

## 오리가미 기반 파이프 탐사 소프트 로봇

### Origami-Inspired Pipe Inspection Robot

김주형\*‡, 김조현\*‡, 장제이\*‡, 오기용\*\*†

Ju Hyung Kim\*‡, Jo Hyeon Kim\*‡, Jei Jang\*‡ and Ki-Yong Oh\*\*†

**초 록** 지하 수도망이나 발전소와 같은 복잡한 배관 시스템에서는 안전을 위한 정기적인 배관 검사가 필수적이다. 본 논문에서는 이러한 복잡한 배관 환경에서 작동 가능한 크레슬링 오리가미(Kresling origami) 기반의 공압식 소프트 로봇(Soft robot)을 제안한다. 제안된 로봇은 폴리염화비닐(Polyvinyl chloride, PVC) 및 테이프 복합재 기반의 크레슬링 액추에이터(Actuator) 모듈로 구성되어 있으며 수평이동 및 수직이동과 같은 기본적인 이동뿐만 아니라, T자형 배관 내에서 원하는 방향으로 굽힘 이동하는 것이 가능하다. 또한, 크레슬링 액추에이터의 큰 변형 능력을 활용하여 80 mm ~ 170 mm 범위의 배관 직경 사이에서 안정적으로 작동할 수 있다. 따라서 제안된 크레슬링 기반 소프트 로봇은 기존에 해결하지 못했던 직경 변화에 대한 적응성을 확보하여, 복잡한 배관 환경에서도 안정적이고 효과적인 검사 수행이 가능함을 보여준다.

**주요용어:** 소프트 로봇틱스, 공압 액추에이터, 크레슬링 오리가미 구조, 배관 탐사 로봇, 생체 모방 로봇

**Abstract** Pipe inspection is essential for maintain the safety of complex pipe systems such as underground water supply networks and power plants. In this paper, we propose a Kresling-based soft pneumatic robot that can operate in these complex pipe systems. The robot consists of polyvinyl chloride-tape composite-based Kresling actuator modules. In addition to basic movements such as crawling and climbing, the robot can bend and drive in a desired direction in a T-shaped pipe. Furthermore, the proposed robot can stably operate within a pipeline diameter range of 80 - 170 mm by leveraging the deformation capability of the Kresling actuators. Thus, the proposed Kresling-based soft robot mitigates the challenges exhibited by previous methods in adapting to diameter changes, thereby enabling stable and effective inspection in complex pipeline environments.

**Key Words:** Soft Robotics, Pneumatic Actuator, Kresling Origami, Pipe Inspection Robot, Biomimetic Robot

#### 1. 서 론

배관 내부는 직경이 작은 구간, 급격한 곡률 변화, 다수의 분기와 같은 복잡한 기하학적 특성을 지니기 때문에 내부 검사용 로봇(Robot)의 주행과 작업 수행이 어렵다. 이러한 환경에서는 크기 변화와 굽힘 동작이 가능하여 유연하게 기하학적 제약을 극복할 수 있는 소프트 로봇(Soft robot)이 경직된 하드 로봇(Hard robot)에 비해 높은 적합성을 갖는다. 기존의 소프트 로봇은 주로 지렁이 형태의 실리콘 기반 구조를 채택하였으

며, 전후 단의 실리콘 액추에이터(Actuator)가 앵커(Anchor) 역할을 수행하고 중앙의 선형 실리콘 액추에이터가 추진력을 생성하는 방식이 일반적이다[1,2]. 또한, 실리콘 대신 나일론 섬유를 액추에이터로 사용하는 구조가 제안되기도 하였다[3]. 이와 같이 실리콘 및 나일론 기반 지렁이형 로봇은 안정적인 접지력 및 굽힘 성능을 보유하지만, 낮은 이동 속도 및 다양한 직경의 배관 환경에 대한 적응력 부족이라는 구조적 한계를 가진다.

한편, 유전체 탄성체(Dielectric elastomer) 액추에이터를 이용한 뱀 형태 로봇이 제안되어 실리

[Received: July 12, 2025, Revised: August 13, 2025, Accepted: August 13, 2025] \*한양대학교 기계공학부 학부과정 (Undergraduate Course, Dept. of Mechanical Engineering, Hanyang University), \*\*한양대학교 기계공학부 교수 (Professor, School of Mechanical Engineering, Hanyang University)

‡These authors contributed equally to this work as co-first authors.

† Corresponding Author: kiyongoh@hanyang.ac.kr

© 2025, The Korean Society for Nondestructive Testing

큰 기반 구조보다 빠른 이동 속도를 달성하였으나[4], 직경 변화가 심한 배관에서는 이동 성능이 제한된다. 직경 변화 문제를 해결하기 위해 크래슬링(Kresling) 오리가미(Origami) 구조의 액추에이터를 적용한 로봇이 연구되었으며, 큰 변형 특성을 통해 다양한 직경의 배관 환경에 대응할 수 있음이 보고되었다[5]. 그러나 기존 크래슬링 기반 로봇은 굽힘 기능이 부재하여 분기나 곡률이 큰 구간을 포함한 복잡한 배관 내부 주행에는 한계가 존재한다.

