

자석대차를 이용한 화물창 내 자동 도장로봇에 대한 연구

한승철¹, 김진호^{2*}, 김제훈², 이성규³

¹영남이공대학 자동차학과, ²영남대학교 기계공학부, ³케이엘테크

Design and Experiment of Automatic Painting Robot Using Permanent Magnet Mobile Robot in Ship Cargo Tank

Seung-Chul Han¹, Jin-Ho Kim^{2*}, Je-Hoon Kim² and Sung-Kyu Lee³

¹Department of Automobile, Yeungnam College of Science & Technology

²School of Mechanical Engineering, Yeungnam University

³KL-TECH

요약 선박을 건조하는 수많은 공정 중에서 화물창 내의 도장작업은 대부분 고공에서의 작업뿐만 아니라 밀폐된 탱크 내에서 작업을 하는 경우가 많기 때문에 항상 사고의 위험에 노출되어 있다. 이러한 문제를 해결하는 방법으로 진공 펌프와 로봇에 장착된 흡착판을 이용하여 로봇을 벽면에 부착하는 방법이 개발되어져 왔다. 하지만 이러한 방법들은 다양한 재질의 벽면에 적용이 가능하다는 장점이 있는 반면에 흡착판이 고착된 상태에서 이동하기 힘들다는 것과 부착을 위해 부가장비와 그에 따른 제어가 요구된다는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 본 논문에서는 자석의 성질을 이용하여 선체의 평면, 수직면까지 매달린 채도 이동가능한 자석대차를 이용한 자동 도장 로봇장치를 제안한다. 또한 시제작품을 제작하여 성능 실험을 위해 자석마퀴 부착력, 대차부착력, 견인력 및 자동주행실험을 하였다.

Abstract In order to build a ship, painting on ship cargo tank is one of the most dangerous parts as it involves working in high altitudes and a closed ship cargo tank. Therefore, researchers have been developing devices that will enable mobile robots to operate on vertical walls. The wall-climbing robots have been widely used to attach on the wall such as suction types. These types can be utilized regardless of the wall material. However, it is required to adhere and control the suction cups. To moderate this drawbacks, this paper proposes an automatic painting robot that uses a permanent magnet mobile robot. Using the magnetic characteristics, this robot can move on the boat vertically and horizontally even while hanging on the ceiling of the ship cargo tank. Also, we made a prototype to test adhesive force of the permanent magnet wheel and mobile robot as well as the towing capacity and auto-piloting ability.

Key Words : Ship Cargo Tank, Automatic Painting Robot, Permanent Magnet Wheel, Permanent Magnet Mobile Robot

1. 서론

선박을 건조하는 수많은 공정 중에서 화물창 내의 도장작업은 가장 열악한 환경에 방치되어 항상 사고의 위험에 노출되어 있다. 선박의 도장작업 특성이 대부분 고공에서의 작업뿐만 아니라 선박의 밀폐된 탱크 내에서 작업을 하는 경우가 많기 때문에 추락사고의 위험과 폭발사고, 질식사고 등의 위험 속에서 작업을 하는 경우가

많다. 또한, 고소작업의 경우에는 고소차 또는 족장, 사다리 등을 설치하여야 하며 탱크 내부에는 족장은 물론 조명 시설까지 투입되어야 함에 따라 도장작업을 위한 부대작업과 그에 따른 사고 위험이 상존하므로 이에 대한 대체방안, 또는 대체장비의 개발이 매우 절실하게 요구되고 있다. 그러나 도장작업에 대한 개선, 개발이 장비나 공법 등에 한정되고 있고, 작업자의 안전대책 또는 작업대체장비의 개발에는 작업의 특성과 한계로 인해 그 성과

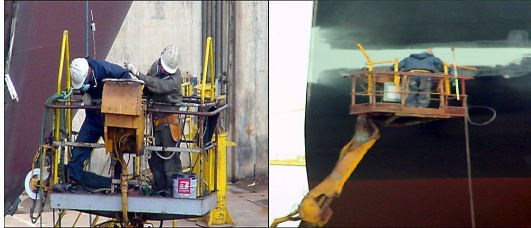
*교신저자 : 김진호(Jinho@ync.ac.kr)

