

# 재난상황시 초동대응과 복구지원을 위한 로봇 하부체 메커니즘 설계 및 연구 Design of a Robot Leg Mechanism for Early Rescue and Recovery Support from a Disaster

신동빈<sup>1</sup> · 고연호<sup>1</sup> · 서우석<sup>1</sup> · \*홍대희<sup>1</sup>

Dong Bin Shin, Yeon Ho Ko and Woo Seok Seo, \*Dae Hie Hong

## 1. 서론

재난재해 특히 각종 붕괴사고 발생 시 인명 피해 및 2차 피해를 최소화하기 위해서는 재난발생 후 2~72시간의 골든타임 내에 신속한 초기 대응이 필수적이지만, 현장에서는 구조대원 등의 인력 및 기초적인 수작업 도구에 의존하고 있어 초기 인명 구조 및 복구지원에 어려움을 겪고 있는 실정이다.

2001년 세계무역센터 사고 발생 당시 3종의 모바일 로봇이 투입되어 생존자들을 위한 지하 또는 계단으로 이어지는 지름길(shortcut)을 찾는데 사용된 것으로 시작으로 각종 큰 재난 사고 때마다 로봇은 각기 그 임무를 수행하였다. 대형 재난 사고로서 많이 회자되는 후쿠시마 원전사고에서도 원자로 건물 내부의 상황판단을 위한 환경조사와 건물 주위의 작업환경 개선을 위한 방사성 잔해 처리 작업 등에 사람을 대신해 제한적으로 투입되었다.

하지만 작업효율 면에서 개선필요성이 많이 언급되었다. 후쿠시마 사고 당시, 동일 현장에 투입된 인력에 의한 조사에는 약 15분의 짧은 시간이 주어졌으나 취득 정보의 양과 질은 로봇이 약 2시간 동안 활동하며 취득한 정보보다 우수했다는 점은 우리에게 시사하는 바가 크다.

현 시점에 비춰본 재난재해 상황 발생 시의 사고 수습 및 복구과정에서 로봇 시스템들의 역할은 매우 제한적이다.

최근의 연속적으로 일어나는 지진, 쓰나미, 기름 유출 및 광산 재해는 사후 반응과 복구의 수단만이 아니라 예방과 대비를 위한 로봇의 가치에 대한 인식을 달리하게 만들었다.

그리하여 이러한 목적에 맞는 전용 특수목적기계 개발에 대한 요구가 생겨나는 상황임에도 불구하고 해당 장비는 국제적으로도 개발 및 보급이 초기 단계이고 국내에서는 거의 없는 상태이다.

본 연구에서는 개념적인 아이디어에서부터 설계 및 시뮬레이션을 통한 분석 후 실제 테스트용 장비



Fig. 1 Locomotion mechanism of robot lower body

를 제작하였다. 이러한 장비는 조인트 구동 범위 및 설정을 위한 데이터 검증용으로 이용되었다. 그리하여 실험을 통해 제안한 메커니즘의 가동성을 확인하였다.

이 논문에서는 유압 구동 방식 로봇의 하부체 메커니즘을 제안한다.

## 2. 개념 설계 및 방향성

### 2.1 궤도, 바퀴 및 보행 이동 방식 결정

재난재해 로봇은 사용목적과 환경에 따라 각각 상이한 형태의 이동 방식을 채택하게 된다. 실내 확인 및 점검, 화재 지역에서의 인원확인, 위험물질 탐지 등 적용분야가 다양하므로 이러한 이동 방식의 결정은 다각적인 환경 검토 후 이루어져야 한다. 이는 Fig. 1과 같이 크게 3가지 방식으로 분류된다.

기존 로봇에는 험한 지형에서의 차체 이동성 극대화를 위해서 바퀴 형태나 무한궤도 방식의 주행을 주로 사용하였으나 최근 로봇 기술이 발전함에 따라 다족 보행 형태의 이동방법에 대한 연구도 지속적이고 폭넓게 수행되고 있다.

