

◆ 특집 ◆ 자연모사공학을 위한 정밀가공기술

유체골격 애벌레의 다리조직 대변형을 모사한 적응형 그리퍼

Adaptive Gripper Mimicking Large Deforming Proleg of Hydraulic Skeleton Caterpillar

정광필¹, 고제성¹, 조규진^{1,✉}

Gwang Pil Jung¹, Je Sung Koh¹ and Kyu Jin Cho^{1,✉}

¹ 서울대학교 기계항공공학부 (Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National Univ.)

✉ Corresponding author: kjcho@snu.ac.kr, Tel: 02-880-1663

Manuscript received: 2011.11.14 / Revised: 2011.11.24 / Accepted: 2011.11.28

In this study, we present a gripping mechanism that is inspired by caterpillar's proleg. A caterpillar's proleg has planta that gives compliance to the proleg by greatly deforming its shape. In the bio-inspired gripper, the planta is implemented by flexure joints. The flexures buckle when end force and end moment is applied on the joint in opposite direction. Using this characteristic, the gripping structure is designed so that the flexure buckling can occur. Flexure buckling increases the region where gripping force is constant and this region leads to increasing in gripping range. At the same time, flexure buckling decouples all spines and therefore all spines can move differentially and independently. With this simple but effective mechanism, the bio-inspired gripper can achieve adaptive gripping on rough and rugged surfaces. A prototype is built to demonstrate adaptive gripping on rough and rugged surfaces such as cement block, brick.

Key Words: Bio-inspired (생체 모방), Compliance (유연성), Buckling (좌굴현상), Underactuation (부족 구동)

1. 서론

적응성(adaptability)은 모바일 로봇, 로봇틱 매니플레이터와 로봇틱 핸드 분야에서 가장 중요한 이슈들 중 하나로 손꼽힌다. 이 이슈를 해결 하기 위해, 많은 학자들은 여러가지 방법을 적용하여 테스트하고 있다. 보편적으로, 차동(differential) 메커니즘과 적응형(compliant) 메커니즘이 많이 사용되며 구동 방법으로는 부족구동(underactuation) 방법이 많이 사용되고 있다.

모바일 로봇 분야에서는 Volpe et al. 는 락커-보기 시스템을 화성 탐사로봇, Rocky 7 rover,¹에 적용시켜 험지를 잘 극복할 수 있도록 하였다.

Kim et al.은 stickybot²의 발에 이중 차동(double differential) 시스템과 와이어에 부족구동을 적용시

켜 굴곡이 심한 표면에 잘 적응하여 접촉할 수 있도록 하였다. Spinybot³ 또한 발에 수동적 적응(passive compliant) 메커니즘을 적용하여 거친 표면에서의 접촉과 무게 분배를 고르게 하였다.

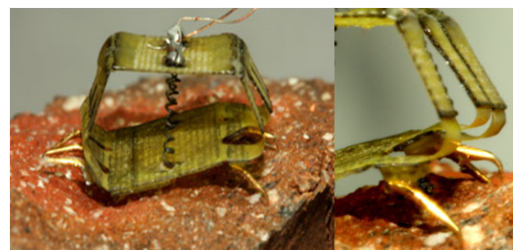


Fig. 1 Bio-inspired gripper on a rough and rugged surface(Left), Adaptive gripping by flexure buckling(Right)

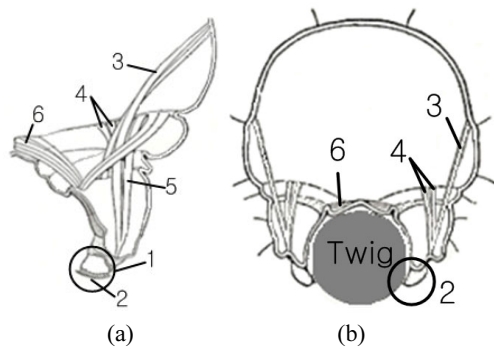


Fig. 2 (a) Right leg and muscles, posterior view⁷, (b) Diagrammatic section of caterpillar grasping a twig⁷

로보틱 핸드 분야에서 역시 부족구동 방법과 차동 메커니즘, 그리고 조인트 유연성(compliance)이 많이 사용되었다. 대표적인 로보틱 핸드로는 Hirose 와 Unetani 의 soft gripper⁴가 있다. 이들은 동일한 압력을 물체에 가하면서도 물체의 모양에 잘 적응하여 잡을 수 있도록 하였다. 이들은 직렬로 연결된 링크와 도르래(pulley)들을 하나의 와이어로 구동하였다. Dollar et al.⁵는 조인트의 유연성(compliance)과 부족구동을 적용한 와이어 구동을 통해 물체의 모양에 잘 적응하고 견실한 그리핑을 할 수 있도록 하였다. 그 외 새로운 방법으로는 Brown et al. 의 universal gripper⁶가 있다. 이들은 알갱이들을 뭉친 주머니를 이용하여 다양한 모양과 크기를 가진 물체를 안정적으로 잡게 하였다.

