

# 3D 모델링을 통한 유리창 청소로봇의 응력해석 및 설계 개선방안 도출

## Stress Analysis of a Window Cleaning Robot using 3D Modeling and Improvement Plan

김 균 태\*

전 영 훈

Kim, Kyoon-Tai\*

Jun, Young-Hun

Construction System Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology(KICT),  
Ilsanseo-Gu, Gyeonggi-Do, 10223, Korea

### Abstract

Recently, a prototype of a guide rail type window cleaning robot was developed, and is currently undergoing field testing. The size and the load of the robot have not yet been optimized. In this study, a stress analysis was performed to derive quantitative data to improve the current window cleaning robot and secure its structural safety. Through the analysis of its own weight, resistance to wind speed, and other factors, it was found that the robot can be improved in terms of the drooping caused by its own weight and the drag force against wind pressure. The analysis results obtained will be directly applied to improve the design of the window cleaning robot, and it is expected that this will advance the completeness of the robot's design.

Keywords : construction automation, stress analysis, 3D modeling, maintenance, window cleaning, cleaning robot

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

우리나라 국민들의 소득과 생활수준이 향상됨에 따라, 건축물의 미관과 청결도에 대한 관심도 증가하고 있다. 특히 클리닉, 휘트니스센터, 미용샵 등 이미지가 중요한 업종에서는 실내뿐만 아니라 유리창 외부까지 깨끗하게 관리되기를 원하고 있다. 그러나 기존의 유리창 청소방식은 인력에 의존하여 건물외벽 전체를 청소하는 경우가 대부분이기 때문에, 2층 이상의 창문을 자주 청소하는 것이 용이하지 않았다. 따라서 2층 이상의 위치에 입주한 고객들의 유리창 청소 수요를 충족시키는 것이 매우 어려웠다.

최근에 이러한 수요에 대응하기 위하여 건축물 외부 중 특정한 위치만 청소하는 방안에 대한 개발 필요성이 제기되고 있다[1]. 이 방안을 가이드레일형 유리창 청소로봇이라고도 하는데, 이는 건축물의 특정 부위에 가이드레일을 설치하고, 설치된 레일을 따라 청소로봇이 이동하면서 수시로 유리창을 청소하는 장치를 말한다. 하지만 국내에는 가이드레일형 유리창 청소로봇을 개발하거나 적용한 과거 사례가 거의 없고, 해외시스템을 도입하거나 활용한 사례도 극히 드문 실정이다[1]. 또한 개발 중인 가이드레일형 유리창 청소로봇(이하 유리창 청소로봇이라 함)은 현재 첫 번째 시작품이 제작되어 시험 중인 상황으로, 그 크기와 하중이 최적화되지 못한 상황이다[2]. 유리창 청소로봇과 같이 건축물 외부에 부착되는 장치들은 그 크기와 하중이 매우 중요하다. 왜냐하면 크기가 커지면 미관이 훼손될 뿐만 아니라, 풍하중이 증가하는 등 건축물에 미치는 영향이 커지기 때문이다. 또한 하중이 증가하는 경우에도, 가이드레일에 작용하는 하중이 증가하게 되고, 이 하중은 건축물로 전달되게 된다. 따라서 이 프로토타입 청소로봇의 크기, 형상, 하중, 응력분포 등을

Received : December 22, 2017

Revision received : February 1, 2018

Accepted : March 15, 2018

\* Corresponding author : Kim, Kyoon-Tai

[Tel: 82-31-910-0420, E-mail: ktkim@kict.re.kr]

©2018 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

분석하여, 설계 개선방안을 도출해야 할 시점이라고 할 수 있다.

위와 같은 필요성에 따라, 본 연구의 목적은 가이드레일형 유리창 청소로봇(이하 유리창 청소로봇이라 함)의 시뮬레이션을 통해 정량적 데이터를 도출하고, 이를 기반으로 유리창 청소로봇의 설계 개선방안을 도출하는 것으로 설정하였다. 다시 말하면, 3D 모델링 및 동작 시뮬레이션을 통하여 유리창 청소로봇의 하중, 응력분포 등 구조해석을 실시하고, 유리창 청소로봇의 자중, 이송위치, 풍압 등에 의한 응력 해석을 통하여 응력 집중부위를 도출하여, 집중응력 발생원인을 분석하고 대안을 도출하고자 한다. 이러한 구조해석 결과를 바탕으로 유리창 청소로봇의 설계를 개선함으로써, 설계오류 발생 가능성을 줄이고 설계완성도를 높이고자 한다.

### 1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구에서는 유리창 청소로봇의 프로토타입을 대상으로 유한요소해석 프로그램인 Ansys를 이용하여 유리창 청소로봇에 대한 응력을 해석하였다. 응력해석은 청소로봇의 위치에 따라 대기 상태일 때의 자중에 의한 해석, 청소로봇이 이동할 때의 이송위치에 의한 해석을 진행하였으며, 풍력에 의한 해석, 볼트체결 등 결합 공정방법에 의한 해석, 구조적 안정성 평가 및 확보를 위한 안전계수에 의한 평가를 진행하였다.

