



#### 공학석사 학위논문

# 등장기 최적설계를 이용한 빌딩외벽 청소로봇의 위치오차보정

Positioning error compensation of the Facade cleaning robot by optimal design of the rope winch

2021 년 8 월

서울대학교 대학원

기계공학부

경 홍 준

## 등장기 최적설계를 이용한 빌딩외벽 청소로봇의 위치오차보정

Positioning error compensation of the Facade

cleaning robot by optimal design of the rope

winch

지도 교수 차석 원

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함 2021 년 4 월

> 서울대학교 대학원 기계공학부 경 홍 준

경홍준의 공학석사 학위논문을 인준함 2021 년 8 월

위원	년 장	박용 래
부위	원장	차 석 원
위	원	이 호 원

초 록

본 연구는 빌딩외벽청소로봇의 등강기 최적화를 목적으로 수행되었다. 빌딩외벽청소로봇은 건물 꼭대기에 고정된 로프와 풀리 간의 마찰을 이용해 이동하는 시스템이다. 그러나 다양한 요인에 의하여 이동 중에 위치 오차가 발생하며, 이는 로봇 위치 정밀도에 악영향을 미치며 청소 성능 저하로 이어질 수 있다. 이 문제를 해결하기 위해 로봇의 위치정밀도 확보를 목표로 연구를 수행하였다. 우선 위치오차의 예측을 통해 영향을 미치는 변수에 대하여 탐색하였다. 이후 위치반복도 확보를 위하여 다구치 방법론을 이용한 견실최적설계 실험을 수행하였으며, 2회에 걸쳐 실험을 수행하였다. 위치반복도 최적화 결과 압력모듈 1개, 풀리 쐐기각도 6°, 압력모듈 힘 45N의 설계변수 조합에서 최적 위치반복도를 얻을 수 있음을 확인하였다. 상기 실험에서 확보한 설계변수 조합을 활용하여 위치오차 보정 실험을 수행하였다. 위치오차는 장력 차이에 의하 로프의 변형과 백래시로 정의하였으며. 위치오차 보정은 피드포워드 제어기법을 활용하였다. 위치오차 보정값은 견실최적설계 실험에서 확인된 위치 측정값을 기반으로 보정식을 통해 결정하였으며, 백래시는 10회의 반복실험을 통하여 결정하였다. 위치 오차 보정 실험 결과, 해석 방법에 따라 92-95% 이상 위치오차가 개선되었음을 확인하였다. 이번 연구 결과를 통해 빌딩외벽청소로봇의 위치오차에 대한 경향성을 확인하였으며, 로봇의 이동 시의 위치 정밀도 향상에 기여하였다.

주요어 : 빌딩외벽청소로봇, 등강기, 위치정밀도, 위치반복도, 위치오차 모델링 하 버·2010-27050

학 번:2019-27950

i

목 차

제1장서	론	1
1.1	연구의 배경	1
12	연구의 내용	2
1.0		
제 2 장 로프	드 슬립량에 대한 이론	3
2.1	로프와 풀리의 자유물체도	3
2.2	로프와 풀리 간 역학식	6
	2.2.1 상승 시 풀리에 작용하는 장력	6
	2.2.2 하강 시 풀리에 작용하는 장력	9
	2.2.3 슬립에 의한 로프의 인장	10
제 3 장 다극	구치방법론을 활용하 겨싴최적석계	11
31	무제 정의	11
3.2	목적함수 석계변수 고객사용주거 S/N비 것의	11
3.3	식현장치와 방법	14
3.4	격시최전석계 1차 시헌	14 16
2.5	거시치저서게 9차 시허	10
0.0	신 코의 이 코게 길게 길 급	
제 4 장 위치	이오차 보정	20
4.1	위치 오차의 정의	
4 2	백래시의 측정	20
4.3	피드포워드제어를 확용하 위치 9차 보정	21
4 4	위치 오차 보젓 결과	22
1.1		
제 5 장 결훈	2	24
, - 0 40		
참고문헌		25
Abstract		

## 표 목차

[丑	1]	표기법	4
[표	2]	등장기의 고객사용조건	12
[丑	3]	견실최적설계 1차실험 설계변수	12
[丑	4]	견실최적설계 1차실험 결과	16
[표	5]	견실최적설계 2차실험 설계변수	18
[丑	6]	견실최적설계 2차실험 결과	18
[丑	7]	백래시 측정 결과	21
[표	8]	위치오차 측정 결과	22

## 그림 목차

[그림 1] 빌딩외벽청소로봇 프로토타입(위), 멀티풀리차동기어 등 강기(아래)
[그림 2] 로프와 풀리의 자유물체도3
[그림 3] 로프와 풀리의 슬립존6
[그림 4] 등강기 실험 모듈에서 압력 모듈의 위치13
[그림 5] 풀리 쐐기 각도 별 형상13
[그림 6] 압력 모듈(왼쪽), 압력모듈 힘의 방향(오른쪽)14
[그림 7] 무게 모듈 및 리니어 마그네틱 엔코더15
[그림 8] 테스트벤치 3D 모델링(왼쪽), 테스트벤치(오른쪽)15
[그림 9] 위치 반복도 측정 방법(ISO 규격 참조)15
[그림 10] 견실최적설계 1차 실험의 민감도 분석17
[그림 11] 견실최적설계 1차 및 2차 실험의 민감도 분석19
[그림 12] 위치오차 보정식의 수립20
[그림 13] 백래시 측정 방법21
[그림 14] 피드포워드 제어 블록 다이어그램22
[그림 15] 오차 보정 전 측정 위치23
[그림 16] 오차 보정 후 측정 위치23

#### 제1장서 론

#### 1.1 연구의 배경

높이가 150m 이상인 초고층 빌딩은 전 세계 어디에서나 볼 수 있다 [1]. 이 건물들은 일반적으로 인간 노동자들이 로프를 사용하거나 곤돌라를 이용하여 관리하는데, 이는 노동자를 위험에 처할 수 있고, 심지어 치명적인 부상이나 사망에까지 이르게 할 수 있다. International Window Cleaning Association에 따르면 2010년과 2014년 사이에 매년 최소 한 건의 외벽청소 노동자가 사망하였다고 발표하였다 [2].