본 논문에서는 연성 조인트의 좌굴 현상을 이용하여 적응적으로 그리핑을 하는 생체모방형 그리퍼를 제안한다. 그리퍼의 핵심 메커니즘은 애벌레의 다리를 모방하였다. 애벌레의 다리 끝부분에는 플란타(planta)라고 불리는 부드러운 조직으로 이루어진 요소가 있다. 애벌레가 표면을 잡을 때, 플란타는 표면의 모양에 알맞게 대변형을 일으키게 되면서 안정하고 적응적인 그리핑이 가능케 한다.

이러한 핵심 메커니즘은 생체모방 그리퍼에서 단단한 링크와 연성 조인트의 조합으로 구현된다. 그리핑 하는 동안 상대적으로 부드러운 연성 조인트가 변형을 일으키게 되고, 변형이 심해지면 좌굴 현상이 발생한다. 이렇게 발생한 좌굴 현상은 그리핑 힘이 일정한 구간을 늘려주는 동시에 모든 발톱이 독립적으로 움직이게 한다. 또한 이러한 디자인은 부족구동을 가능하게 하여 구조물 자체

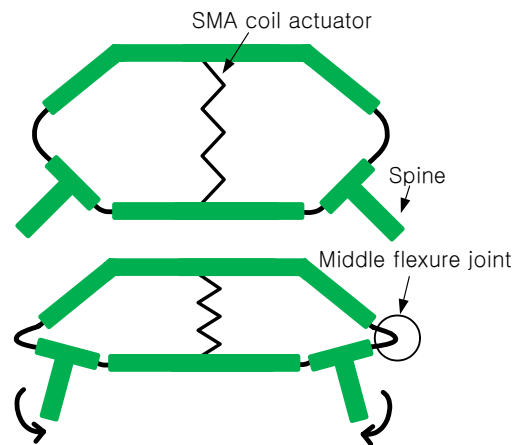


Fig. 3 Concept design of the bio-inspired gripper

를 보다 간단하고 컴팩트하게 한다.

뒤의 단원에서는 그리퍼 디자인, 모델링, 제작 그리고 실험이 진행된다. 모델링에는 PRBM (Pseudo-rigid-body model)과 Elastica theory가 혼합된 형태가 쓰였다. 또한 제작 파트에서는 복합재에 기반한 간결하고 가벼운 구조물 제작 방법에 대해 소개할 것이다. 또한 그리퍼의 성능을 여러 가지 실험을 통하여 증명할 것이다. 실험은 두 가지 측면에서 진행될 것이다. 첫째, 그리퍼가 극복할 수 있는 굴곡의 정도를 측정하여, 좌굴 현상이 굴곡 극복에 어떤 영향을 미치는지 조사할 것이다. 둘째, 거친 표면에서의 좌굴 현상에 의한 영향을 볼 것이다. 이 뿐만 아니라 프로토타입을 제작하여 실제 벽돌, 시멘트 블록과 같은 표면에서 그리핑 테스트를 진행할 것이다.

2. 생물학적 영감 및 개념 디자인

2.1 생물학적 영감

본 생체모방 그리퍼는 애벌레의 다리(proleg)로부터 영감을 얻어 출발하였다. 애벌레는 단순한 구조와 단순한 원리로 자연계에 존재하는 다양한 표면들을 잘 잡는다. 애벌레의 복부(abdominal) 부분은 단순하지만 다소 특이한 구조를 가진다. Fig. 2(b)에서 보듯이, 전체적으로 단힌 곡선의 형태를 하고 있으며, 양 옆으로 한 쌍의 다리가 튀어 나와있다. 애벌레는 이러한 구조물을 3~5 쌍 정도 가지고 있다.

