

케이블 구동 서보조작기의 모션 비간섭 설계 및 최적화

Design and Optimization of Cable-driven
Servo-manipulator for Motion Decoupling

KAERI

한국원자력연구원

제 출 문

한국원자력연구원장 귀하

본 보고서를 2008년도 “핵연료주기 원격취급기술개발” 과제(세부연구 내용 “Pyroprocess 원격취급용 양팔조작기 제작”)의 기술보고서로 제출합니다.

2008. 12.

주 저 자 : 이 종 광

공 저 자 : 윤 광 호
김 기 호
박 병 석

요 약 문

케이블 구동 매니플레이터에서 케이블-폴리의 기하학적 특성에 의해 한 축의 운동이 다른 축의 운동에 영향을 미치는 모션 간섭(motion coupling) 현상에 대해 살펴보았으며, 이를 보상하기 위한 종래의 기술들을 분석하였다. 분석 결과 기존의 구조들에서는 케이블-폴리 파라미터들이 최적화되더라도 케이블 길이변화를 완전히 제거하지 못하였다.

본 연구에서는 조작기 링크의 회전에 관계없이 케이블 길이를 일정하게 유지하기 위한 메커니즘을 고안하였으며 이를 실험을 통해 검증하였다. 엘보우 조인트의 경우 모션 간섭을 기구적으로 보상하기 위해 하부팔의 회전에 따른 케이블 길이변화를 하부팔의 회전에 동기하여 수평 이동하는 폴리를 추가함으로써 보상하는 새로운 메커니즘을 적용하였다. 손목 조인트의 경우 케이블-폴리 구조와 관련된 기하학적 파라미터들을 최적화함으로써 전체 케이블 길이 변화량을 최소화하도록 하였다. 쇼울더 조인트의 경우 모션 간섭이 발생되지 않는 구조를 채택하였다. 설계된 모션 비간섭 케이블 구동 서보조작기는 케이블 길이 변화에 따른 부정확한 운동을 방지할 수 있으며, 케이블 길이변화에 따른 과도한 장력의 변화를 줄임으로써 동력전달요소의 내구성을 높이고 조작기의 안전성 향상시킬 수 있으리라 판단된다.

SUMMARY

In this report, we investigated kinematic motion coupling problems where the length or tension of a cable is changed due to another link's motions and we also analyzed the conventional joint decoupling configurations for cable-driven manipulators. The results show that a small motion coupling effect exists in these configurations due to an imperfect compensation for a variation of the cable length even if the configuration parameters are optimized.

To maintain the cable length constant regardless of the rotation of the arm, we present a structural decoupling mechanism for a cable-driven manipulator. In case of an elbow joint design, we used a novel joint decoupling mechanism where a moving pulley which actively compensates for a motion interference. For a wrist joint design, we considered the volume of a wrist joint as a design constraint. Therefore, we optimized the geometrical parameters of the cable-pulley configurations in order to minimize the overall variation of the cable length. As for a shoulder joint, we adopted motion decoupled structures where an upper arm a roll and forearm pitch motion are performed in a differential driving manner. Designed motion decoupled cable driven mechanism prevents an unintended malfunction of the manipulator, and it also increases the durability of the power transmission elements of the manipulator.

CONTENTS

Chapter 1 Introduction	1
Chapter 2 Motion interference of cable-pulley configurations	4
Chapter 3 Analysis for motion coupling of cable-driven manipulators	8
3.1 Conventional approaches	8
3.2 Analysis program	15
Chapter 4 Design and optimization of motion decoupled joints	20
4.1 Design of motion decoupled joints	20
4.2 Optimal design for motion decoupled joint	25
4.3 Evaluation of motion coupling	31
Chapter 5 Conclusion	34
References	35

목 차

제 1 장 서론	1
제 2 장 케이블-폴리 모션 간섭	4
제 3 장 케이블 구동 조작기의 모션 간섭 분석	8
3.1 기술 현황 분석	8
3.2 분석 프로그램	15
제 4 장 모션 비간섭 조인트 설계 및 최적화	20
4.1 모션 비간섭 조인트 설계	20
4.2 모션 비간섭화 최적 설계	25
4.3 모션 간섭량 평가	31
제 5 장 결론	34
참고문헌	35

제 1 장 서 론

힘반영(force-reflection)은 조작자가 원격으로 자신이 수행하는 작업력을 직접 느낄 수 있는 기능으로 성공적인 원격조작을 위한 핵심 기능이다. 이를 통해 조작기나 물체를 손상시키지 않고 복잡한 작업들을 수행할 수 있다. 힘반영 서보매니플레이터의 설계에는 우수한 정적 및 동적 성능의 확보를 위해서 역구동성(backdrivability), 힘 민감도(force sensitivity), 백래쉬(backlash), 위치/힘 대역폭(position/force bandwidth), 마찰(friction), 관성(inertia), 강성(stiffness), 무게균형(weight balancing), 제어모드(control mode), 특이점 없는 작업공간 등과 같은 다양한 요인들을 고려하여야 한다[1].

작업공간에 특이점이 없는 것은 매니플레이터의 기구학 및 역기구학이 각 점에서 유일한 해를 갖게 됨을 의미하며, 이는 암의 위치와 힘 궤환(feedback)의 측정을 쉽게 한다. 또한 높은 대역폭과 고정도 센서를 구비한 전기적인 구동기를 사용하는 것은 매니플레이터의 높은 성능을 보장한다. 일반적으로 우수한 힘반영 서보조작기가 되기 위해서는 역구동성이 좋아야하고, 힘의 민감도는 취급 하중의 1~5 %, 백래쉬는 2 mm 이하, 무게 불균형(unbalancing)은 0.4 kgf 이하가 되어야 한다.

역구동성은 힘반영 서보매니플레이터에서 아주 중요한 기준으로, 이는 매니플레이터가 공간상에 자유롭게 움직일 수 있는 특성을 나타낸다. 추가로 낮은 관성과 마찰은 매니플레이터 동역학을 보상하기 위해 필요한 힘을 감소시킴으로써 이의 성능을 향상시킨다. 또한 높은 강성은 정교한 말단장치(end-effector)의 위치제어를 가능하게 한다.

방사선 환경에서 사용되는 힘반영(force-reflecting) 서보매니플레이터는 steel cable, steel wire 및 steel tape와 같은 텐던(tendon)을 이용하여 동력을 전달하는 것이 선호된다[2,4,5, 7-9, 10-14, 16]. 이는 텐던을 통한 동력전달 방식이 기어에 의한 방식에 비해 백래쉬(backlash)와 마찰을 크게 줄임으로써 역구동성(backdrivability)을 크게 증가시키고, 이에 따라 힘반영 특성을 크게 개선시킬 수 있기 때문이다. 또한 구동기(actuator)들을 그들이 구동하는 조인트 또는 링크로부터 멀리 떨어뜨려 설치할 수 있어, 매니플레이터 암 자체의 무게 또는 관성을 줄일 수 있으므로 구동기의 용량을 줄일 수 있고 시스템의 동적 성능을 개선할 수 있다[1-3].

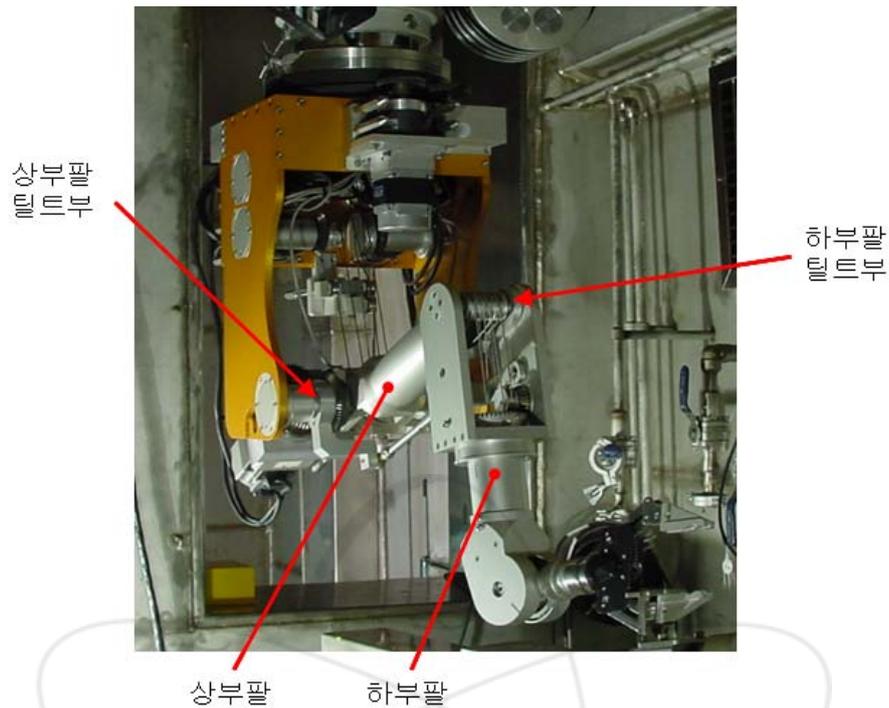


그림 1-1. 케이블 구동 슬레이브 서보매니퓰레이터.

