

영구 자석 바퀴를 이용한 벽면 이동 로봇의 설계시의 설계지침

이화초(영남대 기계공학부), 김은찬(삼성전자), 한승철*(영남대 대학원 기계공학과)

Guideline for the Design of Wall-Climbing Mobile Robot Using Permanent Magnetic Wheels

Hwa-cho Yi(Yeungnam Univ.), Eun-chan Kim(Samsung Electronics),
Seung-chul Han*(Graduate School in Yeungnam Univ.)

ABSTRACT

Most tasks of the large vertical or ceiling structures have been carried out by human power. Those tasks require us much operation costs and times, safety devices, etc. So the need of automation for those tasks have been rising. That automation needs a wall-climbing mobile vehicle. Most former researches are things about attachment devices and moving mechanisms. A wall-climbing mobile vehicle must be designed by a method different from the case of the vehicle of the horizontal environment. That is because gravity acts as a negative role on the stability of a wall-climbing vehicle. In this thesis, the particular shape characteristics of a wall-climbing mobile vehicle are derived by the wall-environment modeling. In addition, some design constraints of the permanent magnetic wheel as an attachment device was studied. According to those requirements and constraints, one specific wall-climbing mobile vehicle was designed and some experiments were made on the attachment ability of that vehicle.

Key Words : Permanent magnet (영구자석), Gauss meter (자력측정기), Magnetic field (자력선), Attachable (부착), Detachable (탈착), Wall-Climbing mobile robot (벽면이동로봇)

1. 서론

산업발달과 더불어 구조물들은 대형화되어가고, 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 자동화 요구는 갈수록 증대되고 있는데, 이를 위해서는 벽면을 이동할 수 있는 이동체의 개발이 필요하다.

벽면 이동체의 경우 평면 이동체와는 달리 중력의 영향이 이동체의 안정에 부정적인 작용을 한다. 또한 벽면 이동체 설계에 있어서 이동체의 부착장치는 일종의 설계 제약사항으로 작용한다. 그러므로 이동체의 설계는 이러한 중력의 영향을 최소화하고 부착 장치에 대한 최적의 형태를 얻어내는 방향으로 나가야만 한다. 아울러 벽면 특성과 벽면에 이동체가 위치했을 경우의 현상, 부착 장치를 사용했을 경우의 제약 등을 고려한 설계기법이 필요하다.

대부분의 벽면 이동 로봇에 연구는 강한 부착 장

치의 개발^{1,2,3,4}이나 효과적인 이동 기구를 설계하는 방식으로 진행되어 왔다.^{1,2,3,4,5,6,7} 또한 벽면 이동 로봇의 효율성에 대한 연구로, Nagakubo⁴등은 4지관,절형 로봇이 어떠한 자세를 취할 경우 하중을 가장 효율적으로 이용할 수 있는지 연구했으며, 이러한 로봇의 적절한 자세 제어법을 제시하였다. 또한 Arikawa⁵등은 4지 관절형 로봇의 경우 구동 장치가 상당한 무게를 차지하므로, 그 용량을 줄이기 위해 구동 장치를 가장 효율적으로 이용하는 구동 방법에 대한 연구를 하였다.

본 논문에서는 벽면 이동체의 외형적인 특징을 벽면 모델링을 통해서 고찰하고, 부착 장치의 효율을 높이는 적절한 로봇 형태에 대한 특성을 파악하고, 부착 장치로서 영구 자석 바퀴를 사용할 경우의 제약 사항들을 고려하여 이동체의 설계방안에 대하여 고찰하였다.

2. 벽면 특성 및 제약 사항

2.1 벽면 모델링

벽면 작업 환경이 수평면과 가장 다른 차이점은 중력의 영향이다. 수평면의 경우는 중력의 영향이 이동체의 안정에 긍정적인 반면 벽면의 경우는 부정적으로 작용하기 때문에 벽면 이동체 개발에 있어서는 중력의 영향을 최소화하는 것이 중요하다.

이동체가 작업하게 될 벽면은 크게 나누어 3가지 형태로 구분할 수 있고, Fig. 1~Fig. 3에서 중력의 영향을 보여주고 있다. 이동체는 이 3가지의 경우에 대해서 모두 안정된 자세를 유지할 수 있어야만 한다. 그러므로 각 경우에 대해서 이동체에 작용하게 되는 힘을 살펴봄으로써 이동체의 안정성에 대해서 살펴보았다.

