

# 다구치 방법론을 이용한 불규칙한 표면 부착용 진공흡착유닛의 최적설계

## Optimal Design of a Vacuum Attachment Device Capable of Attaching to the Irregular Surface by Using Taguchi Methodology

\*서근찬<sup>1</sup>, 이경훈<sup>1</sup>, 남우철<sup>1</sup>, 김병욱<sup>1</sup>, #김종원<sup>1</sup>

\*Kunchan Seo<sup>1</sup>, Kyunghoon Lee<sup>1</sup>, Uochul Nam<sup>1</sup>, Byoungwook Kim<sup>1</sup>, # Jongwon Kim(jongkim@snu.ac.kr)<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> 서울대학교 기계항공공학부

Key words : Taguchi methodology, Optimal design, Irregular surface, Vacuum attachment

### 1. 서론

고층 건물의 외벽 청소, 대형 선박의 도장 및 용접뿐만 아니라 각종 산업용 탱크의 안전 검사 등과 같은 극한 환경에서의 작업은 작업자의 안전을 위협하고 많은 비용을 수반하게 된다. 따라서 이러한 작업을 대신하기 위하여 수직 벽면을 오를 수 있는 등반로봇들이 개발되어 왔지만 부착 가능한 벽면 형상 및 단위면적당 부착력 측면에서 한계를 가지고 있었다.[1-3]

본 논문에서는 등반로봇에 적용될 수 있는 진공흡착유닛의 최적 설계를 다루었다. 유리표면과 같은 매끈한 표면뿐만 아니라 대리석 및 콘크리트 표면, 그리고 그루브(Groove)가 있는 표면과 같이 표면 형상이 불규칙한 표면에 부착이 가능한 진공흡착유닛의 구조를 제시하였고, 다구치 방법론(Taguchi methodology)[4-6]을 이용하여 실험을 통해 부착력을 최대화 하는 동시에 부착 표면의 형상에 따라 부착력의 변동이 최소화 되도록 설계를 최적화 하였다.

### 2. 진공흡착유닛의 구조

개발된 진공흡착유닛의 구조는 Fig. 1 과 같다. 흡착유닛의 프레임에 예하중을 가해 흡착유닛을 부착 벽면으로 눌러주면, 벽면에 접하게 되는 실링고무와 고무필름/브러쉬 구조가 2 층으로 흡착유닛의 내부를 외기와 차단해주게 된다. 이때, 진공흡입구(Vacuum inlet)를 통해 진공펌프 등을 이용하여 내부에 진공을 공급하면 부착력이 발생하게 된다.

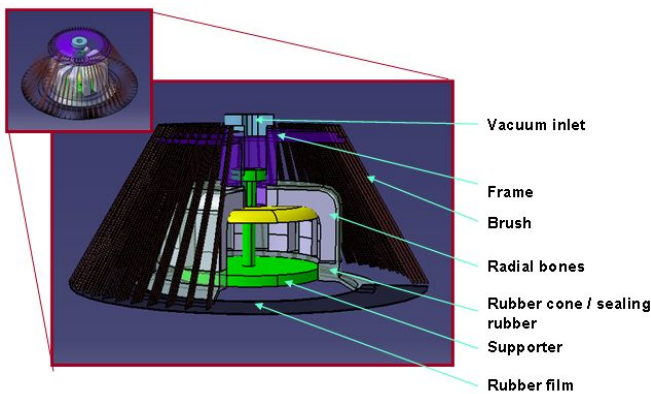


Fig. 1 Design layout of the vacuum attachment device



Fig. 2 Prototype of the vacuum attachment device

### 3. 실험의 설계

흡착유닛의 기능은 진공을 공급받아 벽면에 부착력을 발생시키는 것이고, 특히 등반로봇에 적용되어 중력방향의 무게를 지지하며 수직 벽면에 부착하기 위해서는 부착 벽면에 대해 수평방향의 부착력이 중요하다. 따라서 본 실험의 설계목표 기능변수는 흡착유닛의 수평방향 부착력이다. 또한 부착력의 크기는 크면 클수록 좋기 때문에 다구치 방법론의 설계목표 기능변수는 망대(Larger the better) 설계목표 기능변수이다.

부착력의 크기에 영향을 미칠 수 있는 흡착유닛의 설계 변수는 Fig. 3 및 Table 1 에서 보는 바와 같이 총 7개 이고, 실험을 통해 각 설계변수의 최적 조합을 찾아내는 것이 목표이다. 이를 위해 각 설계변수를 3 개의 수준(Level)으로 설정하였고 최소한의 실험 횟수로 각 설계변수가 설계목표 기능변수에 미치는 영향을 알아보기 위해 직교배열표(Orthogonal array)  $L_{27}(3^{13})$ 을 사용하여 27가지의 설계변수 조합에 대해 실험하도록 하였다.

