

유연 소재 기반 로봇의 강성 조절을 위한 구조 결합 기반 이중 강성

Dual-Stiffness by Combined Structures for Rigidity-Tuning of Soft Robot

최재혁¹, 이대영¹, 조규진[†]

Jae-Hyeok Choi¹, Dae-Young Lee¹, Kyu-Jin Cho[†]

Abstract Recently, soft robots using soft materials are presented. Thanks to soft materials, soft robots have flexible, highly-stretchable or adaptable features. However, due to the flexibility of soft material, it is hard for soft robots to control accurately or perform high force. To deal with these limitations, variable stiffness technology, which enables the stiffness control of structure, has been developed. In this research, a dual-stiffness structure that is actuated by the assembly of two flexible structures are presented. Each flexible structure consists of flexible film part and rigid parts placed at regular intervals. The flexibility of film between rigid parts allows each structure to move softly. On the other hand, by combining two structures rigid part of each part constrain the degrees of freedom of the other side part. And this causes the stiffness of whole structure to be increased. This paper will cover concepts, design, analysis and experiments of this structure.

Keywords Dual-Stiffness, Variable Stiffness, Structure-Based, Soft Robot, Combined Flexible Structure

1. 서론

최근에 들어, 유연한 소재를 이용한 로봇(소프트 로봇)들이 많이 제시되고 있다. [1-2]에서는 유연한 고분자를 기반으로 다양한 물체를 적응적으로 잡을 수 있는 손을 만들었고, [3-6]에서는 사람에 장착되어 움직임을 돕는 보조기구를 유연한 소재를 이용하여 만들었다. 이렇듯, 유연소재 기반의 로봇들은 소재의 유연성 및 고인장성 등의 특징을 바탕으로 높은 적응성을 필요로 하는 곳에

활용되고 있다. 하지만, 이러한 유연 소재 기반 로봇은 소재의 유연성에서 기인하는 제어의 어려움^[7], 제한된 힘의 크기 등의 문제를 가진다.

소프트 로봇을 연구하는 연구자들은 이러한 유연 소재의 한계를 극복하기 위해, 소재의 구조나 강성을 필요에 따라 변화시키는 방법(가변강성)에 대한 연구를 진행해 왔다. Jamming, Antagonistic Actuation, Low Melting Point Materials (LMPM), 형상기억재료, Tendon-driven 을 이용한 방법 등 다양한 방법이 등장했으며 이를 이용한 다양한 적용분야들이 제시되어 왔다^[7,8].

Granular Jamming의 경우에는 자유로운 모양에서 강성을 변화시킬 수 있다는 장점을 가지고 있지만^[9], 외부와 내부의 압력 차이를 이용하기 때문에 증가할 수 있는 강성에 한계가 있다는 단점이 있다. LMPM은 모양과 강성 변화가 독립적이고 비교적 큰 강성을 확보할 수 있다

Received : Apr. 13. 2017; Revised : Aug. 8. 2017; Accepted : Aug. 15. 2017

※This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) Grant funded by the Korean Government (MSIP) (No.NRF-2016 R1A5A1938472)

[†]Corresponding author: Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, 1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, Korea (kjcho@snu.ac.kr)

¹Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University (why4859@gmail.com, winter2nf@gmail.com)

는 장점이 있는 반면에, 열원을 이용해 구동 되므로 구동 환경이나 속력에서 한계를 지닌다^[7].

이중 강성(Dual-Stiffness)은 유연한 소재와 단단한 소재를 특정한 패턴으로 배치하여, 패턴의 변화를 통해 유연한 소재의 자유도를 제한하는 방식으로 구동되는 가변강성 개념으로서 제시되었다^[10]. [10]에서 제안된 이중 강성은 단단한 소재가 포함된 패턴을 접거나 슬라이딩시키는 방식으로 강성을 변화시키므로 모양과 강성 변화가 독립적이지는 않지만, 소재와 패턴의 변화에 따라 강성을 크게 높일 수 있는 가능성이 있다.

