

## 반 자율 무인 잠수정의 개발

김경기\* · 최형식† · 유삼상\*\* · 서주노\*\*

(원고접수일 : 2006년 12월 19일, 심사완료일 : 2007년 4월 25일)

### Development of a Semi-Autonomous Underwater Vehicle

Kyeong-Ki Kim\* · Hyeung-Sik Choi† · Sam-Sang You\*\* · Ju-No Seo\*\*

**Abstract** : This paper is mainly concerned with the development of the semi-autonomous underwater vehicle(SAUV). Underwater vehicles are affected by external disturbances due to the sea conditions such as currents and waves when it is performing various missions. In this paper, we present a design scheme of the SAUV system with mathematical models. Also, we present a control system including motion control of motors and main controller and a communication based on CAN method for interrelated control between the controllers and actuators.

**Key words** : SAUV(Semi-Autonomous Underwater Vehicle), CAN 통신, 실시간 복합 PID 제어 알고리즘

### 1. 서론

과학이 발달함에 따라 인간은 지구 뿐 만 아니라 우주까지 탐사를 하게 되었다. 그러나 아직 지구상에서 해양은 탐사되지 않는 곳이 많은 미지의 영역으로 남아있다. 그 중에서도 심해저는 높은 가치를 지니는 해양광물의 보고로서 자원고갈 문제가 심각해지는 현 세계에 많은 관심을 받고 있다. 이에 따라 심해저를 탐사하는 연구가 세계에서 활발하게 이루어지고 있다. 연구의 중심에는 무인잠수정 UUV(Unmanned Underwater Vehicle)가 있다. 이 무인잠수정은 심해저의 극한환경에 사람을 대신해 작업을 수행하고 그 환경 정보를 수집하는

데 아주 중요한 기능을 한다.

무인잠수정은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데 우선 원격제어 무인 잠수정 ROV(Remotely Operated Vehicle)와 자율 무인 잠수정 AUV(Autonomous Underwater Vehicle)이다. ROV는 모선에 연결된 케이블을 통한 수동적인 제어로 구동되고 보통의 경우에는 작업을 위한 매니퓰레이터가 달려있어 정적 혹은 저속의 운동에서 작업을 수행한다. AUV는 원격조종과 동력전달을 하기 위한 별다른 장치 없이 동력원과 스스로 움직이기 위한 제어장치를 갖추고 수중에서 항해를 하면서 작업을 할 수 있다.

70년대 초부터 현재에 이르기까지 주로 해양 석

† 교신저자(한국해양대학교 기계정보공학부), E-mail: hchoi@hhu.ac.kr, Tel: 051) 410-4297

\* 한국해양대학교 기계정보공학부

\*\* 한국해양대학교 기계정보공학부

\*\* 해군사관학교 기계조선공학부

유산업의 수요에 의해 발전해 온 유인잠수정과 유선 무인잠수정(ROV)을 제 2세대 잠수정이라고 한다면 AUV는 그보다 발달한 제 3세대 잠수정으로 그 활용도가 크게 증가할 것으로 주목받고 있다<sup>[1]</sup>.

본 연구는 단독으로는 넓은 지역 탐사와 자유로운 항해가 어려운 ROV와 제작비가 비싼 AUV의 장단점을 보완하여 ROV와 AUV가 동시에 운용될 수 있는 복합적인 시스템인 SAUV(Semi-Autonomous Underwater Vehicle : 반 자율 무인 잠수정)를 개발하려고 한다<sup>[2]</sup>. 수심 50m급의 잠수정을 목표로 하여 설계하였고, 자세제어, 깊이제어 및 방향제어 시스템을 구축하는데 주안점을 두고 제어 알고리즘과 실험 결과들을 소개한다.

## 2. SAUV의 기구부 설계

선체는 Fig. 1과 같이 유체역학적인 실린더 형으로 설계하여 저항을 최소화 시키고, 주 추진축은 선미의 상하좌우의 4개의 모터를 사용하여 각각 개별적으로 제어하여 좌우 방향 전환 및 상하 이동 시에도 사용되도록 하고, 선수에는 2개의 모터를 선체와 수직으로 달아 선체의 상하운동에 사용됨과 동시에 선체의 롤링과 피칭에 대응하여 평형을 유지하도록 설계하였다.