또한, 설계목표 기능변수에는 영향을 미치지만 실제 동작 환경에서 제어가 불가능한 요소인 환경(잡음)인자(Noise factor)는 부착되는 벽면의 표면 형상으로 Fig. 4 과 같이 3 개의 수준으로 정하였다.

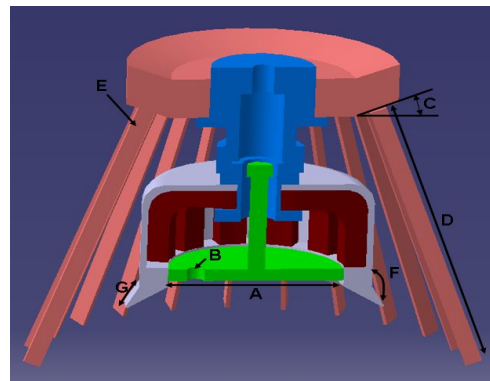


Fig. 3 Design variables

Table 1 Design variables and assigned values for each level

Design variables		Level		
		1	2	3
A	Diameter of unit	40 mm	45 mm	50 mm
B	Holes in supporter	1 ea	3 ea	6 ea
C	Angle of brush	20°	10°	0°
D	Length of brush	65 mm	70 mm	75 mm
E	Brush density	28 bunch	30 bunch	32 bunch
F	Angle of skirt	120°	150°	180°
G	Length of skirt	4 mm	6 mm	8 mm

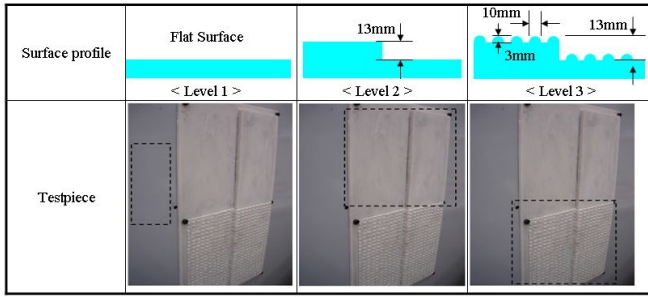


Fig. 4 Noise factors (Wall surface profile)

#### 4. 실험의 수행 및 결과 분석

27 가지의 설계변수 조합에 대해 각각 3 수준의 환경인자에 대해 부착력을 측정한 결과는 Table 2 와 같다. 각각의 실험 결과에 대해 S/N 비를 계산하고, 수준평균분석법(Level average analysis)을 이용하여 각각의 설계 변수 별로 민감도 분석(Sensitivity analysis)을 수행한 결과는 Fig. 5 와 같다. 여기서 S/N 비가 크다는 것은 부착력의 크기가 크면서도 환경인자, 즉 벽면 형상의 변화에 대해 부착력의 크기 변동이 작다는 의미이다. 실험결과 설계변수 A(흡착유닛 직경), F(실링고무 스킨 각도), G(실링고무 스킨 길이)가 부착력에 큰 영향을 미치며 나머지 설계변수들은 값이 변하더라도 부착력에 큰 영향이 없었다. 또한, 설계변수 A: 3 수준, B: 3 수준, C: 3 수준, D: 1 수준, E: 1 수준, F: 2 수준, G: 2 수준의 조합이 최고의 조합임을 알 수 있다.

부착력에 영향이 큰 설계변수 가운데 설계변수 A(흡착유닛 직경)가 커질수록 부착력이 커진다는 것은 매우 자명한 사실이므로 1 수준(40mm)으로 고정시켰다. 하지만, 설계변수 F 와 G 는 각각 수준 2 근처에서 값을 변동시켰을 때 S/N 비가 더 커질 가능성이 있으므로 Table 3 과 같이 수준 2 근처에서 값을 1 차 실험보다 더 작은 폭으로 변화시켜 2 차 실험을 하였다. 2 차 실험에서는 설계변수 A 를 제외하고 부착력에 영향을 줄 수 있다고 생각되는 고무필름의 두께(H)를 추가하여 실험을 실시하였다. 실험결과 세 설계변수 모두 수준 2 일 때 S/N 비가 가장 높았고 수준의 변화에 따른 S/N 비의 변화가 1dB 이하로 큰 차이가 없었다.

1 차, 2 차의 실험 결과를 통해 부착 벽면에 수평방향 부착력을 최대화 시키면서도, 벽면 형상의 변화에 대해 부착력의 편차가 작아지는 최적 설계변수 조합은 Table 4 와 같고, 그때의 부착력은 환경인자의 각 수준에 따라 각각 28N, 22N, 19N 이었다.

