



직물형 형상기억합금을 이용한 초경량 모듈형 구동기의 설계 및 성능에 관한 연구

정현목^a, 박성준^a, 최경준^a, 박철훈^{a,*}**A Study on the Design and Performance of Ultra-light Modular Actuator Using Textile Shape Memory Alloys**Hyunmok Jung^a, Seong Jun Park^a, Kyungjun Choi^a, Cheol Hoon Park^{a,*}^a Department of Advanced Robotics Research Center, Korea Institute of Machinery and Materials**ARTICLE INFO***Article history:*

Received	28	June	2024
Revised	9	July	2024
Accepted	11	July	2024

Keywords:

Shape memory alloy
Textile SMA
Modular actuator
Ultra-light actuator

ABSTRACT

Actuator technology using shape memory alloys is used in various fields. It has been used in the medical field, to move small cameras or small parts of medical devices. Furthermore, it has been used to implement the movement functions of various robots in the engineering field. Unlike general mechanical actuators, fabric-type shape memory alloy actuators are flexible and light, and they can utilize the unique characteristics of shape memory alloys. In this study, an ultra-light module actuator using fabric-type shape memory alloy was developed and performance tests were conducted. A comparison experiment was conducted on the cooling performance of the driver depending on whether the cooling fan was running or not, and a force measurement experiment on the modular driver was conducted. Based on the experiments, the superior of cooling performance and driving power was confirmed. Additionally, the SMA actuator developed in this study is expected to be applicable in various fields.

1. 서론

형상기억합금(shape memory alloy, SMA)을 이용한 구동 기술은 의료 로봇공학, 재활 로봇공학, 자동차, 항공 우주 분야 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 형상기억합금은 특정 온도 변화에 따라 형태를 복원할 수 있는 특성을 가지고 있으며, 작고 가벼운 구동 시스템을 만들 수 있는 장점이 있다. 최신 연구에서는 높은 정밀도를 요구하는 애플리케이션을 위해 Ni-Ti 기반의 새로운 SMA 구동기가 개발되고 있으며, 산업의 요구에 부응하는 콤팩트하고 빠른 반응속도를 갖춘 구동기가 개발되고 있다. SMA 구동기는 전통적인 모터 구동기보다 작고 가벼우며, 복잡한 기계적 부품이 필요하지 않고, 온도조절을 통해 정밀한 제어가 가능하다.

직물형 SMA에 관한 연구는 최근에 주목을 받고 있는 분야 중 하나이며, SMA와 텍스타일 소재를 결합하여 스마트 텍스타일이나 소프트 액추에이터, 웨어러블 디바이스 등을 개발하는 데 중점을 두고 있다. SMA를 활용하여 제작된 스마트 텍스타일 소재가 보호용 의류에 적용되는 방법과 그 효과에 대해 다룬 연구에서는 직물형 SMA를 통해 보호용 의류의 기술적 향상과 안전성을 높일 수 있는 방안을 제시하고 있다.^[1] 소프트 액추에이터 분야에서는 SMA를 텍스타일 플랫폼에 적용하여 스마트 텍스타일 복합 액추에이터를 개발하고 이를 소프트 그리퍼에 적용하는 방법에 관한 연구가 수행되었고, 스마트 텍스타일의 응용 가능성을 탐구하고 소프트 로봇 분야에서의 활용성을 높일 수 있는 방안을 마련하였다.^[2] 웨어러블 디바이스 분야에서는 3D 프린팅 기술과 SMA를

* Corresponding author. Tel.: +82-42-868-7980

E-mail address: parkch@kimm.re.kr (Cheol Hoon Park).

