

소형 재밍 그리퍼의 설계에 관한 연구

Study on the Design of a Small-Scale Soft Jamming Gripper

윤진곤¹, 금재영¹, 이창기¹, 윤동원^{1,#}Jingon Yoon¹, Jaeyeong Keum¹, Changgi Lee¹, and Dongwon Yun^{1,#}¹ 대구경북과학기술원 로봇 및 기계전자공학과 (Department of Robotics and Mechatronics Engineering, Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology)

Corresponding Author / E-mail: mech@dgist.ac.kr, TEL: +82-53-785-6219

ORCID: 0000-0003-2254-5274

KEYWORDS: Soft Gripper (소프트 그리퍼), Jamming gripper (재밍 그리퍼), Membrane morphology (막 형태), Membrane thickness (막 두께), Membrane material (막 재료)

In soft robotics, gripper technology based on granular jamming offers the capability to adapt flexibly to objects of diverse shapes and material properties. Specifically, small-scale jamming grippers can address tasks challenging for conventional grippers either by enhancing gripping performance or by extending functionality when combined with rigid grippers. This study investigated effects of membrane morphology, thickness, and material on performances of small-scale jamming grippers to identify optimal design parameters. Experiments were conducted with three membrane morphologies, two thickness levels, and two material types. Results indicated that a concentric-pocket membrane morphology, a membrane thickness of 1.5 mm, and a soft material such as Dragon Skin 10 achieved a superior holding force of 430.7 gf. These findings indicate that softer materials can improve the membrane's ability to conform to objects, while increasing thickness can minimize deformation due to tensile forces, thereby enhancing gripping stability. Furthermore, experiments demonstrated that this configuration could enable the gripper to safely grasp objects of various shapes and perform additional tasks, such as rotating valves and handles, with effectiveness.

Manuscript received: November 15, 2024 / Revised: December 27, 2024 / Accepted: February 5, 2025

NOMENCLATURE

D [mm] = Diameter of the Jamming Gripper Membrane

H [mm] = Height of the Jamming Gripper Membrane

t [mm] = Thickness of the Jamming Gripper Membrane

1. 서론

소프트 로봇 분야에서 입자 재밍(Granular Jamming)을 이용한 그리퍼 기술은 대상 물체의 다양한 형상과 물성에 유연하게 적용할 수 있는 장점을 지니며, 이를 통해 로봇 공학의 적용 범위를 넓히는 유망한 기술로 각광받고 있다. 공압을 사용하는 다른 소프트 그리퍼와 달리[1,2], 입자 재밍 기술은 탄성 막 내부에 입자를 채운 후 진공 압력을 가하여 입자 간의 상호 잠금

상태를 이용하여 물체를 잡거나 강성을 변화시키는 기술이다[3-6]. 이 기술은 특정 형태의 물체에 구애받지 않고 안정적인 성능을 발휘할 수 있는 장점이 있어, 바다 환경에서 수집을 위한 그리퍼[6,7] 혹은 로봇의 발바닥 패드와 같이 다양한 분야에 적용이 가능하다[8]. 특히 그리퍼 분야에서 기존 강체 손가락 기반 그리퍼가 하기 힘든 문 잠금 장치를 돌리거나 작은 비정형 물체를 잡을 수 있으며[9] 강체 그리퍼의 손바닥에 장착되어 마찰을 올려 성능을 높이는 소형 재밍 관련 연구도 진행되고 있다[10,11].

지금까지 입자의 크기와 모양, 막의 재질 및 형상 같은 설계 요소들이 그리퍼 성능에 미치는 영향을 분석한 연구들이 진행되어 왔으며, 이를 통해 다양한 입자 및 막 사이즈를 결정하고 그리퍼를 구현하는 연구가 보고되었다[12-16]. 예를 들어, Brown 등은 입자 크기와 그리퍼의 크기 및 막 높이에 대해 재밍 과정에서 그리핑 성능에 미치는 영향을 연구하고 종합적인 성능을 평가하였다[17]. 그러나 성능에 영향을 미치는 중요한

요소 중 하나인 막의 형상(Membrane Morphology)에 대한 연구는 아직 부족한 실정이다[18,19]. 다양한 막 형상에 대한 연구는 진행되고 있으나 막에 대한 재료, 두께와 같은 파라미터를 바꾸어 성능에 미치는 영향에 대한 분석이 이루어지지 않고 있다[18-20].

