

벽면이동 로봇용 하이브리드 자석바퀴 3차원 유한요소해석 및 설계

한승철*, 이재용**, 김진호†**

영남이공대학 자동차과*, 영남대학교 기계공학부**

Design of Hybrid Magnet Wheels using 3D Finite Element Analysis for
Wall-climbing Robot

Seung-Chul Han*, Jae-Yong Lee** and Jin-Ho Kim†**

Department of Automobile, Yeungnam College of Science & Technology*
School of Mechanical Engineering, Yeungnam University**

Abstract

We propose a new design of the hybrid-magnet wheel to make it possible for a mobile robot to be attached to the vertical plane and be in motion. In the new suggested design, a permanent magnet is utilized to enhance the adhesive force, while an electromagnet is adopted to reduce the magnetic field and the adhesive force for detaching easily. To analysis the performance of the robot, 3 dimensional finite element analysis is executed using commercial electromagnetic analysis program, Maxwell. The results show that the adhesive force is reduced effectively by the electromagnet in the new designed robot system.

※Keywords: Mobile robot(이동로봇), Electromagnet(전자석), Hybrid magnet(하이브리드자석), Permanent magnet(영구자석), Wheel(바퀴)

1. 본 문

Fig. 1은 조선소 및 대형 저장탱크, 건설현장 등과 같은 대형 철 구조물에서 상당부분 작업이 수직이나 경사면에서 이루어지는데 이런 환경에서의 작업은 대부분 인력에 의존하고 있음을 보여준다. 이러한 경우 작업자의 사고위험, 부가장비의 필요성 증가, 작업비용증가 등의 문제가 발생한다.

접수일: 2009년 4월 7일, 승인일: 2009년 11월 3일

† 교신저자: jinho@ynu.ac.kr, 053-810-2441

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 고착하는 방법이다. Luk et al.(1991, 1993)은 4지 관절형 Nero Robot과 ROBUG II를 개발하였는데 이 시스템에서는 각 발과 몸통에 흡착판을 장착하고 공압 실린더를 이용 순차제어방식으로 이동한다. Bahr et al.은 흡입 컵의 설계와 로드셀

을 이용한 흡입 컵의 수평면과 수직면의 부착력을 측정하는 방법을 제시하여 흡착판 장착 로봇의 흡착 효율과 전체 장비의 하중 문제를 개선하였다. 국내에서는 Ryu et al.(2006)은 구동 목적이 아닌 단순 흡착을 위해 자석을 이용한 용접용 벽면이동 로봇을 개발하였으며, Lee et al.(1996)은 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 부가장비와 그에 따른 제어가 요구된다는 단점이 있다.

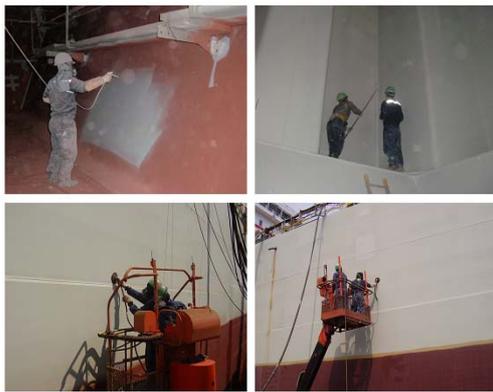


Fig. 1 Work conditions during ship construction

이러한 문제점을 해결하기 위하여 Han et al. (2002)은 새로운 구조의 유도핀을 가지는 영구자석 바퀴를 제안하였다. Fig. 2는 제안된 영구자석 바퀴의 구조와 작동원리를 보여준다. 바퀴 내의 영구자석은 부착 대상물인 철판 등의 자성체 벽면과 페루프의 자속을 구성하여 부착력을 발생시킨다(Fig. 2(a)). 또한, 탈착 시에는 철심으로 만들어진 유도핀을 삽입하여 영구자석의 자속을 유도핀으로 유도하여 부착대상물로 흐르는 자속량을 감소시킴으로써 부착력을 줄여 탈착을 용이하게 한다(Fig. 2(b)). 따라서 기존의 진공펌프 타입의 부착장치에 비해 상대적으로 구조가 간단하고 무게가 가볍고 또한 바퀴 형상을 가지고 있기 때문에

이동속도를 향상시킬 수 있다.

