

영구 자석 바퀴를 이용한 벽면 이동 로봇의 설계시의 제약 사항들에 대한 연구 (Part 2 - 이동체설계)

한승철[#], 이화조^{*}, 김은찬^{**}

Study on the Design Constraints of the Wall-Climbing Mobile Robot Using Permanent Magnetic Wheels (Part 2 - Design of Mobile Vehicle)

Seungchul Han[#], Hwacho Yi^{*}, Eunchan Kim^{**}

ABSTRACT

The attachment of mobile vehicle is necessary for the automated operation on the inclined or vertical walls of steel structures. Since the vehicle requires attaching devices additionally, its overall efficiency can be reduced by the devices. Therefore, external shapes of mobile vehicles have to be researched to give the effective movement on the vertical face. For the design of mobile vehicle, the guideline has been derived from the modeling of wall-climbing, so that the vehicle should have a specific external shape for vertical movement due to the gravitational force. Hence, some adequate arrangement of attaching device to the mobile vehicle has been presented for the effective movement. In the experiments with four permanent magnetic wheels, a plausible result was achieved as a vertical attaching force of 185.2(N), a friction force of 153.8(N) and a curvature radius of 1.4m. The mobile vehicle should be modified according to the proposed design guideline, and then it could be applied to a specific operation as an appropriate external shape. Also, Further research is recommended on an optimal posture and a moving method in a specific application, as the attaching force of the vehicle can be affected by its posture.

Key Words : permanent magnet wheel(영구자석 바퀴), wall-climbing mobile robot(벽면 이동로봇), mobile vehicle(이동체), friction force(마찰력), attaching force(부착력)

1. 서론

대형 구조물에서는 수직면이나 경사면이 상당 부분을 차지하고 있으므로 그러한 부분의 건조 및 유지 보수작업은 부가장비요구 및 비용 증가 등의 문제를 안고 있다. 그러므로 그런 작업에 대한 자

동화 요구는 갈수록 증대되고 있는데, 이를 위해서는 벽면을 이동할 수 있는 이동체의 개발이 필요하다.

철 구조물의 경사면이나 수직면의 자동화작업을 위하여 기존의 연구에서는 이동체가 벽면에 부착되는가에 대한 문제만 다루고 있다. 하지만 부

접수일:2003년 10월 2일; 게재승인일:2004년 2월 20일

교신저자: 영남대학교 기계공학과 대학원

E-mail:schan@sangju.ac.kr Tel.(053) 810-3233

* 영남대학교 기계공학부

** 삼성전자

착 장치의 효율성에 관한 연구는 그리 많지 않다. 부착 장치는 이동체의 전체적인 효율을 감소시키고 부담을 증가시키는 부정적인 영향을 주는 존재이다.

대부분의 벽면 이동 로봇연구는 강한 부착 장치의 개발^{1,2,6}이나 효과적인 이동 기구를 설계^{3,4,5,7} 하는 방식으로 진행되어 왔다. 이동체의 설계에 있어서는 이동 방법에 대한 내용만 주를 이루고 있을 뿐 벽면에서 동작하는 이동체가 가장 효율적이기 위해서 어떠한 외형적인 특징을 가져야만 하는가라는 문제는 거의 다루어지지 않고 있다.

본 논문에서는 기존의 흡착방식의 벽면 이동 로봇이 아닌 구동형 이동로봇으로 영구자석바퀴를 이용한 벽면 이동로봇의 설계 지침에 의한 이동체를 개발하고 개발된 이동체의 부착력, 마찰력, 곡면 적응성 등의 실험을 통해 영구자석 바퀴를 이용할 경우 이동체의 설계에 따른 어떠한 외형적인 특징을 지녀야만 하는가에 대한 것을 알아 본다.

