한국정밀공학회지 제 39 권 제 11 호 pp. 811-817 November 2022 / 811
J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 39, No. 11, pp. 811-817 http://doi.org/10.7736/JKSPE.022.046
ISSN 1225-9071 (Print) / 2287-8769 (Online)

Check for updates

공압 기반의 팽창식 비틀림 소프트 스프링 액추에이터 설계 및 성능

Design and Performance of a Pneumatic-Based Expanding Torsional Soft Spring Actuator

장재혁[1,*], 김지훈[1,*], 장성원[1], 휴고 로드리그[1,#]
Jae Hyuck Jang[1,*], Ji Hun Kim[1,*], Seong Won Jang[1], and Hugo Rodrigue[1,#]

1 성균관대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University)
* Jae Hyuck Jang and Ji Hun Kim contributed equally
# Corresponding Author / E-mail: rodrigue@skku.edu, TEL: +82-031-299-4680
ORCID: 0000-0002-1358-9630

KEYWORDS: Soft robot (소프트 로봇), Pneumatic actuator (공압 구동기), Soft actuator (소프트 구동기), Air pressure (공압)

The soft robotics field, known to have actuators and systems with a simple manufacturing process, being lightweight and safe to interact with humans, is in constant expansion. Present actuators have excessive unwanted deformations, which greatly affects the system's performance by enlarging the external dimensions of the soft robot, reducing its efficiency, and causing unexpected or harmful contact with its surrounding environment. Thus, this work presented an actuator with a spring-like structure within a pneumatic chamber able to contract based on its innate design and lengthen when hyper-atmospheric pressures are applied, resulting in tension and torsion. A tensile testing machine and a force-torque sensor coupled with the actuator were used to evaluate its performance for different initial lengths, pressure inputs, and number of coils. At 30 kPa, a torque of up to 5 Nm was generated, have a maximum torsional angle of 41 degrees, and expanded 700% of its original length. Results have shown that the studied pneumatic-based expanding torsional soft spring actuator can stably lengthen under pneumatic pressure, resulting in sufficient force and considerable torque, and could be considered in future applications.

Manuscript received: April 19, 2022 / Revised: September 5, 2022 / Accepted: September 19, 2022

NOMENCLATURE

L = Chamber Length
R = Chamber Radius
F = Tensile Force of the Spring Chamber
P = Pneumatic Pressure

1. 서론

소프트 로봇은 지난 수십 년간 여러 가지 방법으로 연구되어 왔다. 가령 폴리머, 형상기억합금, 필름 등과 같은 재질을 이용하고 다양한 구조를 통해 발전되어 왔으며, 제작 기술의 발전으로 인해 소프트 로봇은 실생활에 사용할 수 있는 정도까지 연구되었다. 특히나 부드러운 생물학적 시스템과 유사한 재료를 사용하기 때문에 로봇 시스템에 의해 급작스러운 상황에서 발생할 수 있는 피해가 상당히 감소하고 인간과의 상호 작용 가능성이 증가한다는 장점이 있다[1]. 하지만 아직은 일반적인 로봇과 결합해서 사용해야 하는 한계가 있다.

많은 소프트 로봇은 탄성 중합체(Polymer)가 가진 부드럽고 유연한 성질을 이용해 비선형적인 작동이 가능하도록 연구되어 왔다. 예를 들어 전력 및 모터를 동력원으로 하는 생체 모방 로봇과[2-4] 공압을 동력원으로 하는 생체 모방 로봇[5-7]이 있지만, 탄성 중합체를 이용한 소프트 로봇은 크기가 커질수록 성능이 극단적으로 떨어지는 단점이 있다.

Copyright © The Korean Society for Precision Engineering
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

탄성 중합체와 형상기억합금(Shape-Memory Alloy)을 이용해 제작된 선형 액추에이터는 다양한 작동 모드가 가능한 스마트 소프트 복합재(SSC) [8,9]로서 크기가 작고 다양한 동작이 가능하다는 장점이 있다. 하지만 큰 크기의 로봇에 적합하지 않고 일정량 이상의 힘을 내기가 어렵다는 단점이 있다. 추가로 Pouch Motor처럼 얇은 필름과 같은 재질만을 이용해 액추에이터가 팽창하면서 갖는 강성과 큰 변위를 낼 수 있는 것을 특징으로 가진 많은 로봇이 개발되었다[10-12]. 이러한 장점에도 불구하고 필름으로 제작된 소프트 액추에이터는 단일 개체로 사용하기에 부적합하다. 탄성 중합체와 필름을 함께 사용하는 소프트 로봇도 연구되었는데[13], 이전의 단일 재질로 연구된 소프트 로봇보다 큰 힘을 낼 수 있다는 장점이 있지만 동작이 제한적인 단점이 존재한다.

