

다양한 곡률에 안정적인 등반 로봇을 위한 건식 점착물질의 실험기반 설계변수 최적화

유연형^a, 신명석^a, 서태원^{a*}**Optimization Design of Dry Adhesion for Wall-Climbing Robot on Various Curvatures Based on Experiment**Yanheng Liu^a, Myeongseok Shin^a, TaeWon Seo^{a*}^a Creative robot design laboratory, School of Mechanical Engineering, Yeungnam Univ., 280, Daehak-ro, Gyeongsan-si, Gyeongsangbuk-do, 712-749, Republic of Korea**ARTICLE INFO***Article history:*

Received 18 June 2014
 Revised 24 July 2014
 Accepted 29 July 2014

Keywords:

Optimization design
 Wall-climbing robot
 Dry adhesive
 Soft elastomer
 Robust design

ABSTRACT

This paper presents the results of a study on the optimal footpad design for vertical climbing on acrylic surfaces with various curvatures used Taguchi methods. For a climbing robot, the adhesion system plays an important role in the climbing process. Only an appropriate adhesion strength will prevent the robot from falling and allow it to climb normally. Therefore, the footpad is a significant parameter for a climbing robot and should be studied. Taguchi methods were used to obtain a robust optimal design, where the design variables were the flat tacky elastomeric shape, area, thickness, and foam thickness of the footpad. Experiments were conducted using acrylic surfaces with various curvatures. An optimized footpad was selected based on the results of the experiments and analysis, and the stability of the wall-climbing robot was verified.

1. 서론

최근 등반로봇 개발에 대한 관심이 커지고 있다. 높은 빌딩의 유리담이나 페인트작업 등에 사람이 수행하기에는 위험요소가 분명히 있기 때문에, 등반로봇의 활용에 많은 관심을 갖고 있다.

수직방향 벽면 등반로봇은 종류에 따라 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 일반적으로 기구의 도움이 필요하여 자력등반이 불가능한 로봇^[1,2]과 자력등반이 가능한 로봇^[3-6]으로 나뉘어진다. 본 연구는 자력등반이 가능한 로봇을 개발한다. 자력등반이 가능한 로봇 중에는 평면을 등반할 수 있는 형식과 곡면을 등반할 수 있는 형식이 있다. 각종 수직방향 벽면 등반로봇이 Table 1(Reference [1]-[6])에 나와 있다. 평면을 등반하는 로봇 중에는 단순히 평면벽만을 등

Table 1. Comparison of Various Robot

	Sky Cleaner [1]	Gekko Facade [2]	Stickbot [3]	Tank-Like [4]	HELI-PIPE [5]	Snake [6]
self (y/n)	No		Yes		Yes	
walls	flar surface		flat surface		curved surface	
flat (y/n)	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes
curve (y/n)	Yes	No	No	No	Yes	Yes

반할 수 있는 로봇과 벽면과 벽면 사이를 이동할 수 있는 로봇이 있다. 한편 관과 같은 곡면을 등반 하는 로봇은 관내 또는 관외를 등반하는 로봇으로 나누어진다.

앞서 언급한 모든 로봇들은 평범한 벽면만을 등반할 수 있거나

* Corresponding author. Tel.: +82-53-810-2442

Fax: +82-53-810-4627

E-mail address: taewon_seo@yu.ac.kr (Teawon Seo).

관내, 관외에서만 등반이 가능하다. 이 중에서 Snake Robot은 평면과 곡면을 모두 등반 할 수 있지만, 평면의 경우에는 어느정도 경사각이 있으면 등반이 제한된다. 따라서 등반로봇의 더 많은 응용을 위해서는 특정한 벽면만을 등반하기 보다는 관이나 다양한 곡률의 벽면들을 등반할 수 있는 능력을 갖추는 것이 필요하다.

본 연구는 O. Unver와 M. Sitti가 개발한 four-bar로봇^[7]에 쓰이는 건식 점착물질을 기준으로 설계되어 있고, 다양한 곡률의 아크릴 벽면에 안정적으로 등반할 수 있는 로봇의 점착력을 찾아서 로봇의 설계변수들을 최적화하는 것이 목표이다.