기능적으로 애벌레는 두 파트로 나누어 생각할 수 있다. 한 가지는 유체골격(hydro skeleton) 몸체

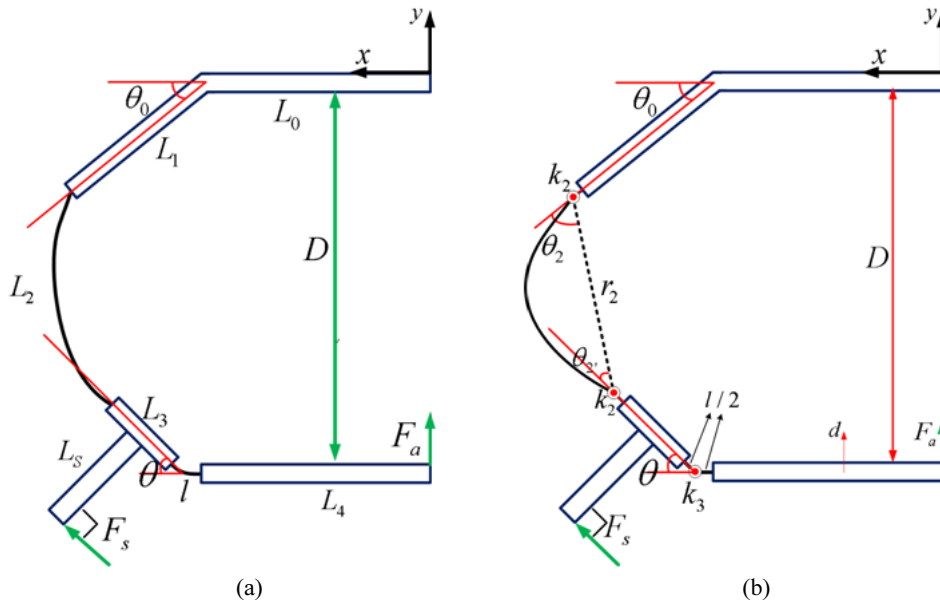


Fig. 4 (a) The bio-inspired gripper, (b) Its equivalent model (The bent angle, θ_0 , is fixed value and is related with initial shape or initial gripping angle, θ . The long flexure, L_2 , is modeled with the pinned-pinned elastica beam and two torsional springs located at each pin. The length of distance between two pins is given as r_2)

이며 다른 한 가지는 다리(proleg) 끝에 붙어있는 다소 부드러운 조직의 Fig. 2(a)에 제시된 플란타(palnta)라는 부분이다. 이 두 가지 부분은 수축근(retractor muscle)으로 이어져 있다. 이 수축근이 구동될 때, 유체겔격은 수축근 구동을 위한 단단함(stiffness)을 제공하고 다소 부드러운 플란타는 대변형을 일으키게 된다.⁸ 플란타에는 수개의 발톱이 붙어 있으며, 플란타의 대변형은 애벌레의 다리에 수동적 유연성(passive compliance)을 제공한다. 이러한 특성으로 인해 애벌레는 거칠고 굴곡이 심한 표면을 잘 극복하여 성공적으로 다양한 표면을 잡을 수 있게 된다.

2.2 개념 디자인

전체적인 구조의 모습은 애벌레의 다리를 연상케 한다. 위에서부터, 그리퍼는 아래쪽으로 휘어있는 위 판과 아래 판으로 구성 되어있다. 위 판과 아래 판은 여러 쌍의 연성 링크들로 이어져 있다. 연성 링크는 길이가 다소 긴 중간 연성 조인트와 발톱이 붙어있는 중간의 단단한(rigid) 링크, 그리고 아래쪽 짧은 연성 조인트의 직렬 연결을 말한다.

기본 구조의 그리퍼는 한 쌍의 연성 링크를 가

지는데, 그리핑 모션은 아주 간단하다. 위판과 아래판은 형상기억합금 스프링 구동기로 연결되어 있다. 이 구동기가 구동하면, 아래판이 위로 올라오는 동시에, 양 옆의 발톱들은 회전 모션을 하게 된다.

이러한 모션을 통해 발톱 부분이 표면과 닿게 되면, 발톱에 그리핑 힘이 걸리게 되고 이는 결국 중간의 긴 연성 조인트에 전달된다. 이 때, 중간 연성 조인트에는 구동기에 의한 위로 향하는 힘과 발톱에 의한 모멘트가 반대 방향으로 가해지게 된다. 따라서 중간연성 조인트에 좌굴 현상이 발생한다. 좌굴 현상이 발생할 때, 일정 그리핑 각도 동안 그리핑 힘이 일정한 값으로 유지되는 현상이 발생한다.

이러한 좌굴 현상은 일정 값으로 힘이 유지되는 구간을 늘려줄 뿐만 아니라 동시에 각각의 발톱들이 독립적(decoupling)으로 움직일 수 있도록 한다. 따라서 중간 긴 연성 조인트의 좌굴 현상은 본 생체모방 그리퍼의 핵심 요소이다.