무한궤도 방식의 주행 차량은 넓은 면적에 힘을 분산시킴으로써 일반적인 타이어 주행 차량에 비해 이동성이 좋은 편이다. 또한 험지 및 경사로 등판 환경에서의 주행이 비교적 원활하고 외형의 크기에 비해 회전반경이 작다는 이점이 있다. 거기에 제어성이 우수하다는 장점도 있지만 진흙과 같은 연약지반의 경우 크롤러 사이에 진흙이 끼는 현상에 의해 구동 자체가 불가능해질 수 있고, 마찰 영향에 의하여 에너지 효율이 낮고 소음이 심하다는 단점이 있다.

바퀴 형태의 구조는 속도가 빠르고 소음이 적다. 포장이 잘 된 도로나 평지 상황에서 유리하지만 주행도로 환경에 따라 미끄러짐이 잘 발생하며 다른 구조에 비해 구동력이 약하다.

보행형태의 구조는 지형적응력이 우수하여 비정형적인 지면 환경에서 주행성능이 탁월하다. 하지만 이동 속도가 상대적으로 떨어질 뿐만 아니라 구조의 복잡성으로 인하여 제어가 어렵다는 단점을 가진다.

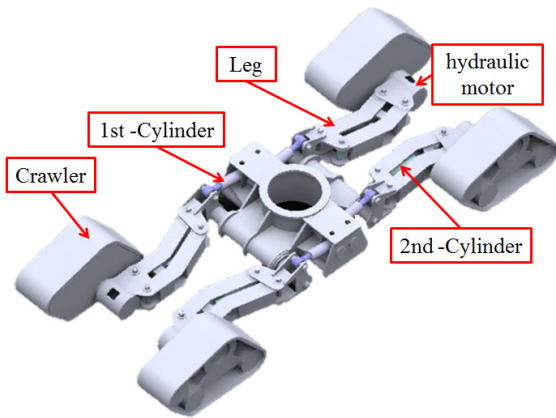


Fig. 2 Schematic of robot leg mechanism

Table 1 Design requirements

Parameter	Value
Running speed	4.1km/h
D.O.F	12
Radius of turn	1.65m
Range of motion (height)	1.2m
Obstacle height	0.5m
Roll	35deg
Pitch	25deg

## 2.2 설계 방향성

본 논문에서 제안하는 로봇 하부체의 구조는 Fig. 2의 모습과 같이 다리를 이루는 링크 말단에 궤도를 연결한 형태이다. 개발 과정을 크게 나누어보면 Fig. 3과 같이 자세제어 메커니즘, 바퀴 회전을 위한 구동부 설계, 설계 데이터 분석을 위한 시뮬레이션 3부분으로 나누어진다. 이러한 재난대응로봇은 사람의 접근이 어려운 험지주행이나 추가적인 장비의 부착으로 인한 주행 안정각, 측면 전복각 등의 설계조건을 반영한 하부체를 설계하는 것이 중요하다.

## 3. 다리부 설계

### 3.1 관절 구동부의 기본 구조 설계

비정형화된 장애물 형태 및 지형, 구동 환경 분석 및 요소기술 도출, 크롤러 구동 메커니즘 개념설계, 조향 및 자세제어 메커니즘의 설계 기술 등이 필요하다 이에 따른 개념설계안을 토대로 자세제어 메커니즘 모듈의 상세 설계가 필요하다. 기구부 설계과정에서는 관절의 기본적인 구조에 대한 개념도 설계 및 3D모델링을 통한 구체화작업을 수행하였다.

