

소프트 액추에이터를 위한 유연 기구 설계 및 응용

김 기 우 인하대학교 기계공학과 교수 | e-mail : gwkim@inha.ac.kr

이 글에서는 다양한 유연 기구에 대한 연구 및 관련 기술 현황에 대해 소개하고 소프트 액추에이터 응용 가능성 및 성공에 대한 긍정적인 전망을 제시하였다.

기존 강체(rigid body)를 통해 입력된 힘이나 변위를 전달하는 기구(mechanism)와 달리 탄성이 있는 변형체를 통해 전달하는 신축성(flexible) 있는 기구를 유연 기구(compliant mechanism)라고 부른다. 실제 자연에 존재하는 많은 기구가 강성(stiffness)이 필요하지 않은 경우가 많으며 미시학적(microscopic) 관점에서 유연 기구 특성이 매우 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 이러한 유연 기구 특성은 특히 높은 종횡비(aspect ratio) 특성을 나타내는 MEMS에서도 동일하게 나타난다. 자연계에 존재하는 90%에 이르는 생명체가 척추가 없는 유연한 형태의 무척추 동물(invertebrates)인 점도 유연 기구의 다양성과 일맥 상통하다. 최근 자연에 존재하는 이러한 유연 기구를 생체 모방하여 조인트가 필요 없는 일체형(monolithic) 유연 기구의 개발에 대한 연구가 각광 받고 있으며, 특히 웨어러블(wearable) 디바이스 등에 사용되는 소프트 센서 및 액추에이터에 적용할 경우 기존 기술의 단점을 해결할 수 있는 Breakthrough 기술로 기대된다.

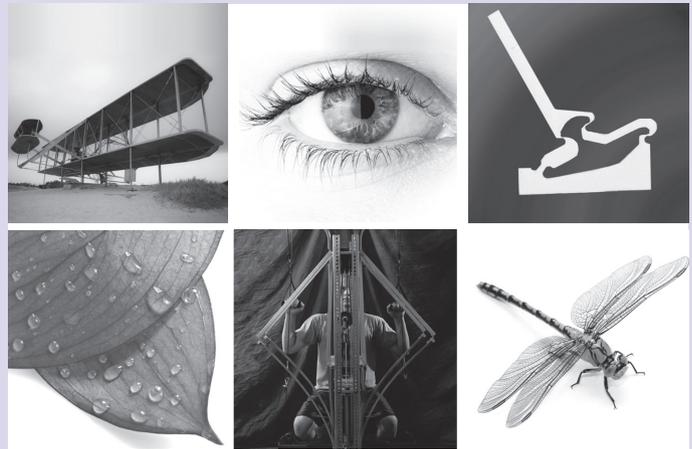


그림 1 유연 구조물(compliant mechanisms)의 대표적인 예(Howell et al., Handbook of Compliant Mechanism)

쌍안정 액추에이터 시스템(Bistable Actuation Systems)

유연 기구 중 가장 연구가 활발하고 유망한 기구는 쌍안정(bistable, or snap-through, snap-action, buckling) 기구이다. 쌍안정 특성은 위치 에너지(potential energy)가 바닥인 지점(potential well)이 일반적으로 하나가 존재하는 대부분의 단안정(monostable) 기구(또는 시스템)와 달리 두 군데 존재하는 특성이다. 이를 복원력과 변위와의 관계로 살펴보면 기울기는 강성(stiffness)을 나타내므로 음-

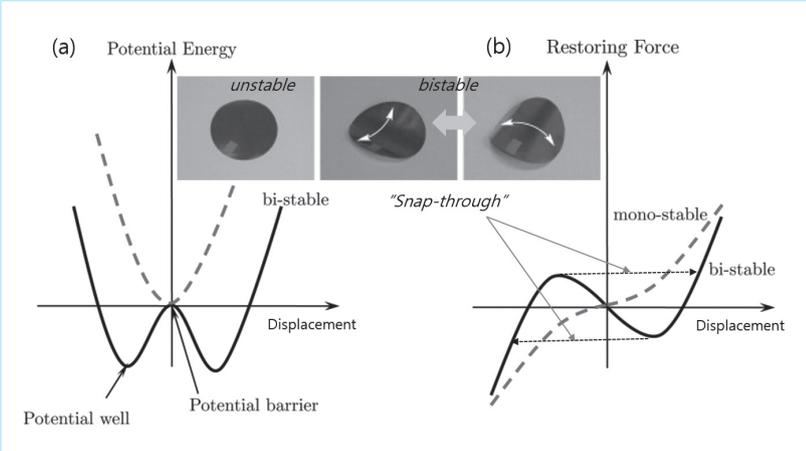


그림 2 쌍안정(Bistability) ; (a) Potential energy vs. displacement, (b) Restoring force vs. displacement

