

## 로봇팔을 위한 중력보상기 연구

최형식† · 김동호\* · 허재관\*\*

(원고접수일 : 2009년 1월 20일, 원고수정일 : 2009년 3월 1일, 심사완료일 : 2009년 3월 23일)

### A Study on a Gravity Compensator for the Robot Arm

Hyeung-sik Choi† · Dong-ho Kim\* and Jea-gwan Her\*\*

**Abstract :** In this paper, a design and analysis of a gravity compensator which is a new device to reduce the joint torque of robots caused due to gravity is presented. Joints of all robots are loaded by large torques due to gravity. By applying the gravity compensator to the robot joints, the load torques applied to the robot joints are reduced by the repulsive force of the gravity compensator such that the size of the joint actuation motor can be reduced.

In this paper, the structure and force relation of the gravity compensator are analyzed. The superior performance of the proposed gravity compensator is verified through experiments which measure the joint motor current caused by the load applied to the robot link.

**Key words :** Gravity compensator(중력보상기), Robot joint(로봇 관절), Joint actuator(관절 구동기), Joint torque(관절 부하), Robot(로봇)

### 1. 서 론

인간과 비슷한 구조로 인간 생활환경이나 작업현장에서 작업할 수 있도록 개발된 휴머노이드 로봇은 로봇 중에서 가장 복잡하며 최고의 제작 및 제어기술을 요하고 있다. 이 휴머노이드의 핵심 기술 중의 하나는 로봇을 지탱하며 보행하거나 떨 수 있는 다리 관절 부분이다. 또한 산업용 다관절 로봇팔의 경우에 고중량의 작업물을 이송하기 위해서는 고토크를 낼 수 있는 관절의 성능이 매우 중요하다.

다. 이러한 휴머노이드나 다관절 로봇팔의 관절부는 중력의 영향을 받는 로봇의 자중이나 이송 물체의 중량으로 인해 큰 부하토크를 받게 되고 이 부하토크는 관절부를 이루고 있는 관절구동기의 용량을 크게 설계하는데 직접적인 영향을 미친다. 따라서 토크성능이 뛰어난 관절 구동기에 대한 연구와 이를 적용한 로봇에 대한 연구들이 수행되었다.

큰 힘을 낼 수 있는 구동기로는 유압을 이용한 것이 있다. 유압 구동기를 보행로봇의 관절구동기로 사용하여 구동토크를 증대하는 연구가 있었다

† 교신저자(한국해양대학교 기계정보 공학부, E-mail:hchoi@hhu.ac.kr, Tel: 051)405-4969)

\* 한국해양대학교 대학원 기계공학과

\*\* 한국해양대학교 대학원 기계공학과

[1]. 하지만, 유압 구동기는 무겁고 보수유지가 어려운 단점으로 사용에 어려움이 있어서 보편적으로 사용되지 못하고 있다. 다른 관절구동기로는 경량으로 구성하여 로봇 암의 토크성능을 증대시키기 위하여 압축 공기주머니의 인공근육을 적용하여 중량대비 높은 가반하중을 가지는 공압 관절 구동기에 대한 연구가 있었으나 이는 관절구동기의 위치 및 속도 제어에 어려운 문제가 있었다[2].

이러한 치명적인 단점들로 최근에는 모터기반의 관절 구동기를 사용하게 되었다. 모터는 특성상 속도는 빠르나 토크가 약하여 감속기와 직결하여 토크를 증대시켜 로봇의 관절구동기로 사용하고 있다. 하지만, 보다 큰 힘을 요하는 작업 수행을 위해 중력으로 인하여 로봇의 관절에 가해지는 토크부하를 감소시키거나 관절 구동토크 방법을 개선하여 관절구동기의 토크성능을 향상시키는 연구들이 행하여졌다.