Fig. 1은 경사각(θ)이 90° 이하인 경사면 위의 이동체에 작용하는 힘들을 나타낸다. 경사면 또는 벽면에 위치한 물체에 작용하는 힘은 크게 부착력(F), 하중(W), 반력(N), 마찰력(f)으로 나눌 수 있다. Fig. 1의 경우, 물체가 경사면에서 안정되거나 위로 이동할 수 있기 위해서는 x 방향과 y 방향의 힘들의 합이 음이 되어야 한다. Fig. 1의 경우 y 방향은 힘의 합이 음의 값을 가지므로 문제없이 안정되며, x 방향의 힘들의 합은 식 (1)의 좌변과 같고 이 값은 0보다 작거나 같아야 한다.

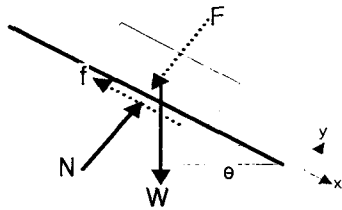


Fig. 1 Forces on the inclined plane ($\theta < 90^\circ$)

$$\sum F_x = W \cos \theta - \mu F \leq 0 \quad (1)$$

여기서 μ 는 물체와 면 사이의 마찰계수이다. 두 번째 경우는 θ 가 90° 보다 큰 경우이며 Fig. 2와 같다.

Fig. 2의 경우 물체가 벽면에서 안정되기 위해서는 y 방향의 힘이 중요하다. y 방향의 힘들의 합이 0보다 크거나 같아야 면에서 이탈하지 않는다. y 방향의 힘들의 합은 식 (2)와 같다.

$$\sum F_y = F(\mu \sin \theta - \cos \theta) - W \geq 0 \quad (2)$$

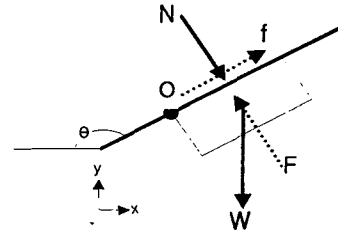


Fig. 2 Forces on the inclined plane ($\theta > 90^\circ$)

세 번째 경우는 수직면에 부착된 경우이다. 운동 방정식을 세워보면 식(3)과 같으며, Fig. 2에서 θ 가 90° 일 경우와 동일하다.

$$\sum F_y = f - W = \mu F - W \geq 0 \quad (3)$$

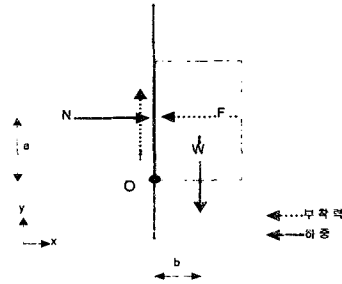


Fig. 3 Forces on the vertical wall

각 경우를 살펴보면, Fig. 3의 경우는 Fig. 2로 한꺼번에 표현 가능하므로, Fig. 1과 Fig. 2의 경우만 고려해 보자. 설계적인 측면에서 보면 식들의 변수 중 변경 가능한 것들은 F , W 의 값이다. 이 값들을 특정 값으로 취했을 경우 위의 식들을 만족하면 그때의 F , W 의 값은 유효하다고 할 수 있다. 식 (1)의 경우는 직관적으로 식 (2)의 경우보다 만족하기 쉽다는 것을 알 수 있다. 하지만 식 (2)에서의 $(\mu \sin \theta - \cos \theta)$ 의 값은 직관적으로 알기 어려우므로 그 값을 3차원 그래프로 그려보는 것이 유효하다.

Fig. 4는 μ 를 0.1에서 0.9까지, θ 를 90° 에서 180° 까지 변화시키면서 $(\mu \sin \theta - \cos \theta)$ 의 값의 변화를 그린 것이다. 이때 얻어진 각 값들을 살펴보면 각 μ 에 대해서 θ 가 90° 일 경우가 가장 적은 값을 보인다. 즉, 90° 일 경우가 가장 만족시키기 어렵다는 것을 알 수 있다. 식 (3)을 분석하고 그 상황을 만족하도록 이동체를 설계할 경우 모든 경사면 및 벽면에 대해서 안정될 수 있다.