접수일 11년 10월 07일

수정일 (1차 11년 11월 12일, 2차 11년 12월 12일)

게재확정일 11년 12월 13일

가 기대에 미치지 못하고 있으므로, 이를 위한 공법 및 장비의 개발을 위한 필요성이 대두되고 있다. 그림 1은 선박의 도장작업이 대부분이 고공에서 이루어지며 인력에 의존하고 있음을 보여준다.



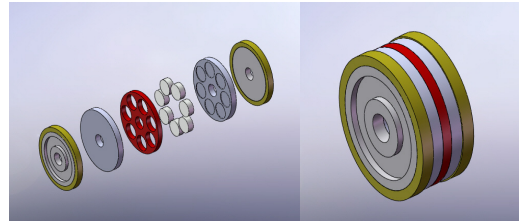
[그림 1] 선박 도장작업의 작업환경
[Fig. 1] Work conditions of ship painting

이러한 문제를 해결하는 방법으로 수직벽면에 부착하여 이동하며 작업할 수 있는 로봇을 위한 부착장치가 개발되어 왔다. 현재까지 개발된 가장 대표적인 장치는 진공 펌프와 로봇에 장착된 흡착판을 이용하여 로봇을 벽면에 부착하는 방법이다. 또한, 구동 목적이 아닌 단순 흡착을 위해 자석을 이용한 용접용 벽면 이동로봇을 개발하였으며, 로봇의 메커니즘을 가진 로봇의 발 부분에 흡착패드를 달아 병진운동을 이용한 보행로봇을 개발하였다. 이러한 방법들은 다양한 재질의 벽면에 적용이 가능하고 장비무게에 비해서 강한 부착력과 부착력 제어를 쉽게 얻을 수 있다는 장점이 있는 반면에 흡착판이 고착된 상태에서 이동하기 힘들다는 것과 부착을 위해 부가 장비와 그에 따른 제어가 요구된다는 단점이 있다[1-3]. 이러한 단점을 보완하기 위해 본 논문에서는 자석의 성질을 이용하여 선체의 평면, 수직면까지 매달린 채도 이동 가능한 자석대차를 이용한 자동 도장 로봇장치를 제안한다[4-5]. 자석을 가공하여 만든 바퀴에 구동장치와 조향장치를 장착한 시제품을 제작하여 성능 실험을 위해 자석바퀴 부착력, 대차부착력 및 자동주행실험을 하였다.

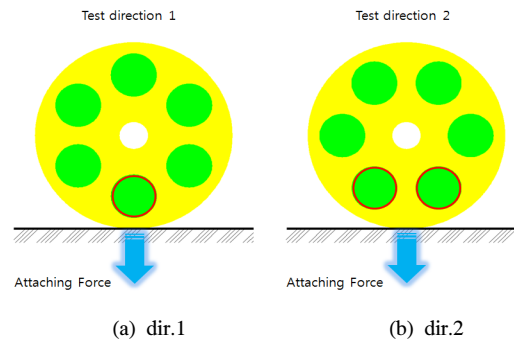
2. 자석대차 설계 및 해석

자석대차의 핵심적인 요소인 자석 바퀴를 설계하고 상용 전자기 해석프로그램인 Maxwell을 이용하여 부착력을 해석하였다. 그림 2는 설계한 자석바퀴의 개략도를 보여준다. 자석 바퀴의 개수는 직경이 25 mm인 자석을 7개 배치하고 전체 자석바퀴의 외경은 100 mm이며, 주행 시 슬립(slip)현상을 감소시키기 위해 외경 최외각을 두께 1 mm의 우레탄 코팅을 하였다. 또한, 그림 3은 자력 해석 방향을 보여준다. 개별 자석이 부착 면에 수직일 경우 그

림 3(a)와, 자석과 자석 사이 바퀴가 위치하는 경우 그림 3(b)로 구분하여 해석하였다.



