

# 유리창 청소 로봇의 이동 메커니즘 제안

## Proposal of Moving Mechanism of Window Cleaning Robot

이 동 혁<sup>1</sup>, 문 형 필<sup>1</sup>, 노 세 곤<sup>2</sup>, 황 달 연<sup>3</sup>, 유 원 필<sup>4</sup>, 최 혁 렬<sup>†</sup>

Lee Dong-Hyuk<sup>1</sup>, Moon Hyungpil<sup>1</sup>, Roh Se-Gon<sup>2</sup>, Hwang DalYeon<sup>3</sup>,  
Yu Wonpil<sup>4</sup>, Choi Hyouk Ryeol<sup>†</sup>

**Abstract** Recently researches on the window cleaning robot are being conducted actively. Moving mechanisms of these window cleaning robots are divided into two categories, which are towed type and walking type. Towed type is focused on fast cleaning on the flat surface of building and walking type has priority on cleaning task on relatively complex surface with overcoming obstacles. Currently commercialized towed type window cleaning robot has weakness that it is hard to adhere closely with the wall and easy to be affected by wind. In case of walking type it has the problem that the position errors are continuously accumulated during motion. In this paper, we propose new towed and walking type mechanism which can compensate previous weaknesses. After that we estimate the performance of each proposed mechanism by simulation.

**Keywords** : Window Cleaning Robot, Wall Cleaning Robot, Façadecleaning Robot, Cleaning Robot

### 1. 서론

최근 서비스 로봇의 일환으로 사람을 대신하여 건물 외벽을 청소하는 유리창 청소 로봇에 대한 연구가 활발해지고 있다. 건물의 벽면에 매달려 작업하는 유리창 청소로봇의 특성상 안전하고 원활한 이동을 위한 이동 메커니즘은 유리창 청소로봇의 설계에 중요한 요소가 되고 있다.

유리창 청소로봇의 이동 메커니즘은 크게 두 가지 종류로 나눌 수 있다. 로봇이 건물 상단에 위치한 크레인에 의해 견인되면서 이동하는 견인형<sup>[1-4]</sup>과 로봇의 자체적인 흡착 메커니즘을 이용해 벽면에 직접 부착해 이동하는 보행형<sup>[5-9]</sup>이 그것이다. 견인형 유리창 청소로봇은 평면으로 구성된 비교적 단순한 형태의 건물을 대상으로 하고 있으며 보행형 유리창 청소로봇은 장애물 극복을 위해 보행을 할 수 있는 다리와 유사한 메커니즘을 가지고 좀 더 복잡한

형태의 건물 벽면의 청소를 목표로 하고 있다.

일반적으로 견인형은 높은 안전성과 빠른 이동 속도를 갖는다는 장점이 있으나 바람의 영향을 받기 쉽고 로봇을 견인하기 위한 크레인 등의 외부 부수 장치가 많이 필요하다. 반면에 보행형은 외부 부수장치가 적고 이동 가능 영역이 넓으나 로봇 자체 구성이 복잡해지고 이동 속도가 느리다는 견인형과는 상반되는 특징을 갖고 있다.

대표적인 견인형 유리창 청소로봇은 미국 SkyPro사에서 개발한 SkyPro로써 현재 유일하게 실용화 되어 있는 대표적인 견인형 유리창 청소로봇이다. 보행형으로 대표적인 유리창 청소 로봇은 중국Beihang University에서 개발한 SkyCleaner<sup>[5-6]</sup>이다. SkyCleaner는 로봇의 다리에 부착된 흡착패드를 X, Y, Z축의 3방향으로 움직이면서 창틀을 극복하며 유리창의 표면을 보행하듯이 이동할 수 있다. 또한 발목 부분에 Passive 조인트를 추가하여 제한적으로 곡면 형태의 장애 요소를 극복할 수 있는 것이 특징이다.

SkyPro의 경우 메커니즘 구조상 벽면과 밀착이 어려워 균일한 청소가 어렵고 바람의 영향에 대응할 수 있는 방법이 없다는 단점이 있으며 SkyCleaner는 작업 평면상에서 X, Y축 2자유도 운동만을 허용하고 임의의 방향으로 방향

Received: Nov. 28, 2009; Reviewed: Dec. 23, 2009; Accepted: Jan. 22, 2010

※ 본 연구는 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 전략기술인력 양성사업으로 수행되었음

† 교신저자: 성균관대학교 기계공학부 교수 (hrchoi@me.skku.ac.kr)

<sup>1</sup> 성균관대학교 기계공학부 (dhlee@me.skku.ac.kr, hyungpil@me.skku.ac.kr)

<sup>2</sup> 동경공업대학교 기계우주학과 (romeorsg@hitel.net)

<sup>3</sup> 한국산업기술대학교 기계설계공학과 (dyhwang@kpu.ac.kr)

<sup>4</sup> 한국전자통신연구원 로봇시스템연구팀 (ywp@etri.re.kr)

전환이 불가능해 이동 방향에 오차가 누적되어도 보정이 불가능하다는 단점을 갖고 있다. 본 논문에서는 SkyPro와 SkyCleaner로 대표되는 기존의 견인형 및 보행형 유리창 청소로봇의 단점을 보완한 새로운 견인형 및 보행형 이동 메커니즘을 제안한 후 각각의 이동 메커니즘에 대해 시뮬레이션을 통해 성능을 평가하고 결과를 고찰하였다.