그림 1-1은 사용후핵연료 차세대관리공정(ACP, Advanced spent fuel Conditioning Process)의 실증을 위해 개발된 천정이동 텔레스코픽 서보조작기(BTSM; Bridge Transported Servo Manipulator)를 보여준다. 개발된 서보조작기는 중량대비 취급용량을 크게 하기 위해 토크 전달력이 큰 몸체 회전, 상부팔(upper arm) 틸트(tilt) 및 하부팔(forearm) 틸트 운동은 기어 구동 방식을 채택하였고, 토크 전달력이 비교적 작은 하부팔 회전(yaw), 손목의 roll 및 pitch 동작, 그리퍼의 그립(grip) 운동은 텐던-폴리(tendon-and-pulley) 구동 방식을 채택하였다.

그림 1-2는 슬레이브 서보조작기의 주요 와이어 구동부에 대한 사진을 보여준다. 스틸 케이블이 관절 조인트(joint)의 회전축상에 설치된 폴리들에 감겨지고 지지되어 페루프를 형성한다. 따라서 구동 모터로 이에 연결 폴리를 회전시켜 케이블을 감으면, 케이블의 장력은 매니퓰레이터에 관절의 회전 조인트 설치된 폴리들을 거쳐 전달되어 종단 폴리를 회전시키게 된다. 관절 구동부의 설계가 복잡하지 않도록 그림 1-2의 (b) 또는 (c)와 같이 동일한 회전축 상에 모든 폴리들을 배치하는 것이 일반적이다. 하지만 이러한 설계의 편의성은 와이어와 폴리 사이의 기하학적 특성에 의해 모션 간섭현상(coupling)이 발생된다.

본 보고서는 이러한 케이블 구동 서보매니퓰레이터의 텐던-폴리 구동부의 모션

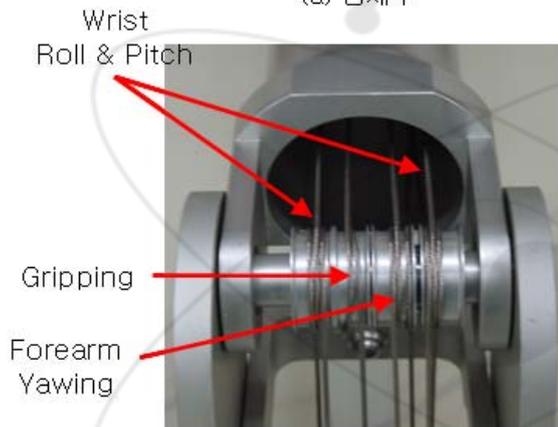
간섭 현상을 제거하기 위한 설계 및 최적화에 관한 것으로, 종래 기술들에 대한 분석과 함께 새로운 설계 및 분석 기법에 대해 정리하였다.



(a) 몸체부



(b) 상부 팔 틸트부



(c) 하부 팔 틸트부



(d) 하부 팔 회전부

그림 1-2. 매니플레이터 케이블 구동부.

제 2 장 케이블-폴리 모션 간섭

그림 2-1은 케이블 동력전달을 통해 매니퓰레이터의 말단부에 설치된 그리퍼의 개폐를 제어하기 위한 개념도를 나타내며, 케이블은 회전 조인트 상에 설치된 폴리들의 안내를 통해 구동 모터로부터 그리퍼까지 연결된다. 일반적인 산업용 로봇과 같이 구동 모터를 그리퍼 또는 하부팔에 설치하여 제어하는 경우 매니퓰레이터 암의 무게를 크게 증가시키게 되므로, 이러한 방식은 힘반영 서보매니퓰레이터의 설계에서는 거의 적용되지 않는다.

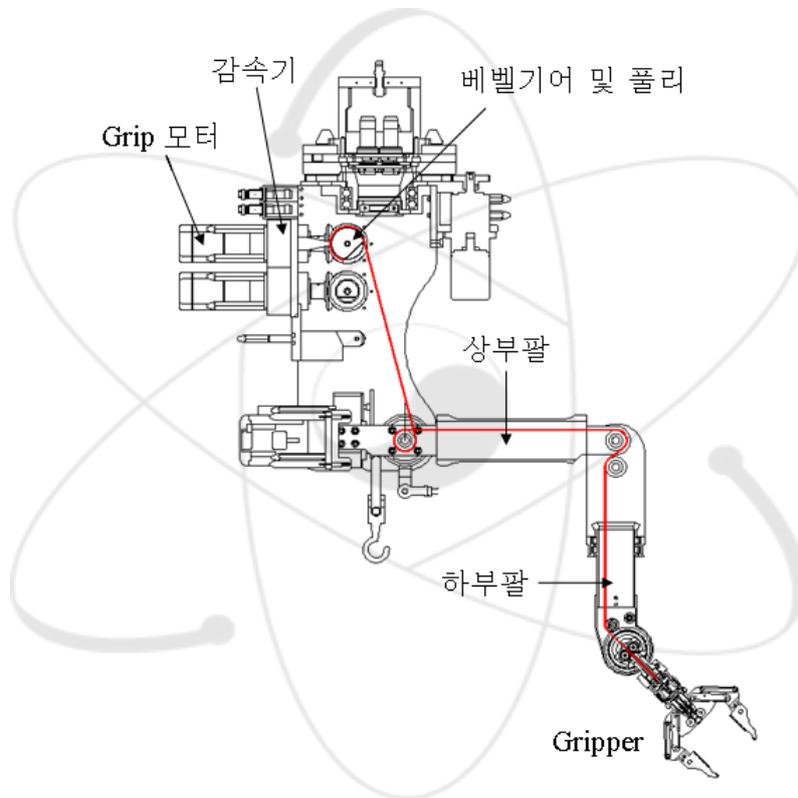


그림 2-1. 케이블 동력전달 개념도.

그림 2-2는 그리퍼의 개념도를 보여준다. Grip 모터를 회전시켜 케이블을 베벨 기어에 연결된 폴리에 감는 경우 전체 케이블의 길이가 줄어들게 된다. 이때 그리퍼 모듈의 케이블에 연결된 체인이 4절 링크 구조를 회전시켜, 그리퍼 조(jaw)를 평행하게 닫히도록 한다. 모터를 반대로 회전시키는 경우 케이블이 풀려 느슨해지게 되는데, 이때 그리퍼 모듈에 설치된 스프링이 4절 링크를 반대 방향으로 복원시켜 그리퍼가 펴지면서 케이블이 팽팽하게 된다.

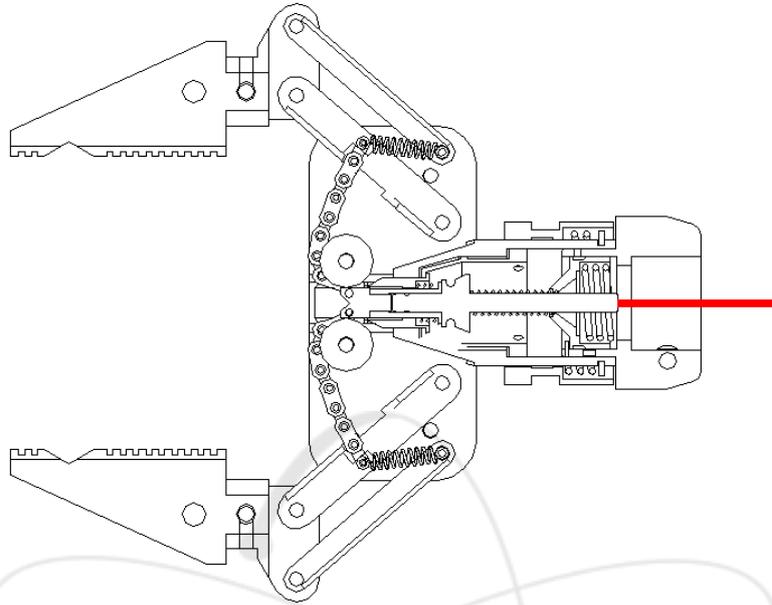


그림 2-2. 그리퍼 개략도.

