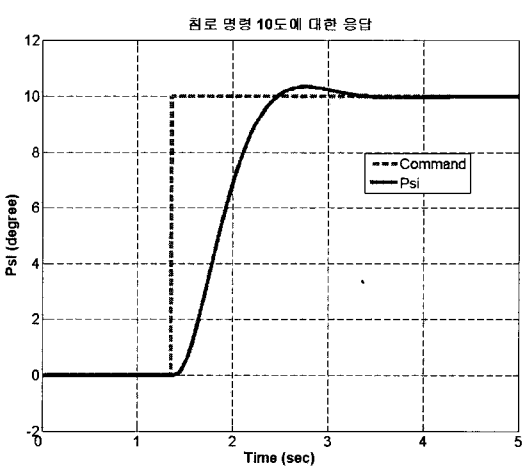


그림 7. 침로 명령 10°에 대한 응답 반응

본 통합시뮬레이터에서는 제어법칙의 하드웨어 구현시 자동조종컴퓨터로의 이식을 용이하게 하기 위하여 그림 8과 같이 Matlab/Simulink 'S-function' 기반의 C-언어로 구현하였다. 이와 같이 구현한 제어법칙 모듈의 입력 및 출력 정의는 그림 8과 같다.

3. MEMS관성센서 기반의 자세센서 모델링

일반적으로 MEMS 관성센서는 기존의 기계식이나 광학식의 관성센서에 비해 소형/저가/저전력소비 등의 측면에서 현격한 장점이 있는데 반하여 주요 오차성능인 바이어스(bias) 및 스케일 팩터(scale factor) 안정성 등은 매우 저조한 특성을 갖는다. 그림 9와 10은 자이로와 가속도계의 유형별 주요 오차성능의 경향도를 보여준다[8]. 표 1은 자이로의 경우 이를 보다 구체적으로 적용등급에 따른 오차성능의 허용 범위를 제시하고 있다.

본 연구에서는 MEMS 관성센서 기반의 소형 자율무인수중운동체의 제어시스템을 목표로 한다. 따라서 MEMS 관성센서로 구성된 자세/침로각 기준시스템 (Attitude & Heading Reference System, AHRS)의 상세 오차 및 동적 모델링을 구성하고, 이를 바탕으로 MEMS 관성센서의 성능이 전체 제어시스템에 미치는 영향을 정량적으로 도출하여 본 시스템에 적용 가능한 최적의 성능사양을 도출하도록 한다.

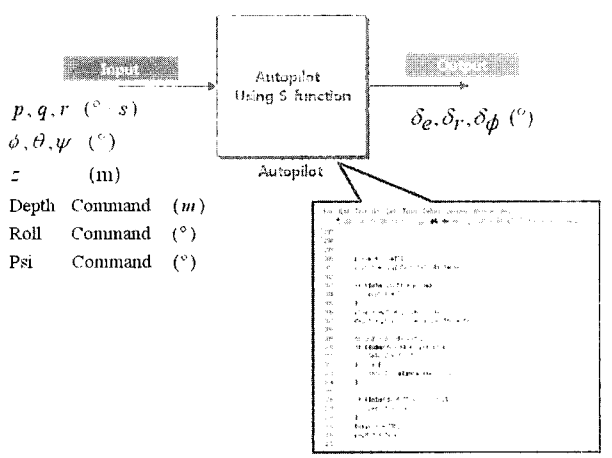


그림 8. C code 기반의 제어법칙 모듈

표 1. 적용등급별 자이로의 성능지표 범위

PARAMETER	UNIT	RATE GRADE	TACTICAL GRADE	INERTIAL GRADE
Bias Drift	°/hr	10-1000	0.1-10	<0.01
Scale Factor Accuracy	%	0.1-1	0.01-0.1	<0.001

3.1 관성센서 오차모델링

자이로 및 가속도계에서 측정된 성분을 $\tilde{\omega}$ 와 $\tilde{a}$ 라 하고 실제 각속도와 가속도를 각각 ω 와 a 라 하면 그 관계식은 (7), (8)과 같다.