## 2. 이동 메커니즘 제시

### 2.1 견인형 1

주로 창틀형 장애요소만을 갖고 있는 평면형태의 빌딩은 로봇의 이동에 대한 제약이 적고 청소작업이 수행되어야 할 지형이 단순하므로 크레인에 의해 견인되는 견인형 방식의 로봇이 적합하다. 견인형 유리창 청소 로봇은 항상 견인 케이블에 지지되어 있으므로 안정성이 뛰어나며 이동 메커니즘이 단순하여 빠르게 이동할 수 있다는 장점을 갖는다. 또한 로봇의 가로방향 길이와 청소속도가 비례하게 되어 단순히 로봇의 가로 길이를 길게 하는 것만으로 쉽게 사람보다 빠른 청소 속도를 얻을 수 있다. 그러나 기존의 견인형 방식 로봇은 벽면 부착능력이 미약해 균일한 청소 결과를 보장하기 어렵다는 단점이 있으며 바람에 취약하다는 것 또한 커다란 단점으로 지적되고 있다. 본 논문에서 제시하는 견인형 1 유리창 청소로봇을 그림 1에 나타내었다.

먼저로봇의 중앙에 외부 전원에 의해 구동되는 프로펠러를 설치하여 프로펠러 회전에 의한 추력으로 로봇을 유리창과 밀착시키고 이로써 청소와 안정적인 이동에 필요한 접착력을 얻을 수 있다. 이러한 프로펠러 방식은 기존에 연구되었던 진공 흡입에 의한 방식<sup>17-19)</sup>에 비해 압력 누출의 우려가 없고 단순한 구조가 가능하다는 장점을 갖는다.

로봇에 부착된 바퀴와 서스펜션 장치를 통해 창틀의 안정적인 극복을 가능하게 하며 여기에 서 사용된 바퀴는 추후에 설명될 측방향 바람에 대처할 수 있는 마찰력을 제공

하는 역할도 같이 한다. 바퀴를 제외하고 로봇과 벽면이 직접 닿는 부분은 스펀지와 같이 유연한 재질로 감싸 이동에 방해가 주지 않으면서 로봇 내부에서 청소작업 중 발생한 물방울이 옆의 벽면으로 튀는 것을 방지하도록 하였으며, 청소 자체는 로봇 내부 빈 공간에 설치된 원통형 브러시가 회전하며 외부로부터 공급되는 물을 이용하여 수행된다.

견인형의 유리창 청소로봇은 로봇 동체의 길이를 늘림으로써 그에 비례하는 청소속도를 얻을 수 있다는 장점을 갖는데 이를 극대화 하기 위해 로봇 자체를 그림 1과 같이 분리 합체가 가능한 모듈 식으로 설계하여 동일한 청소모듈을 이어 붙이는 것만으로 원하는 작업속도를 얻을 수 있도록 하였다. 이와 같이 모듈 개념을 적용함으로써 대형이나 중 소형 건물 모두에 같은 방식으로 접근할 수 있는 유리창 청소로봇의 제작이 가능하다.

견인형 유리창 청소로봇의 단점인 바람에 대한 취약성은 프로펠러와 바퀴의 조합으로 실용적인 수준에서 해결이 가능하다. 건물에 작용하는 바람은 건물의 수평 단면에 평행한 방향으로 부는 것이 일반적으로 이는 벽면에 대해 수직 및 수평 성분으로 분해가 가능하다. 먼저 벽면에 대해 수직 성분의 바람은 로봇의 동체를 작업 평면에 대해 수직인 방향으로 흔들어 벽면에 안정적으로 부착되는 것을 방해하고 청소에 필요한 고정된 지지점을 요동시킴으로써 고른 청소작업을 어렵게 한다. 이와 같은 수직성분 바람은 프로펠러의 추력 제어를 통하여 그 영향을 상쇄하는 것이 가능하다.

벽면으로부터 수평 방향으로 부는 바람의 경우 로봇 동체를 벽면상에서 미끄러지게 만들어 시스템의 안전을 저해하는 요소로 작용할 수 있다. 이러한 측방향 바람의 영향은 로봇동체의 측방향 투영면적을 최소화시켜 바람으로부터 받는 힘을 감소시킴과 동시에 로봇과 바퀴 사이의 정지 마찰력을 높여 로봇이 벽면에서 미끄러지지 않도록 함으로써 최소화 할 수 있다. 다음 장에서 제시되는 시뮬레이션을 통해 견인형 1 로봇의 이동 간 안정성 및 바람의 영향에 대한 안정성을 검증하였다.

### 2.2 보행형

창틀 외에도 곡면, 모서리 및 각종 부착물들이 혼합되어 구성되어 있는 복잡한 형태의 건축물의 경우 견인형 형태의 이동메커니즘 만으로는 작업에 필요한 이동성능을 얻을 수 없다. 따라서 이러한 경우 로봇의 이동에 방해가 되는 견인 케이블을 제거하고 흡착판이 붙어 있는 다리를 이용하여 벽면에 직접 부착되는 보행형 이동 메커니즘이 적절하다. 보행형 유리창 청소로봇의 경우 기존에 개발된

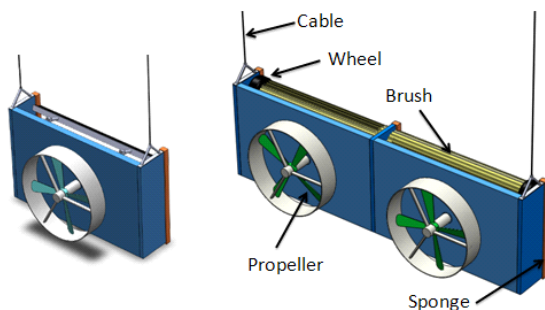


그림 1. 견인형 유리창 청소로봇 및 그 모듈화 개념

유리창 벽면 이동 로봇 Ninja<sup>[11-12]</sup> 시리즈와 같이 높은 자유도를 갖은 다리를 사용하였을 때 가장 우수한 이동 성능을 보일 것으로 예상되나 구조적 복잡함에 따른 실용화의 어려움 및 그에 동반되는 비용 상승을 고려하였을 때 실용적으로 사용하기에는 아직 적절치 않다고 판단된다.

