

공압제어를 통한 2DOF 팽창식 관절 액추에이터 제작

Manufacturing 2DOF Inflatable Joint Actuator by Pneumatic Control

오 남 수¹ · 이 한 열¹ · 로드리그 휴고[†]

Namsoo Oh¹, Haneol Lee¹, Hugo Rodrigue[†]

Abstract: In this paper, a soft robotic arm which can prevent impact injury during human-robot interaction is introduced. Two degrees of freedom joint are required to realize free movement of the robotic arm. A robotic joint concept with a single degree of freedom is presented using simple inflatable elements, and then extended to form a robotic joint with two degrees of freedom joint using similar manufacturing methods. The robotic joint with a single degree of freedom has a joint angle of 0° bending angle when both chamber are inflated at equal pressures and maximum bending angles of 28.4° and 27.1° when a single chamber is inflated. The robotic joint with two degrees of freedom also has a bending angle of 0° in both direction when all three chambers are inflated at equal pressures. When either one or two chambers were pressurized, the robotic joint performed bending towards the uninflated chambers.

Keywords: Soft robot, Soft actuator, Soft robotic arm, Inflatable joint, Bending joint

1. 서 론

최근 소프트 로봇 분야는 다양한 재료, 제작, 구조 등의 시도를 통해 다방면에서 지속적으로 발전해왔다. 기술의 발전으로 소프트 로봇과 소프트 액추에이터는 일상에서 흔히 보이는 크기부터 아주 작은 크기까지 다양한 크기로 연구되어왔지만, 거대한 규모의 소프트 로봇과 액추에이터는 아직 많이 연구되지 않았다.

McKibben 구동기로 대표되는 공압인공근육(Pneumatic Artificial Muscle, PAM)은 압축공기를 동력원으로 사용하며 소프트한 조직을 이용해 두께가 늘어남과 동시에 길이가 수축하는 성질을 이용한 가장 오래된 소프트 액추에이터이다^{1,2}. PAM은 자체중량대비 큰 힘을 낼 수 있고 제어가 쉬운 편이나,

모터에 비해 동작이 느리다는 단점이 있다⁴. 탄성 중합체(Polymers)로 제작된 액추에이터는 가볍고 소프트한 성질과 비선형적인 동작을 간단하게 구현할 수 있다는 장점이 있지만^{5,6}, 크기가 커지면 성능에 제한을 받는다⁷. Pouch motor와 같이 플라스틱 필름을 사용한 선형 액추에이터는 제작이 간편하고 매우 가볍다는 장점이 있으며, iPAM이나 sPAMs 등으로의 적용을 통해 기존의 PAM을 대체할 가능성이 있다⁸⁻¹². 그러나 이러한 액추에이터는 주변 구조물과의 기계적인 구속을 필요로 한다.

SMA (Shape memory alloy)나 TCA (Twisted-coiled actuator)를 이용한 선형 액추에이터의 경우 부피가 작고 자체중량대비 높은 힘을 낼 수 있다^{13,14}. 그러나 이를 이용해 관절을 형성하려면 주변 구조물과의 기계적 구속이 반드시 필요하고, 큰 크기의 로봇에는 적용이 어렵다는 단점이 있다¹⁵.

본 논문에서는 주변 구조물과의 기계적인 구속 없이 작동할 수 있고 다양한 굽힘 각도를 소프트한 상태에서 매우 단단한 상태까지, 넓은 범위의 강성으로 구현할 수 있는 관절 액추에이터의 개념과 그 프로토타입 제작 과정을 소개한다.

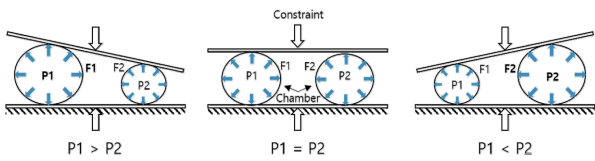
[Fig. 1]에 나타난 액추에이터는 기본적으로 두 개의 챔버가 위판과 아래판에 고정되어 있으며, 두 챔버의 압력 균형에 따

Received : Mar. 28. 2018; Revised : Apr. 24. 2018; Accepted : May. 10. 2018

※ This work was supported by the Technology Innovation Program (10080336) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (M, Korea), and by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. 2017R1C1B5017557).

1. Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea (dhnamsoo@skku.edu, bigspirit@skku.edu)

† Corresponding author: Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea (rodrigue@skku.edu)



[Fig. 1] Basic concept of 1DOF joint actuator. When both two chambers have same pressure, top plate will parallel to the bottom plate. When two chambers have different pressure, plate will be tilted and will make bending angle

라 두 판의 상대적인 기울기가 달라져 다양한 굽힘 각도가 발생한다.

만약 챔버의 압력 비가 1:1로 같다면, 두 챔버의 압력이 10 kPa인 경우보다 두 챔버의 압력이 50 kPa로 동일한 경우에 액추에이터가 더 높은 강성을 갖는다. 따라서 같은 굽힘 각도에서도 다양한 강성을 가질 수 있다. 이때 액추에이터는 두 개의 챔버를 이용하면 1DOF, 세 개 이상의 챔버를 이용하면 2DOF를 가지게 된다.

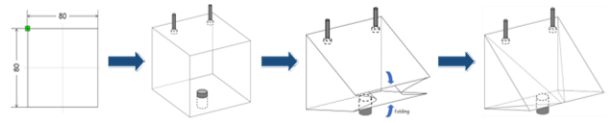
2. 본 론

사람의 팔은 무한한 움직임을 가지고 있지만, 기본적으로는 2자유도에 기반하고 있다. 따라서 로봇 팔에 사용될 관절 역시 2자유도로 제작되어야 완전한 구동이 가능하다.

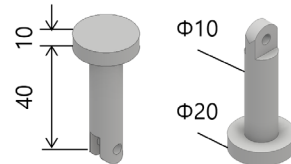
2.1 1자유도 관절 제작과정

1자유도 관절은 [Fig. 2]과 같이 정사각형 5개로 이루어진 챔버 두개, 윗판과 아랫판, 그리고 두 판의 상대적인 거리를 고정시켜주는 구속으로 구성되어 있다. 챔버의 재질로는 0.20 mm 규격의 TPU를 사용한다. 첫 번째 그림에 나타나듯이 레이저 커터를 이용해 가로, 세로 80 mm의 정사각형 면을 5개 제작한다.

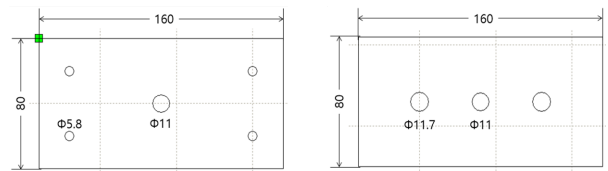
기본적으로 TPU끼리의 접합은 열 접합 방식으로서, 임펄스 실러를 사용한다. 1DOF 관절 액추에이터에 사용된 챔버는 5개의 정사각형을 정육면체가 되게끔 각 모서리를 접합한 뒤, 마지막으로 비어 있는 면 쪽의 모서리를 접합한 모양이다. 이와 같은 입체모양은 굽힘 각도를 발생시킴과 동시에 누수발생을 줄이는 이점을 갖는다. 임펄스 실러를 사용하여 TPU를 접합할 때, 접합횟수와 세 모서리가 모이는 꼭짓점의 개수가 많아질수록 누수가능성이 커진다. 기존에는 조인트의 굽힘 각도를 발생시키기 위해 옆면의 한 변이 경사를 갖는 사다리꼴인 육면체를 제작하였으나, 현재의 입체모양을 통해 챔버 제작시 모서리 접합횟수를 3회 줄이고, 누수가능성이 큰 꼭짓점을



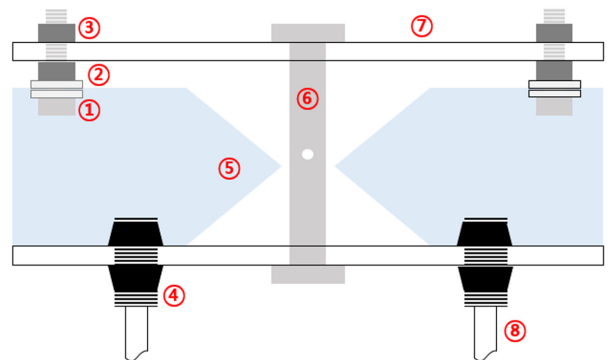
[Fig. 2] Projection view of one chamber. Each chamber is made of 5 TPU square. Once all the connectors and bolts are fixed, we seal one side where there are no TPU



[Fig. 3] 3D model of constraint. There are two parts, which can be fixed together. Top and bottom plate will move based on this constraint



[Fig. 4] Blueprint of top and bottom plate at RDWorksV8. Acrylic plate will be cut by laser cutter using this drawing



[Fig. 5] Drawing of 1DOF actuator with full parts. ①-③ is M6 bolt, washer, and nut; ④ is tube connector; ⑤ is chamber; ⑥ is constraint; ⑦ is acrylic plate; ⑧ is 1/4 inch tube

2개 줄일 수 있다.