이들 중에는 보행로봇의 관절 구동기에 인장스프링을 적용하여 가해지는 중력을 보상하여 구동 관절구동기의 부하를 감소시켜 관절구동기의 토크성능을 높이는 장치를 적용한 연구가 있었고[3], 관절구동기의 토크성능을 높이기 위하여 스크류와 너트로 구성된 크랭크 형태의 관절 구동기를 고안하여 로봇에 적용한 연구가 있었다[4]. 또한, 농업용 로봇팔의 토크성능을 증가시키기 위하여 폐관절 형태의 관절 구동기를 적용하여 수박과 같은 무거운 농작물을 이송하는 연구가 있었다[5]. 이 관절 구동기는 폐관절 메커니즘이 한 개의 관절에 적용되어 수박 이송에 좋은 토크성능을 보였다. 새로운 형태의 사절링크기반 폐체인 구조의 관절 구동기를 중력의 영향을 받는 피칭관절에 적용하여 고가반하중의 4 자유도 로봇팔을 구성하여 자체 중량과 가반하중의 비가 기존의 산업용 로봇 팔에 비해 3배이고 정밀도도 3배인 성능을 보인 연구가 있었다[6]. 하지만, 로봇의 작업공간이 작아지는 단점이 있다.

본 논문에서는 로봇의 관절구동기의 중력으로 인하여 로봇의 관절 구동기에 가해지는 부하를 저감하여 관절구동기의 토크성능을 상대적으로 개선시킬 수 있는 새로운 개념의 중력보상기에 대해 연구하였다. 본 논문에서 제안하는 중력보상기의 기본

원리는 국내특허 등록 중인 새로운 개념으로 국내 외적으로 개발된 적이 없는 독창적인 원리를 바탕으로 한 장치에 대한 연구이다.[7] 중력보상기를 적용한 관절 구동기 구조와 동작 메커니즘에 대한 연구와 이를 로봇의 관절에 적용하여 중력으로 인한 부하토크의 저감특성을 연구하였다. 시뮬레이션과 실험을 통하여 제안한 중력보상기의 성능을 검증하였다.

## 2. 중력 보상기의 구조 해석

### 2.1 중력보상기의 구조

로봇의 관절 구동기에 적용되는 중력보상기는 Fig. 1과 같이 관절 구동기를 이루는 구동모터와 감속기에 직결되는 구조이다. 이는 Fig. 2에서와 같이 로봇 관절부에 고정되는 고정판과 이에 밀착하여 중심이 로봇의 링크가 결합되는 모터/감속기의 회전축에 결합되어 회전하는 회전판, 그리고 회전판 면의 원주를 따라 형성된 슬롯과 슬롯 내에 삽입되는 스프링으로 구성되는 매우 간결한 구조로 구성된다. 중력보상기의 부하토크 감쇄는 회전판에 연결된 로봇 링크에 가해지는 중력으로 인한 부하가 회전각에 따라 원주방향의 스프링을 압축시켜 이의 반발력에 비례하여 부하를 감소시키는 특성을 갖도록 구성하였다.

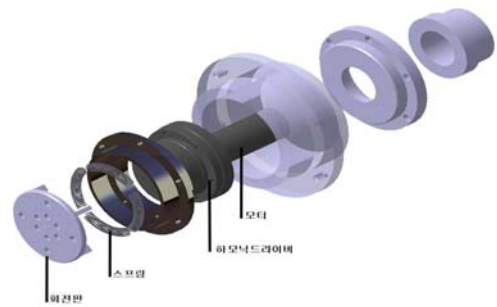


Fig. 1 Structure of a gravity compensator

본 논문에서 개발한 중력보상기는 회전운동을 하는 로봇 팔이나 보행 로봇을 위한 구동모터에 직결된 감속기로 구성된 관절 구동기에 연결된 링크에 가해지는 중력에 의한 부하 모멘트를 회전각에

따라 보상하여 관절 구동기에 가해지는 부하토크를 저감시켜 상대적으로 관절구동기의 토크성능을 증가시키는 특성을 갖는다.

