

< 학술논문 or 기술논문 >

## 영구자석을 이용한 선체 외판 주행 로봇 개발

김은영<sup>†</sup> · 이동훈\* · 김호경\*

Development of a hull-plate moving robot with permanent magnets

Eun-Young Kim, Dong-Hoon Lee and Ho-Kyeong Kim

**Key Words :** A hull-plate moving robot(선체 외판 주행 로봇), Permanent magnet module(영구 자석 모듈)

### Abstract

During the ship's construction process, most high place workings have been carried out by human power, like welding, grinding and so on. Because of the ability to relieve human beings from these, the need of developing a hull-plate moving robot has been rising. This paper describes a hull-plate moving robot, using magnet modules as the adhesive method. Magnet modules maintain the magnetic force between hull-plate and magnets constantly. So that allows the robot to perform movements on the curved plate without the loss of adhesive force. The robot consists of driving motors, control system and magnet modules. The performance of the robot is verified on the curved plate.

### 기호설명

$F_r$  : 바퀴의 마찰력 [N]  
 $\mu$  : 바퀴와 외판 사이의 마찰계수  
 $F_m$  : 자석 1개당 발생 자력 [N]  
 $n$  : 자석 개수  
 $T_G$  : 바퀴의 구동 토크 [Nm]  
 $m$  : 로봇 무게 [kg]  
 $g$  : 중력 가속도 [ $m/s^2$ ]  
 $r$  : 주행 바퀴 반지름 [mm]  
 $T_m$  : 모터의 구동 토크 [Nm]  
 $e$  : 감속기 효율  
 $N$  : 감속비  
 $\mu_g$  : 공기 투자율

$A$  : 자석 면적 [ $mm^2$ ]  
 $B$  : 자석의 표면 자속 밀도 [T]  
 $x$  : 로봇의 평면 주행 시, 주행 바퀴와 외판과의 접점에서부터 외판 곡률 중심까지의 거리 [mm]  
 $R$  : 외판 곡률 반경 [mm]  
 $\delta$  : 로봇의 평면 주행 대비 곡면 주행 시 발생하는 로봇 본체와 지면 사이의 최대 간극 [mm]  
 $d$  : 로봇 주행 바퀴 간 거리 [mm]  
 $y$  : 주행 바퀴 중심에서 평면과 평행한 곡면 접선까지의 거리 [mm]  
 $C$  : 곡 외판 중심

### 1. 서론

전 세계적으로 고층 빌딩의 유리창 청소나 화재 진압, 교량 검사 등과 같이 위험한 작업들을 대신 수행할 수 있는 동반 로봇에 관한 관심이 높아지면서 그에 따른 다양한 연구가 진행 중이다.

특히, 조선 산업의 경우 노동 집약형 산업이라는 특성과 작업 대상물 자체가 대형이라는 점 때문에

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, (주)STX 조선  
 E-mail : stxkey@onestx.com  
 TEL : (055)548-3520 FAX : (055)548-3191

\* (주)STX 조선

작업자들이 위험한 고소작업을 수작업으로 처리하는 경우가 대부분이며, 이를 해결하기 위해 다양한 벽면 이동 로봇에 대한 연구가 이루어졌고, 실험형 시제품들이 제안되었다.

지금까지 연구되고 있는 등반 로봇의 부착 방법들을 살펴보면 크게 세 가지로 나누어 볼 수 있다. 첫 번째는 가장 일반적인 방법인 진공 흡착 방식<sup>(1)(2)</sup>이고, 두 번째는 추력을 이용한 방법, 그리고 마지막으로 자력을 이용한 방법<sup>(3)(4)</sup>이다. 그 중 진공 흡착 방식은 다양한 종류의 벽면에 적용이 가능하나, 강한 부착력을 생성하기 위해 장비 외부에 대용량의 진공 부압 장치를 필요로 하게 되고, 진공 발생 장치와 장비가 진공 호스로 연결되어 있어 구동에 제약이 따를 수 있다. 그리고 추력을 이용한 방법은 안정성의 문제로 사용에 제약이 따른다.

자석을 이용한 부착 방법의 경우, 주행에 방해 요인으로 작용할 수 있는 추가적인 장비 사용이 줄어들고 선체와 같은 강자성체에 적용하기 좋은 장점이 있으나, 자석과 부착면 사이의 간극차에 따른 자력 손실이 크기 때문에 선체 벽면과 같은 유선형의 작업면을 주행할 때에는 제약이 따른다.