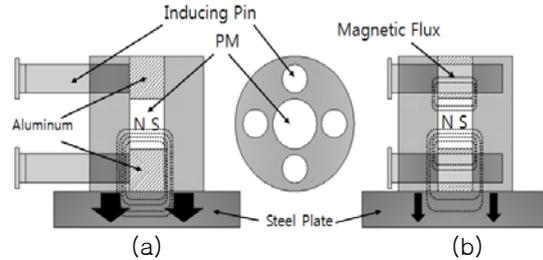


Fig. 2 Structure and operation principle of permanent magnet wheel (a) attaching mechanism (b) detaching mechanism using inducing pins

앞에서 설명한 유도핀 타입의 영구자석 바퀴는 몇 가지 단점을 가지고 있다. 첫째, 유도핀을 유도핀용 홀(Hole)에 조립하는 작업은 용이하나, 작업 후 영구자석과 유도핀에 형성된 강한 자력으로 인해 다시 분리하기가 어렵다는 점이다. 둘째, 바퀴가 회전할 때 유도핀용 홀 위치에 따라 영구자석으로 부착면으로 흐르는 자속량의 변화가 생기고, 자기력의 크기가 달라져 자석바퀴의 속도를 일정하게 유지 할 수 없다는 것이다. 본 연구의 목적은 무게가 가볍고 수직철제벽면에서의 효과적인 이동과 탈착이 가능한 이동로봇용 하이브리드 자석 바퀴를 개발하는 것이다. 영구자석과 전자석을 함께 활용하여 기존의 유도핀 타입의 자석바퀴의 단점을 극복하여 일정한 부착력을 제공하고 탈착을 용이하게 할 수 있는 방법을 제시한다.

2. 하이브리드자석 바퀴

Fig. 3은 하이브리드자석 바퀴의 구조와 작동원리를 보여준다. 한 쌍의 디스크휠과 디스크휠 사이의 구동축(철심), 영구자석, 전자석(Coil)으로 이루어진다. 작업 시에는 바퀴 내의 영구자석은 부착 대상물인 철판 등의 자성체 벽면과 페루프의 자속을 구성하여 부착력을 발생시킨다(Fig. 3(a)). 탈착시에는 전자석의 자속 방향이 영구자석의 자기장 방향과 반대방향으로 형성되도록 전자석에

전류를 인가시키고, 바퀴에서 부착물로 흐르는 자속은 서로 상쇄되어 부착력이 감소된다(Fig. 3(b)).

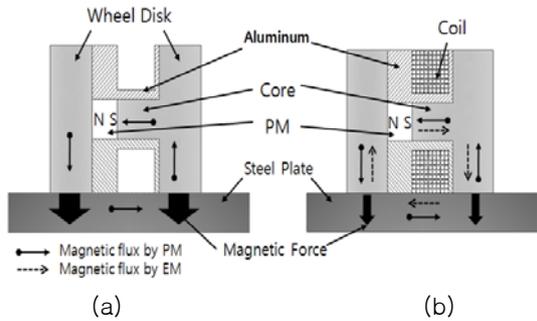


Fig. 3 Structure and operation principle of hybrid magnet wheel (a)attaching mechanism (b)detaching mechanism using inducing pins

제안된 하이브리드자석 바퀴는 기존의 유도핀 타입의 자석바퀴에 비해 몇 가지 장점을 가지고 있다. 첫째, 탈착을 위한 유도핀용 홀이 없기 때문에 자석바퀴의 회전에 따라 부착력의 변화가 없고 일정한 부착력을 형성할 수 있다. 둘째, 작업 후 전자석의 연결단자에 전기를 공급하면 자석바퀴를 작업 부착면에서 쉽게 탈착을 할 수 있어서, 기존의 유도핀 타입의 자석 바퀴처럼 작업 후 유도핀 제거의 어려움이 없다.

3. 유한요소법을 이용한 시뮬레이션

제안된 하이브리드자석 바퀴의 성능을 규명하기 위하여 자기 해석을 위한 상용 프로그램인 "MAXWELL"을 활용하여 유한요소 해석을 수행하였다. 기존의 4개짜리 유도핀 타입의 자석바퀴와의 비교분석을 위하여 유도핀 타입의 자석바퀴와 하이브리드자석 바퀴를 각각 모델링 하였다. 두 개 모델의 휠디스크의 크기와 영구자석의 크기는 동일하여, 다만 유도핀 타입 자석바퀴의 휠디스크에는 유도핀용 홀이 존재한다. Fig. 4는 각각의 모델의 치수를 보여준다. 휠디스크 및 구동축에는 1010 탄소강의 비선형 B-H 특성이 주어졌고, 영구자석의 경우에는 NdFeB35의 특성이 주어졌다.