좌굴 현상은 특히 발톱이 여러 쌍일 때 그 기능을 발휘하기 시작한다. 예를 들어 굴곡이 심한 표면이 있다고 가정해보자. 만약 중간 연성 조인트의 길이가 매우 짧아 좌굴 현상이 일어나지

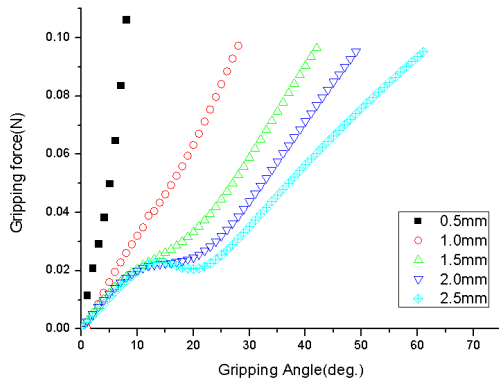


Fig. 5 Gripping force vs. Gripping angle according to various length of the middle flexure joint

않는다면, 모든 발톱이 같은 각도로 마치 한 개처럼 움직이게 될 것이다. 그러나 좌굴 현상이 발생하게 된다면 각각의 발톱들의 독립적으로 움직이게 되어 굴곡진 표면에 접촉이 가능하게 된다.

또한 좌굴 현상은 안정한 그리핑을 가능하게 한다. 안정한 그리핑이라 함은 각 발톱에 걸리는 그리핑 힘이 비슷할 때이다. 만약 한 발톱에 모든 힘이 걸린다면 작은 외부의 충격에도 쉽게 표면에서 떨어지게 된다. 하지만 좌굴 현상은 일정 회전 각도 동안 일정한 힘을 제공하기 때문에, 비록 각 발톱들의 그리핑 각이 다르다 하더라도 비슷한 힘을 제공한다.

3. 모델링

앞서 언급했듯이, 본 생체모방 그리퍼의 핵심 요소는 중간의 긴 연성 조인트의 좌굴 현상이다. 좌굴 현상과 같은 대변형의 빔(beam)을 분석하는데 주로 Pseudo Rigid Body Model(PRBM)¹⁰ 과 Elastica theory¹¹ 가 쓰인다. PRBM은 대변형의 빔을 분석하는 데 있어, 직관적이고 단순한 해법을 제시한다. 연성 조인트를 flexural pivot 과 pseudo-rigid-link 로 대체하도록 한다. 그러나 PRBM은 변형의 범위에 제한이 있고 이로 인해 필요한 계수(coefficient)를 결정하기가 힘들다. Elastica theory의 경우, 대변형의 빔을 분석하는데 매우 용이하나 수학적 계산이 복잡하고 빔 끝 단의 조건에 민감하다. 따라서 우리는 이 두 가지 모델을 합친 대변형 모델을 제시하고자 한다.

3.1 연성 조인트 모델

Fig. 4는 생체모방 그리퍼와 이에 상응하는 모델을 보여준다. 먼저, 아래 연성 조인트는 다른 rigid link 들에 비해 길이가 약 십분의 일 정도 되기 때문에 small length flexural pivot 으로 대체된다. 이 때, 비틀림 스프링의 상수는 EI/l 로 주어진다.

중간의 긴 연성 조인트는 PRBM 과 Elastica theory 를 합한 모델로 주어진다. 양 끝 단이 고정된(fixed-fixed) 긴 연성 조인트는 두 개의 비틀림 스프링과 양 끝 단이 자유로운(pinned-pinned) 연성 링크의 조합으로 대체된다. 이 때, 비틀림 스프링 상수는 $2\gamma K \theta EI/L_2$ 로 주어진다. Characteristic radius factor, γ , 는 0.8360 그리고 stiffness coefficient, K_θ , 는 2.61259 이다. 또한 정규화 된 양 끝 단이 자유로운 연성 링크의 힘은 다음과 같다.¹²

$$F_{beam} = EI \left\{ b_4 \frac{(r_{20} - r_2)^4}{L_2^6} + b_3 \frac{(r_{20} - r_2)^3}{L_2^5} + b_2 \frac{(r_{20} - r_2)^2}{L_2^4} + b_1 \frac{(r_{20} - r_2)}{L_2^3} + b_0 \frac{1}{L_2^2} \right\} \quad (1)$$

이 때, $b_0=9.8879488$, $b_1=4.3898032$, $b_2=6.2531770$, $b_3=-6.2016131$, 그리고 $b_4=7.1908239$ 로 주어진다.

3.2 정역학적 그리핑 힘 모델

위의 연성 조인트 모델을 적용시켜 정역학적 운동 방정식을 이끌어 낼 수 있다. 이 때, 몇 가지 가정이 있다. 첫째, 그리핑 힘, F_s , 는 발톱에 수직으로 작용하는 것으로 한다. 둘째, 아래판은 y 방향으로만 움직이는 것으로 가정한다. 위 가정을 적용시켜 운동방정식을 구해보면 식 (2)와 같다.

$$F_s r_s + k_3 \theta - k_2 \theta_2 - F_{beam} r_3 S_2 = 0 \quad (2)$$

기하학적 조건으로부터 식 (3), (4), (5)를 구할 수 있다.

$$\theta_0 + \theta_2 + \theta_2 + \theta = \pi \quad (3)$$

$$r_1 C_0 - r_2 C_{\pi-0-2} - r_3 C_\theta = 0 \quad (4)$$

$$r_1 S_0 + r_2 S_{\pi-0-2} + r_3 S_\theta = D - d \quad (5)$$

식 (2), (3), (4) 그리고 (5)를 수치 해석을 통하여 풀어내면 그리핑 힘을 구해 낼 수 있다. 이 때, 입력 값은 그리핑 각도인 θ 이고 출력 값은 그리핑 힘인 F_s 이다.

