우주탐사와 종이접기 (2부)

“이번 2부에서는 앞선 1부에 이어 이대영 교수님 연구실의 주요 성과들을 소개합니다. 각 성과는 사진들과 함께 살펴보실 수 있습니다.”

▶ 지금까지 수행한 종이접기 관련 연구 중 대표적인 성과 몇 가지 소개 부탁드리겠습니다.

- 차량의 기동성 한계 극복을 위한 트랜스포밍 타이어

대학원 시절 가장 많은 시간을 투자한, 개인적으로도 애정이 큰 프로젝트입니다. 서울대학교 조규진 교수 연구팀, 한국타이어와 공동으로 개발한 종이접기 기반 전개형 바퀴로, 종이접기 구조가 큰 하중을 견디기 어렵다는 기존의 한계를 극복하고자 시작하였습니다.

이 바퀴는 평상시에는 지름 45cm의 작은 형태로 주행하다가 필요에 따라 80cm까지 확장할 수 있어 험지를 극복하는 데 유리합니다. 알루미늄 패널과 특수 직물을 종이접기 패턴으로 연결하여 복잡한 관절 없이도 전개할 수 있으며, 실험을 통해 1톤 이상의 하중을 지탱할 수 있음을 입증하였습니다. 이 연구는 2021년 Science Robotics 표지 논문으로 게재되었으며, 단순한 바퀴 설계를 넘어 모바일 시스템의 기동성을 획기적으로 향상할 수 있는 새로운 접근으로 평가받았습니다. 또한 자율주행 로봇, 재난 대응 차량 등 지상 응용 분야로도 확장 가능성이 제시되었습니다.



종이접기 트랜스포밍 타이어 *– 종이접기 설계 기법을 사용하였지만 1톤 이상의 하중을 견딜 수 있다. (Image Credit: 한국타이어, SNU SRRC)*

- 우주 물체 포획을 위한 나선 직조 로봇손

기존의 로봇 손은 대체로 여러 개의 모터와 센서로 구성되어 있으며, 이로 인해 구조가 복잡해지고 고장 가능성이 높습니다. 특히 우주와 같은 극한 환경에서는 작은 부품 하나의 고장이 전체 시스템의 실패로 이어질 수 있으므로 더욱 취약합니다. 저희 연구팀은 KIST 송가혜 박사 연구팀과의 공동 연구를 통해 단순하면서도 안정적으로 물체를 파지할 수 있는 새로운 개념의 로봇손을 제안하였습니다.

'나선 직조 로봇손'은 이름 그대로 직물처럼 짜여지는 구조를 가지고 있습니다. 유연한 필름 소재를 나선형으로 교차 배열한 뒤, 단일 구동기만으로 수축시키면 물체를 감싸 잡을 수 있는 방식입니다. 로봇손 자체의 무게는 약 130g에 불과하지만, 실험에서는 100kg 이상의 물체를 들어 올릴 수 있는 성능이 확인되었습니다. 별도의 센서 없이도 다양한 형상의 물체를 안정적으로 파지할 수 있으며, 내구성과 신뢰성, 경제성 측면에서도 기존 로봇손보다 우수한 결과를 보여주었습니다.

이 기술은 ㈜뉴로메카에 기술이전 계약이 체결되어 현재 산업 현장 적용을 위한 고도화가 진행 중입니다. 특히 농업, 물류, 제조업처럼 외부 환경이 거칠고 다양한 물체를 다루어야 하는 현장에서 높은 활용 가치를 지닐 것으로 기대됩니다. 동시에 인공위성연구소와 협력하여 우주 물체 포획을 위한 직조 로봇손 연구도 수행하고 있습니다. 다수의 모터나 센서에 의존하지 않고도 안정적으로 작동하는 이 기술은 향후 우주쓰레기 제거와 같은 극한 환경 임무에서 큰 장점이 될 수 있을 것으로 생각합니다.