그리고 자석 부착 방법을 사용하는 등반 로봇에 대한 지금까지의 연구들은 장비의 하단부에 영구자석을 고정 부착시키는 방식이나 자석 바퀴를 이용하는 방식에 대한 내용들이 대부분이다.

이에 본 논문에서는 영구자석을 모듈화 시켜 부착면과 일정한 간극을 유지시킬 수 있는 새로운 방법의 자력 부착 방식을 제안하고, 이를 적용한 선체 외관 주행 로봇을 개발하여 실제 벽면 주행 테스트를 통해 성능을 검증하고자 하였다.

## 2. 작업 환경 특성

선체 외관 이동 로봇은 건조 중인 선박의 수직면 또는 위보기면에 부착되어 작업을 수행하게 된다. 이 때의 작업 환경은 수평면과는 달리 중력과 벽면 부착력에 대한 영향이 함께 고려되어야 하며, 이를 통해 로봇에 필요한 구동력이 어느 정도인지를 알 수 있다. 따라서 이 장에서는 선체 외관 주행 로봇이 고소 작업을 위한 작업 유닛을 탑재한 상태에서 로봇의 전체적인 질량분포가 대체로 균일하다는 가정하에 각각의 작업면에서 로봇에 요구되는 구동력이 어느 정도인지를 알아 보고, 그 값을 로봇 제작에 반영하고자 하였다.

### 2.1 수직면

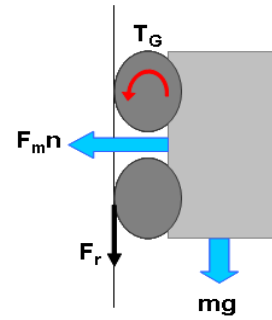


Fig. 1 The forces on the perpendicular plate

수직면에서 로봇이 미끄러짐 없이 상향 이동한다고 가정 할 때, 로봇에 작용하는 힘들을 Fig. 1 에서 나타내고 있다.

이 때, 로봇의 구동력과 직접적인 연관이 있는 주행 모터 구동 토크  $T_m$  은 바퀴에 작용하는 마찰력  $F_r$  과 자석에 의한 부착력  $F_m n$  을 고려해서 계산해야 하며 그 계산 식은 다음과 같다.

$$F_r = \mu F_m n$$

$$T_G \gg (F_r + mg)r$$

$$T_m \gg \frac{(F_r + mg)r}{4eN} \quad (1)$$

### 2.2 위보기면

위보기면에서 로봇이 전진할 때, 로봇에 작용하는 힘들을 Fig. 2 에서 나타내고 있으며, 2.1 장에서와 마찬가지로 로봇의 주행 모터 토크  $T_m$  은 다음과 같이 구해질 수 있다.

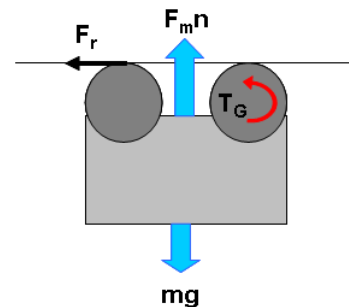


Fig. 2 The forces on the overhead plate

$$F_r = \mu(F_m n - mg)$$

$$T_G \gg F_r r$$

$$T_m \gg \frac{F_r r}{4eN} \quad (2)$$

### 2.3 곡면

로봇이 곡면을 주행할 경우에는 로봇 몸체 하단부의 각 지점과 외판 사이의 간극이 서로 달라지게 되며, 이는 로봇의 외판 부착 능력에 영향을 미치게 된다.

따라서 로봇이 평면을 주행할 때와 비교해서, 곡면 반지름에 따른 간극이 최대 어느 정도까지 발생하는지를 알아 보고, 3 장의 자석 모듈 설계에 반영하고자 하였다.

