

리니어 구동 구조의 마찰 저감을 위한 수동형 성장 피복

A Passively Growing Sheath for Reducing Friction of Linearly Moving Structures

서한범¹·김동기²·정광필[†]

Hanbeom Seo¹, Dongki Kim², Gwang-Pil Jung[†]

Abstract: A linearly moving structure in the area where the friction force is dominant – such as ducts filled with grease in the nuclear power plant - experiences increase in friction since the contact surface gets larger as the structure proceeds. To solve this problem is critical for the pipe inspection robot to investigate further area and this makes the system more energy-efficient. In this paper, we propose a passively growing sheath that can be added to linearly moving structures using zipper mechanism. The mechanism enables the linearly moving structures to maintain rolling contact condition against external environment, which provides substantial reduction in kinetic friction. To analyze the effect of the mechanism's head shape, we establish a physical model and compare to the experimental results. Finally, we have shown that the passively growing sheath can be successfully applied to the pipe inspection robot for the nuclear power plant.

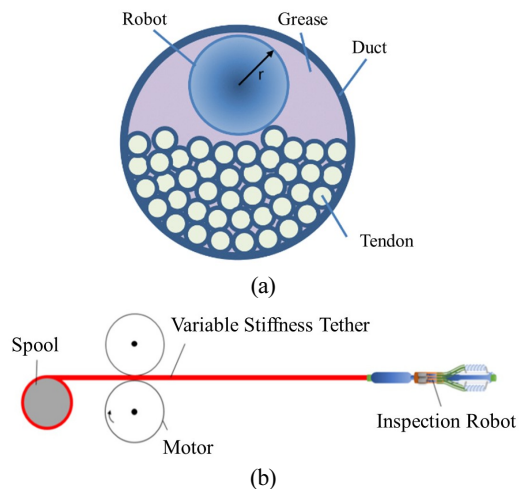
Keywords: Growing Robot, Reducing Friction, Zipper Mechanism, Pipe Inspection

1. 서론

본 연구는 원자력 발전소 구조물 중 강제 보호 목적의 그리스로 가득한 수백 미터의 덕트 내부의 강제 부식 여부를 판단하기 위한 로봇의 점성 마찰 감소 구조에 관한 것이다[Fig. 1(a)]. 현재 강제의 부식 여부를 판단하기 위해선 그리스를 모두 제거하고, 강제의 긴장력을 풀어 꺼낸 후 육안검사를 진행하는 과정을 거친다. 이러한 과정은 많은 시간과 자원을 소모한다. 따라서 점성 환경에서 효과적으로 이동할 수 있는 로봇은 이러한 기존의 비효율적인 검사 방법을 대체하고, 검사 이외에도 보수, 보강과 같은 다양한 활용 방안을 창출할 수 있을 것이다.

본 연구 그룹에서는 덕트 내부를 이동하기 위한 리니어 구

동형태의 검사 로봇을 사용하고 있다[Fig. 1(b)]. 이러한 리니어 형태의 로봇은 그리스 내부를 이동시 구동기와 그리스 사이의 상대운동으로 인해 점성 마찰을 받게 되며, 그 크기는 로봇의 이동거리, 속도에 따라 지속적으로 증가한다. 간단한 예로, 본 논문에 사용된 리니어 구동기가 0.01 m/s로 이동한다고 가정하면, 덕트를 100 m 이동시 점성마찰은 180 kg에 이르며,



[Fig. 1] (a) Diagram of the nuclear power plant duct, (b) A linear inspection system

Received : Mar. 10. 2022; Revised : Mar. 29. 2022; Accepted : Mar. 30. 2022

※ This research was supported by the KHNP (Korea Hydro & Nuclear Power Co.,Ltd)

1. Undergraduate Student, Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea (shb8754@seoultech.ac.kr)

2. MS Student, Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea (stardust1067@seoultech.ac.kr)

† Assistant Professor, Corresponding author: Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea (gpjung@seoultech.ac.kr)

고출력의 구동 모터와 트랜스미션을 필요로 하게 된다. 따라서 증가하는 점성 마찰 문제를 해결하는 것은 시스템의 경량화와 구동 효율 증가에 필수적이다.