2. 지침에 따른 이동체 설계

2.1 자석 바퀴의 설계

Fig.1, Fig.2 와 같이 자석과 부착면 사이의 중간 위치에 자장이 흐를 수 있는 금속물질을 끼워 넣어 자석의 양쪽에 있는 판을 연결시키게 되면 상당부분의 자력선은 끼워 넣은 금속물질을 통하여 흐르게 되고 부착 면에서의 부착력은 급격히 저하할 것이다. 이러한 방법은 자력강화를 위하여 장착한 자석의 양쪽 금속판에 구멍을 뚫고 핀을 끼워 넣음으로서 구현이 가능하고 회전형의 바퀴에서도 적용이 가능할 것이다.⁶

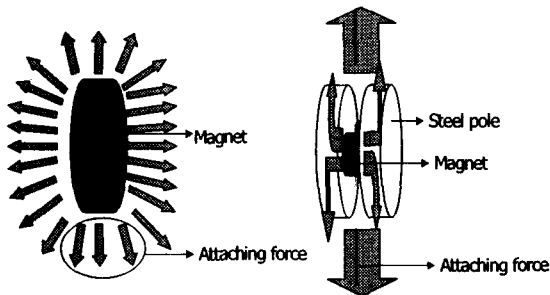


Fig. 1 Enforcement of Magnetic Attaching Force

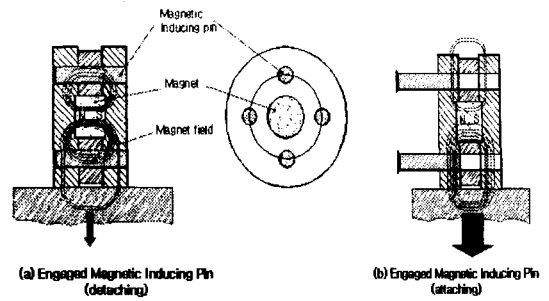


Fig. 2 Operation of detaching and attaching wheel by inducing magnetic force.

바퀴를 설계함에 있어서 가장 중요하게 고려되어야 하는 문제는 부착력이다. 부착력을 이야기 하기 위해서는 가장 중요한 두가지를 고려해야 한다. 첫째는 순수한 자력에 의해서 부착면과 수직 방향으로 버티는 힘이고 둘째는 마찰력에 의해서 부착면과 수평 방향으로 버티는 힘이다(Fig.3).

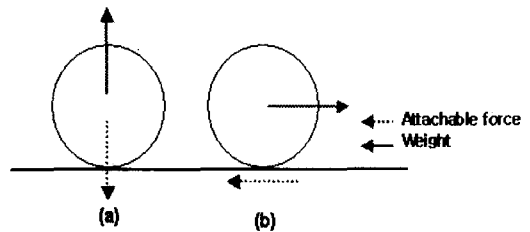


Fig. 3 The important attaching force of magnetic wheel
(a) Vertical attaching force by magnetism
(b) Horizontal attaching force by friction force

자력은 자력을 발생시키는 부품의 형상에 대한 영향을 많이 받을 뿐만 아니라, 어떤 경우에 어떤 수치의 자력을 발생시킬 수 있다는 공식을 얻는 것이 힘들기 때문이다. 그래서 사실상 실제 자석 바퀴를 제작한 다음 실험적인 과정을 통해서 우리가 원하는 범위의 자석 바퀴를 만들어 내는 것이 가장 정확한 방법이라고 할 수 있다. 일단 원하는 자석 바퀴를 만들기 전에 필요한 과정은 전체 이동체가 감당해야만 하는 부하를 예상하고 간단한 식을 통해서 우리가 필요한 자석 바퀴 하나의 부착력을 대략적으로 얻어내는 일이다. 여기

서 다시 다른 문제가 발생하는데, 우리가 추정해야만 하는 두가지 부착력 중 두번째의 경우인 마찰력이 문제가 된다. 마찰력은 일반적으로 식 (1) 과 같이 정의된다.

$$F = \mu N \quad (1)$$

이때 F 는 마찰력, μ 는 마찰계수, N 은 접촉 물체간의 작용력이다. 이때 문제는 마찰 계수인데 이 값은 쉽게 알 수 없다. 실제적으로 같은 물질 들간의 마찰이라고 하더라도 여러 가지 외부적인 요인들(예를 들면, 온도) 또는 형상에 의해서 그 값이 상당히 달라지기 때문이다.

이러한 문제들로 인해서 정확하게 필요한 자력을 발생시키는 자석 바퀴를 설계한다는 것은 현실적으로 어렵다. 그러므로 Han,S.C.⁶ 이 개발한 자석 바퀴의 형상과 자료를 참고하여 기본적인 바퀴를 제작하고 수직 부착력과 마찰력 실험을 통해서 우리가 필요한 성능을 발휘하는지 검증하는 방식으로 진행했다.