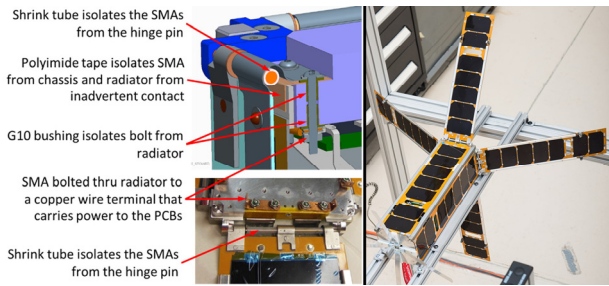


Fig. 1 SMA hinge component of CubeSats

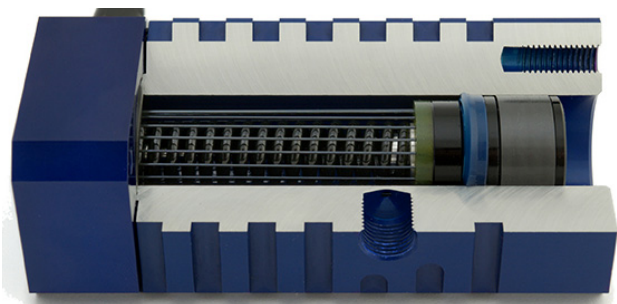


Fig. 2 SMA actuator of Kinitics Automation

이용하여 의류에 맞춤형 액추에이터를 제작하기 위한 플랫폼 개발에 관련한 연구 기록이 있으며, 패브릭 SMA 플랫폼을 통해 의류에 맞춤형 액추에이터를 제작하는 새로운 방법을 구축하였고, 이를 통해 의류 디자인에 혁신을 가져오고 의류를 더욱 스마트하게 만드는 가능성을 제시하고 있다.^[3] 이와 같이 SMA를 직물 형태로 통합하여 다양한 응용분야에서의 활용 가능성을 탐구하는 연구가 점차 늘어나고 있다.

형상기억합금에 관한 연구와 더불어 해외 여러 기관 및 기업들의 이를 응용한 구동기 개발사례들도 꾸준히 증가하고 있다. 미국 항공우주국 NASA의 글렌 리서치 센터는 CubeSats과 같은 소형 위성을 위한 형상 기억합금을 기반으로 하는 가볍고 신뢰도 높은 구동 메커니즘을 개발하였다. Fig. 1과 같이 액추에이터 및 힌지 요소에 SMA 구성 요소를 사용하여 태양 전지판과 같은 중요한 구조물의 유지, 방출 및 배치를 개선하였다.^[4] 캐나다의 액추에이터 전문회사인 Kinitics Automation에서는 Fig. 2와 같은 SMA 기반 구동기 및 펌프를 자체 개발하여 고효율, 경량, 정밀제어의 장점을 부각하여 제품을 판매하고 있으며, 개발된 SMA 구동기는 산업 자동화 라인이나 로봇, 항공우주, 의료기기 등 다양한 분야에서 활용되어지고 있다.^[5]

본 논문에서는 직물형 SMA를 이용한 모듈형 구동기 설계 및 제작 기술을 제시하고 제작된 SMA 구동 모듈의 변형률과 힘, 냉각성능 등 실험을 통한 기초 연구에 대해서 다룬다. 이를 위해서 2절에서는 직물형 SMA 모듈 구동기의 설계 및 제작을 수행하였으며, 3절에서는 직물형 SMA 모듈 구동기의 성능시험을 수행하

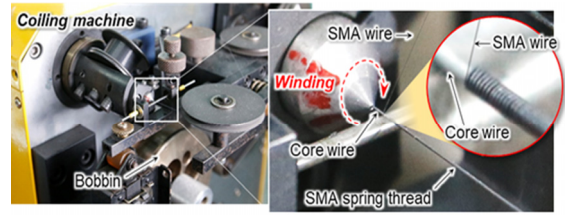


Fig. 3 Manufacturing process of fabric SMA fabric

였고, 마지막으로 4절에서 결론을 논한다.

2. 직물형 SMA 모듈 구동기 설계 및 제작

2.1 SMA 패브릭 유연구동기 제작

형상기억합금은 모터, 공압, 유압 등의 추가 구동장치 없이 가볍고 부드러우면서 스스로 수축하고 힘을 발생하는 초경량 유연구동소자 개발이 가능하다. 본 연구에서는 인장강도와 연신율, 변태 온도 등을 고려하여 Ni 55.4%, Ti 44.6%의 조성비를 갖는 와이어를 선정하였으며, 재료 물성치와 세부 조성 자료를 바탕으로 제작의 용이성을 고려해 와이어의 직경을 결정하였다.

머리카락의 2분의 1 수준인 직경 40 μm 의 SMA 와이어를 권선하여 스프링 실(단위 유연구동소자)을 제작하였으며, 스프링 실을 다발로 직조하여 SMA 패브릭 원단 및 유연구동기를 제작하였다. 선행연구에서 SMA 와이어의 직경이 작을수록 표면적 대비 부피 비율이 증가하고 냉각 속도가 빨라짐을 확인하였으며^[6] 이와 같은 이유로 40 μm 의 매우 작은 직경의 SMA 와이어를 선정하였다. Fig. 3은 SMA 패브릭 원단의 제작과정이며, 권선기에 코어 와이어를 장착한 후 NiTi SMA 와이어를 코일 스프링 형태로 연속적으로 감아 SMA 스프링 실을 제작한다. 이후 특수 개발된 직기를 통해 SMA 스프링 실을 직조하여 직물형으로 제작한 후, 코어 와이어만 용해할 수 있는 산성용액에 침지시켜 용해시킨다. 이와 같은 공정으로 유연구동기의 기초가 될 SMA 패브릭 원단을 제작하였다.