비틀림은 어떠한 물체에 회전하는 힘이 가해졌을 경우 물체가 변형되는 현상을 말한다. 일반적으로 원기둥 형태와 같은 물건을 이용하여 비틀림을 정의하는데, 한 극을 고정한 후 다른 한 극의 중심축과 나란한 방향으로 힘을 주게 되면 축 방향을 따라 비틀림이 생기게 된다. 이는 인간과 동물에게 가장 기본적인 동작 형태 중 하나로 복잡하고 좁은 공간에서도 원하는 위치와 자세를 유연하고 빠르게 유연성을 높여 복잡한 공간적 위치를 빠르게 달성할 수 있고, 비틀림 변형을 일으켜 저항을 줄일 수 있다.

구멍이나 터널 등 좁은 공간을 지날 때 연성 비틀림 액추에이터는 굽힘 및 신장 모듈과 같은 다른 기능 구성요소와 함께 작동하여 복수의 복잡한 운동을 실현할 수 있다. 또한 정확한 위치 및 힘 제어가 필요하지 않은 일부 비틀림 동작의 경우 부드러운 비틀림 액추에이터를 사용하면 보다 간결한 구조를 만들 수 있고, 복잡한 케이블 전송이 필요하지 않으며 낮은 비용/높은 성능 비율을 가질 수 있다.

비틀림 회전이 가능한 소프트 액추에이터는 다양하게[9,14-20] 구성되어 있는데 그 중 공압을 이용하는 액추에이터는 크게 세 가지로, 나선형 회전 액추에이터[16], 비틀림 회전 액추에이터[17,18], 주름형 챔버 액추에이터[19]가 있다. 또한 위와 같은 소프트 액추에이터의 비틀림 회전 운동을 이용해 로봇의 손목에 적용한 연구도 이루어져 왔다[15,19,21,22].

본 논문에서는 필름으로 외부를 감싸고 스프링이 내장된 챔버의 구조로 공압을 이용해 인장 및 비틀림이 동시에 구동되는 비틀림 회전 액추에이터의 제작 및 설계를 설명하고 힘/토크를 분석하였다. 그 첫 번째로 디자인과 제작 과정을 소개하고 메커니즘을 설명했고, 두 번째는 챔버에 공압이 가해질 때 길이의 증가 및 스프링의 비틀림 운동을 통해 발생하는 힘과 토크를 계산하고 이를 모델 식과 비교하여 설명하였다. 추가로 구조적인 차이가 있을 때의 실험을 진행했는데, 예를 들어 스프링 코일의 개수가 다를 때 챔버의 너비 및 팽창 길이가 다를 때 각각의 실험 결과를 분석하고 설명하였다. 마지막으로 액추에이터의 비틀림 동작에 대해 분석하고 향후 연구 방향에 대해 소개하였다.

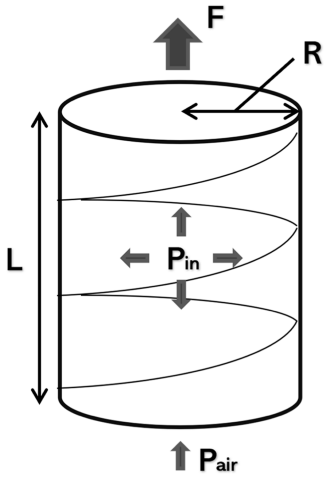

Fig. 1 Model figure

2. 본론

2.1 메커니즘 및 제작 과정

2.1.1 수학적 모델링

Fig. 1은 팽창식 소프트 비틀림 챔버의 수학적 모델 계산을 위해 수치화 한 것이다. 스프링 챔버는 공압을 이용해 팽창하게 되는데 팽창했을 때의 부피를 수식으로 계산한 것은 식(1)과 같다.

$$V = \int_0^{2\pi} \frac{LR^2\theta}{\pi} d\theta \tag{1}$$

챔버가 팽창하면서 하는 일의 양과 주입하는 공기가 한 일의 양은 같으므로 이를 식으로 나타내면 식(2)와 같다.

$$FdL = PdV \rightarrow F = P\frac{dV}{dL} \tag{2}$$

부피를 길이에 대해 미분하면 식(3)이 되고,

$$\frac{dV}{dL} = \int_0^{2\pi} \frac{R^2\theta}{2\pi} d\theta \tag{3}$$

힘 F에 대해 표현하면 식(4)와 같다.

$$F = P\pi R^2 \tag{4}$$

본 모델 식을 통해 압력이 증가할수록 힘이 증가하는 것을 확인할 수 있었고, 챔버의 지름이 증가하면서 내부에 유입되는 공기량이 증가하기 때문에 챔버 내부 부피의 증가도 힘에 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다.