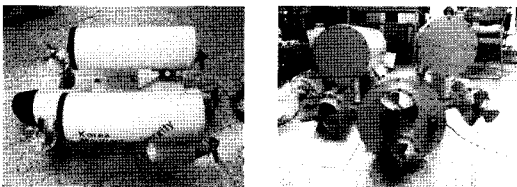


Fig. 1 Front and side view of SAUV

### 2.1 모터 선정을 위한 추력 계산

본 논문의 SAUV는 선체의 자기위치 유지 및 자세제어를 우선의 목표로 한다. 항력은 수중의 복잡한 비선형 계수를 단순화하여 계산하고 모터의 출력은 항력을 충분히 이길 수 있도록 하여 여유 있게 모터를 선정하였다.

선체의 최고속력은 2[knots] (=1.028[m/s])를 목표로 한다. 그리고 90[W] 직류모터를 먼저 선정

하고 역으로 항력 계산을 하여 출력이 항력을 이길 수 있는지를 알아본다.

의란을 무시하였을 때 SAUV에 가해지는 항력은 (1)과 같고, 여기서  $D$ 는 항력[N],  $C_D$ 는 항력계수로 0.2이며,  $\rho$ 는 평균 바다의 밀도인 1,029 [ $kg/m^3$ ]이다.  $v$ 는 정지해 있는 유체에 대해 SAUV의 최대 속도이며 1.028[m/s]로 한다.  $A$ 는 전면 투영면적  $m^2$ 이다<sup>[3]</sup>.

$$D = C_D \frac{\rho}{2} v^2 A \quad (1)$$

항력계산을 위해 SAUV를 각 부분으로 모듈화하였으며, (1)을 이용하여 각 모듈의 항력을 계산하여 Table 1에 정리하였다.

Table 1 Total and modular resistance force for SAUV

Item	Diameter [mm]	Rssistance [N]
Body	330	9.3
Cylinder for main actuator	120	1.23
Cylinder for vertical actuator	277	6.55
Balast tank	200	3.42
Total resistance force		20.5

총 항력  $D$ 는 추진축 모터 4개가 받는 항력이므로 모터 1개당 받는 항력은 5.125[N]이다. 이 항력을 이길 수 있는 모터의 토크를 위해 모터의 최대 회전수는 5000[rpm]으로 제한한다.

$$P_m = 2\pi n Q = 90 [W] \quad (2)$$

여기서,  $n$ 은 회전수(rps)이며, 5000[rpm]에서 모터의 토크  $Q$ 는 0.172[Nm]이다.

모터 1개 당 내야하는 추진동력은 항력과 최대속도 곱으로 약 5.27[W]인 것을 알 수 있다. 이는 프로펠러가 내야할 추진력으로 생각할 수 있다.

$$P_p = 2\pi n Q \times 0.95 \quad (3)$$

여기서 0.95는 프로펠러 효율이다. 일반 선박의 프로펠러는 약 2%의 손실을 갖는다고 가정하지만 본 연구에서는 제작조건 상 5%의 손실을 가정하여 안전범위를 넓혀 추진력을 얻도록 하였다<sup>[3]</sup>.

(3)에서 프로펠러 효율을 고려한 필요 회전수 (rps)는 5.133인 것을 알 수 있다.

필요 추진력을 내기 위해 5.8:1의 감속기를 사용 하였으며 그에 따른 5000[rpm]에서의 토크는 0.798[Nm], 프로펠러의 회전수는 14.37[rps]이다.

따라서 최종적으로 얻은 토크와 회전수로부터 프 로펠러의 추진력이 68.45[N] 인 것을 알 수 있다. 프로펠러의 항력을 생각하지 않고 구한 추력이라 하더라도 요구되는 프로펠러의 추력보다 약 10배 이상의 큰 추력을 얻을 수 있다. 이는 모터의 속도 제어 시 프로펠러의 항력을 배제할 수 있을 정도의 값이다. 즉, 보다 약 조건 속에서도 요구되는 추력 을 낼 수 있으며 목표한 최고 속도보다 빠르게 운 행할 수도 있다.

### 2.2 방수 설계

각 실린더 및 본체의 덮개는 일체형 보다는 유지 보수가 쉽도록 O링 2개를 사용하여 2중 방수처리 를 하였고, 누수 가능성이 가장 높은 모터의 추진 축 부분은 가격이 저렴하며 유지보수가 쉬운 미케 니컬 씰(Seal)을 이용하여 아래 Fig. 2와 같이 방 수 설계하였다.

