

# 소프트 팁을 이용한 로봇 청소 메카니즘의 접촉 해석

## Contact Analysis of a Robotic Cleaning Mechanism Using Soft Tip

김병호

경성대학교 전기전자메카트로닉스 공학부 생체모방제어 및 로봇 연구실  
E-mail: kimbh@ks.ac.kr

### 요 약

본 논문은 청소 로봇 메카니즘을 위한 소프트 팁의 접촉력을 제어하기 위한 방법을 제안한다. 제안한 방법에 사용하면, 어떤 소프트 팁의 기하학적인 탄성 모델을 근거로, 청소작업이 수행되는 동안 소프트 팁에 작용되는 접촉력을 팁의 압축변위 정도에 따라 적절히 판단할 수 있다. 이것을 청소 로봇 메카니즘에 탑재된 매니플레이터의 위치제어 변위로 활용함으로써, 소프트 팁의 적절한 접촉상태를 유지하는 것이 가능해진다.

**Key Words** : Soft-tip, Contact force, Robotic cleaning mechanism

### 1. 서 론

현재 로봇기술은 기존의 공장자동화뿐만 아니라 다양한 산업응용 분야에 활용되고 있다. 특히, 사람이 직접 수행하기에는 어렵고, 위험한 환경(hazardous environments)에서의 원활한 작업 수행을 위한 서비스 로봇 메카니즘에 대한 요구가 점점 더 커지고 있는 실정이다. 예를 들면, 그림 1에서 보는 바와 같이, 현대사회가 발전하면서 초고층 빌딩과 컨벤션 센터 등이 많이 세워지고 있는데, 이러한 건물들은 많은 외벽 유리창을 가지고 있다. 대부분의 경우, 이러한 유리창의 외벽과 내벽에 대한 청소 작업은 사람에게 의해 이루어지고 있는데, 아주 위험한 작업이며, 실제로 청소작업이 쉽지 않다. 이와 같은 분야는 사람에게 의해 직접 수행하기에는 매우 위험한 분야이기 때문에 로봇기술의 활용이 절실히 요구되는 분야라고 할 수 있으며, 이러한 작업들을 원활하게 수행하기 위한 로봇 메카니즘의 개발은 기존의 작업환경과 생산성을 획기적으로 개선시킬 수 있는 아주 유용한 실용적인 연구로 대두되고 있다 [1-5].

그림 1에서 보는 것과 같이, 고층 건물의 유리벽 청소를 위한 로봇은 기본적으로 안정하게 유리창 표면에 부착될 수 있어야 하고, 모든 청소작업 영역을 쉽게 이동하며 작업할 수 있어야 하며, 효과적인 청소가 이루어질 수 있는 다양한 기능이 만족되어야 한다 [3][5]. 이와

관련하여 Nishigami [1] 등은 유리창으로 덮혀진 지붕을 청소하기 위한 로봇 메카니즘을 개발하였고, Elkmann [2] 등은 풍선에 로봇 매니플레이터를 장착한 형태의 청소 로봇 시스템을 개발하여 건물의 중앙홀에 있는 유리창 지붕 내벽을 청소하는데 이용하였다. 또한, 유리창 벽에 붙어서 이동하기 위한 위치제어 방법이 Zhang [4] 등에 의해 연구되고 있다. 이 외에도 이러한 로봇을 위한 구동 시스템이나 운동 메카니즘 및 점착 시스템에 관한 연구가 다양하게 진행되고 있다 [5].

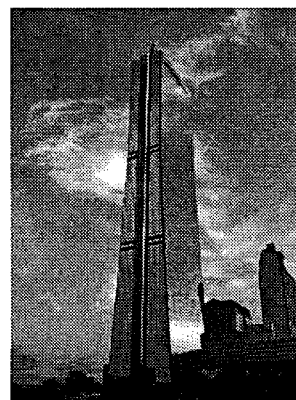


그림 1. 유리창 외벽을 갖는 고층 빌딩(63빌딩)

한편, 이러한 로봇은 깨지기 쉬운 유리에 부착되어서 작업을 수행하여야 하기 때문에 소프트한 접촉(soft contact)이 매우 중요한 과제가 된다. 기존의 힘 제어 방법 [6] 등이 사용될 수

는 있지만, 노이즈 등으로 인하여 원하는 컴플라이언스를 보장하는 것이 쉽지 않다.

본 논문에서는 유리창과 효과적인 접촉을 위한 방법으로서 청소 로봇 메카니즘에 탑재한 매니플레이터의 끝 부분에 소프트 팁(soft tip)을 장착하여 사용하는 방법을 고려했다. 또한, 소프트 팁의 기하학적인 탄성 모델을 근거로, 청소 로봇 메카니즘을 위한 소프트 팁의 접촉력을 적절히 제어하기 위한 방법을 제시한다.