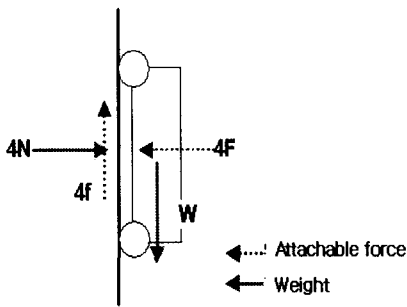


Fig. 4 Weight and attachable force on vertical attaching

수직면에서 마찰력에 의한 힘을 산출하고 부착을 위해 요구되는 각 바퀴의 단위 부착력을 알기 위해서 Fig.4 의 상대에 대해서 Fig.5 의 3 차원 그래프를 그려보는 것이 유효하다.

Fig.5 는 Fig.4 의 자세에서 마찰계수를 0.3 으로 가정하고 4 개의 부착 장치에 대해서 바퀴당 단위 부착력과 전체 하중에 따른 마찰에 의한 잉여 부착력을 계산한 그래프이다. 하중이 작을수록 잉여 부착력은 커짐을 알 수 있으며 각 단위 부착력이 작을수록 견딜 수 있는 하중의 범위는 좁아지게 된다.

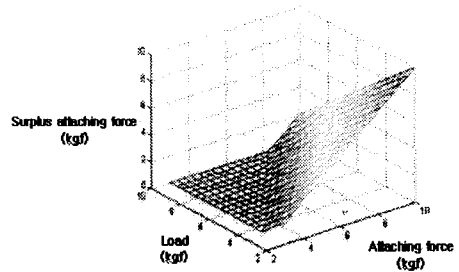


Fig. 5 Specific attachable force of vertical plane and over plus attachable force when attachable devices are 4 (if a coefficient of friction is 0.3)

이런 그래프를 참고로 해서 하중에 대해서 요구되는 단위 부착력을 대략적으로 짐작한다. 일단 여기서는 마찰력을 0.3 으로 가정한 그래프를 보이고 있지만 이것은 나중에 바퀴를 제작한 후 실험을 통해서 마찰계수를 얻은 다음 다시 Fig.5 와 같은 그래프를 그려서 검증을 한다. 처음 잡는 마찰력은 작게 잡는 것이 안전하다.

2.2 동력 전달부 설계

2.2.1 곡률 적응을 위한 설계

동력 전달부는 구동 장치인 모터에서 각 바퀴로 토크를 전달하는 역할을 한다. 자석 바퀴를 부착 장치로 사용하는 이동체의 경우 동력 전달부는 일반적인 다른 이동체와는 다른 기능을 더 가져야만 하는데 그것은 바로 벽면 적응력이다. 이동을 발생시키는 장치와 부착을 발생시키는 장치가 같기 때문에 이러한 기능이 요구된다.

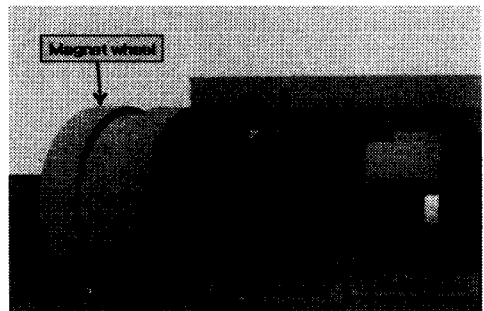


Fig. 6 Power transmission

벽면 적응력을 가지기 위해서 관절 구조를 채택하는 것이 간단하며 구현을 위해서 유니버설 조인트(Universal Joint)를 사용한다.

Fig.6 은 유니버설 조인트를 사용한 동력 전달부의 모습이다. 이런 구조를 사용함으로써 바퀴는 상하로 움직일 수 있게 되며 곡면에 적응력을 가지게 된다. Fig.6 의 구조에서 어느 정도의 곡면 적응력을 가지게 되는가 하는 문제는 식(2),(3)에 따른다.⁷

공식을 다시 보면 볼록면의 경우는

$$h_1^2 + 2R_1h_1 - (h^2 + 2R_1h + \omega p - \frac{\omega^2}{4}) = 0$$

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{p}{R_1 + h}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{\omega - 2p}{2(R_1 + h)}\right) \quad (2)$$