그림 2-3은 매니플레이터의 상부팔(upper arm)과 하부팔(forearm)을 서로 회전 가능하도록 결합시키는 엘보우(elbow) 조인트에서 발생하는 대표적인 모션간섭 현상을 보여준다. 반경 r 의 풀리 P1이 엘보우 조인트 축상에 설치되어 있으며, 아이들(idle) 풀리 P2가 그리퍼까지 연결되는 케이블을 지지한다. 그림 2-1과 비교하여 B는 Grip 모터에 연결되며, A는 그리퍼에 연결된다. 그림에서 구동 모터와 연결된 풀리의 회전에 의해 케이블이 감기는 방향에 따라 B의 위치가 좌, 우로 이동하게 되면, 이러한 위치 변화가 풀리 P1과 P2를 거쳐 A의 위치를 변화시키는데, 이를 통해 그리퍼를 개폐시키게 된다.

그림 2-3 (b)에서와 같이 단순히 하부팔(forearm)만을 θ 만큼 회전시키는 경우, 그리퍼로 연결되는 케이블이 풀리 P1에 접촉하는 각도가 변화하게 된다. 이러한 접촉각의 변화가 케이블의 길이 또는 장력을 변화시켜, 결국 그리퍼의 의도하지 않은 운동을 유발한다. 케이블 길이 변화는 아이들 풀리 P2와는 전혀 관계가 없으며, 엘보우 조인트 축상에 설치된 풀리 P1의 크기에만 관계가 있다. 전체 케이블 길이는 다음과 같이 θ 의 함수로 표현된다.

$$L_2 = L_1 \pm r\theta. \quad (2-1)$$

그림 2-3 (b)와 같이 하부팔이 반시계방향으로 θ 만큼 회전하는 경우 전체 케이블의 길이는 그림 2-3 (a)의 기준 위치에서보다 $r\theta$ 만큼 증가하게 된다. 이러한 상황에서 그리퍼는 증가된 케이블 길이에 의해 그리퍼가 열리게 되며, 이로 인해 매니플레이터는 잡고 있는 물체를 떨어뜨릴 수 있다. 반대로 하부팔이 θ 만큼 시계방향으로 회전하는 경우, 전체 케이블의 길이는 회전량에 비례하여 줄어들게 된다. 이는 그리퍼를 오픈라지게 동작시켜 잡힌 풀리와 와이어 사이의 기하학적 특성에 의해 하부팔의 pitching 동작고 있는 물체에 손상을 가할 수 있다.

정리하면, “조인트로 연결된 두 링크가 상대 회전시 조인트 축상에 설치된 풀리에 케이블이 접촉하는 각도가 달라져 의도하지 않은 다른 축의 운동을 유발하는 현상”을 와이어 구동부의 모션 간섭(motion coupling)이라 정의할 수 있다. 이 현상은 그리퍼 구동 케이블 뿐만 아니라, 엘보우 조인트 풀리에 감겨 동력을 전달하는 모든 케이블들의 동작에 동일한 영향을 미치게 된다.

그림 2-4는 하부팔이 기준자세에서 $\pm 45^\circ$ 범위로 회전하는 경우에 전체 케이블의 길이 변화를 보여준다. 풀리 P2의 크기는 전체 길이 변화에 영향을 미치지 않는다. 풀리 P1의 직경이 30 mm인 경우 케이블은 최대 23.6 mm의 범위 안에서 길이가 변화하게 된다.

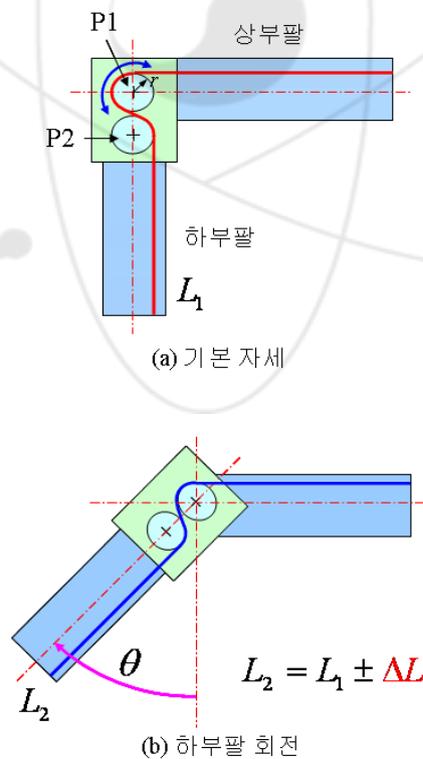


그림 2-3. 케이블 모션간섭 개념도.

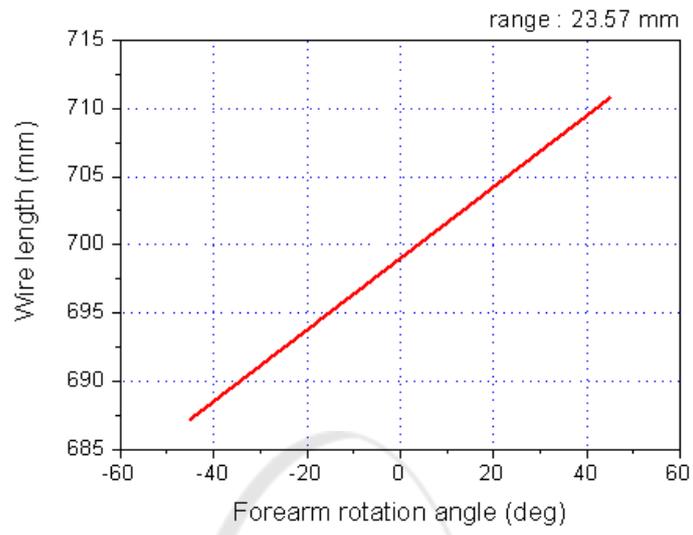


그림 2-4. 폴리(P1) 회전에 따른 케이블 길이.

제 3 장 케이블 구동 조작기의 모션 간섭 분석

제 1 절 기술 현황 분석

1. 단순한 모션 비간섭 구조

풀리가 설치된 조인트가 피치방향으로 회전할 때 발생하는 모션 간섭을 완전히 제거하는 가장 단순한 방법은 그림 3-1에 제시된 것처럼 암과 함께 구동 모터가 동일한 움직임을 갖도록 기구를 구성하는 것이다. 이 메커니즘은 그림 3-2에 보이는 MA22 서보조작기에 사용된 방식이다[2, 15].

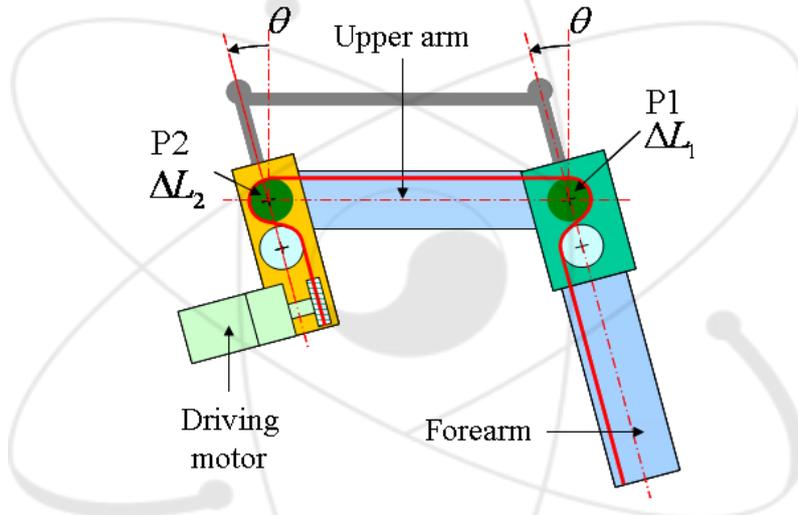


그림 3-1. 단순한 모션 비간섭 구조 개념도.

이러한 구조에서, 풀리 P2에서 발생하는 케이블 길이변화(ΔL_2)은 풀리 P1에서 발생하는 케이블 길이 변화(ΔL_1)로 흡수된다. 따라서 전체 케이블 길이 변화는 다음과 같이 완전히 제거된다.

$$\Delta L = \Delta L_2 - \Delta L_1 = r\theta - r\theta = 0. \quad (3-1)$$

하지만 이러한 구조는 다음과 같은 단점이 있다.