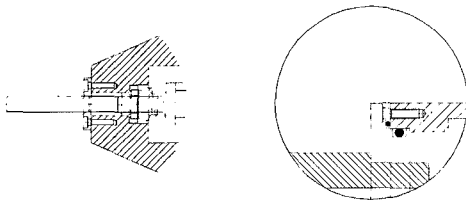


Fig. 2 Waterproof design of cylinder cover and motor rotor

## 3. SAUV 제어시스템의 설계

### 3.1 SAUV 제어시스템의 구성

SAUV를 제어하기 위한 전체 시스템 구성도는 Fig. 3과 같다. 제어시스템은 크게 Host PC, 주 제어기, 모터제어기, 서보모터 드라이버 및 센서부 로 구성된다. Host PC에서 SAUV에게 명령을 보 내거나 선체의 상황을 파악하고, 카메라로부터 영

상을 받아 자료를 수집한다. 여기서 Host PC는 제어 시스템의 최상위 제어기가 되어 ROV와 같이 원격 조종하며, 동시에 Master DSP가 상위 제어 기로서 자율적으로 자세제어, 깊이제어 및 방향 제 어를 할 수 있는 기능을 한다. 여기서 DSP간에는 CAN통신을 하며 Master DSP는 모터제어 DSP 에게 명령을 내린다.

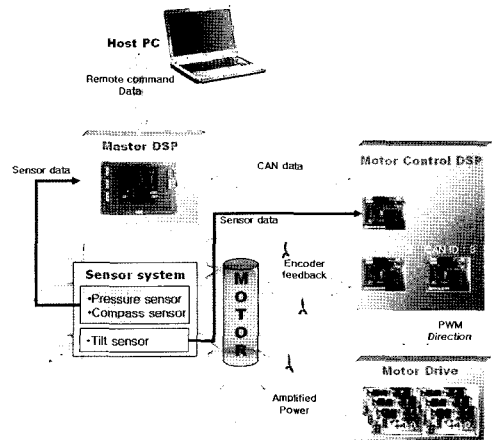


Fig. 3 SAUV Control system

먼저, Host PC는 선체와 연결된 케이블을 통해 Master DSP와 시리얼통신을 하며, 이를 통해 작 업명령을 보내주거나 SAUV의 상태를 모니터링 한다.

Master DSP는 원격조종의 경우 Host PC로부 터 원격으로 받은 작업명령에 대한 데이터를 CAN 통신을 통해 모터제어 DSP에게 전달한다. 그리고 각 모터로부터 엔코더(encoder) 신호를 받아 Host PC로 보내주는 폐루프(close loop) 제어를 한다. 하위 프로세서와 CAN통신을 하고 센서 값 을 받기 위해 Fig. 4와 같이 DSP 제어보드를 구 성하였다. 이를 통해서 최상위 프로세서인 Master DSP가 전체 제어시스템을 관리하여 자율 적으로 자세제어, 깊이제어 및 방향 제어를 한다. 근본적으로 원격조종의 경우에 외부에서 인간이 참 여하여 수중의 상황에 따라 지속적으로 제어신호를 보내는 tele-operating 방식의 제어를 한다. 반 면, 자율제어 시에는 원격 조종을 통해 인지한 제 어 입력 데이터를 Host PC로 받은 후에 이 명령

에 따라서 SAUV가 자율적으로 동작하는 방식이다. 이후의 제어방법은 원격조종의 경우와 같고 모터로부터 받은 엔코더 신호와 센서로 부터 받은 신호에 대해 Master DSP는 능동적으로 처리하여 하위 프로세서에 자세제어 및 방향 전환에 관련된 데이터를 보내준다.

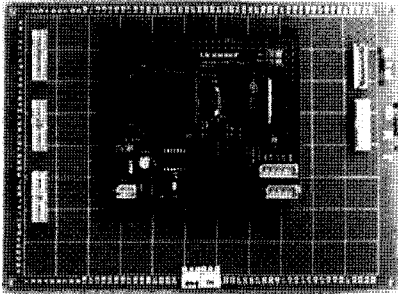


Fig. 4 Control board for Master DSP

모터제어 DSP는 CAN통신을 위해 Master DSP와 같은 TMS320LF2407A 모터 제어용 마이크로 프로세서를 사용한다. 두 대의 모터를 제어할 수 있도록 두 개의 엔코더 카운터를 내장한 모터 전용 제어 보드를 Fig 5.와 같이 직접 제작하여 하나의 DSP가 두 개의 모터를 동시에 제어할 수 있도록 구성하였다<sup>[4]</sup>.