제작된 SMA 패브릭 원단은 Fig. 4와 같은 방식으로 유연구동기 제작공정에 투입된다. 신축성이 있는 매쉬 원단과 양 끝단이 전도성 직물로 구성된 상하부 패브릭 사이에 SMA 패브릭 원단을 배치한 후 재봉하여 SMA 패브릭 유연구동기를 제작하였다. SMA 패

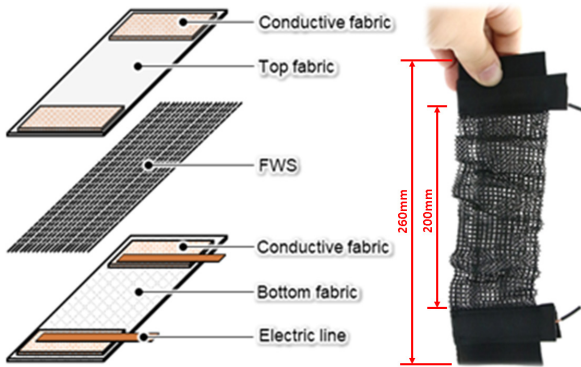


Fig. 4 Manufacturing process of fabric SMA flexible actuator

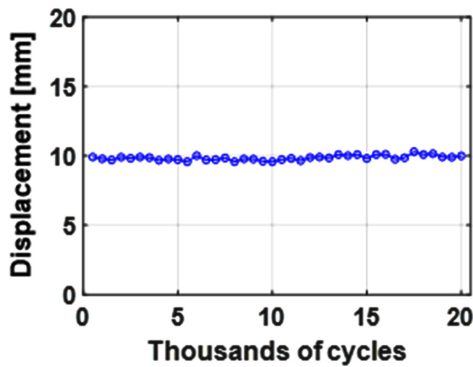


Fig. 5 Contraction displacement of repeated actuation

브릭 유연구동기는 병렬 구조로 제작하기 때문에 전류 주입을 위한 배선을 위아래 두 가닥으로 제작하였으며, 하중을 인가하지 않은 자유단 길이가 200 mm, 구동기 총 길이가 260 mm가 되도록 제작하였다.

SMA 스프링 실은 400°C에서 30분 동안 어닐링 처리하여 제작하였다. SMA 스프링 제조 시 열처리 조건이 적절하지 않은 경우, 작동이 반복됨에 따라 수축 범위가 저하된다.^[7] 직물형 SMA 모듈 구동기의 작동 주기 수에 따른 변화를 관찰하기 위해 3 kg의 하중에서 20,000주기의 반복 작동을 수행하였다. Fig. 5와 같이 전체 사이클 동안 수축 범위는 감소하지 않았으며 균일한 수축이완 성능이 유지되었다. 본 실험을 통해 직물형 SMA 모듈 구동기용 SMA 스프링 실의 열처리 조건이 적절함을 확인하였다.

2.2 모듈형 구동기 설계 및 제작

Fig. 6과 같이 선행연구에서 개발하였던 기존의 SMA 패브릭 유연구동기는 권선된 SMA 스프링이 직조된 패브릭 형태로 메쉬 패브릭 내부에 포함되어 있고, 그 외 장치로는 와이어 형태의 온도 센서와 냉각을 위한 쿨링팬이 구성되어 있다.^[8] 이러한 방식은 직물형태로 외부에 노출되어 있어 충격이나 걸림 등의 원인으로 찢어지거나 파손될 우려가 있다. 또한 국부냉각방식으로 패브릭 구동기의 냉각 시 온도의 균일화가 이루어지지 않아 냉각효과가 떨어

