안녕하세요 저는 유연 크레슬링 패턴을 활용한 공압 로터리 액추에이터 개발에 대해 발표할 추대호입니다.

발표 순서는 다음과 같습니다. 우선 **연구 배경**에 대해 간략히 소개 드리고, 이어서 **연구 목표**를 설정한 내용을 말씀드리겠습니다. 그 다음으로 **연구 내용**에 대해 정리하여 설명 드리고. 이후에는 **연구 성과**를 통해 이번 연구에서 얻어진 결과를 말씀드리겠습니다. 마지막으로 **향후 연구 계획**을 소개하며 발표를 마치겠습니다.

첫번째로 연구 배경입니다. 기존의 산업용 로봇은 금속과 같은 강체 재료를 기반으로 높은 정밀도와 강한 힘을 발휘하며 제조와 같은 산업 분야에서 중요한 역할을 해왔습니다.

하지만 이러한 강체 기반 로봇은 단단한 구조와 제한된 유연성으로 인해 사람과의 직접적인 협업 환경에서는 안전성과 적응성에서 한계를 드러냅니다.

특히, 예기치 않은 충돌이 발생했을 때, 강체 로봇은 인체나 주변 환경에 큰 손상을 줄 가능성이 높아, 인간과 긴밀히 협력해야 하는 응용 분야에서는 활용이 제한적일 수밖에 없었습니다. 반면, 소프트로봇은 실리콘, 플라스틱과 같은 유연하고 가벼운 재료를 사용하여 설계되며, 충격을 흡수하고 환경에 적응하는 능력이 뛰어납니다.

이를 통해 로봇이 인간의 신체나 섬세한 기기를 다룰 때에도 안전하게 상호작용할 수 있으며, 예기치 않은 접촉 상황에서도 인체에 가해지는 부하를 최소화합니다.

이러한 배경 속에서 소프트로봇의 핵심 기술 중 하나로 공압을 이용하여 운동을 생성할 수 있는 소프트 액추에이터의 필요성이 부각되었고 저희 연구실에서는 오리가미 패턴을 이용한 액추에이터를 연구하고 있습니다.

또한 공압 액추에이터를 활용하여 사람의 전완 시스템을 구현하고 있는데 현재 사용하고 있는 손목 관절 시스템은 선형 운동을 생성하는 액추에이터에 별도의 기계 장치를 연결해 이를 회전 운동으로 전환하는 방식으로 구동하고 있습니다.

하지만 이러한 구조는 시스템을 복잡하고 무겁게 만드는 단점이 있습니다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 저희는 공압으로 직접 회전 운동을 생성할 수 있는 회전 액추에이터를 개발하게 되었습니다

공압 시스템에서 회전 운동을 생성하기 위해 저희는 **오리가미 패턴**의 하나인 **크레슬링 패턴**을 활용하였습니다.  
그러나, **다음 영상에서 보시다시피**, 크레슬링 패턴을 **직렬로 연결하여 제작한 액추에이터**는 회전 운동과 선형 운동이 동시에 발생하였습니다.  
이로 인해, **순수한 회전 운동이 요구되는 회전 액추에이터**로는 적합하지 않았습니다.

이러한 이유로 회전 액추에이터의 불필요한 선형 운동을 제거하기 위해 크레슬링 패턴을 동심 구조로 배치한 구조로 액추에이터를 설계하게 되었습니다.

내부와 외부에 직경이 다른 두 가지 크레슬링 패턴을 적용함으로써, 선형 운동을 상쇄하면서 액추에이터의 총 회전 각도를 증가시키는 장점이 있습니다. 이러한 설계적 특징 덕분에 DKRoA라는 이름이 붙여졌습니다.

DKRoA는 크레슬링 패턴을 활용하여 회전 운동을 생성하는 공압 기반 소프트 액추에이터입니다. 이 액추에이터의 상부를 고정한 상태에서 내부를 감압하면, 내부와 외부의 압력 차이에 의해 바깥쪽 크레슬링 패턴이 접힌 부분을 따라 수축하며 alpha 만큼의 회전 운동을 생성합니다.