이며 오목면의 경우는

$$h_2^2 - 2R_2h_2 = h^2 - 2R_2h + \omega p - \frac{\omega^2}{4}$$

$$\theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{p}{R_2 - h}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{\omega - 2p}{2(R_2 - h)}\right) \quad (3)$$

- h1: 볼록면에서 몸통축까지 수직높이
- h2: 오목면에서 몸통축까지 수직높이
- p: 바퀴축회전 중심에서 바퀴중심까지 거리
- w: 축이 회전하지 않았을 경우 바퀴간의 거리
- h: 바퀴 반경
- R: 곡률반경

이다. 예를 위해서 각 식에서 h, p, w, R 의 값을 각각 50mm, 34mm, 189mm, 5000mm 로 잡고 계산을 하자. 이때 R=R1=R2 이다.

식(2)에 값을 대입하면 h1 에 대한 2 차 방정식을 얻고 이것을 풀어서 식(3)에 대입하면 동력 전달부가 R 이 5000 일 경우에 적응하기 위해서 회전해야만 하는 각도를 알 수 있다. 식을 풀면 h1 은 49.752mm 가 나오며 그에 대한 θ 는 1.072°가 나온다.

동력 전달부의 회전을 위해서 특별한 구동 장치를 추가로 부착할 필요는 없다. 왜냐하면 자석 바퀴가 강한 자력에 의해서 가장 안정된 부착을 유지하기 위해서 스스로 적응하기 때문이다. 설계

에서 고려해야 하는 것은 그러한 전달부의 회전이 가능하도록 이동체의 다른 부분이 동력 전달부의 회전을 일정 범위내에서는 구속하지 않도록 만드는 것이다.

2.2.2 자력 확산 차단

자석 바퀴의 자력은 가능한 한 자석 바퀴에서만 존재하도록 만들어야 한다. 그렇지 않을 경우 부착력의 핵심인 자력이 분산됨으로 해서 부착력이 약화되고 결과적으로 이동체의 안정성에 부정적인 영향을 준다. 그렇기 때문에 여기서는 단순히 동력 전달부를 비자성체를 사용하며 제작함으로써 그 효과를 얻는다. Fig.7 은 비자성체인 스테인레스 스틸을 사용할 경우 어느 정도의 자력 차단 효과를 발생시키는지에 대한 실험을 보여주고 있다. 자석 바퀴의 양단에 축으로 스틸과 스테인레스 스틸을 사용하여 각 끝단에서의 자력을 측정했다.

측정 장비로서 가우스미터(Gaussmeter)를 사용하였으며 측정 결과는 Table 1 과 같다.

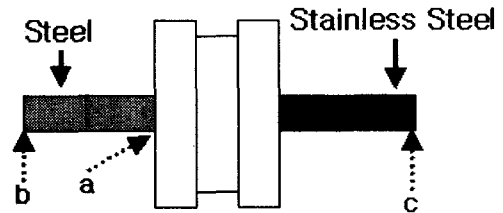


Fig. 7 Measurement of magnetic isolating efficiency

Table 1 Measuring result of isolating magnetic diffusion

Measurement point	a	b	C
Gauss	0.183	0.22	0.04

Table 1 을 보면 두 가지 현상을 알 수 있는데 첫째는 자성체 축을 사용할 경우 자력이 축 끝단에서 집중되어 발생하는 현상이고 둘째는 비자성체를 사용할 경우의 자력 차단 효과이다.

3. 설계된 바퀴와 이동체의 성능 실험

3.1 자석바퀴의 구성 및 부착력 실험

자석바퀴의 부착력 실험을 위해 Fig.2 와 같이 자석바퀴의 지름이 38mm, 두께 24mm 로 제작하였으며 영구자석은 네오디움 자석을 사용하였다. 또한 이동체는 자석바퀴 4 개를 장착할 수 있는 직경 165mm*225mm*8mm 의 비자성체인 백그라이트로 제작하였다.

구동축은 Fig.6 과 같이 감속기어 모터와 유니버설 조인트를 사용하여 곡면에 대한 실험을 할 수 있도록 제작하였다.

3.1.1 자석 바퀴의 수직 부착력 실험

영구자석 바퀴의 수직부착력 실험은 벽면에 대해서 수직 방향으로 작용하는 힘에 대해서 자석 바퀴가 어느 정도의 부착력을 발휘하는가에 대한 실험이다.