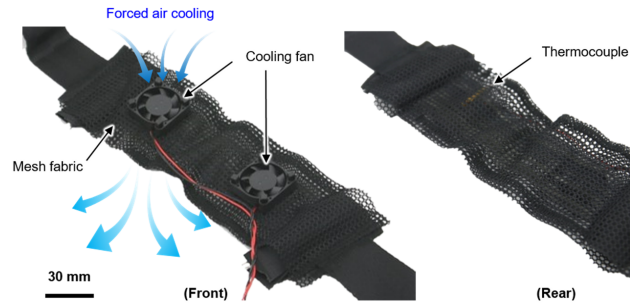


Fig. 6 Previous versions of fabric SMA flexible actuator

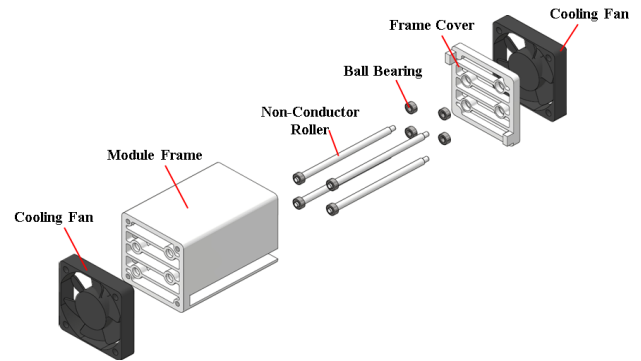


Fig. 7 Component of a modular actuator

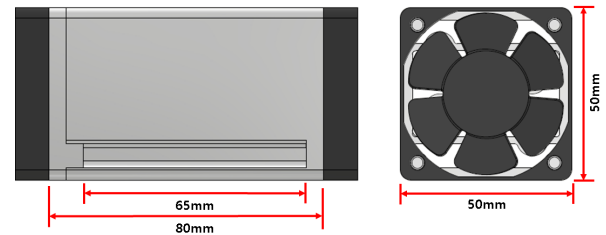


Fig. 8 Design drawing of SMA modular actuator

지는 문제가 있으며, 부착이나 활용에 있어서 편리성이 떨어지고, 구동 및 착용 범위가 넓어 다수의 구동기를 겹쳐서 활용할 수 없는 단점이 있다.

본 연구에서는 기존의 SMA 패브릭 유연구동기의 단점을 보완하고자 비전도성 프레임으로 케이스링 하여 보호할 수 있도록 설계 제작하였다. 또한 가열된 구동기를 프레임 안에서 전 영역 쿨링하여 냉각효과를 높이고, 원하는 위치에 간편하게 부착하여 활용할 수 있는 콤팩트한 구조의 모듈형 구동기를 개발하였다. 모듈형 구동기의 기본구성은 Fig. 7과 같이 SMA 패브릭 유연구동기를 보호하는 모듈 프레임과 비전도성 롤러, 양 측면에서 일 방향으로 공랭시키는 냉각팬으로 구성된다.

모듈 프레임은 Fig. 8과 같이 냉각팬의 크기에 맞추어 가로 x 세로 50 mm의 크기로 설계하였으며, SMA 패브릭 유연구동기의 폭이 60 mm인 것을 고려하여 65 mm의 홈을 갖는 80 mm의 길이로 설계하였다. 프레임 내부는 Fig. 9와 같이 SMA 패브릭