[그림 2] 자석 바퀴의 개략도
[Fig. 2] Schematic diagram of PM wheel

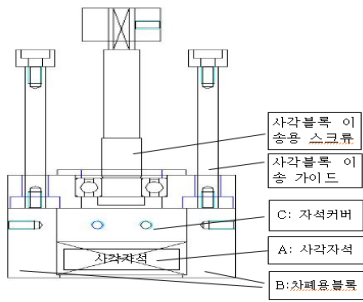


[그림 3] 자석 바퀴의 부착 방향
[Fig. 3] Attaching direction of PM wheel

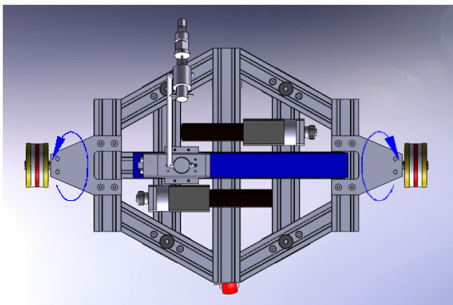
해석결과, 바퀴의 최소 부착력은 약 279 N임을 알 수 있었고, 자석이 철판에서 떨어지는 순간 부착력이 급격히 감소함을 알 수 있었다.

또한, 자석 대차의 무게가 증가함에 따라 대차의 부착력을 증가 시킬 필요가 있다. 그러나 자석바퀴의 크기가 한정됨으로 자석 바퀴의 자력을 무한정 향상시키기는 힘들고 조향성을 향상시키기 위해 자석바퀴 개수를 늘리는 것도 한계가 있으므로 이를 보완하기 위해 사각자석을 보조로 사용하기 위해 사각자석을 설계 및 해석하였다. 그림 4는 사각자석 블록 구성도를 보여준다. 사각자석 블록의 구성은 가로 50 mm, 세로 25 mm, 두께 20 mm인 사각자석, 알루미늄 소재의 두께 10 mm인 차폐용 블록, 철 소재의 두께 20 mm인 자석커버, 사각 블록 이송용 스크류, 사각블록 이송 가이드로 구성된다. 해석 결과, 475.25 N임을 알 수 있었다.

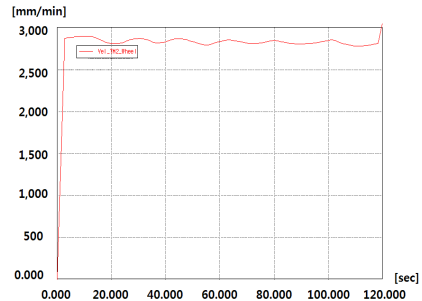
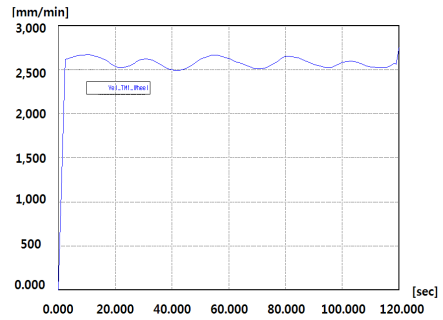
또한, 자석대차의 동해석을 하기 위해 자석 바퀴의 개수가 2개일 때의 자석 대차에 대한 모델을 생성하고 일정 토크와 속도로 직선주행 시 각 바퀴의 각속도와 회전 조향을 해석하였다. 그림 5는 자석 바퀴의 개수가 2개일 때 해석 모델을 보여준다. 또한 그림 6은 동해석 결과를 보여준다.