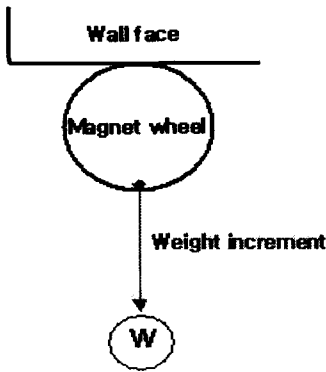


Fig. 8 Inspection of vertical attachable force

수직 부착력 실험에서는 바퀴나 이동체를 철체면에 부착시킨 후 하중을 조금씩 증가시켜 나가다가 자석 바퀴가 벽면에서 이탈할 때의 하중을 측정하면 부착력을 알 수 있다. 부착력 실험에 있어서 중요한 점은 하중을 가능한 한 정적인 형태로 증가시켜야 한다는 것이다. 정적인 형태로 하중을 증가시킨다는 것은 하중의 증가 속도가 가능한 0 에 가깝게 천천히 증가시킨다는 것을 의미한다. 그렇게 하지 않을 경우 실험 결과값에 있어서 상당히 큰 편차가 발생한다.

Fig.9 는 이 실험에 대한 결과치를 보여주며 평

균치는 89.47(N)이다.

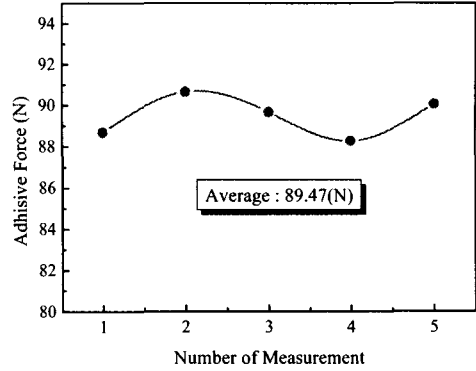


Fig. 9 Inspectional result for vertical attachable force of magnetic wheel

3.1.2 자석 바퀴의 마찰력 실험

마찰력은 자석 바퀴가 벽면에 부착하여 안정할 수 있는 중요한 요인 중 하나이다. 그러므로 마찰력 실험은 반드시 필요하며 설계에서 중요하게 사용된다. 이 실험으로써 우리는 벽면에서 바퀴의 미끄러짐 정도를 얻을 수 있고 마찰계수를 구할 수 있다.

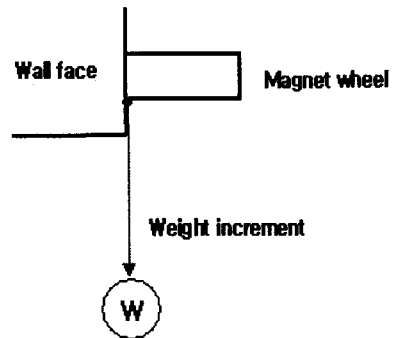


Fig. 10 Frictional inspection

Fig.10 에서 마찰력 실험을 보여주고 있는데 바퀴에서 하중을 부과하는 위치가 접합면의 바로 윗부분이다. 면과 아주 미세한 거리차는 있긴 하지만 무시한다.

Fig.11 은 실험 결과를 보여주고 있으며 마찰력의 평균치는 38.87(N)이다. 이 값을 수직 방향 부착력으로 나누면 마찰 계수를 얻을 수 있다. 이때

사용된 부착력은 앞의 실험에서 얻어진 평균값을 사용한다. 결과로 얻어진 마찰 계수는 약 0.43 이다.

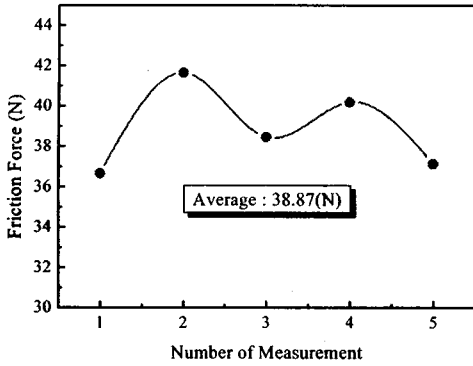


Fig.11 Friction of enforcing weight on joining plane

3.2 이동체 부착력 실험

3.2.1 천장면에서의 부착력 실험

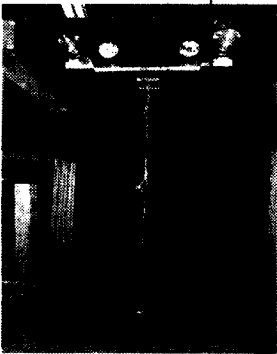


Fig. 12 Inspection of vertical attachable force

Fig.9 와 Fig.11 의 실험결과를 가지고 설계된 바퀴를 이동체에 적용하여 제작된 이동체의 수직 부착력 실험을 통하여 각 바퀴의 부착력의 합에 대해서 어느 정도 부착력을 지니게 되는지 실험을 하였다.