등반로봇의 점착력 측정실험은 이미 다른 연구에서 행해진 바 있다. 불규칙한 면에서도 부착이 가능하도록 하는 진공흡착 유닛의 최적설계에 대한 연구^[8]와 습식 점착방식을 이용한 등반로봇에 대한 연구^[9]를 꼽을 수 있다. 두 연구 모두 진공흡착방식을 이용하였고 실험을 통해 최대의 흡착력을 찾은 것이 목적이다. 하지만 본 연구의 로봇은 건식점착물질을 이용하고 다리를 이용한 이동방식을 사용하므로 단순히 점착력을 크게 하는 게 좋은 것은 아니다. 따라서 본 논문에서는 건식점착물질을 이용한 로봇의 안정된 등반을 위한 적절한 점착력의 기준을 선정하고 필요한 설계변수들을 다구찌 실험계획법을 적용하여 최적화하는 것을 보여준다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 로봇의 점착 유닛에 대해 설명한다. 3장에서는 최적설계의 목표기능 변수, 최적화 설계변수를 정의하고 사용조건 및 재현방식을 설명한다. 4장 최적설계 수행 및 분석에서는 다구찌 실험계획법, 실험 수행 및 결과, 실험 결과 분석에 대해 설명 및 수행된다. 5장에서는 본 연구의 최적화된 결론을 제시한다.

2. 로봇의 점착 유닛

로봇의 점착 유닛은 O. Unver 와 M. Sitti가 개발한 four-bar로봇^[7]을 기준으로 선정했다. 이 유닛은 Fig. 1에 제시되어 있다. Footpad가 Vytaflex-10(V10)과 foam로 구성되어 있는데, 여기에서 V10은 건식 점착물질이고 이 물질의 특성이 [10]에 나타나 있다.

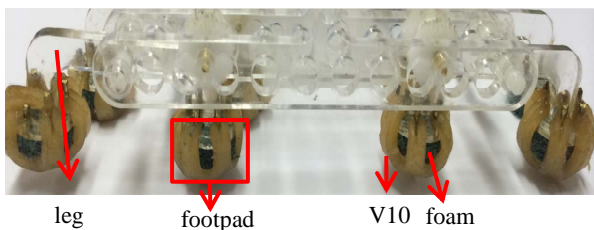


Fig. 1 Mechanism of robot adhesive unit

3. 최적설계 계획

3.1 목표기능변수 정의

등반로봇에 있어서 가장 중요한 점은 등반의 안정성이다. 여기서 등반의 안정성이라 함은 벽면을 타고 원하는 목적지까지 얼마나 잘 올라갈 수 있는가에 대한 척도라 말할 수 있다. 그래서 본 논문의 로봇 등반방식을 생각해보면, 등반 시에 벽면으로부터 떨어져서도 안 되고 벽면에 달라붙는 힘이 강하여 발이 떨어지지 않아서 이동이 불가능해져도 안 된다.

로봇에 있어서 안정된 등반능력을 나타내는 지표로 점착력(벽면에 붙어있는 힘)을 들 수 있다. 본 논문에서는 점착력에 대한 최적값을 Fig. 2^[5]에 근거를 두어 선정한다. 로봇이 안정하게 등반하려면 작용하중에 대한 점착력이 1:1에 가까울수록 좋다. 그러므로 Fig. 2^[5]의 Acrylic surface의 preload-adhesion관계 곡선과 y=x의 직선이 교차하는 지점이 최적의 점착력(약 255 gf)이라 할 수 있다.

본 논문은 실험을 기반으로 최적설계를 수행하기 때문에, 목표로 하는 기능변수가 필요하다. 그 기능변수를 실험으로 측정된 점착력과 앞서 말한 최적의 점착력 차로 두어 이 차이를 최소화 시키는 건실최적설계를 수행할 것이다.

3.2 최적화 설계변수 정의

최적설계를 하기 위해서, 목표기능변수인 점착력의 차이값이 변하는데 영향을 줄 만한 요인들을 설계변수로 정의한다. 그래서 본 논문에서는 발바닥 모양, 발바닥 면적, 점착물질두께, foam 두께 이렇게 네 가지 요인들을 설계변수로 정했다. 따라서 네 가지 설계변수들의 다양한 조합 중에 점착력이 최적값에 가깝도록 하는 변수 조합을 최적값이라 할 수 있다.