앞에서 고려한 수직 방향의 힘과 더불어 고려해야 하는 것은 모멘트의 영향이다. Fig. 2와 Fig. 3의 경

우를 제외하고는 모멘트에 의한 회전의 영향은 부착과 안정에 긍정적이기 때문에 고려하지 않는다.

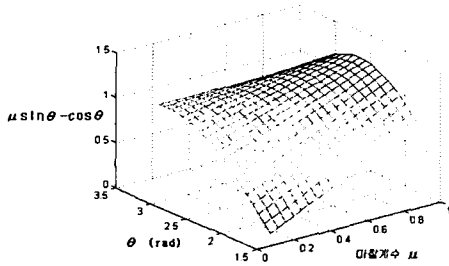


Fig. 4 Coefficients change by θ and μ on the inclined plane ($\theta > 90^\circ$)

Fig. 2와 Fig. 3의 경우 회전 중심점을 각 그림에 대해서 O로 잡을 수 있다. 두 그림에 대한 모멘트의 영향은 식 하나로 세울 수 있는데 식 (4)와 같다. 이때 θ 는 Fig. 2를 참고하고 a, b는 Fig. 3을 참고한다.

$$\sum M_o = aF - W\sqrt{a^2 + b^2} \times \cos(\pi - \theta - \tan^{-1}(\frac{b}{a})) \geq 0 \quad (4)$$

앞에서 얻어진 식 (4)과 더불어 두 식을 통해서 기능적인 요구 조건과 더불어 벽면 이동체가 벽면에서 안정된 자세를 효과적으로 취하기 위해서 요구되는 외형적인 특징을 얻을 수 있다.

2.2 부착 장치의 배치에 대한 제약

로봇이 벽면에서 다양한 작업을 수행하기 위해서는 이동에 있어서 어느 정도 이상의 자율성을 가져야 한다. 하지만 벽면에서 이동체가 향하는 방향에 따라 이동체의 안정성 여부가 달라진다면 이동체는 안정된 방향을 취하기 위해서 일정 영역을 향하는 범위에서만 작업을 해야하므로 자율성이 급격히 떨어져 문제가 된다. 이러한 면에서 이동체가 가능한 모든 방향에서 비슷한 부착력을 발생시키도록 부착 장치들을 배치하는 것이 바람직하다.

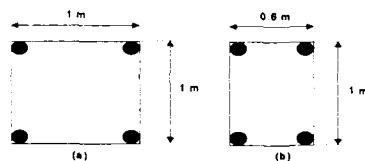


Fig. 5 Attaching arrange for moment calculation

(a) All constraints are contentment

(b) Random period between the attaching distances

Fig. 5는 부착 방향에 따른 부착 모멘트가 어떻게

작용하는지 알아보기 위해서 고려한 두 가지 이동체와 부착 장치의 배치 형태이다. (a)의 경우는 앞에서 도출한 로봇의 외형적인 특징을 고려하여 부착 장치를 원주상에 등간격으로 배치한 경우이고 (b)의 경우는 부착 장치간의 거리를 고려하지 않고 단지 원주상에만 부착 장치를 배치한 경우이다. 두 가지 경우에 대해서 각 장치의 부착력 $F = 1N$ 으로 두고 부착 각도를 0° 에서 90° 까지 변화시킬 경우 각 경우의 부착 모멘트(식 (4)에서 aF 에 해당)를 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다