2.1.2 팽창식 소프트 비틀림 챔버 메커니즘

팽창식 소프트 비틀림 챔버의 설계에는 두 가지 기본 개념이 있다. (1) 액추에이터는 비틀림 변형 능력을 갖추고 있고, (2) 비틀었을 때 굽힘, 확장 및 팽창과 같은 결합 처짐이 없다. 비틀림

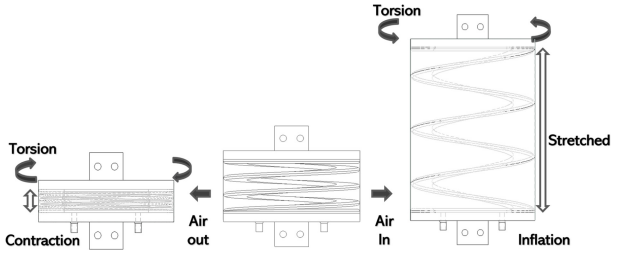

Fig. 2 Basic concept of torsional soft spring chamber structure

스프링은 코일의 중심선 주위에 비틀림을 받아 탄성변형 하는 스프링이다. 위 두 가지 움직임을 바탕으로 팽창식 소프트 비틀림 챔버는 압력을 가하면 필름이 접혀 있는 초기 단계에서 팽창하면서 길이가 필름의 길이만큼 인장했고, 내부의 스프링에 비틀림 응력이 가해져 액추에이터는 비틀림 운동을 수반하면서 인장 및 비틀림 회전 운동을 보이게 되었다. Fig. 2는 본 논문에서 제시하는 액추에이터로서 하나의 챔버가 위, 아래 판 사이에 고정되어 있고 내부는 스프링 구조물로 이루어져 있다.

2.1.3 팽창식 소프트 비틀림 챔버 디자인 및 제작

Fig. 3(a)는 팽창식 소프트 비틀림 챔버의 구조이다. 하단과 상단 판, 내부 스프링, 그리고 외부 필름으로 이루어져 있는데, 내부 구조의 스프링 및 위, 아래 판은 다양한 크기 제작을 위해 Fused Filament Fabrication (FFF)을 통해 3D 프린터(Ultimaker 5S)를 사용하여 Polylactic Acid (PLA) 필라멘트로 제작되었다.

챔버의 동작 범위를 최대화하기 위해 스프링의 모양은 단면이 납작한 모양을 사용하였다. 내부 구조물이 완성된 후 이 내부 구조물의 외부를 감싸기 위해 필름을 사용했는데, 위 필름은 공압을 이용하기 위해 스프링 외부를 밀봉하여 감싸는 역할을 한다. TPU Coated Nylon 재질의 필름을 재단 후 임펄스 실러 또는 다른 열 접합 장비를 사용하여 모서리를 밀봉 후 원기둥 형태가 되도록 봉하여 스프링 외부에 필름을 씌웠다. Fig. 3(b)는 완성된 팽창식 소프트 비틀림 챔버의 모습으로 공압을 가하였을 때 스프링의 움직임과 필름의 움직임이 함께 이루어질 수 있도록 스프링이 필름의 최대 높이까지 비틀린 상태에서 상, 하단 판의 측면과 필름을 봉하였다.

2.2 실험 과정

2.2.1 실험 방법

본 논문에서는 구조물의 길이에 따른 힘 실험을 위해 인장시험기(Mark-10, ESM750)를 사용하였다. 공기압 펌프(Bambi, MD 75/250)를 사용하여 팽창식 파우치 모터의 압축 공기를 생성하고. 압력 제어는 전기 공압 조절기(SMC, ITV-1030)를 사용하여 수행됐다. 생성된 토크에 대한 값은 센서(Robotus, RFT40-SA01)를 사용해 챔버의 양쪽 끝을 고정하고 수평으로 반대쪽 끝을 힘 토크에 부착하여 테스트하였다. 실험에 사용한 팽창식 소프트 비틀림 챔버는 반지름 40 mm 상 하단 판 길이 40 mm 제작했고, TPU Coated Nylon 필름의 길이는 110 mm로 재단하였다. 내부 스프링은 외부 지름 80 mm, 내부 지름 50 mm, 초기 길이 30 mm의 구조로 제작하였다. 또한 챔버의 크기별로 테스트하기 위해 위에 명시된 크기 이외에도 추가로 너비를 증가시키거나 축소해 제작하였다. 스프링의 코일 개수는 1, 2, 3개로 구분해서 챔버가 인장하는 동안 발생하는 힘 및 토크에 대한 변화를 실험했고, 압력별로 변화하는 힘에 대한 실험도 동일하게 진행하였다.

2.3 실험 결과

2.3.1 압력에 따른 힘 모델

Fig. 4는 인장시험기(Mark-10, ESM750) 를 사용해 액추에이터가 고정되어 있을 때 압력에 따른 힘 변화를 실험한 결과이다. 압력이 증가할수록 액추에이터에서 발생하는 힘도 또한 증가했는데, 이는 모델 식에서 보였듯이 $F = P\pi R^2$에 따라 힘이 압력에 비례하게 증가한다는 것을 확인할 수 있었다. 코일이 하나일 때 실험 결과를 보면 10 kPa일 때 힘은 증가하다가 60 N에서 일정한 힘을 보였고, 30 kPa일 때는 140 N에서 일정한 힘을 보였다. 모델 식은 10 kPa일 때 50 N의 일정한 힘을 보였고, 30 kPa 일 때 150 N의 일정한 힘을 보였다. 힘이 증가하다가 일정해지는 지점은 압력마다 모두 달랐고, 동일하게 선형적으로 증가하다가 힘이 일정해지는 것을 확인할 수 있었다.