앞서 정한 설계변수들은 각각에 대해 수준을 정할 필요가 있다. Table 2에 설계변수의 종류와 수준을 정리해 놓았다. 이것은 1차 실험에 대한 설계변수 값들이다. Fig. 3에 제시되어 있는 것은 설계변수에 따라 제작된 footpads 모형이다.

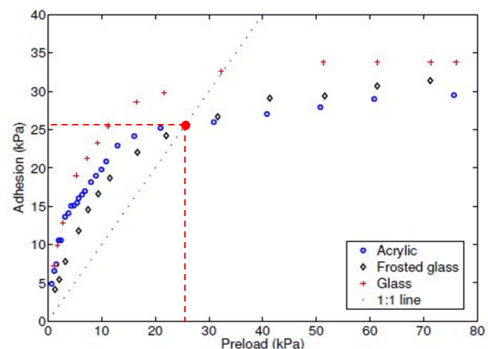


Fig. 2 Adhesion of the V10 flat elastomers on different-surfaces having different roughnesses with varying preloads^[7]

Table 2 Level of design parameters on 1st experiment

Parameters	Level		
	1	2	3
Shape (Foot)	Square	Circle	Oval
Area (Foot)	1 cm ²	2 cm ²	3 cm ²
Thickness (V10)	1 mm	3 mm	5 mm
Thickness (Form)	5 mm	10 mm	15 mm

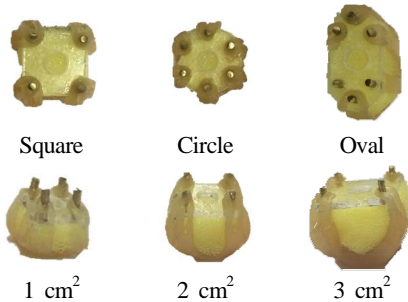


Fig. 3 Experiment candidate for 1st experiment

3.3 사용조건 및 재현방식

본 논문에서 연구중인 등반로봇은 다양한 곡률의 아크릴 벽면을 등반하는 것이 목표라고 말한 바 있다. 그러므로 더 신뢰성 있는 최적값을 찾기 위해 사용조건을 고려하도록 한다. 평면과 곡면 모두를 포괄한 실험이 되기 위해, 평면의 경우와 벽면의 곡률반경이 1000 mm인 경우, 곡률반경이 100 mm인 경우 총 세 가지를 사용 조건으로 정의하였고 실제 실험을 위해 제작된 벽면이 Fig. 4에 나타나 있다.

사용조건 재현장치가 Fig. 5에 나타나 있다. 아래에 있는 로드셀 (Load cell)은 점착력을 측정하기 위한 장치이고, 이송부(Conveying unit)는 로봇의 발이 내려가고 올라가는 것을 표현하는 장치이다. 그리고 로드셀 위에 있는 아크릴 벽면(Wall)은 사용조건을 표현하기 위함이다.