Table 2 Experiment result

X	Design variables							Shear attachment force (N)		
	A	B	C	D	E	F	G	Flat surface	13mm stepped surface	13mm stepped surface with embossing
	1	1	1	1	1	1	1	1	20.1	15.5
2	1	1	2	2	2	2	2	24.9	22.1	17.4
3	1	1	3	3	3	3	3	17.4	14	12.3
4	1	2	1	2	2	3	3	12.8	12.6	12.1
5	1	2	2	3	3	1	1	23.1	15.6	10.3
6	1	2	3	1	1	2	2	28.6	19.3	20
7	1	3	1	3	3	2	2	27.2	21.9	18.5
8	1	3	2	1	1	3	3	13.3	16.1	15.1
9	1	3	3	2	2	1	1	25.7	16.2	11.5
10	2	1	1	2	3	2	3	37.1	31.2	21.9
11	2	1	2	3	1	3	1	29.1	29.9	18.7
12	2	1	3	1	2	1	2	33.4	27.4	23.6
13	2	2	1	3	1	1	2	42.7	28.7	18.8
14	2	2	2	1	2	2	3	31.6	30.1	23.8
15	2	2	3	2	3	3	1	33.8	26.5	18.5
16	2	3	1	1	2	3	1	35	24.7	20.7
17	2	3	2	2	3	1	2	41.8	28.7	22.5
18	2	3	3	3	1	2	3	41.2	31.4	26.7
19	3	1	1	3	2	3	2	43.3	34.1	25.6
20	3	1	2	1	3	1	3	72.2	37.1	31.7
21	3	1	3	2	1	2	1	49.7	29.2	27.7
22	3	2	1	1	3	2	1	52.3	32.3	22.8
23	3	2	2	2	1	3	2	41	32	24.4
24	3	2	3	3	2	1	3	65.8	34.6	30.8
25	3	3	1	2	1	1	3	68.3	36.4	30.2
26	3	3	2	3	2	2	1	57.9	31.6	27.1
27	3	3	3	1	3	3	2	49.8	34	29.9

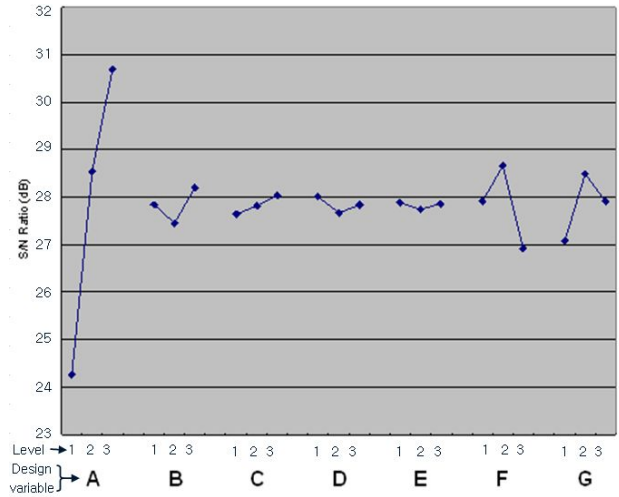


Fig. 5 Sensitivity analysis of design variables

Table 3 Design variables and assigned values for 2<sup>nd</sup> experiment

Design variables	Level	Level		
		1	2	3
F	Diameter of unit	135 degree	150 degree	165 degree
G	Length of skirt	5mm	6mm	8mm
H	Thickness of film	0.025mm	0.03mm	0.05mm

Table 4 Optimal design variable values

Sign	B	C	D	E	F	G	H
Meaning	Holes in support	Angle of brush	Length of brush	Brush density	Angle of skirt	Length of skirt	Thickness of film
Value	6 ea	0°	65mm	28 bunch	135°	6mm	0.03mm

#### 5. 결론

본 논문에서는 불규칙한 형상의 벽면에 부착이 가능한 진공흡착유닛의 설계를 제안하였고, 다구치 방법론을 이용하여 실험을 통해 설계를 최적화 하였다. 이를 통해 부착력을 최대화 하면서도 부착되는 표면 형상의 변화에 따라 부착력의 편차가 작아지는 설계변수들의 값을 얻을 수 있었다.

#### 후기

이 연구는 서울시 산학연 협력사업에 의하여 지원되었습니다.

#### 참고문헌

1. M. Elliot, W. Norris, J.Xiao, "City-Climber: A new generation of wall-climbing robots", Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation.
2. S. Hirose, A. Nagakubo, R. Toyama, "Machine that can walking and climb on Floors, Walls and Ceilings", International Conference on Advanced Robotics, Vol.1, pp. 753-758, 1991
3. Alan T. et al, "Scaling hard vertical surfaces with compliant microspine arrays", The International Journal of Robotic Research, Vol.25, pp. 1165-1179, 2006.
4. Taguchi, G, "Taguchi on Robust Technology Development: Bringing Quality Engineering Upstream", ASME Press, 1993 (translated by Tsai, S-C.).
5. Glen S. Peace, "Taguchi Methods: A Hands-on Approach to Quality Engineering", Addison-Wesley, 1993.
6. 김종원, "공학설계: 창의적 신제품 개발방법론", 문운당, 2008.