본 논문에서는, 두 가지의 유연한 구조의 결합을 통해서 단단한 구조를 만들어내는 이중 강성 구조를 제안하고자 한다. [10]에서 제안한 구조는 슬라이딩 방식으로 강성 변화의 과정에서 길이의 변화가 생기거나, 접히는 방식으로 강성을 변화시키기 위해서 주변의 여유 공간을 필요로 하였다. 본 논문에서는 분리된 두 구조가 결합되면서 상대편 구조의 자유도를 제한하도록 만드는 방식을 통해 이러한 공간 소비를 해소 하려한다. 또한, 제시된 구조의 굽힘 모드를 예측하고 이를 실험으로 검증하여 앞으로의 발전에 활용할 수 있도록 하려한다.

2. 설 계

2.1 개념

Fig. 1은 본 논문에서 소개된 구조가 구동되는 방식에 대한 개념도 이다. Fig. 1(A)는 유연한 필름 소재로 이루어진 파트(Flexible Part)에 단단한 파트(Rigid Part)를 특정한 간격으로 배치해 둔 모습이다. 이러한 구조물은 단단한 파트 사이를 유연한 파트가 연결하고 있기 때문에, 구조 전체의 층위에서 Fig. 1(B)에서 보이는 것처럼 외부에서 가해지는 힘이나 모멘트에 의하여 쉽게 휘어지는 유연한 거동을 보인다. 하지만 Fig. 1(C)에서처럼, 두 구조물을 결합하는 경우에는 구조 전체의 굽힘 강성이 높아지는 것을 확인 할 수 있다. Fig. 1(C)처럼 외부에서 굽힘력이 가해지는 경우, 상부 구조물의 유연한 파트는 굽힘에 의해 생기는 인장력을 견디는 역할을 한다. 동시에, 상부와 하부 구조물의 단단한 파트는 굽힘에 의해 그 사이에서 생기는 압축력을 견디는 역할을 한다. 굽힘

력이 반대 방향으로 작용하는 경우에는 상부와 하부 구조물의 역할이 반대로 나타나 결과적으로 구조 전체의 굽힘에 대한 강성이 증가하는 효과를 나타낸다.

본 논문에서는 Fig. 1에서 제시하는 개념을 바탕으로, 최종적으로는 Fig. 2-Assembled Part와 같은 구조를 제안한다. 하부 구조를 Main Part, 상부 구조를 Sub Part로 구분 할 수 있고, Sub Part의 유연한 파트로 고무 자석을 사용하고, Main Part의 단단한 파트 내부에 자석을 배치하여 두 구조간의 결합을 유지하게 할 수 있다. Main Part는 Fig 2-Main Part에 표현된 것처럼 유연한 파트 양면에 단단한 파트를 부착하였다. 이를 통해, Main Part는 Fig. 2-Assembled Part에 표시된 방향의 굽힘력에 대해서 구조적인 작동 범위(Range of Motion)가 제한되어 굽힘이 일어나지 않도록 하였고, 반대 방향의 굽힘력에

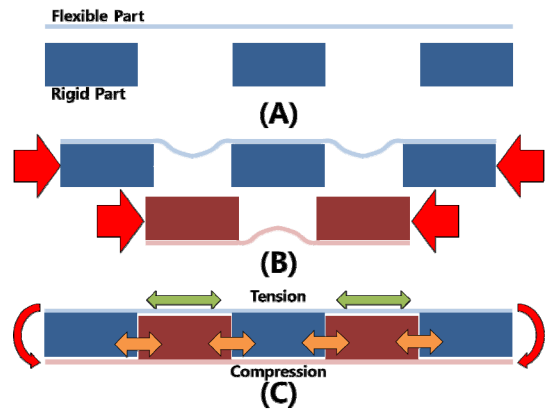


Fig. 1. (A) Flexible Part and Rigid Part, (B)Flexible State, (C) Stiffened State

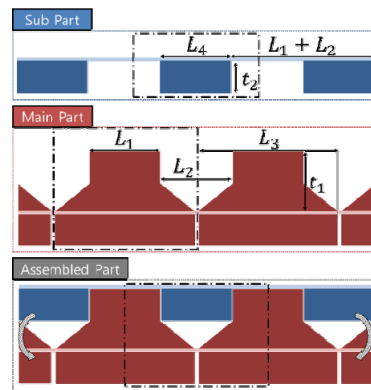


Fig. 2. Sub Part, Main Part and Assembled Part

대해서는 단단한 파트가 맞닿을 때까지의 굽힘을 허용 하도록 하였다.