$$\tilde{\omega} = (1+S)\omega + M\omega + B_f + Ga + n \quad (7)$$

$$\tilde{a} = (1+S)a + Ma + B_f + n \quad (8)$$

여기서 S는 scale factor 오차, M 은 cross coupling 오차, G는 g-sensitivity 오차, n은 확률적 오차이다. 그림 11은 자이로의 경우 이러한 주요 오차 항목들을 Simulink 기반으로 모델링한 것이다. 확률적 오차항은 바이어스 드리프트(bias drift) 와 백색잡음(random white noise)을 지배적인 요소로 가정하여 그 특성을 모델링 하였다. 또한 사용자의 편의성을 위하여 그림 12와 같이 윈도 창을 구현하여 주요성능 사양을 입력할 수 있도록 하였다.

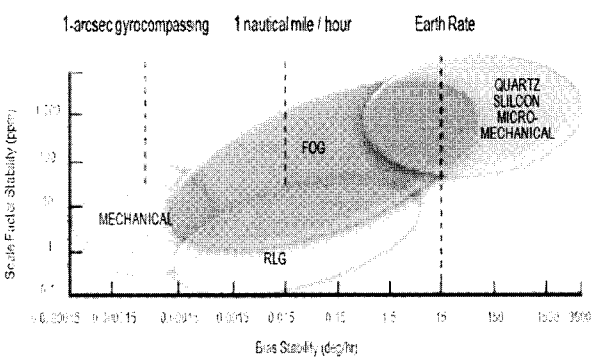


그림 9. 자이로 유형별 성능 경향도

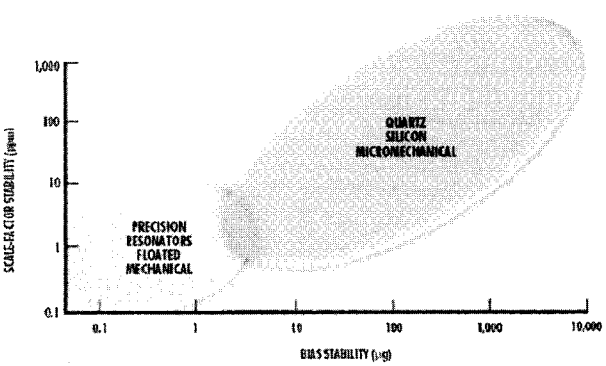


그림 10. 가속도계 유형별 성능 경향도

각 센서의 동적 특성은 대여폭과 감쇄비를 반영한 이차 시스템으로 가정하였다.

3.2 자세/침로각 추정 알고리즘

본 절에서는 통합시뮬레이터의 자세센서모듈을 구성하기 위하여 관성센서에서 측정된 데이터를 바탕으로 자세와 침로각을 계산하기 위한 일반적인 추정알고리즘을 소개한다.

(9)는 동체 좌표계에서 측정된 각속도(p,q,r)을 지표고정 좌표계의 오일러 각 변화율 ($\dot{\phi},\dot{\theta},\dot{\psi}$)로 변환하는 관계식이다. 한편, (10)은 동체 좌표계에서 측정된 중력 가속도 성분(a_x,a_y)로부터 오일러 각(ϕ,θ)을 계산하는 식이다[9].

$$\begin{bmatrix}\dot{\phi}\\ \dot{\theta}\\ \dot{\psi}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & \sin\phi\tan\theta & \cos\phi\tan\theta\\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi\\ 0 & \dfrac{\sin\phi}{\cos\theta} & \dfrac{\cos\phi}{\cos\theta}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}p\\ q\\ r\end{bmatrix} \quad (9)$$