연구방법으로는 기존의 인력의존형 유리창 청소작업 현황과 국내외 청소로봇의 기술동향을 고찰하여, 청소로봇의 필요성을 확인하였다. 그리고 3D 모델링과 동작 시뮬레이션을 위한 분석조건을 설정하고, 구조해석을 실시하였다. 이러한 과정을 통하여 발생된 응력의 원인과 결과를 분석하여, 유리창 청소로봇의 개선방안을 도출하였다.

## 2. 현황 고찰

### 2.1 유리창 청소작업 현황

국내의 건축물 유리창 청소 작업은 대부분 인력에 의존하고 있다[3]. 유리창 청소를 위해서는 로프를 이용한 달비계, 곤돌라, 차량형 고소작업대, 사다리 등이 많이 활용된다. 이 중 로프를 이용한 유리창 청소작업이 가장 많이 사용되는데, 이 작업은 작업준비, 로프결속, 청소작업의 순서로 진행된다[4]. 이와 같은 로프를 이용한 유리창 청소 작업의 순서를 도식화하면 Figure 1과 같으며, 청소작업 사례는 Figure

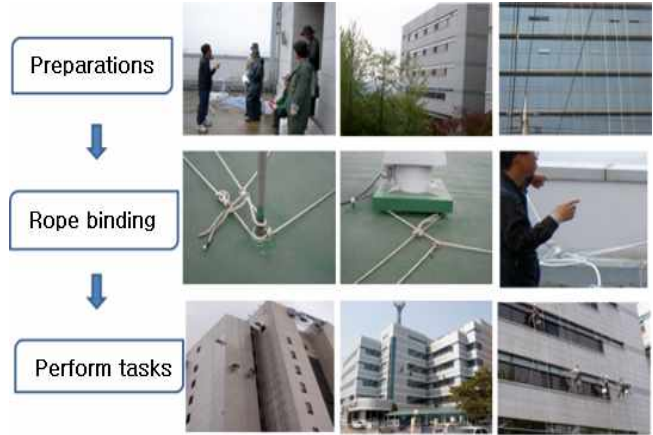


Figure 1. Window cleaning work using rope(4)



Figure 2. Examples of window cleaning using rope(5)

2와 같다. 이와 같은 인력의존형 청소방법은 소위 저효율 고비용 방법이라고 할 수 있으며, 작업원이 추락 등의 위험에 노출된다는 단점이 있다.

### 2.2 청소장치 기술 동향

국내외에서는 유리창 청소방법을 개선하기 위하여 다양한 청소장치가 개발되고 있다. 일본의 니혼비소(Nihon Biso)사는 Figure 3(a)와 같이, 벽면에 매립되어 있는 레일을 따라서 유리창을 청소하는 장치를 개발하여 상용화하였다. 한양대학교에서는, Figure 3(b)와 같이, 신축 시 커튼월에 매립해 놓은 레일을 따라 이동하면서 유리창을 청소하는 장치를 개발하였다[6]. 그러나 이와 같은 시스템들은 건축물 신축 시에 레일을 미리 매설하여야만 적용할 수 있다는 한계가 있다. 또한 건축물 벽면 전체를 청소대상으로 하므로, 가격이 높다는 점도 단점으로 지적되고 있다. 따라서 청결한 이미지를 중요하게 여기는 특정업종에서 해당 공간의 유리창만 자주 청소하기를 원하는 수요를 충족시키는 데에 적용하기는 어려운 실정이다.



(a) Nihon Bisoh system[6] (b) Hanyang Univ. system[7]