2.3.2 스프링 코일 개수에 따른 힘

팽창식 소프트 비틀림 챔버는 내부가 스프링 구조로 이루어져 있으므로 챔버가 팽창해 길이가 증가하면 스프링이 비틀림 동작을 수행하였다. Fig. 5는 스프링의 코일 즉 스프링이 감겨진 정도에 따라 힘 변화를 실험한 결과이다. 힘이 다른 것을 확인할 수 있는데, 압력에 따른 힘 변화 방식과 동일하게 실험하고 20 kPa의 압력에서 실험한 결과 스프링의 코일 개수가 증가할수록 힘은 감소하는 양상을 보였다. 힘의 감소는 코일 개수가 감소함에 따라 비례해서 약 10 N씩 감소하였다. 이는 코일의 감긴 개수가 증가할수록 챔버가 팽창할 때 주는 저항력이 증가한다는 것을 보여주었다.

2.3.3 스프링 코일 개수 및 압력에 따른 토크

Fig. 6은 힘/토크 센서(Robotus, RFT40-SA01)를 사용해 챔버가 정지상태일 때 공압을 가해 변화하는 토크 값을 실험한 결과이다. 코일이 하나일 때는 5 Nm의 토크의 비틀림 회전력이 발생했고, 코일의 개수가 3개일 때는 2 Nm 토크의 비틀림 회전력이 발생하였다. 위를 바탕으로 스프링 코일의 개수가 챔버의 비틀림 회전력에 영향을 주었기 때문에 코일 개수가 증가할수록 토크 값이 감소하는 양상을 보였다. 압력을 다르게 가해 실험한 결과에서는 토크 변화량의 차이가 크지 않지만 높은 압력에서 더 큰 토크의 결과가 나오는 것을 확인할 수 있었다.

2.3.4 길이에 따른 동작 및 힘 변화

인장시험기(Mark-10, ESM750)를 사용해 챔버에 10, 20, 30

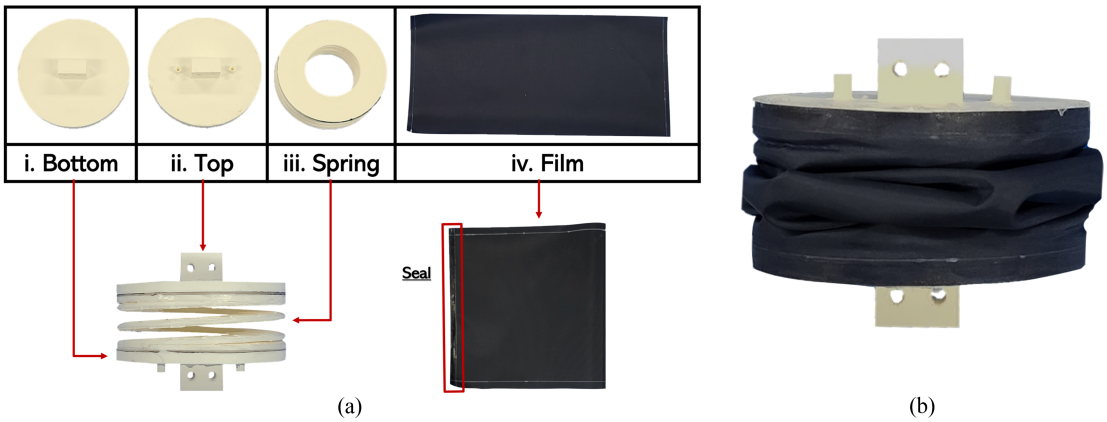

Fig. 3 (a) Pneumatic-based expanding torsional soft spring actuator design, (b) Pneumatic-based expanding torsional soft spring actuator manufacturing

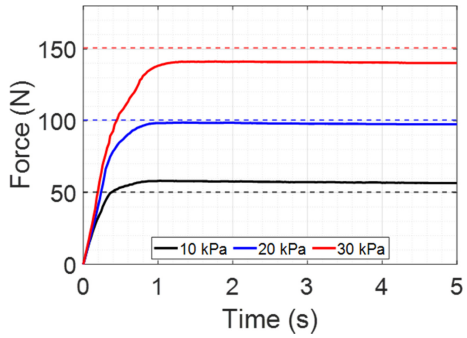

Fig. 4 Force test results and model results according to pressure when the chamber is fixed