3.3 모델에 기반한 그리퍼 디자인

Fig. 5 는 정역학적 모델을 통해 시뮬레이션한 결과를 보여준다. 중간 연성 조인트의 길이가 0.5mm, 1.0mm, 1.5mm, 2.0mm, 그리고 2.5mm 일 때, 그리핑 각도에 대한 그리핑 힘을 나타낸 것이다. 일단, 연성 조인트의 길이가 길어질수록 그리핑 범위가 증가한다. 이는 자명한 사실로 받아들일 수 있다. 힘 측면을 살펴보자. 연성 조인트의 길이가 짧을 때에는 그리핑 힘이 선형적으로 증가한다. 그러나 연성 조인트의 길이가 점차 길어질수록 비선형 구간이 늘어나게 된다. 즉, 앞서 언급한 일정 그리핑 각도 동안 그리핑 힘이 일정하게 유지되는 구간이 나타나기 시작한다. 이 구간의 길이는 연성 조인트의 길이가 길어질수록 늘어 나는 것을 볼 수 있다. 또한, 연성 조인트의 길이가 2.5mm 일 때에는 그리핑 힘이 떨어지는 것을 볼 수 있는데, 이는 연성 조인트의 과도한 좌굴 현상에 의한 것으로 해석할 수 있다. 이러한 과도한 좌굴 현상에 의한 그리핑 힘의 감소는 성공적인 그리핑에 방해 요소가 될 가능성이 있다. 따라서 그리핑 힘이 감소되는 현상은 그리핑 디자인 시에 반드시 고려되어야 한다. 이 현상을 고려하여 우리는 연성 조인트를 2.0mm 로 선택하였다.

4. 제작

본 생체모방 그리퍼는 smart composite microstructure(SCM)¹³ 프로세스를 통해 제작된다. 이 프로세스는 금속 기반의 핀 조인트와 링크를 연성 조인트와 복합재 기반의 링크로 대체한다. 따라서 구조를 매우 가볍고 단순하게 할 수 있도록 한다. 또한 구동기로서는, 형상기억합금 스프링 구동기가 사용되었다.

4.1 그리핑 구조

그리퍼는 연성 조인트 파트와 복합재 기반의 링크로 나누어진다. 본 그리퍼에서는 유리 섬유(glass fiber)가 링크의 역할을 하며, 연성 조인트는 구리 박막이 입혀진 폴리이미드 필름으로 제작된다. 구리 박막이 입혀진 폴리이미드 필름은 연성

회로로도 사용된다.

4.2 구동기

한 개의 형상기억합금 스프링 구동기가 사용되었다. 이 구동기는 마텐사이트와 오스테나이트, 두 가지 상을 이동하며 힘을 제공한다. 마텐사이트 상에 있던 형상기억합금 스프링 구동기에 열이 가해지면, 스프링이 오스테나이트 상으로 가는 동시에 수축하면서 그리퍼를 구동한다. 사용된 형상기억합금의 오스테나이트 시작 온도는 90 °C이며 500°C 에서 1 시간의 열처리를 거쳤다. 열처리를 거친 후, 우리는 원하는 모양의 구동기를 가질 수 있게 된다.¹⁴ 또한 기하적 특징으로, 500 μ m의 스프링 직경과 150 μ m의 와이어 직경을 가진다.

5. 실험 및 결과

실험에 앞서 우리는 재료의 거칠기(surface roughness)와 재료의 굴곡진 정도(surface waviness)를 구분한다. 왜냐하면 같은 거칠기를 가지더라도 표면의 굴곡 모양에 따라 잡을 수도 있고 잡지 못할 수도 있기 때문이다.

재료의 거칠기를 극복 할 수 있는가에 대한 문제는 발톱 끝의 곡률과 관계가 깊다. 즉, 발톱 끝의 반지름이 작을수록 아주 부드러운 재료의 알갱이까지 발톱 끝에 걸리게 할 수 있다. 그러나 단지 알갱이를 걸리게 하는 것만이 아닌, 그 표면을 잡으려고 한다면 재료의 거칠기뿐 만 아니라 재료의 굴곡까지 극복해야 한다.