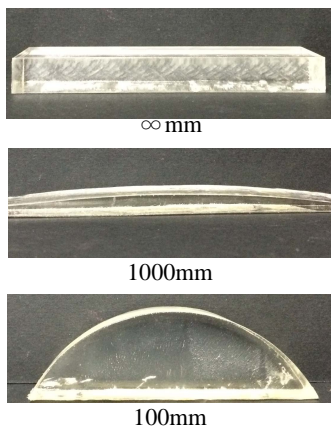


Fig. 4 Various curvatures acrylic surface

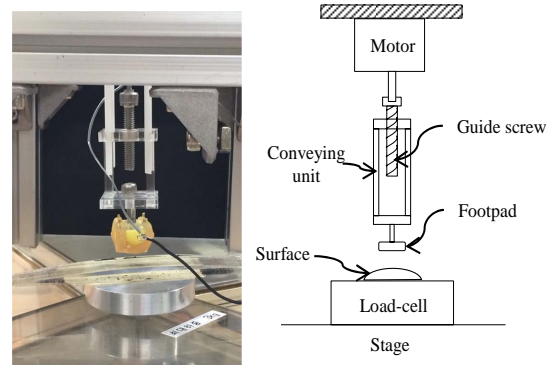


Fig. 5 Reproduction apparatus of user conditions

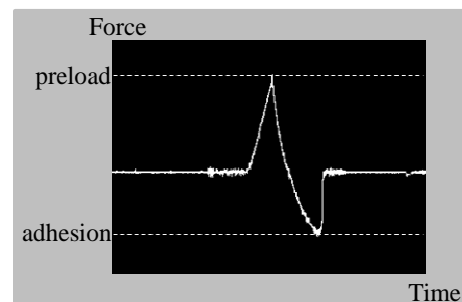


Fig. 6 Preload and adhesion on acrylic surface

실험방식의 이해를 돕기 위해, 실제 실험으로 측정된 데이터 샘플을 Fig. 6에 나타내었다. 실험방식은 우선 모터를 구동하여 이송 부를 로드셀 위에 고정된 아크릴 벽면에 맞닿게 하고, 일정 하중 (preload)이 가해진 후에 모터를 역방향으로 구동시켜 이송부를 다시 올라가게 한다. 여기에서 말한 일정 하중은 앞서 말했던 안정적 인 등반을 위해 필요한 점착력과 같은 크기의 힘이다. 이송부가 다시 올라갈 때 점착물질의 점착력에 의해 로드셀에 음의 값이 출력 되고, 떨어지는 동안 음의 최대값(adhesion)이 존재하게 되는데 그 값을 이용하여 최적화를 하게 된다.

4. 최적설계 수행 및 분석

4.1 다구찌 실험계획법

다구찌 실험계획법은 다양한 설계변수와 사용조건들이 존재할 때, 모든 가능한 변수조합들을 다 실험하지 않고도 신뢰성 높은 최적 값을 도출해내도록 하는 강력한 실험계획방법이다. 이를 이용 하면 많은 시간과 비용을 절약하면서도 만족할만한 결과를 얻을 수 있다. 따라서 본 논문에서는 다구찌 실험계획법을 이용할 것이고, 이 방법론의 최적값 도출과정은 Fig. 7와 같다.

4.2 실험 수행 및 결과

앞서 다구찌 실험계획법 과정의 사용조건 설정까지 진행하였으

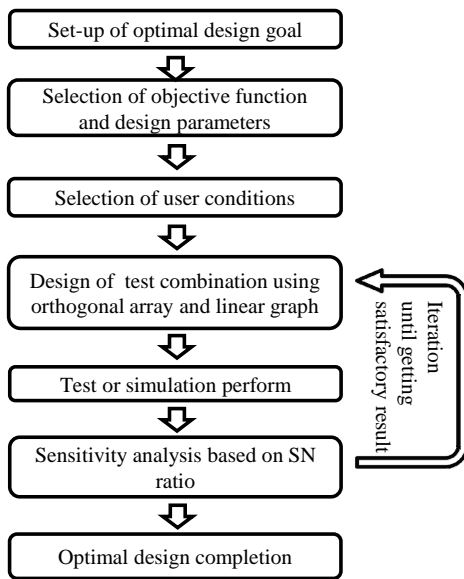


Fig. 7 Procedure on Taguchi method

므로, 다음 단계인 수직행렬을 선정한다. 본 논문에서는 3수준의 설계변수 네 가지를 최적화하기 때문에 L9(3⁴)을 사용한다. 이 수직행렬을 이용하여 간소화된 실험조합과 각 사용조건에 대한 결과값을 Table 3에 나타내었다. 여기에서 나타낸 결과값은 단순히 측정된 점착력이 아니고, 측정치와 목표하는 점착력의 차이이다. (차이가 곧 오차가 되고, 이 오차의 합을 최소로 하는 것을 최적으로 생각하기 때문이다). 표에 나타나 있는 S/N ratio는 신호잡음비로써 각 실험조합의 점착력의 결과값으로 산출되고 아래의 식으로 구할 수 있다.