2.2 해석

제시된 형상은 Fig. 2와 같이 나누어 분석할 수 있다. 각 구조에서 검은색 일 점 쇄 선으로 표시된 단위 구조체에 대한 해석을 통해 외력에 의한 전체 구조의 변형을 예측할 수 있다. 단위 구조체는 유연한 파트의 변형과 단단한 파트의 형상을 통해 전체 변형을 이루어 낸다. 이 해석에서는 Main Part와 Sub Part가 분리된 경우 유연한 파트의 굽힘(Rotation)이 더 주요한 변형 요소로 작용하고, Assembled Part에서는 유연한 파트의 굽힘 보다는 인장(Elongation)이 주요한 변형 요소로 작용한다고 가정하였다. 이렇게 구조의 변형을 예측하는 모델을 통해 이후 구조의 개선에서 각 요소가 변형에 미치는 영향을 확인 할 수 있을 것이다.

2.2.1 Main Part

Main Part와 Sub Part가 각각 분리 되어있는 경우에는 외력에 대한 강성이 부족하여 작은 힘에서도 쉽게 휘어진다. 작은 외력 조건에서 유연한 파트는 구조에 영향을 줄 정도로 인장 되지는 않지만, 형상이 아주 얇으므로 쉽게 굽혀진다. 이러한 가정 하에서 유연한 파트가 일정한 곡률로 휘어지며 단단한 파트를 이어주는 핀 조인트 및 굽힘 스프링의 작용을 한다고 가정할 수 있다. 이를 그림으로 표현하면 Fig. 3(A)와 같다. 이때, 굽힘의 해석에 기본이 되는 식 (1) (Euler-Bernoulli beam theory)을 통해 Fig. 3(A)의 거동을 예측할 수 있다.

$$M = EI \frac{d\theta}{ds} \tag{1}$$

Fig. 3(A)에 임의의 굽힘력 M 을 가한다고 하면, 식 (1)에 의해 모든 굽힘 스프링은 식 (2)에서 구할 수 있는 각도로 휘어지게 된다. 이때 L 은 Fig. 3(C)의 굽혀지는 유연한 파트의 길이이다.

$$\theta = \frac{LM}{EI} \tag{2}$$

Main Part와 Sub Part의 경우 각각, $L = L_1 + L_2 - L_3$, $L = L_1 + L_2 - L_4$ 이므로 이를 대입해 식 (3), (4)의 결과를 얻을 수 있다. 각 식에서 우변의 E 와 I 는 각 Part에 사용된 유연한 파트의 특성 값이고, 좌변은 유연한 파트가 치환된 굽힘 스프링의 스프링 상수이다.

$$k_{eff,main\ part} = \frac{EI}{L_1 + L_2 - L_3} \tag{3}$$

$$k_{eff,sub\ part} = \frac{EI}{L_1 + L_2 - L_4} \tag{4}$$

2.2.2 Assembled Part

Assembled Part의 경우, 개별 Part에 비해서 강성이 상당히 증가한 상태이므로 굽힘이 쉽게 일어나지 않는다. 이러한 조건에 의해 외력에 의한 유연한 파트의 굽힘 보다는 인장이 주요하게 일어난다고 볼 수 있다. 2.2.1.에서와 같이, Assembled Part는 Fig. 3(B)처럼 단위구조체가 핀 조인트와 반대편 조인트의 인장 스프링으로 연결되어 있다고 가정할 수 있다.

2.2.1에서와 같이 외부의 굽힘력을 가하면 Fig. 3(B)는 Fig. 3(D)처럼 휘어지게 된다. 스프링 상수는 응력과 변형률의 관계에 의해서 식 (5)로 표현된다. 이 식에서 A 는 Main Part의 유연한 파트의 단면 넓이이고, L 은 단위구조체에 포함된 필름의 길이이다.