이 회전 운동은 액추에이터 하부에 연결된 내부 크레슬링으로 전달되며, 내부 크레슬링은 추가적으로 beta 만큼의 회전 운동을 발생시킵니다. 두 회전 운동을 더하기 위해 내부와 외부 크레슬링 패턴은 반대 방향으로 설계하였습니다.

결과적으로, 내부 크레슬링에 연결된 회전축은 고정된 상단 부분을 기준으로 α+β만큼의 회전 운동을 생성하게 됩니다. 이러한 원리를 통해 DKRoA는 선형운동 없이 오직 회전운동만을 생성할 수 있습니다.

이러한 아이디어를 기반으로 실제 액추에이터를 제작하기 위해서는 **크레슬링 패턴의 특성을 분석**하고, 이를 바탕으로 **적절한 액추에이터 구조를 설계**해야 했습니다.

이를 위해 저는 연구 목표를 다음과 같이 설정하였습니다.  
첫째, 두 개의 층으로 액추에이터를 구성했을 때, 총 회전각이 **180도**가 되도록 하는 **내부와 외부 크레슬링 패턴의 지름**을 설계하는 것. 둘째, **공기 누출이 없는 구조**를 설계하는 것입니다.

다음으로는 연구한 내용에 대해 설명 드리겠습니다. 먼저, 크레슬링 패턴의 특성을 분석하기 위해 패턴의 주요 파라미터를 정리하였습니다.  
크레슬링 패턴은 기본적으로 윗면이 정다각형으로 이루어져 있으며, 옆면은 삼각형 구조로 구성되어 있습니다.

이를 기반으로, 초기 상태에서 크레슬링 패턴의 높이를 H\_1 수축된 상태에서의 높이를 H\_2​로 설정하였습니다. 또한, 옆면을 이루는 삼각형에서 제일 긴 변의 길이를 L 아랫변의 길이를 a. 나머지 한 변의 길이를 b로 정의하였습니다.

다음은 **크레슬링 패턴의 회전각도**에 대한 수식입니다. 크레슬링 패턴에서 옆면 삼각형의 세 변의 길이 a, b, l은 모두 **윗면의 직경** D, **정다각형의 변의 개수** n, 그리고 **초기 높이** h1에 의해 결정되는 변수입니다. 따라서, 크레슬링 패턴의 설계 변수로는 D, n, h1​, 그리고 두께 t까지 총 네 가지가 있습니다. 그러나, **크레슬링 패턴의 회전각을 계산**할 때에는 설계 변수에 포함되지 않는 **수축 시 높이** h2​가 추가적으로 필요합니다. 이 값은 **실험적으로 측정**하여 사용하였습니다.

이러한 설계 변수를 기반으로, **변 l의 길이가 수축하거나 이완하지 않는다는 가정** 하에 크레슬링 패턴의 수축 시 회전각도를 계산하는 수식을 도출하였습니다.

이어서, 유도한 수식을 이용하여 계산한 **크레슬링 패턴의 회전각도**와 실제 출력된 크레슬링 패턴의 **회전각도 비교 실험**에 대해 말씀드리겠습니다.

비교 실험에서는 기존에 사용하던 액추에이터와의 통일성을 유지하기 위해, 밑면이 **8각형**, 높이가 **25mm**, 지름이 각각 **30mm, 50mm, 70mm**인 크레슬링 패턴을 사용하였습니다. 이 크레슬링 패턴은 **TPU 소재**로 출력되었으며, 두께는 프린터가 정상적으로 출력 가능한 최소 두께인 **0.6mm**로 설정하였습니다. 또한, 수축 시 높이 h2​는 수축된 상태에서 측정한 각 크레슬링 패턴의 평균값인 **5mm**로 설정하였습니다.

그 결과는 다음과 같습니다. **지름이 30mm**인 크레슬링 패턴은 **아크사인 함수의 정의역을 벗어나 계산이 불가능**하였습니다.

**지름이 50mm**일 때는 **5.86%의 오차율**이 나타났고 **지름이 70mm**일 때는 **1.2%의 오차율**이 나타났습니다.

이 실험에서 확인된 점은, **지름이 줄어들수록 오차율이 증가**하는 현상이었습니다. 이러한 오차의 원인을 분석한 결과, 크레슬링 패턴의 지름이 작아질수록 **회전각도가 증가**하고,

이로 인해 **삼각형의 긴 변 l이 더욱 휘어지는 특성** 때문으로 확인되었습니다. 이 문제를 해결하기 위해, **실험적인 방법**을 통해 액추에이터에 적합한 **크레슬링 패턴의 지름을 설정**하기로 하였습니다.