본 연구는 강체 그리퍼에 장착이 가능한 소형 재밍 그리퍼의 성능을 극대화하기 위해 막의 형태, 두께, 재료와 같은 다양한 변수들이 성능에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였다. 이를 통해 소형 재밍 그리퍼의 성능 향상을 위한 각 설계변수가 성능에 미치는 영향을 확인하고, 다양한 그리핑 환경에서 높은 수준의 성능을 발휘할 수 있는 설계 근거를 확인하고자 한다.

2. 소형 재밍 그리퍼의 형상 및 파라미터

소형 재밍 그리퍼의 막 형상은 3가지 종류로 설계하였다. Fig. 1은 세 가지 막의 형상 및 단면을 나타내었다. Fig. 1(a)는 반구 형상으로, 기존 구형 재밍 그리퍼에서 소형화를 위해 재밍 막을 지지하던 깔대기 형태의 구조물[3,4]을 삭제하고 원기둥과 반구를 합쳐 설계하였다. 다른 두 가지 막 형상은 Howard 등의 논문에서 진화 알고리즘을 통해 물체를 잡는 힘인 유지력을 높이는 특징을 가진 형상을 제시하였고, 이를 기반으로 설계하였다[19]. 제시된 형상은 재밍 그리퍼의 세 가지 작동 메커니즘을 기반으로 다음과 같은 특징을 가진다. 첫번째, 정적 마찰로 인한 유지력(Holding Force)을 높이기 위해 표면 접촉 면적을 최대화하는 구의 곡선에 근접하는 곡선을 가진다. 두번째, 그리퍼가 물체 위에서 누를 때 그리퍼 막 형상의 아랫부분이 물체를 감싸는 것으로 상호 잠금이 일어나 잡는 힘이 발생한다. 세번째, 물체에 대한 진공 흡입 성능을 높이기 위해 그리퍼의 중앙에 포켓 구조로 나타난다. 이러한 특징이 반영된 형상을 Figs. 1(b) 및 1(c) 형상에 나타내었다. Figs. 1(c) 형상은 1(b) 형상과 다르게 동심원 모양의 패턴을 추가하였다. 이 세 가지 형상은 기존 구형 형상과 포켓이 있는 변형된 형상에 대한 성능을 비교하였으며 표면에 마찰을 높이기 위한 동심원 패턴이 있을 때와 없을 때 재밍 그리퍼의 성능을 비교하기 위해 선정하였다.

Fig. 1에서 D, H, t는 각각 재밍 막의 지름, 높이, 두께이다. 세 가지 형상의 막 지름 및 높이는 성능 비교를 위해 동일하게 설계하였다. 크기는 높이가 42, 지름이 28.5 mm 설계하여 작은 크기로 디자인하였다. 재밍 막이 두께와 재료에 대해서 받는 영향을 알아보기 위해 3가지 형상에 대해 두께가 1, 1.5 mm, 막 재료가 서로 다른 2가지 실리콘으로 구성하여 총 12개의 경우에 대해 재밍 그리퍼의 성능을 비교하였다. 이때 막 재료는 기존 재밍 막 제작에 많이 사용하는 실리콘[21] 중 Dragon Skin 10 Medium과 Dragon Skin 20으로 특성은 Table 1과 같다. Dragon Skin 10 Medium은 Dragon Skin 20 비해 표면 경도와 강성이 낮아 더 부드러운 특징을 가진다. 형상, 두께 및 재료가 성능에 미치는 영향을 확인하기 위해 12개의 재밍 그리퍼를 제작하고 재밍 그리퍼의 물체를 들어 올리고 유지하는 힘을 측정하여 성능비교를 4장에서 진행하였다.