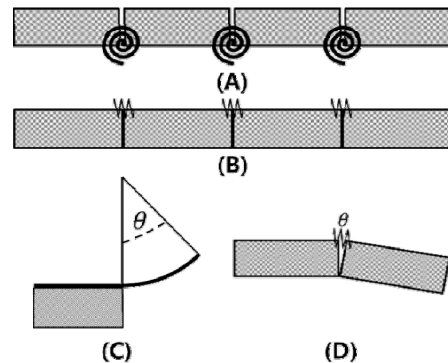


Fig. 3. Unit Structure connected by (A) Torsional Spring and (B) Linear Spring, (C) Bend flexible part, (D) Elongated flexible Part

$$k_{eff,assembledpart} = \frac{EA}{L} \quad (5)$$

3. 제 작

전체 구조물은 ABS, PET 필름, 고무자석과 네오디뮴 자석을 이용하여 만들어졌다. 단단한 파트는 Stratasys의 FDM 방식 3D 프린터인 uPrint SE Plus를 이용해 ABS (ABSplus-P430)를 재료로 해서 만들어졌다. Main Part의 경우 유연한 파트는 PET 필름을 이용하였고, 구조 내부에는 네오디뮴 자석을 배치하였다. Sub Part의 경우에는 두께가 0.5mm인 고무자석을 유연한 파트로 사용하였고, 단단한 파트는 Main Part와 같은 방식으로 제작하였다.

이 구조는 Fig. 4에서처럼 제작된다. Fig. 4(A)는 Sub Part로, (1)은 고무자석, (2)는 ABS로 만든 단단한 파트

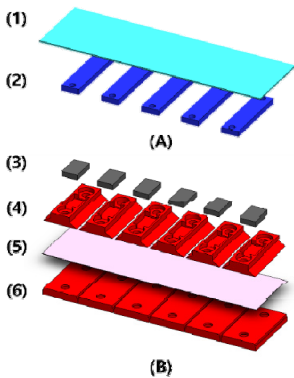


Fig. 4. (A) Sub Part, (B) Main Part



Fig. 5. Fabricated Part

이다. (1)과 (2) 사이는 순간접착제를 이용하여 고정된다.

Fig. 4(B)는 Main Part로, (3)은 네오디뮴 자석, (4)와 (6)은 ABS로 만든 단단한 파트, (5)는 PET 필름이다. (5)와 (4), (5)와 (6)이 닿는 부분에는 접착 테이프를 붙이고, (4)와 (6)에 있는 구멍에 맞춰 지름 M3 볼트와 너트를 이용해 단단히 고정한다. 이후에 (4)에 있는 틈에 맞춰 (3)을 끼우고 순간접착제로 고정한다.

이렇게 만들어진 구조물은 Fig. 5와 같다. 이 구조물은 앞에서 이야기 한 것처럼 두 구조물로 분리되어 유연해지고, 결합되어 단단해진다.

4. 실험 및 분석

제작된 구조물을 바탕으로, 2가지 실험을 진행하였다. 2.2에서 기술한 것과 같이 분리된 상태의 Main Part는 외력에 취약하고, Assembled Part는 외력에 강한 특성을 보인다. 이러한 특성을 반영하여 분리된 Main Part에 대해서는 상대적으로 약한 힘인 중력에 의한 처짐을 확인하였고, Assembled Part에 대해서는 중력에 의한 처짐을 측정하기 어려우므로 외력을 가해 그때 발생하는 변위를 측정하였다.

또한, 2.2에서 제시된 굽힘 및 인장 스프링 가정을 바탕으로 실험과 같은 조건으로 변위를 계산하였다. 동시에, 굽힘 및 인장 스프링을 사용하여 동역학 Simulation 프로그램인 Working Model 2D에 반영하여 산출해 보았다. 마지막으로, 실험결과와 Simulation 값, 변위 계산값을 비교하여 2.2에서 제시한 가정을 검증해 보았다.