Figure 3. Examples of window cleaning robot

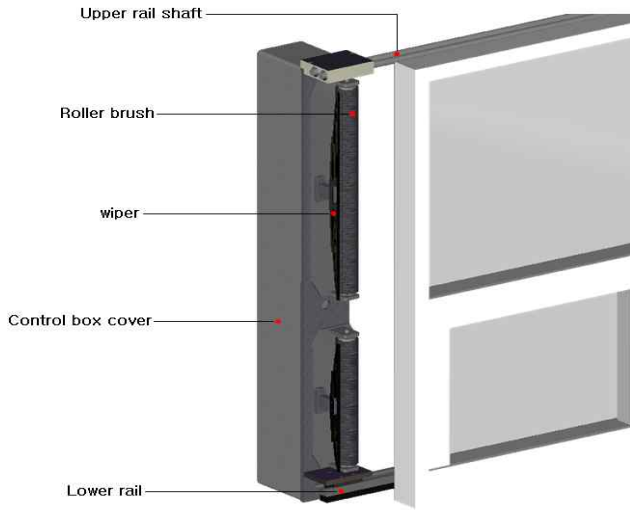


Figure 4. 3D model of window cleaning robot

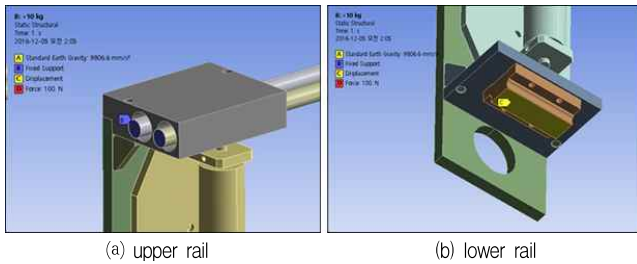


Figure 5. Support condition

### 3. 시뮬레이션 조건 설정 및 3D 모델링

#### 3.1 3D 모델링 및 경계조건

유리창 청소로봇은 상부 레일 샤프트, 브러쉬롤러, 와이퍼, 컨트롤 박스(본체), 하부 레일 등으로 구성되며, 그 3D 모델은 Figure 4와 같다. 해석 시간을 단축시키고 해석의 정확성을 높이기 위하여, 와이퍼, 브러쉬, 전자 부품 등 해석에 직접적인 영향이 크지 않은 요소들은 간략화 하였다. 본 해석이 자중에 의한 구조해석임을 고려하여 제외된 부품들의 중량을 고려하여 그에 부합하는 하중조건을 부여했으며, 전자 부품 등을 포함한 하중을 10kg으로 가정하여 해석을

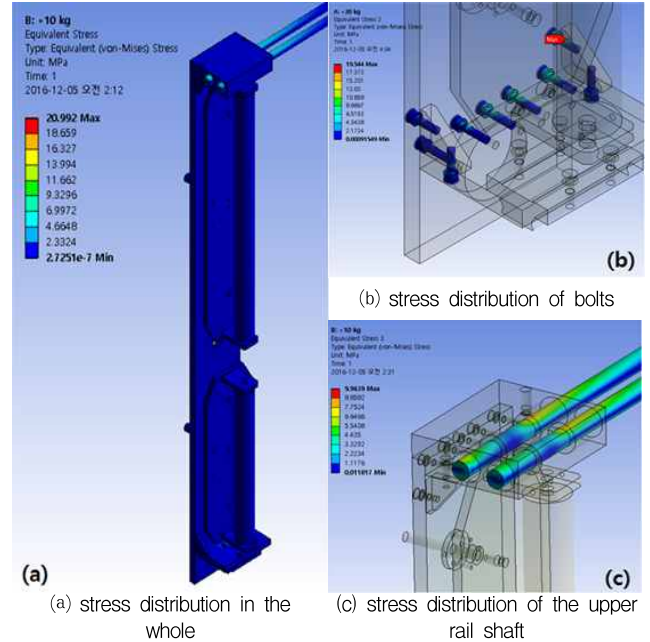


Figure 6. Stress distribution by self weight

진행했다. 본 연구에서 설정한 조건은 다음과 같다.

- 부품 간 볼트 완전체결, 볼트의 체결력 (bolt pretension)<sup>1)</sup> 값 1000N로 가정
- 볼트로 체결되는 부품들 간의 접촉조건은 no separation<sup>2)</sup> 조건으로 가정
- 볼트머리와 부품간 연결부위는 bonded<sup>3)</sup> 조건으로 가정
- 부품의 제작 및 조립 중 시공오차는 분석 조건에서 제외
- 제품의 가공 및 여분을 위한 공극은 무시
- 상부 레일 샤프트와 하부 볼트 체결에 사용된 나사의 재질은 SUJ2 structural steel, 그 외 부품의 재질은 Al 6061

#### 3.2 지지조건

유리창 청소로봇은 상부에 위치하고 있는 2개의 레일 샤프트와 하부의 레일에 의해 자중을 지지하는 구조이다. 따라서 Figure 5 (a)와 같이, 2개의 상부레일 끝단에 fixed support 조건을 부여하였다. 그리고 하부 레일과 접촉되는 위치에는 Figure 5 (b)와 같이, 레일이 진행되는 방향을 제외하고 구속조건을 부여하였다.

- 1) 너트나 볼트 머리에 토크를 주어 볼트 내부에 인장력을 발생시키고 반대로 결합력을 얻을 때, 결합체에 아무런 힘을 가해지지 않은 상태에서 존재하는 힘
- 2) 접촉상태이지만 접촉면 방향의 sliding을 허용하는 접촉 경계조건. 수직 방향으로 변위 구속
- 3) 완전 접촉과 같은 접촉상태. 수직, 접선 방향으로 변위 구속

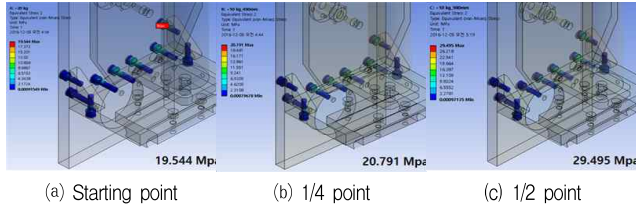


Figure 7. Distribution of internal stresses in bolts according to the feeding position

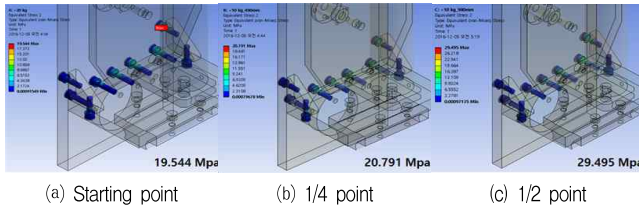


Figure 8. Distribution of internal stresses in upper rail shaft according to the feeding position

## 4. 응력 해석

### 4.1 자중에 의한 구조해석

#### 4.1.1 응력분포 시뮬레이션

본 연구에서는 자중에 의하여 발생하는 응력을 분석하기 위하여 시뮬레이션을 실시하였다. 그 결과, Figure 6과 같이 응력이 주로 집중되는 부위는 상부 레일 샤프트와 부품들 간의 체결을 위한 볼트인 것으로 확인되었다.