- ① 구동기를 포함한 회전부의 볼륨이 증가하며, 이에 따라 전체 조작기의 크

기가 커지게 된다.

- ② 이동부에 의해 증가된 무게와 관성은 조작기의 동역학적 성능을 저하시킬 수 있다.

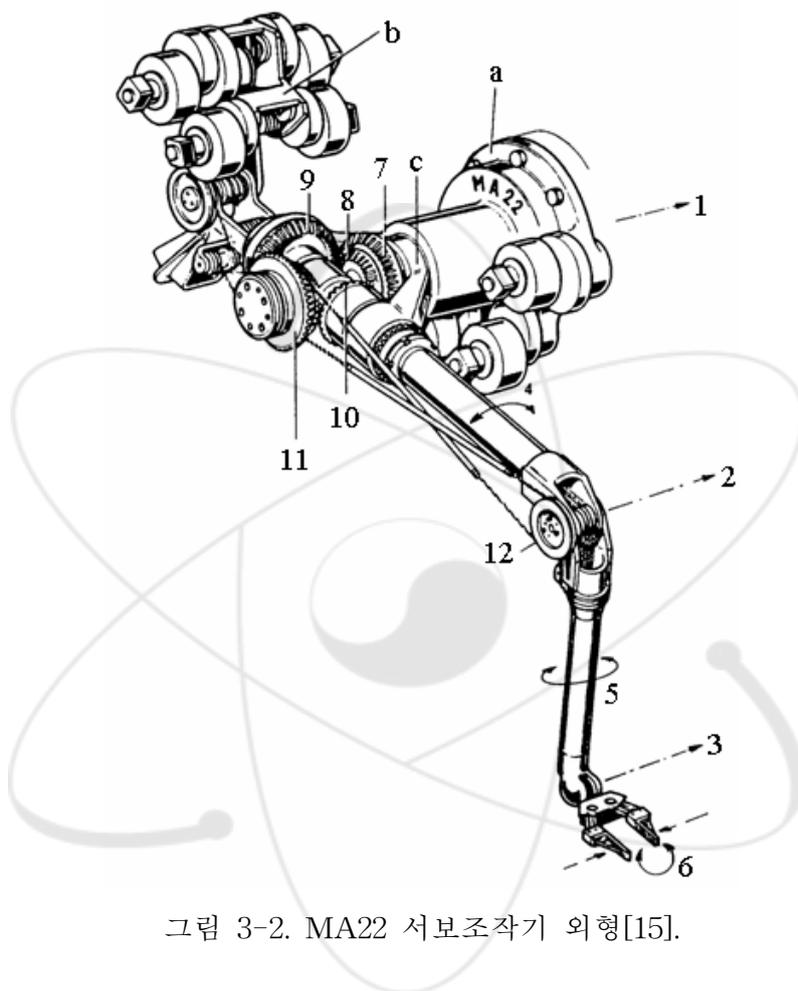


그림 3-2. MA22 서보조작기 외형[15].

모션 간섭 문제를 풀리-케이블 배치를 통해 해결하고자 하는 다양한 방법들이 사용되고 있으며, 다음 절에서 보다 상세한 분석과 함께 다룬다.

2. 와이어 안내 장치[16]

그림 3-3은 케이블 구동매니플레이터의 조인트를 통과하는 와이어를 안내하는 장치(wire guide apparatus)를 보여준다. 두 풀리 P1과 P3는 각각 하부팔과 상부팔에 고정되어 있다. 풀리 P2는 암 내부를 통과하는 케이블을 엘보우 조인트에서 편심되어 지지한다. 이 장치에서 만약 모든 풀리의 직경을 2장에서 분석된 풀리

와 동일한 조건을 갖도록 30 mm라고 하고, 두 풀리의 거리, d_1 과 d_2 를 35 mm라고 가정하였다. 고정된 상부팔에 상대적으로 하부팔이 회전 운동을 할 때 모션 간섭량을 계산하였으며, 최대 케이블 길이 변화는 그림 3-4에 제시된 것과 같이 약 6.75 mm이다. 그림 2-4와 같은 엘보우 조인트상에 설치된 풀리의 경우 최대 케이블 길이변화가 23.6 mm이었던 것을 고려하면, 이 장치는 모션 간섭량을 상당히 줄일 수 있다. 하지만 이러한 구조 개념은 풀리의 크기와 위치 등의 기하학적 파라미터들을 최적화하는 경우에도 케이블 길이변화를 완전히 없앨 수 없는 구조적 단점을 갖고 있다.

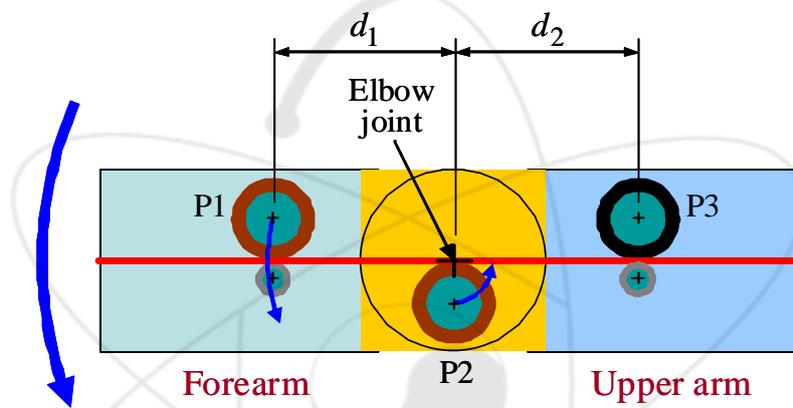


그림 3-3. 케이블 안내장치 개념도.

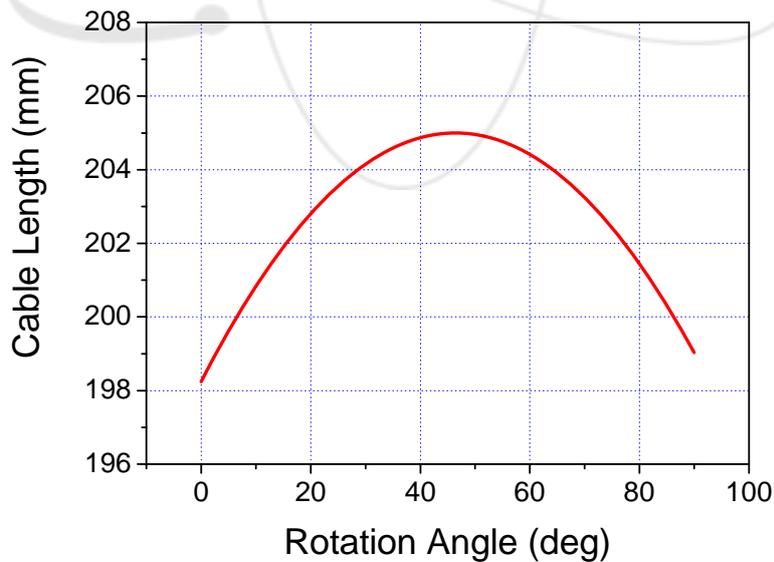


그림 3-4. 엘보우 조인트 회전에 따른 케이블 길이 변화.

3. MT200 슬레이브 조작기

그림 3-5는 프랑스 원자력청(CEA)에서 개발한 슬레이브 조작기 MT200-TAO의 z축 확장부에 대한 케이블 동력전달 개념도를 보여준다. 그림에서 점선 박스로 표시된 부분은 모션 간섭 현상을 줄이기 위해 구성된 케이블-폴리부의 배치 모습을 보여준다. 폴리 P3는 벽 관통부(wall transmission part)에 설치되었으며, 다른 두 폴리 P1과 P2는 쇼울더 조인트의 고정되어, 조인트 회전시 같이 회전한다. 이전 절의 와이어 안내 장치와 비교할 때, 사용된 폴리의 직경이 서로 다르며 중립 위치에서 세 폴리들이 특정한 각도로 설치된 것이 다르다. 그림 3-6은 쇼울더 조인트가 90도 범위에서 회전할 때 케이블 길이 변화량을 분석한 결과를 나타낸다. 치수 파라미터들이 정확히 알 수 없어 이전 절에서 사용된 값을 고려하여 선정하였으며, 폴리의 직경 차이는 그림상의 스케일을 고려하여 선정하였다. 분석 결과 최대 케이블 길이 변화는 2.464 mm였다.