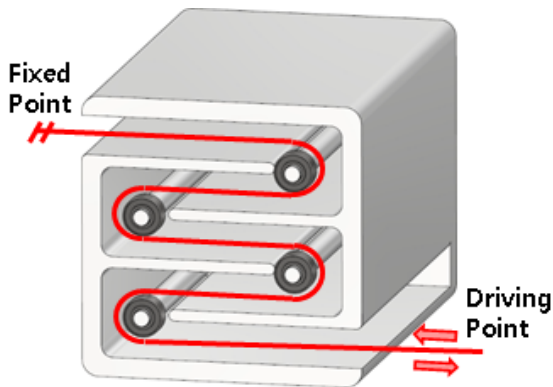


Fig. 9 Driving path of SMA modular actuator

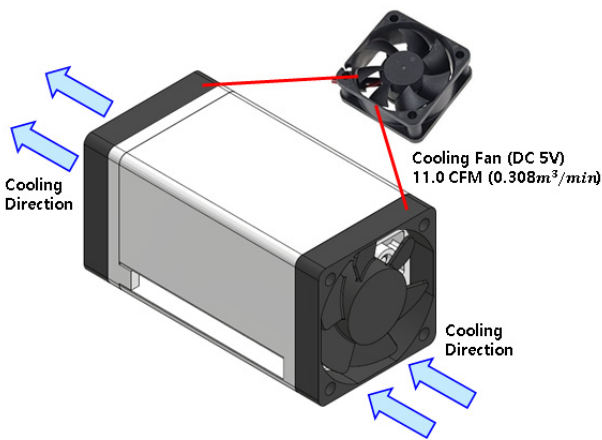


Fig. 10 Cooling direction of SMA modular actuator

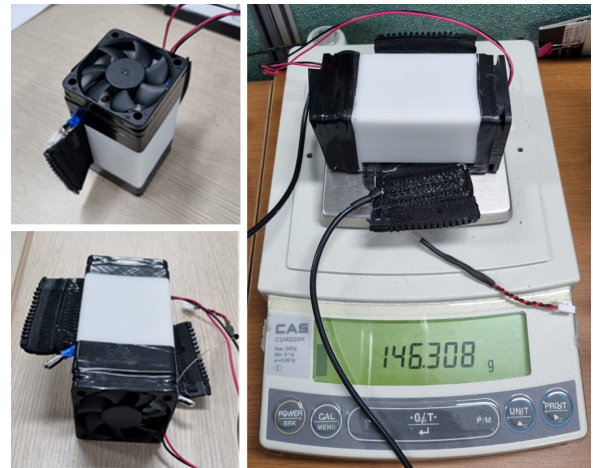


Fig. 11 Prototype of SMA modular actuator

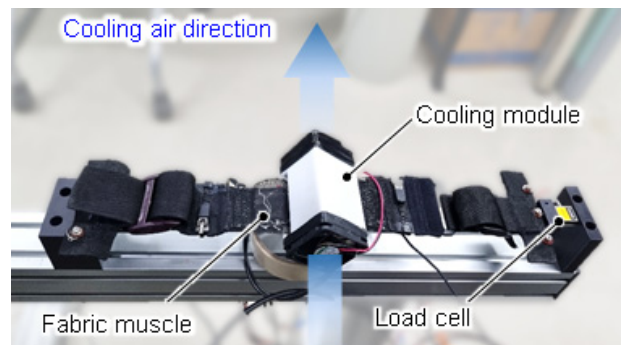


Fig. 12 Isometric force measurement experiment setup

유연구동기를 콤팩트하게 배치할 수 있도록 경로를 형성하였으며, 제작된 구동기의 자유단 길이가 150 mm인 것을 고려, 10 mm의 여유가 있도록 프레임 내부 경로의 총 길이를 160 mm로 설계하였다.

유연구동기가 접하는 엣지 부분은 베어링과 롤러를 배치하여 패브릭 유연구동기의 수축, 인장에 의한 마찰 영향이 최소화 되도록 설계하였다. 전류구동방식인 SMA 패브릭 유연구동기의 특성상 프레임 및 롤러는 비전도성 소재로 제작하였다. 모듈 프레임의 경우 SLA 방식의 3D프린터를 사용하여 해상도와 내구성이 우수하고 매끄러운 표면을 구현할 수 있는 ABS-like 소재로 제작하였으며, 회전 롤러는 열과 전기에 대한 저항이 강한 베크라이트 재질로 제작하였다.

모듈 구동기에 사용한 냉각팬은 DC5V의 유량 11.0 CFM을 가지는 모델로 선정하였으며 Fig. 10과 같이 모듈의 양 끝단에 한 방향으로 쿨링할 수 있도록 부착하여 설치하였다.

제작된 SMA 모듈 구동기는 Fig. 11과 같으며, 전자저울을 사용하여 패브릭 유연구동기를 포함한 전체무게를 측정된 결과 146.3 g의 무게가 측정되었다.

3. 직물형 SMA 모듈 구동기 성능시험

3.1 직물형 SMA 모듈 구동기 Isometric 힘 측정 실험

SMA 모듈 구동기의 Isometric 힘 측정 실험은 Fig. 12와 같이 구성하여 수행하였다. Isometric 실험은 근육의 힘을 측정하는 실험 중 하나로, 본 연구에서는 근육 대신에 유연구동기의 한쪽을 고정시키고 다른 한쪽에 로드셀(LSB200, FUTEK, CA, USA)을 부착하여 일정한 길이로 고정된 상태에서 전류를 인가하였을 때 발생한 힘을 측정하였다. 유연구동기의 길이가 변하지 않지만 외력에 대한 저항을 할 때 힘이 발생하는 원리를 이용하여 실험하였다.

실험은 2장 1절에서 소개한 직경 40 μm , 변태온도가 48 $^{\circ}\text{C}$ 인 SMA 스프링으로 수행하였고, 형상기억합금을 직물형으로 제작한 병렬구조의 특성과 전원공급 장치의 사양에 맞추기 위해 저항 1 [Ω]의 조건으로 실험하였고, 냉각성능이 최적의 성능을 발휘하는 전류 10~20 [A], 가열시간 1.5초의 조건으로 아래와 같은 순서로 수행하였다.