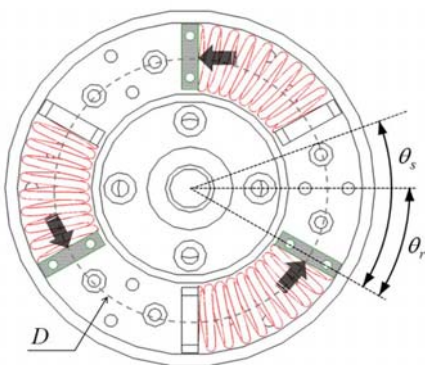


rotating disk      support disk

**Fig. 2 Outlook of the developed gravity compensator**

## 2.2 중력보상기의 역학 해석

중력보상기에 연결된 로봇 링크에 가해지는 중력으로 인한 부하를 저감하는 역학관계는 Fig. 3과 같이 표현된다. 여기서 회전판에 붙어있는 격막이 중력부하로 인한 로봇 링크의 회전과 함께 스프링을 압축하면 고정판의 격막에 대한 스프링의 압축 변형에 비례하여 반력  $F_s$ 이 발생한다. 이 반력은 스프링의 세기를 나타내는 스프링 상수  $k$ 의 크기와 중력보상기에 내재하는 스프링의 개수에 비례하여 결정된다. 이러한 역학관계는 식(1)로 나타낸다. 식 (1)은 중력보상기의 회전판에 연결된 링크에 중력으로 인하여 관절 구동기에 가해지는 부하토크와 중력보상기 내의 스프링 압축으로 인해 발생한 반발 모멘트 간의 관계를 나타내는 식이다.



**Fig. 3 Operational structure of the gravity compensator**

$$T_m = M_p - M_s \quad (1)$$

여기서  $T_m$ 은 구동모터의 부하 토크이고  $M_p$ 는 외부 부하 로 인하여 로봇의 관절구동기의 구동모터에 걸리는 모멘트이고  $M_s$ 는 스프링의 압축으로 인해 발생한 반발 모멘트로 이의 차는 관절구동기의 구동모터에 대한 부하  $T_m$ 로 표현된다. 식 (1)을 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.

Fig. 3에서 중력부하로 인하여 로봇 링크가 회전하여 스프링을 압축하면 스프링을 압축한 각도의 양  $\theta_s - \theta_r$ 에 비례하여 스프링의 반발력  $F_s$ 이 발생한다. 여기서  $\theta_s$ 는 고정판의 원주 홈을 따라 설치한 압축스프링의 회전각의 총 길이를 나타낸다.

$$F_s = nk \frac{\pi D(\theta_s - \theta_r)}{360^\circ} \quad (2)$$

여기서  $n$ 은 압축 스프링의 개수이다. 또한, 스프링의 반발력  $F_s$ 는 스프링 상수  $k$ 의 크기와  $n$  개수에 비례함을 알 수 있다. 이 스프링 반발력은 다음의 모멘트 식으로 중력으로 인한 부하토크를 감소시키는 역할을 한다.

$$M_s = DF_s/2 \quad (3)$$

여기서  $D$ 는 회전축으로부터의 스프링 유효직경이다.

중력보상기를 로봇 팔에 적용할 때, 로봇 팔 링크의 자중 및 링크에 걸리는 부하하중으로 인한 부하 토크와 이를 보상하는 중력보상기의 보상토크의 차가 관절구동기의 구동모터에 가하는 부하토크에 대한 역학 계산이 필요하다. 이 관계는 Fig. 4에 표현되었고 여기서  $P$ 는 로봇 링크에 가해지는 외부 부하를 나타낸다. 중력보상기의 보상토크에 관한 역학 관계식은 식 (1) 및 식 (2)에 정리하였고 이를 구성하는 로봇 팔 링크의 자중 및 링크로 인한 부하 토크에 대한 관계식은 다음과 같다. 로봇 링크 길이  $L$ 와 로봇의 관절각  $\theta$ , 중력보상기의 회전 반경  $D$ 에 따라 중력보상기의 보상성능이 달라진다. 식 (2)에 의해 회전반경  $D$ 의 크기가 증가함에 따라 부하는 감소함을 알 수 있으나  $L$ 과  $\theta_r$ ,

의 변화에 따른 특성파악이 필요하다. 즉, 피칭 방향으로 동작을 하는 로봇의 관절에 적용될 중력보상기를 설계하기 위해 Fig. 4와 같이 로봇의 링크와 중력보상기 사이의 역학 구조를 나타내고 각 인자 간의 관계를 나타내는 식을 도출하였다.