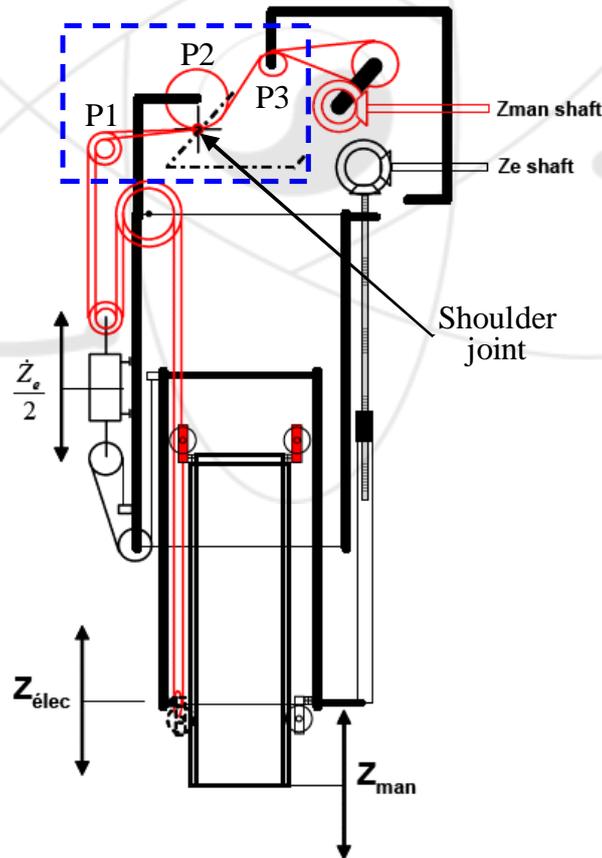


그림 3-5. 하부팔의 텔레스코픽 동작을 위한 케이블-폴리 배치 개념도[17].

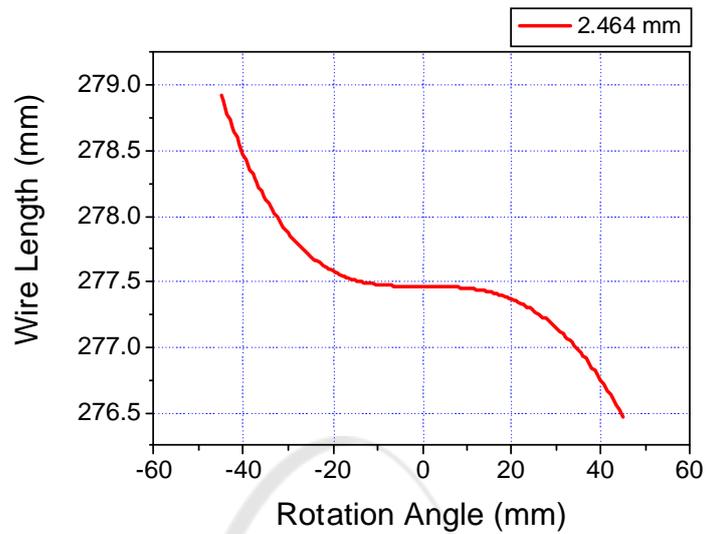


그림 3-6. 쇼울더 회전에 따른 케이블 길이변화.

4. 기계식 원격조종기

그림 3-7은 ACP 핫셀에 설치된 (주)한국차폐에서 개발된 벽부착 기계식 원격조종기(모델명: KTH 200)의 쇼울더 조인트 모습을 보여준다. 이 조작기는 직경이 동일한 세 폴리들을 사용하였다. 폴리 P3는 벽 관통부에 고정되었으며, 나머지 두 폴리 P1과 P2는 쇼울더 조인트에서 편심되게 설치되어 쇼울더 피치 운동에 따라 같이 회전한다. 그림 3-8은 이러한 케이블-폴리 배치에서 케이블 간섭량을 분석하기 위한 모델을 나타내며, 각각의 파라미터들은 표 3-1과 같다.

그림 3-9는 쇼울더 조인트가 90도 범위로 회전할 때 케이블 길이변화를 보여준다. 최대 길이변화량이 1.733 mm로 분석되어, 이전 절에서 설명된 2가지 방식보다 모션 간섭량을 더욱 줄일 수 있었다. 하지만 이 구조는 쇼울더 조인트 축상에서 편심되게 설치된 두 폴리가 회전하는 공간이 필요하여, 컴팩트한 설계에 제약사항으로 작용한다.

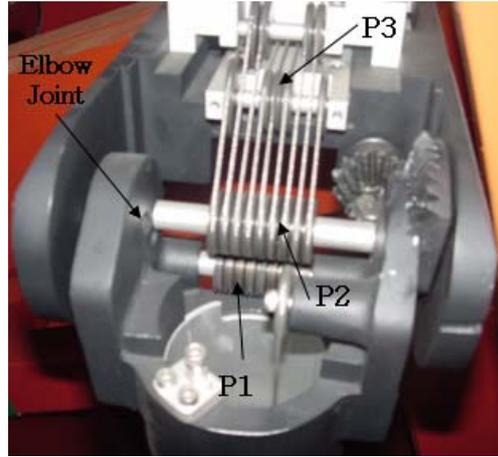
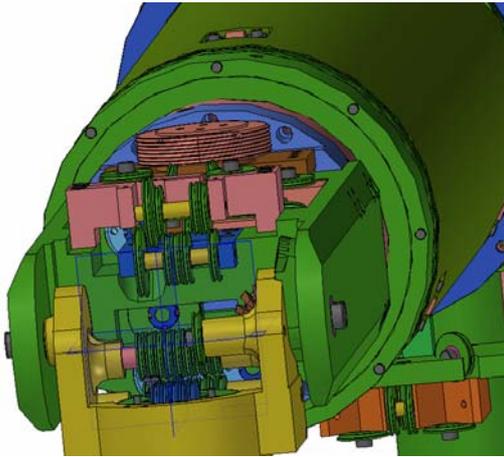


그림 3-7. KTH 200 조작기 쇼울더 조인트 폴리-케이블 배치.

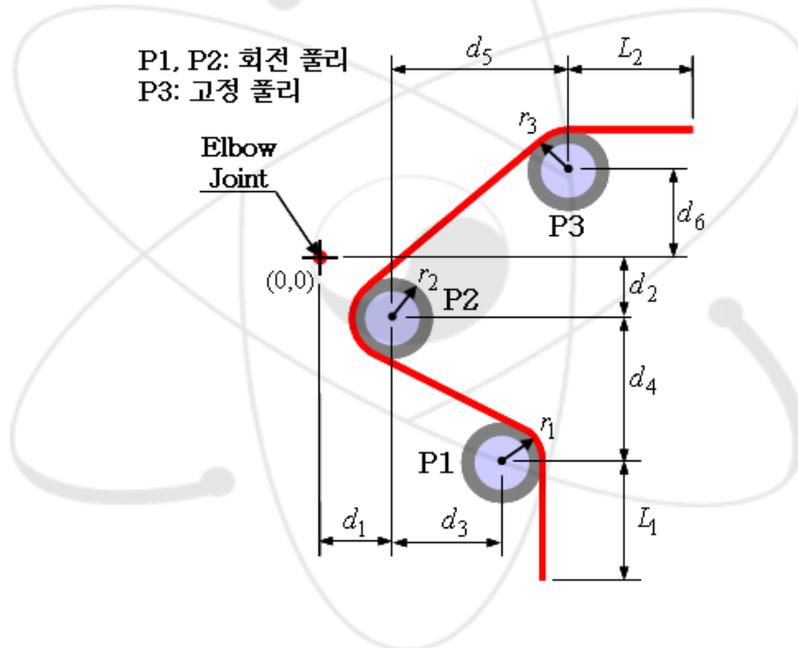


그림 3-8. KTH 200 모션 간섭량 분석 모델.

표 3-1. KTH 200 폴리-케이블 구성의 기하학적 파라미터.