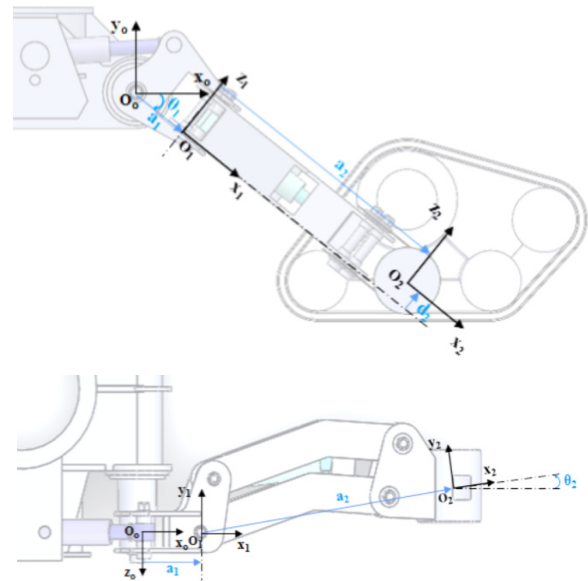


Fig. 3 Kinematic details of the robot-leg

Table 2 D-H parameters of right and left leg

Link#	Link Length	Link Twist	Joint offset	Joint Angle
1(Right)	$a_1$	$-90^\circ$	0	$\theta_1$
2(Right)	$a_2$	0	$d_2$	$\theta_2$
1(Left)	$a_1$	$90^\circ$	0	$\theta_1$
2(Left)	$a_2$	0	$d_2$	$\theta_2$

Table 3 Link parameters

$a_1$	$a_2$	$d_2$
300mm	1335mm	55mm

이러한 관절의 기본 구조 설계과정에서는 실린더 등 부품 배치를 고려하여 기구부의 구조를 제안하였다. 이러한 설계치는 각 작업 시나리오에 따른 환경 요소별 크롤러 모듈 시스템의 시뮬레이션 작업에 이용되고 실제 실험에 앞서 관련 데이터를 비교분석할 수 있는 바탕이 된다.

### 3.2 다리부의 역기구학

Fig. 4의 모델을 기준으로 하여 역기구학을 풀어 보면,

$${}^0T_2 = \begin{bmatrix} c_1c_2 & -c_1s_2 & s_1 & a_2c_1c_2 + d_2s_1 + a_1c_1 \\ s_1c_2 & -s_1s_2 & -c_1 & a_2s_1c_2 + d_2c_1 + a_1s_1 \\ s_2 & c_2 & 0 & a_2s_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$p_x = a_2c_1c_2 + a_1c_1 + d_2s_1 \quad (1)$$

$$p_y = a_2s_1c_2 + a_1s_1 - d_2s_1$$

$$p_z = a_2s_2$$

$\theta_2 = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$ ,  $\theta_1 = p_y/p_x$ 를 이용해 계산하면,

$$\theta_2 = \sin^{-1}\left(\frac{p_z}{a_2}\right) \quad (2)$$

$$\theta_1 = \arctan^{-1}\left(\frac{a_2P_xc_2 + (a_1 + d_2)P_y}{a_2P_xc_2 + a_1P_x - d_2P_y}\right)$$

와 같이 나타낼 수 있다.

### 3.3 다리 관절의 기구부 설계

여기서는 다리 역할을 하는 부위의 형상과 관절부 구조의 적절한 배치 및 기본 설계를 위한 개념설계를 진행하였다. 각 관절의 회전범위의 설정을 위해 역기구학 해석이 원활토록 4절 링크 구조로 동일선상에 정렬되는 모양으로 설계를 진행하였다.

### 3.4 3D 모델 생성

3차원 설계 과정에서는 실제 관절의 동작 범위, 유압실린더 구조에서 부수적인 취약 부분 및 유지보수

를 위한 조립 및 분해성, 유압 배선이 지나가는 부위에 대한 영향을 고려했다. 생성한 3D 모델은 Fig. 1과 같다.

## 4. 시뮬레이션 및 실험

반력을 계산하기 위한 시뮬레이션을 진행하였다.