나선 직조 그리퍼 – 얇은 PET 소재로 구성되었지만 100 kg 이상의 하중을 들어올리는 것이 가능하다. (Image Credit: KIST, KAIST)

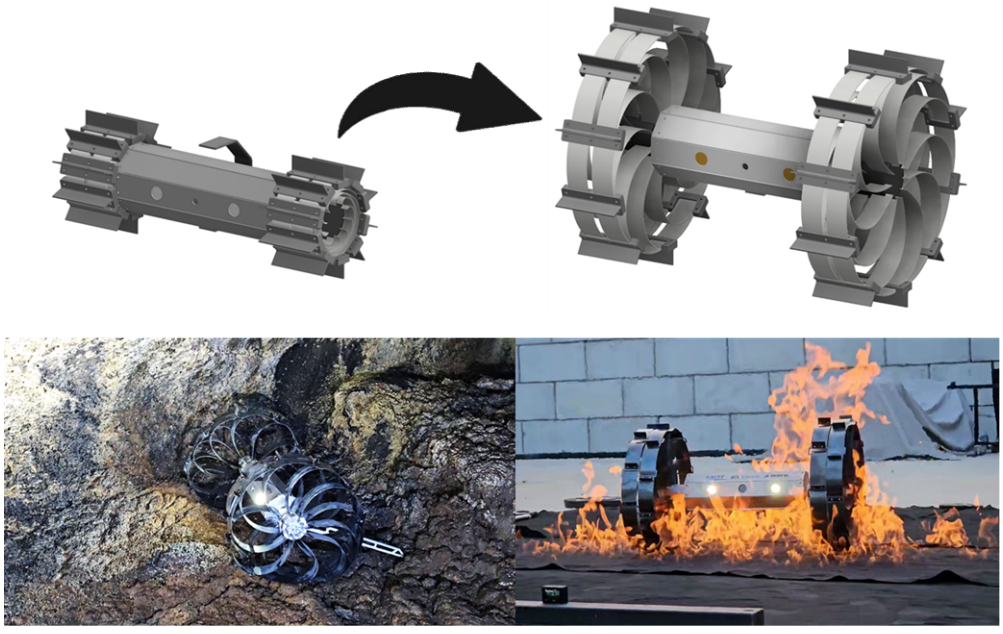
- 달 동굴 진입을 위한 전개형 달 탐사 로버 바퀴

달 탐사의 최대 난제 중 하나는 바로 피트(pit)와 용암 동굴(lava tube) 진입입니다. 피트는 달 표면에 난 커다란 구덩이로, 지하 동굴이 무너지면서 형성된 것으로 알려져 있습니다. 피트 내부는 달 표면과 달리 낮과 밤의 극심한 온도 차이와 우주 방사선으로부터 상대적으로 보호받을 수 있어, 장기적인 달 거주지 후보지로 각광받고 있습니다.

그러나 지금까지는 가파른 입구와 불규칙한 지반 때문에 피트 내부로의 진입이 쉽지 않았습니다. 이러한 난제를 해결하기 위해 저희 연구팀은 무인탐사연구소, 한국항공우주연구원, 한국천문연구원, 한양대학교와 협력하여 새로운 바퀴를 개발하였습니다. 종이접기 원리와 다빈치 다리의 맞물림 구조에서 아이디어를 얻어, 전개형 에어리스 휠을 설계한 것입니다.

이 바퀴는 탄성 금속판 소재를 종이접기 방식으로 배열해 접힌 상태에서는 지름 23cm에 불과하지만 전개하면 최대 50cm까지 확장되어 소형 로버도 가파른 턱이나 큰 바위를 넘어설 수 있습니다. 실제 인공 월면토 지형 실험에서도 우수한 주행 성능과 높은 충격 내구성이 입증되었습니다.

이 연구는 달 탐사 임무에 실질적으로 적용할 수 있는 해법을 제시했다는 점에서 의미가 있으며, 특히 인류가 언젠가 달의 피트와 용암 동굴을 탐사하고 활용하는 데 있어 중요한 기술적 기반이 될 수 있다고 생각합니다.