변수	값 (mm)	비고
L ₁ , L ₂	50	
d ₁	7	
d ₂	16	
d ₃	20	
d ₄	36	
d ₅	60	
d ₆	40	
r ₁	15	
r ₂	15	
r ₃	15	

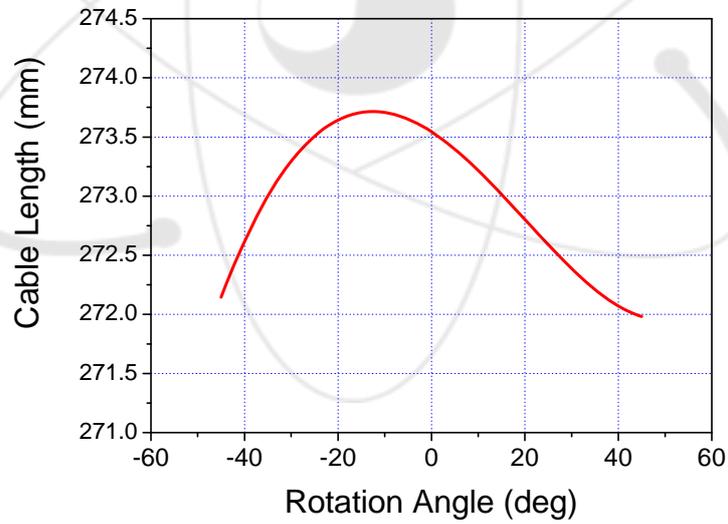


그림 3-9. KTH 200 쇼울더 회전시 케이블 길이변화.

제 2 절 분석 프로그램

텐던-폴리부의 기하학적 해석을 통한 모션 간섭현상을 분석하였다. 분석을 위해 적용된 가정은 다음과 같다.

- 폴리과 케이블 사이의 마찰은 이들 상호간의 미끄러짐(sliding)이 발생하지 않도록 충분이 크다.
- 케이블과 폴리의 관성은 무시할 수 있다.
- 케이블은 항상 인장된 상태로 장력의 변화에 따른 신축 정도는 무시할 수 있다. 따라서 케이블은 폴리에 접선형태로 연결되며 폴리의 원주를 따라 밀착되어 접촉한다.
- 매니플레이터 조이트에 설치된 폴리들 사이의 중심거리는 항상 일정하다.

이상의 가정을 통해 폴리에 접촉하는 케이블을 원에 접촉하는 선으로 단순화하여 해석할 수 있다. 해석 유형은 크게 케이블과 폴리와의 관계 및 폴리과 폴리와의 관계로 구분할 수 있다.

- ① 케이블이 직접 폴리로 연결되는 경우 원에 접하는 접선으로 해석할 수 있으며, 한 점에서 원에 그은 접점은 항상 2개가 되므로 텐던-폴리부의 배치 특성 즉, 케이블을 감는 형태에 따라 올바른 접점을 판단할 수 있는 기준을 정해야 한다.
- ② 폴리과 폴리 사이에 케이블이 연결되는 경우는 두 원이 서로 내접하는 경우와 외접하는 경우로 나누어 분석할 수 있다. 항상 내접점과 외접점도 쌍으로 얻어지므로 올바른 접점을 판단할 수 있는 기준을 정해야 한다.

다양한 텐던-폴리부의 배치 및 형태에 대해서 분석할 수 있도록 컴퓨터 프로그램을 작성하였으며, 이에 사용된 기하학적 기본식들은 다음과 같다.

1. 직선과 원의 위치관계 판별

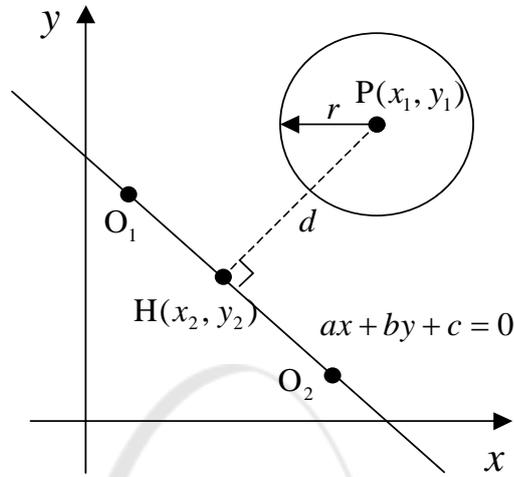


그림 3-10. 원의 중심과 직선 사이의 수직 거리.

좌표 O_1 과 O_2 를 지나는 직선과 원의 중심 좌표 P 를 지나는 직선이 수직으로 만날 때 \overline{HP} 의 길이 d 는 다음과 같이 된다.

$$d = \frac{|ax_1 + by_1 + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (3-2)$$

직선과 원의 위치관계 판별은 $d < r$, $d = r$ 및 $d > r$ 조건을 적용한다.

2. 한 점을 통과하는 직선과 원이 접하는 점

점 $P_1(x_1, y_1)$ 에서 원 $(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = r^2$ 에 그은 접선의 방정식으로 부터 접점 $P_2(x_2, y_2)$ 를 구하면 다음과 같이 된다.

$$x_2 = -\frac{y_1 - y_c}{x_1 - x_c} y_2 + \frac{(y_1 - y_c)y_c + r^2}{x_1 - x_c} + x_c \quad (3-3)$$

$$= A y_2 + B$$

$$(A^2 + 1)y_2^2 + 2(AB - Ax_c - y_c)y_2 + B^2 - 2Bx_c + x_c^2 + y_c^2 - r^2 = 0 \quad (3-4)$$

식 (3-4)에서 근 y_2 를 구하고, 이를 식 (3-3)에 대입하여 x_2 를 구한다. 이 때 근이 2개(P_2, P_2')이므로 풀리와 와이어의 구성에 따라 적합한 1개의 근을 선택한다.

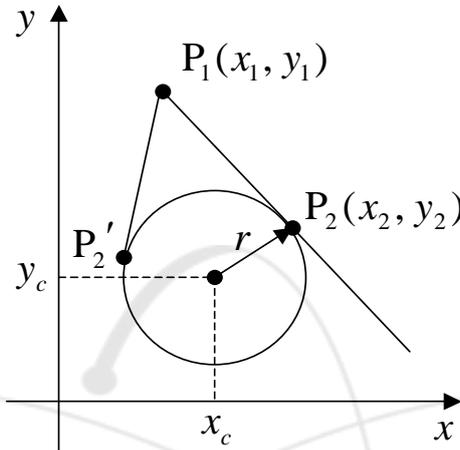
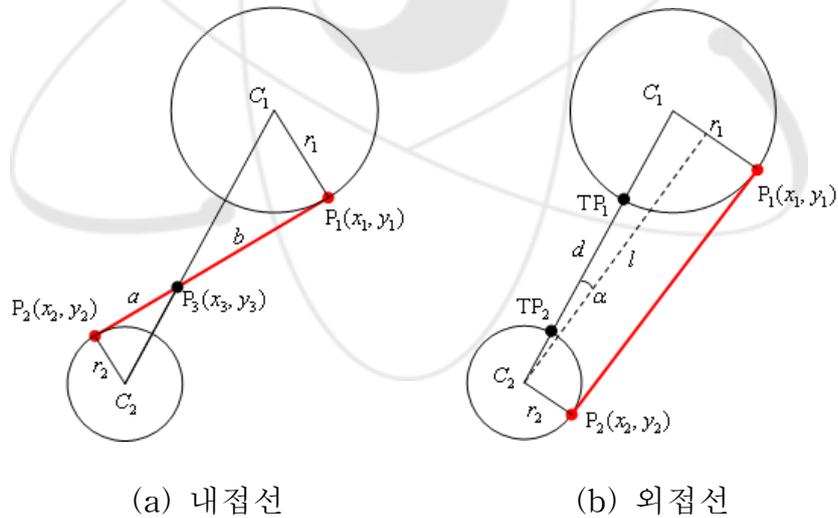


그림 3-11. 직선과 원이 접하는 두 점.

3. 두 원의 내접 및 외접



(a) 내접선

(b) 외접선

그림 3-12. 두 원 사이의 내접선 및 외접선.

가. 내접점

내접선($\overline{P_1P_2}$)과 두 원의 중심을 이은 직선($\overline{C_1C_2}$) 사이의 교점 $P_3(x_3, y_3)$ 를 구한다. 교점 P_3 에서 두 원에 각각 접선을 그어 식 (3-3)과 식 (3-4)를 적용하여 내접점 P_1, P_2 를 구한다.

$$P_3(x_3, y_3) = [kC_{x1} + (1-k)C_{x2}, kC_{y1} + (1-k)C_{y2}] \quad (3-5)$$

여기서, $k = \frac{a}{a+b} = \frac{r_2}{r_1+r_2}$ 이다.