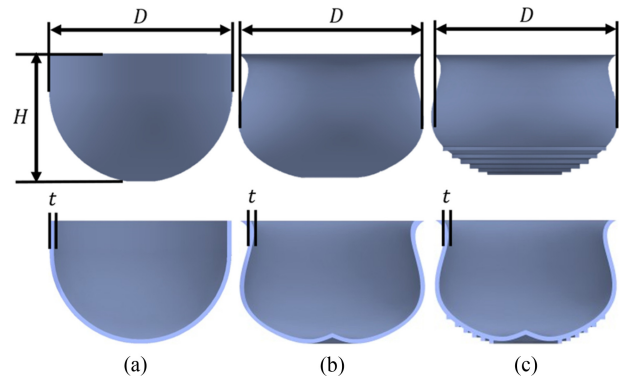


Fig. 1 Membrane morphology of jamming gripper and cross section: (a) Hemisphere shape, (b) Pocket shape, and (c) Pocket shape with concentric ring pattern

Table 1 Properties of dragon skin 10 medium and dragon skin 20

	Dragon skin 10	Dragon skin 20
Shore hardness [A]	10	20
Cure Time (Hours)	5	5
Elongation at Break [%]	1,000	980
Tear strength [pli]	102.5	119
Tensile strength [psi]	525	575

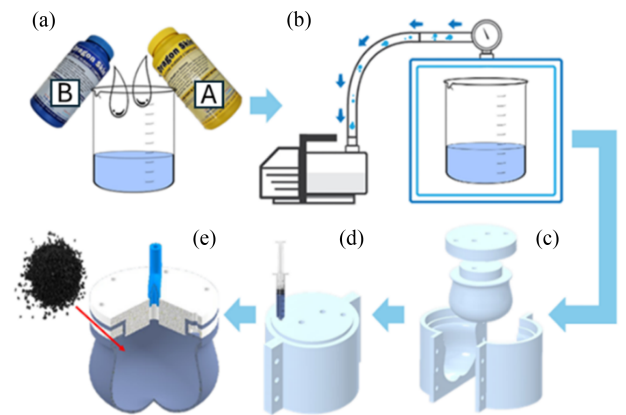


Fig. 2 The fabrication process of the jamming gripper

3. 소형 재밍 그리퍼 제작

Fig. 2는 재밍 그리퍼의 제작과정을 나타낸 그림이다. 먼저, 실리콘 주재(A)와 경화제(B)를 중량비로 1 : 1로 섞어준다(Fig. 2(a)). 다음으로 섞은 실리콘 안의 공기 방울을 10분 동안 진공 탈포를 진행하여 제거한다(Fig. 2(b)). 재밍 그리퍼의 막을 성형하기 위해 3D 프린터(Bambu Lab X1C, Bambu Lab, China)를 이용하여 PLA 재질의 금형을 제작하였다(Fig. 2(c)). 3D 프린팅한 금형을 조립한 후 주입구를 통해 탈포한 실리콘을 주입한다. 이때 실리콘의 주입은 주사기로 천천히 압력을 가하며 유출구에 실리콘이 나올 때까지 진행하였다(Fig. 2(d)). 이후 5시간 동안 실온에서 실리콘을 경화한다. 완전히 경화된 실리콘을 앞서

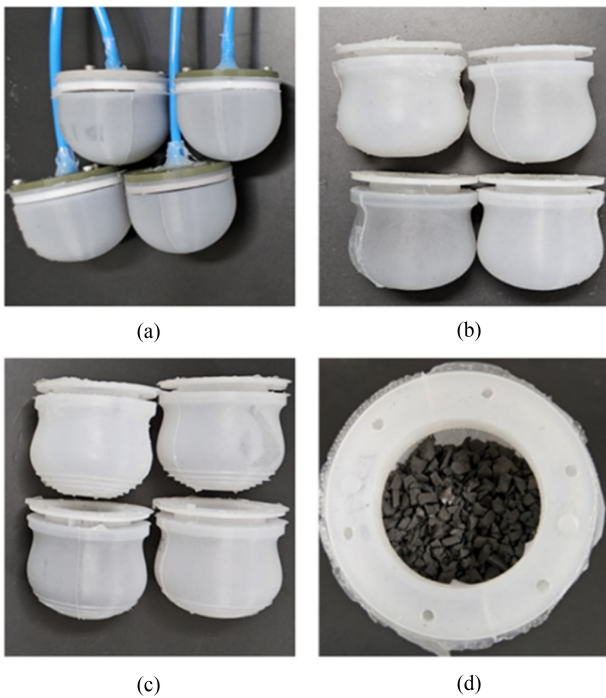


Fig. 3 Fabricated jamming gripper membrane and rubber granular: (a) Jamming gripper of a hemisphere shape, (b) Jamming gripper with small pocket shape, (c) Jamming gripper with small pocket shape and concentric ring pattern, (d) Rubber granular for jamming gripper