본 논문에서 제시하는 보행형 로봇은 그림 2와 같이 메커니즘을 단순화하여 유리벽면 위에서 보행할 수 있는 형태의 로봇이다. 본 보행형 로봇은 다리와 몸체의 하단에 설치된 진공 흡착 패드를 번갈아 가며 사용하여 유리창 위에서 창틀을 극복하며 이동 할 수 있으며 몸체 하단의 빈 공간에 회전 브러쉬 및 물 분사 장치 등의 청소 장비를 설치하여 청소작업을 수행 할 수 있다. 또한 로봇 중앙에 설치된 회전 조인트에 의해 임의의 방향으로 방향 전환이 가능해 이동 중에 축적된 자세 오차를 보정할 수 있다.

견인형 로봇이 상시 견인 케이블에 매달려 있어 케이블과 벽면의 간섭이 생기는 영역에서는 이동에 제약이 있는 것과는 달리 보행형 로봇은 흡착 패드에 의해 자체적으로 벽면에 부착되기 때문에 평면 내에서는 이동이 자유롭다는 장점을 갖는다. 그러나 반면에 견인형에 비해 현저히 이동 속도가 느리다는 단점이 있으므로 일반적인 형태의 빌딩에서는 이들을 조합하여 사용하는 것이 합리적인 것으로 보인다.

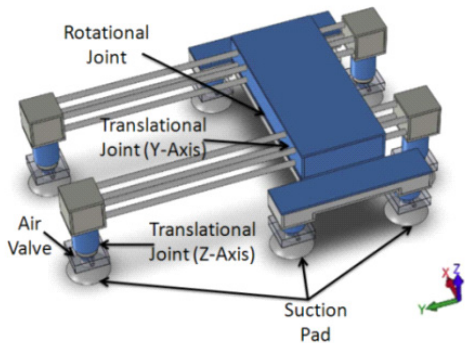


그림 2. 보행형 유리창 청소 로봇

### 2.3 견인형 2

주로 창틀형태의 단순한 장애요소만을 가지며 높이가 비교적 낮고 좌우로 긴 형태의 건물에서는 그림 3과 같은 형태의 견인형 청소 로봇을 사용할 수 있다. 일반적인 견인형에서 케이블을 감아 올리는 크레인이 빌딩 상단에 설치되는 것과 달리 건물 상단에는 도르래만 설치되고 크레인은 건물 하단에 설치하게 된다. 이러한 구조를 사용함으로써 얻을 수 있는 장점은 세 가지 이다. 첫째 로봇의 이동을 위한 크레인과 같이 무거운 이송장치를 건물 상단까지

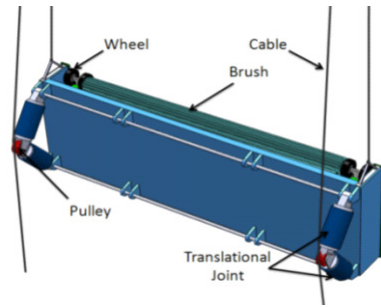


그림 3. 견인형 2 유리창 청소 로봇

옮길 필요가 없으며, 둘째 로봇 자체가 케이블에 의해 고정되어 있기 때문에 일반적인 견인형 청소 로봇과는 달리 바람에 의한 미끄러짐이나 로봇 자체의 진동, 케이블의 진동 등 안전성을 위협하는 요인에 대해 강한 특성을 갖는다는 것이다. 세 번째 장점은 부착력을 제공하기 위해 프로펠러 등 여분의 장치가 필요 없고 케이블 자체가 부착력을 제공하여 로봇과 벽면이 쉽게 밀착되도록 할 수 있는 점이다.

견인형 2 에서 케이블이 제공하는부착력은 그림 4에서 볼 수 있는 바 와 같이 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$F_c = 2mgsin\theta \tag{1}$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{x}{y}\right) \tag{2}$$

따라서 케이블이 제공하는부착력은 로봇의 질량과 각  $\theta$ 의 함수이다. 안정적인청소를 위해서는 로봇이 벽면을 이동하는 동안 동일한 접촉력을 유지해야 할 필요가 있다. 이를 위해 로봇의 이동 중에  $\theta$ 가 일정하게 유지되도록 빌딩 상하단에 설치된 도르래의 수평 위치와 로봇의 좌우에 부착된 병진조인트의 변위를 조절함으로써 작업 중에 부착력이 일정하게 유지되도록 하는 것이 가능하다. 다만 이러한 특수한 구조는 건물의 높이가 높아질 수록 적용하기

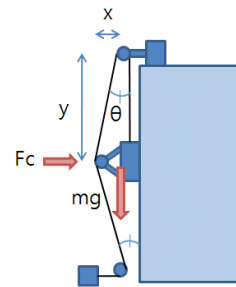


그림 4. 견인형2에 작용하는 힘

가 어려운데, 그 이유는 첫째로 같은 병진조인트 변위에서는 건물의 높이가 높아질수록 각  $\theta$ 가 작아지기 때문에 동일한 접촉력을 얻기 위해서 과도하게 큰 병진조인트 변위가 필요하게 된다는 것이다.

이러한 과도한 변위는 기계적으로 만족시키기 어렵다는 점이 견인형 2를 일반적인 고층 빌딩에 적용하기 어렵게 하는 주된 이유이다. 두 번째 이유는 전체 케이블의 길이가 길어질수록 케이블의 변형이나 진동 등 예측 및 제어하기 어려운 현상이 발생해 전체 시스템의 안전성을 해칠 수 있다는 점이다. 따라서 견인형 2와 같은 특수한 구조는 중층 이하의 빌딩에만 적용하는 것이 적절할 것으로 보이며 다음 장의 시뮬레이션을 통해 견인형 2의 이동 안정성 및 적용이 가능한 건물의 범위를 알아보았다.