다음은 실험으로 측정한 크레슬링 패턴의 지름별 회전 각도입니다.

이 실험 결과를 토대로, 저희는 설계할 액추에이터의 외부 크레슬링의 지름을 65mm,  
내부 크레슬링 패턴의 지름을 30mm로 설정하기로 하였습니다.

이러한 설계를 통해 액추에이터는 최대 178도까지 회전이 가능하도록 설계되었습니다.

다음으론 DKRoA의 공기 누출을 방지하고 효율적으로 운동을 전달하기 위한 구조에 대해 연구하였고 다음과 같은 세가지 방식을 고안하였습니다.

첫 번째 방식은 Mechanical Seal 방식입니다. 운동을 전달하는 축이 외부로 나오는 지점에 Mechanical Seal을 장착하여 공기 누출을 방지하는 설계입니다.

두 번째 방식은 Magnetic Coupling 방식입니다. 이 방식은 물리적인 접촉 없이 자석의 자기력을 이용해 회전운동을 전달하는 원격 방식입니다.

세 번째 방식은 반대방향으로 축을 연결한 방식입니다. 이 구조에서는 회전 축을 반대 방향으로 연결하여 회전운동을 전달하도록 설계되었습니다.

공기 누출을 방지하기 위해 첫번째로 적용한 방식인 Mechanical Seal 방식입니다.  
이 방식은 운동을 전달하는 축이 외부로 나오는 지점에 Mechanical Seal을 장착하여 공기 누출을 막는 구조입니다.

이 방식의 가장 큰 장점은 운동을 직접적으로 전달할 수 있다는 점입니다. 또한, 운동이 생성되는 위치와 엔드이펙터 사이의 거리가 짧기 때문에, 다른 방식들보다 더 강한 토크를 견딜 수 있는 특징이 있습니다.

하지만, Mechanical Seal은 구조적 특성상 완벽한 밀폐를 유지하기 어려운 경우가 있습니다. 높은 압력이 가해질 경우, Seal 부위에서 공기가 누출되는 단점이 존재합니다

다음 영상은 **Mechanical Seal**을 활용하여 구동되는 DKRoA의 시연 영상입니다.  
영상에서 확인할 수 있듯이, Mechanical Seal 방식은 공기 누출을 방지하기 위한 설계로 적용되었지만, 완벽한 밀폐가 이루어지지 않아 내부가 완전히 감압 되지 않는 문제가 발생했습니다.

이로 인해 크레슬링 패턴이 온전히 수축하지 못하기 때문에 충분한 회전운동을 만들기는 어려웠습니다.

다음은 두 번째 방식인 마그네틱 커플링입니다. 이 방식은 **원형 자석을 직접 배치하여 제작**되었으며, 상부와 하부에 각각 8개의 원형 자석을 극이 교차되도록 배치하여 동력을 전달하는 구조입니다. 마그네틱 커플링의 주요 장점은 **간접적으로 동력을 전달하기 때문에 공기 누출 문제가 발생하지 않는 점**입니다. 이는 기존 방식인 Mechanical Seal의 단점을 보완할 수 있는 중요한 특징입니다. 하지만, 이 방식은 자기력을 통해 작동하기 때문에 외부에서 지나치게 큰 토크가 가해졌을 때, 축이 돌아가는 문제가 발생할 수 있습니다.

다음 영상은 **마그네틱 커플링을 활용한 액추에이터의 가동 영상**입니다.  
왼쪽 영상을 보시면, **Mechanical Seal**을 활용한 방식에 비해 **크레슬링 패턴이 더욱 수축**하는 모습을 확인할 수 있습니다. 이는 마그네틱 커플링 방식의 공기 누출 방지 효과를 잘 보여줍니다. 하지만 오른쪽 영상을 보면, **외부에서 축에 부하가 가해졌을 때 축이 돌아가는 문제**가 발생하는 것을 확인할 수 있습니다. 이는 마그네틱 커플링 방식이 자기력을 통해 동력을 전달하기 때문에 나타나는 한계점으로, 지나치게 큰 외부 토크에 취약한 구조적 단점을 보여줍니다.