제작한 금형에서 분리하고 실리콘 막 내부 공간에 재밍을 위한 입자인 고무 조각을 채워 넣고 3D 프린터로 제작된 부품과 조립하여 재밍 그리퍼를 제작한다(Fig. 2(e)). 3D 프린터로 제작된 부품은 실리콘 막 안의 고무입자가 빠져나가지 않게 하고 진공을 가할 때 밀봉상태를 유지하기 위해 제작된 부품이다. 재밍 그리퍼에서 공기를 빨 때 사용하기 위해 우레탄 튜브를 3D 프린팅 부품과 연결하고 실리콘 접착제인 Sil Poxy (Smooth-On, Inc., USA)로 밀봉하였다. Fig. 3은 실제로 제작된 재밍 그리퍼 및 실리콘 막과 재밍 그리퍼를 채운 고무 입자를 보여준다.

4. 파라미터에 대한 재밍 그리퍼의 유지력 실험 및 결과

재밍 그리퍼의 3가지 파라미터에 따른 성능 비교를 위해 소형 공압 시스템 및 물체를 들어 올리고 유지하는 힘을 측정하는 실험을 세팅하였다. Fig. 4는 재밍 그리퍼의 회로 구성 및 공압 라인에 대한 개략도를 나타내었다. 소형 공압 시스템을 구성하기 위해 크기가 지름 27, 길이 58 mm인 공압 모터 펌프(DAP-2758, Motorbank, South Korea)와 소형 솔레노이드 밸브를 사용하였다. 공압 모터 펌프는 최소 압력 -52 kPa이며 유량은 3.2 L/min의 성능을 가진다. 공압 모터 펌프와 솔레노이드 밸브는 같은 푸시 버튼에 연결되며 푸시 버튼을 누르면 펌프와 밸브에 동시에

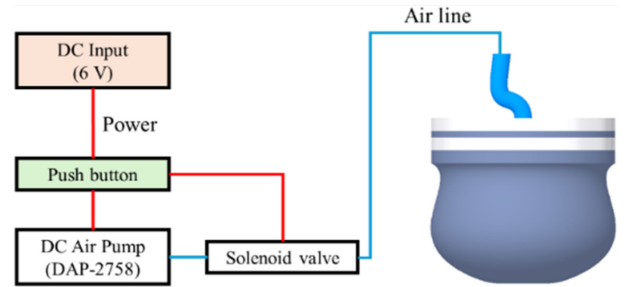


Fig. 4 Circuit and pneumatic line diagram of jamming gripper

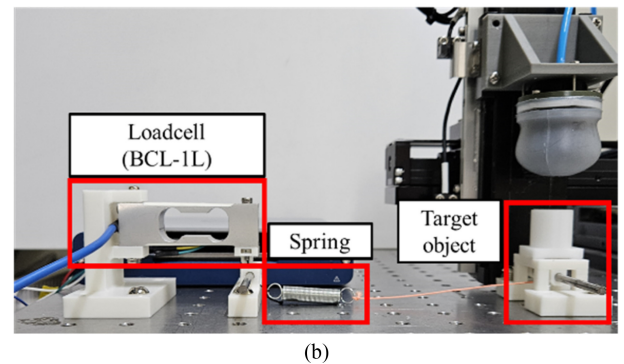
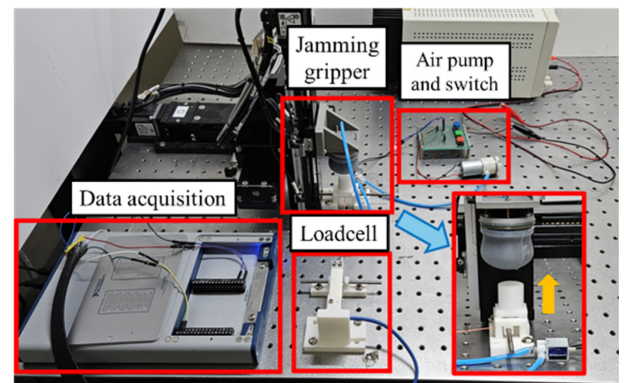


Fig. 5 Experimental setup for measuring holding force of the jamming gripper: (a) Overall experimental setup configuration, and (b) Close-up of the connection between the load cell and the target object