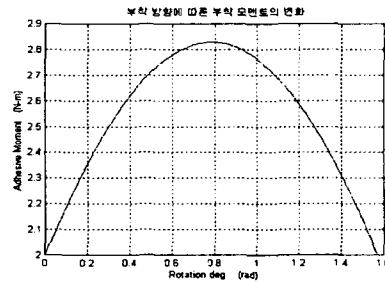


Fig. 6 All constraints are contentment

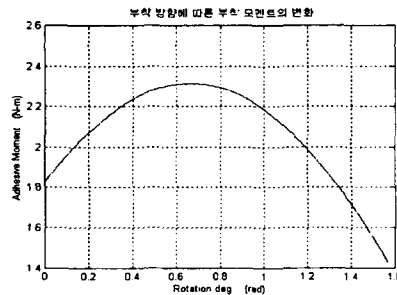


Fig. 7 Random period between the attaching distances

Fig. 6, 7에서 보듯이 각 경우는 부착 모멘트에서 상당한 차이를 보이고 있다. 두 가지 면에서 다른 것이 보이는데 첫째는 최대값이 다르다는 것이고 둘째는 최소값이 다르다는 것이다. 최대값은 부착 장치가 배치되는 원의 지름의 크기에 의존하며 최소값은 인근 부착 장치간의 거리 때문에 발생한다. 간격이 일정하지 않은 경우는 부착 모멘트의 최소값이 일정한 경우보다 현저히 떨어진다. 이동체가 향하는 모든 각도에 대해서 어느 수준 이상의 안정도를 획득하기 위해서는 이 최소값이 원하는 안정도를 얻기 위한 부착 모멘트를 상회해야만 한다. 간격이 일정한 경우는 그 최소값이 클 뿐만 아니라 0° 에서의 값

과 90°에서의 값이 같은 결과를 보인다. 이러한 결과가 의미하는 바는 원주에 무한개 또는 연속된 부착 장치를 배치할 수 있다면 모든 방향에 대해서 항상 일정한 부착 모멘트를 발생시킬 수 있다는 것을 의미한다.

2.3 벽면의 곡률에 의한 제약

가장 이상적인 벽면 작업 환경은 곡률이 없는 완전 평면일 경우이다. 하지만 대부분 평면의 양상을 보이는 하지만 어느 정도 곡률을 가지고 있다. 이러한 작업 환경에서 이동체가 견고한 부착력을 확보하기 위해서는 곡면에 대해 부착 장치가 유연하게 적응할 수 있어야 한다. 이러한 적응성은 부착 장치를 적절하게 설계함으로써 획득할 수 있으며 곡면에 이동체가 접한 경우는 크게 두가지 측면에서 살펴볼 수 있다. Fig. 8은 곡률의 중심이 벽면의 안쪽에 위치한 경우(이하 볼록면)이고 Fig. 9는 곡률의 중심이 벽면의 바깥쪽에 위치한 경우(이하 오목면)이다.

본 연구의 부착장치인 자석 바퀴는 그 특성상 접합면과 바퀴가 수직의 자세를 취하는 것이 가장 부착력이 높다. 그러므로 가능한 그 상태를 유지시켜 줄 필요가 있는데 그러기 위해서는 바퀴가 이동체 몸통에 대해 자유도를 지니고 있어야 한다. 이동체의 폭 방향(Fig. 8, 9 참조)에 대한 자유도와 길이 방향에 대한 자유도를 지니면 구 표면과 같은 벽면에 완전히 적응할 수 있다. 자유도를 주기 위한 방법으로는 조인트 구조를 삽입하는 것이 가장 용이하다. 그러므로 여기서도 조인트를 이용하여 바퀴에 자유도를 부과한다. Fig. 8과 Fig. 9에서는 폭 방향 자유도를 보이고 있다.

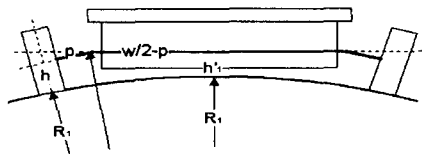


Fig. 8 The center of curvature inside the surface (convex surface)

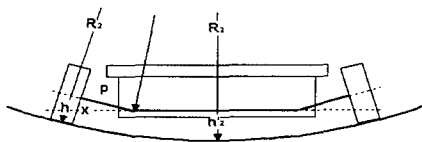


Fig. 9 The center of curvature outside the surface (concave surface)

적용하고자 하는 곡률 반경에 대한 바퀴축의 회전 범위를 계산하기 전에 Fig. 8과 Fig. 9에서 사용된

기호를 설명하면 다음과 같다.