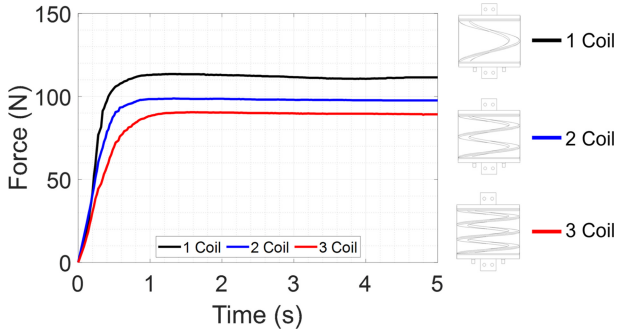

Fig. 5 Test result of force change according to the number of spring coil

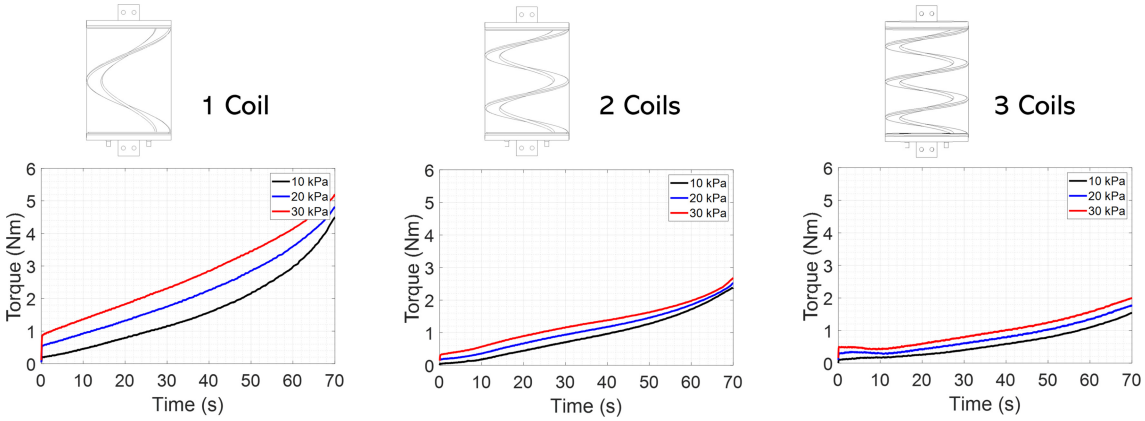

Fig. 6 Torque change according to the number of spring coils and pressure

kPa의 공압을 가한 상태로 0.5 mm/s의 속도로 길이를 변화시켜 각 길이 변화에 따라 발생하는 힘을 실시간으로 측정하였다. 실험 결과는 Fig. 7(a)와 같이 30 kPa의 압력을 주었을 때 챔버의 시작 지점 즉 길이 변화가 0%일 때의 힘은 170 N이었고, 길이가 증가하면서 최종 길이 70 mm, 즉 100% 지점까지 길이 변화가 나타났을 때의 힘은 약 130 N의 결과가 나왔다. 챔버가 팽창과 동시에 인장하면서 힘의 변화 양상은 서서히 낮아지다가 마지막 지점에 높아졌다. 10, 20 kPa의 압력에서 실험해도 힘의 변화는 낮아지다가 50% 지점부터 마지막 지점까지 증가하는 양상을 보였다.

Fig. 7(b)는 각 팽창 지점에서 정지 상태의 힘을 측정해본 결과이다. 0%일 때 가장 높고, 50%가 가장 낮고, 100%일 때는 힘이 조금 증가하였다. 이는 챔버 내부의 스프링 코일이 챔버가 인장하면서 비틀림 회전력이 발생해 반발력이 생겨 인장력이 감소했고, 중간지점 이상부터 챔버가 인장하면서 스프링에서 받는 간섭이 줄어들어 힘이 증가했던 것이다.