6 V 전원이 공급되는 회로를 가진다. 솔레노이드 밸브는 3 방향 밸브로 재밍 그리퍼와 대기가 평상시 열림 상태이며 재밍 그리퍼와 공압 모터 펌프가 평상시 닫힘 상태로 연결되어 있다. 따라서 전원이 소형 솔레노이드 밸브에 가해지면 밸브가 열리면서 재밍 그리퍼와 공압 모터 펌프가 연결되고 재밍 그리퍼 내부가 음압 상태가 된다. 전원을 끊으면 소형 솔레노이드 밸브가 닫히고 재밍 그리퍼와 대기가 연결되면서 재밍 그리퍼 내부가 대기압 상태가 된다. 이로써 사용자가 재밍 그리퍼의 물체를 잡고 놓는 상태를 제어할 수 있다.

Fig. 5는 재밍 그리퍼가 물체를 들어 올리고 유지하는 힘, 유지력을 측정하는 실험에 대한 세팅이다. 목표 물체(Target Object)를

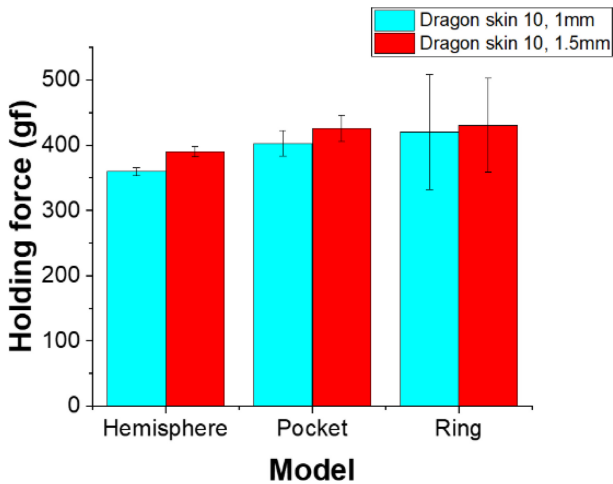


Fig. 6 Comparison of holding force for different jamming membrane thickness

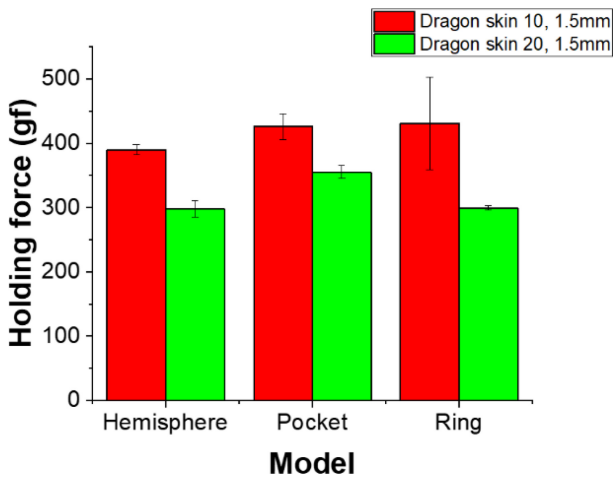


Fig. 7 Comparison of holding force for different jamming membrane material

재밍 그리퍼가 당기면 목표 물체에 연결된 와이어가 도르래를 따라 힘의 방향이 바뀐 후 로드셀(BCL-1L, CAS, South Korea)을 당겨 힘을 측정한다. Fig. 5(b)에서 로드셀과 목표 물체 사이의 와이어에 스프링을 추가하였다. 3축 스테이지에 고정된 재밍 그리퍼가 목표 물체를 잡고 움직이는 동안 스프링이 늘어나 유지력을 천천히 측정할 수 있도록 하여 최고 유지력을 측정하기 쉽게 하였다. 로드셀 데이터는 DAQ (USB-6341, National Instruments Corp., USA)를 통해 컴퓨터로 전송하며 Matlab R2021 (MathWorks, USA)로 데이터를 분석하였다. 위 방법으로 막의 형상, 두께, 재료가 따라 최고 유지력을 5번 반복 측정하고 평균 및 표준 오차를 구하였다.