하게 발생하는데 대표적인 사례는 탄성 재료에서 발생하는 좌굴(buckling) 현상이며 최근에는 플라이 각도(ply angle)를 다르게 설계하여 적층한 CFRP 복합재(carbon fiber reinforced plastic composite)에서도 쌍안정 특성이 가능한 것으로 나타났다. 쌍안정 특성을 이용한 액추에이터의 장점은 무엇보다도 비교적 큰 변위 이동이 운동 에너지(즉, 파워)의 투입이 없이 가능하다는 점이다. 반면 불안정한 특성으로 제어가 어렵다는 단점도 존재하지만 정밀한 위치 제어가 필요 없는 작동 시스템(actuation system)에 적용하면 효율적인 액추에이터로 사용할 수 있다.

쌍안정 특성을 이용하여 작동하는 대표적인 유연 작동 시스템은 자연계에도 다수 존재하는데 대표적인 사례가 식충 식물의 한 종류인 Venus flytrap이다. 볼록하고 오목한 표면의 “snap-through” 기구 특성으로 인해 큰 작동력이 필요 없이 빠른 개폐 동작(nastic motion)이 가능하다. 이러한 특성을 모방하여 다양한

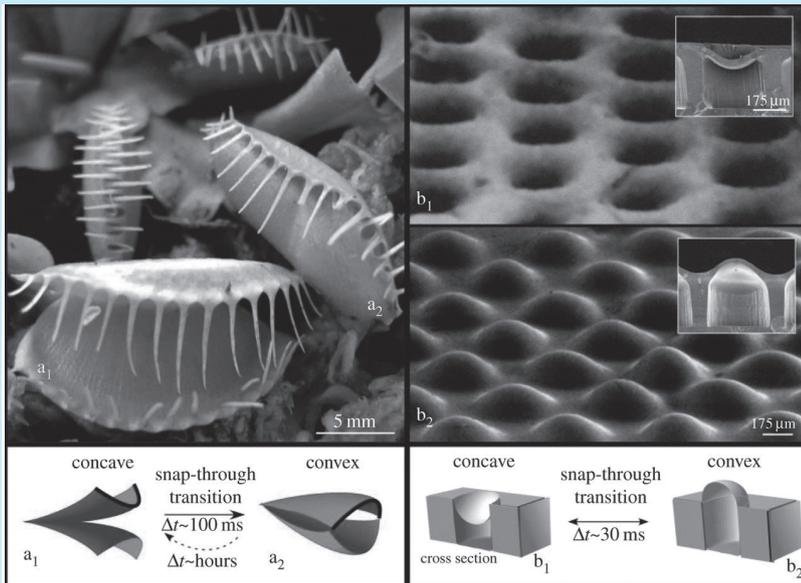


그림 3 ‘Snap-through’ 좌굴 작동 ; (a) Venus flytrap, (b) Micro lens

기울기(negative stiffness)를 나타내는 구간이 존재하는 사실을 알 수 있으며 불안정성으로 인해 급격하게 안정한 상태로 이동하려는 점프 현상(jump phenomenon)이 발생하는데 이런 비선형 과도 특성을 일반적으로 “snap-through” 또는 “snap-action” 이라고 부른다. 이러한 쌍안정 특성은 전기, 기계, 바이오, 재료 공학과 같은 다양한 공학 분야에서 광범위

공학적 응용이 가능하다. 마이크로 액추에이터, 모핑 날개(morphing wing), 다이내믹 “snap-through”를 이용하여 가진(excitation) 주파수를 up-conversion하는 에너지 하베스팅 기술 등이 공학적 응용 사례이다. 최근 소프트한 엘라스토머를 사용하여 압력차에 의한 “snap-through” 현상을 반복적으로 발생 시킨 후 다양한 동작(회전, 집기, 이동)을 구

현한 연구 결과가 발표되었는데 쌍안정 현상을 이용한 소프트 액추에이터 개발이 가능한 점을 제시한 연구 결과 중 하나이다.

이러한 쌍안정 특성은 ‘snap-through’를 유발시키기에 필요한 초기 작동력 만으로도 큰 변위를 빠른 시간 내에 이동시킬 수 있기 때문에 특히 유연 기구(또는 구조물) 모핑용 작동기에 적합하여 그림 5에 나타난 바와 같이 가까운 미래에 비행기 모핑 날개, 자동차용 모핑 스킨 등 다양한 분야에서 성공적으로 적용될 것으로 판단된다. 이외에도 본질적으로 불안정한 ‘Snap-through’ 특성을 이용하여 대변위, 큰 작동력과 빠른 응답 속도를 실현한 그림 6과 같은 형태의 유체 기반(fluidic) 소프트 작동기 개발도 가능하다.