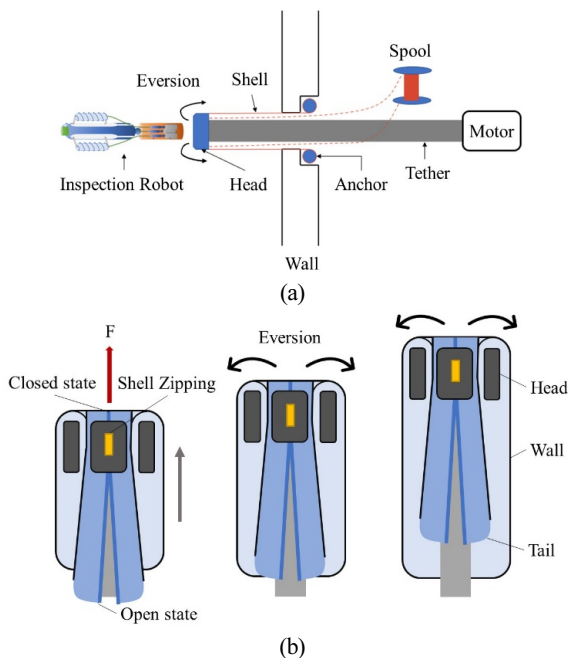
식물 뿌리의 말단 성장(Elongation of the tip) 특성은 구조 전체의 이동없이, 끝부분 성장을 통해 외부 환경과의 상대 이동 및 상호 작용을 최소화하여 성장하며^[1], 이를 리니어 구동기에 적용시 상기의 문제를 해결할 수 있다. 최근 각광받는 Soft Vine Robot은 공압을 통해 해당 특성을 모사하여, 제한된 환경에서 효과적으로 이동하며 다양한 가능성을 제시하였다^[2-5]. 하지만 공압의 밀폐된 시스템은 Vine Robot을 곧바로 상기의 검사로봇에 곧바로 적용하기엔 어려움으로 작용한다.

따라서 말단 성장 특성을 모듈화를 통해 기존 시스템에 추가할 수 있도록 한다면, 필요에 따라 마찰저감 특성을 유연하게 적용할 수 있을 것이며, 기존 로봇을 더욱 유연하게 활용할 수 있을 것이다. 따라서 본 논문은 지퍼 메커니즘을 통한 모듈화된 형태의 마찰 저감 수동형 성장 피복 디자인을 제안하며, 간단한 모델링과 디자인 변수에 따른 실험을 통해 비교 분석을 진행한다. 본 논문의 2장에서는 시스템 디자인과 동작 방법을 소개하고, 3장에서는 모델링, 4장에서는 실험 및 결과를 제시한다. 그리고 마지막으로 결론과 향후 계획을 서술한다.

2. 디자인

2.1 컨셉 디자인

본 시스템의 개략적인 구성은 다음과 같다[Fig. 2(a)]. 나일



[Fig. 2] (a) Integrated system diagram, (b) Eversion process using zipper mechanism

론 재질의 멤브레인 한쪽 끝은 앵커에 고정되어 스펴에 저장된다. 리니어 구동기가 전진 시, 구동기 말단에 부착된 Head가 구동기와 함께 이동하며 스펴에 저장된 피복을 끌어당긴다. 당겨진 피복(Tail)은 Head를 지나며 시스템 전체를 감싸는 새로운 외벽(Wall)이 되어 말단 전개를 일으킨다. 따라서 새로운 피복이 리니어 구동기의 끝부분에서 구름 조건을 통해 전개되며 시스템 전체의 상대이동 없이 적은 마찰로 이동할 수 있다.