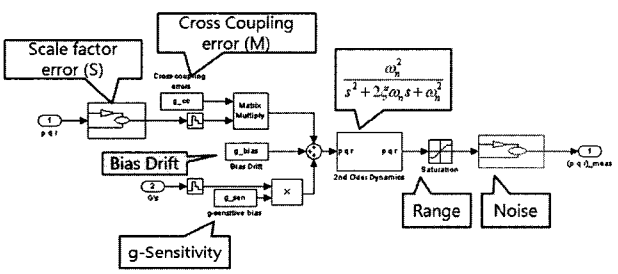


그림 11. 자이로 오차모델링의 예

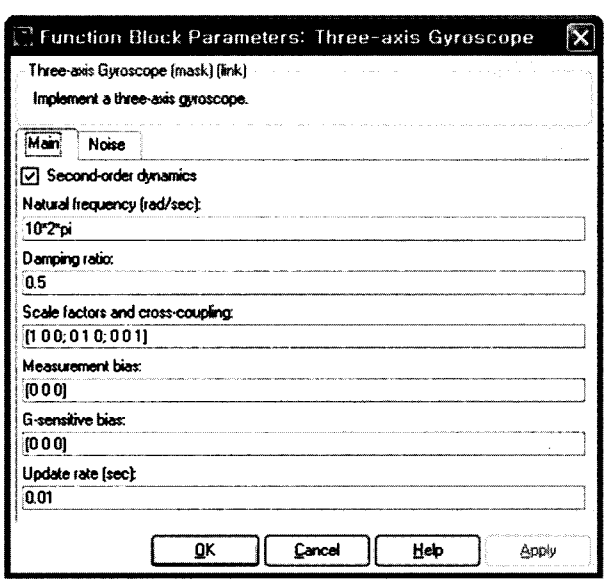


그림 12. 자이로 사양 입력의 윈도우 창

$$\phi=\sin^{-1}\left(\frac{-a_y}{g\cos\theta}\right),\ \theta=\sin^{-1}\left(\frac{a_x}{g}\right) \quad (10)$$

(9)에서 계산된 $\dot{\phi},\dot{\theta}$를 적분하여 구한 ϕ,θ와 (10)의 ϕ,θ의 차이를 비례적분 제어하여 자이로의 장점과 가속도계의 장점을 융합하는 그림 13의 보상필터 알고리즘을 사용한다. 즉, 가속도계부터 구한 자세각은 저주파 통과 필터링을, 자이로 신호의 좌표변환 및 적분을 통해서 구한 자세값은 고주파 통과 필터링을 하고 이를 융합하여 안정된 자세값을 취하는 구조로 구현하였다. 침로각 추정 알고리즘은 위 구조에서 가속도 대신에 마그네토미터의 방위각 정보를 사용하며 그 외의 구조는 동일한 형태를 취한다[10].

이렇게 구현된 자세/침로각 센서 모델링 모듈을 이용하여, 2장의 비선형 운동방정식 및 제어기 모듈과 연동한 모의 시험을 하였다. 센서 모듈을 이상적인 모델로 가정할 때의 운동방정식의 출력을 기준 값으로 하고, 적용할 센서 모듈을 제어루프 상에 적용 한 경우의 출력을 그 기준 값과 비교하였다. 한 예로 그림 14는 Rate Grade 급(표 1 참조)의 MEMS 자이로 센서 중 가장

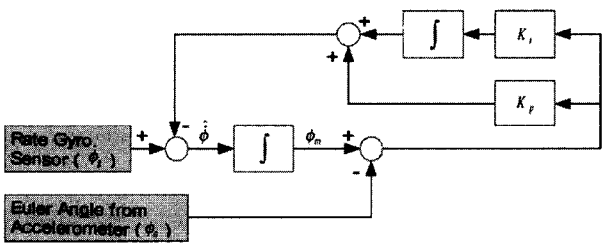


그림 13. 자세추정 보상필터

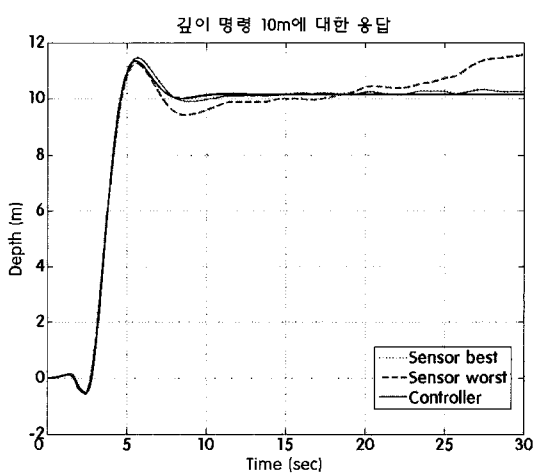


그림 14. 센서사양 변화에 대한 제어시스템의 반응

표 2. 도출된 최적의 관성센서 성능사양

주요사항	자이로	가속도계
Dynamic Range	±100Deg/s	±2g
Scale Factor nonlinearity	0.5%	0.5~1%
Bias	3deg/s	±0.1 g
Noise density	0.005deg/s/$\sqrt{Hz}$	0.2mg/$\sqrt{Hz}$
Bandwidth(3dB)	10Hz	17Hz