본 연구에서는 크래슬링 오리가미 액추에이터를 기반으로 직경 변화에 대한 적응성과 곡률이 큰 배관에서의 굽힘 동작을 동시에 구현할 수 있는 공압식 소프트 로봇을 제안한다. 제안된 로봇은 두 개의 다리 액추에이터와 하나의 몸통 액추에이터로 구성되며, 모듈러(Modular) 설계를 통해 조립과 분해가 용이하다. 특히 몸통 액추에이터는 세 개의 선형 액추에이터로 구성되어 다자유도의 굽힘 동작이 가능하고, 다리 액추에이터는 높은 수축·팽창 비율을 제공하여 직경 80 mm에서 170 mm 범위의 다양한 배관 직경 환경에서

도 안정적인 주행이 가능하다.

## 2. 본 론

### 2.1 로봇 디자인

본 연구의 목표는 다양한 직경과 곡률의 파이프(Pipe) 내부에서 안정적이고 효율적으로 주행할 수 있는 소프트 로봇을 개발하는 것이다. 산업 현장에서 사용되는 파이프는 내경이 최소 50 mm에서 최대 150 mm까지 다양하고, 굽곡선 구간과 직선 구간이 혼재되어 있으며, 내부 표면 거칠기에 따른 마찰계수가 높게 나타나기 때문에 주행 로봇은 곡률 변화에 유연하게 대응하면서도 충분한 접지력과 추진력을 확보해야 한다. 이를 위해, 다방향 변형이 가능하고 구동력 제어가 용이한 오리가미 기반 공압식 액추에이터 구조를 채택하였다.

본 연구에서는 몸통 액추에이터 및 다리 액추에이터로 구성된 공압식 소프트 로봇을 제작하였다(A in Fig. 1). 로봇의 중앙에는 몸통 액추에이

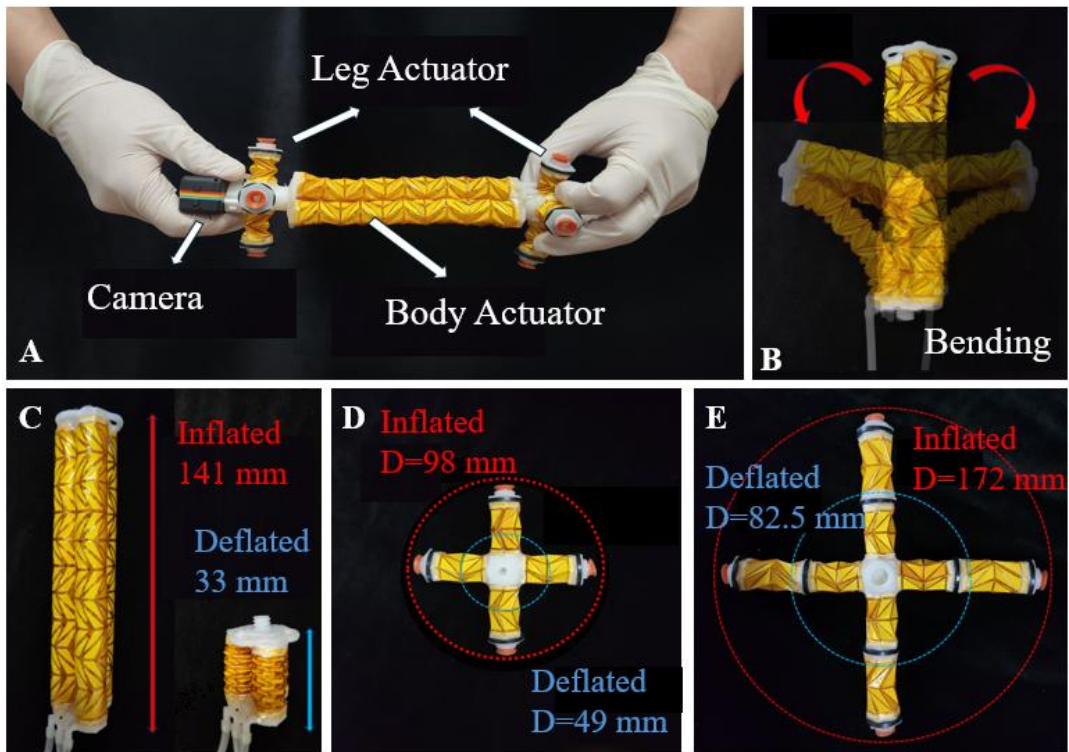


Fig. 1 Structural and Dimensional Characteristics of the Robot (A) Bending behavior, (B) Overall view, (C) Inflated/deflated body Actuator, (D) 1-stage leg Actuator, (E) 2-stage leg Actuator

터가, 양 끝단에는 다리 액추에이터가 배치되어 있다. 각 액추에이터는 크래슬링 패턴과 면·선 결합의 오리가미 구조[6]로 설계되어, 안정적인 다방향 변형과 형상 조절이 가능하다. 이러한 구조를 통해 액추에이터의 수축과 팽창을 반복함으로써 로봇이 전후 이동을 수행하며, 이는 지렁이의 체형 수축·이완에 의한 추진 메커니즘을 모사한다.