1. 시작 상태 설정 : SMA 패브릭 유연구동기를 자유단 길이로 맞춰놓은 후 초기 상태로 설정

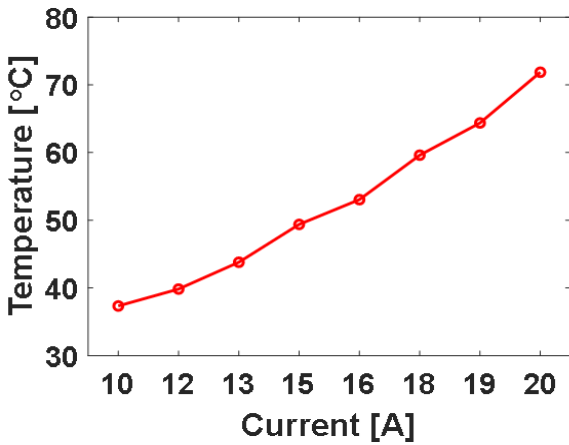


Fig. 13 Temperature change of SMA fabric for current

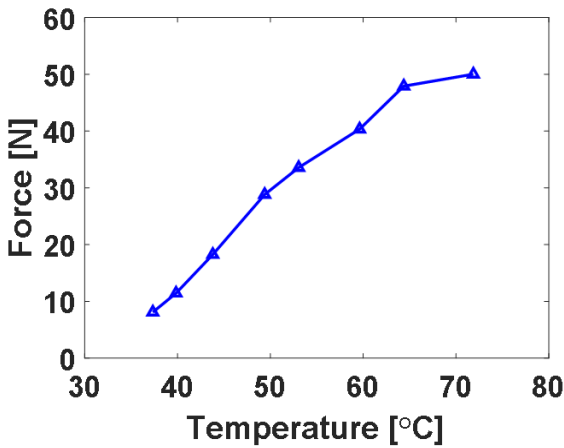


Fig. 14 Force of SMA actuator for temperature change

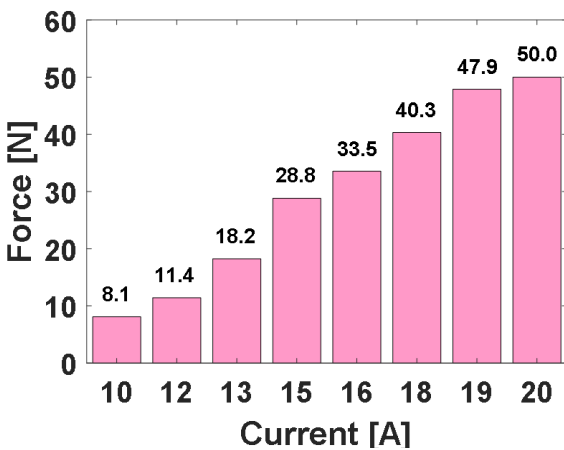


Fig. 15 Force of SMA actuator for current

2. 고정 : SMA 구동기가 실험하는 동안 움직이지 않도록 고정
3. 응력 적용 : SMA 구동기에 전류를 인가하면 수축되는 특성을 이용하여 일정한 응력을 가함
4. 응력 유지 : SMA 구동기에 가해진 응력을 유지하면서 시간에 따른 변화를 관찰