상위의 성능사양을 적용했을 경우와 가장 하위의 성능사양을 대입했을 경우에 전체 제어시스템에 미치는 영향을 보여 준다. 센서 성능의 저하로부터 전체 제어 시스템의 미치는 주된 영향을 살펴보면 정착 시간 및 정상상태 오차에서 큰 영향을 끼침을 알 수 있다.

본 연구에서 구축한 자세센서 모델링 모듈, 비선형 운동방정식 및 제어기 모듈과 연동한 시행착오적인 모의시험을 통하여 도출된 허용 가능한 MEMS 관성센서 성능사양은 표 2와 같고 그 때의 전체 제어시스템 성능은 그림 15와 같다.

4. 구동장치 모델링

구동장치 모델링 모듈은 소형/저가 구동기로서 일반적으로 많이 사용되는 DC 모터, 개루프 제어가 가능한 스테핑 모터, 그리고 뱅뱅 제어기와 함께 동적 상태의 정밀제어가 요구되지 않는 경우의 소형/저가로 구현이 가능한 솔레노이드형 구동기를 선택적으로 적용 할 수 있도록 구현하였다.

DC 모터 모듈은 키르히호프의 전압법칙(KVL)을 이용한 전기 방정식과 동역학 방정식을 결합하고 각도제어루프와 함께 구축하였다. 스테핑 모터는 펄스입력에 대해서 정해진 분해능에 따라 이산적으로 작동되는 개루프 제어 형태로 구축하였다. 한편 On-Off 제어 신호에 의하여 구동되는 솔레노이드 형의 작동기는 자세/침로 제어시스템 오차 기준치에 따라 On-Off 제어 신호를 발생하는 뱅뱅제어기와 함께 구현되었다. 그림 17은 각 구동장치를 통합시뮬레이터의 제어루프 상에 적용하여 전체 시스템에 미치는 영향을 비교한 예이다.

DC 모터의 경우는 시정수, 스테핑 모터의 경우는 시정수와 분해능, 솔레노이드의 경우는 제어시스템의 오차 기준치가 전체 시스템의 성능에 영향을 주는 주요 인자임을 알 수 있었으며, 예상한 바와 같이 솔레노이드의 경우는 정상상태를 유지 할 수 없음을 확인할 수 있었다.