### 3. 시뮬레이션

본 논문의 시뮬레이션을 위해 로봇의 강체 동역학 뿐 아니라 케이블의 변형을 고려하기 위해 변형체 해석이 동시에 가능한 Recurdyn V7 시뮬레이션 패키지를 사용하였다. 시뮬레이션에서 로봇의 각 부품은 실제 재료를 고려한 질량을 갖고 조인트에 의해 연결된 강체로 설정하였고 케이블은 2cm의 지름과 1m 당 0.7kg의 무게를 갖는 준 1차원 모델로 설정하였다.

#### 3.1 견인형 1

창틀형 장애물만을 갖고 있는 평면 형태의 빌딩에 적용할 수 있는 견인형 로봇은 그림 5와 같다. 로봇은 기본 모듈 2개를 연결한 형태로 가로 3m 세로 1m의 높이 50cm를 가지며 무게는 100kg이다. 시뮬레이션을 통해 로봇이 장애물을 극복하면서 이동할 때의 안정성과 바람의 영향에 대해 알아보았다. 청소 작업의 특성상 로봇이 하단 방향으로 움직일 때에만 벽면과 직접 밀착되어 청소를 수행하고 상단 방향으로 움직일 때에는 청소 없이 이동만 하게 된다. 직진 운동에 대한 시뮬레이션 결과 프로펠러로부터 발생한 추력에 의해 로봇이 벽면과 밀착되어 안정적인 이동이 가능한 것을 알 수 있었다. 창틀의 경우 개폐가 불가능한

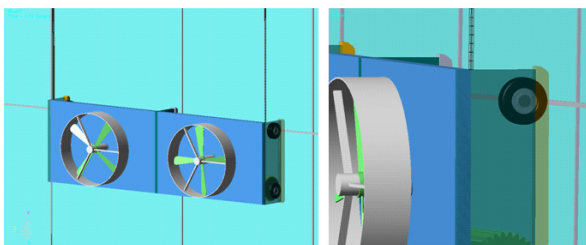


그림 5. 창틀 극복 시뮬레이션

유리창 창틀의 평균 높이인 3cm 및 개폐가 가능한 유리창 창틀의 평균 높이인 7cm를 무난히 극복하는 결과를 보여주었다.

견인형 로봇은 전술한 바와 같이 바람에 영향 받기 쉬운 구조로 로봇에 영향을 미치는 바람은 벽면에 대해 수직 성분과 수평성분으로 나누어 생각할 수 있다. 먼저 벽면에 수직인 방향으로 부는 바람은 로봇을 벽면에 대해 상하 방향으로 요동치게 할 수 있고 이러한 힘은 프로펠러의 속도 제어를 통해 상쇄하고자 한다. 바람에 의해 로봇에 작용하는 힘은 다음과 같다.

$$F_{wind} = \rho A V^2 \quad (3)$$

여기에서  $\rho$ 는 공기의 밀도로  $1.2\text{kg/m}^3$ ,  $A$ 는 로봇의 정방향 투영 면적으로 시뮬레이션에서는  $3\text{m}^2$ 의 값을 가지며  $V$ 는 바람의 벽면에 대한 수직방향성분을 나타낸다. 식 (3)에 의해 5%의 바람이 벽면에 수직방향으로 불 때 로봇에 가해지는 힘은 90N이 됨을 알 수 있다. 그림 6은 5%의 진폭을 갖는 사인과 형태의 바람이 벽면에 수직으로 불 때 바람에 의해 로봇에 가해지는 힘과 이에 대한 제어의 결과로써 프로펠러 추력의 변화를 보여준다. 프로펠러 추력이 바람에 의한 힘을 적절히 상쇄하여 이의 결과로써 벽면과 로봇 사이의 접촉력이 일정한 범위 내에서 유지되는 것을 알 수 있다.

한편 벽면에 수평 방향으로 부는 바람은 로봇을 기울게 만들어 시스템의 안정성을 저하시킬 수 있다. 이러한 경우 유리창과 바퀴 사이의 마찰력을 높여 바퀴의 측방향 슬립이 일어나지 않도록 해야 한다. 바퀴와 유리창 사이의 마찰력은 다음과 같다.

$$F_{friction} = \mu N \quad (3)$$

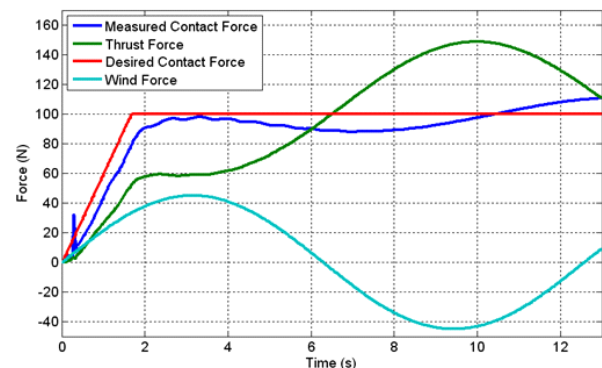


그림 6. 프로펠러 속도 제어 결과

여기에서 수직항력 N은 프로펠러의 추력과 같다. 측방향 바람에 의해 로봇에 작용하는 힘은 식(3)과 동일하다. 이 경우 A는 로봇의 측방향 투영 면적으로 시뮬레이션에서는 0.43m<sup>2</sup>의 값을 가지며 V는 바람의 수평방향 성분이다. 수식적으로 바람에 의해 측방향 슬립이 발생하지 않을 조건은 다음과 같다.

$$F_{friction} \geq F_{wind} \quad (5)$$

일반적으로 유리나 고무 사이의 정지 마찰 계수는 1 이상으로 크나 유리의 표면이 젖어있는 경우 급격히 낮아진다. 0.2의 정지 마찰 계수를 갖는 표면에서 벽면에 대해 수평방향 풍속과 프로펠러의 추력을 변화시켜가면서 바퀴와 벽면 사이에 측방향으로 슬립이 일어나는가를 관찰한 결과를 그림 7에 나타내었다.