이러한 사고를 줄이기 위하여 청소노동자를 로봇으로 대체하기 위한 연구가 수행되었으며 다양한 형태의 빌딩외벽청로봇이 고안되었다. TITO500, SIRIUSc 및 CAFE 로봇은 건물 상단에 위치한 크레인을 사용하여 건물 상하 이동이 가능하다 [3, 4, 5]. BFMR(Building Façade Management Robot)은 건물에 레일을 설치하여, 로봇의 등하강 시 활용한다 [6]. 로봇의 등하강을 위한 장비도 개발됐다. KITE [7] 및 SkyScraper-I는 건물 상부에 고정된 장비를 활용하여 등하강 한다 [8]. 그러나 건물 외부에 추가로 장비 설치 하는 것은 비용이 증가하며, 시간이 많이 소요된다는 단점이 있다.

우리 연구그룹에서 만든 FCR-M1(Facade Cleaning Robot Module1)은 건물의 곤돌라를 이용해 건물 상하 이동을 할 수 있기 때문에 건물에 곤돌라가 있는 경우에 활용될 수 있다 [9].

모바일형 케이블 구동 로봇도 개발됐다. 이 로봇들은 로봇에 등장기와 케이블이 내장되어 있다. Wall Robot은 내장 등장기와 강철 케이블을 사용하여 위 아래로 이동할 수 있다 [10]. 하지만 등장기가 내장돼 있어 로봇의 무게가 늘어나 전력 소비량이 늘어나게 된다.

IPC Eagle(Integrated Professional Cleaning Eagle)은 강철 케이블을 활용하여 등하강 하며 케이블 끝이 고정되어 있지 않은 자유단형 등강시스템을 활용하였다 [11]. 케이블은 로봇 외부에 설치되기 때문에 제어해야하는 로봇의 무게가 줄어들게 된다. 하지만 건물이 높을수록 케이블의 무게가 무거워져 설치하기가 어렵고, 바람과 같은 외란에 취약하여 건물의 창문이나 기둥을 손상시킬 수 있다.

우리 연구그룹에서는 다양한 유형의 건물에 쉽게 설치하기 위하여 건물 상단에 로프를 고정하고 이를 활용하여 움직이는 단일 풀리 등장기를 개발하였다. 이 시스템은 등장기를 빌딩외벽청소로봇

1

플랫폼(ROPE RIDE)에 설치되여 로봇의 무게를 줄였다 [12]. 그러나 로봇의 위치가 슬립과 부하 무게에 영향을 받아 위치 정밀도가 떨어진다.

더블 트랙션 윈치는 드럼 2개를 사용하는 시스템이다. 드럼에는 로프가 미끄러지지 않도록 홈이 나있다. 하지만 하중이 분산되지 않기 때문에 드럼에 힘이 집중되고, 슬립을 방지하기 위한 드럼 정밀가공이 필요하기 때문에 생산비용이 증가한다 [13].

CTCU(Cable Traction Control Unit)는 멀티 풀리 유형의 등장기로 심해 구조물을 설치하는 데 사용된다. 이 시스템은 풀리가 파손되지 않도록 풀리 간에 하중을 분배하며, 또한 로프 인장에 의한 슬립은 풀리의 속도를 조절하여 보정할 수 있다. 하지만 각 풀리를 제어하기 위해 다수의 모터가 필요하기 때문에 시스템이 복잡해진다 [14].

#### 1.2 연구의 내용

우리 연구그룹에서는 위치 정밀도를 개선하기 위해 다중풀리 차동기어 등장기를 개발하였다 [15]. 이 시스템은 2개의 풀리와 중간부분의 차동기어 모듈 1개로 구성되어 있으며, 차동기어 모듈은 풀리에 가해지는 토크를 고르게 분배하여 풀리에 힘이 집중되는 것을 방지해준다. 또한 이 시스템을 운영하기 위해서는 건물옥상에 고정된 로프만 필요하기 때문에 비교적 쉽게 설치할 수 있는 장점이 있다.

로봇의 청소성능을 최대화하기 위해 등강기의 위치 정밀도와 반복도를 확보해야한다. 빌딩외벽청소로봇 시스템은 풀리와 로프의 마찰에 의해 구동되기 때문에 로프의 탄성, 로프와 풀리의 마찰 손실, 이동 방향 변경 시 백래시 등 다양한 요인에 의해 오차가 발생한다.

따라서 본 연구에서는 위치 반복도 확보를 위해 다구치 방법론을 이용한 견실최적설계 실험을 수행하고, 위치오차 보정 알고리즘을 이용하여 위치오차 보상 실험에 대하여 수행한다. 다구치 방법론을 활용하여 위치 반복도를 최적화하고 S/N 비에 따라 최적 설계 변수를 결정하였다. 최적화된 등강기 설계변수를 기반으로 피드포워드 제어를 통한 위치 오차 보정 알고리즘을 적용하여 위치 오차를 최소화하였다.

본 논문의 나머지 부분은 다음과 같이 구성하였다. 2장에서는 오차 예측 모델을 소개하였으며, 3장에서는 테스트 벤치를 소개 및 위치 반복도 확보를 위한 견실최적설계 실험에 대하여 기록한다. 4장에서는 로프의 백래시 측정 실험에 대해 소개하며, 보상 알고리즘을 사용하여 위치 정밀도가 향상 실험을 수행하였다. 결론은 5장에 제시하였다.