Fig. 6은 재밍 그리퍼의 막 두께에 따라 비교한 그래프이다. 각 형상 내에서 두께 조건을 제외하고 재료가 Dragon Skin 10일 때 가장 좋은 성능을 보여 이 조건에서 비교하였다. 3가지 형상에서 두께가 1.5 mm일 때 공통적으로 유지력이 더 크게 나왔다. 이때 두께가 1.5와 1 mm 일 때 유지력 차이는 각각 30.1,

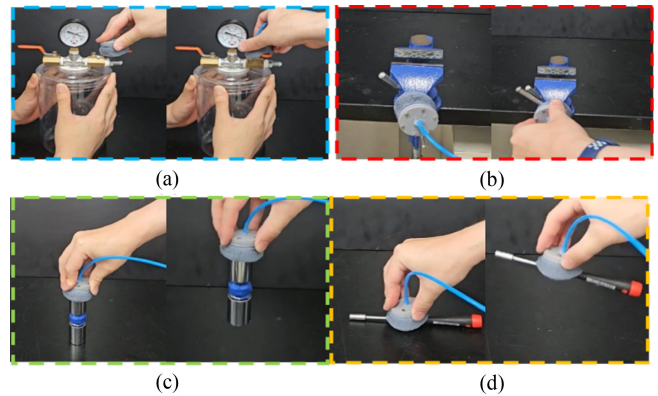


Fig. 8 Various object grasping experiments using jamming gripper: (a) Ball valve, (b) Vise handle, (c) Weight of 400 g, and (d) Socket driver

23.2, 10.1 gf로 2.5-8.4%의 성능차이가 났다. 또한 두께가 1.5 mm 일 때에 형상이 성능에 미치는 영향에 대해 비교하였다. 각각 반구형, 포켓형, 동심원 패턴형에서 유지력은 389.7 ± 8 , 425.9 ± 20 , 430.7 ± 71 gf로 동심원 패턴형이 가장 높게 나왔다.

Fig. 7은 재밍 그리퍼의 재료에 따라 비교한 그래프이다. 각 형상 내에서 같은 재료에서 1.5 mm 두께를 가지는 조건일 때에 대해 비교하였다. 모든 형상에서 부드러운 재료인 Dragon Skin 10일 때 더 큰 유지력을 보였다. 이때 Dragon Skin 10와 Dragon Skin 20일 때 유지력 차이는 형상에 대해 각각 92, 70.8, 131.3 gf로 20-43.9%의 성능차이를 보였다.

이 실험을 통해 재밍 그리퍼의 형상은 포켓 모양에 동심원 패턴이 있는 경우가 가장 높은 성능을 가지는 것을 확인하였다. 이는 반구형상에 비해 포켓 형상이 물체를 감싸기 쉽고, 포켓을 형성하여 물체에 대한 흡입 성능이 더 높기 나타났던 것으로 보인다. 또한 동심원 패턴이 있어 물체가 재밍 막 표면에서 미끄러지는 것을 방지하여 유지력을 높였다. 재밍 막의 두께는 1보다 1.5 mm에서 더 높은 성능을 보였다. 막의 재료는 Dragon Skin 10일 때가 Dragon Skin 20일 때보다 큰 힘을 가진다. 막의 재료는 부드러우면 물체를 감싸기 쉽기 때문에 재밍 그리퍼가 물체를 잘 잡는 것으로 보인다. 막의 두께가 두꺼워지면 막의 인장으로 인한 변형이 적어져 잡고 올리는 동안 상호 잠금 상태가 유지하기 쉬워져 성능이 향상되는 것으로 보인다.

재밍 그리퍼는 다양한 형상과 크기의 물체를 안정적으로 잡을 수 있다. 이 연구에서 제시한 재밍 그리퍼가 목표 물체뿐만 아니라 다양한 물체 및 작업에 사용할 수 있음을 확인하기 위해 Fig. 8과 같이 실험을 진행하였다. 포켓형 재밍 그리퍼를 사용하여 Figs. 8(a) 및 8(b)와 같이 좁고 작은 밸브 혹은 핸들을 잡을 수 있으며 이를 돌릴 수 있음을 확인하였다. Figs. 8(c) 및 8(d)와 같이 400 g의 추를 들어 올릴 수 있으며 박스 드라이버와 같은 도구도 쉽게 들어올릴 수 있음을 확인하였다. 따라서 제시한 재밍 그리퍼는 다양한 형상의 물체를 잡고 작업을 수행할 수 있음을 확인하였다.

5. 결론

소프트 로봇 분야에서 입자 재밍을 이용한 그리퍼 기술은 대상 물체의 다양한 형상과 물성에 유연하게 적응할 수 있는 장점이 있다. 특히 소형 재밍 그리퍼는 단독 혹은 강체 그리퍼와 같이 사용함으로써 기존 그리퍼가 하기 힘든 작업을 수행하거나 그리핑 성능을 향상시킬 수 있다.