나. 외접점

원의 중심을 잇는 선분을 $d-r_1:r_1$ 로 내분하는 점 TP_1 과 $r_2:d-r_2$ 로 내분하는 점 TP_2 를 구한다. 점 $P_1(x_1, y_1)$ 은 외접점 TP_1 을 C_1 을 중심으로 $\pi/2-\alpha$ 만큼 회전시킨 점이며, 점 $P_2(x_2, y_2)$ 는 외접점 TP_2 를 C_2 를 중심으로 $\pi/2+\alpha$ 만큼 회전시킨 점이다. 여기서, $\alpha = \cos^{-1}(l/d)$, 공통 외접선 길이 $l = \sqrt{d^2 - (r_1 - r_2)^2}$ 이다. 따라서 외접점 P_1, P_2 는 다음 식과 같이 계산된다.

$$P_1 = \begin{bmatrix} \cos(\frac{\pi}{2}-\alpha) & -\sin(\frac{\pi}{2}-\alpha) \\ \sin(\frac{\pi}{2}-\alpha) & \cos(\frac{\pi}{2}-\alpha) \end{bmatrix} TP_1 = \begin{bmatrix} \sin\alpha & -\cos\alpha \\ \cos\alpha & \sin\alpha \end{bmatrix} TP_1 \quad (3-6)$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} \cos[-(\frac{\pi}{2}+\alpha)] & -\sin[-(\frac{\pi}{2}+\alpha)] \\ \sin[-(\frac{\pi}{2}+\alpha)] & \cos[-(\frac{\pi}{2}+\alpha)] \end{bmatrix} TP_2 = \begin{bmatrix} -\sin\alpha & \cos\alpha \\ -\cos\alpha & -\sin\alpha \end{bmatrix} TP_2 \quad (3-7)$$

4. 원주 상의 두 점 사이의 호의 길이

원주 상에 두 점, P_2, P_3 사이의 호의 길이는 다음과 같다.

$$s = r\theta = r \cos^{-1} \frac{2r^2 - l^2}{2r^2} \quad (3-8)$$

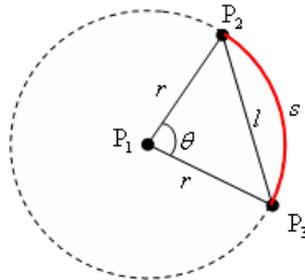


그림 3-13. 두 좌표 사이의 호의 길이.

5. 분석 프로그램 작성

그림 3-14는 기하학적 텐던-풀리부 분석을 위해 이전 절들에서 설명한 기하학적 분석식들을 코드화한 프로그램의 실행 화면으로, GUI 구성 및 인터페이스 화면을 보여준다. 개발된 프로그램은 다음의 기능들이 포함되어 있다.

- 풀리와 와이어 사이의 기하학적 관계를 계산하는 모듈 제공
- 링크 회전에 따른 풀리부의 이동 또는 회전 위치를 계산
- 풀리부 기하학적 특성값 (풀리들의 공간배치, 풀리 직경, 회전중심 위치 등)을 입력할 수 있는 인터페이스 제공
- 링크 회전에 따른 전체 와이어 길이 변화량을 계산하여 그래프로 표시하고, 이를 파일로 저장함.

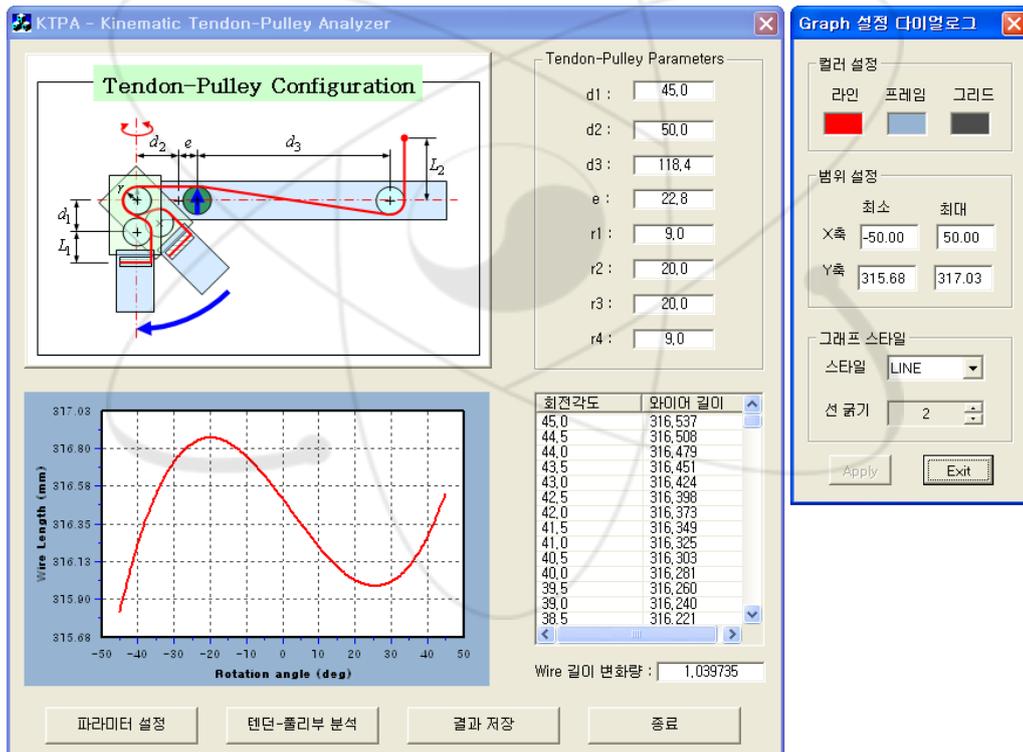


그림 3-14. 기하학적 텐던-풀리부 분석 프로그램 실행 화면.

제 4 장 모션 비간섭 조인트 설계 및 최적화

제 1 절 모션 비간섭 조인트 설계

1. 쇼울더 조인트 설계

그림 4-1은 MIT에서 개발된 WAM(Whole Arm Manipulator)의 외형 및 케이 블-폴리 배치를 보여준다[18].

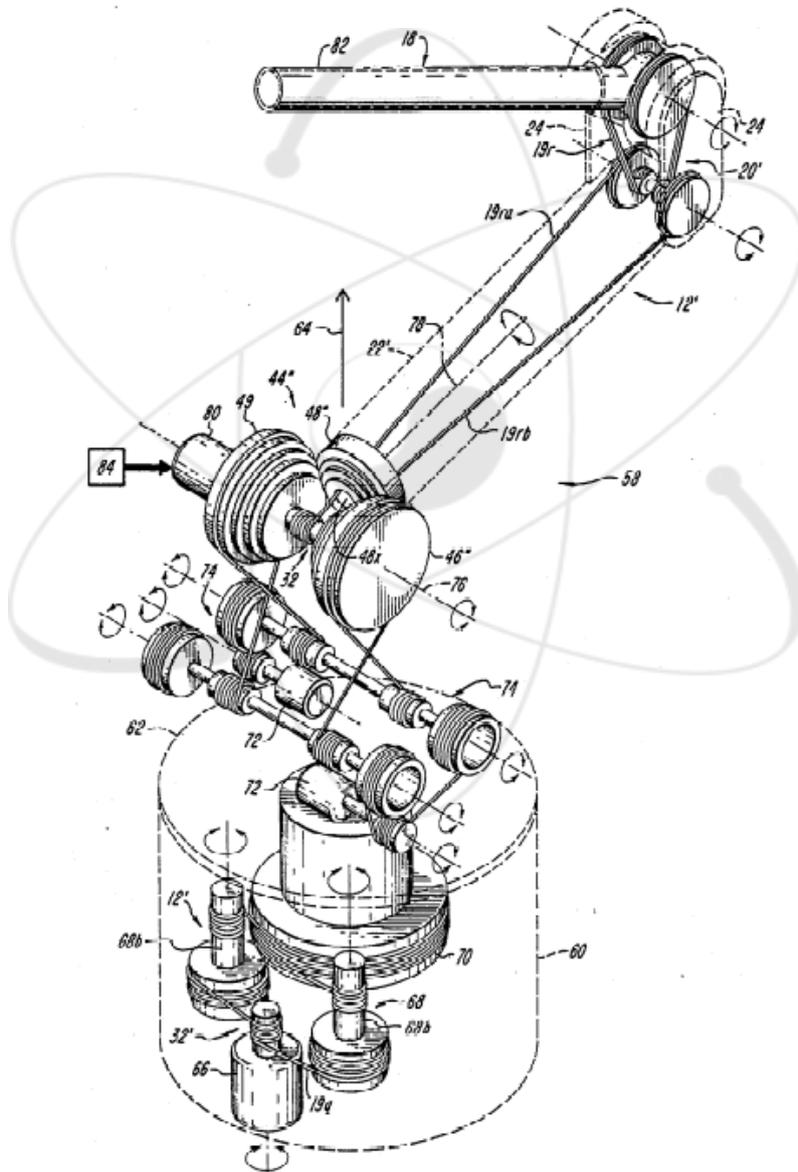


그림 4-1. WAM(Whole Arm Manipulator) 개념도[18].