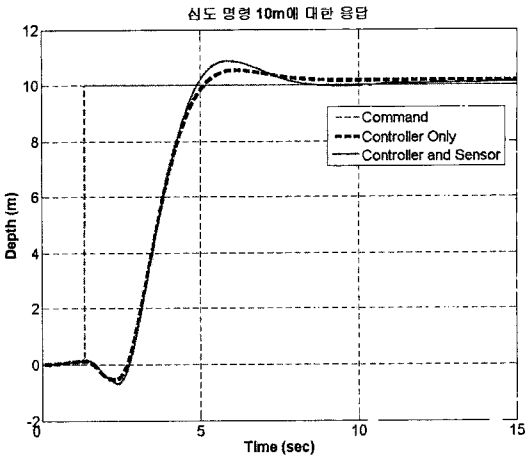


그림 16. 센서 모듈이 추가된 성능 분석

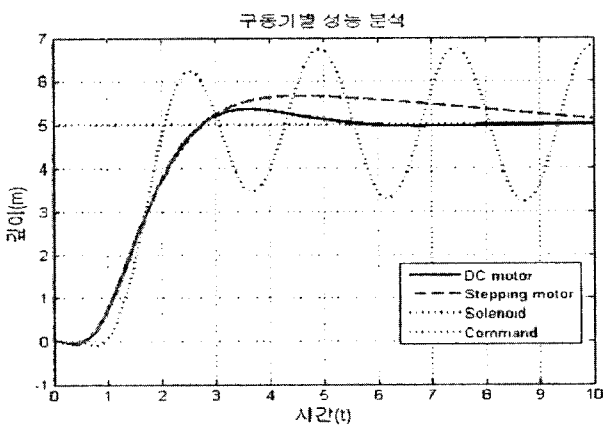


그림 4. 구동기별 성능 분석

본 연구에서 구축한 구동장치 모델링, 비선형 운동방정식 및 제어기 모듈과 연동한 시행착오적인 모의시험을 통하여 도출된 허용 가능한 DC 모터의 시정수는 0.2초 이하이고, 스테핑 모터의 분해능은 0.4(deg) 이하이다.

5. 통합 시뮬레이터 구성 및 HILS

5.1 통합 시뮬레이터 구성

수중운동체의 제어시스템 설계를 위한 통합 시뮬레이터 구성은 (1) GUI 기반의 자세제어기 설계를 포함하는 제어기부, (2) 3종의 저가 구동기의 특성모델링과 제어 알고리즘을 포함하는 구동기부, (3) MEMS 관성센서의 특성모델링과 자세/침로각 추정 알고리즘을 포함하는 센서부, 그리고 (4)비선형 운동방정식으로 구성된 수중운동체의 동역학 모델부로 구성된다. 그림 18

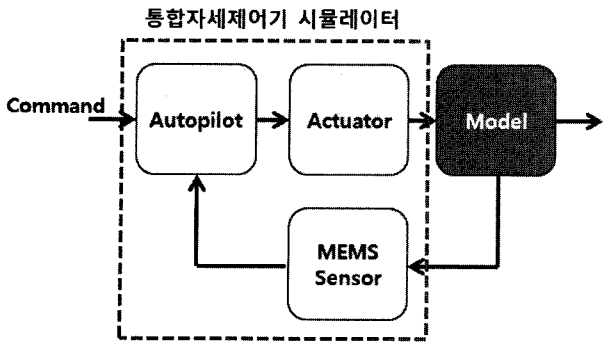


그림 5. 제어시스템의 통합 시뮬레이터 구성

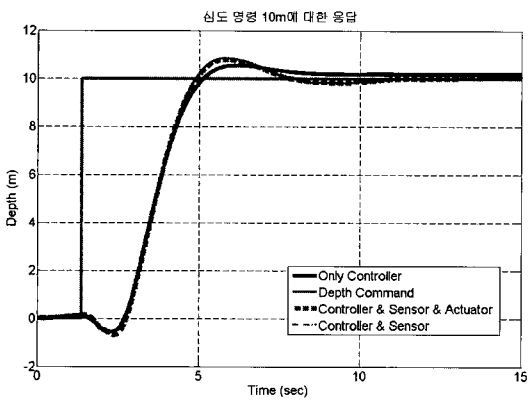


그림 19. 통합 시뮬레이션 결과

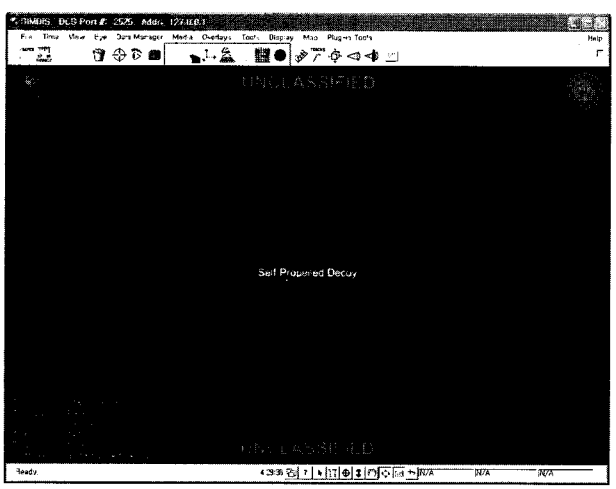


그림 20. SIMDIS GUI화면

은 통합 시뮬레이터 각 모듈간의 입출력 관계를 개념적으로 보여준다.