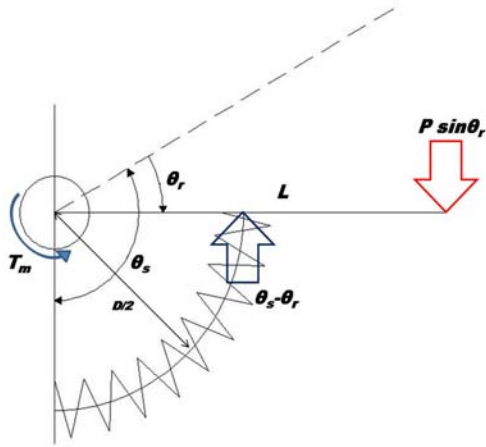


Fig. 4 Moment relation between the gravity compensator and payload

외부 부하 \$P\$로 인하여 로봇의 관절구동기의 구동모터에 걸리는 모멘트는 다음과 같다.

$$M_p = PL \sin \theta_r \tag{4}$$

식 (1)~(4)는 중력보상기의 적용으로 인한 구동모터의 부하토크의 관계식을 나타내었다. 중력보상기로 인해 저감된 모터의 부하토크를 측정하기 위해서는 모터의 부하토크와 부하전류의 비례적인 관계식을 이용하여 전류를 측정하면 된다. 식 (1)에서 중력보상기에 의해 모터에 가해지는 외부모멘트 \$M\_p\$를 감소시키는 부하토크 \$T\_m\$을 시험을 통하여 측정하기 위해서 구동모터를 이용하였다. 측정을 위하여 구동모터를 이용하였고 모터의 부하와 부하전류 \$I\_m\$와의 관계는 식 (5)와 같다.

$$I_m = \frac{T_m}{k_m} + I_o \tag{5}$$

여기서 \$I\_o\$는 무부하 오프셋 전류로 상수이고 \$k\_m\$

은 토크 상수이다. 무부하 오프셋 전류 \$I\_o\$는 실험을 통해 측정된 결과 0.005A 이하로 매우 작아서 무시할 수 있었다. 따라서 식 (5)에서 부하토크 \$T\_m\$과 전류 \$I\_m\$은 비례적인 관계로 설정되며 부하토크의 크기는 전류의 측정으로 알 수 있다.

중력보상기를 최적으로 설계하여 로봇의 관절 구동기에 설치하면 관절 구동기에 가해지는 부하토크를 크게 저감할 수 있다. 본 논문에서는 이를 위해 제안한 중력보상기의 성능을 검증하기 위하여 기본적인 실험 장치를 구축하고 실험하였다.

### 3. 중력보상기의 특성실험

#### 3.1 성능해석용 시뮬레이터 구성

본 논문에서는 Matlab을 사용하여 중력보상기의 토크 저감특성에 영향을 주는 중요한 인자들과 부하토크의 상관관계를 나타내는 역학관계식을 적용한 시뮬레이터를 구성하였다. 중력보상기의 설계에 중요한 인자를 정의하고 이를 적용하여 부하토크에 대한 보상력에 대한 예측을 하여 궁극적으로 최적의 중력보상기를 설계할 수 있는 시뮬레이터를 구성하였고 이를 이용하여 실험에 사용되는 중력보상기의 설계 인자 값을 도출하였다. Fig. 5는 시뮬레이터를 통해 도출한 로봇 회전각 변위에 따른 중력보상기의 보상 값을 계산해주는 Matlab 프로그램을 이용한 시뮬레이터의 화면이다. 밑의 그림에서 맨 위의 곡선은 식 (4)의 관절구동기의 구동모터에 걸리는 모멘트곡선으로 로봇 링크의 회전각에 따라 \$\sin e\$곡선으로 표현되며 그 밑의 직선은 식 (2)의 부하토크에 대한 스프링의 반발력에 의한 모멘트 \$M\_s\$를 나타낸다. 스프링 상수가 증가함에 따라 기울기가 달라진다. 맨 밑의 그림은 관절 구동기에 가해지는 부하토크와 중력보상기 내의 스프링 압축으로 인해 발생한 반발 모멘트 간의 차를 나타낸다. 이 시뮬레이터를 잘 활용하면 부하에 대한 적절한 스프링 상수 및 스프링의 개수를 선정하거나 중력보상기의 지름을 최적으로 설계하여 모터에 부과되는 부하토크를 최적으로 감소시킬 수 있다.