#### 4.1.2 해석

상부 레일 샤프트에서는 9.964Mpa의 밴딩 응력이 발생했으며, 볼트에서는 19,544Mpa의 전단 응력이 발생했다. Table 1에서 볼 수 있듯이, 볼트의 재질인 structural steel의 항복 강도가 250Mpa인 것을 감안하면, 항복강도의 1/10 수준의 응력이다. 따라서 파손에 대해서는 안전한 수준이라고 할 수 있다. 그러나 응력의 집중이 집중되는 부위가 볼트 부분이고 볼트의 파단유무가 핵심 요인이라면 볼트 체결력에 대한 경계조건을 강화할 필요가 있는 것으로 판단된다.

Table 1. Status of slab formwork system application

Material	Density	Modulus of elasticity	Phasongi	Yield strength
SUJ2	7.8 g/cm <sup>3</sup>	207 Gpa	0.3	350 Mpa
AL6061	2.7 g/cm <sup>3</sup>	68.9 Gpa	0.33	276 Mpa
Structural steel	7.85g/cm <sup>3</sup>	200 Gpa	0.3	250 Mpa

### 4.2 이송위치에 의한 구조해석

#### 4.2.1 하부 볼트의 응력분포 시뮬레이션

본 연구에서는 청소를 위해 유리창 청소로봇이 이송 중일 때에 청소장치의 내부 응력 변화를 확인하기 위하여, 이송 위치에 따른 시뮬레이션을 진행하였다. 그 결과, 장치가 시작 지점, 1/4지점, 1/2지점에 위치할 때 각각 19.544Mpa, 20.791Mpa, 29.495Mpa의 내부 응력이 발생하였다 (Figure 7 참조).

#### 4.2.2 상부 레일 샤프트의 응력분포 시뮬레이션

장치가 시작 지점, 1/4지점, 1/2지점에 위치했을 때, 상부 레일 샤프트와 블록이 만나는 부위의 응력 분포는 Figure 8과 같다. 시뮬레이션 결과, 부위별로 각각 9.964Mpa, 5.814Mpa, 7.231Mpa의 내부 응력이 발생하는 것으로 나타났다. 다시 말하면, 볼트의 경우는 1/2지점에서 가장 큰 응력이 걸리는 것을 확인할 수 있으며, 시작지점에 비해 약 51% 가량 내부 응력이 증가할 것으로 분석되었다.

#### 4.2.3 해석

본 연구에서는 중심부로 갈수록 응력이 커지는 원인을 분석하기 위해 유리창 청소로봇의 이송 위치에 따른 상부 레일 샤프트의 응력과 변형량을 분석하였다. Figure 9는 이송 위치에 따른 상부 레일 샤프트의 응력 분포이다. 해석 결과, 시작 지점과 1/4지점에 위치해 있을 경우 레일 샤프트의 최대 응력은 끝단에서 발생하지만, 1/2지점에 위치해 있을 경우에는 중심부에서 최대 응력이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 상부 레일 샤프트의 경우 양 끝단이 고정되어 있어 단순 지지보와 같은 거동을 하는 것을 알 수 있다. 또한 집중 응력 발생 원인이 유리창 청소로봇의 자중이므로, 자중에 의해 상부 레일 샤프트가 처짐으로써 이와 같은 현상이 일어나는 것으로 판단된다.

이송 위치에 따른 상부 레일 샤프트의 변형량 분포는 Figure 10과 같고, 이송위치에 따른 응력, 변형량, 높이 변화를 정리하면 Table 2와 같다. 상부 레일 샤프트의 최대 변형량의 경우, 유리창 청소로봇이 끝단에 위치해 있을 때 레일 샤프트 전체의 변형량은 가장 크다. 하지만, 유리창 청소로봇의 상대적 위치 변화량을 본다면 끝단에서 가장 작은 것을 알 수 있다.

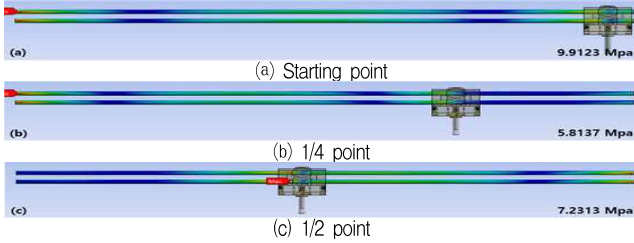


Figure 9. Stresses distribution of upper rail shaft according to the feeding position