다음의 Fig. 3 은 최대 간극 차를 구하기 위한 모델링이다. 이를 이용해 볼록 곡면의 반경  $R$  에 따른 주행면의 최대 변위  $\delta$  를 구하는 식은 다음 식 (3)과 같다.

$$(r+x)^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2 = (r+R)^2 \quad (3)$$

여기에서  $x = r - \delta$  와 같으므로 다시 한번 식을 정리하면, 다음 식(4)와 같다.

$$\delta = R + r - \sqrt{(r+R)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (4)$$

마찬가지로 오목 곡면의 반경  $R$  에 따른 최대 간극  $\delta$  를 구하는 식은 다음 식 (5)와 같다.

$$(R-y)^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2 = (R-r)^2 \quad (5)$$

이 때,  $y = r + \delta$  와 같으므로 다시 한번 식을 정리하면 다음 식 (6)과 같다.

$$\delta = R - r - \sqrt{(R-r)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (6)$$

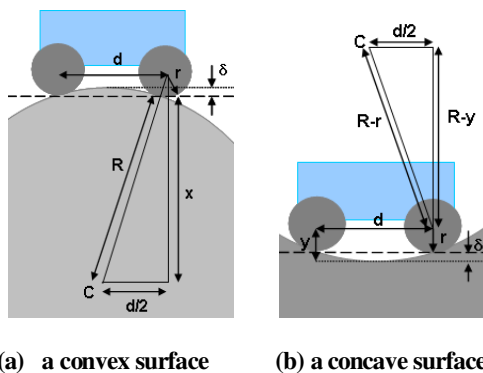


Fig. 3 Maximum displacement between flat plate and curved plate

Table 1 The magnetic force and displacement between a magnet and a flat plate

Displacement [mm]	Magnet force [N]
1	152.72
2	142.36
3	132.17
4	122.25
5	112.68
6	103.53
7	94.84
8	86.64
9	78.96
10	71.81

## 3. 외판 부착용 자석 모듈 개발

### 3.1 영구 자석 모듈 설계

#### 3.1.1 영구 자석의 자력

영구 자석 모듈 설계에 앞서, 식 (7)을 이용해 부착면과의 간극차에 따라 작용하는 영구자석의 자력이 어느 정도인지를 알아보았다. 자력 측정에 사용된 영구자석은 50 x 50 x 25 [mm] 사이즈의 블록형 네오디뮴 자석으로 N35 타입을 사용하였다. Table 1 에서 보는 바와 같이 자석과 부착면 사이의 간극이 1mm 씩 멀어질 때 마다 약 10N 정도씩 자력이 약해지는 것을 알 수 있다.

$$F_m = \frac{AB^2}{2\mu_g} \quad (7)$$

#### 3.1.2 영구 자석 모듈의 구조

일반적으로 자력을 이용한 벽면 이동 로봇의 경우, 충분한 부착력을 얻기 위해 다수의 자석을 로봇 몸체에 부착시켜 구동하게 된다. 그러나 주행면의 상태가 곡면인 경우, 로봇의 몸체에 부착된 각각의 자석과 외판과의 거리가 달라지게 되고 이는 곧 발생하는 자력이 서로 달라져 로봇의 부착력에 영향을 미치게 된다

특히, 선체 외판을 주행하며 작업을 수행하게 되는 로봇의 경우, 유선형의 선체 벽면을 따라 주행을 해야 하기 때문에 자석과 부착면 사이의 간극 유지는 꼭 해결되어야 할 문제 중 하나라고 할 수 있다.

이에, 본 논문에서는 Fig. 4 에서 보는 바와 같이 자석과 부착면 사이의 간극을 유지시켜 줄 수

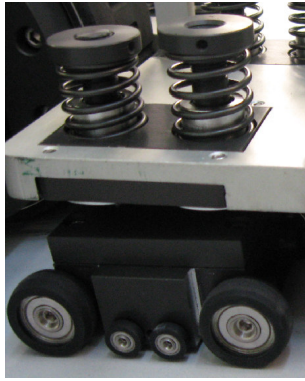


Fig. 4 Magnet module

있는 자석 모듈을 개발하여 선체 외판 주행 로봇에 적용하였다.

2.3 장에서 구한 식을 이용해 평판 대비 블록곡과 오목곡에서 발생하는 최대 간극을 구해냈다. 현재 당사 조선소에서 건조중인 선박들의 미드쉽 곡률반경의 평균치라 할 수 있는 1700mm 를 곡률반경으로 정하였고, 로봇의 주행바퀴 반경은 80mm, 대차부의 바퀴 중심 거리는 380mm 로 하였다. 이때의 블록곡 간극은 최대 10.7mm, 오목곡의 간극은 최대 11.8mm 였다.