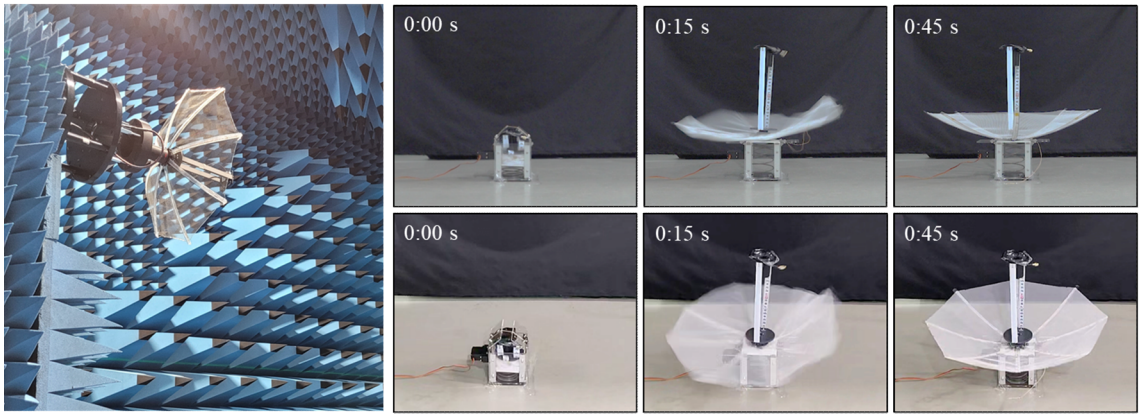
달탐사 로버를 위한 전개형 바퀴 *– 종이접기와 다빈치다리 구조에서 영감을 받은 전개형 휠 구조를 통해 소형 로버로 대형 로버 수준의 기동 성능 확보가 가능하다. (Image Credit: KAIST)*

- 초소형 위성의 활용성 향상을 위한 전개형 우주 안테나

최근 우주 산업에서는 크기가 작고 제작비가 저렴한 큐브샛(CubeSat)이 많이 활용되고 있습니다. 하지만 크기가 작은 만큼 탑재할 수 있는 안테나의 크기에도 한계가 있어, 신호 세기와 관측 성능에서 부족함이 발생합니다. 예를 들어, 지구 대기를 정밀하게 관측하거나 기상 예보에 활용하려면 일정 수준 이상의 큰 안테나가 필요하지만, 초소형위성에는 이를 실을 공간이 없는 것이 현실입니다.

이 문제를 해결하기 위해 저희 연구팀은 같은 학과 한재흥 교수님 및 윤효상 교수님 연구팀과의 공동 연구를 통해 0.5m급 전개형 반사판 안테나를 개발했습니다. 이 안테나는 1U 크기(10cm × 10cm × 10cm)의 큐브샛 내부에 접어 넣을 수 있으며, 궤도에 진입하면 종이접기 원리를 적용한 교차축 폴딩 메커니즘을 통해 안정적으로 펼쳐집니다. 실험 결과, 전개 후에도 표면 오차가 약 5mm 수준으로 유지되었고, 지향성은 13.07 dBi로 상용 소형 안테나 대비 60% 이상 향상된 성능을 보였습니다.

특히 이 기술은 GNSS-RO(Global Navigation Satellite System Radio Occultation) 방식에서 큰 의미를 가집니다. GPS와 같은 위성 신호가 지구 대기를 통과하며 굴절되는 정도를 분석하면, 대기의 온도·습도·압력 분포를 정밀하게 파악할 수 있습니다. 이는 태풍의 경로를 더 정확히 예측하거나 장기적인 기후 변화 추적에 필수적인 자료가 됩니다. 지금까지는 대형 위성이 담당했던 임무를, 전개형 안테나를 장착한 초소형위성 다수로도 수행할 수 있게 되는 것입니다. 결국 이 연구는 저비용으로 지구 전역을 촘촘히 관측하는 환경 모니터링 체계를 가능하게 하는 핵심 기술이라고 말씀드릴 수 있습니다.



큐브셋을 위한 전개형 우주 안테나 *- 1U 크기에 수납 후 직경 500mm 수준의 반사판 안테나로 전개가 가능하다. (Image Credit: KAIST)*

▶ 앞으로의 연구는 어떤 방향으로 확장해 나가실 계획인지 궁금합니다.