### 2. 유리창 청소용 로봇 메카니즘

그림 2는 작업용 매니플레이터가 탑재된 다족 로봇 메카니즘으로서, 유리창 청소를 위한 개념도이다. 이 로봇에 탑재된 매니플레이터는 병진운동 관절에 의해 동작되고, 전체적으로 3차원 운동이 가능하며, 유리창 청소를 하는 작업자의 팔로 볼 수 있다. 또한, 소프트 팁은 청소용 도구를 의미한다. 본 논문에서는 이러한 로봇을 위한 구동 시스템이나 운동 메카니즘 및 점착 시스템에 관해서는 다루지 않는다.

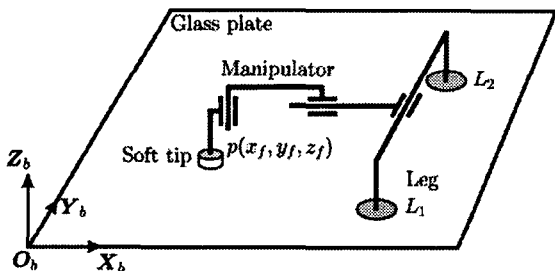


그림 2. 유리창 청소용 로봇 메카니즘

### 3. 소프트 팁의 접촉 해석

어떤 로봇 메카니즘이 큰 유리창 판을 청소하는 경우, 유리창은 원래 충동에 의해 깨지기 쉬기 때문에 접촉상황에서의 충격을 완화시키기 위한 소프트 접촉에 관한 연구가 필수적인 요소로서 고려될 수 있다. 기본적으로 청소용 도구에 어떤 소프트 팁이 유용하게 사용될 수 있다고 판단된다. 따라서 본 논문에서는 그림 3에서 보는 것과 같은 실린더 형 소프트 팁을 고려했다. 소프트 팁이 유리창 판에 접촉하게 되면, 팁의 탄성특성에 의해 어떤 접촉 표면이 형성된다. 본 논문에서는 소프트 팁의 압축에 의한 압축변위(deformation)는 수직방향으로만 일어난다고 가정하며, 청소용 매니플레이터의 평면운동에 의한 청소작업을 고려했다.

일반적으로 소프트 팁에 접촉력이 작용되면, 수축에 따른 반발력이 발생된다. 이러한 물리적인 현상을 근거로, 소프트 팁의 변형(strain)  $e$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$e \equiv \frac{\Delta L}{L} \tag{1}$$

여기서  $e$ 의 차원은 없고, 부호는 음수를 갖는다. 또한, 그림 3에서 소프트 팁에 가해지는 응력(stress)  $\sigma$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma \equiv \frac{F}{S} \tag{2}$$

여기서  $F$ 는 팁의 접촉면적  $S$ 에 대하여 작용되는 전체 반발력을 나타내며, 실린더 형 팁의 접촉면적은 다음과 같이 결정된다.

$$S = \pi r^2 \tag{3}$$

여기서  $r$ 은 접촉면의 반지름이고,  $\pi$ 는 원주율이다.

일반적으로 소프트 팁은 사용된 재료에 따라 탄성특성이 다르며, 영율(Young's modulus,  $Y = \sigma/e$ )로 표시하고 있다. 이러한 계수를 도입하여 소프트 팁에 작용되는 힘 관계식을 구하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \frac{Y\pi r^2}{L} \Delta L \tag{4}$$

결과적으로, 청소작업이 수행되는 동안 소프트 팁에 작용되는 접촉력은 팁의 압축변위와 사용된 소프트 팁의 물리적인 파라미터  $L, r$ 과 재료의 특성에 따라 결정될 수 있음을 알 수 있다.

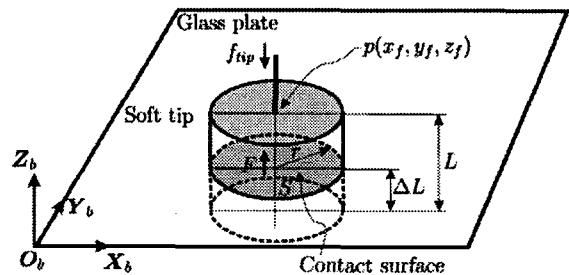


그림 3. 실린더 형 소프트 팁

실질적으로 유리판을 효과적으로 닦기 위해서는 적절한 힘이 가해진 상태에서 청소용 팁을 문질러야 한다는 것을 경험적으로 알 수 있다. 이러한 접촉력은 (4)에서 압축변위  $\Delta L$ 을 적절히 유지함에 의해 달성될 수 있으며, 궁극적으로 요구되는 압축변위를 청소 로봇 메카니즘에 탑재된 매니플레이터의  $z$ 축 위치제어 변위로 활용함으로써 소프트 팁의 적절한 접촉상태를 유지하는 것이 가능해짐을 알 수 있다. 이러한 관점에서 매니플레이터의 팁 공간에서의 접촉력  $f_{tip}$ 은 다음과 같이 결정될 수 있다.