몸통 액추에이터는 세 개의 독립 제어가 가능한 유닛으로 구성되어 있으며, 각 유닛(Unit)은 전용 통기구(Air hole)에 개별적으로 연결된다. 통기구는 공기 공급원과 튜브(Tube)로 연결되어 압축 공기를 해당 액추에이터로 전달한다. 세 개의 몸통 액추에이터가 동시에 수축 또는 팽창할 경우 선형 이동이 발생하며(C in Fig. 1), 반대로 세 개의 액추에이터 중 두 개만 수축 또는 팽창시킴으로써 굽힘 동작을 가능하게 한다. 실제로 굽힘 운동 시 각 액추에이터의 팽창 및 수축 정도가 제각기 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있다(B in Fig. 1). 각 액추에이터의 양 끝단은 경화 레진(Resin structure)으로 마감되어 있으며, 특히 후방 레진 구조에는 통기구가 설계되어 로봇 진행 방향의 반대측에서 공기가 공급되도록 하였다. 몸통 액추에이터의 최대 팽창 길이는 141 mm, 최대 수축 길이는 33 mm이며, 세 개의 유닛 구성이 굽힘 동작 구현을 위한 최소 조건임을 실험적으로 확인하였다. 두 개만 사용할 경우 굽힘이 좌우 방향으로 제한되어 3차원 곡률 구현이 어렵다.

다리 액추에이터는 로봇 이동 시 몸통 액추에이터를 지지해주는 역할을 해주며, 수축 팽창을 통해 이동을 보조할 수 있다. 다리 액추에이터는 크게 세 부분으로 구성되는데, 각 구성요소는 모두 모듈화되어 있어 분리 및 조립이 가능하다. 첫째, 몸통 액추에이터와 연결되는 중앙의 셸(Shell) 형태 흰색 레진 구조는 통기구를 통해 독립적으로 공기 공급원과 연결된다(D in Fig. 1). 둘째, 실제 팽창 및 수축이 이루어지는 크래슬링 오리가미 구조 부분은 1단 또는 2단 유닛으로 구성 가능하며, 2단 유닛은 직경 변화가 큰 배관 환경에 적합하다(D, E in Fig. 1). 셋째, 다리 끝단의 고무 부위는 단순한 마감재를 넘어 로봇 전체의 안정성을 유지하는 핵심적인 구성 요소이다. 로봇이 공기 압력(양압 또는 음압)을 이용해 팽창하거나 수축할 때, 특히 내부 압력의 급격한

변화가 발생하면 로봇이 파이프 내부에서 흔들리거나 위치가 틀어질 수 있다. 이때 고무 부위는 파이프 내벽과의 마찰력을 증가시켜 로봇을 해당 위치에 고정시키고, 움직임의 중심축을 유지하는데 기여한다. 구조적으로 단순하지만, 로봇의 반복 가능하고 신뢰성 있는 동작을 위해 반드시 필요한 요소이다.

## 2.2 실험 및 결과 분석

몸통 액추에이터와 다리 액추에이터를 튜브를 통해 펌프 모터와 연결하고, 아두이노(Arduino)와 모터 드라이브(Motor drive)를 통해 총 다섯 개의 액추에이터를 개별적으로 제어하였다. 이러한 구성은 각 액추에이터의 수축·팽창 동작을 독립적으로 구동함으로써 로봇의 전후 이동과 굽힘 동작을 정밀하게 구현할 수 있도록 하였다.

제어 시스템을 기반으로 로봇은 일자형 파이프, 직경 변화가 있는 파이프, 내부에 물이 존재하는 파이프, T자형 파이프, 그리고 U자형 파이프 등 다양한 환경에서 성능을 평가하였다. 각 실험은 로봇이 주어진 환경에 적합하게 수행할 수 있는지를 검증하는 것을 목적으로 수행되었다. 특히 T자형과 U자형 파이프와 같이 직각 회전이 필요한 환경에서는, 몸통 액추에이터의 굽힘 동작을 개별 제어하여 협소한 공간에서 급격한 방향 전환이 가능함을 확인하였다.