### 4.1 3초 가속 후 감속 시 스프로킷 구동 토크

시뮬레이션 시작 후 3초부터 가속시켰다. 가속하면서 1500Nm의 토크가 발생되고, 최고 속도의 주행 구간은 4~7초 사이이다. 감속 구간에서 200mm의 이동 시, 반대방향으로 4300Nm의 토크가 발생한다. 정지에 걸리는 시간은 0.35초이며 이 때 순간적으로 큰 토크가 발생된다. 정지 후, 관성에 의한 반대 힘이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 앞쪽 부분의 트랙과 뒤쪽 부분의 트랙의 구동 토크는 거의 동일한 것으로 측정되었다.

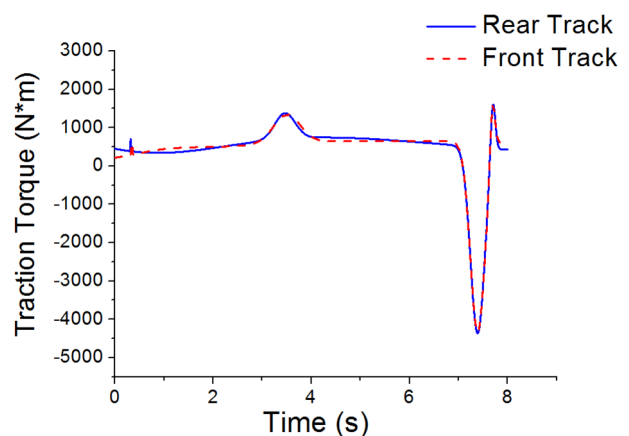


Fig. 4 Simulation result of traction torque

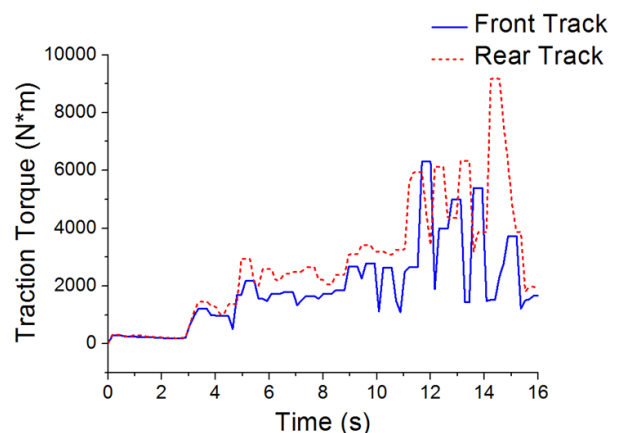


Fig. 5 Simulation result of traction torque on sloped terrain

4.2 경사면(30도) 5초 가속 등판 구동 토크

3초 구간부터 가속을 발생시켜 6~17초 구간까지 경사면 주행을 하였다. 이때 트랙 슈의 미끄러짐에 의해 진동이 발생하였고, 후면 트랙 부분이 차체의 하중을 많이 지탱함으로써 더 큰 구동 토크가 발생함을 확인할 수 있다.

4.3 복합 지형- 조인트 반력과 요구 실린더 힘

하중이 많이 걸릴 것으로 예상되는 자세가 발생하는 복합 지형환경에서의 실린더 필요 힘을 시뮬레이션하였다. 이 때 Upper Cylinder에서 -2,500,000 N, Bottom Cylinder에서 -50,000 N의 값이 발생함을 알 수 있었다. 조인트 반력을 측정된 결과 main hinge에서 -75,000 N의 값이 나타났다. 여기서 bracket부분에서는 동작이 멈춘 후부터 0 N의 값이 나타났다.

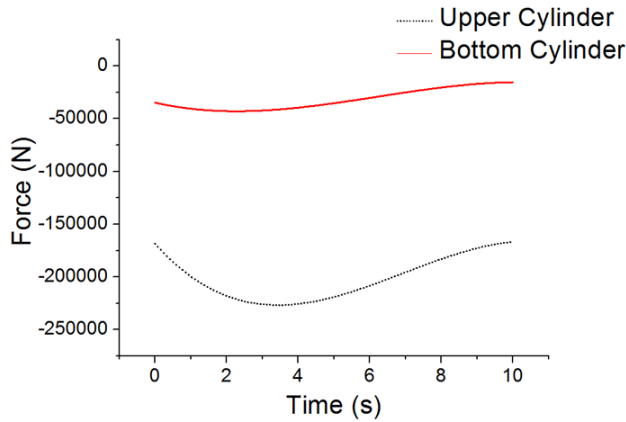


Fig. 6 Resultant joint forces at atypical terrain (Upper Cylinder: -2,500,000 N, Bottom Cylinder: -50,000 N)