소형 재밍 그리퍼의 성능 향상을 위해 설계 파라메터가 성능에 미치는 영향에 대한 분석이 필요하다. 하지만 그리핑 성능에 영향을 미치는 중요한 요소인 막 형태에 대해 두께 및 재료를 변경에 대한 연구가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서 여러 재밍 그리퍼의 막 형태에 대해 두께 및 재료가 미치는 영향에 대해 실험적으로 확인하였다.

3가지 막 형상, 2가지 두께, 2가지 재료에 대해 실험한 결과, 동심원 패턴이 있는 포켓 형상, 두께 1.5 mm로 비교적 두꺼울 때, 재료가 Dragon Skin 10으로 비교적 부드러울 때 성능이 좋은 것으로 나타났다. 이는 막의 재료가 부드러우면 물체를 감싸기 쉽기 때문에 물체를 잘 잡으며, 막의 두께가 두꺼워지면 막의 인장으로 인한 변형이 적어져 안정적으로 잡을 수 있어 향상되는 것으로 보인다. 또한 다양한 형상의 물체도 안정적으로 잡고 벨브 혹은 핸들 또한 돌릴 수 있음을 실험을 통해 확인하였다.

향후 제시된 막에 대한 설계 파라메터 이외에도 입자에 관련된 조건도 같이 고려하여 재밍 그리퍼의 성능을 최적화할 것이다. 또한 하이브리드 그리퍼를 구성하여 작은 크기에도 다양한 작업을 할 수 있는 그리퍼를 제작할 예정이다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the Technology Innovation Program (No. 20018110, “Development of a wireless teleoperable relief robot for detecting searching and responding in narrow space”) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea).

REFERENCES

1. Yoon, J., Yang, J., Yun, D., (2024), A two-chamber soft actuator with an expansion limit line for force enhancement, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 9(5), 4567-4574.
2. Batsuren, K., Yun, D., (2019), Soft robotic gripper with chambered fingers for performing in-hand manipulation, *Applied Sciences*, 9(15), 2967.
3. Amend, J. R., Brown, E., Rodenberg, N., Jaeger, H. M., Lipson, H., (2012), A positive pressure universal gripper based on the jamming of granular material, *IEEE Transactions on Robotics*, 28(2), 341-350.

4. Brown, E., Rodenberg, N., Amend, J., Mozeika, A., Steltz, E., Zakin, M. R., Lipson, H., & Jaeger, H. M., (2010), Universal robotic gripper based on the jamming of granular material, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(44), 18809-18814.
5. Li, Y., Chen, Y., Yang, Y., Wei, Y., (2017), Passive particle jamming and its stiffening of soft robotic grippers, *IEEE Transactions on Robotics*, 33(2), 446-455.
6. Joseph, T., Baldwin, S., Guan, L., Brett, J., Howard, D., (2023), The jamming donut: a free-space gripper based on granular jamming, *Proceedings of the 2023 IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, 1-6.
7. Licht, S., Collins, E., Mendes, M. L., Baxter, C., (2017), Stronger at depth: Jamming grippers as deep sea sampling tools, *Soft Robotics*, 4(4), 305-316.
8. Capalbo, C. E., Tomaino, D., Bruno, F., Rizzo, D., Phillips, B., Licht, S., (2022), A soft robotic gripper with neutrally buoyant jamming pads for gentle yet secure grasping of underwater objects, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 47(4), 975-983.
9. Hauser, S., Eckert, P., Tuleu, A., Ijspeert, A., (2016), Friction and damping of a compliant foot based on granular jamming for legged robots, *Proceedings of the 2016 6th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob)*, 1160-1165.
10. Kim, D., Choi, S., Song, B., Song, J., Yoon, J., Yun, D., (2024), GripFlexer: Development of hybrid gripper with a novel shape that can perform in narrow spaces, *Proceedings of the 2024 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*.
11. Lee, J., Kim, J., Park, S., Hwang, D., Yang, S., (2021), Soft robotic palm with tunable stiffness using dual-layered particle jamming mechanism, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 26(4), 1820-1827.
12. Howard, D., O'Connor, J., Brett, J., Delaney, G. W., (2021), Shape, size, and fabrication effects in 3d printed granular jamming grippers, *Proceedings of the 2021 IEEE 4th International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, 458-464.
13. Miettinen, J., Frilund, P., Vuorinen, I., Kuosmanen, P., Kiviluoma, P., (2019), Granular jamming based robotic gripper for heavy objects, *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 68(4), 421.
14. Jiang, A., Ranzani, T., Gerboni, G., Lekstutyte, L., Althoefer, K., Dasgupta, P., Nanayakkara, T., (2014), Robotic granular jamming: Does the membrane matter?, *Soft Robotics*, 1(3), 192-201.
15. Nishida, T., Shigehisa, D., Kawashima, N., Tadakuma, K., (2014), Development of universal jamming gripper with a force feedback mechanism, *Proceedings of the 2014 Joint 7th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems (SCIS) and 15th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (ISIS)*, 242-246.