### 2.2.1 80 mm 내경 파이프에서의 직선 주행

직선 주행 실험은 1단 구성에서 최소 49 mm, 최대 98 mm로 팽창 가능한 다리 액추에이터의 길이를 고려하여, 내경 80 mm의 파이프에서 수행하였다. 로봇의 한 주행 사이클(Cycle)은 다음과 같은 순차 동작으로 구성된다. 먼저 전방 다리 액추에이터를 팽창시켜 파이프 내벽에 고정된 뒤, 몸통 액추에이터를 수축시켜 후방 다리를 전진 방향으로 이동시킨다. 이어서 후방 다리 액추에이터를 팽창시켜 지지점을 형성한 후, 전방 다리의 고정을 해제하고 몸통 액추에이터를 팽창시켜 전방 다리를 전진시킨다. 마지막으로 후방 다리의 고정을 해제함으로써 하나의 주행 사이클이 완성된다. 이러한 과정을 통해 로봇은 지렁이와 유사한 수축·이완 기반의 추진을 구현한다.

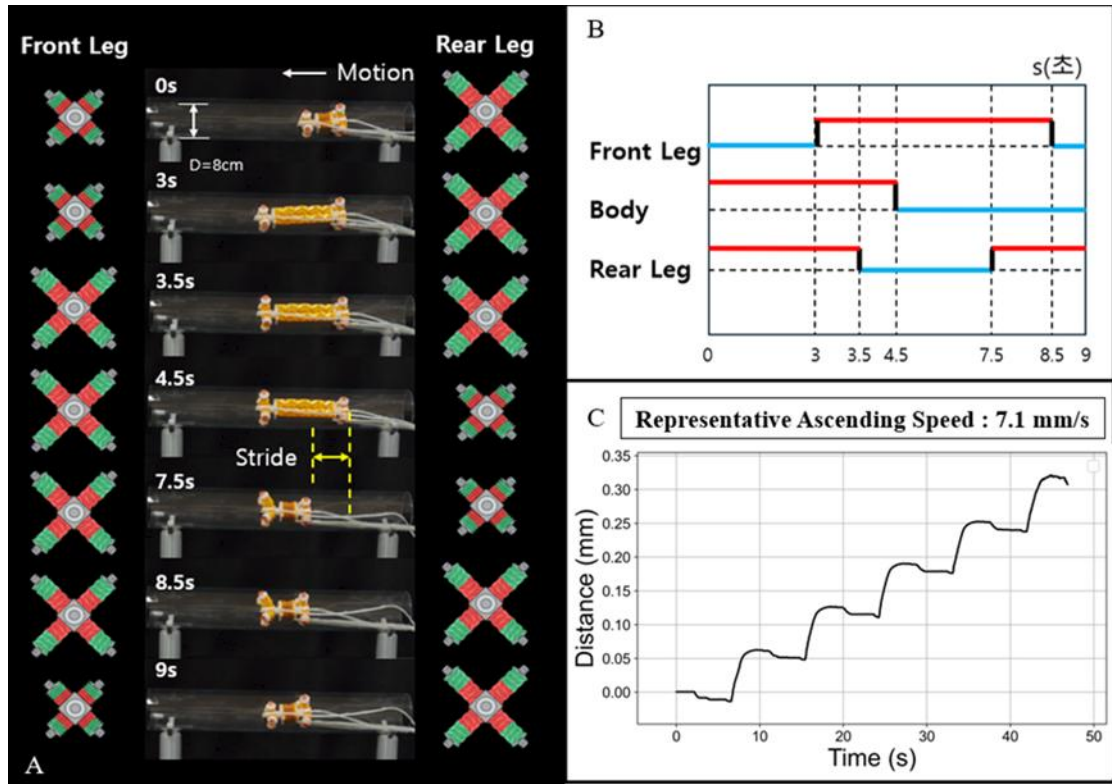


Fig. 2 Robot locomotion in a straight pipe (A) Sequential Actuator states and durations for linear locomotion, (B) Time - pressure profiles for each Actuator during linear locomotion, (C) A distance- time plot with and indicated average speed demonstration.

본 사이클의 소요 시간은 약 8초이며, 한 사이클당 약 60 mm를 전진하여 평균 속도 7.5 mm/s를 기록하였다(A in Fig. 2). 30 fps로 42초 동안 다섯 사이클을 수행한 결과, 총 320 mm를 이동하였다. 거리-시간 그래프에서는 평균 상승 구간의 기울기를 대표 속도로 산출하였으며, 이때의 속도는 7.1 mm/s로 나타났다(B, C in Fig. 2).

### 2.2.2 80 mm 내경 T자 파이프에서의 방향 전환 제어

T자형 파이프 환경에서는 로봇이 교차 지점에서 원하는 방향으로 진입하기 위해 굽힘 동작을 수행해야 한다. 이를 위해 세 개의 몸통 액추에이터를 서로 다른 길이로 수축·팽창시켜 굽힘을 유도하였다. 이동 방향과 가장 가까운 액추에이터는 짧게 수축시키고, 나머지 두 액추에이터는 길게 팽창시켜 로봇이 목표 방향으로 곡률을 형성하도록 제어하였다. 이러한 방식으로 교차 지점에서 약 90°의 방향 전환이 가능하였다(A in

Fig. 3).