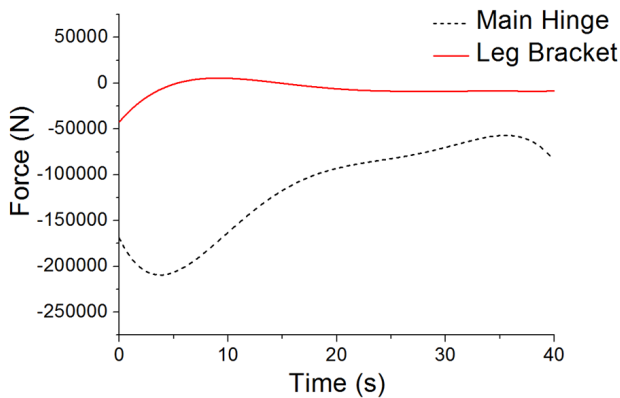


Fig. 7 Resultant joint forces at atypical terrain (Main hinge: -75,000 N, Bracket: 0 N at the stopped motion)

4.4 기본지형 - 조인트 반력과 요구 실린더 힘

일반적인 평면 지형에서의 요구되는 실린더 힘을 측정하였다. upper cylinder에서 -100,000 N, bottom cylinder에서 -20,000 N의 값이 나타났다. 평면 지형의 조인트 반력을 측정된 결과 main hinge 부분에서 -100,000 N의 값이 나타났다. 여기서 bracket부분에서는 -20,000 N의 값이 나타났다.

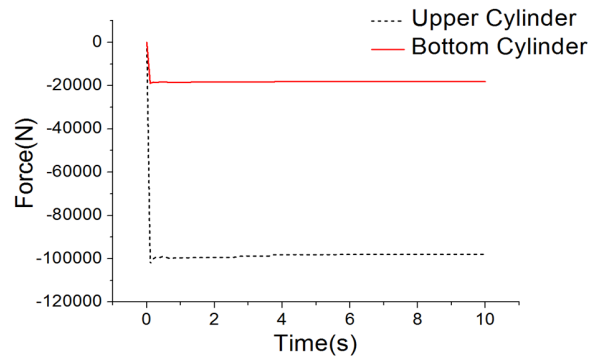


Fig. 8 Resultant cylinder forces at basic posture (Upper Cylinder: -100,000 N, Bottom Cylinder: -20,000 N)

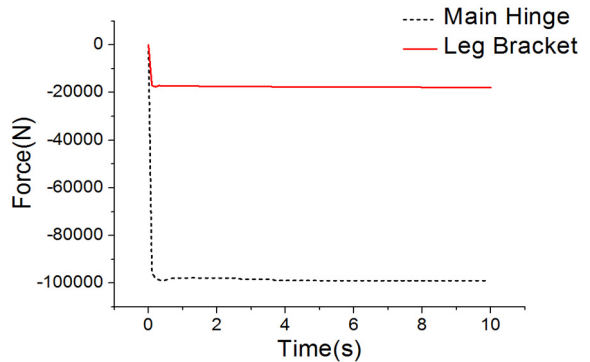


Fig. 9 Resultant joint force at basic posture (Main hinge: -100,000 N, Bracket: -20,000 N)