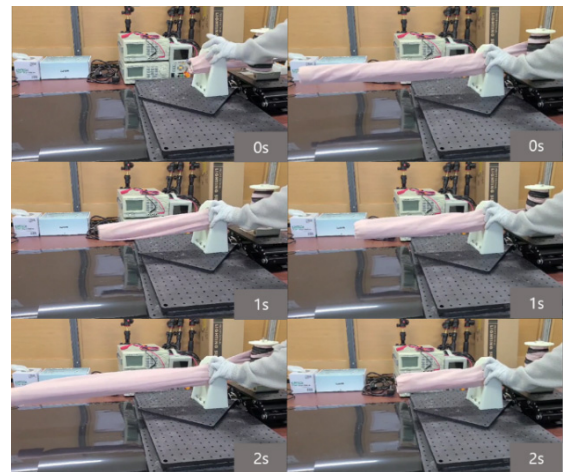
본 논문의 주요 메커니즘은 열린 상태이던 피복이 Head를 거쳐 리니어 구동기를 완전히 감싸는 닫힌 상태가 되는 것이며, 이를 통해 별도의 시스템이던 피복이 리니어 구동기 시스템에 추가될 수 있다. 본 논문에서는 Zipper 메커니즘을 통해 이를 구현하였다[Fig. 2(b)].

본 연구에서 가정한 덕트 환경에서, 로봇이 강연선 위를 지날 수 있는 직경은 대략 0.1 m로, 그리스 내 이동시 저항을 최소화하기 위해 앞쪽에 부착된 검사로봇과 유사한 직경인 0.05 m를 기준으로 제작하였다.

2.2 동작 방법

본 시스템은 성장시에는 리니어 구동기의 추진력을 통해 성장하며, 회수시에는 스펴에 장착된 정하중스프링의 복원력으로 회수된다[Fig. 3]. 정하중스프링은 초기의 일정 변위 이후 일정한 토크 아웃풋을 보이며, 많은 길이 이동을 목적으로 하는 본 시스템에서 기존 스프링에 비해 큰 이득을 얻을 수 있다.

말단 전개와 Zipping이 일어나는 Head는 구동기에 결합되는 지지 구조물과 피복이 Tail에서 Wall로 변환되는 구간으로 나뉜다. 결합 구조의 디자인은 리니어 구동기의 형태에 따라 가변적이며, 본 논문에서는 기존 구동기 시스템에 결합하기 위해 구동기와 Head 사이에 마찰 증대 목적의 폴리머를 부착한 후 나사로 체결하였다. 피복은 지지 구조물을 둘러싼 그리



[Fig. 3] Growing process (left), Retracting process (right)

형태의 구조물을 따라 이동하며 Tail에서 Wall로 변환된다. 피복 전개 시 피복에 여유공간이 많으면 지퍼가 체결되는 중, 피복이 지퍼에 끼거나 구김이 발생하여 체결에 방해받을 수 있다. 따라서 상대적으로 피복 여유공간이 적은 Head의 바깥면에 지퍼를 위치시킴으로써 이를 최소화하였다.

3. 모델링

기존 Soft Vine-Robot이 성장하기 위해선 멤브레인이 스펀지에서 이송되는 과정과 피복의 뒤집힘(Eversion) 과정에서의 힘 손실이 존재하며, 이는 다음과 같이 수식화 된다⁶⁾.

$$PA = [Path\ Independent] + [Path\ Dependent] \quad (1)$$

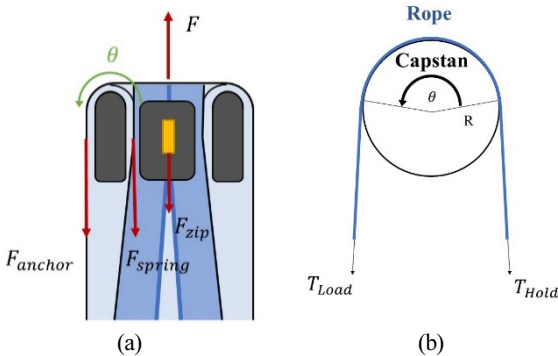
$$PA = [YA + (\frac{1}{\varphi}v)^{\frac{1}{n}}A] + [\mu_s wL + \sum_i Ce^{\frac{\mu_s L_i}{R_i}}] \quad (2)$$