방향 전환 시 구동 압력은 직선 주행 실험과 동일하게 유지하였으며, 아두이노를 이용해 각 밸브의 개방 시간을 조절함으로써 액추에이터별 팽창량을 제어하였다. 이는 각 액추에이터에 연결된 튜브에 독립적인 수축·팽창 밸브를 설치하여 개별 제어가 가능하도록 설계한 구조와, 크래슬링 오리гами 액추에이터의 높은 유연성과 내구성 덕분에 구현할 수 있었다.

### 2.2.3 직경 변화 파이프(90 → 150 mm) 주행

내경이 90 mm에서 150 mm로 확장되는 파이프 구간을 통과하기 위해 두 다리 액추에이터는 2단 구조로 조립하였으며, 세 개의 몸통 액추에이터는 동시에 수축 또는 팽창하도록 제어하였다. 다리 모듈은 최소 82.5 mm까지 수축 가능하고 최대 172 mm까지 팽창할 수 있어, 직경 변화가 큰 환경에서의 주행 성능을 검증하기 위해 해

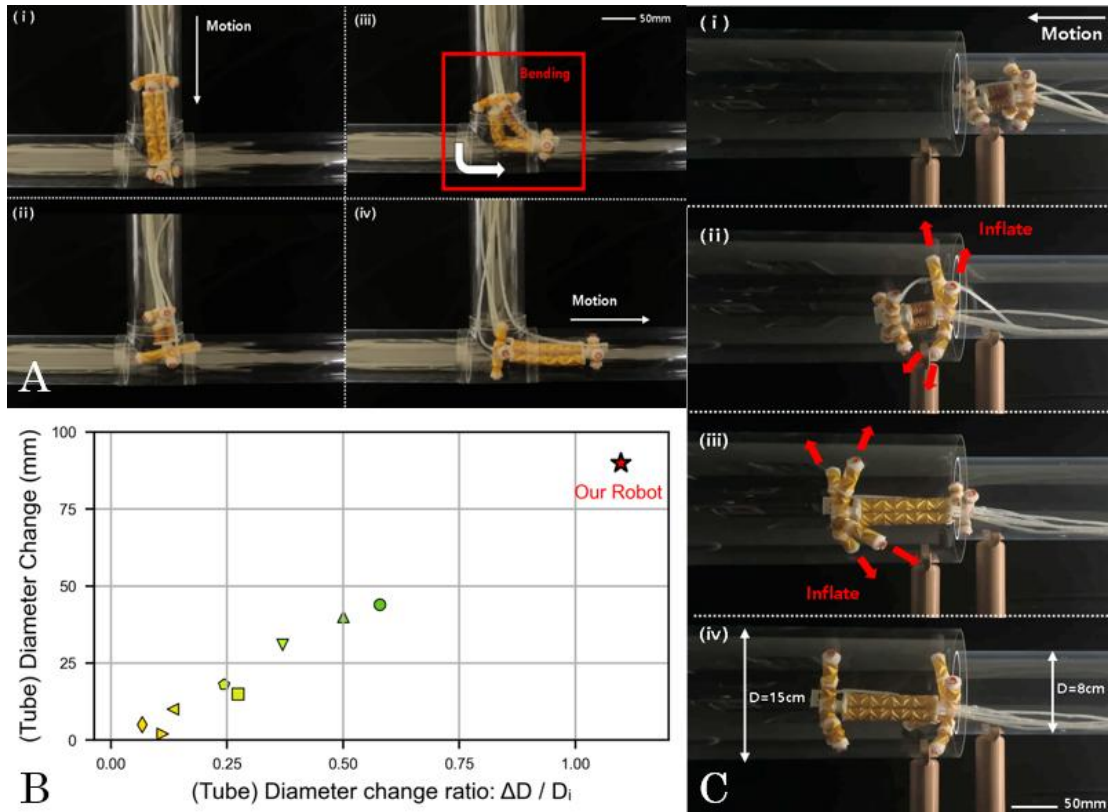


Fig. 3 Robot locomotion in T-junctions and pipes with varying diameters. (A) Time-lapse sequence illustrating the robot's maneuver through a T-junction, (B) Diameter change adaptability of our robot benchmarked against other robots (C) Time-lapse sequence illustrating the robot's adaptive locomotion within a pipe connecting sections of 90mm and 150mm in diameter.

당 조건에 맞는 파이프를 제작하였다.