[그림 4] 사각자석 블록 구성도
[Fig. 4] Block diagram of square magnet



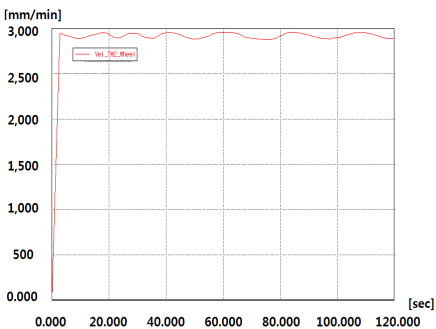
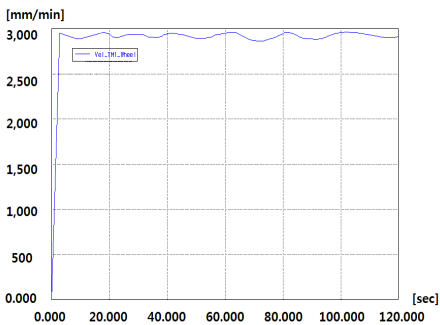
[그림 5] 자석대차 개략도
[Fig. 5] Schematic diagram of PM mobile robot



(b) 회전 조향 해석 결과

[그림 6] 동해석 결과
[Fig. 6] Results of dynamic analysis

동해석 결과, 2개의 바퀴에 동일한 토크와 회전수(9 rpm, 100 kgfcm)로 120초 동안 직선주행 시, 모든 바퀴가 3,000 mm/min로 움직임을 알 수 있었다. 또한 좌측바퀴에 3 rpm, 우측 바퀴는 기어축 최대 rpm인 9 rpm으로 구동 시, 회전 조향 해석 결과, 좌측바퀴와 우측바퀴의 선속도는 각각 약 1,300 mm/min와 약 2,600 mm/min임을 알 수 있었다.

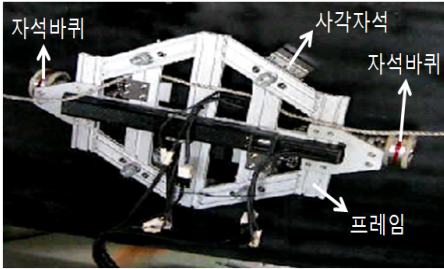


(a) 직선주행 시 해석 결과

3. 시제품 제작 및 성능 실험

자석대차 설계 및 해석을 바탕으로 2 wheel 육각 대차에 대한 시제품을 제작하고 시제품에 대한 성능 실험을 하였다. 자석대차의 부착력이 작은 단점을 보완하기 위해 사각자석 4개를 제작하고 대차에 설치하였다. 그림 7은 시제품을 제작한 사진을 보여준다. 시제품 성능 실험은 자석바퀴 하나에 대한 탈·부착력 실험, 자석대차 시제품에 대한 부착력 및 견인력 실험과 자동주행실험을 하였다. 자석바퀴는 유한요소 해석을 통해 선정된 바퀴로써, 바퀴 외경은 $\varnothing 100$, 자석 외경은 $\varnothing 25$, 자석 개수는 7로 이루어진 구조이다. 제작된 자석바퀴에 대해 0° , 180° 의 방향으로 바퀴의 회전 위치를 달리하여 측정

하였으며 이 때 바퀴 부착면으로 부터의 거리를 증가시켜 최대 자력 발생치를 측정하였다. 그림 8은 자석바퀴 자력 측정 장치를 보여준다. 자석바퀴, 자석바퀴의 자력을 측정을 할 로드셀로 이루어져있다.