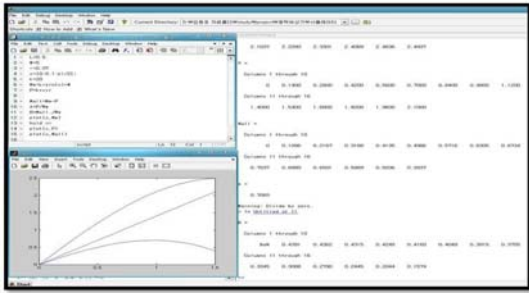


Fig. 5 Composition of simulator

3.2 중력보상기의 보상력 실험

본 논문에서 제안한 중력보상기의 토크 저감 성능을 검증하기 위하여 Fig. 5와 같은 기초적인 실험 장치를 구성하였다. 실험장치는 링크가 1개인 로봇 팔을 구성하고 이 링크를 중력보상기의 회전판에 연결된 관절구동기의 축에 고정하였다. 실험장치 구성에 사용된 제원은 Table 1과 같다.

Table 1 Property of test device

Motor	Link length	Gear ratio	Payload
60 W	280 mm	120:1	2.5kg

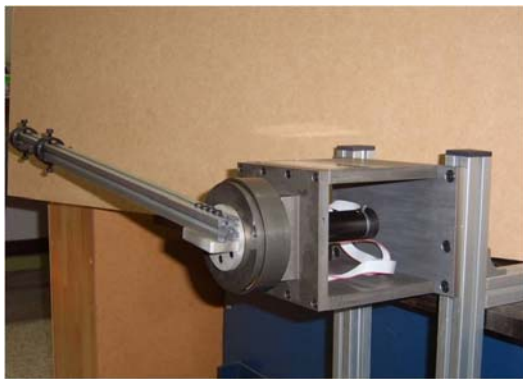


Fig. 6 Performance test of the gravity compensator

실험은 중력보상기에 연결된 로봇 팔의 링크 끝에 2.5kg의 부하를 달고 중력보상기를 적용하였을 때와 하지 않았을 때에 관절구동기 내의 구동 모터에 가해지는 부하토크전류를 측정하여 중력보

상기의 토크저감성능을 검증하였다. 실험에 사용한 중력보상기의 제원은 Table 2과 같다

Table 2 Property of the gravity compensator

Spring diameter	Number of springs	Spring constant	Motor power	Torque constant
81mm	2	13N/mm	60W	13.9 Nm/A

부하토크의 측정을 위하여 Fig. 7과 같이 측정 장치를 구성하였다. 측정 장치는 로봇 팔의 위치를 제어하기 위한 제어기 및 드라이버 시스템, 외부 부하에 의해 모터에 가해지는 부하 전류를 검출하고 안정화하는 홀센서를 포함하는 전류측정 시스템, 홀센서로부터의 전압을 A/D 변환하여 통신으로 측정값을 저장하는 시스템으로 구성된다.

실험은 링크의 끝에 2.5kg의 외부부하 하에서 관절 구동기에 중력보상기를 적용한 것과 하지 않은 각각의 경우에 대해 구동 모터에 부과되는 부하 전류를 측정하여 성능을 비교하였다. 실험은 로봇 팔의 부하가 가장 많이 걸리는 형태인 링크의 방향이 지면과 평행일 때, 즉 로봇팔의 각도가 90°의 경우의 부하전류를 측정하여 비교하였다. 또한 시뮬레이션의 검증을 위하여 실험의 조건을 시뮬레이션의 것과 일치시켰다. 이때, 링크를 구동하는 모터와 하모닉드라이버로 구성된 관절구동기의 보를 수평으로 유지하기 위하여 PID 제어 알고리즘을 적용하여 제어하였다. 중력보상기를 적용한 것과 하지 않은 경우에 PID 이득을 똑같이 적용하였다.