3장과 4장에서 선정된 MEMS 자세센서와 DC모터의 사양을

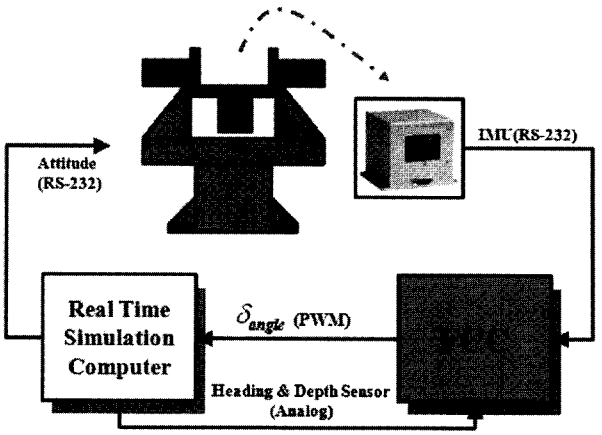


그림 21. 실시간 HILS 시스템 환경

제어시스템루프 상에 모두 적용한 최종적 시뮬레이션 결과는 그림 19와 같다. 이와 같이 본 통합 시뮬레이터를 통하여 전체 제어시스템 성능에 미치는 각 구성품의 개별적 성능사양 인자의 영향성을 체계측면에서 관찰할 수 있다.

본 통합 시뮬레이터는 설계자에게 시뮬레이션결과에 대한 시각적 만족도를 높이기 위하여 미국의 해군 연구소 (NRL)에서 공개프로그램으로 제공하고 있는 SIMDIS 프로그램과 실시간 네트워크로 연동되도록 하였다.

그림 20은 SIMDIS를 이용하여 구현한 GUI (Graphic User Interface) 화면의 한 예이다.

5.2 HILS

이렇게 구성된 통합 시뮬레이터를 실제 시스템에 적용하기 전에 폐회로 시험 기법을 이용한 지상 실물 모의 실험인 HILS를 수행함으로써 체계의 하드웨어 및 소프트웨어의 안정성을 검증하고 실제 시험에서의 위험요소를 제거하고 신뢰도를 증가시킬 수 있다[11-12]. 실시간 HILS 시스템 환경은 그림 21과 같다. 여기서 자동조종컴퓨터는 DOS 운용체계의 상용 PC104 Controller를 사용하였으며, 이곳에 통합시뮬레이터 제어법칙 모듈의 C-code를 이식하였다. 3축 운동재현장치는 Ideal Aerosmith사의 제품을 사용하였으며 그 제원은 표3과 같다.

MEMS 자세센서는 3축 운동재현장치에 장착된다. 한편 통합 시뮬레이터에서 구축된 수중운동체의 운동방정식을 실시간으로 연산하기 위한 실시간 컴퓨터는 dSPACE사의 DS1005를 사용하였다.

전체 HILS의 운용 환경은 통합 시뮬레이터의 환경과 같은 Matlab/Simulink로 하였으며, 실시간 컴퓨터와의 인터페이스, 제

표 3. 3축 운동재현장치의 제원

AXIS	INNER	MIDDLE	OUTER
Encoder (cts/rev)	614,440	614,440	614,440
Angularly freedom	unlimited	unlimited	±720
Rate			
Maximum rate	±350 deg/s	±350 deg/s	±350 deg/s
Minimum rate	±.001 deg/s	±.001 deg/s	±.001 deg/s
Resolution	.001 deg/s	.001 deg/s	.001 deg/s
Positioning			
Range (deg)	0-359.999	0-359.999	-720.0-720.0
Accuracy, arc sec	± 30	± 30	± 30
Resolution,arc sec	± 2.1	± 2.1	± 2.1