- R1 - 볼록면의 임계 곡률 반경
- R2 - 오목면의 임계 곡률 반경
- θ1 - 볼록면에서 임계 회전각
- θ2 - 오목면에서 임계 회전각
- h1 - 볼록면에서 몸통축까지 수직 높이
- h2 - 오목면에서 몸통축까지 수직 높이
- p - 바퀴축 회전 중심에서 바퀴중심까지 거리
- w - 축이 회전하지 않았을 경우 바퀴간의 거리
- h - 바퀴 반경

Fig. 8에서 곡률 중심에서 바퀴축 회전 중심까지의 거리는 식 (5)의 각 변으로 표현된다.

$$\sqrt{(R_1 + h_1)^2 + \left(\frac{w}{2} - p\right)^2} = \sqrt{(R_1 + h)^2 + p^2} \quad (5)$$

이 식을 정리하면 식 (6)과 같이 되며 이것은 h1에 대한 2차 방정식이 된다.

$$h_1^2 + 2R_1 h_1 - (h^2 + 2R_1 h + wp - \frac{w^2}{4}) = 0 \quad (6)$$

이 방정식을 풀어서 얻어진 값을 다시 식 (7)에 대입하면 볼록면에 대한 임계 회전 각도를 얻을 수 있다. 이 얻어진 각도는 설계에 이용된다.

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{p}{R_1 + h}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{w - 2p}{2(R_1 + h_1)}\right) \quad (7)$$

Fig. 9의 경우도 거의 흡사한 식으로 오목면에서의 임계 회전 각도를 얻을 수 있으며 식 (8), (9), (10)로 나타난다.

$$\sqrt{(R_2 - h)^2 + p^2} = \sqrt{(R_2 - h_2)^2 + \left(\frac{w}{2} - p\right)^2} \quad (8)$$

$$h_2^2 - 2R_2 h_2 = h^2 - 2R_2 h + wp - \frac{w^2}{4} \quad (9)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{p}{R_2 - h}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{w - 2p}{2(R_2 - h_2)}\right) \quad (10)$$

여기서 얻어진 식들을 이용해서 실제 바퀴축의 회전 각도를 설정하고 설계에 참고한다.

3. 자석 바퀴에 의한 제약 사항

3.1 바퀴의 구조와 부착력

자석 바퀴의 구조와 자력에 의해 강한 부착력이 생성되는 원리를 보면, Fig. 10과 같이 자석의 양극에 자성체로 만들어진 판을 부착할 경우 자력은 편

향되어 바퀴의 외곽으로 집중되는 경향을 보이게 된다. 이렇게 집중된 자력은 바퀴의 폭 방향으로 바퀴를 통과하는 철심(Fig. 11)을 이용해서 다시 차단시킬 수 있는데 철심이 양쪽 바퀴를 연결시킬 경우 자력이 철심을 통해서 흘러 버리기 때문에 바퀴 외곽의 자력은 현저히 감소하고 그에 따라 철제 벽면으로부터 분리가 용이해진다. [8]

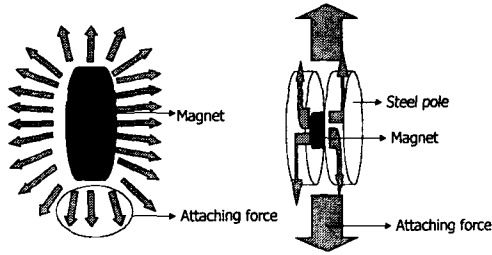


Fig. 10 Enforcement of Magnetic Attaching Force

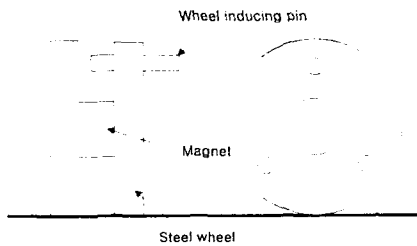


Fig. 11 The structure of magnetic wheel

3.2 자석 바퀴에 의한 제약 조건

3.2.1 수직 부착력과 모멘트에 대한 부착력

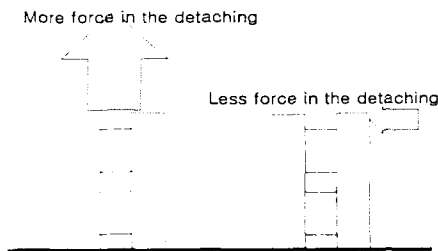


Fig. 12 Comparison of force for detaching

Fig. 12에서 보는 바와 같이 자석 바퀴를 분리시킴에 있어서 면과 수직 방향으로 작용하는 분리력에 대해서 견디는 부착력은 강하다. 하지만 면과 평행하여 작용하는 힘에 대해서는 상당히 취약한데 그 이유는 모멘트 때문이다. 그러므로 이동체의 설계시 바퀴에 모멘트가 적게 발생하도록 각종 주변 장치와

바퀴를 설계 및 부착해야 할 것이다.