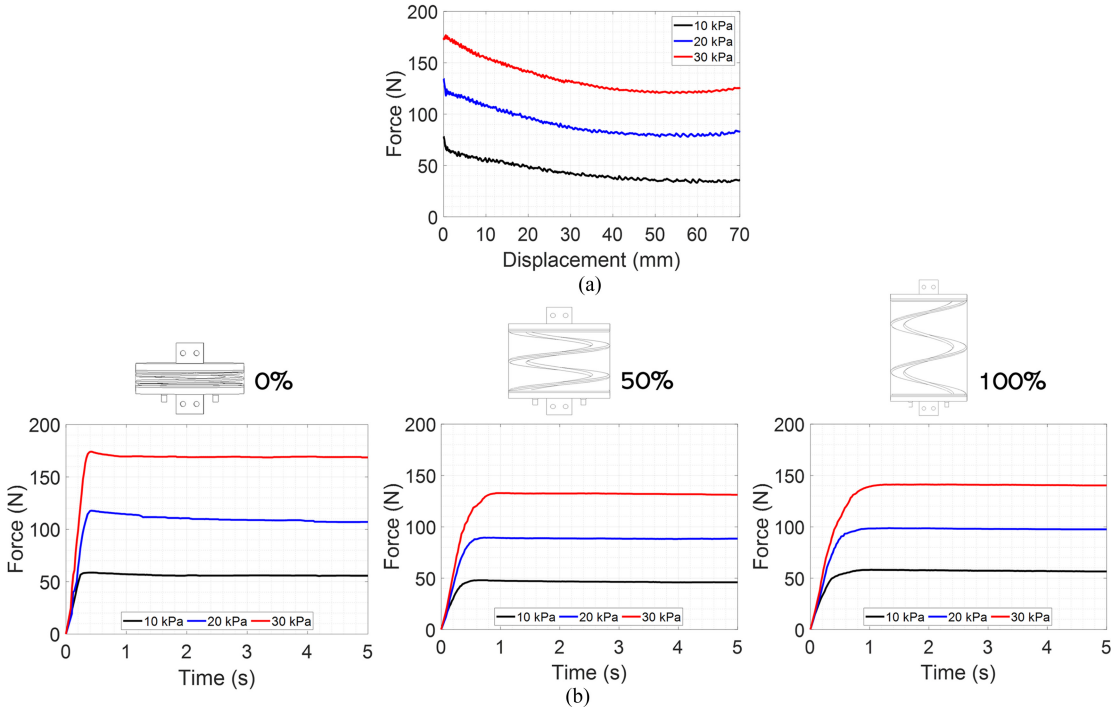

Fig. 7 (a) Force changes according to length change by pressure, (b) Force change at 0, 50, 100% tensile point by pressure

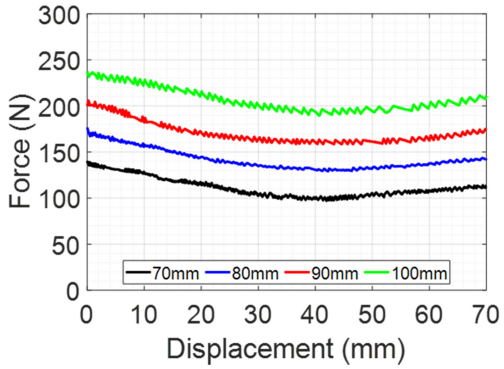

Fig. 8 Force changes according to length change of different radius

2.3.5 크기에 따른 동작 및 힘 변화

Fig. 8은 챔버의 크기별로 길이 변화에 따라 발생하는 힘을 실시간으로 측정한 결과이다. 다른 압력에서 길이별로 측정한 힘 결과와 동일하게 길이 변화가 없는 지점에서는 힘이 가장 높게 측정됐고, 길이 변화가 약 50% 지점인 35 mm 증가했을 때는 힘이 가장 낮게 측정됐고, 100% 지점인 70 mm까지 증가할 때 힘이 증가하였다.

챔버의 크기를 10 mm씩 증가시키면서 실험한 결과는 다음과 같았다. 크기가 가장 작은 70 mm 지름은 시작 지점 힘이 약 140 N의 결과가 나왔고, 가장 큰 지름인 100 mm에서는 시작 지점 힘이 약 240 N의 결과가 나왔다. 챔버의 가장 작은 지름에서 가장 큰 지름까지 10 mm씩 증가시킬 때 힘도 같은 변화의 양상을 보이며 선형적으로 증가한 것을 확인할 수 있었다.

2.4 팽창식 소프트 비틀림 챔버 성능 및 적용

팽창식 소프트 비틀림 챔버에 20 kPa의 공압을 가해 챔버가 팽창 및 인장하면서 나오는 각도 변화와 길이 변화를 측정하였다. 위의 실험 결과를 바탕으로 지름 80 mm와 위아래 판을 포함한 총길이 110 mm, 내부 코일은 한 개로 이루어진 챔버를 제작하였다.

최종적으로 Figs. 9(a)와 같이 41°의 각도 변화와 9(b)와 같이 70 mm의 길이 변화가 나타났고, 스프링이 꼬인 방향은 반시계 방향이기 때문에 챔버가 팽창하면서 코일이 풀리며 반시계 방향으로 회전하는 것을 확인할 수 있었다.

추가로 챔버의 코일이 시계방향으로 회전하게 제작하고, 각도 변화와 길이 변화 측정에 사용했던 챔버와 동일한 조건의 챔버를 제작하였고, 3D 프린터로 제작한 인체의 손 모양을 부착해 손목 형태의 어플리케이션을 제작하였다. Fig. 9(c)와 같이 챔버에 공압을 가해 팽창하면서 시계방향으로 회전하는 움직임을 이용해 문을 여는 시뮬레이션을 진행한 결과 챔버가 팽창해 회전하고 길이가 증가하며 문고리를 돌리고 문을 여는 동작을 성공적으로 보여주었다.