16. Amend, J., Cheng, N., Fakhouri, S., Culley, B., (2016), Soft robotics commercialization: Jamming grippers from research to product, *Soft Robotics*, 3(4), 213-222.
17. Howard, D., O'Connor, J., Letchford, J., Joseph, T., Lin, S., Baldwin, S., & Delaney, G., (2023), A comprehensive dataset of grains for granular jamming in soft robotics: Grip strength and shock absorption, *Proceedings of the 2023 IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, 1-8.
18. Shahsevani, R., Reitelshofer, S., Alimardani, R., Franke, J. (2019), Soft jamming gripper with the external prominence of membrane for human-robot cooperation, *Proceedings of the 2019 7th International Conference on Control, Mechatronics and Automation (ICCMA)*, 377-383.
19. Howard, D., O'Connor, J., Letchford, J., Brett, J., Joseph, T., Lin, S., Furby, D., Delaney, G. W., (2022), Getting a grip: in materio evolution of membrane morphology for soft robotic jamming grippers, *Proceedings of the IEEE International Conference on Soft Robotics*, 4, 531-538.
20. Fujita, M., Tadakuma, K., Komatsu, H., Takane, E., Nomura, A., Ichimura, T., Konyo, M., Tadokoro, S., (2018), Jamming layered membrane gripper mechanism for grasping differently shaped-objects without excessive pushing force for search and rescue missions, *Advanced Robotics*, 32(11), 590-604.
21. Fitzgerald, S. G., Delaney, G. W., Howard, D., (2020), A review of jamming actuation in soft robotics, *Actuators*, 9(4), 104.



Jington Yoon

B.S. degree in mechanical engineering from Pusan National University, Busan, South Korea, in 2017, and a M.S. degree in control automation system from Pusan National University, Busan, South Korea, in 2019. He is currently working toward a PhD in robotics engineering with the Daegu Gyeongbuk Institute of Science and Technology (DGIST), Daegu, South Korea. His research interests include soft robotics and soft grippers.
E-mail: y1k1000@dgist.ac.kr



Jaeyeong Keum

B.S. degree in mechatronics engineering from Korea University of Technology & Education (KOREATECH), Cheonan, South Korea, in 2022. He is currently pursuing an integrated M.S. & Ph.D. course in robotics engineering at the Daegu Gyeongbuk Institute of Science and Technology (DGIST), Daegu, South Korea. His research interests include mobile manipulators.
E-mail: jykeum@dgist.ac.kr



Changgi Lee

B.S. degree in school of undergraduate studies from Daegu Gyeongbuk Institute of Science and Technology (DGIST), Daegu, South Korea in 2022. He is currently pushing an integrated M.S. & Ph.D. course in robotics engineering with DGIST. His research interests include mobile robots.
E-mail: dlckdr199@dgist.ac.kr



Dongwon Yun

B.S. degree in Mechanical Engineering from Pusan National University, South Korea, in 2002, an M.S. degree in Mechatronics Engineering in 2004 from GIST, South Korea, and a Ph.D. degree in Mechanical Engineering from KAIST, South Korea, in 2013, respectively. He was a Senior Researcher for Korea Institute of Machinery and Materials from 2005 to 2016. He joined the Department of Robotics and Mechatronics Engineering, DGIST in 2016. He is a Professor in the department and his research interests include biomimetic robot system, industrial robot system & mechatronics, soft robotics, and sensors & actuators.
E-mail: mech@dgist.ac.kr