시뮬레이션 결과 슬립이 일어나지 않으면 원으로 슬립이 일어난 경우는 별모양으로 표시하였다. 점선은 수식적으로 예측된 마찰력과 바람에 의한 힘이 같아지는 구간으로 점선의 위쪽은 슬립이 일어나지 않는 안전한 범위를 뜻한다. 그래프로부터 수식적으로 예측된 결과와 시뮬레이션 결과가 거의 일치함을 알 수 있다. 또한 수평 성분 5% 이하를 갖는 바람에서는 적절한 추력을 선택함으로써 슬립 없이 작업이 가능하다는 것을 알 수 있다.

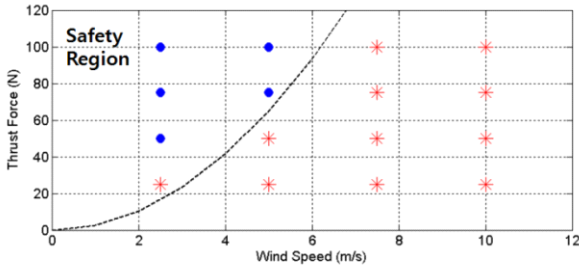


그림 7. 수평방향 바람에 대한 안전 영역

### 3.2 보행형

견인형 유리창 청소로봇은 하중이 견인케이블에 의해 지지되어 작업안정성이 높고 이동속도가 빠르나 견인케이블이 이동에 방해요소가 되어 이동성에 제한이 존재한다. 보행형 청소로봇은 견인케이블을 제거하고 자체하중을 지지하기 위한 부착장치를 내장하여 견인형에 비해 높은 이동성을 갖는다. 시뮬레이션에 사용된 보행형 로봇은 가로 0.7m, 세로 1.2m 및 높이 0.4m의 크기로 50kg의 무게를 갖는 것으로 설정하였다. 시뮬레이션을 통해 로봇의 보행 안정성을 알아보았다.

보행형 로봇은 앞의 그림 2와 같은 구조를 갖고 직진 및 방향 전환을 통해 평면 내에서 자유롭게 이동하며 청소 작업을 할 수 있다. 보행형 로봇의 방향전환 및 직진 패턴을 그림 8 그림 9에 나타내었다.

로봇은 진공패드 내부와 외부 사이의 압력차이에 의해 발생한 진공 압력에 의해 벽면에 부착되고 이 압력차이는 적절한 재질과 형상을 갖는 패드를 선택할 경우 70Kpa로 유지하는 것이 가능하다<sup>7)</sup>. 이 경우 필요한 진공패드의 지름은 다음과 같다.

$$D = \sqrt{\frac{4mgc}{\pi\Delta_p\mu n}} \quad (5)$$

여기에서 m은 로봇의 질량, g는 중력 가속도, c는 안전 계수, Δ<sub>p</sub>는 진공 패드 내부와 외부 사이의 압력차이며 μ는 정지 마찰 계수로 0.14의 값을 갖고<sup>7)</sup>, n은 흡착 패드의 개수로 여기에서는 4의 값을 갖는다. 안전 계수를 1로 설정하여 구한 진공 패드의 지름은 약 4cm이며 안전계수를 4로 설정하면 약 8cm의 진공 패드 지름을 갖게 된다. 시뮬레이션 결과 보행형 로봇은 충분한 진공 압력이 공급될 경우 높은 보행 안정성을 보여주는 것으로 나타났다.

그림 10 그림 11은 각각 8cm, 4cm 지름의 진공패드를 갖는 보행형 로봇이 연직 상방향으로 보행 할 때 로봇 중심의 회전조인트 위치를 기준으로 한 로봇의 변위를 나타