5.1 굴곡 극복 실험

우리는 먼저 생체모방 그리퍼가 어느 정도의 굴곡까지 극복할 수 있는지 조사하기 위해 굴곡의 양을 조절하면서 테스트해보았다. Fig. 6 은 실험 장치이다. 먼저 두 쌍의 발톱을 가진 두 종류의 그리퍼를 준비한다. 한 그리퍼는 연성 조인트의 길이가 0.5mm 이고, 나머지 하나는 연성 조인트의 길이가 2.0mm 이다. 각 그리퍼에 대해 r 값을 조절해가면서 각 발톱에 의한 그리핑 힘을 측정한다. 만약, 굴곡, r , 을 극복하지 못한다면, 한 개의 로드 셀에서만 힘이 측정될 것이다.

Fig. 7 과 Fig. 8 은 실험 결과를 보여준다. Fig. 7 의 경우 연성조인트의 길이가 0.5mm 이다. 그래프에서 보듯, 한 발톱에서만 힘이 측정된 것을 알 수 있다. 이 때, r 값은 0.1mm 이다. Fig. 8 의 경우는

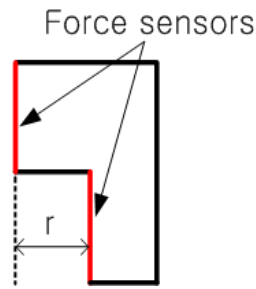


Fig. 6 Experimental set-up

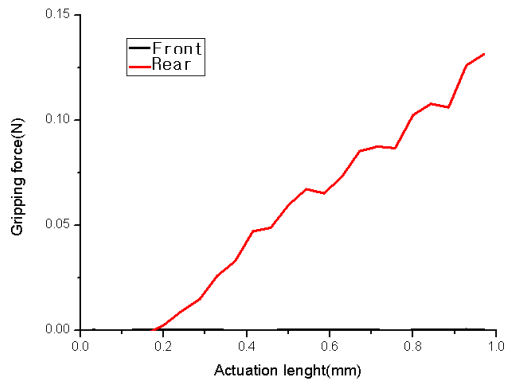


Fig. 7 Gripping force vs. Actuation length for 0.5mm flexure joint

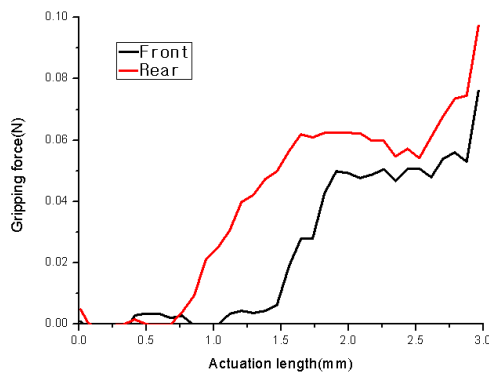


Fig. 8 Gripping force vs. Actuation length for 2.0mm flexure joint

연성 조인트의 길이가 2.0mm 이며, r 값은 1.5mm 일 때이다. 먼저, 구동 길이가 0.75mm 일 때, 뒤쪽 발톱이 먼저 접촉한 것을 볼 수 있다. 뒤쪽 발톱 접촉 후 약 0.75mm 의 구동 길이가 지나면 앞쪽 발톱까지 접촉함을 확인할 수 있다.

2.0mm 길이의 연성 조인트를 가진 그리퍼가 1.5mm 의 굴곡을 극복할 수 있는 이유는 앞서 언

급한 좌굴 현상으로 설명된다. Fig. 8 에서 보듯이 그리핑 힘이 일정한 구간이 나타나면서 동시에 그리핑 범위를 늘려준다. 따라서 두 발톱 모두 굴곡을 극복하고 표면에 접촉할 수 있게 되는 것이다. 또한 접촉 후에도 각 연성 조인트의 모양이 다름에도 불구하고 비슷한 그리핑 힘을 유지한다. 이러한 현상은 안정한 그리핑에 도움이 된다.

5.2 표면 거칠기에 따른 그리핑 퍼포먼스

앞서 언급했듯 표면 거칠기는 발톱의 끝 부분의 곡률과 직접적인 관계가 있으며, 발톱 끝 부분의 반지름이 작을수록 잡을 수 있는 알갱이 개수가 많아지게 된다.¹⁵ 그러나 발톱 끝의 반지름 뿐만 아니라 좌굴 현상에 의한 유연성(compliance) 역시 영향을 미친다. 이를 확인하기 위해 유연성(compliance) 이 있는 그리퍼와 없는 그리퍼를 준비하여 거칠기가 다른 표면에 대해 통계 실험을 실시하였다. 실험 과정은 다음과 같다.