실험 결과, 직경이 큰 구간을 통과할 때 팽창에 소요되는 시간이 증가하고 로봇의 전체 질량이 커짐에 따라 주행 속도가 다소 감소하였으나, 직경 변화가 90 mm에서 150 mm로 급격히 이루어지는 환경에서도 안정적인 주행이 가능하였다(C in Fig. 3). 또한, 본 로봇의 직경 변화 대응 범위를 Fig. 3(B)에 제시된 비교 데이터와 함께 분석하였다. 다른 소프트 로봇들과 비교했을 때[4,7-13], 본 로봇의 직경 변화 비율( $\Delta D / D_i$ )은 1.09로, 비교군 중 가장 높은 값을 기록하였다. 변화량의 절대 크기 또한 다른 로봇 대비 가장 크기 때문에 직경 변화 환경에 대한 우수한 적응성을 확인할 수 있었다.

#### 2.2.4 완전 침수된 U자 파이프에서의 수중 주행

본 제안 로봇은 공압식 제어 방식을 사용하

로 수중에서도 동일한 제어가 가능하다는 장점을 갖는다. 이를 검증하기 위해 내경 80 mm의 수직 U자형 파이프를 완전히 침수시켜 실험을 수행하였다(Fig. 4). 실험 환경은 하부 수평 구간이 전부 물에 잠긴 상태이며, 양쪽 수직 구간은 약 16 cm 깊이의 수주를 형성하였다.

제어 조건은 상온 공기 중 실험과 동일하게 설정하였으며, 먼저 수평 구간에서 직선 주행을 수행한 뒤 90° 방향 전환을 거쳐 반대편 수직 구간을 오르는 테스트를 진행하였다. 실험 결과, 수중 환경에서 물의 점성 저항으로 인해 주행 속도가 약 25% 감소하여 5.3 mm/s를 기록하였으나, Fig. 2에서 제시된 6단계 주행 사이클이 수중에서도 안정적으로 수행됨을 확인하였다.

#### 2.2.5 카메라 장착 탐사 임무(Application)

제안된 로봇의 파이프 내부 점검 가능성을 평



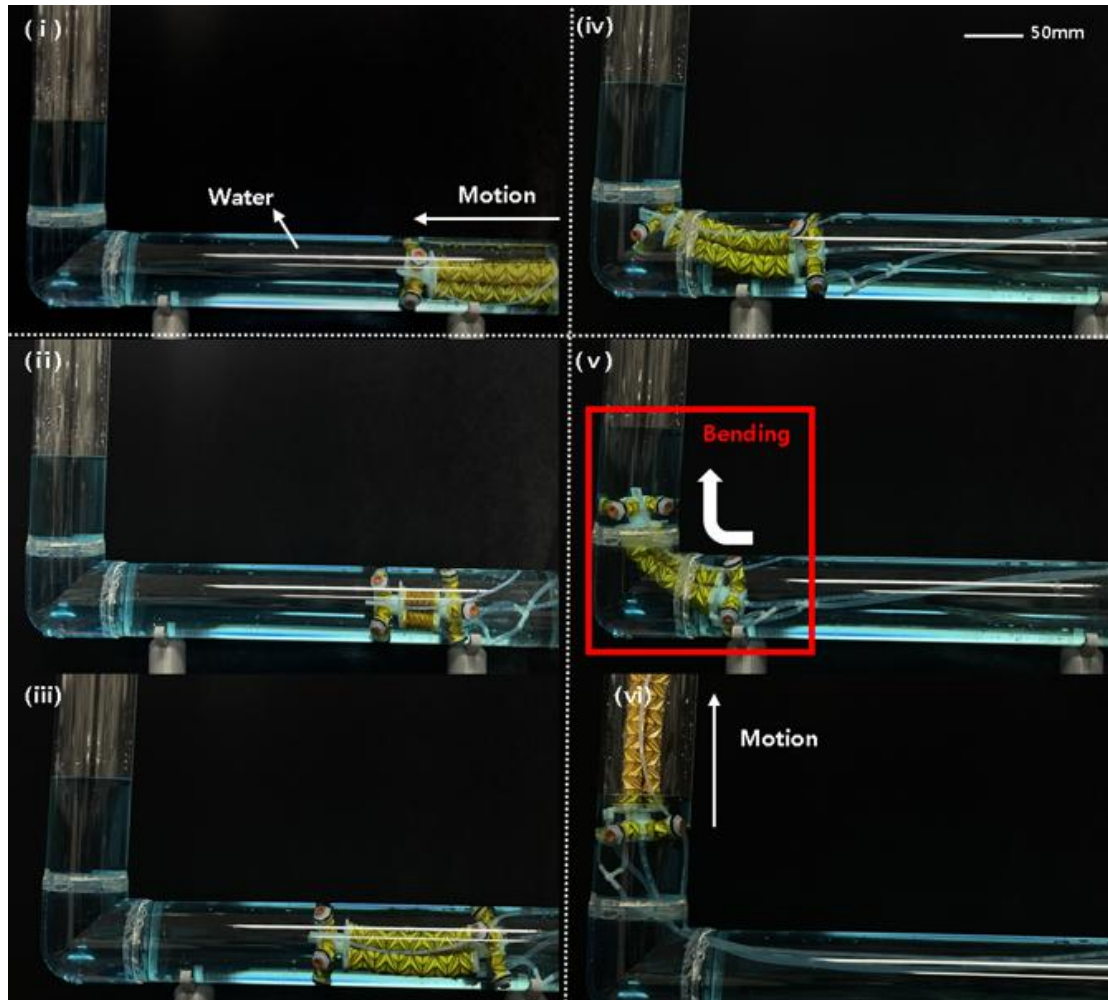


Fig. 4 Underwater locomotion and vertical climbing in a U-shaped pipe including straight movement.