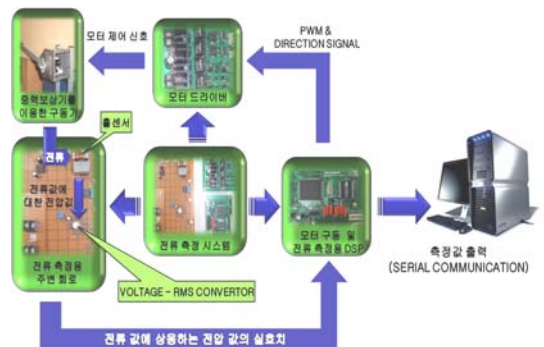


Fig. 7 Diagram of current measurement system



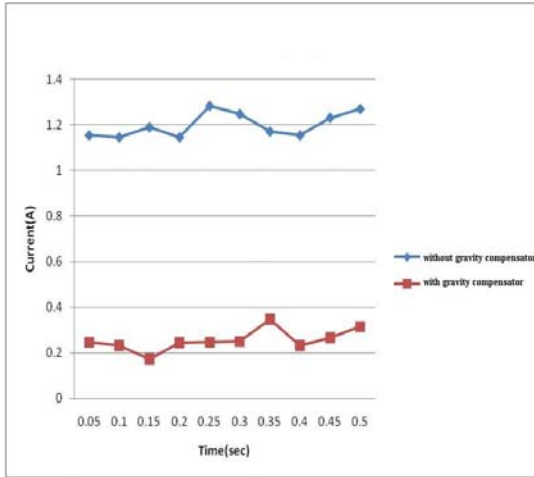


Fig. 8 Result of performance test of the gravity compensator

전류의 계측은 0.05초마다하였고 샘플은 10개를 추출하였다. 실험결과를 Fig. 8에 도시하였다. 그림에서 중력보상기를 적용하지 않은 경우에 홀센서로 검출한 부하전류는 1.2A이고 중력보상기를 적용한 경우의 평균부하전류는 0.26A이다. 중력보상기를 적용한 경우에 관절구동기의 구동모터에 부과되는 최대전류가 1/4.6배로 줄어들었음을 알 수 있다. 즉, 2.5kg의 부하를 구동모터에 연결된 링크에 가했을 때, 중력보상기의 토크저감 성능으로 0.54kg의 부하만이 구동모터에 부착된 링크에 가해지는 매우 큰 부하토크 저감성능이 있음을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 중력으로 인하여 로봇의 관절 구동기에 가해지는 토크 부하를 경감할 수 있는 새로운 개념의 중력보상기 구조 및 이의 특성연구를 수행하였다. 이를 위하여 중력보상기 및 이의 시험장치를 직접 제작하여 실험을 수행하였다.

실험 결과를 통하여 중력보상기를 적용한 관절구동기의 부하는 적용하지 않은 경우에 비해 현저히 감소하였고 이 부하의 경감으로 인한 관절 구동모터의 전류의 양은 1/4.6 배로 낮아지는 것을 확인할 수 있었다.

실험과 시뮬레이션을 통하여 고안한 중력보상기는 중력에 영향을 받는 로봇의 관절에 부착하여 사용함으로써 로봇의 관절 구동성능을 상대적으로 대폭 향상시킬 수 있는 우수한 장비임을 확인하였다.

#### 후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임

#### 참고문헌

- [1] A. Takanishi, M. Ishida, Y. Yamazaki, and I. Kato, "The realization of dynamic walking by the biped walking robot WL-10RD," J. of the Robotics Society of Japan, Vol. 3, pp. 325-336, 1985.
- [2] M Damme, F. Daerden, and D. Lefeber, "A pneumatic manipulator used in direct contact with an operator," IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 4505-4510, 2005.
- [3] J. Yamaguchi, D. Nishino, and A. akanishi, "Realization of dynamic biped walking varying joint stiffness using antagonistic driven joints," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2022-2029, 1988.
- [4] B. Espiau and P. Sardain, "The anthropomorphic biped robot BIP2000," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 3996-4001, 2000.
- [5] S. Sakai and K. Osuka, "Active vision of a heavy material handling agricultural robot using robust control: a case study for initial cost problem", Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 1707-1713, 2005.
- [6] H. S. Choi and J. Oh, "A new revololute

robot manipulator adapting the Closed-chain Mechcnism, J. of Robotic Systems, Vol. 22, No. 2, pp. 99-109, 2005.

- [7] 모터의중력보상기, 등록번호:0801799과 국제출원 (PCT/KR2007/001918, 미국출원 번호: 11/997,542)

## 저 자 소 개



### 최형식(崔炯植)

1989년 5월 미국 University of South Carolina 기계공학과에서 석사, 1993년 2월 North Carolina State University 기계 및 항공 공학과 박사로 협조로봇의 제어, 보행로봇 개발, 수중 운동체 시스템 연구 및 공장자동화에 대한 연구를 수행



### 김동호(金東浩)

2008년 한국해양대학교 기계공학부 기계시스템공학 졸업, 현재 한국해양대학교 기계공학과 석사과정



### 허재관(許載官)

2008년 한국해양대학교 기계공학부 기계시스템공학 졸업, 현재 한국해양대학교 기계공학과 석사과정