0.5mm 의 연성 조인트를 가지는 그리퍼와 2.0mm 의 연성 조인트를 가진 그리퍼를 각각 준비한다. 또한 표면 거칠기가 다른 두 재료를 준비한다. 준비된 재료는 벽돌과 콘크리트이며 각각의 표면 거칠기는 표 1 에 주어져 있다. 각 재료에 대해 각각의 그리퍼로 25 회씩 그리핑 테스트를 실시하여 성공 여부를 체크한다. 그리핑 성공 여부는 벽돌과 콘크리트를 거꾸로 들었을 때 그리퍼가 계속 버티고 있는 것으로 간주 한다. 결과를 그래프로 나타낸다.

실험 결과는 Fig. 9 와 같다. 그리퍼의 종류에 관계없이 전체적인 성공률은 표면 거칠기가 상대적으로 거친 시멘트 블록의 경우가 높았다. 또한

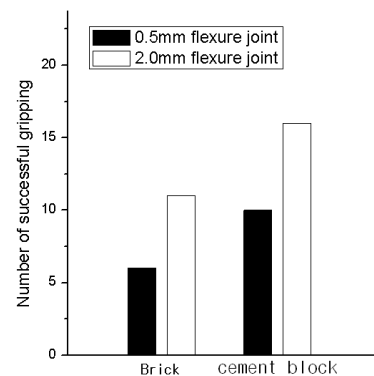


Fig. 9 Number of successful gripping out of twenty five tries

Table 1 Surfaces and Surface roughness

Surface	Surface roughness(μm)
cement block	2.4633
brick	1.9848

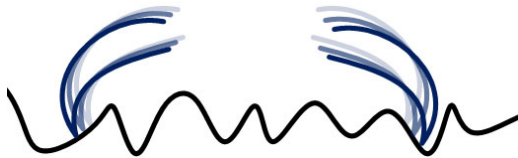


Fig. 10(a) Gripping on the rough surface 0.5mm J_m

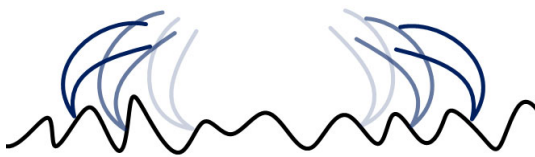


Fig. 10(b) Gripper with 2.0mm J_m



(a) (b)

Fig. 11 (a) The bio-inspired gripper on various surfaces cement block with 0.05N, (b) On brick with 0.288N

연성 조인트의 길이가 긴 경우가 짧은 경우보다 약 1.5~1.9 배 정도 성공률이 높게 나타났다.

준비된 두 종류의 그리퍼에는 똑 같은 발톱이 사용되었다. 그러나 그리핑 퍼포먼스에 상당히 차이가 있음을 실험 결과가 보여주었다. 이는 그리퍼의 유연성(compliance) 즉, 좌굴 현상으로 설명된다. Fig. 10 에는 중간 연성 조인트의 길이가 다른 두 종류의 그리퍼가 거칠기가 같은 표면을 잡고 있는 모습이다. 두 그리퍼 모두 세 쌍의 발톱을

가진다고 가정하며, 진하기가 같은 발톱들이 같은 쌍에 속하는 것으로 한다. Fig. 10(a)는 연성 조인트가 짧은 경우이다. 세 쌍의 발톱 중 한 쌍만이 알갱이에 걸려있다. 즉, 세 쌍의 발톱 중 어느 하나가 알갱이에 걸리는 순간 나머지 발톱들 역시 그리핑 모션이 중지된다. 따라서 세 쌍 모두가 알갱이에 걸리는 경우는 동시에 걸리는 경우 밖에 존재하지 않으나 이는 확률이 매우 낮다. Fig. 10(b)의 경우는 연성 조인트가 긴 경우이다. 연성 조인트가 짧은 경우와는 다르게 세 쌍의 발톱 중 어느 하나가 먼저 알갱이에 걸리더라도 나머지 발톱들은 그리핑 모션을 계속 할 수 있다. Fig. 10(b)에서 보듯 각각의 발톱들이 각기 다른 알갱이에 걸리는 것을 볼 수 있다. 이는 연성 조인트의 좌굴 현상이 각각의 발톱들에 독립적인 움직임을 가능케 했기 때문이다. 또한 좌굴 현상은 그리핑 힘이 일정한 구간을 수반하므로 이 때, 각각의 발톱들에 가해진 그리핑 힘들은 비슷한 수준의 힘을 유지한다. 이는 결국 안정된 그리핑으로 이어진다.