영구 자석 모듈은 보조 바퀴가 부착되어 있는 알루미늄 케이스 내부에 영구 자석이 삽입되어 있는 구조이며, 보조 바퀴 사이에 직경이 더 작은 보조 바퀴를 추가로 설치하여 영구 자석 모듈이 용접 비드면 등의 장애물을 통과하게 될 때, 구동이 좀 더 용이할 수 있도록 하였다. 그리고 샤프트에 설치되어 있는 스프링의 작용을 통해 영구 자석 모듈이 곡면에 부착될 때에도 유연한 대응을 통해 자석과 외판 사이의 간극이 유지될 수 있도록 하였다.

### 3.2 영구 자석 모듈의 구동

자석 모듈이 강자성체인 외판에 부착되기 전에는 모듈의 몸체 부분이 외판 주행 로봇의 몸체부 가까이 올라와 있는 상태이지만, 외판 부착 시에는 외판과 영구자석 사이에 발생하는 자력에 의해 모듈 몸체부가 아래로 내려와서 외판에 부착되게 되며, 이때의 변위는 10mm 가 되도록 설계하였다. 그리고 모듈에 부착되어 있는 보조바퀴에 의해 외판과 모듈 사이에는 일정한 간극이 발생되도록 하였으며, 이 간극은 4mm 로 제작하였다. 즉, Table 1 에서 얻은 결과값에 의해 자석 모듈은 1 개당 122.25N 의 자력을 발생시키게 된다.

자석 모듈에 부착되어 있는 2 개의 샤프트는 개

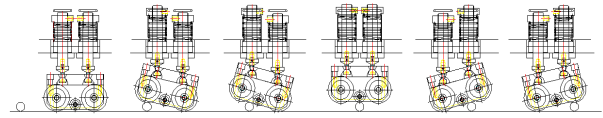


Fig. 5 Magnet module's moving layout on the hull-plate with welding bead

별적으로 작동되기 때문에 자석 모듈이 장애물을 만났을 때 또는 곡면 주행 시, 모듈의 자세를 변화시켜 자석과 외판이 일정한 간극을 유지할 수 있도록 해 준다. 그리고 자석 모듈과 샤프트의 체결에 사용되는 핀을 반구 형상으로 제작하여 자석 모듈이 종방향의 장애물과 곡면뿐만 아니라 횡방향의 장애물과 곡면에서도 대응이 가능하도록 하였다. Fig. 5 는 자석 모듈이 선체 외판 용접 비드를 주행할 때 발생하는 동작을 시퀀스적으로 나타낸다.

## 4. 시스템 구성

다음의 Fig. 6 은 선체 외판 주행 로봇을 나타낸다. 선체 외판 주행 로봇은 향후 제작되어 탑재될 선박 건조 작업 유닛의 무게까지 고려하여 충분한 부착력을 낼 수 있도록 자석 모듈의 설치 공간을 마련하였으며, 총 14 개의 자석 모듈이 좌우 대칭으로 설치되어 있다.

현재까지 개발된 대다수의 선체 외판 주행 로봇들은 진공 흡착 방식 또는 제어부를 지상에 따로 분리하는 방식을 사용해 왔다. 이는 진공 호스나 로봇에 연결되는 케이블 다발의 영향으로 부착력을 약화시켜 주행 안전성을 떨어뜨리는 역할을 하기도 한다. 하지만 본 논문에서는 제어부를 로봇에 탑재하여 주행 안전성을 높일 수 있는 선체 외판 주행 로봇을 개발하였다.