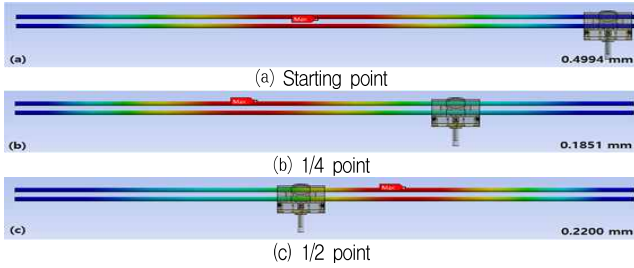


Figure 10. Amount of deformation of the upper rail shaft according to the feeding position

Table 2. Status of slab formwork system application

	Starting point	1/4 point	1/2 point
Maximum stress (Mpa)	9.9123	5.8137	7.2313
Maximum deformation (mm)	0.4994	0.1851	0.2200
The relative positional change amount (mm) of the cleaning device according to the feeding position	0.0072	0.0654	0.1263

반면에 유리창 청소로봇의 상대적 위치 변화량은 1/2지점이 가장 큰 것을 알 수 있다. 본 구조의 경우 상부 레일 샤프트 2개와 하부의 레일에 의해 지지되면 응력이 상하부로 분산되는 구조이지만, 장치가 이동하게 되어 1/2지점에 위치하게 되면 상부 레일 샤프트 중심부의 처짐에 의해 하부 레일로 힘이 집중하게 되고, 이 때문에 1/2지점에서 볼트의 응력이 커짐을 알 수 있다.

상부 레일 샤프트의 1/2지점에 로봇이 위치해 있을 때 샤프트의 처짐에 의해 발생하는 응력집중을 개선하기 위해서는 레일 샤프트의 처짐을 최소화 시켜야 하며, 결국 레일 샤프트의 단면2차 모멘트를 증가시키는 방향으로 설계가 선택되어야 할 것으로 판단된다.

### 4.3 풍력에 의한 응력분포

유리창 청소로봇은 외부에 지속적으로 설치될 것이므로, 바람으로부터 받는 영향을 검토할 필요가 있다. 따라서 본

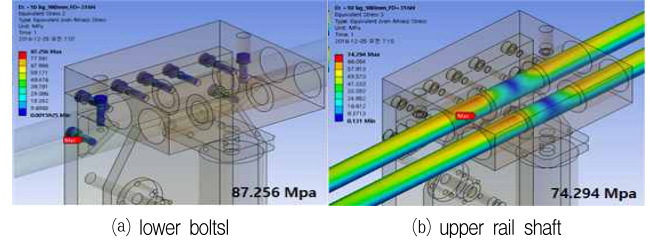


Figure 11. Stress distribution by wind (1/2 point)

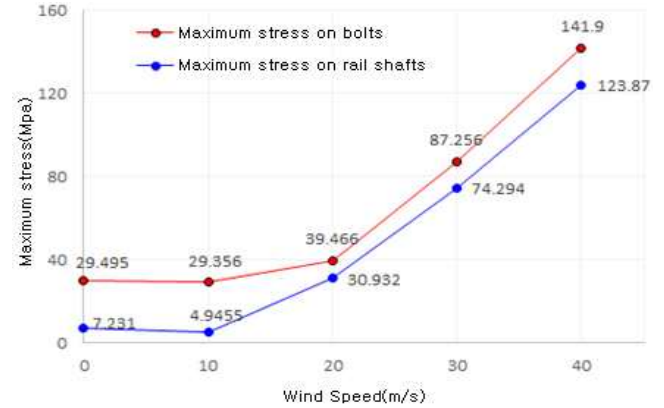


Figure 12. Maximum stresses in bolts and rail shafts depending on wind speed

연구에서는 풍력에 의한 응력분포를 시뮬레이션 하였다.

#### 4.3.1 분석조건

본 연구에서 설정한 분석조건은 다음과 같다.

- 바람조건 : 0~40m/s 풍속 설정
- 바람방향 : 컨트롤 박스 커버의 옆면 수직방향
- 시뮬레이션 조건 : 바람조건과 방향을 고려한 항력 계산
- 항력의 작용면적 : 사각형의 장치 측면(가로 1,360mm × 세로 380mm)
- 항력계수 : 1.05 적용(사각형 형상의 항력계수)
- 항력 계산식 ( $F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 C_D A$ ) 적용[8]  
 $F_D$  : 항력,  $\rho$  : 공기의 밀도,  $v$  : 공기의 속도,  $C_D$  : 항력계수,  $A$  : 단면적

#### 4.3.2 응력분포 시뮬레이션

본 연구에서 분석조건들을 대입하여 계산한 결과, 항력은 315.7N이다. 이를 바탕으로 유리창 청소로봇이 1/2지점에 위치해 있고 30m/s의 바람이 불 때를 시뮬레이션한 결과는

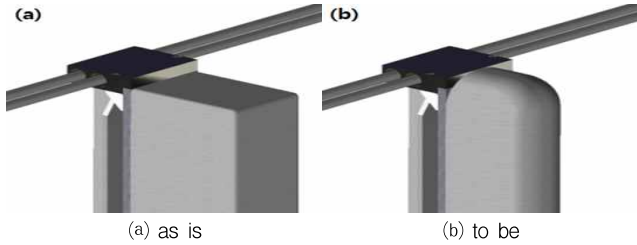


Figure 13. Alternative of shape improvement

Figure 11과 같다. 여기에서 볼트와 상부 레일 샤프트의 최대 응력이 각각 87.256Mpa와 74.294Mpa임을 알 수 있다. 그리고 바람이 불지 않을 때와 비교해 보면, 바람이 불 때 내부 응력이 4배 가량 증가함을 알 수 있다.