Main Part는 Fig. 6(A)에서와 같이 4개의 단위구조체가 자중에 의해 휘어지도록 하였고, 상판에 나머지 구조체를 접착 테이프로 고정해 두었다. 이때, 구조물 뒤에 배치된 모눈종이의 작은 칸의 한 변의 길이는 2 mm이다. Assembled Part는 Fig. 6(B)와 같이 4개의 단위 구조체를 허공에 수평으로 배치하고 두개의 구조체를 고정한 상태에서 실험을 진행하였다. 이후, 4번째 구조체의 중간 지점에 Load cell을 이용하여 힘을 가하며 변위를 측정하였다. 이때, Main Part의 강성변화를 확인하기 위하여 Main Part를 위, Sub Part를 아래에 두고 실험을 진행하였다.

분리된 Main Part는 Fig. 7(A)에서처럼 중력에 의한 굽힘 해석을 진행할 수 있다. Virtual Work를 이용하면 식 (6)을 구할 수 있고, 이를 각각의 각도에 대해 편미분하여 (7)를 구할 수 있다. 이때 계산에 사용되는 특성값은 Table 1의 값을 이용하며, E는 Matweb의 Library를 참조하였고 나머지는 실제 모델 설계 및 측정 값을 이용하였다. k는 식 (3)의 값을 이용한다. 이를 바탕으로 Matlab으로 식 (8)를 풀면 Main Part의 거동을 예측할 수 있다.

$$W = mgl \left(\sum_{i=1}^4 (2i-1) \sin \left(\sum_{j=1}^{5-i} \theta_j \right) \right) \quad (6)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \theta_i} = k\theta_i = mgl \left(\sum_{j=1}^{5-i} (2j-1) \cos \left(\sum_{k=1}^{5-j} \theta_k \right) \right) \quad (7)$$

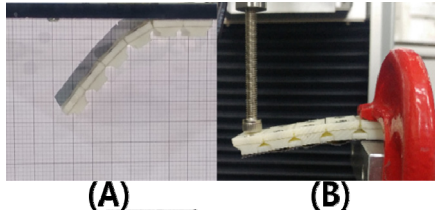


Fig. 6. Experiments of (A) Main Part, (B) Assembled Part

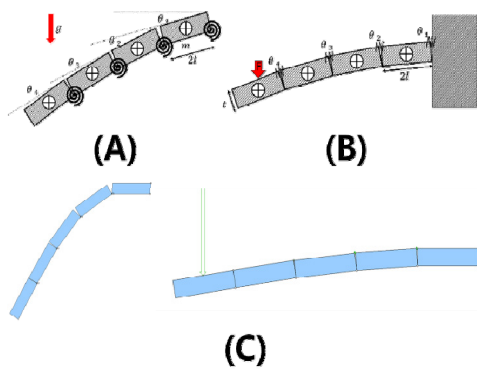


Fig. 7. Model of (A) Main Part, (B) Assembled Part, (C) Working Model 2D Simulation

Table 1. Properties of Main Part

<i>E</i>	<i>k</i>	<i>m</i>	<i>l</i>
2.92 GPa	0.0061 Nm/rad	4.17 g	7.5 mm

Assembled Part는 Fig. 7(B)에서처럼 외부 하중에 의한 해석을 진행할 수 있다. 각 조인트에서 꺾이는 각도를 계산하면 식 (8)과 같고, 이를 바탕으로 힘이 가해지는 위치에서의 변위를 식 (9)과 같이 구할 수 있다. 이때 *s*를 스프링의 길이로 두고, *s*는 접착 테이프의 미끄러짐을 고려해 단위 구조체의 필름 길이로 둔다. 이때, 계산에 사용된 특성값은 Table 2와 같다.

$$\theta_i = 2 \sin^{-1} \left(\frac{(9-2i)lFs}{2t_1^2 AE} \right) \quad (8)$$

$$\delta = 2l \sum_{i=1}^3 \left\{ \sin \left(\sum_{j=1}^i \theta_j \right) \right\} + l \sin \left(\sum_{k=1}^4 \theta_k \right) \quad (9)$$

Working Model 2D를 통한 동역학 Simulation은 Fig. 7(C)와 같이 진행 하였다. 분리된 Main Part는 중력 조건에 노출시켜 각 조인트의 수직방향 변위를 측정하였고, Assembled Part는 힘을 바꾸어 가며 힘을 가하는 점의 변위를 측정하였다.