본 논문의 메커니즘은 리니어 구동력에 의해 전개되지만 위의 Soft Vine-Robot과 유사성이 존재한다. 따라서 각 힘의 관계를 선형이라고 가정하여, 식 (2)를 다음과 같이 변형하여 적용할 수 있다.

$$F = [F_{anchor} + F_{zip} + F_{spring}] + [\mu_s wL + \sum_i Ce^{\frac{\mu_s L_i}{R_i}}] \quad (3)$$

여기서 F_{anchor} 는 피복이 Anchor로부터 받는 힘, F_{zip} 는 지퍼 체결을 위한 힘, 그리고 F_{spring} 는 스펀지의 복원력이다. 이때, 피복 사이의 마찰을 굉장히 작다고 가정하면, 리니어 구동 시 상대적으로 작은 [Path Dependent] 항을 소거할 수 있으며⁷⁾, 다음과 같이 간략화 된다.

$$F = [F_{anchor} + F_{zip} + F_{spring}] \quad (4)$$



[Fig. 4] (a) System modeling, (b) Capstan equation diagram

뒤집힘 과정에서의 Head와 피복 사이 마찰거동은 일종의 Capstan과 Rope 사이의 운동으로 묘사할 수 있으며[Fig. 4], Capstan Equation 식 (5)과 유사하게 F_{anchor} 와 F_{spring} 관계를 $k(\mu_s, \theta)$ 의 계수로 표현할 수 있을 것이다(식 (6)).

$$T_{Load} = T_{Hold} * e^{\mu_s \theta} \quad (5)$$

$$F_{anchor} = F_{spring} * k(\mu_s, \theta) \quad (6)$$

여기서 θ 는 Head와 피복 사이의 접촉각이며 μ_s 는 Head와 피복 사이의 마찰계수이다. 따라서 본 시스템이 전개되기 위한 힘을 다음과 같이 표현할 수 있다(식 (7)).

$$F = F_{zip} + (1+k) * F_{spring} \quad (7)$$

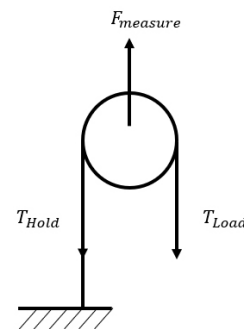
4. 실험 및 결과

4.1 모델링과 실험값 비교

본 논문에서는 실험을 통해 구해낸 각각의 F_{zip} , $k(\mu_s, \theta)$ 의 값을 식 (7)에 대입하여 구한 F_{model} 와 통합 실험을 통해 얻은 F_{exp} 를 비교하였으며, 각각 $\theta = 150^\circ$, $\theta = 180^\circ$, $\theta = 230^\circ$ 일 때의 결과를 비교하여 모델링 결과를 테스트하였다. 실험을 통해 구한 각 항들의 값은 [Table 1]과 같다.

[Table 1] Experiment results

	$\theta = 150^\circ$	$\theta = 180^\circ$	$\theta = 230^\circ$
F_{zip}	1.5 N		
F_{spring}	6.5 N		
k	3.7	3.42	5.14
F_{model}	32.05 N	30.23 N	41.41 N
F_{exp}	39 N	34.3 N	51.6 N
Error	17.8%	11.9%	19.8%



[Fig. 5] Experiment setup diagram

F_{zip} 은 피복을 고정한 후, 지퍼 체결을 위한 힘을 측정하였으며, F_{spring} 은 6m의 피복이 저장된 스펀로부터 피복을 풀기 위한 힘을 측정하였다. k 는 [Fig. 5]과 같이 한쪽 끝단을 고정 한 채 반대쪽 끝단에 하중을 부과한 후, Head가 피복과 마찰을 받으며 일정한 속도로 움직이기 위한 힘을 측정하였다. 해당 힘을 식(8)~식(11)의 과정을 거쳐 다음과 같이 k 를 구하였으며, T_{Load} 가 각각 10N, 14N 그리고 20N 일 때의 값들의 평균 값을 구하였다. 상기의 실험들은 모두 각각 3번의 반복 시험으로 이루어졌으며, 그 결과는 [Table 2]와 같다.