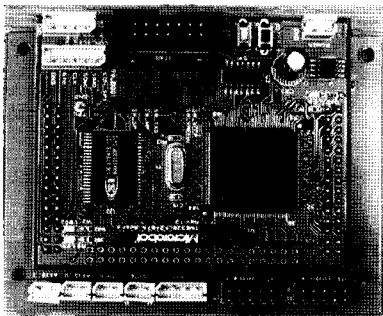


Fig. 5 Motor controller

모터를 구동하기 위해 DSP에서 출력되는 PWM (Pulse width modulation)은 DSP 프로세서의 사용전압으로 실제 모터를 구동시켜야 하는 15V의 전압보다 작은 값이다. 따라서 모터를 구동하기 전에 15V로 증폭시켜 주어야 한다. 이러한 역할을 해주는 것이 모터 드라이브이다.

Table 2 Properties of Motion Controller

Parts	Part name	Function
MCU	TMS320LF2407A	PWM, Encoder counter, UART, Timer, GPIO
Level Shifter	74LVHT4245	3.3V (->) 5V
DeadTime Generator	CD4538	Dual Precision Monostable

모터 드라이브는 구동 모터 제어기에서 제어알고리즘에 따라 출력되는 PWM과 모터 전 방향 신호에 따라 PWM 듀티비(Duty rate)에 비례 증폭되어 모터에 전압을 공급한다.

본 논문에서는 Power Transister와 브릿지 회로를 구성하여 모터 드라이버를 Fig. 6과 같이 직접 제작하였다.

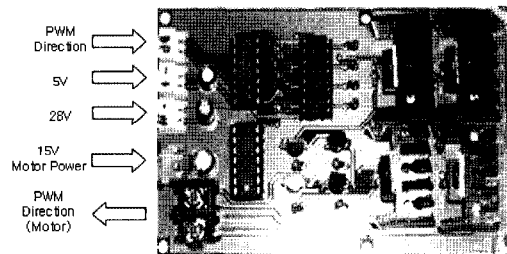


Fig. 6 Motor driver

### 3.2 다수의 DSP간의 CAN 통신

다수의 모터제어 DSP와 하나의 Master DSP 간의 효율적인 통신을 위해서는 네트워크 통신이 구현되어야 한다. 하지만 일반적인 직렬통신을 이용하여 네트워크를 구성 할 경우 통신의 신뢰성이 떨어지게 되고 모션보드에 잦은 인터럽트 루틴의 발생으로 인해서 구동 시에 오동작의 원인으로 작용할 수가 있다. 그래서 CAN 통신을 이용하여 다수의 DSP간의 네트워크 통신을 구현하였다. 제작된 시스템의 CAN 통신 구현은 DSP2407에 포함되어 있는 CAN 컨트롤러를 사용하였고 송수신 인터럽트를 이용한 Full CAN 컨트롤러를 구현하여 CPU 부하를 최소화 하였다<sup>[4]</sup>.

Master DSP에서 데이터 값을 CAN 통신 버스에 던져주면 각각의 Motor Control DSP는 자

신의 ID에 해당하는 데이터만 받아 모터를 구동한다. 이는 시리얼 통신과 달리 Master DSP는 센서나 엔코더 신호에 따라 능동적이고 즉각적으로 처리하여 CAN 통신 버스 상에 하위 DSP를 구분하지 않고 데이터를 보내주기만 하면 모터제어 DSP가 알아서 자신의 데이터만 가져가므로 보다 효율적으로 통신을 할 수 있다.

3.3 센서 구성 및 제어 알고리즘 설계

SAUV의 위치와 깊이 정보 수집을 위해 2개의 Tilt(기울기) 센서와 수심 60m까지 측정 가능한 압력센서 그리고 0~360°의 측정범위를 가진 Compass센서를 이용하였다. 운항 시 SAUV의 전방 관측을 위한 CCD 카메라가 선수 부분에 장착되어 있다. Table 3에서 각 센서들을 요약하였다.

Table 3 Sensor of SAUV

Sensor	Model	Output
Tilt sensor	SA1	Analog
Depth sensor	P-100	Analog
Compass	CMPS_03	PWM
Camera	Water eye 500	

SAUV의 제어 알고리즘은 기본적으로 모터 속도 제어에 연산시간이 적게 걸리고 실용성이 높은 PID제어를 적용하였다. 이는 엔코더에서의 위치정보를 피드백하는 폐루프 구조이다<sup>[5]</sup>.