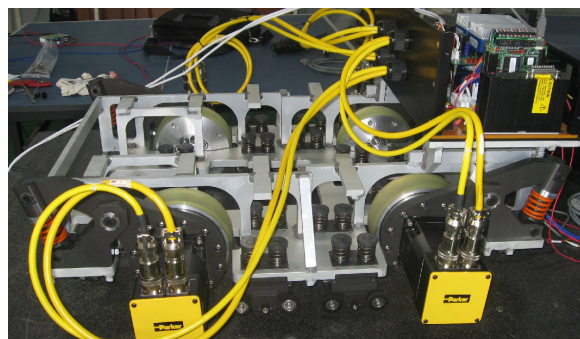


Fig. 6 Hull-plate moving robot

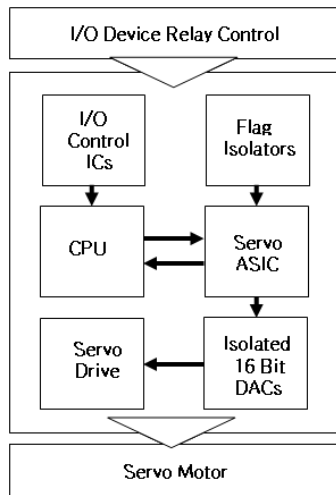


Fig. 7 Software structure

이동부는 4 개의 바퀴와 모터로 구동되며, 조향은 좌우의 바퀴 속도차를 이용하여 이루어지도록 되어 있다. 모터의 용량은 2 장에서 구한 식을 통해 충분한 구동력을 낼 수 있도록 선정되었다.

제어부는 PC104 버스를 가진 임베디드 제어기를 사용하고 있으며, 제어 박스는 향후 탑재될 각종 작업 유닛들의 제어 장치 공간을 고려해서 공간을 최적화하고자 하였다. 이를 위해 서보 드라이브와 모션 제어기, I/O 등을 포함하고 있는 PCB 모듈을 자체적으로 제작하여 사용하였다. Fig. 7은 선체 외관 주행 로봇의 전체적인 제어 시스템에 대해서 나타낸다.

### 5. 부착 및 주행 테스트

#### 5.1 부착 테스트

선체 외관 주행 로봇이 블록곡과 오목곡을 주행할 때, 영구자석 모듈의 작용에 대해서 알아 보았다. 실험은 R=1700mm의 곡과 수직 평판이 동시에 존재하는 블록을 임의로 제작하여 실시되었으

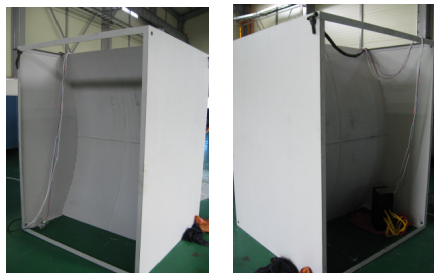
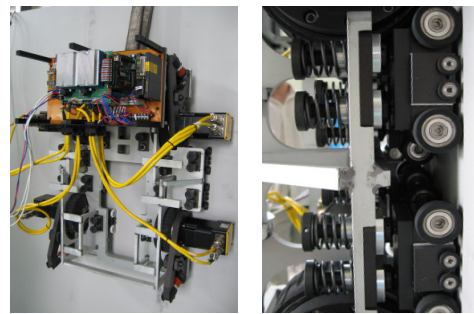
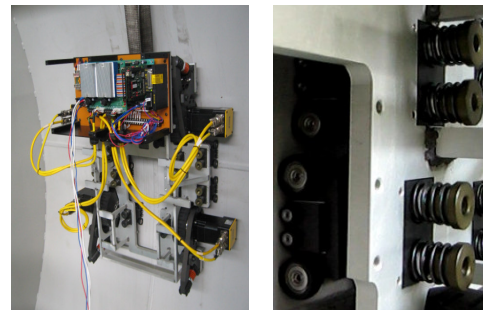