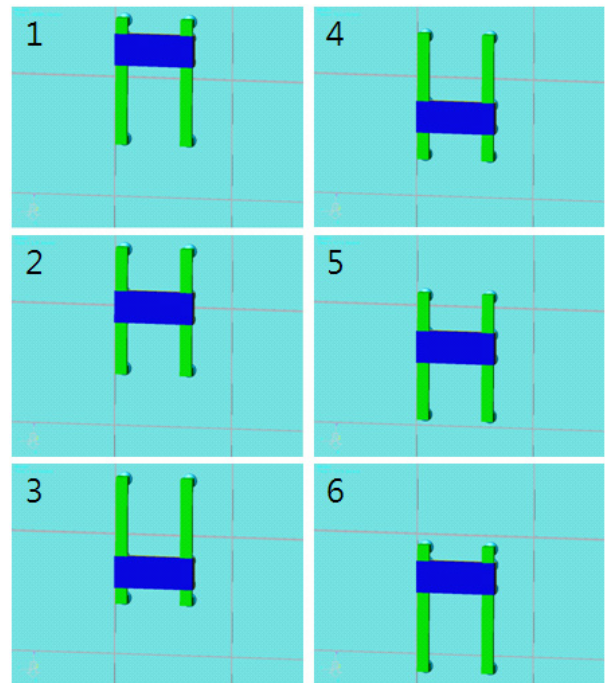


그림 8 보행형의 직진 보행 패턴

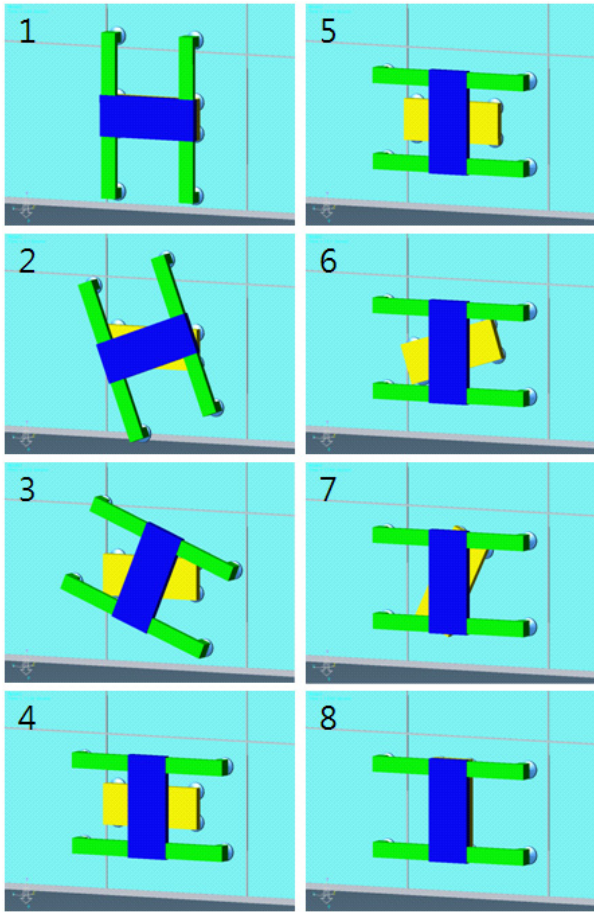


그림 9. 보행형의 방향 전환

낸 그래프이다. 로봇의 직진 보행은 18초를 1주기 반복되며(평균 이동 속도 초속 약 4.4cm) 그 모습은 그림 8과 같다. 로봇 중심의 회전조인트 부분은 최초 5초 동안만 움직이므로 그림 10 그림 11의 그래프 상에서 평평한 부분의 기울기를 관찰함으로써 로봇의 보행 중에 슬립이 일어나는가를 알 수 있다

시뮬레이션 결과 지름 8cm의 진공패드를 갖는 보행형 로봇은 거의 슬립이 일어나지 않는 것을 관찰할 수 있다.

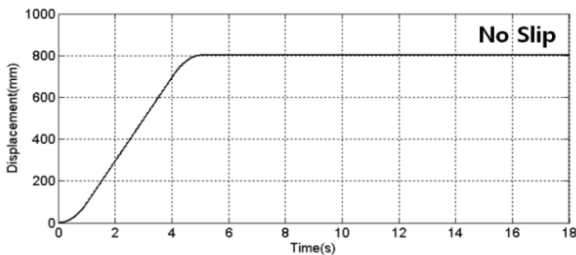


그림 10. 패드지름8cm에서 미끄러짐 정도

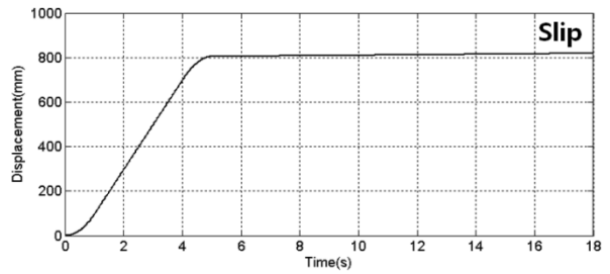


그림 11. 패드지름4cm에서 미끄러짐 정도

그림 11은 안전계수를 1로 했을 때의 보행형 청소로봇의 변위를 나타낸 것으로 보행중 진공패드와 벽면 사이에 약간의 슬립이 발생하여 안정성이 저해되는 것을 알 수 있다. 이 경우 1보폭당 약 1.5cm정도의 슬립이 발생하는 것을 관찰하였다. 이러한 결과는 연직 상방향 뿐 아니라 연직 하방향 및 임의의 방향에 대해서도 동일한 결과가 나타났으며 이러한 패드의 슬립현상은 패드의 재질이나 형상, 유리창 표면의 상태나 내부 압력 등 수많은 변수에 의해 상이한 결과가 나올 수 있어 정확한 데이터를 얻기 위해서는 실제 반복적인 테스트가 필요할 것으로 보여진다.

### 3.3 견인형 2

본 절에서 제시하는 두번째 형태의 견인형 로봇은 일반 견인형 청소로봇에 비해 많은 장점을 갖고 있으나 그 특수한 형태로 인해 건물의 높이가 높아질수록 적용이 어려워질 것으로 생각된다. 시뮬레이션에서는 전체 시스템의 안전성 및 적용 가능한 건물의 높이에 대해 알아보았다. 시뮬레이션에 사용된 로봇은 가로 3m 세로 1m의 크기를 갖고 100kg의 무게를 갖는 것으로 설정하였다. 로봇의 좌우에 설치된 병진조인트는 유리벽면에 대해 수직방향으로 길이를 증가 혹은 감소시킬 수 있어 결과적으로 케이블에 의해 로봇에 가해지는 부착력을 조절하게 되고 시뮬레이션에서 사용된 로봇은 벽면에 수직한 방향으로 최대 1m의 변위를 갖는다. 병진 조인트 변위가 그 이상이 되면 창틀을 넘을 때 로봇에 불필요한 모멘트가 가해져 전복될 우려가 있는 것으로 나타났다.

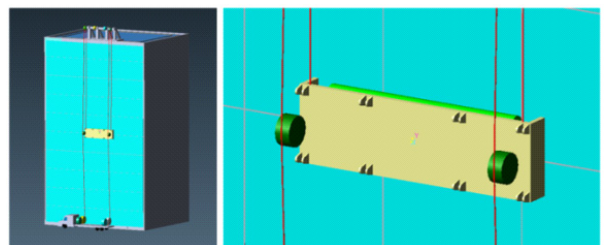


그림 12. 견인형 2 시뮬레이션

수식적으로 케이블에 의해 로봇에 가해지는 힘은 식 (1-2)와 같다. 수식으로 예상할 수 있는 바와 같이 시뮬레이션에서도 건물의 높이가 한계치 이상이 되면 케이블에 의해 로봇에 가해지는 힘이 필요한 양보다 작아지게 되어 로봇과 벽면간에 완전한 밀착이 이루어 지지 못하는 것을 관찰할 수 있었다.