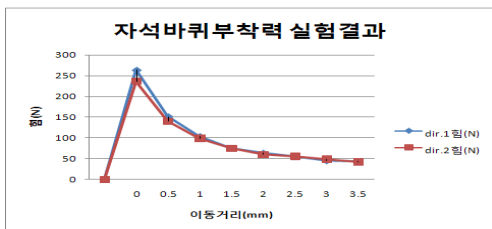


[그림 7] 자석대차 시제작품
[Fig. 7] Prototype of PM mobile robot

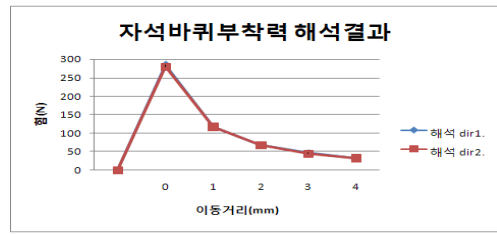


[그림 8] 자석바퀴 자력 측정 장치
[Fig. 8] Test equipment of PM wheel

그림 9와 그림 10은 각각 자석바퀴 자력 실험 데이터와 실험 결과 및 유한요소해석결과를 보여준다. 최대 부착력은 실험결과에 비해 해석결과가 더 높음을 알 수 있다. 또한 최대 부착력은 바퀴가 바닥면에 붙어 있을 때임을 알 수 있다. 하지만 실험에서는 자석바퀴를 바닥에 높은 상태에서 하중을 영으로 하고 위로 당기면서 자력을 측정하기 때문에 실제 자석바퀴가 바닥에서 떨어지는 순간에 최대 부착력을 나타낸다. 이로 인해 해석결과와 실험결과 사이에 오차가 발생한 것임을 알 수 있다.



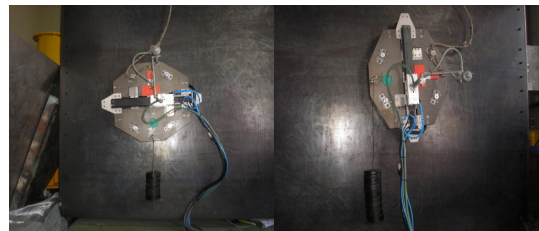
[그림 9] 자석바퀴 부착력 실험 결과
[Fig. 9] Results of attaching force of PM wheel by experiment



[그림 10] 자석바퀴 부착력 해석 결과
[Fig. 10] Results of attaching force of PM wheel by FEA

또한, 사각자석에 대한 부착력 실험을 하였다. 사각 자석의 부착력 실험은 지면에서 3 mm간격을 두고 수행하였다. 이는 사각자석은 자석바퀴와 같이 지면에 닿아 구동되는 것이 아니라 자석 대차의 무게가 증가함에 따라 대차의 부착력을 증가시키기 위한 장치이기 때문이다. 앞서 유한요소해석을 통해 해석한 사각자석의 부착력은 730 N이었으나, 실험 결과는 719 N임을 알 수 있었다. 지면에서 3 mm간격을 두고 부착력 실험을 한 결과 512 N으로 측정되었다. 따라서 사각자석 4개의 부착력은 약 2000 N을 초과함을 알 수 있었다.

자석대차 부착력, 견인력 및 자동 주행 실험을 하기 위해 두께 8 mm인 철판 구조물을 제작하였다. 대차의 부착력 실험을 위해 수직벽면을 제작하였고 대차 추락방지용 rope를 설치하여 대차에 장착하였다. 그림 11은 수직면과 천정면에서 부착력과 견인력을 실험하기 위해 대차를 실험 구조물에 부착한 사진을 보여준다. 실험은 수직면에 부착한 대차에 추를 매달아 수직방향과 수평방향에 대해 대차가 정지해 있을 때 부착력을 측정하였고 주행할 때 견인력을 측정하였다.

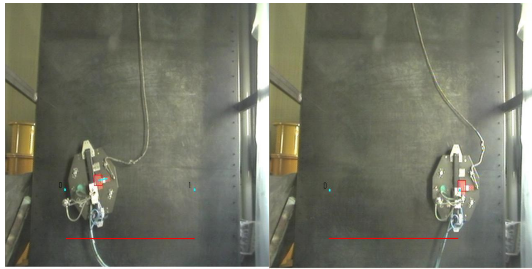


(a) 수직방향 (b) 수평방향

[그림 11] 자석대차 설치 모습
[Fig. 11] Installation of PM mobile robot

부착력 실험결과, 수직방향 정지 시 추의 무게가 약 11 kgf, 수평방향 정지 시 약 17 kgf를 넘어서면서 미끄러지기 시작하였다. 또한 주행 시 견인력 실험 결과, 수평방향 일 때 약 7 kgf, 수직방향일 때 약 15 kgf이상에서 미끄러지기 시작함을 알 수 있었다.