3. 결론

본 고에서는 일반적인 상태일 때 소프트한 특성을 가져 외부에서 주는 힘 그대로 모양을 변형할 수 있고, 공압을 가했을 때는 외부 챔버가 팽창 및 인장해 강성이 생김과 동시에 내부의

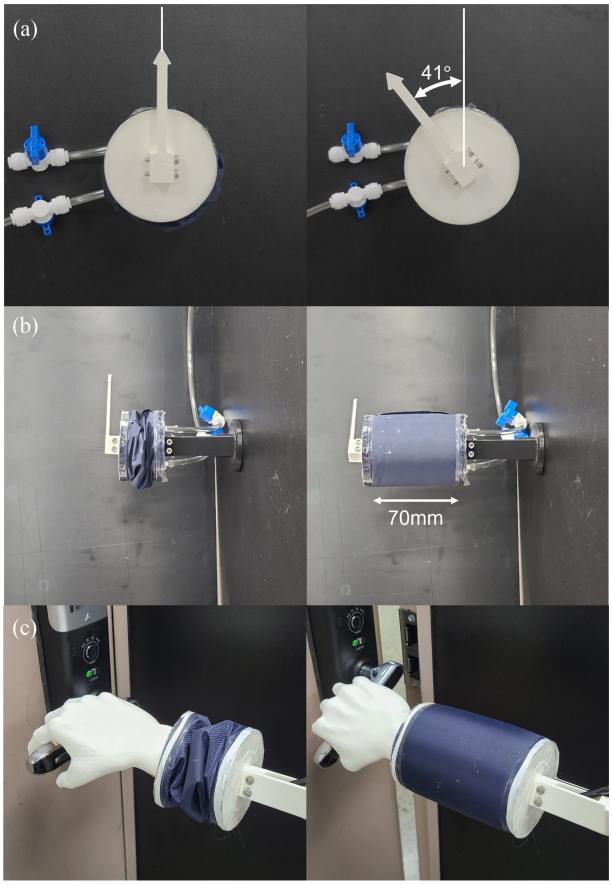

Fig. 9 (a) Changes in the angle, (b) Length of the chamber, and (c) Chamber apply to robot arm wrist to open door

스프링이 풀리면서 비틀림 동작을 수행하는 소프트 액추에이터를 소개했다. 팽창식 소프트 비틀림 챔버의 내부는 스프링 구조로 이루어져 있고 열 접합으로 밀봉한 외부 필름과 결합되어 있다.

압력에 따른 힘/토크의 수학적 모델 및 실험 결과 압력이 증가하면 힘도 증가하는 것을 확인할 수 있다. 스프링 코일 개수에 따른 힘/토크에 관한 결과는 코일이 하나일 때 가장 높은 힘과 토크 값이 나왔고, 스프링의 코일 개수가 증가함에 따라 저항력이 증가해 힘과 토크가 낮아졌다. 길이 변화에 따른 힘은 초기지점에서 가장 높은 힘을 보였고, 중간지점까지 힘이 감소하다가 이는 중간지점 이상부터 챔버가 인장하면서 스프링에서 받는 간섭이 줄어들어 마지막 지점까지 힘이 증가하는 양상을 보였다.

제안된 액추에이터는 제작이 간단하고 사용에 있어 위험성이 낮은 소프트 로봇의 특성을 가지기 때문에 인간과 상호작용하는 로봇으로 활용될 수 있다. 가령 로봇 팔의 손목과 같이 유연한 특성을 갖고 가벼우면서 강력한 액추에이터가 필요한 대규모 응용 프로그램에 사용될 수 있다.

팽창식 소프트 비틀림 챔버의 각도 및 길이 변화를 증가시키는 것은 실생활에서 사용 가능한지 여부의 주요 요소 중 하나이기 때문에 향후 추가적으로 필름 이외에 다양한 재질의 재료 사용 및 구조적인 변화를 통해 비틀림 회전의 각도를 높일 수 있도록 액추에이터의 구성을 개선하고, 비틀림 회전 각도에 대한 PID 제어를 사용해 입력값에 대한 출력 각도의 조절을 가능하게 하여 실생활 로봇에 활용을 위한 후속 연구를 진행할 것이다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean government (Ministry of Science and ICT) (No. 2020R1A4A1018227) and by the Technology Innovation Program (or Industrial Strategic Technology Development Program) (20008745) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea).