다음은 세 번째 방식인 **반대 방향으로 축을 연결한 방식**입니다.  
이 방식은 **마그네틱 커플링**과 마찬가지로 **내부와 외부가 완전히 분리**되어 있어 **공기 누출 문제가 없는 장점**을 가지고 있습니다. 하지만, 이 방식은 운동의 생성 지점과 엔드이펙터 사이의 거리가 멀기 때문에, 3D 프린터로 출력한 PLA 재료를 사용할 경우, **축이 뒤틀리거나 부러질 가능성**이 있습니다. 이러한 문제는 비틀림 응력에 대한 취약성으로 인해 발생합니다. 이를 해결하기 위해 **비틀림 응력에 강한 카본 파이프**로 회전 축을 대체하는 방법을 적용하였습니다. 이를 통해 축의 강성을 높이고, 동력을 안정적으로 전달할 수 있도록 문제를 해결하고자 하였습니다.

다음 영상은 **반대 방향 액추에이터**의 가동 영상입니다.  
영상에서 보시다시피, **공기 누출이 없어 액추에이터가 완전히 수축**하는 것을 확인할 수 있습니다.

또한, 이 방식은 **마그네틱 커플링과 달리 직접적으로 회전 운동을 전달**하기 때문에, **축이 돌아가는 문제**가 발생하지 않는 장점이 있습니다.

이를 통해 안정적으로 동력을 전달하며, 설계 목적에 가장 적합한 방식임을 보여줍니다.

다음으로는 연구 성과에 대해 말씀드리겠습니다.  
이번 연구의 주요 성과로는 연구 내용을 기반으로 시작품을 개발한 점입니다.

특히, **크레슬링 패턴의 회전각 측정 결과**를 기반으로 DKRoA를 설계하였으며, 외부 크레슬링의 지름을 **65mm**, 내부 크레슬링의 지름을 **30mm**로 설정하였습니다.  
또한, 세 가지 방식 중 **로터리 액추에이터에 가장 적합했던 Opposite Direction Design**으로 제작하였습니다. 이를 통해 최대 **178도까지 회전**할 수 있으며, **공기 누출 없이 안정적으로 동작**하는 액추에이터를 제작하였습니다.

또한, 이번에 개발한 액추에이터로 **특허를 출원**하였습니다.  
특허 출원 과정에서, 저는 **크레슬링 패턴을 동심으로 배치한다는 아이디어를 활용**하여 실제 기구를 설계하고 제작하는 데 기여하였습니다.

아이디어를 기반으로 DKRoA의 독특한 구조적 특징을 반영하여 실제로 작동 가능한 액추에이터를 구현하였으며, 이를 통해 새로운 방식의 배치 방법을 활용할 수 있는 구체적인 구조로 발전시킬 수 있었습니다.

다음으로는 향후 연구 계획입니다. 첫 번 째로, 제작한 DKRoA의 **토크를 측정**하여 이 액추에이터의 성능을 객관적으로 평가할 계획입니다. 이를 통해 DKRoA의 구동 특성을 정량적으로 분석하고, 향후 설계 개선에 활용하고자 합니다.

두 번 째로, 제작한 DKRoA를 활용하여 실제 **전완부 시스템의 손목 회전**을 구현하고 제어하는 실험을 진행하려고 합니다.

DKRoA의 회전 특성을 바탕으로 손목의 자연스러운 동작을 재현하고, 이를 효과적으로 제어할 수 있는 방안을 연구할 계획입니다.

세 번 째로, 단순히 특정 조건에서의 크레슬링 패턴 회전각도 측정을 넘어, 다양한 설계변수들을 달리하여 회전각도를 측정하고 이를 통해 보다 정확히 크레슬링 패턴의 회전각도를 예측할 수 있는 모델을 개발하는 것을 목표로 하고 있습니다.

이를 통해 설계 단계에서 크레슬링 패턴의 회전 특성을 미리 파악하고, 보다 최적화된 액추에이터 설계가 가능하도록 기여하고자 합니다.

이상으로 연구 발표를 마치겠습니다. 감사합니다.