Table 3 Design and result of 1st experiment based on L9 (3⁴)

Simulation number	Design parameters				User conditions			SN ratio (dB)
					N ₁	N ₂	N ₃	
	A	B	C	D	Adhesion (gf)			
1	1	1	1	1	210	206	205	-46.3
2	1	2	2	2	176	163	173	-44.6
3	1	3	3	3	47	37	77	-35.0
4	2	1	2	3	199	203	195	-46.0
5	2	2	3	1	87	58	64	-37.0
6	2	3	1	2	162	156	157	-44.0
7	3	1	3	2	179	166	176	-44.8
8	3	2	1	3	193	183	179	-45.3
9	3	3	2	1	148	158	156	-43.8

A: foot shape of robot, B: foot area of robot, C: thickness of adhesive material, D: thickness of foam. (refer to Table 2)
 N₁: flat surface, N₂: radius curvature of wall = 1000 mm, N₃: radius curvature of wall = 1000 mm.

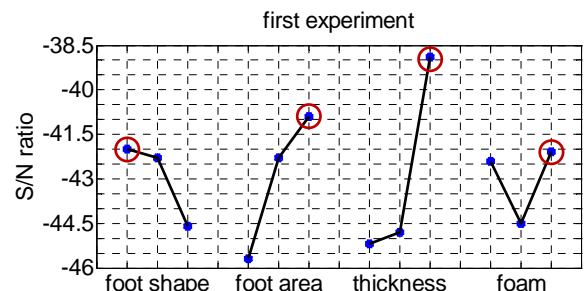


Fig. 8 S/N ratio of 1st experiment

$$SN_{smaller-the-better,i} = -10 \log \left| \frac{N_{1,i}^2 + N_{2,i}^2 + N_{3,i}^2}{n} \right| [dB] \quad (1)$$

4.3 실험 결과 분석

실험을 통해 얻은 데이터로 각 설계변수의 수준에 대한 S/N ratio를 산출하여 Fig. 8에 나타내었다. 그림에 나타나 있는 것처럼 설계변수 B와 C는 민감도가 상대적으로 큼을 알 수 있다. 그리고 최적값은 더 큰 수준값에서 나올 것으로 예상된다. 그래서 두 변수 발바닥 면적과 점착물질두께는 2차실험을 통해 더 최적화된 값을 찾아야 합당하다.

한편, 설계변수 A와 D는 상대적으로 민감도가 적다. 발바닥 형상의 경우에는 연속적으로 변화하는 수준값이 아니므로 S/N ratio가 가장 크게 나온 정사각형으로 채택하도록 한다. 그리고 foam의 두께의 경우에는 더 두꺼운 수준값에서 최적화 된 값이 나올 것으로 예상되지만, 점착물질을 부착하는 것과 로봇의 실제 제작에 어려움을 주기 때문에 S/N ratio가 가장 크게 나온 15 mm로 채택하기로 한다.

4.4 2차 실험 결과 및 분석

1차 실험을 진행한 것과 마찬가지로 계획부터 분석까지 수행하였다. 설계변수는 발바닥 면적과 점착물질두께 이렇게 두 가지이므로 수직행렬은 1차 실험과 마찬가지로 L9(3²)을 사용한다. 2차 실험 설계변수의 수준과 실험 결과값을 Table 4와 Table 5에 나타내었고, 설계변수 수준별 S/N ratio를 계산하여 Fig. 9에 나타내었다. 두 변수의 S/N ratio를 살펴보면 1차 실험과 마찬가지로 더 큰 수

Table 4 Level of design parameter on 2nd experiment

Parameters	Level		
	1	2	3
Shape (Foot)	Square		
Area (Foot)	3 cm ²	4 cm ²	5 cm ²
Thickness (V10)	5 mm	6 mm	7 mm
Thickness (Form)	15 mm		

Table 5 Design and result of 2nd experiment based on L9 (34)

Simulation number	Design parameters		User conditions			SN ratio (dB)
			N ₁	N ₂	N ₃	
	A	B	Adhesion (gf)			
1	1	1	145	123	143	-42.8
2	1	2	85	89	125	-40.1
3	1	3	40	57	98	-36.8
4	2	1	117	145	148	-42.8
5	2	2	20	87	75	-36.6
6	2	3	70	129	121	-40.8
7	3	1	133	91	123	-41.4
8	3	2	30	48	98	-36.3
9	3	3	-7	40	78	-34.1