### 제 2 장 로프 슬립량에 대한 이론

2.1 로프와 풀리의 자유물체도



Façade-Cleaning Robot Prototype



Multi-Wound Differential Pulley Winch

그림 1. 빌딩외벽청소로봇 프로토타입(위), 멀티풀리차동기어 등강기(아래)



그림 2. 로프와 풀리의 자유물체도

표1. 표기법

'n	로프 질량 유량 (kg/s)
ρ	단위 부피 당 질량 (kg/m <sup>3</sup> )
A(s)	위치 s에서의 로프 단면적 (mm²)
v(s)	로프 속도 (m/s)
Т	로프 장력 (N)
dT	장력 증분 (N)
f	풀리에 작용하는 단위길이 당 접선 방향 마찰력 (N/m)
r	풀리 반지름 (mm)
d heta	각도 증분 (rad)
ds	위치 증분 (m)
dv	속도 증분 (m/s)
n	풀리에 작용하는 단위길이 당 수직 방향 수직항력 (N/m)
T(s)	위치 s에서의 로프 장력
$T_{ref}$	기준 장력 (N)
k	로프의 강성 (N)
$\varepsilon(s)$	위치 s에서의 변형률
$v_{ref}$	기준 속도(m/s)
T <sub>left</sub>	왼쪽풀리의 장력 (N)
$T_{right}$	오른쪽 풀리의 장력 (N)
$M_{motor}$	모터 토크 (Nm)
$T_1$	슬립존 이후의 오른쪽 풀리 장력 (N)
$T_2$	풀리 중간부분의 장력 (N)
$T_3$	슬립존 이전 왼쪽풀리의장력 (N)
$f_{ascend, left}$	상승 시 왼쪽풀리에 가해지는 단위길이 당 마찰력 (N/m)
$f_{ascend, { m right}}$	상승 시 오른쪽풀리에 가해지는 단위길이 당 마찰력 (N/m)
$\omega_{left}$	왼쪽 풀리의 각속도 (rad/s)
$\omega_{right}$	오른쪽 풀리의 각속도 (rad/s)
μ	로프와 풀리간 마찰계수
$ heta_{\mathit{slip,left,ascend}}$	상승 시 왼쪽풀리의 슬립각 (rad)
$ heta_{\mathit{slip}, \mathit{right}, \mathit{ascend}}$	상승 시 오른쪽풀리의 슬립각 (rad)
$ heta_{\mathit{slip,left,descend}}$	하강 시 왼쪽풀리의 슬립각 (rad)
$ heta_{\mathit{slip}, \mathit{right}, \mathit{descen}}$	하강 시 오른쪽풀리의 슬립각 (rad)
ε	로프의 변형률
Ε	로프의 탄성계수 (N/mm²)
A	도쓰의 단면적 (mm <sup>2</sup> )
$d\delta_{slip}$	슬립손에서의 도프 변형 길이 승문 (m)
$\delta_{slip}$	슬립손에서의 도프 변형 길이 (m)
$\delta_{slip,ascend}$	상승 시 슬립손에서의 로프 변형 길이 (m)

로프와 풀리의 자유물체도(그림2)를 통해 역학분석을 진행하였다. Eulerian Formulation을 채택하여 시간에 독립인 상태로 가정한다. ρ는 로프의 단위길이당 질량, A(s)는 로프의 단면적, v(s)는 로프의 이동 속도로 설정한다. 그리고 질량로프의 질량유량이 일정하다고 가정한다

$$\dot{m} = \rho A(s) v(s) = constant$$
 (1)

Tangential방향과 Normal 방향에 대하여 힘 평형 방정식을 적용하면

$$-T\cos\left(\frac{d\theta}{2}\right) + (T+dT)\cos\left(\frac{d\theta}{2}\right) - frd\theta = \dot{m}dv\cos d\theta \tag{2}$$

$$-Tsin\left(\frac{d\theta}{2}\right) - (T+dT)sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) + nds$$
  
=  $-\dot{m}vsin\left(\frac{d\theta}{2}\right) - \dot{m}(v+dv)sin\left(\frac{d\theta}{2}\right)$  (3)

 $d\theta \ll 1$ 으로 가정하면,  $\cos(d\theta/2) \Rightarrow 1$ 이고  $\sin(d\theta/2) \Rightarrow d\theta/2$  이고 다음과 같이 정리된다.

$$dT - fds = \dot{m}dv \tag{4}$$

$$\mathbf{n} = \frac{T - \dot{m}v}{r} \tag{5}$$

로프의 장력이 변함에 따라 로프의 인장이 이루어지기 때문에 풀리에 감기는 로프는 장력과 인장에 대한 추가식이 필요하다. 로프를 선형적인 탄성체라고 가정하며, 임의의 점 s에서의 로프 장력은 다음과 같다.

$$T(\mathbf{s}) = T_{ref} + k\varepsilon(s) \tag{6}$$

k는 탄성계수(N)이며  $T_{ref}$ 는 기준점의 장력이다. 또한 임의의 점에서의  $\varepsilon$  (s)는 로프의 속도와 기준점의 속도 $(v_{ref})$ 와 연관된다.

[16].

$$v(s) = v_{ref} \left( 1 + \varepsilon(s) \right) \tag{7}$$

Tref 를 0으로 가정하고 대입 정리하면

$$T(s) = k \left( \frac{v(s)}{v_{ref}} - 1 \right)$$
(8)

#### 2.2 로프와 풀리 간 역학식

슬립존은 로프가 풀리에 감겨있고, 진입단과 출구단의 장력의 차이가 발생하는 구간으로 정의한다. 양쪽 풀리에 생성되는 슬립존은 그림 2 와 같이 정의하고 슬립존 외에서는 장력이 일정하다고 가정한다. 이에 따라 슬립존에서 로프의 변형이 발생한다. [15, 17]



그림 3. 로프와 풀리의 슬립존

2.2.1 상승 시 풀리에 작용하는 장력

등장기의 풀리에 전달되는 토크는 차동기어 메커니즘에 따라 동등하게 분배된다고 가정한다. 이에따라 양쪽 풀리에 분배되는 토크는 다음과 같다.

$$T_{left} = \frac{M_{motor}}{2r} - (T_3 - T_2)$$
(9)

$$T_{right} = \frac{M_{motor}}{2r} - (T_2 - T_1)$$
(10)