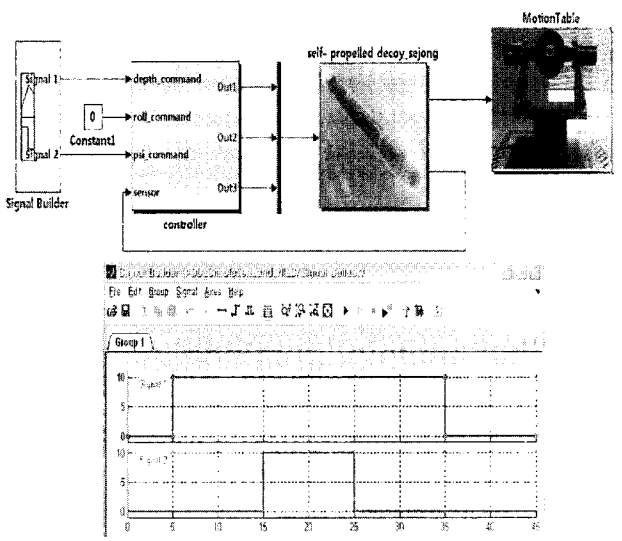


그림 22. Matlab/Simulink 기반의 HILS 운용

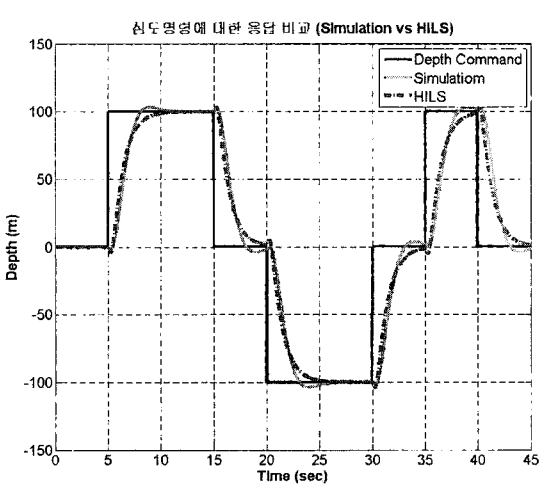


그림 23. 심도 명령에 대한 HILS 결과

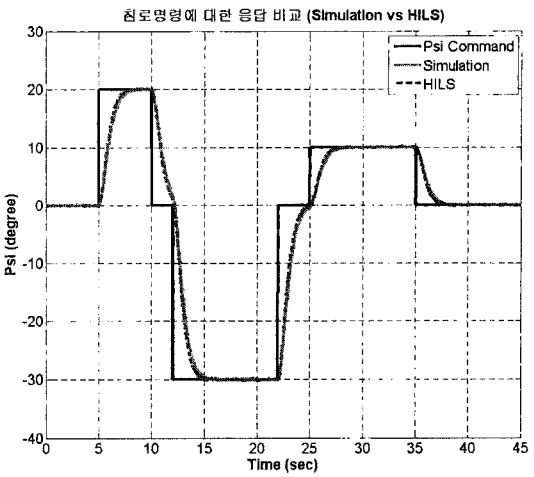


그림 24. 침로 명령에 대한 HILS 결과

어 컴퓨터로의 조종명령 입력과 센서 신호를 취득하여 수중운동체의 운동 상태를 모니터링이 가능하도록 그림 22와 같이 구현하였다.

이상의 환경에서 수행된 HILS 결과 중 심도 및 침로제어의 시응답은 그림 23, 24와 같다. 이로서 자동조종장치, MEMS 자세센서, 구동장치의 구현이 정상적으로 이루어졌음을 체계적 측면에서 검증할 수 있음을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 MEMS 관성센서 기반의 소형 자율무인 수중운동체의 제어시스템 설계를 위한 소프트웨어적인 통합시뮬레이터의 구축과 이를 HILS와 연계한 제어시스템의 연속적 검증체계를 구축하였다. MEMS 관성센서 기반의 자세센서 부와 소형/저가 구동장치 부의 성능특성 모델링, 그리고 수중운동체의 동역학 모델링과 자동조종 제어법칙 부로 구성된 Matlab/Simulink 환경의 통합 시뮬레이터를 구축하여 체계적 관점에서 제어시스템의 구성품인 MEMS 관성센서 와 구동장치의 최소한의 사양을 도출 할 수 있었다. 또한 통합 시뮬레이터를 HILS와 연계하는 체제 구축을 통하여 수중운동체의 탑재 하드웨어와 소프트웨어를 동시에 결합하여 성능을 검증할 수 있도록 하였으며, 이로서 전체 시스템의 안정성과 성능을 정성적으로 검증할 수 있었다.