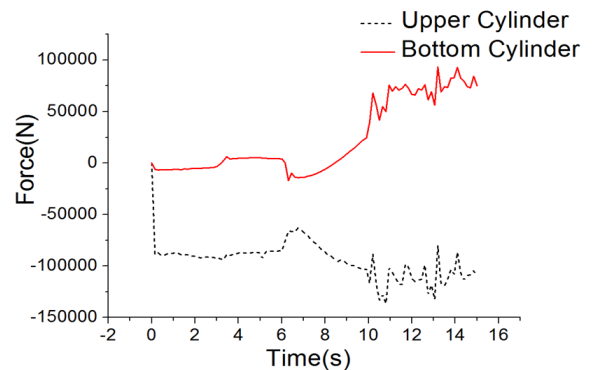


Fig. 10 Resultant cylinder forces at low posture (Upper Cylinder: -100,000 N, Bottom Cylinder: -20,000 N)



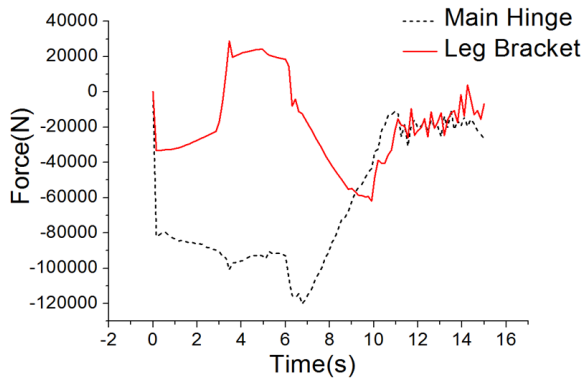


Fig. 11 Resultant joint forces at low posture (Main hinge: -120,000 N, Bracket: 29,000 N)

4.5 Roll 회전- 조인트 반력과 요구 실린더 힘

3초에서 6초까지 차체의 높이를 낮추고, 6초에서 11초까지 왼쪽 다리를 올려서 roll 회전 모션을 만들었다. 이러한 환경에서의 요구 실린더 힘을 측정하였는데 upper cylinder에서 -100,000 N, bottom cylinder에서 -20,000 N의 값이 나타났다. 3초에서 6초까지 차체의 높이를 낮추고, 6초에서 11초까지 왼쪽 다리를 올려서 roll 회전 모션을 만들었을 때, 조인트 반력은 main hinge 부분에서 -120,000 N, bracket은 29,000 N의 힘이 작용함을 확인하였다.

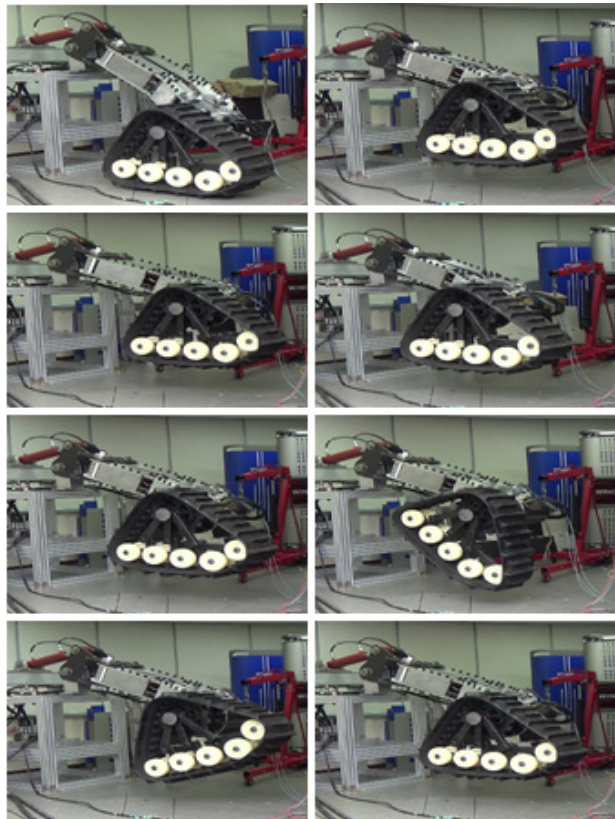


Fig. 12 Driving experiment of equipment

4.6 제작된 하부체 장비 테스트

설계된 데이터를 바탕으로 총 4개의 다리 중 하나에 대한 테스트 장비를 제작하였다. 단일 모듈에 대한 실험목적으로 유압회로를 구성하였고, 시뮬레이션을 수행한 결과를 확인하기 위한 실제 모델을 이용한 구동 실험을 하였다.