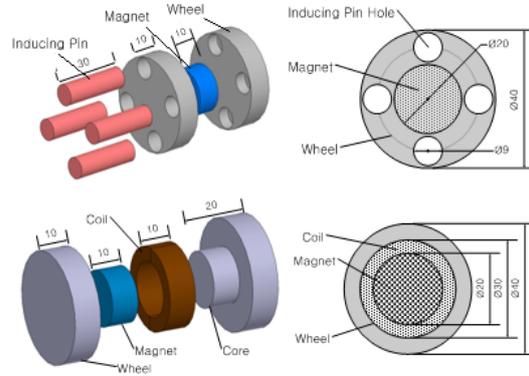


Fig. 4 FE model Specification

Table 1은 NdFeB35 자석의 자기적 특성을 나타내고, Fig. 5는 1010 탄소강의 B-H 곡선을 보여준다.

Table 1 Magnetic properties of NdFeB35

Relative Permeability(μ)	1.099
Residual Induction(Br)	1.23(T)
Coercivity(Hc)	-890000 (A/m)

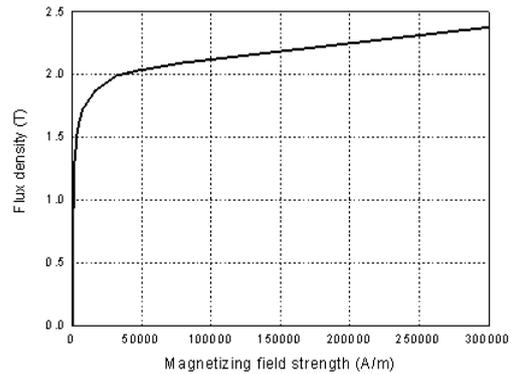


Fig. 5 Initial magnetization curves of 1010 steel

유도핀 타입의 자석바퀴의 경우에는 유도핀을 삽입 하지 않았을 경우와 4개의 유도핀을 삽입 했을 경우에 각각 부착력을 계산하였고, 하이브리드

자석바퀴의 경우에는 전자석에 인가된 전류와 부착력과의 관계를 조사하기 위해 전자석에 0(A)부터 2500(A/T)까지 100(A/T)씩 증가시키면서 유한요소해석을 하였다. 즉, 전자석이 100(turn)의 코일로 구성되어 있다면 1(A)씩 전류를 증가시켰다. Table 2는 유도핀 타입의 유도핀 삽입에 따른 부착력의 변화를 보여준다. 229.43(N) 정도의 부착력을 형성하고, 유도핀을 삽입했을 경우에는 23.93(N)으로 약 90% 정도 감소한다.

Table 2 Magnetic force of inducing pin type of magnet wheel

	With pins	Without pins	Ratio
Force(N)	23.93	229.43	10.4%

Fig. 6은 하이브리드 자석바퀴의 전자석에 가해진 (A/T)에 따른 부착력의 변화를 보여주고 있다. 전자석에 전류가 인가되지 않았을 경우 237(N)의 부착력을 형성하고 100(A/T)당 5.44(N) 가량의 부착력이 감소되고 있다. 자석바퀴의 탈착을 위해 필요한 목표치 50(N) 이하의 부착력을 얻기 위한 소요 전류값을 보여주고 있다. 또한, Fig. 7은 전자석에 전류가 인가되지 않았을 때와 1000(A/T)의 전류가 인가되었을 때 바퀴에서 철판으로 흐르는 자속의 변화를 보여준다. 전자석에 전류가 가해졌을 때 자속이 감소됨을 알 수 있다.