미우라 접기(miura-fold, or miura-ori)에 영감을 받아 시작된 오리가미(origami) 기술이 최근 공학 분야에 다양하게 응용되기 시작하였다. 그림 7에 대표적인 적용 사례를 나타내었다. 이러한 오리가미에서 영감을 얻은 구조물 기술이 유연 기구에 기초한 작동기 기술과 결합하여 많은 공학적 문제를 해결할 수 있는 Breakthrough 기술의 하나로 각광 받고 있다. 특히 유연한 기구학적 특성을 지닌 복합재를 사용하는 유체 작동기(fluidic actuator)와 결합하여 소프트 액추에이터로의 가능성을 보여주는 연구 결과들이 발표되고 있다. 미우라 접기를 유연 기구 형태로 구현한 후 공압(pneumatic pressure)을 작용하면 그림 8과 같은 형태의 소프트한 쌍안정 기반 작동기 개발이 가능하여

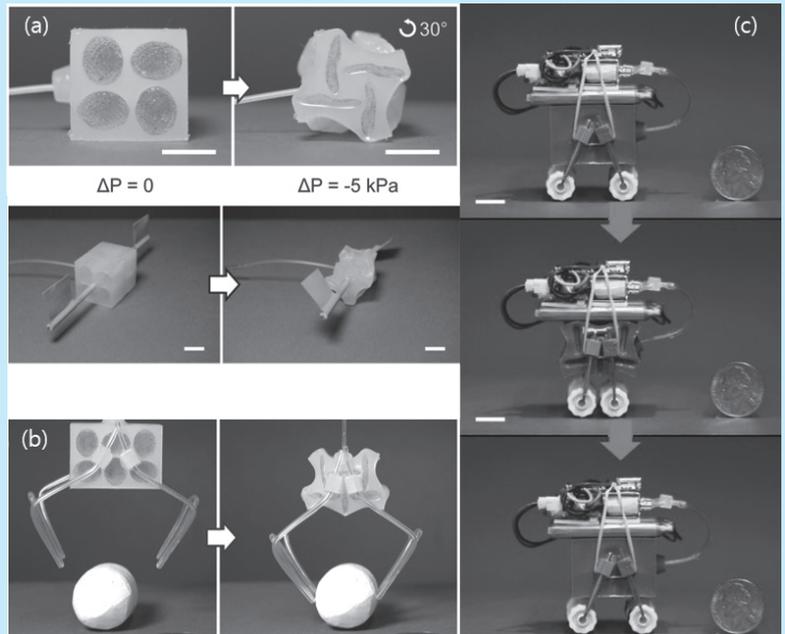


그림 4 소프트 좌골 액추에이터: (a) Rotation, (b) Grip, (c) Locomotive motion

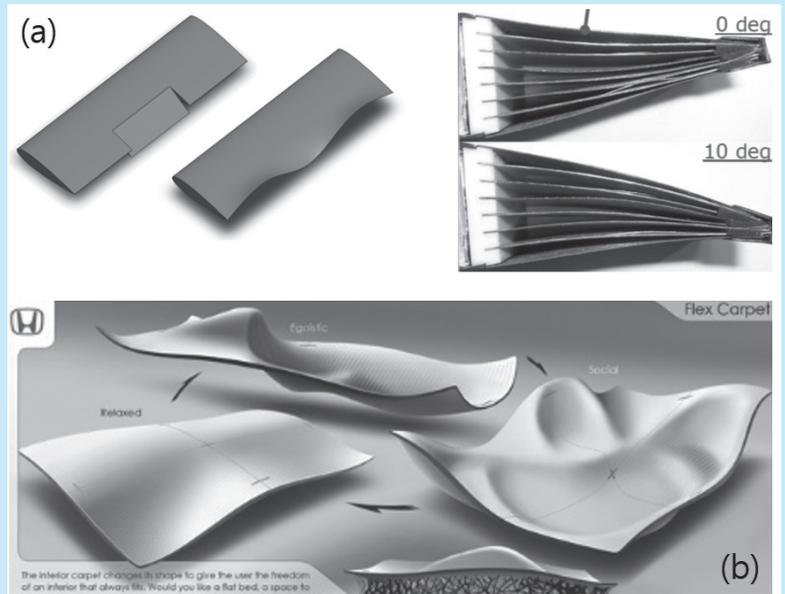


그림 5 쌍안정 복합재 액추에이터; (a) 비행기 모핑 날개, (b) 자동차 차체

내부 압력이 임계치에 도달할 때 쌍안정 특성이 트리거되어 빠른 작동이 가능하다. 이러한 소프트 작동 시스템은 venus flytrap에서 나타나는 쌍안정 특성을