정리하면,

$$T(s) = T_{left} = \frac{M_{motor}}{2r} - (T_3 - T_2) = k \left(\frac{r\omega_{left}}{v_{ref}} - 1\right)$$
(11)

$$T(s) = T_{right} = \frac{M_{motor}}{2r} - (T_2 - T_1) = k \left(\frac{r\omega_{right}}{v_{ref}} - 1\right)$$
(12)

$$v_{ref} = k \left( \frac{r\omega_{left}}{\frac{M_{motor}}{2r} - (T_3 - T_2) + k} \right)$$
(13)

$$v_{ref} = k \left( \frac{r \omega_{right}}{\frac{M_{motor}}{2r} - (T_2 - T_1) + k} \right)$$
(14)

위 식을 대입하여 정리하면

$$T(s) = \left(\frac{v(s)}{r\omega_{left}} \left(\frac{M_{motor}}{2r} - (T_3 - T_2) + k\right) - k\right)$$
(15)

$$T(s) = \left(\frac{v(s)}{r\omega_{right}} \left(\frac{M_{motor}}{2r} - (T_2 - T_1) + k\right) - k\right)$$
(16)

$$dT = dv = 0, f(s) = 0$$
 (17)

$$T(s) = T_{left} = \frac{M_{motor}}{2r} - (T_3 - T_2)$$
(18)

$$v(s) = r\omega_{left}, n(s) = \frac{T_{left} - \dot{m}r\omega_{left}}{r}$$
(19)

2) 왼쪽풀리의 슬립존

상승시 모터는 시계방향으로 작용하므로 마찰력은 반대로 작용한다.

$$f_{ascending,left} = \mu n \tag{20}$$

식 (1)~(5) 에 의하여,

$$\frac{dT - \dot{m}dv}{T - \dot{m}v} = \mu d\theta \tag{21}$$

$$\theta_{slip,left,ascend} = \frac{1}{\mu} \ln \left( \frac{\left( T(s) - \dot{m}v(s) \right)}{T_{left} - \dot{m}r\omega_{left}} \right)$$
(22)

$$T(s) - \dot{m}v(s) = \left(\frac{M_{motor}}{2r} - (T_3 - T_2) - \dot{m}r\omega_{left}\right)e^{\mu\theta_{slip,left,ascend}}$$
(23)

 $X = \frac{M_{motor}}{2r} - (T_3 - T_2) - \dot{m}r\omega_{left}$ 라고 설정하고, 대입 정리하면,

$$T(s) = \left[X + \frac{\dot{m}r\omega_{left}X}{(X+k)}\right]e^{\mu\theta_{slip,left,ascend}} + \frac{\dot{m}r\omega_{left}k}{(X+k)}$$
(24)

$$dT = dv = 0, f(s) = 0$$
 (25)

$$T(s) = T_{right} = \frac{M_{motor}}{2r} - (T_2 - T_1)$$
(26)

$$v(s) = r\omega_{right}, n(s) = \frac{T_{right} - \dot{m}r\omega_{right}}{r}$$
(27)

4) 오른쪽풀리의 슬립존왼쪽풀리에서와 유사하게 전개하면,

$$f_{ascend,right} = \mu n \tag{28}$$

$$\theta_{slip,right,ascend} = \frac{1}{\mu} \ln \left( \frac{\left( T(s) - \dot{m}v(s) \right)}{T_{right} - \dot{m}r\omega_{right}} \right)$$
(29)

$$T(s) - Gv(s) = \left(\frac{M_{motor}}{2r} - (T_2 - T_1) - \dot{m}r\omega_{right}\right)e^{\mu\theta_{slip,right,ascend}}$$
(30)

$$Y = \frac{M_{motor}}{2r} - (T_2 - T_1) - \dot{m}r\omega_{right}$$
라고 설정하고 정리하면,

$$T(s) = \left[Y + \frac{\dot{m}r\omega_{right}Y}{(Y+k)}\right]e^{\mu\theta_{slip,right,ascend}} + \frac{\dot{m}r\omega_{right}k}{(Y+k)}$$
(31)

양쪽 풀리에 전달되는 토크/장력식은 모터의 방향이 반대로 바뀌게 되므로 다음과 같이 된다.

$$T_{left} = \frac{M_{motor}}{2r} + (T_3 - T_2)$$
(32)

$$T_{right} = \frac{M_{motor}}{2r} + (T_2 - T_1)$$
(33)

이고, 토크전달식과 장력속도식을 결합하면

$$T_{left} = \frac{M_{motor}}{2r} + (T_3 - T_2) = k \left(\frac{r\omega_{left}}{v_{ref}} - 1\right)$$
(34)

$$T_{right} = \frac{M_{motor}}{2r} + (T_2 - T_1) = k \left(\frac{r\omega_{right}}{v_{ref}} - 1\right)$$
(35)

$$v_{ref} = k \left( \frac{r\omega_{left}}{\frac{M_{motor}}{2r} + (T_3 - T_2) + k} \right)$$
(36)

$$v_{ref} = k \left( \frac{r \omega_{right}}{\frac{M_{motor}}{2r} + (T_2 - T_1) + k} \right)$$
(37)

위 식을 대입하여 정리하면

$$T(s) = \left(\frac{v(s)}{r\omega_{left}} \left(\frac{M_{motor}}{2r} + (T_3 - T_2) + k\right) - k\right)$$
(38)

$$T(s) = \left(\frac{v(s)}{r\omega_{right}} \left(\frac{M_{motor}}{2r} + (T_2 - T_1) + k\right) - k\right)$$
(39)

앞선 상승시의 슬립존과 유사하게 전개하면 하강시 슬립존의 최종 장력식은 다음과 같다.