Figure 12는 풍속에 따른 볼트와 상부 레일 샤프트의 최대 응력을 나타낸 그래프이다. 풍속 10m/s 이하의 바람이 불 경우, 자중에 의한 응력과 크게 차이가 없다. 하지만 30m/s 이상부터는 내부 응력의 증가폭이 커지는 것을 확인할 수 있다. 우리나라 역대 태풍은 매미로, 2003년 9월 12일에 제주도에서 최대 순간 초속이 60.0m/s이었다. 이러한 점을 감안한다면, 지금의 유리창 청소로봇은 풍압에 대하여 보다 안전하게 설계될 필요가 있는 것으로 판단된다.

#### 4.3.3 해석

풍속에 의한 항력은 면적에 비례한다. 따라서 항력에 의해 발생하는 높은 응력을 개선하기 위해서는 기본적으로 바람을 맞는 부위의 면적을 최소화 시켜야 한다. 이와 더불어, 형상을 개선하여 항력계수를 줄여야 한다. 곡면의 경우 평면에 비해 50% 낮은 항력계수를 갖는다. 따라서 가능하다면, Figure 13 (a)와 같은 직육면체 형태를 Figure 12 (b)와 같은 곡면 형태로 변형하여 형상을 설계하면, 항력계수를 낮출 수 있다.

### 4.4 결합 공정 방법에 따른 응력 해석

#### 4.4.1 응력분포 시뮬레이션

앞선 시뮬레이션과 분석들을 통하여 유리창 청소장치에서 최대 응력 발생 부분이 볼트임을 확인하였다. 즉 부품간의 결합 요소인 볼트에서 집중응력이 발생하였다. 따라서 볼트에서 발생하는 전단응력을 감소시킬 필요가 있다. 볼트에서 발생하는 전단 응력을 감소시키기 위한 일반적인 방법은 볼트의 개수나 단면적을 넓히는 것이다. 그러나 구조체의 크기

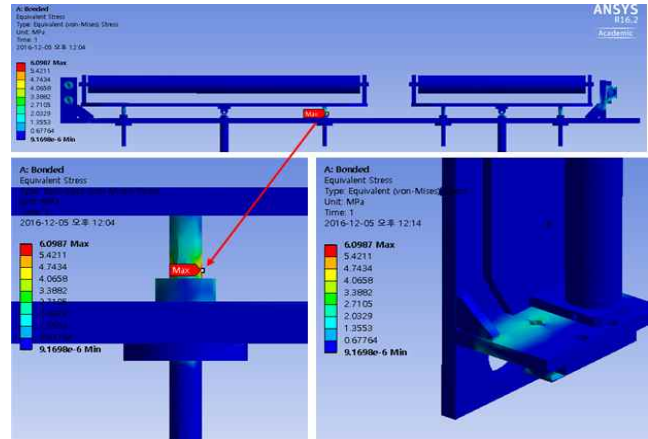


Figure 14. Stress distribution when bolting element is changed to welding

등 제약조건으로 인하여 볼트의 수량과 체결 면적을 증가시키는 데에 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 응력집중이 되는 부분의 체결방법을 볼팅에서 용접으로 변경하는 것으로 가정하여, 이송위치 1/2지점에서의 응력분포를 확인했다. 그 결과 Figure 14와 같이 최대 응력이 6.099Mpa인 것으로 나타났다.

#### 4.4.2 해석

체결방법을 용접으로 변경할 때의 최대 응력 6.099Mpa은 볼팅결합에서의 최대 응력 29.496Mpa의 20% 이하 수준이다. 따라서 결합방법의 개선만으로 80%이상의 응력 개선 효과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 특히 본 연구에서는 해석을 위해 가정한 bolt pretension 값은 체결방법과 나사의 종류에 따라 얼마든지 증가할 수 있는 값이라는 점을 감안할 때, 결합 공정 개선의 효과는 더욱 커질 수 있을 것으로 기대된다.

한편 체결방법을 용접으로 변경하면, 최대 응력 발생 위치가 전동 브러쉬 블럭과 연결되는 샤프트에서 발생하게 된다. 하지만 그 값은 크지 않아, 결합 부위에서 발생하는 최대 응력을 줄이기 위해서는 기존의 볼팅 방법이 아닌 용접등과 같은 접합 면적을 넓히는 공정 방법이 적합함을 알 수 있다. 그리고 본 유리창 청소로봇의 구조상, 볼트에 전해지는 힘이 전단력 또는 모멘트이기 때문에 볼트에 큰 전단응력을 발생시킨다. 볼트의 결합력을 최대한 활용하기 위해서는 볼트에 가해지는 힘이 수평방향으로 작용하게 기구물들이 설계되어야 한다.