$$T_{Hold} = T_{Load} * k \tag{8}$$

$$F_{measure} = T_{Load} + T_{Hold} \tag{9}$$

$$F_{measure} = (1 + k) * T_{Load} \tag{10}$$

$$k = \frac{F_{measure}}{T_{Load}} - 1 \tag{11}$$

$\theta = 150^\circ$, $\theta = 180^\circ$, $\theta = 230^\circ$ 에서 모델링 값과 실험값의 오차가 각각 17.8%, 11.9%, 19.8%를 보였다. 이는 피복의 구김도, 지퍼와 피복 사이의 misalignment로 인해 F_{zip} 이 달라지기 때문이며, 또한 실제 피복 거동에서 발생하는 [Path Dependent]

[Table 2] k data results

	10 N	14 N	20 N	Avg
$k_{\theta = 150^\circ}$	3.85	3.86	3.4	3.7
$k_{\theta = 180^\circ}$	3.46	3.5	3.3	3.42
$k_{\theta = 230^\circ}$	5.31	5.13	4.99	5.14

항에서 기인한다.

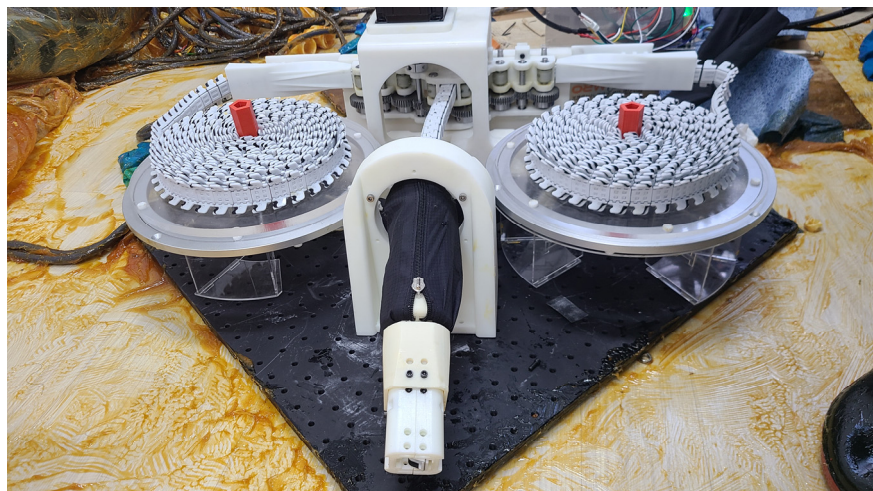
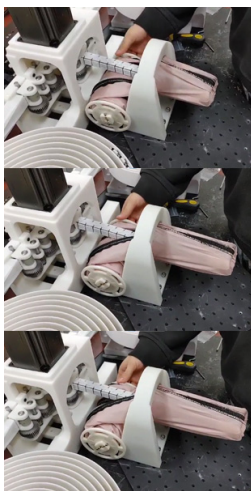
$k(\mu_s, \theta)$ 의 경우 접촉각에 따라 $k_{\theta = 180^\circ}$ 를 기준으로 $\theta = 230^\circ$ 일 때, 50%만큼 큰 차이를 보이며, 기존 일반적인 Capstan Equation과 달리 최적화된 k 가 존재하는 경향성을 확인할 수 있다. 이는 k 가 접촉각과 마찰계수 이외에도 피복의 구김 정도, 피복과 Head 사이 여유공간 등 다른 변수들의 영향을 받기 때문이며, 결과적으로 실제 피복의 운동이 3차원의 면마찰로 일어나며, Head가 Capstan과 완전히 형태적으로 유사하지 않기 때문이다.