1) 왼쪽풀리의 슬립존 $Z = \frac{M_{motor}}{2r} + (T_3 - T_2) - \dot{m}r\omega_{left}$ 라고 설정하고정리하면,

$$T(s) = \left[Z + \frac{\dot{m}r\omega_{left}Z}{(Z+k)}\right]e^{-\mu\theta_{slip,left,descend}} + \frac{\dot{m}r\omega_{left}k}{(Z+k)}$$
(40)

$$T(s) = \left[W + \frac{\dot{m}r\omega_{right}W}{(W+k)}\right]e^{-\mu\theta_{slip,right,descend}} + \frac{\dot{m}r\omega_{right}k}{(W+k)}$$
(41)

2.2.3 슬립에 의한 로프의 인장

장력에 대한 식이므로, Hooke's Law과 실험을 통해 구한 EA값을 활용하여 예측되는 슬립오차량을 구할 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{T}{EA} \tag{42}$$

$$d\delta_{slip} = \varepsilon r d\theta = \frac{1}{EA} \int_0^s T(s) \, ds \tag{43}$$

$$\delta_{slip} = \delta_{slip,ascend} + \delta_{slip,descend} \tag{44}$$

#### 제 3 장 다구치방법론을 활용한 견실최적설계

#### 3.1 문제 정의

이번 연구는 빌딩외벽청소로봇의 위치 정밀도를 높여 청소 성능을 개선하는 것을 목표로 했다. 이전 장에서는 자유물체도 기반 로프와 풀리간의 역학식을 통해 위치 오차를 예측했다. 그러나 위치 반복도를 확보하지 않은 상태로 위치 오차 보정을 수행하면 위치 정밀도가 떨어질 수 있다. 때문에 위치 반복도가 우선 확보되어야 하며 다구치 방법론을 사용하여 견실최적설계 실험을 수행하였다.

다구치 방법론은 실험계획법의 방법 중 하나이며 실험 횟수를 대폭 줄일 수 있고, R&D 생산성을 높이며, 다양한 분야에 적용할 수 있다는 장점이 있다.

실험은 다음과 같이 수행하였다. (1단계) 최적화할 목적함수를 선택한다; (2단계) 목적함수에 영향을 미치는 고객사용조건 및 설계 변수를 선정하고, 요인의 수준을 선택한다; (3단계) 직교 배열을 선택한다; (4단계) 설계변수를 직교배열에 할당한다; (5단계) 설정된 설계변수에 대하여 실험을 수행한다; (6단계) 신호 대 잡음비(S/N) 분석을 수행하여 결과를 분석한다; (7단계) 최적설계변수를 결정한다 [18].

#### 3.2 목적함수, 설계변수, 고객사용조건, S/N 비 정의

지정된 위치에서의 오차는 (x<sub>ii</sub>) 는 다음과 같이 정의한다.

$$x_{ij} = P_{ij} - P_i \tag{45}$$

여기서  $P_{ij}$ 는 실제 측정된 위치를 나타내고  $P_i$ 는 목표 위치를 나타낸다. 이 실험은 등강기의 위치 오차를 최소화하기 위한 것이었기 때문에, 목적 함수 (y)는 위치 오차의 표준 편차로 정의하였다.

$$y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{n} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2}$$
(46)

여기서  $\bar{x}_i$  는 각 목표 위치에서의 오차 평균을 나타내고 n 은 실험횟수를 나타낸다.

실험은 다음 고객사용조건(표2), 설계변수(표3)에서 수행되었다. 빌딩외벽청소로봇 작동 시 중량, 모터속도, 가속도는 제어하기 어렵기 때문에 고객사용조건으로 설정하여 2단계로 구분하였다.

그개사용조거	수	준1	수준2			
고격지중도신	$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$		
중량	60 kg	60 kg	10 kg	10 kg		
모터속도	2,000 rpm	2,000 rpm	5,000 rpm	5,000 rpm		
ㅁ더기소디	1,000	1,000	6,000	6,000		
	rpm/s	rpm/s	rpm/s	rpm/s		
이동방향	상승	하강	상승	하강		

표 2. 등장기의 고객사용조건

중량	60 kg	60 kg	10 kg	10 kg			
모터속도	2,000 rpm	2,000 rpm	5,000 rpm	5,000 rpm			
ㅁ티기소ㄷ	1,000	1,000	6,000	6,000			
고니/기ㅋㅗ	rpm/s	rpm/s	rpm/s	rpm/s			
이동방향 상승 하강 상승 하강							
표 3 겨식최적석계 1 차식험 석계변수							

기호	설계변수	수준1	수준2	수준3
<i>x</i> <sub>1</sub>	압력모듈 갯수 (개)	1	2	_
<i>x</i> <sub>2</sub>	풀리 쐐기 각도(°)	4	5	6
<i>x</i> <sub>3</sub>	압력모듈 힘(N)	30	45	60

설계변수는 압력 모듈 수(그림 4), 풀리 쐐기 각도(그림 5), 압력 모듈 힘(그림 6)로 선정하였다. 압력 모듈은 풀리에 감긴 로프를 수직으로 힘을 가하여 등강기 초기 장력을 만들어준다. 풀리 쐐기 각도는 로프와 풀리 사이의 마찰력이 로봇 이동에 있어서 중요한 요인이기 때문에 풀리 쐐기 각도를 설계변수로 선정하였다. 이전 연구에서는 6°, 10°, 18° 쐐기 각도를 선정하였으며 [19], 이번 견실최적설계 1차 실험에서는 4°, 5°, 6°, 견실최적설계 2차 실험에서는 6°, 8°, 9°의 쐐기 각도에 대하여 탐색하였다.

하나의 2-수준 설계 변수(압력 모듈 갯수)와 두 개의 3-수준 설계 변수(풀리 쐐기각도 및 압력모듈 힘)가 정의되었기 때문에 L<sub>18</sub>(2<sup>1</sup>×3<sup>7</sup>) 다구치직교 배열을 선택하였다.

또한 위치 오차 표준 편차를 최소화하는 것을 목표하기 때문에 S/N비는 망소 설계목표 기능변수로 정의하였다.