저희 연구실의 중심 철학은 기존 시스템의 한계를 극복하는 종이접기 공학입니다. 지금까지는 제한된 발사체 공간 안에 구조물을 실을 수 있도록 부피를 최소화하는 전개 방식에 주력했다면, 앞으로는 여기에 더해 구조적 안정성, 기능적 성능, 운용 신뢰성까지 확보하여 한정된 무게, 부피 자원 하에서 더 많은 기능을 수행할 수 있도록 하는 것을 목표로 하고 있습니다.

구체적으로 말씀드리면, 우선 현재 진행 중인 전개형 우주 안테나, 태양광 패널, 매니퓰레이터와 같은 시스템을 더 고도화할 계획입니다. 큐브샛이나 소형 위성의 활용이 늘어나면서, 제한된 공간에 수 미터 규모의 안테나나 태양광 패널을 전개하는 기술의 수요가 점점 커지고 있습니다. 저희는 이미 프로토타입을 통해 성능을 입증했지만, 앞으로는 반복 전개 신뢰성, 장기간 궤도 환경에서의 안정성, 극한 온도 차에 대한 내구성을 검증하는 단계로 연구를 확장하려고 합니다.

또한 달 탐사와 관련된 연구 역시 중요한 축입니다. 저희가 개발한 전개형 로버 바퀴는 향후 실제 탐사 임무에서 적용될 가능성이 크기 때문에, 단순한 시제품을 넘어 실제 임무 환경에서의 검증으로 이어가는 것이 필요합니다. 예를 들어, 극저온 환경에서의 반복 주행, 달 먼지(Regolith)에 대한 내구성 실험, 착륙선과의 통합 운용 같은 부분까지 단계적으로 발전시켜 나갈 예정입니다. 이러한 과정은 단순히 바퀴 연구를 넘어서, 향후 달 기지 건설이나 용암 동굴 탐사 등 더 복잡한 임무로 이어질 수 있는 기반을 마련하는 것이라고 생각합니다.

장기적으로는 대형 구조물 연구가 중요한 과제가 될 것입니다. 예를 들어, 최근 주목받고 있는 우주 공장이나 다수의 위성이 협력해야 하는 위성 군집 시스템에서는 대형 통신 안테나나 전력 공급 장치가 필요합니다. 이 경우 수십 미터 규모의 전개형 태양광 패널이나 집광 거울이 요구되는데, 이를 접어서 발사체에 실었다가 궤도에서 안정적으로 펼치는 기술은 필수적입니다. 저희는 종이접기 공학의 장점을 활용하여 이러한 구조물을 보다 단순하고 신뢰성 있게 구현하는 방법을 모색하고 있습니다.

이와 함께, 저희는 다기능 전개 구조에도 관심이 있습니다. 예컨대 전개된 구조물이 단순히 공간을 확장하는 것에서 그치지 않고, 동시에 전력을 공급하거나, 충격을

흡수하거나, 열을 반사하는 기능을 함께 수행할 수 있다면 훨씬 효율적인 임무 수행이 가능해질 것입니다. 이를 위해서는 새로운 소재 개발과 기하학적 설계 원리를 접목하는 융합 연구가 필요하며, 앞으로 이 부분도 적극적으로 추진할 계획입니다.

정리하자면, 앞으로의 연구는 단순한 형상 전개를 넘어서 기능과 성능을 갖춘 전개형 시스템으로 발전하는 것이 핵심입니다. 저희 연구실은 가까운 시일 내에는 위성용 전개 구조와 달 탐사 로버 기술을 고도화하고, 중기적으로는 우주 발전소나 대형 구조물과 같은 새로운 응용 분야로 확장하며, 장기적으로는 인류의 거주지 구축과 같은 큰 비전까지 준비할 수 있도록 단계적으로 연구를 이어가고자 합니다.

“이번 호는 여기까지입니다. 끝까지 읽어주셔서 감사합니다.”