롤링과 피칭 제어를 위한 Tilt센서의 기울기 정보, 요잉 제어를 위한 Compass 센서의 방향 정보, Depth 제어를 위한 압력센서의 깊이정보를 DSP에서 피드백 받는다. 현재 SAUV의 위치 및 상태정보에 대해 PID제어한 출력을 모터 속도데이터로 되돌려 주는 실시간 복합 PID제어 알고리즘을 Fig. 7과 같이 설계하였다<sup>[6]</sup>.

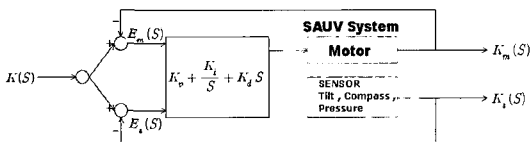


Fig. 7 Hybrid PID controller

Fig. 7에서 명령입력벡터 K(S)는 Host PC에서 SAUV에 내리는 속도, 좌우 기울기(Tilt), Yaw 축 회전각(Compass), 그리고 깊이(pressure)에 대한 기준입력신호를 나타낸다. 또한, 기준입력신호에 따라 SAUV의 출력신호로 나오는 Km(S)는 모터 엔코더 센서의 속도 값을 나타낸다. 또한, 신호벡터 Ks(S)는 Tilt 센서로부터의 좌우 기울기 정보, Zyro Compass로부터의 Yaw 축 회전각, Pressure 센서로부터의 깊이정보를 나타낸다. 이들 센서 데이터는 피드백되어서 SAUV의 속도 및 자세 제어에 사용된다. 여기서 비례 제어상수  $K_p$ , 적분 제어상수  $K_i$ , 미분 제어상수  $K_d$ 는 Table 4와 같이 설정하였다.

Table 4 PID control gain

Item	$K_p$	$K_i$	$K_d$
Rolling control	4.0	0.2	0.4
Pitching control	2.0	0.2	0.3
Yawing control	0.2	0.02	0.02
Depth control	1.5	0.05	0.08

3.4 제어용 윈도우 프로그램의 개발

SAUV가 수중에서 항해 시 사용자는 선체의 정확한 상황을 알기 힘들다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 별도의 제어용 윈도우 프로그램을 제작하였다. 제어 명령 입력과 현재 SAUV의 상태 데이터로서 롤, 피칭, 요 방향의 각도와 수심을 확인할 수 있도록 가시화하였다.

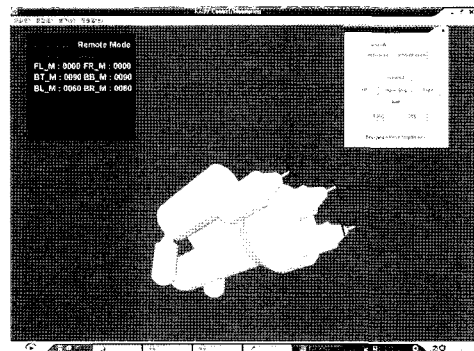


Fig. 8 Window program for control

## 4. 시험 및 고찰

### 4.1 제어시스템 시험

실제 수중에서 시험하기 전에 제어시스템의 안전성 시험을 먼저 시행하였다. Fig. 9는 실제 제어시스템을 모두 구성한 모습으로 외부 Host PC에서 시리얼 통신으로 원격조종을 하여 모터 속도제어 및 Master DSP와 모터제어 DSP간의 CAN통신에 문제가 없음을 확인하였다.

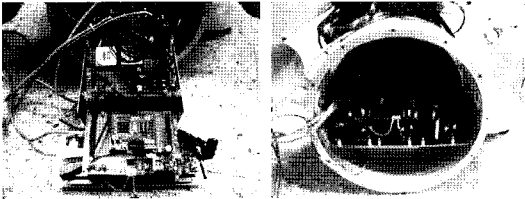


Fig. 9 Total control system on SAUV

### 4.2 항해 시험과 Hovering, Depth 제어 시험

목표한 항해 속도와 방향 전환에 대한 시험, 자세 유지를 위한 Hovering 시험 그리고 잠항 깊이를 조절하는 Depth 제어 시험을 예인 수조에서 수행하였다. SAUV는 감속기를 고려하여 670rpm으로 모터를 회전시키고 5m 예인 수조를 3.5초에 주행하여 약 1.43knts의 속도로 주행하였다. Hovering 시험을 위해 인위적으로 수평을 틀리게 하여 외부의 조작 없이 SAUV가 수평을 유지하는 것을 확인하였으며 Depth 제어 시험은 수심 3m로 잠항하도록 입력을 주고 다시 0m로 입력을 주었을 때 잠항한 뒤 수면으로 부상하는 것을 확인하였다.