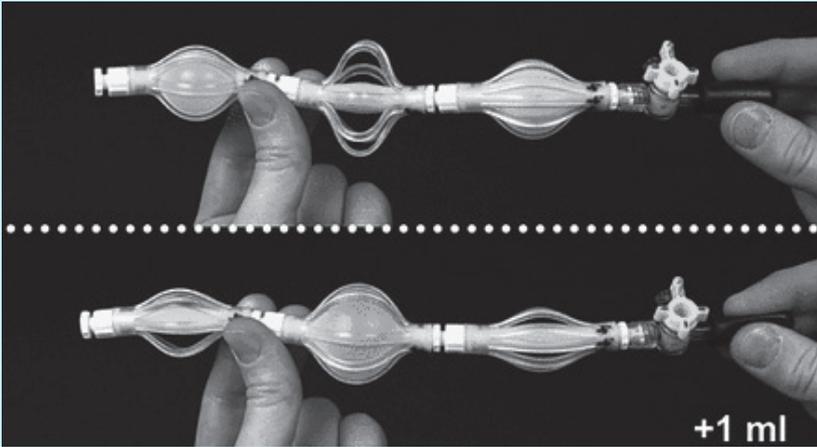


그림 6 'Snap-through' 불안정성을 이용하는 소프트 액추에이터

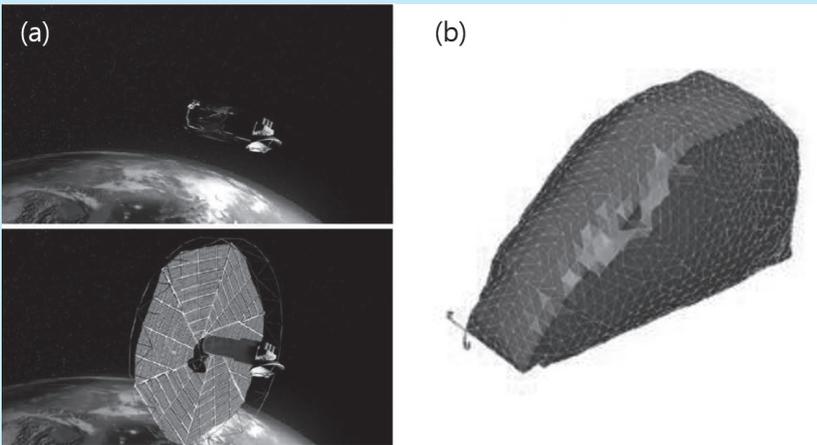


그림 7 오리가미에서 영감을 받은 구조물 ; (a) 펼쳐지는 태양전지판, (b) 자동차 에어백

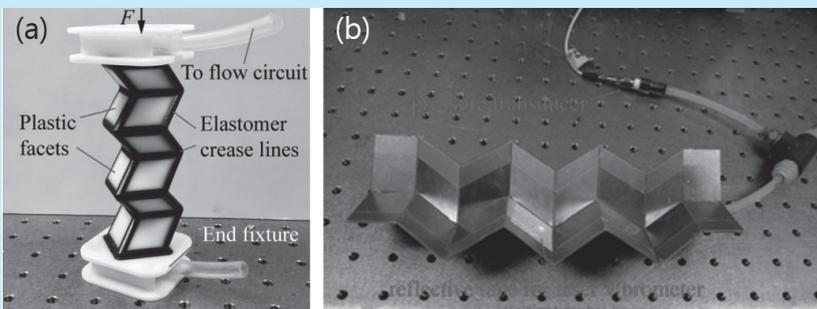


그림 8 유체 오리가미 액추에이터 시작품: (a) 플라스틱, (b) 금속

모방하면서도 origami 특성을 결합하여 유연하면서도 매우 큰 작동 스트로크의 구현이 가능한 중요한 사실을 시사하고 있다. 이제 기존 액추에이터(예: 전기 모터)와 같이 모든 액추에이터가 강성이 반드시 있어야 한다는 고정 관념에서 탈피하여 유연 기구에 기반한 새로운 형태의 다양한 소프트 액추에이터 개발이 지속적으로 이루어질 것으로 예상된다. 대학 연구소를 중심으로 새로운 소프트한 기능성 재료의 개발에 대한 연구 개발도 활발하게 이루어질 것으로 기대된다. 비록 현재는 기술적인 제약 조건 및 안전 문제 등으로 인해 소프트 액추에이터에 대한 실제 적용 사례가 매우 제한적이지만 유연 기구를 Break-through 기술로 창조 발전시킬 수 있다면 소프트 액추에이터 응용 연구 분야의 전망은 매우 밝을 것으로 확신한다. 특히 쌍안정 특성을 이용한 상용 상품이 다수 존재하기 때문에 이러한 특성을 소프트 액추에이터에 적용하는 기술은 매우 전도유망하다고 할 수 있을 것이다.