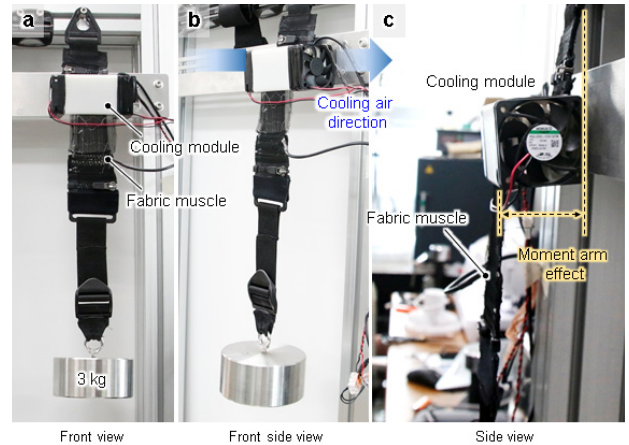


Fig. 16 Cooling performance experiment setup

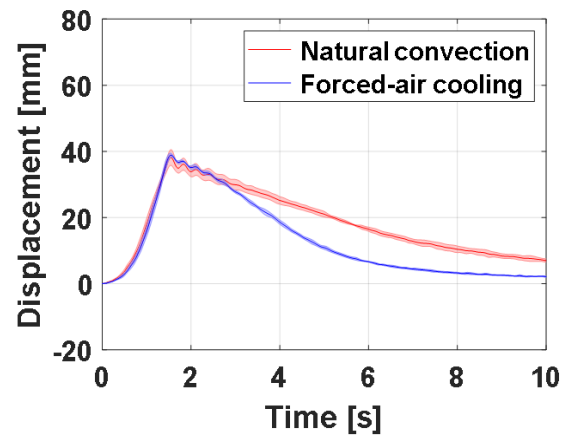


Fig. 17 Contraction displacement of SMA fabric for heating time

5. 평가 : 응력을 가한 후 SMA 구동기의 변형 특성, 응력 대응 곡선, 변형 시간 등을 평가

Fig. 13은 인가된 전류량에 따른 SMA구동기의 온도변화를 보여주는 그래프이며, 1.5초 동안 20 A의 전류를 인가했을 때 약 70°C까지 온도가 상승하였다. 온도가 상승함에 따라 SMA 구동기 내부의 패브릭 유연구동기가 수축하여 힘을 발생시켰으며, Fig. 14와 같이 70°C까지 온도가 상승하는 동안 수축력은 50 N까지 올라가는 것을 확인하였다. 앞선 실험의 결과를 토대로 전류-힘의 그래프를 산출하였으며 Fig. 15와 같다. 인가된 전류의 양이 커질수록 온도가 상승하며, 온도가 상승할수록 수축력이 올라가는 결과를 보였다.

3.2 직물형 SMA 모듈 구동기 냉각성능 실험

SMA 모듈 구동기의 냉각성능 실험은 Fig. 16과 같다. 앞 절에서 수행한 Isometric 힘 측정실험의 결과를 토대로 SMA 유연구동기가 변태되는 온도에 상응하는 3 kg의 무게를 인가하였을 때 냉각 여부에 따른 성능 비교실험을 수행하였다. 유연구동기의 한쪽

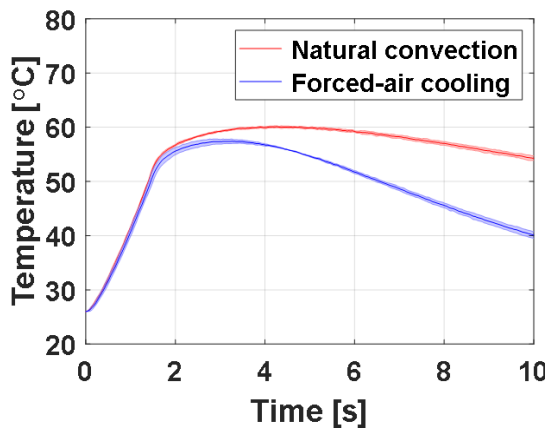


Fig. 18 Temperature change of SMA fabric for heating time

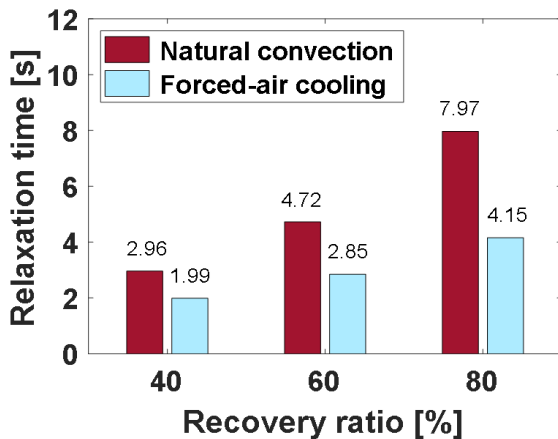


Fig. 19 Recovery time depending on cooling

끝과 프레임이 고정시킨 후 다른 한쪽에 무게 추를 매달아 실험하였고, 부하 3 kg, 저항 1 Ω, 전류 17 A, 가열시간 1.5초의 조건으로 실험하였으며, 동일한 조건일 때 냉각 팬의 가동 여부에 따른 비교실험을 수행하였다.