S/N ratio = 
$$-10 \log \left| \frac{(y_1)^2 + (y_2)^2 + \dots + (y_n)^2}{n} \right|$$
 (47)



그림4. 등강기 실험 모듈에서 압력 모듈의 위치



그림5. 풀리 쐐기 각도 별 형상



그림6. 압력 모듈 (왼쪽), 압력모듈 힘의 방향 (오른쪽)

#### 3.3 실험장치와 방법

실험은 테스트벤치로 진행하였으며, 로봇에 장착한 등장기와 동일 메커니즘으로 설계하였다. 실험장치는 그림 7과 같이 무게 모듈, 등장기 모듈, 테스트 벤치의 3개 섹션으로 구성되어 있다. 등장기 모듈은 모터 동력을 이용하여 구동되며, 중간부분의 차동기어는 모터동력을 양쪽 풀리에 균등하게 분배한다고 가정한다. 무게 모듈을 활용하여 중량을 조절 할 수 있으며, 테스트 벤치는 리니어가이드를 따라 상하 운동을 한다 (그림 8). 또한 무게 모듈의 정확한 위치를 측정하기 위해 리니어 마그네틱 엔코더를 테스트 벤치에 수직으로 부착하였다 (분해능: 0.02mm).

그림 9와 같이 위치 반복도를 측정하기 위해 국제 표준화 기구 (ISO) 위치반복도 측정 규정을 활용하였다 [20]. 지정된 다섯군데의 위치에서 오차를 측정하였으며, 각 실험 당 5회 반복하여 측정하였다. 실험에 사용된 로프는 일상생활에서 널리 사용되고 있는 합성섬유로프 (나일론, 지름 6mm)를 사용하였다.



그림 7. 무게 모듈 및 리니어 마그네틱 엔코더



그림 8. 테스트벤치 3D 모델링(왼쪽), 테스트벤치(오른쪽)



그림 9. 위치 반복도 측정 방법(ISO 규격 참조)

#### 3.4 견실최적설계 1차 실험

전실최적설계 1차 실험 결과는 표 4에 요약되어 있다. 위치오차 표준편차 (위치반복도)와 S/N비는 각각 (46)와 (47)를 이용하여 계산하였다. 표 4와 같이 압력 모듈 1개, 풀리 쐐기각도 6°, 압력 모듈 힘 45N의 조합에서 위치 반복도가 최적점임을 확인하였다. 민감도 분석 그래프 (그림 10)에서도 쐐기 각도가 증가함에 따라 S/N 비가 증가하였고 압력 모듈 힘은 45N에서 정점을 찍었다. 위의 결과는 실험 번호 8번에서 최적 위치반복도를 가짐을 확인하였다. 이에 실험 번호 8이 위치 반복도에 대한 최적의 설계변수 조합으로 잠정적으로 결정하였다.

실 험 비	전	계변 수준	수	고객사용	S/N 비			
빈 호	<i>x</i> <sub>1</sub>	<i>x</i> <sub>2</sub>	<i>x</i> <sub>3</sub>	$y_{N_1}$	$y_{N_2}$	$y_{N_3}$	$\mathcal{Y}_{N_4}$	[QB]
1	1	1	1	0.319	0.507	0.358	0.480	7.46
2	1	1	2	0.273	0.352	0.362	0.418	9.00
3	1	1	3	0.211	0.417	0.360	0.381	9.09
4	1	2	1	0.362	0.535	0.426	0.478	6.84
5	1	2	2	0.152	0.407	0.267	0.351	10.18
6	1	2	3	0.362	0.453	0.241	0.386	8.67
7	1	3	1	0.229	0.273	0.263	0.320	11.27
8	1	3	2	0.085	0.102	0.224	0.290	14.21
9	1	3	3	0.116	0.078	0.509	0.760	6.69
10	2	1	1	0.469	0.742	0.751	0.842	2.92
11	2	1	2	0.246	0.413	0.283	0.416	9.18
12	2	1	3	0.098	0.121	0.439	0.501	9.32
13	2	2	1	0.112	0.133	0.439	0.646	7.95
14	2	2	2	0.329	0.619	0.336	0.404	7.17
15	2	2	3	0.258	0.290	0.440	0.497	8.30
16	2	3	1	0.141	0.310	0.626	0.641	6.39
17	2	3	2	0.279	0.347	0.323	0.430	9.14
18	2	3	3	0.319	0.358	0.408	0.392	8.63

표 4 견실최적설계 1 차실험 결과



그림 10. 견실최적설계 1차 실험의 민감도 분석

민감도 분석 결과에 따라 설계변수 주변 값의 추가탐색이 필요하다. 압력모듈의 경우 최대 2개까지 설치되도록 설계하였기 때문에 S/N비가 더 높은 값인 압력모듈 갯수 1개로 고정한다. 풀리 쐐기각도의 경우 각도가 증가함에 따라 민감도도 증가하므로 6°보다 더 높은 값의 탐색이 필요하다. 이에 따라 8°, 9°의 각도에서 추가 탐색을 한다. 또한 압력모듈의 힘의 경우 민감도가 45N에서 정점을 찍었기 때문에 주변값을 검증할 수 있다. 압력모듈힘의 범위를 좁히고 37.5, 45, 52.5N의 값을 사용하였다.

#### 3.5 견실최적설계 2차 실험

견실최적설계 1차실험에서 추가로 도출한 설계변수는 표 5에 요약하였으며, 견실최적설계 2차실험 결과는 표 6에 정리하였다. 실험 결과 실험번호 2번 조합인 풀리 쐐기각도 6°, 압력 모듈 힘 45N 에서 가장 높은 S/N 비를 보였다. 실험번호 2번 그림 11과 같이 조합은 민감도 분석 결과에서도 가장 높은 S/N비를 보였다.

기호	설계변수	수준1	수준2	수준3
<i>x</i> <sub>1</sub> ′	풀리 쐐기 각도(°)	6	8	9
<i>x</i> <sub>2</sub> ′	압력모듈 힘 (N)	37.5	45	52.5

표 5. 견실최적설계 2 차실험 설계변수

따라서 압력모듈 1개, 풀리 쐐기 각도 6°, 압력모듈 힘 45N의 조합에서 위치반복도가 가장 우수하다는 결론에 이르렀다. 이제 등강기 설계변수의 위치 반복도를 확보하였으므로 이를 기반으로 위치오차 보정을 수행한다.