Main Part에 대한 결과는 Fig. 8과 같다. 점선은 실험값, 일 점 쇄 선은 식 (7)의 계산값을, 이 점 쇄 선은 Working Model 2D의 값을 나타낸다. 결과를 보면, 필름을 굽힘 스프링으로 가정한 모델이 실제를 거의 유사하게 모사

Table 2. Properties of Assembled Part

<i>E</i>	<i>t</i> ₁	<i>A</i>	<i>s</i>	<i>l</i>
2.92 GPa	4.2 mm	2.5 mm ²	15 mm	7.5 mm

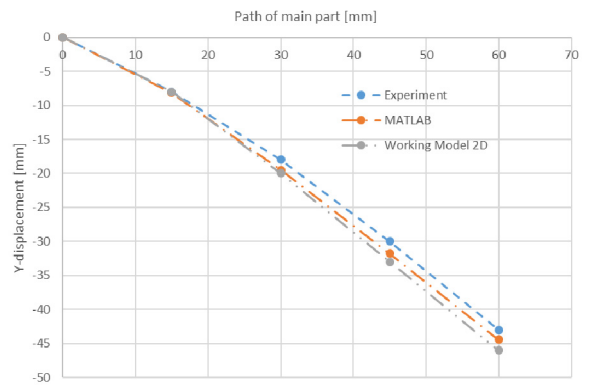


Fig. 8. Main Part deflection Graph

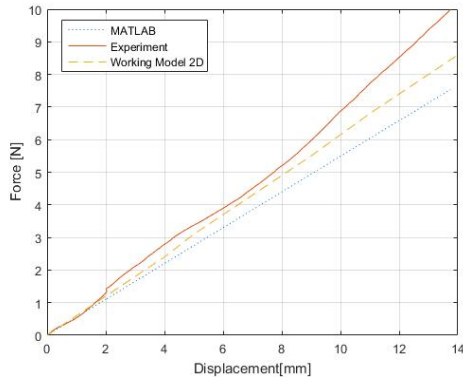


Fig. 9. Assembled Part deflection Graph

하고 있음을 알 수 있다. 다만 실제 형상은 이상적인 경우와는 달리 필름에 접착제 테이프가 붙어있고, 필름도 이상적인 굽힘 스프링으로 작용하지 않는 점에서 차이가 나는 것을 예상할 수 있다.

Assembled Part에 대한 결과는 Fig. 9와 같다. 실선은 실험값, 점선은 Working Model 2D의 값, 점선은 식 (9)의 계산값이다. 세 값의 전체적인 경향은 비슷하지만, 힘의 크기가 커 질수록 변위의 차이가 있음을 확인할 수 있다. 실제 실험에서는 큰 힘이 걸리면 필름의 박리가 일어나는 것을 확인 할 수 있었으므로, 구조적 변화에 따른 오차가 커지는 것으로 추정할 수 있다.

5. 결 론

유연 소재의 장점을 살리면서 단점을 극복하기 위해서는 강성을 변화시키는 이른바 가변 강성 기술이 필수적이다. 이 논문에서는 이러한 가변 강성을 구현하기 위해 유연한 구조를 결합하는 방식을 사용하였다. 유연 소재와 단단한 소재를 특정한 패턴으로 배치해 유연한 구조물 두 가지를 만들고, 또 이들을 하나의 구조물로 결합하는 것을 통해, 두 구조가 서로의 자유도를 제한함으로써 전체 구조가 단단해 지는 것을 유도하였다.

하지만 이렇게 제안된 이중 강성 구조는 실제 로봇에 활용되기에는 아직 부족한 점이 있다. 결합을 기반으로 하여 강성을 변화시키므로 정렬에 따라 강성 값이 달라지는 문제를 갖고 있으며, 구동 과정에서 정렬을 시키기 위한 추가적인 요소가 필요하다. 이렇듯, 본 논문의 이중

강성 구조를 활용하기 위해서는 더 간단하고 정확한 정렬 및 결합 메커니즘을 구현해야 할 것이다.