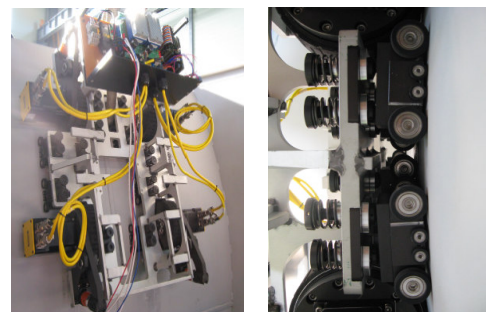
Fig. 8 Test block



(a) Flat plate



(b) Concave plate



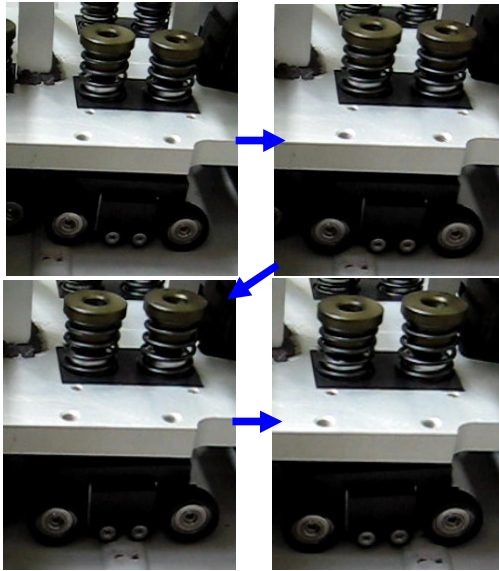
(c) Convex plate

Fig. 9 Magnet module's moving on the three kinds of plates

며, 제작된 블록은 Fig. 8에 나타나 있다.

다음 Fig. 9는 선체 외관 주행 로봇을 각각 수직 평판(a), 오목곡(b)과 블록곡(c)에 부착시켰을 때, 자석 모듈의 작용과 로봇의 모습을 나타낸다.

오목곡과 블록곡에서 각각 스프링의 압축과 인장에 의해 자석 모듈이 외판에 부착되며 자석과 외판 사이의 간극은 4mm로 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 R=1700mm로 제작된 곡률의 반경이 제작 중 발생한 용접 변형 등으로 인해 정확한 곡률 반경을 유지하지 못하면서 발생하는 간극 오차에 의해 오목곡 부착 시, 일부



**Fig. 10 Magnet module's moving on the hull-plate with welding bead**

구간에서 자석 모듈 1~2 개 가량이 원래의 위치로 튕겨져 올라옴을 알 수 있었다. 이에 스프링의 최초 길이보다 더 긴 스프링을 사용하여 부착 안정성을 높여 다시 테스트한 결과, 안정된 부착 상태를 유지할 수 있었다.

### 5.2 주행 테스트

주행 테스트는 오목곡과 볼록곡 주행 및 용접선과 같은 장애물 통과에 대해서 이루어 졌고, 주행 속도는 125mm/sec 이다. Fig. 10 은 로봇이 용접선 비드면이 있는 오목곡을 주행하는 모습이다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 영구자석 모듈을 이용하여 일정한 부착 자력을 유지하며 선체 외관을 주행할 수 있는 선체 외관 주행 로봇의 개발에 대해 설명하였다. 곡면에서도 자석 모듈이 일정한 간극을 유지하도록 하기 위해 자석 모듈에 스프링과 보조바퀴를 설치하였고, 로봇의 주행 환경에 따른 적용 조건을 구해서 설계에 반영, 개발하였다. 그리고 실제 벽면 부착 및 주행 테스트를 통해 성능을 검증하였다.

실제 곡면에서는 제작 과정 중 발생하는 오차와 용접 변형 등의 원인으로 인해 곡률 반경이 정확하게 적용되지 않음을 알 수 있었다. 따라서 영구자석 모듈의 스프링 길이를 안전율을 고려해서 결

정해야 함을 알 수 있었다.

여기에서 얻어진 결과를 향후 제작될 선박 건조 작업 로봇에 반영하여 로봇의 작업 환경에 맞게 수정, 보완된 후 테스트할 예정이다.

## 참고문헌

- (1) Jian Zhu, Dong Sun and Shiu-Kit Tso, 2002, "Development of a Tracked Climbing Robot", *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 35, pp. 427~444.
- (2) Hwang Kim, Dongmok Kim, Hojoon Yang, Kyouhee Lee, Kunchan Seo, Doyoung Chang and Jongwon Kim, 2006, "Development of a wall climbing robot with vacuum caterpillar wheel system", *KSPE 06S105*, pp. 55~56.
- (3) Seung Chul Han, Hwa Cho Yi and Eun Chan Kim, 2004, "Study on the Design Constraints of the Wall-Climbing Mobile Robot Using Permanent Magnetic Wheels (Part 1 – Design Guideline)", *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 21, No. 9, pp. 69~76.
- (4) Seung Chul Han, Hwa Cho Yi and Eun Chan Kim, 2004, "Study on the Design Constraints of the Wall-Climbing Mobile Robot Using Permanent Magnetic Wheels (Part 2 – Design of Mobile Vehicle)", *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 21, No. 5, pp. 77~84.