팽창식 관절 액추에이터의 굽힘을 발생시키려면 구속을 통해 변위가 고정된 하나의 축을 만들어 주어야 한다. 보다 부드러운 굽힘을 위해 [Fig. 3]과 같이 조인트를 포함한 구조로 설계하였고, 3D 프린터를 이용해 제작했다.

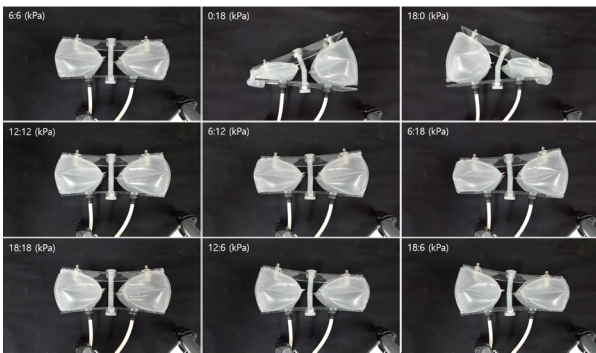
[Fig. 4]와 같이 레이저 커터를 이용해 위판과 아래판에 각각 챔버 윗면, 아랫면에 체결된 볼트, 너트와 같은 위치에 동

일규격의 맞는 구멍과 함께 두 판의 중심에 구속을 위한 구멍을 낸 판을 제작한다.

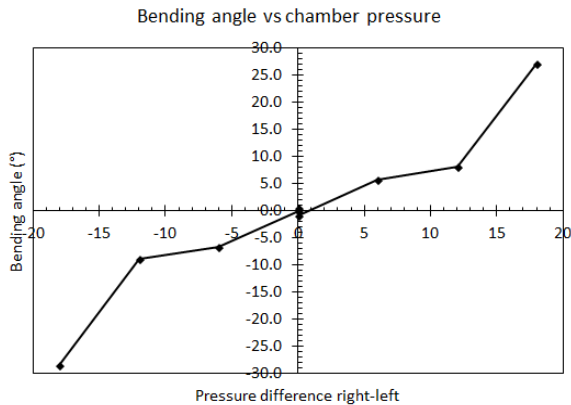
모든 부품이 조립된 액추에이터의 모습은 [Fig. 5]와 같다.

2.2 1자유도 관절 제작결과

제작된 1DOF 액추에이터의 모습은 [Fig. 6]과 같다. 두 챔버의 압력이 같은 경우 위판과 아래판은 평행을 이뤄 약 0°의 굽힘 각도가 발생하였고, P1>P2인 경우에는 최대 27.1°, P1<P2인 경우에는 최대 28.4°의 굽힘 각도가 발생하였다[Fig. 7]. 원



[Fig. 6] Bending motion of 1DOF joint. Pressure of left chamber is P1 and pressure of right chamber is P2; $\approx 0^\circ$ at P1=P2, maximum 28.4° at P1>P2, and maximum 27.1° at P1<P2



[Fig. 7] Bending angle of 1DOF joint. In this graph we can see there are slight angle difference when both chambers having same pressure

[Table 1] Slight angle difference at same pressure difference

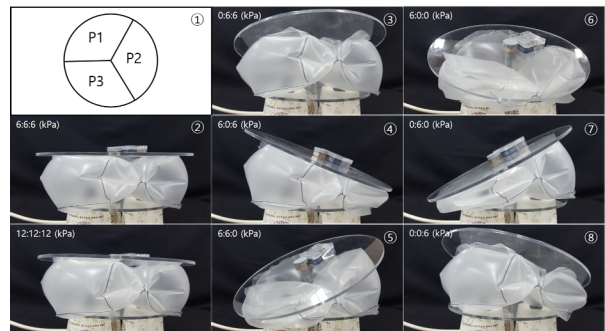
P1	P2	Pressure difference (kPa)	Angle (°)
6	6	0	-0.9
12	12	0	0.5
18	18	0	0.0

점의 길은 부분은 양 챔버의 압력이 같아도 각도가 0이 아니기 때문에 발생했는데, 이러한 오차는 형상의 미묘한 차이와 마찰로 인해 발생하였다[Table 1].