Fig.12 는 이동체의 부착력실험 모습을 보여주고 있으며 아래의 추를 점점 증가시키면서 이동체가 분리되는 하중을 기록한다.

Fig.13 는 실험 결과를 보여준다. 실험에서 사용된 부착 철판은 두께 5mm 의 강판이다. 결과의 평균치는 약 185.22(N)이다. 이 값은 전체 이동체

무게의 약 9 배에 해당한다.

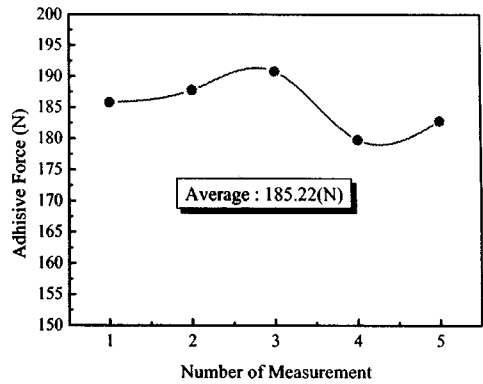


Fig. 13 The vertical attachable force of entire vehicle

3.2.2 이동체 전체에 대한 마찰력 실험

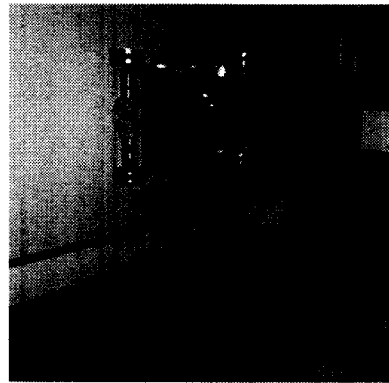


Fig.14 Inspection of moving friction

바퀴의 마찰력 실험에서 보였듯이 접촉면에 힘을 주는 경우와 바퀴의 끝단에 힘을 주는 경우 마찰력에서 차이를 보인다. 그 이유는 모멘트에 의한 영향으로 보인다. 이동체를 설계한 다음에도 이동체의 마찰력에 대한 실험이 필요하며 여기서는 이동체 일정 하중을 가하는 실험을 수행했다.

Fig.14 은 이동체의 마찰력실험을 보여주고 있으며 하중을 증가시켜서 어느 정도의 하중에 대해 미끄러움이 발생하는지 관찰했다. 앞의 바퀴 부착력의 결과와 유사하게 이동체에 하중을 줄 경우 모멘트에 의해 이탈하기 전에 마찰력이 모자라 미끄러지는 과정이 먼저 일어난다. 바퀴와 마찬가지로

하중을 가하는 지점이 부착면에서 충분히 떨어진다면 이동체는 미끄러지기 전에 회전하면서 떨어질 것이다. 결과는 Fig.15 에 보이며 결과의 평균치는 약 153.86(N)이다.