4.2 시스템 통합 테스트

본 실험의 결과를 토대로 시스템 전개를 위해 가장 적은 힘이 요구되는 $\theta = 180^\circ$ 디자인으로 시스템 통합 테스트를 진행하였으며, 피복이 리니어 구동기와 성공적으로 성장 및 회수되며 메커니즘이 작동함을 확인할 수 있다[Fig. 6].

5. 결론

본 논문에서는 점성 마찰이 주요한 공간에서 선형적으로 이동하는 구조물이 효율적으로 이동하기 위한 메커니즘을 제안하였다. 또한 간단한 모델링과 실험을 통해 Head 형태에 따른 성장 힘을 비교 분석하였다. 이를 통해 추후 연구에서 더욱 최적화된 Head 디자인과 전개시의 F_{spring} 최소화를 통해 시스템을 개선할 수 있을 것이다. 실제 리니어 구동기와 통합 실험을 통해 본 메커니즘이 실제로 성공적으로 작동 가능함을 확인하였으며, 모듈화 형태의 디자인을 통해 본 연구에서 사용된 리니어 구동기 이외의 선형적으로 이동하는 구조물에 다양한 목적으로 활용될 수 있을 것이다.



[Fig. 6] Integration test with a linear actuator

References

- [1] A. Sadeghi, A. Mondini, and B. Mazzolai, "Toward self-growing soft robots inspired by plant roots and based on additive manufacturing technologies," *Soft Robotics*, vol. 4, no. 3, pp. 211-223, 2017, DOI: 10.1089/soro.2016.0080.
- [2] E. W. Hawkes, L. H. Blumenschein, J. D. Greer, and A. M. Okamura, "A Soft Robot that Navigates Its Environment Through Growth," *Science Robotics*, vol. 2, no. 8, 2017, DOI: 10.1126/scirobotics.aan3028.
- [3] S.-G. Jeong, M. M. Coad, L. H. Blumenschein, M. Luo, U. Mehmood, J. H. Kim, A. M. Okamura, and J.-H. Ryu, "A Tip Mount for Transporting Sensors and Tools using Soft Growing Robots," *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Las Vegas, NV, USA, 2020, DOI: 10.1109/IROS45743.2020.9340950.
- [4] F. Stroppa, M. Luo, K. Yoshida, M. M. Coad, L. H. Blumenschein, and A. M. Okamura, "Human Interface for Teleoperated Object Manipulation with a Soft Growing Robot," *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Paris, France, 2020, DOI: 10.1109/ICRA40945.2020.9197094.
- [5] J. -h. Kim, J. Jang, S.-M. Lee, S.-G. Jeong, Y.-J. Kim, and J.-H. Ryu, "Origami-inspired New Material Feeding Mechanism for Soft Growing Robots to Keep the Camera Stay at the Tip by Securing its Path," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 6, no. 3, pp. 4592-4599, July, 2021, DOI: 10.1109/LRA.2021.3068936.
- [6] L. H. Blumenschein, A. M. Okamura, and E. W. Hawkes, "Modeling of bioinspired apical extension in a soft robot," *Conference on Biomimetic and Biohybrid Systems*, pp. 522-531, 2017, DOI: 10.1007/978-3-319-63537-8_45.
- [7] D. A. Haggerty, N. D. Naclerio, and E. W. Hawkes, "Hybrid Vine Robot With Internal Steering-Reeling Mechanism Enhances System-Level Capabilities," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 6, no. 3, pp. 5437-5444, July, 2021, DOI: 10.1109/LRA.2021.3072858.



서한범

2017~현재 서울과학기술대학교 기계자동차공학과 학사과정

관심분야: Bio-inspired robots, Smart actuators



김동기

2015 서울과학기술대학교 기계자동차공학과(학사)

2021~현재 서울과학기술대학교 기계공학과 석사과정

관심분야: Bio-inspired robots, Origami-inspired robots, Smart actuators



정광필

2010 KAIST 기계공학과(공학사)

2016 서울대학교 기계공학과(공학박사)

2017~현재 서울과학기술대학교 조교수

관심분야: Bio-inspired robots, Origami-inspired robots, Smart actuators