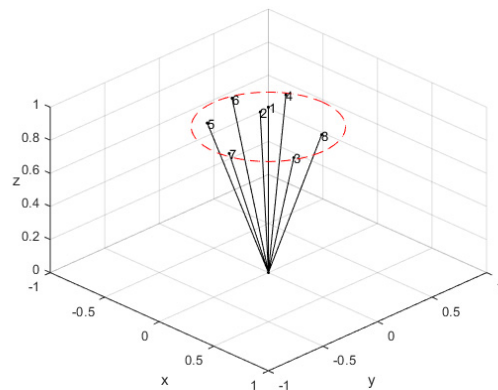
2.3 2자유도 관절 제작결과

2DOF 관절 액추에이터에 사용된 챔버는 우선적으로 원기둥 모양의 하나의 챔버를 제작한 뒤, 위·아래면을 삼등분하여 접합함으로써 세 개의 챔버로 분할한 것이다. 이는 결과적으로 한 챔버당 다섯 개의 면을 갖게 되며 앞서 제작한 1DOF 관절 액추에이터에 사용된 챔버의 구조와 같다. 이와 같은 방식으로 제작된 2DOF 액추에이터의 모습은 [Fig. 8]과 같다.

세 개의 챔버에 모두 압력을 준 다음, 한개의 챔버로 주입되는 공기를 차단하여 굽힘 각도가 발생하는지를 실험하였다. 그 다음 두개의 챔버로 주입되는 공기를 차단하여 roll, pitch, yaw각도를 측정하였다. [Fig. 9]는 측정된 roll, pitch, yaw각도를 이용하여 액추에이터의 법선 벡터를 표시한 것이다. 각 벡



[Fig. 8] Bending motion of 2DOF joint. When three chambers are pressurized, the load top of the actuator is parallel to the ground. When one chamber is not pressurized and the others are still pressurized, we can see that 2DOF bending motion occurs



[Fig. 9] Normal vector of 2DOF joint. We can see the bending angle by calculating normal vectors using roll, pitch, yaw angles

[Table 2] Pressure ratio of 2DOF joint

Number	P1:P2:P3 (kPa)	Number	P1:P2:P3 (kPa)
①	-	⑤	6:6:0
②	6:6:6	⑥	6:0:0
③	0:6:6	⑦	0:6:0
④	6:0:6	⑧	0:0:6

터에서의 세 챔버의 압력비는 [Table 2]에서 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 1DOF 관절 액추에이터를 제작함으로써 공압으로 챔버를 팽창시켜 굽힘을 발생시킬 수 있음을 확인하였다. 또한 동일한 방식으로 제작된 2DOF 액추에이터가 비슷한 굽힘 양상을 보임에 따라, 우리는 본 관절의 기본 개념이 로봇 팔에 적용 가능함을 확인하였다.

본 연구에서 제작된 2DOF 액추에이터는 세 챔버의 압력 차이에 따른 굽힘 양상만을 보였다. 하지만 소프트 로봇 팔에 사용될 관절 액추에이터는 다양한 하중에 따른 정확한 각도 조절이 필요하다. 따라서 향후에는 공압 레귤레이터를 이용하여 각 챔버의 압력을 정확하게 제어함으로써 압력, 굽힘 각도, 토크 간의 관계를 수학적 모델링을 통해 알아볼 것이다.

최종적으로 제작할 로봇 팔에 사용될 관절은 큰 하중을 견디기 위해 고압에서 작동해야 한다. 따라서 기존에 사용한 TPU가 아닌 PVC 타포린을 챔버 제작에 사용할 예정이다. 또한, 챔버 제작 방식을 열 접합이 아닌 열풍 용접 방식을 택하여 보다 강한 접합 강도를 기대할 수 있다.