$$f_{tip} = k_{tip} \Delta z_f \tag{5}$$

여기서  $\Delta z_f$ 는 팁이 유리표면에 접촉된 후, 매니플레이터의  $z$ 축 방향으로의 위치변위를 나타내고,  $k_{tip} (= Y\pi r^2/L)$ 는 팁의 강성특성

(stiffness)을 의미한다.

일반적으로, 유리창 청소작업은 정확한 힘 제어를 요구하는 것은 아니기 때문에 매니플레이터의 위치제어 정밀도는 작업 대상 유리창이 무리하게 압력을 받지 않는 정도의 범위내에서 결정되면 충분하다고 판단된다. 이러한 관점에서 (5)에 나타낸 접촉력 관계식은 어떤 소프트웨어를 사용한 로봇 청소작업에 유용하게 적용될 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 간단한 유리창 청소용 로봇 메카니즘을 보이고, 소프트웨어를 청소용 도구로 사용할 경우, 소프트웨어와 비교적 간단한 유리창의 접촉에 관한 힘 관계식을 제시하였다. 이것을 이용하면, 청소작업이 수행되는 동안 소프트웨어에 작용되는 접촉력을 팁의 압축 변위 정도에 따라 적절히 판단할 수 있다. 또한, 이것을 청소 로봇 메카니즘에 탑재된 매니플레이터의 위치제어 변위로 활용함으로써 소프트웨어의 적절한 접촉상태를 유지하는 것이 가능해진다.

현재 다양한 유리창을 원만하게 기어 다니면서 청소할 수 있는 간단한 로봇 메카니즘 개발에 관한 연구가 진행중에 있다. 이러한 로봇은 고층 빌딩이나 산업용 저장시설의 결함 진단분야 등으로 활용할 수 있기 때문에 괄목할 만하다 [8-10].

#### 참 고 문 헌

- [1] M. Nishigami and T. Mizushima, "Glass roof cleaning robot system 'Canadian Crab,'" *Jour. of Robotics Society of Japan*, vol. 10, no. 5, pp. 40-42, 1992.
- [2] N. Elkmann, T. Felsch, M. Sack, J. Saenz, and J. Hortig, "Innovative service robot systems for facade cleaning of difficult-to-access areas," *Proc. of 2002 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 756-762, 2002.
- [3] H. Zang, J. Zhang, and G. Zong, "Requirement of glass cleaning and developemnt of climbing robot systems," *Proc. of 2004 IEEE Int. Conf. on Intelligent Mechatronics and Automation*, pp. 101-106, 2004.
- [4] H. Zang, J. Zhang, R. Liu, and G. Zong, "A novel approach to pneumatic position servo control of a glass wall cleaning robot," *Proc. of 2004 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 467-472, 2004.
- [5] H. Zang, J. Zhang, G. Zong, W. Wang, and R. Liu, "Sky cleaner 3 : A real pneumatic climbing robot for glass-wall cleaning," *IEEE Robotocs & Automation Magazine*, vol. 13, no. 1, pp. 32-41, 2006.
- [6] T. Yoshikawa and X.-Z. Zheng, "Coordinated dynamic hybrid position/force control for multiple robot manipulators handling one constrained object," *Int. Jour. of Robotics Research*, vol. 12, no. 3, pp. 219-230, 1993.
- [7] P. M. Fishbane, S. Gasiorowicz, and S. T. Thornton, *Physics for scientist and engineers*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.
- [8] T. P. Sattar, B. Bridge, S. Chen, and Z. Zhao, "Development of CLAWER system that combines the tasks of monitoring, mobility, manipulation, and measurement for industrial inspection tasks," *Proc. of the 6th Int. Conf. on Climbing Walking Robots Supporting Technologies Mobile Machines*, pp. 699-706, 2003.
- [9] M. Abderrahim, C. Balaguer, A. Gimenez, J. M. Pastor, and V. M. Padron, "ROMA: A climbing robot for inspection operations," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2303-2308, 1991.
- [10] D. Longo and G. Muscato, "The Alica<sup>3</sup> Climbing Robot : A three-module robot for automatic wall inspection," *IEEE Robotocs & Automation Magazine*, vol. 13, no. 1, pp. 42-50, 2006.