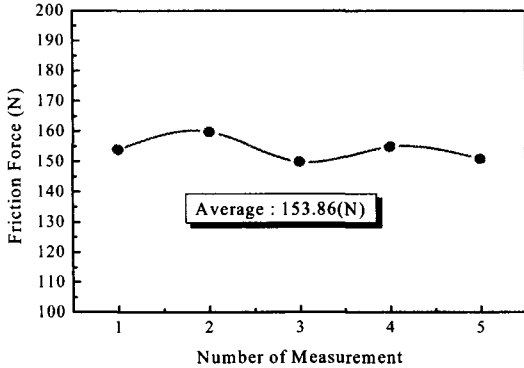


Fig.15 Friction for entire vehicle

3.2.3 곡률에 대한 부착실험

곡률 반경을 가지는 면에 대해 이동체가 적절한 움직임을 보이면서 면에 부착되는지 여부에 대한 실험이다. 실험은 철판을 이용해서 했으며 평면 상태에서 이동체를 부착시킨 후 철판을 볼록면과 오목면의 형태로 휘어가면서 이동체의 바퀴가 적절하게 움직이면서 적응하는지를 실험하였다. 실험에 사용된 이동체는 바퀴의 직경이 38mm 였기 때문에 작은 곡률 반경에 대해서는 적응력이 떨어지며 실험에서는 약 1.5 m 의 곡률 반경에서 바퀴의 부착 상태가 불안해지는 결과를 보였다. 더 큰 곡률 반경에 대해서는 안정된 부착을 유지한다. Fig.16,17 에서는 이동체가 벽면에 적응하기 위해서 구동축이 회전한 형상을 보이고 있다.

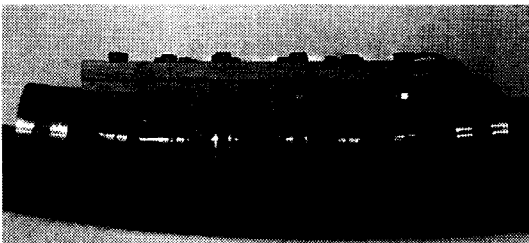


Fig. 16 Looks of attachment on the concave plane

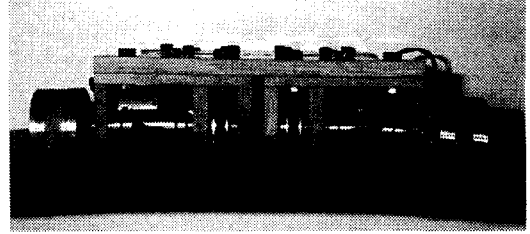


Fig. 17 Looks of attachment on the convex plane

4. 결론 및 향후연구과제

특정 부착 장치인 영구 자석 바퀴를 사용한 이동로봇의 설계 지침들을 바탕으로 실험을 위한 이동체를 제작하였으며 제작된 이동체와 영구 자석 바퀴를 이용하여 부착력 실험, 마찰력 실험, 곡면 적응성 등을 실험하였다

실험에서 4 개의 영구자석 바퀴를 사용하여서 약 185.2(N)의 수직 부착력, 약 153.8(N)의 마찰력, 약 1.4 m 의 곡면 적응성을 얻어 만족한 결과를 보여주었다. 영구자석바퀴를 이용한 벽면 이동로봇의 설계 지침에 의한 이동체를 개발하고 제작된 이동체의 부착력, 마찰력, 곡면 적응성 및 제어기 개발 등을 실험하여 설계 지침의 효율성을 입증하였다.

특정 작업에 벽면 이동 로봇을 적용할 경우 제안된 설계 지침의 요구에 맞게 작업이 선정된 후에 다시 이동체를 작업에 적절한 형태로 변형시켜서 사용하여야만 될 것이다.

후기

본 연구는 2003 년도 영남대학교 BK21 사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

1. Luk, B. L., Collie, A. A. and Billingsley, J., "ROBUG II : An Intelligent wall climbing robot," Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2342-2347, 1991.
2. Briones, L., Bustamante, P. and Serna, M. A., "Wall-Climbing Robot for Inspection in Nuclear Power Plants," Proceedings of the IEEE Int. Conf. on

Robotics and Automation, pp.1409-1414, 1994.

3. Nagakubo, A. and Hirose, S., "Walking and Running of the Quadrupe Wall-Climbing Robot," Proc of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1005-1012, 1994.
4. Ikeda, K. and Nozaki, T., "Development of a Self-Contained Wall-Climbing Robot," Proceedings of Int. Symposium on Advanced Robot Technology, pp.365-372, 1991.
5. Choi, H. R., Lee, J. H., "Development of wall climbing robot," Proc. of kspe, pp.3-6, May 1999.
6. Han, S. C., Yi, H. C., " A Study on a Detachment of a Permanent Magnet Wheel for a Wall-Climbing Mobile Robot using Magnetic Inducement," J. of the KSPE, Vol. 19, No.1, pp. 143-149, 2002.
7. Yi, H. C., Kim, E. C., Han, S. C., "Guide on the Design of the Wall-Climbing Mobile Robot Using Permanent Magnetic Wheels," Proc. of kspe, pp.548-553, October 2002.