Fig. 11 은 시멘트 블록과 벽돌에서의 성공적인 그리핑을 보여준다. 2.0mm 의 중간 연성 조인트를 가진 그리퍼이며 이 때, 잡는 힘은 각각 0.05N 과 0.288N 이다. 시멘트 블록의 표면 거칠기가 더 큰 데 반해 잡는 힘이 작은 이유는 시멘트 블록 재료 자체의 특성 때문이다. 벽돌에 비해 잘 부서지는 성질 때문에 잡는 힘은 평균적으로 낮게 측정된 것이다.

6. 결론

본 논문에서는 거칠고 굴곡진 표면에 잘 적응하여 잡을 수 있는 생체모방 그리퍼를 제안하였다. 핵심 요소는 중간에 위치한 연성 조인트의 좌굴 현상이다. 그리핑 시 발생하는 좌굴 현상은 그리핑 힘이 일정한 구간을 늘려주는 동시에 각각의 발톱들에 독립적인 움직임을 부여한다. 이는 모델링과 실험을 통해 확인되었다. 또한 굴곡을 달린 실험을 통하여 실제로도 생체모방 그리퍼가 표면의 굴곡을 잘 극복함을 보여주었다. 또한 거칠기가 다른 두 재료를 준비하여 통계적 방법을 통해 좌굴 현상이 그리핑에 도움이 됨을 증명하였다.

앞으로 해야 할 일은 일단 그리퍼의 기하 조건을 최적화하는 것이다. 정규화와 최적화 과정을 통해 그리퍼 디자인 시에 도움이 되도록 할 것이다. 또한 생체모방 그리퍼는 사이즈 조절이 쉽게

가능하기 때문에, 사이즈를 키워 손(hand)으로 까지 확대할 계획이다. 또한 더 많은 재료들과 더 극단적인 상황을 설정하여 그리핑 테스트를 진행할 것이다.

후 기

이 논문은 2009 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2009-0087640, 2009-0070058).

참고문헌

1. Volpe, R., Balaram, J., Ohm, T. and Ivlev, R., "The rocky 7 mars rover prototype," Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vol. 3, pp. 1558-1564, 1997.
2. Kim, S., Spenko, M., Trujillo, S., Heyneman, B., Santos, D. and Cutkosky, M. R., "Smooth vertical surface climbing with directional adhesion," IEEE Transactions on Robotics, Vol. 24, No. 1, pp. 65-74, 2008.
3. Kim, S., Asbeck, A. T., Cutkosky, M. R. and Provancher, W. R., "SpinybotII: climbing hard walls with compliant microspines," 12th International Conference on Advanced Robotics, pp. 601-606, 2005.
4. Hirose, S. and Umetani, Y., "The development of soft gripper for the versatile robot hand," Mechanism and Machine Theory, Vol. 13, No. 3, pp. 351-359, 1978.
5. Dollar, A. M. and Howe, R. D., "A robust compliant grasper via shape deposition manufacturing," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 11, No. 2, pp. 154-161, 2006.
6. Brown, E., Rodenberg, N., Amend, J., Mozeika, A., Steltz, E., Zakin, M. R., Lipson, H. and Jaeger, H. M., "Universal robotic gripper based on the jamming of granular material," Proceedings of the National Academy of Sciences, Vol. 107, No. 44, pp. 18809-18814, 2010.
7. Snodgrass, R. E., "Principles of insect morphology," Cornell University Press, 1935.
8. Chapman, R. F., "The Insects: Structure and Function, 4th Ed.," Cambridge University Press, p. 175, 1998.
9. Jung, G. P., Koh, J. S. and Cho, K. J., "Meso-scale compliant gripper inspired by caterpillar's proleg," IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 1831-1836, 2011.
10. Howell, L. L., "Compliant Mechanisms," Wiley, 2001.
11. Oldfather, W. A., Ellis, C. A. and Brown, D. M., "Leonhard Euler's elastic curves," ISIS, Vol. 20, No. 1, pp. 72-160, 1933.
12. Sönmez, Ü. and Tutum, C. C., "A compliant bistable mechanism design incorporating elastica buckling beam theory and pseudo-rigid-body model," Journal of Mechanical Design, Vol. 130, No. 4, paper No. 042304, 2008.
13. Wood, R. J., Avadhanula, S., Sahai, R., Steltz, E. and Fearing, R. S., "Microrobot design using fiber reinforced composites," Journal of Mechanical Design, Vol. 130, No. 5, Paper No. 052304, 2008.
14. Cho, K. J., Hawkes, E., Quinn, C. and Wood, R. J., "Design, fabrication and analysis of a body-caudal fin propulsion system for a microrobotic fish," IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA), pp. 706-711, 2008.
15. Asbeck, A. T., Kim, S., Cutkosky, M. R., Provancher, W. R. and Lanzetta, M., "Scaling hard vertical surfaces with compliant microspine arrays," The International Journal of Robotics Research, Vol. 25, No. 12, pp. 1165-1179, 2006.