가하기 위해, 로봇 전면 모듈에 소형 방수 카메라(Camera)를 장착하고 내경 80 mm의 U자형 파이프 주행 실험을 수행하였다. 본 실험의 목적은 시각 정보 획득이 가능한 상태에서 로봇이 안정적으로 기동할 수 있는지를 검증하는 데 두었다.

실험 결과, 카메라를 장착한 상태에서도 평균 속도 7.2 mm/s로 기존 평행이동 속도와 유사한 성능을 유지하였으며, 부가 하중에도 불구하고 안정적인 주행과 내구성을 확보하였다. 또한 실시간 영상 스트리밍을 통해 주행 경로와 내부 상태를 명확히 확인할 수 있었다. 사용된 카메라는 CubeCam FHD(1920×1080P, 30 fps)로, 직경 10 mm, 무게 20 g의 방수 마이크로 카메라이다 (Fig. 5).

### 3. 결 론

본 논문에서는 오리가미 액추에이터 기반의 공압식 소프트 로봇을 제안하고, 다양한 환경에서의 주행 성능을 검증하였다. 제안된 로봇의 주요 특징과 장점은 다음과 같다.

(1) 오리가미 기반 액추에이터로 구성된 총 무게 53 g의 경량 구조를 갖는다.

(2) 모든 액추에이터가 손쉽게 결합·분리 가능한 모듈러 구조로 설계되어, 분해와 조립이 용이하다.

(3) 몸통 액추에이터에 장착된 세 개의 독립 제어 유닛을 통해 굽힘 동작이 가능하며, 이를 이용하여 좌·우 방향 전환을 구현할 수 있다.

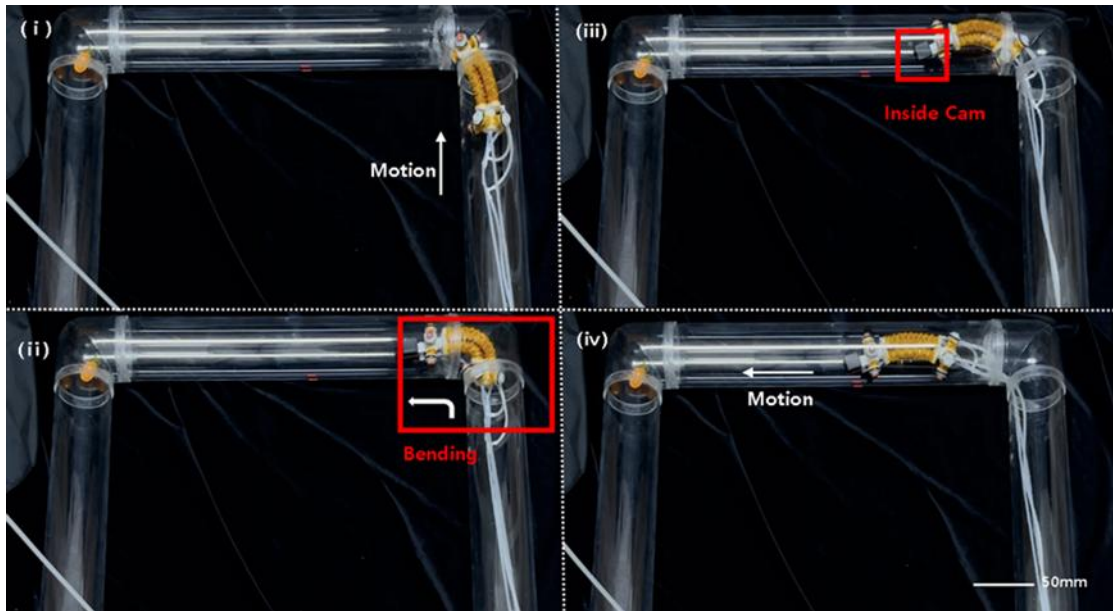


Fig. 5 Robot locomotion with an onboard camera in a U-shaped pipe. Images depict the robot's navigation through a U-shaped pipe.

(4) 다리 액추에이터의 큰 수축-팽창 길이 차이로 인해 직경 80 mm에서 170 mm 범위의 파이프에서 안정적인 주행이 가능하다.