대차 자동 주행 실험 또한 수평방향과 수직방향에 대하여 실험하였다. 그림 12~13은 수평방향 실험과 수직방향 실험 모습을 보여준다. 수평방향 실험은 초기조건이 Θ 는 -15° 이고, d 는 -80 mm일 때 주행 실험을 하였고, 수직방향 실험은 초기조건 Θ 는 16° 이고, d 는 90 mm일 때 주행 실험을 하였다.



(a) 초기위치 (b) 주행 후 위치

[그림 12] 수평방향 대차 설치 모습

[Fig. 12] Installation of PM mobile robot on horizontal direction



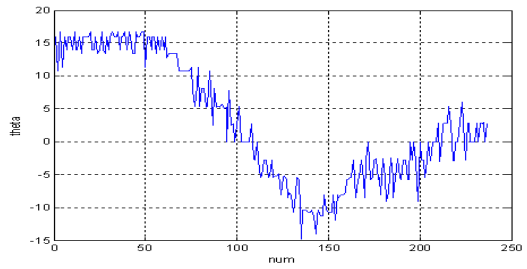
(a) 초기위치 (b) 주행 후 위치

[그림 13] 수직방향 대차 설치 모습

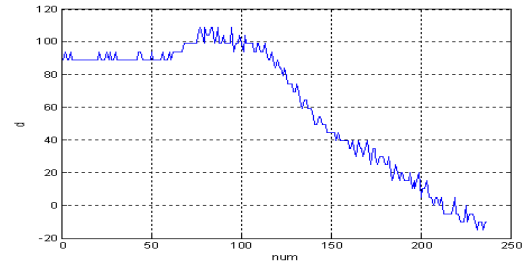
[Fig. 13] Installation of PM mobile robot on vertical direction

그림 14~15는 수평방향과 수직방향실험의 결과를 보여준다. x축은 실험 데이터 개수를 나타내고 y축은 Θ 와 d 에 대한 결과를 보여준다. 실험 결과, 임의의 주행 궤적을 입력함에 따라 주행궤적을 따라 잘 수렴하며 주행함을 알 수 있었다.

또한 대차 이동속도는 안정적 주행을 위해 1.6 m를 15 초 정도이며 이는 약 6 m/min 정도로 이동하도록 설정하였다.



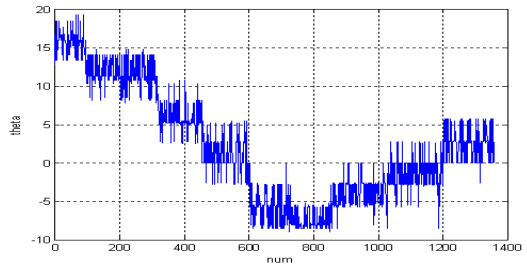
(a) Θ 에 대한 실험 결과



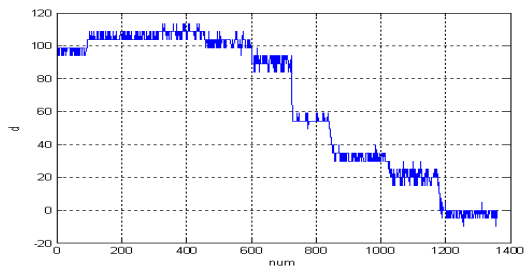
(b) d 에 대한 실험 결과

[그림 14] 수평방향 주행 실험 결과

[Fig. 14] Results of horizontal motion



(a) Θ 에 대한 실험 결과



(b) d 에 대한 실험 결과

[그림 15] 수직방향 주행 실험 결과

[Fig. 15] Results of vertical motion

4. 결론

본 논문에서는 선박을 건조하는 수많은 공정 중에서

항상 사고의 위험에 노출되어 있는 화물창 내의 도장작업에서 인력에 대신해 안전하고 정확하며 신속하게 작업을 수행할 수 있는 자동 로봇 장치를 소개하였다. 기존의 진공 펌프와 로봇에 장착된 흡착판을 이용하여 로봇을 벽면에 부착하는 방법의 단점을 보완하기 위해 자석의 성질을 이용한 선체의 평면, 수직면 및 천정면까지 이동 가능한 자석대차를 이용한 자동 도장 로봇장치를 제안하였다.