REFERENCES

1. Rus, D., Tolley, M. T., (2015), Design, fabrication and control of soft robots, Nature, 521(7553), 467-475.
2. Rogóż, M., Zeng, H., Xuan, C., Wiersma, D. S., Wasylczyk, P., (2016), Light-driven soft robot mimics caterpillar locomotion in natural scale, Advanced Optical Materials, 4(11), 1689-1694.
3. Calisti, M., Arienti, A., Renda, F., Levy, G., Hochner, B., Mazzolai, B., Dario, P., Laschi, C., (2012), Design and development of a soft robot with crawling and grasping capabilities, Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 4950-4955.
4. Cao, J., Qin, L., Liu, J., Ren, Q., Foo, C. C., Wang, H., Lee, H. P., Zhu, J., (2018), Untethered soft robot capable of stable locomotion using soft electrostatic actuators, Extreme Mechanics Letters, 21, 9-16.
5. Laschi, C., Cianchetti, M., Mazzolai, B., Margheri, L., Follador, M., Dario, P., (2012), Soft robot arm inspired by the octopus, Advanced Robotics, 26(7), 709-727.
6. Yamamoto, T., Konyo, M., Tadokoro, S., (2015), A high-speed locomotion mechanism using pneumatic hollow-shaft actuators for in-pipe robots, Proceedings of the 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 4724-4730.
7. TolleyMichael, T., ShepherdRobert, F., GallowayKevin, C., WoodRobert, J., WhitesidesGeorge, M., (2014), A resilient, untethered soft robot, Soft robotics, 1(3), 213-223.
8. Raghavan, J., Bartkiewicz, T., Boyko, S., Kupriyanov, M., Rajapakse, N., Yu, B., (2010), Damping, tensile, and impact properties of superelastic shape memory alloy (SMA) fiber-reinforced polymer composites, Composites Part B: Engineering, 41(3), 214-222.
9. Rodrigue, H., Wang, W., Han, M.-W., Quan, Y.-J., Ahn, S.-H., (2016), Comparison of mold designs for SMA-based twisting

soft actuator, Sensors and Actuators A: Physical, 237, 96-106.

10. Niiyama, R., Sun, X., Sung, C., An, B., Rus, D., Kim, S., (2015), Pouch motors: Printable soft actuators integrated with computational design, Soft Robotics, 2(2), 59-70.
11. Oh, N., Park, Y. J., Lee, S., Lee, H., Rodrigue, H., (2019), Design of paired pouch motors for robotic applications, Advanced Materials Technologies, 4(1), 1800414.
12. Chang, S.-Y., Takashima, K., Nishikawa, S., Niiyama, R., Someya, T., Onodera, H., Kuniyoshi, Y., (2015), Design of small-size pouch motors for rat gait rehabilitation device, Proceedings of the 2015 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 4578-4581.
13. Jang, J. H., Coutinho, A., Park, Y. J., Rodrigue, H., (2022), A positive and negative pressure soft linear brake for wearable applications, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 70(1), 688-698.
14. Zou, M., Li, S., Hu, X., Leng, X., Wang, R., Zhou, X., Liu, Z., (2021), Progresses in tensile, torsional, and multifunctional soft actuators, Advanced Functional Materials, 31(39), 2007437.
15. Rodrigue, H., Wei, W., Bhandari, B., Ahn, S.-H., (2015), Fabrication of wrist-like SMA-based actuator by double smart soft composite casting, Smart Materials and Structures, 24(12), 125003.
16. Amase, H., Nishioka, Y., Yasuda, T., (2015), Mechanism and basic characteristics of a helical inflatable gripper, Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), 2559-2564.
17. Sanan, S., Lynn, P. S., Griffith, S. T., (2014), Pneumatic torsional actuators for inflatable robots, Journal of Mechanisms and Robotics, 6(3), 031003.
18. Bishop-Moser, J., Krishnan, G., Kim, C., Kota, S., (2012), Design of soft robotic actuators using fluid-filled fiber-reinforced elastomeric enclosures in parallel combinations, Proceedings of the 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 4264-4269.
19. Xiao, W., Hu, D., Chen, W., Yang, G., Han, X., (2021), A new type of soft pneumatic torsional actuator with helical chambers for flexible machines, Journal of Mechanisms and Robotics, 13(1), 011003.
20. Choi, J., Ahn, S. H., Cho, K.-J., (2020), Design of fully soft actuator with double-helix tendon routing path for twisting motion, Proceedings of the 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 8661-8666.
21. Nguyen, P. H., Mohd, I. I., Duford, K., Bao, X., Zhang, W., (2021), Design, fabrication, and characterization of a helical twisting, contracting, and bending fabric soft continuum actuator, Proceedings of the 2021 IEEE 4th International Conference on Soft Robotics (RoboSoft), 567-570.
22. Kurumaya, S., Phillips, B. T., Becker, K. P., Rosen, M. H., Gruber, D. F., Galloway, K. C., Suzumori, K., Wood, R. J., (2018), A modular soft robotic wrist for underwater manipulation, Soft Robotics, 5(4), 399-409.

Jae Hyuck Jang
MS combined Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University. His research interest is soft robotics, soft actuators, pneumatic actuator, jamming mechanism, wearable robots.
E-mail: jjh1266@skku.edu

Ji Hun Kim
B.Sc. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University. His research interest is mechanical engineering.
E-mail: kwlgns1214@gmail.com

Seong Won Jang
MS candidate in the Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University. Her research interest is soft robotics, pneumatic actuator, soft sensor, control, soft actuator.
E-mail: joy0314@skku.edu

Hugo Rodrigue
Professor in the Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University. His research interest is soft robots and structures, soft actuators, novel manufacturing methods, biomimetic robots and structures, smart material-based actuators.
E-mail: rodrigue@skku.edu