#### 4.5 안전계수에 의한 평가

안전계수란 제작품의 재질, 하중, 해석(시험) 등의 구조적 불확실성에 대한 대비책으로 하중에 비해 재질이 어느 정도 여유를 가지는가를 나타내는 수치이다. 따라서 안전계수가 큰 값일수록 강도 여유를 많이 가지며, 식(1)과 같이 정의된다.

$$Factor\ of\ Safety = \frac{yield\ stress}{working\ stress} \text{ ----- (1)}$$

여기서 yield stress는 재료가 가지고 있는 항복 강도를 말하며, working stress는 해석 또는 시험을 통해 얻어진 구조의 최대 응력이다. 일반적으로 해석 안전계수의 응력은 유한요소해석을 통하여 얻어진 von-Mises응력을 사용한다[9]. 본 해석에서 얻어진 최대 응력이 발생하는 조건은 초속 40m/s의 태풍에 의한 항력 때문에 볼트에서 발생하는 응력이며, 이때의 최대 응력은 141.9Mpa이다. 볼트의 재료는 structural steel로 항복강도는 250Mpa이며, 따라서 안전계수는 약 1.76 이다.

안전계수를 지정하는 Cardullo 방법을 통해 본 구조가 가져야할 안전계수를 계산했다. Cardullo 방법에서 안전계수는 식(2)와 같이 정의한다[10].

$$안전계수 = a \times b \times c \text{ ----- (2)}$$

a는 파단강도(breaking strength)와 항복강도와의 비율을 뜻한다. 그런데 structural steel의 파단강도와 항복강도는 각각 550Mpa, 250Mpa 이므로, a는 2.2 이다. b는 충격계수를 나타내며, 태풍과 같은 강한 충격에는 3의 값을 사용한다. c는 재료의 결합수치로써 연강 등의 연성재료는 1.5를 사용한다. 이를 통해 본 구조가 가져야하는 안전계수를 계산하면 대략 10 정도이다. 하지만 본 구조는 위에서 언급했던 것처럼 1.76으로 매우 낮다. 본 구조가 안전계수 10을 가지기 위해서는 구조에서 발생하는 최대 내부응력이 25Mpa이하로 낮아져야 할 것으로 판단된다.

#### 4.6 설계 개선사항 도출

본 연구에서 분석대상으로 한 유리창 청소로봇의 구조는 상부의 레일 샤프트 2개와 하부의 가이드 레일에 의해 지지되는 구조이다. 이러한 구조는 이상적인 상태에서는 장치의 하중을 상하로 분배되어 안정적일 수 있다. 하지만 상하부위

간격이 일정하게 유지 되지 않으면, 하중의 균형이 무너질 우려가 크다. 이는 공정 및 조립 공차에 의해서 발생할 수도 있지만, 유리창 청소로봇 자체의 변형에 의해서도 발생할 수 있는 문제이다. 특히 이송 위치에 따라 시작점에서는 내부 응력의 크기가 작지만 중심부로 이동하게 되면서, 상부 레일 샤프트의 처짐에 의해 상하부의 응력지지 구조간의 거리가 좁아지게 되며 이로 인해 결합부위에서 큰 응력이 발생한다.

분석 결과, 실제로 상부 레일 샤프트에 처짐이 발생하는 것으로 파악되었다. 상부레일 샤프트를 중공축으로 설계하는 등 비틀림과 굽힘에 대한 강성을 키우면, 상부 레일 샤프트의 처짐을 어느 정도 막을 수 있을 것이다. 그러나 실제 장치를 건물에 적용하기 위해서는 레일 샤프트의 길이가 훨씬 길어져야 하므로, 상부의 레일에 하중이 지지되는 구조는 적합하지 않은 것으로 판단된다. 따라서 상부는 가이드 역할 만하고 하부 레일에서 하중을 지지하는 구조가 적합할 것으로 사료된다.

현재의 직육면체 형태의 외형은 풍속에 의한 압력을 많이 받는 구조이다. 따라서 풍속을 고려하여 항력을 줄이기 위해서는 우선 구조 설계를 통해 컨트롤 박스의 부피를 최소화할 필요가 있다. 또한 컨트롤 박스 커버의 형상을 곡면으로 설계하는 것도 항력을 줄이는 데에 크게 도움이 될 것이다.

본 유리창 청소로봇은 시제품으로 설계되었기 때문에 수 정보원이 용이한 볼트 조립방식을 채택 하였다. 그러나 볼트에 응력이 집중되는 등 구조적인 문제가 발생할 우려가 있는 것으로 파악되었다. 따라서 향후에 청소로봇이 안정화되어 양산 시스템으로 전환되면, 모듈별 용접으로 부품을 제작하는 등 체결방법을 변경할 필요가 있다. 만약 부득이하게 볼트 체결이 필요한 부분에서는 볼트에 가해지는 힘이 전단응력이 아닌 인장력이 작용하도록 구조를 설계하여야 한다.