References

- [1] D. Trivedi, C. D. Rahn, W. M. Kier, and I. D. Walker, "Soft robotics: Biological inspiration, state of the art, and future research," *Applied Bionics and Biomechanics*, vol. 5, no. 3, pp. 99-117, 2008.
- [2] F. Daerden and D. Lefeber, "Pneumatic Artificial Muscles: actuators for robotics and automation," *European Journal of Mechanical and Environmental Engineering*, vol. 47, no. 1, pp. 11-21, March, 2002.
- [3] A. Miriyev, K. Stack, and H. Lipson, "Soft material for soft actuators," *Nature Communications*, vol. 8, no. 1, pp. 1-8, Sept., 2017.
- [4] Y. Jeong, "Technical trend of Biomimetic robot," *Journal of KIPS*, vol. 13, no. 4, pp.5-16, 2011.
- [5] R. V. Martinez, A. C. Glavan, C. Keplinger, A. I. Oyetibo, and G. M. Whitesides, "Soft Actuators and Robots that Are Resistant to Mechanical Damage," *Advanced Functional Materials*, vol. 24, no. 20, pp. 3003-3010, 2014.
- [6] L. Yao, R. Niiyama, J. Ou, S. Follmer, C. D. Silva, and H. Ishii, "PneUI: Pneumatically Actuated Soft Composite Materials for Shape Changing Interfaces," *Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, St. Andrews, Scotland, United Kingdom, pp. 13-22, 2013.
- [7] R. F. Shepherd, U. Gupta, J. Shim, K. Bertoldi, C. J. Walsh, and G. M. Whitesides, "Pneumatic Networks for Soft Robotics that Actuate Rapidly," *Advanced Functional Materials*, vol. 24, no. 15, pp. 2163-2170, 2014.
- [8] S.-Y. Chang, K. Takashima, S. Nishikawa, R. Niiyama, T. Someya, H. Onodera, and Y. Kuniyoshi, "Design of Small-size Pouch Motors for Rat Gait Rehabilitation Device," *2015 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, Milano, Italy, pp. 4578-4581, 2015.
- [9] R. Niiyama, X. Sun, C. Sung, B. An, D. Rus, and S. Kim, "Pouch Motors: Printable Soft Actuators Integrated with Computational Design," *Soft Robotics*, vol. 2, no. 2, pp. 59-70, 2015.
- [10] R. Niiyama, X. Sun, L. Yao, H. Ishii, D. Rus, and S. Kim, "Sticky Actuator: Free-Form Planar Actuators for Animated Objects," *International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, Munich, Germany, pp. 77-84, 2015.
- [11] J. D. Greer, T. K. Morimoto, A. M. Okamura, and E. W. Hawkes, "Series Pneumatic Artificial Muscles (SPAMs) and Application to a Soft Continuum Robot," *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Singapore, pp. 5503-5510, 2017.
- [12] E. W. Hawkes, D. L. Christensen, and A. M. Okamura, "Design and Implementation of a 300% Strain Soft Artificial Muscle," *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Stockholm, Sweden, pp. 4022-4029, 2016.
- [13] J. Park, J. W. Yoo, H. W. Seo, Y. Lee, J. Suhr, H. Moon, J. C. Koo, H. R. Choi, R. Hunt, K. J. Kim, S. H. Kim, and J.-D. Nam, "Electrically Controllable Twisted-Coiled Artificial Muscle Actuators using Surface-Modified Polyester Fibers," *Smart Materials and Structures*, vol.26, pp. 1-18, 2017.
- [14] H. Rodrigue, W. Wang, M.-W. Han, T. J.Y. Kim, and S.-H. Ahn, "An Overview of Shape Memory Alloy-Coupled Actuators and Robots," *Soft Robotics*, vol. 4, no. 1, pp. 3-15, Mar., 2017.
- [15] H. Rodrigue, W. Wang, B. Bhandari, M.-W. Han, and S.-H. Ahn, "SMA-based smart soft composite structure capable of multiple modes of actuation," *Composites Part B: Engineering*, vol.82, no.1, pp. 152-158, 2015.



오 남 수

2018 성균관대학교 기계공학부(학사)
2018~현재 성균관대학교 기계공학과
(석박통합)

관심분야: Soft Robotics, Biomimetic Robots, Pneumatic Actuator



이 한 열

2018 성균관대학교 기계공학부(학사)
2018~현재 성균관대학교 기계공학과
(석박통합)

관심분야: Soft Robotics, Structures and Control for Actuators



로드리그 휴고

2008 Mechanical Engineering,
McGill University, Canada (B.Eng.)
2010 Industrial Engineering, École
Polytechnique de Montréal, Canada
(M.Sc.A.)
2015 Mechanical and Aerospace
Engineering, Seoul National
University, Korea (Ph.D.)
2016~현재 성균관대학교 기계공학과 조교수

관심분야: Soft Robots and Structures, Soft Actuators, Novel
Manufacturing Methods, Biomimetic Robots and
Structures, Smart Material-based Actuators