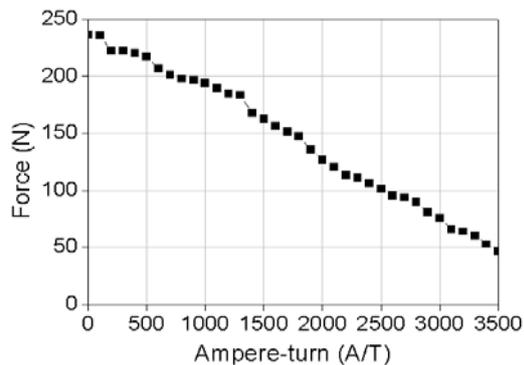


Fig. 6 Magnetic attaching force according to current applied to electromagnet of hybrid magnet wheel

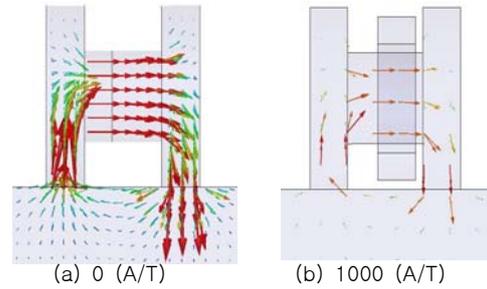


Fig. 7 Plot of magnetic flux according to current applied to electromagnet of hybrid magnet wheel

Fig. 8은 자석바퀴가 회전함에 따라 부착력의 변화를 보여준다. 유도핀 타입의 자석바퀴의 경우 회전에 따른 유도핀용 홀의 위치변화에 따라 부착력이 최소 70(N)에서 최대 230(N)까지 변화되는 반면, 하이브리드 자석바퀴의 경우 회전에 관계없이 237(N)정도의 일정한 부착력을 형성한다.

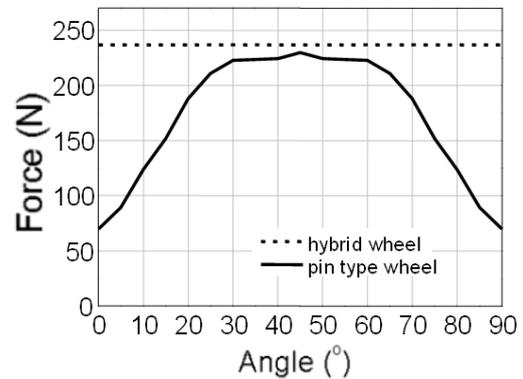


Fig. 8 Magnetic attaching force according to rotation of wheel

4. 결론

이 논문에서는 로봇의 수직 이동을 위한 하이브리드 자석바퀴를 소개하였다. 기존의 유도핀 타입 자석바퀴의 단점을 보완하기 위하여 영구자석과 전자석을 동시에 적용하였다. 새로 제안된 하이브리드 자석 바퀴는 기존의 문제점 이었던 작업 후

유도핀 제거를 고려하지 않아도 되며 동일한 사이즈의 경우에 자석과 구리로된 코일의 무게를 고려할 때 전체적인 무게를 줄이는 장점이 있다. 유한요소 해석을 통해 하이브리드 자석바퀴의 경우 전자석에 의해 부착력이 효과적으로 감소되고, 바퀴 회전에 상관없이 일정한 부착력을 얻을 수 있음을 검증하였으며 또한, 탈착을 위한 부착력 목표치 이하의 힘이 얻어짐을 보였다. 따라서 실제 벽면이동 로봇에 적용될 수 있는 가능성을 보였다.

참 고 문 헌

- Bahr, B., Li, Y. and Najafi, M., 1996, "Design and Suction CPU Analysis of a Wall Climbing Robot," Computer Elect. Eng., Vol. 22, No. 3, pp. 193-209.
- Han, S.C. Lee, H.C. and Lee, J., 2002, "A Study on a Detachment of a Permanent Magnet Wheel for a Wall-Climbing Mobile Robot using Magnetic Inducement," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 19, No. 1, pp. 143-149.
- Lee, J., Choi, Y. and Kim, J., 1996, "Positioning of a Mobile Robot for Reactor Vessel Inspection," The Fourth International Conference on Control. Automation, Robotics and Vision, Vol. 2, pp. 878-882.
- Luk, B.L., Collie, A.A. and Billingsley, J., 1991, "ROBUG II: An Intelligent Wall Climbing Robot," Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 3, pp. 2342-2347.
- Luk, B.L., Collie, A.A. and White, T., 1993, "Nero: A Teleoperated Wall-climbing Vehicle for Inspection of Nuclear Reactor Pressure Vessel," Proceedings of the 13th ASME International Computers in Engineering Conference and Exposition, San Diego, USA.
- Ryu S.W., Lee J.C., Kim H.G. and Kim S.H., 2006, "Development of a Wall-climbing Welding Robot for Draft Mark on the Curved Surface," Special Issue of the Society of Naval Architects of Korea, pp. 112-121.



< 한 승 철 > < 이 재 용 > < 김 진 호 >