또한 유한요소해석을 통해 자석바퀴와 사각자석에 대한 부착력을 해석하였고, 동해석을 통해 각 바퀴의 각속도와 회전 조향을 해석하였다. 해석을 바탕으로 시제작품을 제작하여 자석바퀴 부착력, 대차 부착력 및 자동주행 실험에 대한 성능 실험을 하였다.

실험결과, 수직면이나 천정면에서 떨어지지 않고 임의의 주행 궤적을 입력함에 따라 주행궤적을 따라 잘 수렴하며 주행함을 알 수 있었다. 따라서 본 자석대차를 인력을 대신해 작업이 힘든 철 구조물 장소에 투입하여 안전 사고 위험의 최소화, 부대작업의 최소화는 물론 작업효율을 최대화할 수 있을 것이라고 예상된다.

References

- [1] Bahr. B, et al., "Design and Suction CPU Analysis of a Wall Climbing Robot", Computer Elect. Eng., Vol. 22, No. 3, pp. 193-209, 1996.
- [2] Luk. B. L, et al., "ROBUG II : An Intelligent Wall Climbing Robot", Proc. of 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 3, pp. 2342-2347, 1991.
- [3] Luk. B. L, et al., "Nero : A Teleoperated Wall-climbing Vehicle for Inspection of Nuclear Reactor Pressure Vessel", Proc. of 13th ASME International Computers in Engineering Conference and Exposition, 1993.
- [4] Yi. H. C, et al., "Development of Detachable System of Permanent Magnet Wheel for Mobile Robot", Proc. of the Korean Society of Precision Engineering Conference, pp. 635-638, 2000.
- [5] Kim. J. H, et al., "Design and Experimental Implementation of Easily Detachable Permanent Magnet Reluctance Wheel for Wall-climbing Mobile Robot", Journal of Magnetics, Vol. 15, No. 3, pp. 128-131, 2010.

한 승 철(Seung-Chul Han)

[정회원]



- 2000년 2월 : 영남대학교 기계공학과 (기계공학석사)
- 2007년 2월 : 영남대학교 기계공학과 (기계공학박사)
- 1997년 8월 ~ 2007년 3월 : 상주대학교 자동차과 교원
- 2007년 4월 ~ 현재 : 영남이공대학 자동차과 조교수

<관심분야>
자동화, 제어공학

김 진 호(Jin-Ho Kim)

[정회원]



- 1999년 2월 : 한양대학교 기계공학과 (기계공학학사)
- 2002년 5월 : U.C. Berkeley (기계공학석사)
- 2005년 5월 : U.C. Berkeley (기계공학석사)
- 2005년 10월 ~ 2007년 1월 : 한국과학기술평가원 (부연구위원)
- 2007년 9월 ~ 현재 : 영남대학교 기계공학과 교수

<관심분야>
전기기계, 전자기 액츄에이터

김 제 훈(Je-Hoon Kim)

[정회원]



- 2010년 8월 : 영남대학교 기계공학과 (기계공학학사)
- 2010년 9월 ~ 현재 : 영남대학교 기계공학과 (기계공학석사)

<관심분야>
전기기계, 전자기 액츄에이터

이 성 규(Sung-Kyu Lee)

[정회원]



- 1997년 2월 : 영남대학교 금속공학
학과 (금속공학석사)
- 2000년 8월 : 영남대학교 기계공
학과 (기계공학석사)
- 2002년 7월 ~ 현재 : KL-TECH
대표

<관심분야>

로봇공학, 재활의료, 자동화기계 및 설비