그림 13은 건물의 높이가 각각 30m 부터 110m 까지 변화 할 때 수식적으로 예상되는 부착력과 최대의 부착력을 얻도록 제어했을 때 얻어진 벽면과 로봇 사이에서 측정된 부착력(평균치)에 대한 그래프이다. 건물의 높이가 높아짐에 따라 수식에 의한 예상치와 시뮬레이션에서 측정된 값의 오차가 발생하는 것은 케이블 자체의 무게가 건물의 높이가 높아짐에 따라 증가하나 수식에는 이점이 고려되어 있지 않기 때문이다. 시뮬레이션에서 사용된 로봇의 경우 부착력이 약 50N 이하로 떨어지면 창틀을 넘을 때 로봇과 벽면이 밀착이 되지 않고 흔들리는 모습을 보였다. 따라서 시뮬레이션에서 사용된 로봇은 45m 이하의 빌딩에서 사용이 가능하다는 결론을 내릴 수 있다. 이러한 적용 높이의 한계는 로봇 시스템의 기계적 구조나 질량의 변화에 따라 달라질 수 있으나 어느 경우에도 마찬가지로의 한계는 존재하게 되므로 평면형태의 고층 빌딩에 대해 일반적인 해결책이 되기는 어려울 것으로 보인다. 그러나 한계 높이 이하의 낮은 빌딩에서는 효과적인 해법을 제공할 수 있을 것으로 보여진다.

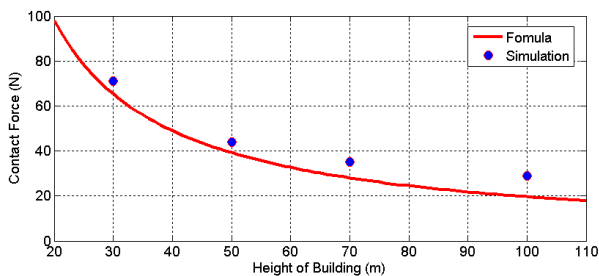


그림 13. 빌딩 높이 증가에 따른 부착력 감소

### 3.4 로봇의 적용 범위

일반적으로 로봇을 이용한 청소가 가장 용이하며 효과적인 빌딩형태는 외벽이 평평한 유리모만 구성된 단순한 직육면체 형태의 빌딩이라고 할 수 있다. 본 논문에서 제안하는 견인형 1은 이와 같은 환경에서 고속으로 청소할 수 있는 능력에 주안점을 두고 설계되었다. 로봇에 장착된 프로펠러는 빌딩 주위의 바람의 영향을 최소화 시키는 동시에 원활한 작업을 위한 부착력을 제공하는 역할을 하고 있다.

견인형 2는 특징적인 케이블 배치를 통해 견인형 1의

프로펠러를 제거하면서도 그와 동일한 효과를 얻을 수 있도록 하였다. 그러나 건물의 높이가 높아짐에 따라서 이러한 효과가 점차 줄어들기 때문에 학교나 관공서등 주로 직육면체 형태이면서도 높이가 높지 않은 건물을 고속으로 청소하는데 적합하다고 할 수 있다.

한편 전체적으로는 직육면체 형태의 빌딩이라 하더라도 부분적으로 간판이나 장식물 등 견인형의 통과를 어렵게 만드는 장애물들이 존재하는 경우가 많이 존재하며 이러한 경우를 보완할 수 있는 것이 보행형 이라고 할 수 있다. 보행형의 경우 자체의 이동속도가 느리기 때문에 단독으로 사용하기는 어렵지만 외부 부착물이 있는 직육면체 형태의 빌딩에서 견인형과 함께 사용된다면 청소속도와 이동성 면에서 상호 보완적으로 사용될 수 있을 것으로 보여진다.

## 4. 결론

지금까지 개발된 유리창 청소로봇의 이동 메커니즘은 빠른 이동 속도를 가지나 장애물 극복 능력이 낮은 견인형 형태와 이동속도는 느리지만 비교적 높은 장애물 극복 능력을 갖는 보행형 형태로 나뉠 수 있다. 일반적으로 한 빌딩을 견인형이나 보행형 중 하나의 이동 메커니즘 만으로 청소하는 것은 어렵고 각각이 서로의 단점을 보완하여 작업을 진행하는 것이 효과적일 것으로 보여진다.

본 논문에서는 먼저 기존의 견인형 및 보행형 유리창 청소로봇의 특징에 대해 분석하고 각각의 취약점을 보완한 새로운 이동 메커니즘을 제안한 후 시뮬레이션을 통해 각각의 이동 메커니즘의 성능을 분석하였다.

기존의 견인형 로봇은 벽면에 충분히 밀착되지 않아 균일한 청소가 어렵고 바람의 영향에 취약하다는 약점을 갖고 있으며 기존의 보행형 로봇은 평면상에서 X축, Y축으로의 2자유도 직선운동만을 허용하여 보행 방향의 오차가 계속 누적된다는 약점을 갖고 있었다. 본 논문에서 제안하는 견인형 1은 기존의 견인형 로봇에 비해 프로펠러에서 발생한 추력을 통해 벽면과 충분히 밀착된 상태에서 청소 작업이 가능하고 프로펠러의 속도제어를 통해 바람의 영향에 적절히 대응이 가능하다는 장점을 갖는다. 보행형 로봇은 로봇의 중앙에 설치된 회전조인트에 의해 보행 중 누적되는 이동 방향에 대한 오차 보정이 가능하다는 장점을 가지며 견인형 2는 낮고 넓은 형태의 빌딩에 적용할 경우 간단한 구성만으로 청소에 필요한 부착력을 공급할 수 있고 바람의 영향에 강하다는 장점을 갖는다. 각각의 메커니즘은 실용화를 염두에 두고 충분히 검증되어 현재 바로 이용 가능한 기술만을 사용하였다.