5. 결 론

본 연구 논문에서는 재난재해 상황에 대응할 수 있는 로봇의 다리 메커니즘을 개념 설계 및 구체화 설계과정을 통해 제안하였다. 시뮬레이션을 수행하고 그에 따른 데이터를 분석해 보았다.

이 연구논문의 목적은 다양한 종류의 재난에 대응하기 위한 로봇 시스템의 포괄적인 정보를 제공하는 것이다. 지속적인 연구를 수행한다면 향후 연구된 결과를 바탕으로 좀 더 현실적인 재난 현장 대응이 가능할 것이라 기대한다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE, Korea) 산업핵심기술개발사업지원의 연구결과로 수행되었음 (10052965, 독립 구동 및 자세제어가 가능한 협지 주행시스템 개발)

References

- 1) J. Cho, "A Study of Hydraulic Actuator Based On Electro Servo Valve For A Working Robot," Journal of Drive and Control, Vol.13 No.2 pp.26-33 Jun. 2016.
- 2) Robin R. Murphy, Disaster Robotics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, pp.24
- 3) Ya-Wen Huang and Yuki Sasaki, "Operation of Underwater Rescue Robot Anchor Diver III during the 2011 Tohoku Earthquake and Tsunami", OCEANS'11 MTS/IEEE KONA, 19-22 Sept. 2011.
- 4) Geert-Jan M. Kruijff, "Rescue Robots at Earthquake-Hit Mirandola, Italy: a Field Report", Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), 2012 IEEE International Symposium on 5-8 Nov, 2012.
- 5) Stefan Kohlbrecher, "Human-robot Teaming for Rescue Missions: Team ViGIR's Approach to the

2013 DARPA Robotics Challenge Trials", Journal of Field Robotics 32(3), 352-377, 2015.

- 6) Shinji Kawatsuma, "Emergency response by robots to Fukushima-Daiichi accident: summary and lessons learned", Industrial Robot: An International Journal 39/5, 428-435, 2012.
- 7) Jeremy Green, "Mine Rescue Robots Requirements", 2013 6th Robotics and Mechatronics Conference (RobMech) Durban, South Africa, October 30-31, 2013.

[저자 소개]

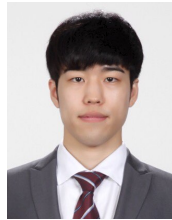


**신동빈**  
 E-mail : sunflowerstream@korea.ac.kr  
 Tel : 02-3290-3765  
 2010년 경남대학교 기계자동화공학부 졸업  
 2015년-현재 고려대학교 기계공학과 석사 과정 재학 중

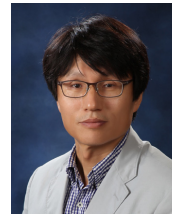


**고연호**  
 E-mail : koyho3@korea.ac.kr  
 Tel : 02-3290-3765  
 2015년 충남대학교 기계설계공학과 졸업  
 2015년-현재 고려대학교 기계공학과 석사 통합과정 재학 중

[저자 소개]



**서우석**  
 E-mail : prime@korea.ac.kr  
 Tel : 02-3290-3748  
 2016년 고려대학교 기계공학과 졸업



**홍대희**  
 E-mail : dhong@korea.ac.kr  
 Tel : 02-3290-3369  
 1987년 고려대학교 기계공학과 석사  
 1994년 University of California Davis 기계공학 박사학위 취득.  
 1995~1998년 AHMCT Researcher.  
 1998년~현재 고려대학교 기계공학과 교수. 생산자동화 설비 제어, 건설 중장비의 자동화 시스템, 지능형 운송 시스템, 정밀 기계 설계 및 제어, 의료 내시경 장비 등 연구에 종사. 정밀공학회 등의 회원, 공학박사