본 연구의 구조해석에서 직접 분석된 결과는 아니나, 이송 레일에 이물질이 침투할 경우에 유리창 청소로봇의 이송에 문제가 발생할 가능성이 제기되었다. 따라서 이물질의 침투를 방지할 수 있게 이송 레일의 설계를 개선할 필요가 있다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 유리창 청소장치에 발생할 수 있는 응력과 발생 원인에 대해 분석했다. 분석 결과, 실제로 상부 레일 샤프트에 처짐이 발생하고, 결합부위에서 큰 응력이 발생하

는 것으로 파악되었다. 이를 개선하기 위해서는 결합부위의 체결 방법을 용접 등으로 바꾸거나 볼트에 전단력이 작용하지 않는 구조로 설계 되어야 한다.

본 로봇의 경우 고층의 건물에 있어 빠른 풍속에 노출될 가능성이 있는 장치이다. 따라서 풍속에 의해 발생할 수 있는 항력도 고려가 되어야 한다. 해석 결과, 기존의 구조의 경우 바람의 영향에 취약한 구조로, 30m/s 이상의 풍속에 대해 안전계수가 1.76에 불과하였다. 실제 요구되는 안전계수는 10으로, 이에 비해 아주 낮은 수치이며, 결합부위의 파단이 우려된다. 이를 개선하기 위해서는 바람을 맞는 단면적의 크기를 줄이거나 커버의 형상을 바꾸어 항력계수를 낮추는 구조로 설계 되어야 한다. 또한 외부에 노출되어 있는 것을 감인하여, 이물질들이 이송 레일에 침투되는 것을 막는 구조가 필요하다.

본 연구는 유리창 청소로봇의 1차 프로토타입을 대상으로 하여 시뮬레이션을 통해 응력 집중부위를 도출한 것으로, 최적화된 설계결과를 대상으로 분석한 것이 아니라는 한계를 갖는다. 하지만 도출된 해석 결과는 유리창 청소로봇의 설계 개선에 직접 적용되어, 설계의 완성도를 높이는 데에 기여할 것으로 기대된다.

## 요 약

최근에 개발되고 있는 가이드레일형 유리창 청소로봇은 현재 첫 번째 시작품이 제작되어 시험 중인 상황으로, 그 크기와 하중이 최적화 되지 못한 상황이다. 본 연구에서는 현재의 유리창 청소로봇을 개선하고 구조적 안전성을 확보하기 위한 정량적인 데이터를 도출하기 위하여 응력해석을 진행하였다. 유리창 청소로봇의 자중, 풍압 등에 의한 응력을 해석한 결과, 자중에 의한 처짐, 풍속에 대한 항력 등에서 개선의 여지가 있음을 발견하였다. 도출된 해석 결과는 유리창 청소로봇의 설계 개선에 직접 적용될 예정이며, 이를 통하여 설계의 완성도를 높일 수 있을 것으로 기대된다.

**키워드** : 건설자동화, 응력분석, 3D모델링, 유지관리, 유리창청소, 청소로봇

## Acknowledgement

This work was supported by the Ministry of Land,

Industry and Transport of South Korea [grant number 17CTAP-C117255-02]

## References

1. Kim KT, Jun YH, Shin EY. Feasibility study of the development of guiderail-type window cleaning equipment. Proceeding of Korea institute of building construction; 2016 May 19-21; Jeju, Korea, Seoul(Korea):Korea institute of building construction; 2016 p. 85-6.
2. Kim KT, Jun YH, Kim JT, Park KH. Structural analysis of self-weight of cleaning robot for external windows. Proceeding of Korea institute of building construction; 2017 Nov 19-20; Busan, Korea, Seoul(Korea): Korea institute of building construction; 2017 p. 203-4.
3. Kim KT, Jun YH. A Problem deriving of the window cleaning work through current status analysis. Proceeding of Architectural institute of Korea; 2016 Oct 4-6; Busan, Korea, Seoul(Korea): Architectural institute of Korea; 2016 p. 1578-9
4. Kim KT, Shin EY, Jun YH. Intelligent external window cleaning robot using window protrusion avoiding technology: Korea institute of civil engineering and building technology; 2017 Jun. Report No: 16CTAP-C117255-01.
5. Kim KT, Han JG, Kim CH. An Analysis and improvement of exterior wall maintenance works for high-raised building: Korea institute of construction engineering and management. Proceeding of Korea institute of construction engineering and management; 2010 Nov 5-6; Inchun, Korea, Seoul(Korea): Korea institute of construction engineering and management; 2010 p. 359-60
6. Building maintenance unit [Internet]. JP, Nihon Bisoh co.; 2017 Dec Available from: <https://www.bisoh.co.jp/en/gallery/permanent/27.html>
7. BMR Research group. Developent of intelligent robotic system for high-rise building maintenance: Hanyang university; 2015 Apr. 1327p. Report No: R&D10-technology innovation-E03
8. Newton, I. Newton's Principia mathematica. The mathematical principles of natural philosophy. New York : Daniel Adee; 1687. Book 2. Section 7. Proposition 37; p. 338-43.
9. Beer, F and Johnson, R. Mechanics of materials. 2nd rev. ed. McGraw-Hill Higher Education, New York(US); 1992. 740 p.
10. Burr, A and Cheatham, J: Mechanical design and analysis, 2nd rev. ed. Prentice-Hall, New Jersey(US); 1995. section 5.2. Strain, Stress and Strength; p. 256-60.