Fig. 17, 18은 가열시간에 따른 SMA구동기의 수축변위 및 온도 변화를 보여주는 그래프이며, 1.5초 동안 가열한 후 60°C까지 상승하며 발생한 40 mm의 수축 변위가 냉각 팬을 가동하였을 때 자연 냉각보다 빠르게 회복하는 것을 확인하였다. Fig. 19는 변형된 SMA 패브릭 유연구동기가 40~80%까지 회복하는데 소요되는 회복시간을 분석한 그래프이며, 냉각팬을 가동하였을 시 회복되는데 걸리는 소요시간이 월등히 짧은 것을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 직물형 형상기억합금을 이용한 모듈형 구동기 개발 연구내용에 대해 다루었다. 형상기억합금의 특성과 이를 응용한 애플리케이션에 대해 소개하였으며, 그 중에서도 형상기억합금을 직물형으로 직조한 패브릭 SMA와 액추에이터에 대하여 소개

하였다. 이와 같은 선행 연구와 개발사례를 바탕으로 SMA 패브릭 유연구동기와 모듈형 구동기의 설계 및 제작 기술을 제시하였고, 제작된 SMA 구동 모듈의 변형률과 힘, 냉각성능 등 성능실험을 통한 기초 연구를 수행하였다. 성능실험 결과 무게 대비 높은 구동력을 갖고, 냉각성능이 우수하여 초기 상태로의 빠른 회복이 가능하다는 결과를 얻었다.

이상과 같이 본 연구에서는 직물형 SMA 모듈형 구동기를 개발하였으며, 효율 및 경제성, 편리성 등의 측면에서 볼 때 기존 기계적 구동기보다 높은 효율을 보여줄 것이라 기대된다. 향후 SMA 모듈형 구동기의 지속적인 연구가 진행된다면 초경량 액추에이터 기술의 선진화를 도모할 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 로봇산업핵심기술개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다. (과제고유번호 1415187105)

References

- [1] Bartkowiak, G., Dąbrowska, A., Greszta, A., 2020, Development of Smart Textile Materials with Shape Memory Alloys for Application in Protective Clothing, *Materials*, 13:3 689, <https://doi.org/10.3390/ma13030689>.
- [2] Shin, J., Han, Y. J., Lee, J. H., Han, M. W., 2023, Shape Memory Alloys in Textile Platform: Smart Textile-composite Actuator and its Application to Soft Grippers, *Sensors*, 23:3 1518, <https://doi.org/10.3390/s23031518>.
- [3] Muthukumarana, S., Messerschmidt, M. A., Matthies, D. J. C., Steimle, J., Scholl, P. M., Nanayakkara, S., 2021, ClothTiles: A Prototyping Platform to Fabricate Customized Actuators on Clothing using 3D Printing and Shape-Memory Alloys, *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 510 1-12, <https://doi.org/10.1145/3411764.3445613>.
- [4] Tech Briefs, 2020, viewed 14 May 2024, Shape Memory Alloy Mechanisms for CubeSats, <<https://www.techbriefs.com/component/content/article/36853-lew-tops-135>>.
- [5] Design World, 2018, viewed 22 May 2024, Shape-memory Alloys Linear Actuators: A New Option for Positioning <<https://www.designworldonline.com/shape-memory-alloys-linear-actuators-a-new-option-for-positioning/>>.
- [6] Park, S. J., Choi, K., Rodrigue, H., Park, C. H., 2022, Soft Exosuit Based on Fabric Muscle for Upper Limb Assistance,

IEEE-ASME Trans. Mechatron., 28:1 26-37, <https://doi.org/10.1109/TMECH.2022.3194975>.

- [7] Tobushi, H., Ohashi, Y., Hori, T., Yamamoto, H., 1992, Cyclic Deformation of TiNi Shape-memory Alloy Helical Spring, Exp. Mech., 32:4 304-308, <https://doi.org/10.1007/BF02325582>.
- [8] Park, S. J., Choi, K., Rodrigue, H., Park, C. H., 2022, Fabric Muscle with a Cooling Acceleration Structure for Upper Limb Assistance Soft Exosuits, Sci. Rep., 12 11398, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15682-w>.



Hyunmok Jung

Senior Researcher in Department of Advanced Robotics Research Center, Korea Institute of Machinery and Materials.

His research interest is Industrial Robot System and Robot Actuator System.

E-mail: gusahr79@kimm.re.kr



Seong Jun Park

Researcher in Department of Advanced Robotics Research Center, Korea Institute of Machinery and Materials.

His research interests include Soft Actuators and Soft Wearable Robots.

E-mail: sjpark61@kimm.re.kr



Kyungjun Choi

Researcher in Department of Advanced Robotics Research Center, Korea Institute of Machinery and Materials.

His research interests include Artificial Muscles, Soft Actuators and Soft Wearable Robots.

E-mail: choikj@kimm.re.kr



Cheol Hoon Park

Principal Researcher in Department of Advanced Robotics Research Center, Korea Institute of Machinery and Materials.

His research interests include Soft Actuators, Soft Wearable Robots and Magnetic Bearings.

E-mail: parkch@kimm.re.kr