장애물 극복능력이 있어서는 본 논문에서 제안한 견인

형 및 보행형 이동 메커니즘 모두 아직 제한된 수준의 성능을 보이고 있다. 이는 완전한 장애물 극복능력보다는 비용과 현재 기술 수준을 고려한 실용성을 우선순위에 두었기 때문이며 높은 수준의 장애물 극복능력을 위해서는 차후 지속적인 연구와 메커니즘 개발이 필요할 것으로 보인다. 본 논문에서 제시하고 있는 이동 메커니즘의 실제 운용에 있어서는 시뮬레이션에서 발견하지 못한 문제의 가능성을 무시할 수 없다. 따라서 실용화를 위해서는 고층 빌딩 벽면에서 발생할 수 있는 난류 현상 등 시뮬레이션 단계에서 포함하지 않은 복잡한 유동 현상에 대한 실사나 청소인력과의 인터뷰 및 반복적인 실험에 의한 데이터 축적이 필요할 것으로 생각된다.

참고 문헌

[1] Bohme, T., Schmucker, U., Elkmann, N. and Sack, M., "Service Robots for Facade Cleaning", Proc. IEEE Industrial Electronics Society, pp.1204-1207, 1998

[2] Elkmann, N., Felsch, T., Sack, M., Saenz, J. and Hortig, J., "Innovative Service Robot Systems for Façade Cleaning of Difficult-to-Access Area", Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, pp.756-762, 2002.

[3] Schraft, R. D., Simons, F., Grandi, G. P. and Muscogiuri, D., "Mechanical Design of an Autonomous, Lightweight Robot for Window Cleaning", Proc. Int. Symp. Robotics, 2002.

[4] Qian, Z., Zhao, Y. and Fu, Z., "Development of Wall-climbing Robots with Sliding Suction Cups", Proc. IEEE Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, pp.3417-3422, 2006.

[5] Zhang, H., Zhang, J., Zong, G., Wang, W. and Liu, R., "Sky Cleaner 3 : A Real Pneumatic Climbing Robot for Glass-Wall Cleaning", IEEE Robotics & Automation Magazine, March, pp.32-41, 2006,

[6] Zhang, H., Zhang, J. and Zong, G., "Realization of a Service Climbing Robot for Glass-wall Cleaning", Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Biomimetics, pp.395-400, 2004.

[7] Tocut, P. D., Tripe-Vidican, A. and Tripe-Vidican, C., "Vacuum Robot for Cleaning the Glass Frontage of the Buildings", Fascicle of Management and Technological Engineering, Volume VII (XVII), pp.1118-1125, 2008.

[8] Miyake, T. and Ishihara, H., "Mechanisms and Basic Properties of Window Cleaning Robot", Proc. IEEU/ASME Int. Conf. Advanced Intelligent Mechatronics, pp.1372-1377, 2003.

[9] Miyake, T., Ishihara, H., Shoji, R. and Yoshida, S., "Development of Small-size Window Cleaning Robot", IEEE Int. Conf. Mechatronics and Automation, pp. 1302-1307, 2006.

[10] Longo, D. and Muscato, G., "Adhesion Control for the Alicia Climbing Robot", Proc. Int. Conf. Climbing and Walking Robots, pp.1005-1015, 2004.

[11] Nagakubo, A and Hirose, S., "Walking and running of the quadruped wall-climbing robot", Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.1005-1012, 1994.

[12] Hirose, S. and Kawabe, K., "Ceiling Walk of Quadruped Wall Climbing Robot NINJA-II", Proc. Int. Symp. Climbing and Walking Robots, pp.143-147, 1998.



이 동 혁

2008 성균관대학교 기계공학부 (공학사)  
 2008~현재 성균관대학교 메카트로닉스공학 석사과정  
 관심분야 In-pipe working robot, Field robotics, Network and communication



문 형 필

1996 포항공과대학교 기계공학과 (공학사)  
 1998 포항공과대학교 기계공학과 (공학석사)  
 2005 University of Michigan, Mechanical Engineering (공학박사)

2005~2007 Carnegie Mellon University 연구원  
 2008~현재 성균관대학교 기계공학부 교수  
 관심분야 : Distributed manipulation, Localization and navigation of multi agent system, Biomimetic robotics





### 노 세 곤

- 2000 성균관대학교 기계공학부 (공학사)
- 2002 성균관대학교 메카트로닉스공학 (공학석사)
- 2006 성균관대학교 메카트로닉스공학 (공학박사)

2006~2009 성균관대학교 기계기술 연구소 연구원  
2009~현재 일본 동경공업대학교 기계우주학과 방문연구원

관심분야: Robot mechanism, Robot application, In-pipe working robot



### 유 원 필

- 1992 서울대학교 제어계측공학과 (공학사)
- 1994 한국과학기술원 전자공학과 (공학석사)
- 1999 한국과학기술원 전자공학과 (공학박사)

1999~2001 국방과학연구원 선임연구원  
2001~현재 전자통신연구원 로봇시스템연구팀 팀장  
관심분야: Robot vision, Image processing, Robot navigation



### 황 달 연

- 1983 서울대학교 기계공학과 (공학사)
- 1985 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사)
- 1995 University of Washington, Electrical Engineering (공학박사)

1987~1998 LG생산기술원 책임연구원  
1999~현재 한국산업기술대학교 기계설계학과 교수  
관심분야: Telerobotics, Automation



### 최 혁 렬

- 1984 서울대학교 기계공학과 (공학사)
- 1986 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사)
- 1994 포항공과대학교 기계공학과 (공학박사)

1986~1989 LG 전자 정보기술연구소 주임연구원  
1993~1995 일본정부 문부성 초청 동경대학 연구원  
1999~2000 일본 AIST 초빙연구원  
2008~2009 University of Washington 방문교수  
1995~현재 성균관대학교 기계공학부 교수  
관심분야: Field robotics, Dexterous hand, Haptic display, Artificial muscle actuator