그럼에도 이러한 이중 강성 기술을 발전시킨다면, 사람 몸에 달라붙어 사람을 도와주는 착용형 로봇이나 사람과 상호작용하는 소프트 로봇들에 활용할 수 있다. 로봇이 외부 환경과의 충돌하는 상황에서 강성을 변화시켜 충격을 완화할 수 있고, 필요에 따라 강성을 증가시켜 로봇이 낼 수 있는 힘이나 반응속도를 향상시킬 수 있다.

이외에도 강성을 변화시켜 로봇 팔의 저장 효율을 증대시킬 수 있다. 로봇 팔의 이중 강성 구조를 분리시키는 것을 통해 유연한 상태로 모양을 변화시켜서 저장하고, 구조를 펼치면서 결합시켜 강성을 증가시킬 수 있다. 이런 방식으로 전개형 로봇 팔을 구현할 수 있을 것이다.

이렇듯, 이중 강성 구조를 발전시키고 활용한다면 기존의 로봇을 개선하거나 새로운 개념의 로봇을 제시할 수 있을 것이다.

References

- [1] F. Ilievski, A.D. Mazzeo, R.F. Shepherd, X. Chen and G. M. Whitesides, "Soft robotics for chemists," *Angewandte Chemie*, vol. 123, pp. 1930-1935, 2011.
- [2] R. Deimel and O. Brock, "A novel type of compliant and underactuated robotic hand for dexterous grasping," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 35, pp. 161-185, 2016.
- [3] H. In, B.B. Kang, M. Sin and K.-J. Cho, "Exo-glove: A wearable robot for the hand with a soft tendon routing system," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 22, pp. 97-105, 2015.
- [4] S.-S. Yun, B.B. Kang and K.-J. Cho, "Exo-glove PM: An easily customizable modularized pneumatic assistive glove," *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2017.
- [5] C.J. Walsh, D. Paluska, K. Pasch, W. Grand, A. Valiente and H. Herr, "Development of a lightweight, underactuated exoskeleton for load-carrying augmentation," in *Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. Proceedings 2006 IEEE International Conference on*, 2006, pp. 3485-3491.
- [6] Y.-L. Park, B.-r. Chen, N.O. Pérez-Arancibia, D. Young, L. Stirling, and R.J. Wood, et al., "Design and control of a bio-inspired soft wearable robotic device for ankle-foot rehabilitation," *Bioinspiration & Bio-*

mimetics, vol. 9, p. 016007, 2014.

- [7] M. Manti, V. Cacucciolo and M. Cianchetti, "Stiffening in soft robotics: A review of the state of the art," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 23, pp. 93-106, 2016.
- [8] E. Brown, N. Rodenberg, J. Amend, A. Mozeika, E. Steltz, M.R. Zakin, et al., "Universal robotic gripper based on the jamming of granular material," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 107, pp. 18809-18814, 2010.
- [9] Y.-J. Park, T.M. Huh, D. Park and K.-J. Cho, "Design of a variable-stiffness flapping mechanism for maximizing the thrust of a bio-inspired underwater robot," *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 9, p. 036002, 2014.
- [10] Y.-J. Park, J.-G. Lee, S. Jeon, H. Ahn, J. Koh, J. Ryu, et al., "Dual-stiffness structures with reconfiguring mechanism: Design and investigation," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 27, pp. 995-1010, 2016.



최재혁

2016 서울대학교 기계항공공학부(공학사)
2016~현재 서울대학교 기계항공공학부
석사 박사 통합과정

관심분야: Soft Robot, 착용형 로봇, 가변강성



이대영

2011 포항공과대학교 기계공학과(공학사)
2013 서울대학교 기계항공공학부(공학석사)
2017 서울대학교 기계항공공학부(공학박사)
2017~현재 서울대학교 정밀기계설계공동
연구소 선임연구원

관심분야: Origami Robot, Bio-medical application



조규진

1998 서울대학교 기계항공공학부(공학사)
2000 서울대학교 기계항공공학부(공학석사)
2007 Massachusetts Institute of Technology
(MIT) 기계공학부(공학박사)
2013~현재 서울대학교 기계항공공학부
부교수

관심분야: Bio-inspired Robot, Rehabilitation, Wearable Robot,
Smart Actuator