이를 통하여 실제 시험에 소요되는 많은 비용과 시간, 그리고 위험성을 단축하고, 실제로 구현하기 어려운 상황을 지상에서 모의시험을 해봄으로써 제어시스템의 성능을 체계적/통합적으

로 입증할 뿐 아니라, 신뢰도의 향상을 도모할 수 있었다. 따라서 향후 실제 적용될 관성센서 및 구동기 등의 구성품의 하드웨어 요구 성능과 각각의 제어/보정 알고리즘을 검증하는 중요한 기준이 될 수 있다.

참고문헌

[1] J.YUH, "Design and Control od Autonumous Underwater Robots : A Survey", *Kluwer Academyc Publishers*, Printed in Netherlands, Autonomous Robots, pp. 7-24, 2000.

[2] S., Showalter, "The Legal Status Of Autonomous Under Vehicles", *The Marine Technology Society Journal*, Spring, vol. 38, no.1, pp. 80-83, 2004.

[3] M. R. Arshad, M. Y. Radzak, "Design and Development of an Autonomous Underwater Vehicle Test-Bed", *International Conference on Contol, Automation, Robotics and Vision*, 6-9th, pp. 257-260, 2004.

[4] 백수호, 홍성경, " 무인항공기의 비행경로 생성 및 유도제어 알고리즘 연구: HILS를 통한 검증," 제어 · 로봇 · 시스템학회 논문지, 14(12), pp. 1238-1243, 2008.

[5] https://Simdis.nrl.navy.mil

[6] Fossen, Thor I, *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, Jhon Wiley & Sons Ltd. 1994.

[7] B. Jalving, "The NDRE-AUV Flight Control System", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 19, no .4, pp. 497-501, 1994.

[8] N. Barbour and G. Schmidt, "Inertial Sensor Technology Trends", *IEEE Sensors J.* No. 1(4), pp. 332- 339, 2001.

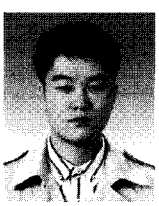
[9] 김도현, 오준호 "자율무인잠수정의 자세계측장치의 개발," 한국정밀공학회지, 제15권, 제1호, pp. 101-108, 1998.

[10] H. S. Kyong, "Fuzzy logic based closed-loop strapdown attitude system for unmanned aerial vehicle(UAV)", *Sensors and Actuators*, A, vol.107, pp. 109-118, 2003.

[11] 박영일, 최영철, 조규갑, 이만형, "수중 운동체의 육상 모의시험을 위한 실시간 HILS 시스템 구현", 대한산업공학회지, 제25권, 제 2호, pp. 282-289, 6.1999.

[12] 이관묵, 전봉환, 이종무 "자율무인잠수정의 통합시뮬레이션 환경 구축을 위한 기초연구", 한국해양공학회 추계학술대회 논문집, pp.125-130, 1999.

저 자 약 력



황 종 현

· 2006년 세종대학교 기계항공우주공학부 졸업.
· 2006년~현재 세종대학교 대학원 항공우주공학과 석사과정 재학중.
· 관심분야 : 무인항공기의 유도 및 제어,시선안정화 장치.

홍 성 경

· 1987년 연세대 기계공학과 학사.
· 1989년 동 대학원 공학석사.
· 1998년 Texas A&M Univ. 공학박사.
· 1989년~2000년 국방과학연구소 선임연구원.
· 2000년~현재 세종대학교 항공우주공학과 교수.
· 관심분야 : 무인시스템의 유도항법제어시스템

조 현 진

· 1988년 부산대 기계공학과 학사.
· 1990년 동 대학원 공학석사.
· 2005년 부산대 제어기계과 박사수료.
· 1990년~현재 국방과학연구소 선임연구원.
· 관심분야 : 수중무인시스템의 유도항법제어시스템