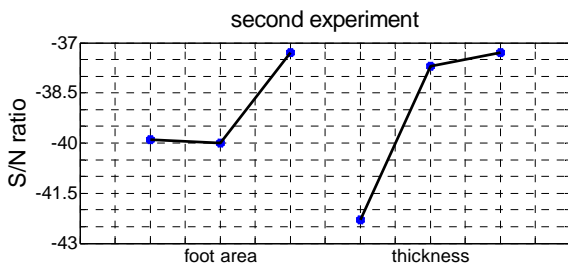


Fig. 9 S/N ratio of 2nd experiment

준값에서 최적값이 존재할 것이라 예상할 수 있다. 하지만 발바닥 면적의 크기와 점착물질두께의 크기가 커지면 로봇자체의 크기도 커질 수 있고, 곡률이 있는 벽면에서는 닿는 부분이 한정되어 효율이 저하될 수 있다. 그러므로 Fig. 9에 나타난 최대 S/N ratio를 가지는 조합을 최종적으로 선정하기로 한다.

5. 결론

본 논문은 다양한 곡률의 벽면을 등반할 수 있는 로봇의 개발을 다룬다. 세부적으로는 건식점착물질(V10)과 아크릴 벽면과의 점착력 관계를 근거로 최적화된 로봇의 발바닥을 찾아낸다. 최적화될 설계변수는 발바닥 형상, 발바닥 면적, 점착물질두께, foam 두께이며 평면과 곡면에 대해 실험을 통하여 최적화된 변수 값은 차례대로 정사각형, 5 cm², 7 mm, 15 mm이다. 기존에 평면벽을 등반하는 로봇의 발바닥(형상: 원형, 면적: 2 cm², 점착물질두께: 3 mm, foam두께 5 mm)에 대한 점착력 오차는 평균 69.7 gf인 반면, 최적화된 로봇의 발바닥의 점착력 오차는 37 gf가 나왔다. 결과적으로 46.9%만큼 원하는 점착력을 내는데 도움이 된다. 추후 본 건식

점착물질의 다양한 재질의 벽면에 대한 점착 연구가 필요하며, 등반로봇 플랫폼 연구가 병행될 예정이다.

후기

본 연구는 영남대학교 LINC 사업단의 기업체공동연구과제 지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

- [1] Zhang, H., Zhang, J., Wang, W., Liu, R., Zong, G., 2007, A series of pneumatic glass-wall cleaning robots for high-rise buildings, *Industrial Robot: An International Journal* 34:2 150-160.
- [2] Serbot AG, Gekko Facade, viewed 4 Jul. 2014, <<http://www.serbot.ch/index.php/en/products/gekko-facade>>.
- [3] Kim, S., Spenko, M., Trujillo, S., Heyneman, B., Santos, D., Cutkosky, M., 2008, Smooth Vertical Surface Climbing With Directional Adhesion, *IEEE Transactions on Robotics* 24:1 65-74.
- [4] Seo, T., Sitti, M., 2011, Under-Actuated Tank-Like Climbing Robot With Various Transitioning Capabilities, *IEEE International Conference on Robotics and Automation* 777-782.
- [5] Horodincu, M., Doroftei, I., Mignon, E., Preumont, A., 2002, A Simple Architecture for In-Pipe Inspection Robots, *Proc. Int. Colloq. Mobile* 1-4.
- [6] Wright, C., Johnson, A., Peck, A., McCord, Z., 2007 Design of a Modular Snake Robot, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* 2609-2614.
- [7] Unver, O., Sitti, M., 2009, A Miniature Ceiling Walking Robot with Flat Tacky Elastomeric Footpads, *IEEE International Conference on Robotics and Automation* 2276-2281.
- [8] Kim, H., Kim, D., Yang, H., Lee, K., Seo, K., Chang, D., Kim, J., 2008, Development of a wall-climbing robot using a tracked wheel mechanism, *Journal of Mechanical Science and Technology* 22:8 1490-1498.
- [9] Miyake, T., Ishihara, H., Yoshimura, M., 2007, Basic Studies on Wet Adhesion System for Wall Climbing Robots, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* 1920-1925.
- [10] Unver, O., Sitti, M., 2010, Flat Dry Elastomer Adhesives as Attachment Materials for Climbing Robots, *IEEE Transactions on Robotics* 26:1 131-141.