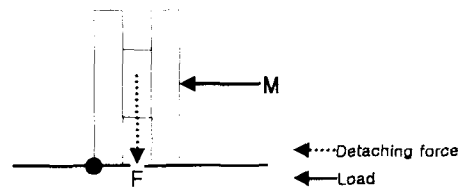


Fig. 13 Source force of moment

Fig. 13에서 보이듯이 부착력과 축력은 회전점에 대해서 항상 반대의 모멘트를 발생시킨다. 바퀴의 경우 M 의 작용점이 일정하기 때문에 M 의 영향은 변경시킬 수 없다. 하지만 반대로 F 에 의해 얻을 수 있는 부착 모멘트를 크게 함으로써 M 의 영향을 상대적으로 줄일 수 있는데, 그 방법은 바퀴의 두께를 두 겹께 만드는 것으로, 회전 중심에서부터의 거리가 멀어져 부착 모멘트의 값이 커지게 된다.

3.2.2 작업면의 거칠기 및 작은 곡률 반경

작업표면의 거칠기가 자석 바퀴에 끼치는 영향을 살펴보면, 자석 바퀴는 Fig. 14에 보는 것처럼 면에 수직 방향으로 자력을 발생시키고 있다 이 자력은 바퀴 중심을 기준으로 양쪽이 대칭하고 있기 때문에 곡률이 크거나 매끄러운 면을 이동할 경우는 자력 자체가 바퀴의 회전에 영향을 주지 않는다. 왜냐하면 이 경우 바퀴는 항상 면에 대해서 단일 선접촉을 이루는 상태가 되고 그 접합선에 대해서 자력은 항상 대칭을 이루기 때문이다. 하지만 바퀴가 특정 지점에서의 곡률이 바퀴의 반경보다 작은 울퉁불퉁한 면을 이동할 경우는 양상이 매우 달라지는데 Fig. 14는 그것을 설명하고자 하는 것이다. 바퀴의 이동에 관련된 힘은 매끄러운 면의 경우 마찰력과 바퀴에 작용하는 토크가 되며 이때 마찰력은 이동을 발생시키는 근원이 된다. 하지만 거친 표면의 경우는 자력이 이동을 저해하는 영향을 발생시키는데 그 이유는 거친 면의 경우는 바퀴가 접합면에서 2지점 이상에서 접촉하게 되고 이동을 위해서는 접촉되어 있는 지점중 한 지점에서 분리되는 과정이 반드시 필요하다. 이것은 바퀴의 수직 방향으로 작용하는 강한 부착력을 극복해야 한다는 것을 의미한다. 또한 울퉁불퉁한 면에서 바퀴가 이동할 경우 바퀴와 장애물의 접촉 지점에서 회전이 발생하는데 이때 자력은 회전하고자하는 방향과 반대방향의 모멘트를 발생시킴으로써 이동을 저해한다. 즉, 강한 부착력은 표면이 울퉁불퉁한 면을 이동하는 이동체의 경우는 오히려 방해요소로 작용한다. 그러므로 거친 작업면에서는 바퀴에 강한 회전력을 주어야 하며, 고용량의 구동 장치를 사용해야 한다.

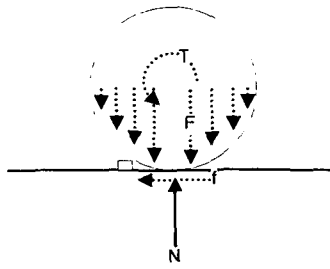


Fig. 14 Force by wheel rotation

4. 분석 결과에 의한 설계지침

4.1 벽면 작업 환경을 고려한 설계지침

(1) 이동체가 가장 불안정한 작업환경은 수직면이며 식 (2), (3) 를 만족시켜야만 안정된 자세를 얻을 수 있다.