실 험	설계 수	변수 준	고객시	S/N ਸੀ			
번 호	<i>x</i> <sub>1</sub> ′	<i>x</i> <sub>2</sub> ′	$y_{N_1}'$	$y_{N_2}'$	$y_{N_3}'$	${\mathcal Y}_{N_4}'$	[dB]
1	1	1	0.274	0.268	0.418	0.426	9.01
2	1	2	0.140	0.076	0.139	0.246	15.79
3	1	3	0.187	0.186	0.257	0.335	12.07
4	2	1	0.377	0.556	0.327	0.379	7.56
5	2	2	0.231	0.204	0.258	0.195	13.02
6	2	3	0.268	0.330	0.373	0.478	8.63
7	3	1	0.562	0.894	0.724	0.846	2.30
8	3	2	0.484	0.425	0.233	0.341	8.35
9	3	3	0.299	0.707	0.219	0.268	7.52

표 6. 견실최적설계 2 차실험 결과



#### 제 4 장 위치 오차 보정

#### 4.1 위치 오차의 정의

위치 오차는 슬립존에서 장력차이에 의한 로프의 변형, 방향 전환 시 백래시로 정의하였다. 제2장에서 로프의 장력과 슬립존 변형오차에 대하여 예측하였다. 이를 반영하여 위치오차 보정식을 실험적으로 추정하였다. 위치오차보정식은 실험조합 8번의 위치측정 데이터를 기반으로 선형회귀하여 식을 수립하였다. 식 (48)과 (49)은 각각 상승, 하강시의 위치오차 보정식이다.

$$\delta_{slip\ ascend} = 3.6x - 3.1\ (mm) \tag{48}$$

$$\delta_{slip\_descend} = 36.9x - 74.7 \,(mm) \tag{49}$$



그림12. 위치오차 보정식의 수립

#### 4.2 백래시의 측정

백래시는 로봇의 이동 방향이 상승에서 하강으로의 방향 전환 시 발생한다. 백래쉬는 실험을 통하여 측정되었다. 최상단 3개 지점을 선정하여 그림 14와 같이 방향전환이 발생했을 때 이동 거리를 측정하였다. 백래시 측정을 위한 공식은 다음과 같다.

$$\delta_{backlash} = (P_5 - P_4) - (P_6 - P_5) \tag{50}$$

백래시를 10회 측정하여 평균으로 계산하였고, 최종적으로 산출한 백래시 값은 0.02m으로 결정하였다.



그림 13. 백래시 측정 방법

실험번호	P <sub>6</sub>	$P_5$	P4	Backlash (m)
1	0.509	0.011	-0.507	0.019
2	0.509	0.011	-0.507	0.020
3	0.509	0.010	-0.507	0.019
4	0.508	0.011	-0.507	0.021
5	0.508	0.011	-0.508	0.021
6	0.508	0.010	-0.509	0.020
7	0.507	0.009	-0.510	0.020
8	0.508	0.009	-0.510	0.021
9	0.508	0.009	-0.509	0.020
10	0.508	0.009	-0.510	0.020

표 7. 백래시 측정 결과

#### 4.3 피드포워드제어를 활용한 위치 오차 보정

위치 오차는 그림 15와 같이 피드포워드 제어를 위해 보정하였다. 등강기의 위치 오차를 보상하기 위해 위치 입력 및 오차 보정식을 추가하였다. [17].



그림 14. 피드포워드 제어 블록 다이어그램

#### 4.4 위치 오차 보정 결과

위치 오차는 로프 변형 모델과 백래시 값을 제어기에 입력하여 보정하였다. 이러한 보상은 표 8과 그림 15-16에서와 같이 보정 전 오차에 비해 92-97%의 감소가 되었음을 확인하였다. 2.5m의 이동거리 대비 위치오차는 26~88mm에서 2~3mm로 개선되었다. 이 오차는 0.08~0.12%에 불과하다.

상승보다는 하강 시 위치 오차가 우세하므로 하강 시에더 많은 보상이 필요하다. 또한 무게가 증가할수록 오차가 잘 보정되는 경향이 있다는 점에 주목할 필요가 있는데, 이는 로프의 탄성이 위치이동에 영향을 미칠 수 있기 때문에 향후 연구에서 고려되어야 한다.

중량	오차(mm)								
	절대값의 평균		증감 (%)	RMS값		중감 (%)	최대최솟값 차이		증감 (%)
	전	후	(10)	전	후	(10)	전	후	(10)
60kg	26	2	<b>▼</b> 92	38	2	▼94	88	3	▼97

표8. 위치오차 측정 결과



그림 15. 오차 보정 전 측정 위치



그림 16. 오차 보정 후 측정 위치

#### 제 5 장 결론

본 연구는 빌딩외벽청소로봇의 위치 정밀도를 향상시키는 것을 목표로 연구를 수행하였다. 위치 오차 예측을 위한 이론적 모델링을 수행하였으며, 로프와 풀리 역학관계를 자유물체도를 이용하여 검증했다. 로프는 탄성체로 간주하였으며 이를 기반으로 풀리에 감긴 로프의 장력에 대한 방정식을 세웠다. 이어 슬립존을 예측하여 풀리에 감긴 로프의 장력차를 확인하였으며, 이로 인해 로프가 변형되고 위치 오차가 발생함을 확인하였다. 위치 오차를 보정하기 위하여 위치 반복도를 확보하는 것이 중요하며, 다구치 방법론을 활용하여 위치반복도 최적화 실험을 수행하였다. 두 번의 견실최적설계 실험을 통하여 최적의 위치 반복도를 확인하였으며, 한 개의 압력 모듈, 6°의 풀리 쐐기각, 45N의 압력 모듈 힘의 조합에서 최적의 위치 반복도를 가짐을 확인하였다. 견실최적설계 실험을 통하여 위치 반복도가 확보되었기 때문에 피드포워드 제어를 활용한 위치 오차 보정을 수행하였다. 로봇의 방향 전화시의 오차인 백래쉬는 실험적으로 측정 및 결정하였다. 상기 결과를 이용하여 60 kg의 부하에서 위치 정밀도 실험을 수행하였으며, 보정 전후의 위치 오차를 비교하였다. 위치 오차는 해석방법에 따라 92-95% 이상 개선되었으며 이는 전체 2.5m 이동의 0.08-0.12%에 불과하다. 본 연구는 빌딩외벽청소로봇의 위치 오차 예측, 위치정밀도 향상 및 로봇의 청소 성능 향상에 활용될 수 있다.