(5) 수중 환경에서 유체 저항으로 인해 속도가 약 25% 감소하였으나, 공압식 구동을 통해 전자장치 없이도 안전하고 안정적인 제어가 가능함을 확인하였다.

(6) 로봇 자체 무게의 약 40%에 해당하는 20 g의 소형 카메라, 열감지 센서 등 다양한 센서를 부착한 상태에서도 안정적인 주행이 가능하며, 다양한 탐사 및 점검 임무 수행이 가능함을 실험을 통해 검증하였다. 향후 연구에서는 크래슬링 오리가미 구조에 사용된 PVC 대신 금속판과 같은 내구성이 높은 소재를 적용하여 산업 현장에서의 사용성을 높일 계획이다. 또한, 현재 로봇은 외부 펌프 모터에서 흡입되는 공기를 실리콘 튜브를 통해 공급받는 방식이므로, Novec 7000과 같이 낮은 온도에서 상변이가 가능한 액체를 이용한 구동 방식을 적용하는 방안을 고려하고 있다. Novec 가스가 기체로 상변이할 경우 액추에이터가 팽창하고, 액체로 상변이할 경우 수축하게 되므로, 액추에이터 내부에 소형 열선을 배치하여 외부 튜브 연결 없이도 원격 제어가 가능한 로봇 설계가 가능할 것으로 기대된다. 더 나아가,

이러한 상변이형 액추에이터 구동 방식은 파이프 내부 점검 로봇뿐만 아니라, 수중 구조물 유지보수, 협소 공간 산업 설비 점검, 의료 내시경 로봇 등 다양한 분야에 적용 가능하다. 후속 연구에서는 Novec 7000의 최적 충전량 및 구동 온도 범위, 장시간 구동 시 반복 내구성, 다양한 직경 및 곡률 환경에서의 동작 안정성을 정량적으로 평가하여, 실증 환경에서의 상용화를 위한 설계 지침을 마련할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 대한민국 행정안전부(RS202400408982, 물류 창고 특성을 반영한 지능형 화재 탐지 및 스프링클러 설비 기술 개발) 지원을 받아 수행되었습니다.

## References

- [1] M. Li, G. Wang, J. Wang, Y. Zheng and X. Jiao, "Development of an inchworm-like soft pipe robot for detection," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 253, pp. 108392 (2023)

- [2] B. Zhang, Y. Fan, P. Yang, T. Cao and H. Liao, "Worm-like soft robot for complicated tubular environments," *Soft Robotics*, Vol. 6, No. 3, pp. 399-413 (2019)
- [3] W. Adams, S. Sridar, C. M. Thalman, B. Copenhaver, H. Elsaad and P. Polygerinos, "Water pipe robot utilizing soft inflatable Actuators," *2018 IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, Livorno, Italy, pp. 321-326 (2018)
- [4] C. Tang, et al., "A pipeline inspection robot for navigating tubular environments in the sub-centimeter scale," *Science Robotics*, Vol. 7, No. 66 (2022)
- [5] J. Liu, G. Ma, Z. Ma and S. Zuo, "Origami-inspired soft-rigid hybrid contraction actuator and its application in pipe-crawling robot," *Smart Materials and Structures*, Vol. 32, No. 6, pp. 065015 (2023)
- [6] S. Zang, D. Misseroni, T. Zhao and G. H. Paulino, "Kresling origami mechanics explained: Experiments and theory," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 188, pp. 105630 (2024)
- [7] W. Wang, et al., "A modular soft pipe-climbing robot with high maneuverability," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, Vol. 29, No. 6, pp. 4734-4743 (2024)
- [8] Z. Zhang, X. Wang, S. Wang, D. Meng and B. Liang, "Design and modeling of a parallel-pipe-crawling pneumatic soft robot," *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 134301-134317 (2019)
- [9] L. Li, et al., "Research on a tubular climbing robot induced by tri-tube soft Actuators," *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Biomimetics (ROBIO)*, Dali, China, pp. 2189-2194 (2019)
- [10] N. Wang, Y. Zhang, G. Zhang, W. Zhao and L. Peng, "Development and analysis of key components of a multi motion mode soft-bodied pipe robot," *Actuators*, Vol. 11, No. 5, pp. 125 (2022)
- [11] J. Zou, Y. Lin, C. Ji and H. Yang, "A reconfigurable omnidirectional soft robot based on caterpillar locomotion," *Soft Robotics*, Vol. 5, No. 2, pp. 164-174 (2018)
- [12] M. S. Verma, A. Ainla, D. Yang, D. Harburg and G. M. Whitesides, "A soft tube-climbing robot," *Soft Robotics*, Vol. 5, No. 2, pp. 133-137 (2018)
- [13] C.-Y. Yeh, S.-C. Chou, H.-W. Huang, H.-C. Yu and J.-Y. Juang, "Tube-crawling soft robots driven by multistable buckling mechanics," *Extreme Mech. Lett.*, Vol. 26, pp. 61-68 (2019)