(2) 이동체의 외형에서 a/b 의 값을 가능한 크게 만들어야 한다(Fig. 4 참고). 그러기 위해서는 부착 장치간의 거리는 가능한 멀리하고 이동체의 무게 중심은 가능한 낮게 만들어야 한다.

(3) n 개의 부착 장치를 가질 경우 각 부착 장치를 정 n 각형의 꼭 지점에 위치시키는 것이 바람직하다.

(4) 벽면 곡률에 적용하기 위한 방법이 요구되며 부착 장치가 가장 효율적으로 면에 접합 수 있도록 해야 한다.

4.2 자석 바퀴를 고려한 설계지침

(1) 바퀴의 측면에서 작용하는 힘에 의한 모멘트에 취약하므로 설계시 바퀴를 두껍게 설계하여 부착 모멘트를 크게 한다.

(2) 작은 곡률 반경을 가지는 작업면에서는 자력이 바퀴의 이동을 방해하므로 고용량의 구동장치를 사용해야 한다.

(3) 자력 확산은 바퀴의 부착력을 약화시키므로 이동체의 다른 부위는 비자성체로 제작하는 것이 바람직하다.

5. 결론

대형 구조물의 경사면 및 수직면에서 작업하는 벽면 이동 로봇의 개발에서 있어서 벽면 이동체가 평면 이동체와는 다른 어떠한 외형적인 특징을 지녀야만 하는가에 대한 것을 벽면 모델링을 통해서 도출하였으며, 벽면 이동 로봇 설계에 있어서 기본적인 지침을 제시하였다.

중력의 방향이 다르기 때문에 벽면 이동 로봇은 평면 이동체와는 외형적으로 차별화된 형상을 지녀야만 한다. 더불어 이동체를 벽면에 부착시키기 위한 부착 장치를 이동체에 배치하는 문제에 있어서

가장 효율적이고 적절한 배치 형태를 제시하고 지침으로 삼게 하였다. 또한 특정 부착 장치인 영구 자석 바퀴를 사용할 경우에 대한 설계 지침도 서술하였다. 영구 자석 바퀴는 그 자력을 이용한다는 특성 때문에 기타 부착 장치와는 다른 특성을 보이며 이러한 특성을 구체적으로 이동체 설계에 적용하기 위한 내용들을 서술하였다.

하지만 특정 작업에 벽면 이동 로봇을 적용할 경우 그에 따른 설계 지침이 충분히 요구될 수 있으므로 작업이 선정된 후에는 다시 이동체를 작업에 적절한 형태로 변형시켜서 사용하여야 할 것이다. 또한 이동체는 자세에 따라서 부착력에서 차이를 보이므로 이동체가 벽면에서 작업시 특정 작업을 수행하기 위한 최적의 자세와 최적의 이동법에 대한 내용에 대한 연구도 가치가 있다고 생각된다.

참고문헌

1. B.L.Luk, A.A.Collie and J.Billingsley, "ROBUG II : AN INTELLIGENT WALL CLIMBING ROBOT," Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2342-2347, 1991.
2. L.Briones, P.Bustamante and M.A.Serna, "Wall-Climbing Robot for Inspection in Nuclear Power Plants," Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1409-1414, 1994.
3. L.Guo, K. Rogers and R.Kirkham, "A Climbing Robot with Continuous Motion," Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2495-2500, 1991.
4. A.Nagakubo and S.Hirose, "Walking and Running of the Quadruped Wall-Climbing Robot," Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1005-1012, 1994.
5. K.Arikawa and S.Hirose, "Study of Walking Robot for 3 Dimensional Terrain," Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.703-708, May. 1995.
6. K.Ikeda and T.Nozaki, "Development of a Self-Contained Wall-Climbing Robot," Proceedings of Int. Symposium on Advanced Robot Technology, pp.365-372, 1991.
7. 최혁렬, 이정훈, "벽면이동 로봇 개발," 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, Vol.1, pp.3-6, 1999.
8. 한승철, 이화조 "자력선 유도를 이용한 벽면이동 로봇용 영구자석바퀴의 착탈에 관한 연구," 한국정밀공학회지 제 19권 제1호, 2002년 1월, pp. 143-149.