#### 참고 문헌

[1] Dan Cortese, "What is a Skyscraper?", THEB1M, London,UK, July. 18, 2018, [Online]. Available:

https://www.theb1m.com/video/what-is-a-skyscraper

[2] S. Raga, "13 Behind-the-Scenes Secrets of ProfessionalWindow washers", Mental Floss, New York City, NY, USA, May. 4,2016. [Online]. Available:

https://www.mentalfloss.com/article/79507/13-behind-scenessecrets-professional-window-washers

[3] Akinfiev, Teodor, Manuel Armada, and Samir Nabulsi."Climbing cleaning robot for vertical surfaces." Industrial Robot: An International Journal 36.4 (2009): 352-357.

[4] Elkmann, N., et al. "SIRIUSc—Façade cleaning robot for a high-rise building in Munich, Germany." Climbing and Walking Robots. Springer, Berlin, Heidelberg, 2005. 1033-1040

[5] Gambao, E., and M. Hernando. "Control system for a semiautomatic facade cleaning robot." Proceedings of the 2006 Inernational Symposium of Automation and Robotics in Construction. 2006.

[6] S. Moon, J. Huh, D. Hong, S. Lee, C. Han, "Vertical motion control of building façade maintenance robot with built-in guide rail", Robot. Comput. Integr. Manuf. 31 (2015) 11–20,

[7] Kite Robotics, Enschede, The Netherlands. Kite RoboticsWindow Cleaning Robots. Accessed: Sep. 25, 2020. [Online].Available: https://www.kiterobotics.com

[8] N. Imaoka, S.-G. Roh, N. Yusuke, and S. Hirose,

"SkyScraper-I: Tethered whole windows cleaning robot," in Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst., Taipei, Taiwan, Oct. 2010, pp. 5460-5465, doi: 10.1109/iros.2010.5649537.

[9] Hong, Jooyoung, et al. "Performance comparison of adaptive mechanisms of cleaning module to overcome step-shaped obstacles on façades." IEEE Access 7 (2019): 159879-159887.

[10] Wall Robotics, Espoo, Finland. Full Self Cleaning Robot From

Wall Robotics. Accessed: Aug. 25, 2020. [Online]. Available: https://www.wallrobotic.com

[11] IPC Eagle, USA. High Rise Professional Window Cleaning System. Accessed: July. 20, 2021. [Online]. Available: http://www.ipcworldwide.com/us/product/highrise-automaticwindow-cleaning-system/

[12] Seo, K., Cho, S., Kim, T., Kim, H. S., & Kim, J. (2013).
Design and stability analysis of a novel wall-climbing robotic platform (ROPE RIDE). Mechanism and Machine Theory, 70, 189–208.

[13] Shafi, Muhammad Shahid, et al. "Design and tension control of double drum Winch system for deep-sea exploration equipment." Proceedings of the 5th International Conference on Information Engineering for Mechanics and Materials. 2015.

[14] Torben, Sverre Rye, et al. "Fiber rope deployment system for ultradeepwater installations." Offshore Technology Conference. OnePetro, 2007.

[15] Yoo, Sungkeun, et al. "Highly Repeatable Rope Winch Design With Multiple Windings and Differential Gear Mechanism." IEEE Access 8 (2020): 87291-87308.

[16] S. E. Bechtel, S. Vohra, K. I. Jacob, C. D. Carlson, "The Stretching and Slipping of Belts and Fibers on Pulleys", J. Appl. Mech. Mar 2000, 67(1): 197–206 (10 pages)

[17] Sungkeun Yoo, Taegyun Kim, Myoungjae Seo, Joohyun Oh,
 Jongwon Kim, Hwa Soo Kim, TaeWon Seo, "Modeling and
 verification of multi-winding rope winch for facade operation",
 Mechanism and Machine Theory 155 (2021) 104105

[18] Rosa, Jorge Luiz, et al. "Electrodeposition of copper on titanium wires: Taguchi experimental design approach." Journal of materials processing technology 209.3 (2009): 1181–1188.

 [19] Choi, Myeongjin, et al. "Robust Design of a Rope Ascender Based on Geometric Parameters of Traction Sheave." International Journal of Precision Engineering and Manufacturing 22.5 (2021): 965-974.

[20] Test Code for Machine Tools—Part 2: Determination of

Accuracy and Repeatability of Positioning of Numerically Controlled Axes, ISO Standard ISO 230-2:2014, 2014.

#### Abstract

## Position error compensation of façade-cleaning robot by optimal rope winch design

Hongjoon Kyong Department of Mechanical Engineering The Graduate School Seoul National University

This study aimed to optimize the rope winch of a facade-cleaning robot. A facade-cleaning robot is a system that travels using friction between ropes and pulleys fixed to the top of buildings. However, during locomotion, position errors are caused by a variety of factors, which adversely affects the robot's position accuracy and can lead to poor cleaning performance. To solve this problem, the repeatability of the robot position was secured through an optimization experiment using the Taguchi method. Subsequently, an error compensation algorithm was designed by predicting the slip errors of the rope, and based on this, the positional accuracy was determined through feedforward control. Through optimization, it was confirmed that optimal repeatability can be obtained using one pressure module, a 6° axial groove pitch angle of the pulley, and the 45 N of pressure module force. The position accuracy was improved by 92-95% in feedforward control. The findings of this study will make it easier to control the position of façade-cleaning robots and will aid in improving robot position accuracy.

Keywords : Façade cleaning robot, Rope winch, Position accuracy, Position repeatability, Position error modeling

Student Number : 2019-27950