Fig. 10 Navigation test



Fig. 11 Tilting and yawing control test

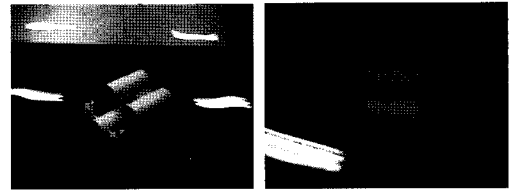


Fig. 12 Depth control test

본 연구에서 시험과정은 실제 물 안에서 제어 알고리즘에 따른 동작 시험을 하기 위함으로 유체 저항, 관성의 영향으로 인한 가, 감속 시간의 지연 그리고 프로펠러의 효율을 고려하면 만족할 만한 결과를 얻었다.

## 5. 결론 및 향후과제

본 논문에서는 수심 50m급의 소형 6자유도 반자율 무인잠수정을 제작하였고 제어 시스템을 구현하였다.

Master DSP 제어보드 1개와 모터제어기 3개를 CAN통신을 이용하여 센서와 모터 엔코더의 신호를 받아 센서퓨전을 통한 실시간 복합 PID 제어 알고리즘을 설계하였다. 이에 따른 개발 제어시스템은 외부의 원격조종 없이 실시간으로 자세 유지를 할 수 있으며, 잠항 깊이를 사용자가 입력한 데이터로 유지할 수 있는 Depth 제어 기능이 있음을 확인하였다. 그리고 선체의 운항 상황은 실시간으로 모니터링 할 수 있도록 구현하였다.

향후 항해의 안정성을 높이기 위해 6자유도 운동 방정식을 유도하고 유체동역학 계수를 산출하여 보다 효율적인 제어알고리즘을 적용할 것이며, 가속도 센서를 추가하고 각 센서 출력을 수집하여 데이

터화 하고, 센서 퓨전을 이용하여 보다 정확한 SAUV의 위치 정보를 얻을 수 있도록 개발할 계획이다.

### 후 기

본 논문은 방위청 지정 수중운동체 센터 지원에 의한 논문입니다.

### 참고문헌

- [1] 이관복 외, "심해무인잠수정 해미래와 해누비의 개발", 국방수중로봇 워크샵 2005, pp. 30-32, 2005.10.
- [2] Hiroshi Sakai et al., "Autonomous Towed Vehicle for Underwater Inspection in a Port Area", IEEE ICRA05, Vol. 1, pp. 189-194, 2005.
- [3] 현범수, 저항추진론, 한국해양대학교 해양시스템공학부, pp. 35-40, 2004.
- [4] 김도윤, 예제로 배우는 제어용 DSP, 성안당, pp 23-33.
- [5] 변승우 외, "수중작업용 Hovering AUV의 Test-bed 설계", 국방수중로봇 워크샵 2005, pp. 48-49, 2005.
- [6] 서주노, 최중락, "자율무인잠수정의 수중도킹을 위한 제어기 설계", 국방수중로봇 워크샵, 2005, pp. 57-59, 2005.10.
- [7] D. A. Smallwood, L. L. Whitcomb, "Adaptive Identification of Dynamically Positions Underwater Robotic Vehicles", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 11, pp. 505-515, 2003.

## 저 자 소 개



**유삼상(柳三相)**

1990년 미국 University of Wisconsin-Madison 기계공학과 석사, 1994년 미국 Iowa State University 기계공학과 박사  
로 현재 한국해양대학교 기계정보공학부 교수. 전공은 시스템 동역학 및 제어공학으로 자동차 동역학 제어, 로봇 제어 및 수중 로봇의 제어에 대한 연구를 수행.



**서주노(徐柱魯)**

1985년 서울대학교 기계공학과 졸업, 1989년 미해군대학원 기계공학과 석사, 그리고 1997년 미 캘리포니아공대 기계공학과 박사로 무인 잠수정 항법 및 제어에 대한 연구를 수행.



**최형식(崔炯植)**

1986년 미국 University of South Carolina 기계공학과에서 석사, North Carolina State University 기계 및 항공공학과 박사로 협조로봇의 제어, 보행로봇 개발, 수중 운동체 시스템 연구 및 공장자동화에 대한 연구를 수행



**김경기(金敬基)**

현재 한국해양대학교 기계공학과 대학원생으로 수중 운동체 시스템의 설계 및 제어에 대한 연구를 수행중.