WAM의 쇼울더 조인트에는 그림 4-2와 같은 케이블 차동구조(cable differential)가 최초로 적용되었는데, 이는 4단으로 구성된 3개 풀리를 마주보게 배치하여 약 340도의 회전범위 내에서의 차동 구동이 가능하다[13, 18]. 이 발명품의 가장 큰 장점은 기존의 차동 베벨기어 구동방식의 단점인 마찰과 백래쉬의 영향을 받지 않는다는 것이다. 반면에 이 방식은 케이블 감속비가 4단 풀리 중 가장 직경이 작은 풀리를 기준으로 결정되므로, 케이블 감속비를 키우려면 4단 전체의 크기를 키워야 하므로 쇼울더가 커지는 단점이 있다. 만약 통상적인 원격 조작기의 쇼울더 조인트 설계 조건과 같이 90도 범위의 동작만 필요한 경우, 세쌍의 2단 풀리로 케이블 차동 구조를 단순화 할 수 있다. 2단 풀리를 적용한 설계가 그림 4-3에 제시되었으며, 이러한 설계 개선을 통해 동일 공간 대비 감속비를 약 34% 높일 수 있었다.

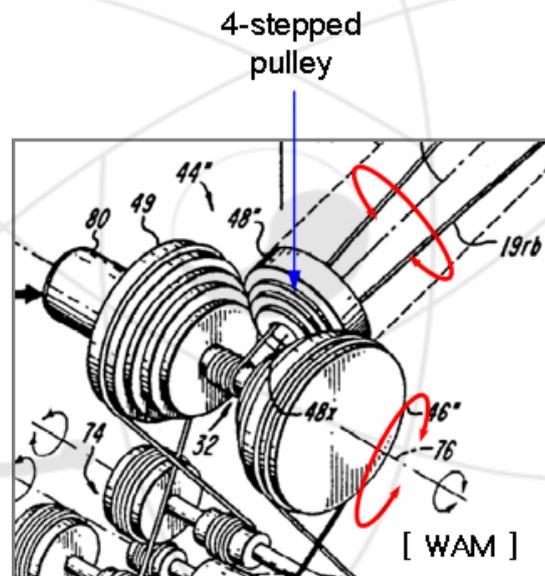


그림 4-2. WAM(Whole Arm Manipulator) 케이블 차동 구조도.

그림 4-2와 4-3은 케이블 차동구조를 사용하였다는 측면에서는 동일하지만 쇼울더 조인트의 동작이 서로 다르다. WAM의 경우 상부팔의 롤(roll) 및 피치(pitch) 방향 모션을 가능하도록 한다. 반면에 그림 4-3의 차동 구조에서는 상부팔의 롤과 하부팔의 피치 방향 모션이 가능하다. 구동기의 선정 측면에서 그림 4-3과 같은 구조가 유리하다. 상부팔을 피치 방향으로 운동시키기 위해 필요한 토크는 하부팔의 피치 운동에 따른 reach만큼 더 커지게 되므로, 상부팔의 롤 운동을 위해 필요한 토크보다 훨씬 더 커지게 된다. 이러한 두 축의 구동력의 차이

때문에 구동기의 용량을 크게 선정해야 하는 결과를 갖는다. 반면에 그림 4-3과 같은 구조에서 하부팔 피치와 상부팔 롤 운동은 비슷한 최대 reach를 갖게 되므로 필요 토크를 최소화하여 구동기를 선정할 수 있다.

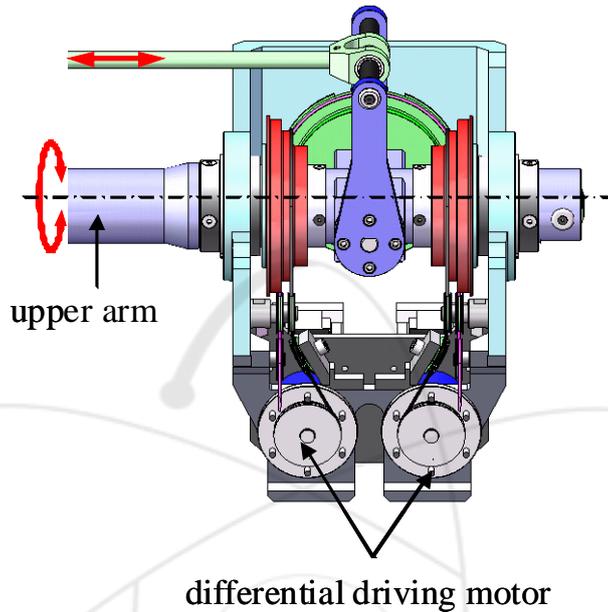


그림 4-3. 케이블 구동 쇼울더 조인트 메커니즘.

2. 엘보우 조인트 설계

이전 장에서 살펴본 모션 간섭 문제를 완전히 해결하기 위해 그림 4-4와 같은 새로운 구조를 적용하였다. 세 풀리(P1, P2, P4)는 팔에 고정되며, P3 풀리는 하부팔의 회전에 비례하여 수평으로 이동하는 풀리이다. 하부팔이 시계방향으로 θ 만큼 회전할 때, 만약 풀리 P3가 좌측으로 $r\theta/2$ 만큼 수평 이동한다면, 하부팔의 회전에 따라 감소하는 케이블 길이를 이동 풀리의 운동으로 완벽히 보상할 수 있다. 반면에 하부팔이 반시계방향으로 회전하는 경우에는 이동풀리를 오른쪽으로 이동시킴으로써 전체 케이블의 길이변화를 보상할 수 있다. 이러한 보상은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Delta L = \Delta L_2 - \Delta L_1 = 2 \times \frac{r\theta}{2} - r\theta = 0. \quad (4-1)$$

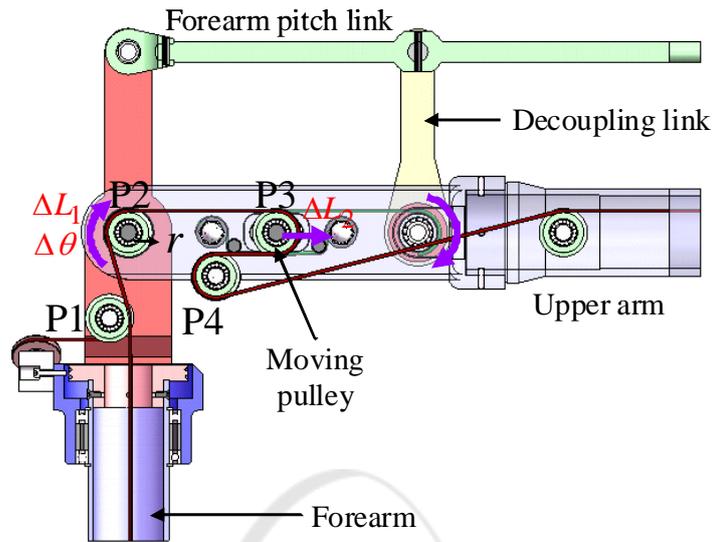


그림 4-4. 엘보우 조인트에서의 케이블 배치.

그림 4-5는 하부팔의 피치 운동에 동기하여 풀리가 좌우 직선운동을 갖도록 이 동시키는 기구 개념도를 나타낸다. 비간섭 링크(decoupling link)가 하부팔 피치 링크와 연결되어 있으며, 두 케이블이 비간섭 링크에 고정된 두 풀리에 서로 반 대방향으로 감겨져 있다. 하부팔이 시계방향으로 회전하는 경우, 풀리 P5에 케이 블이 감기고 동시에 풀리 P6에는 케이블이 풀리게 된다. 이러한 두 케이블의 동 작이 풀리 P7을 조인트 회전에 동기하여 선형 이동하도록 한다.

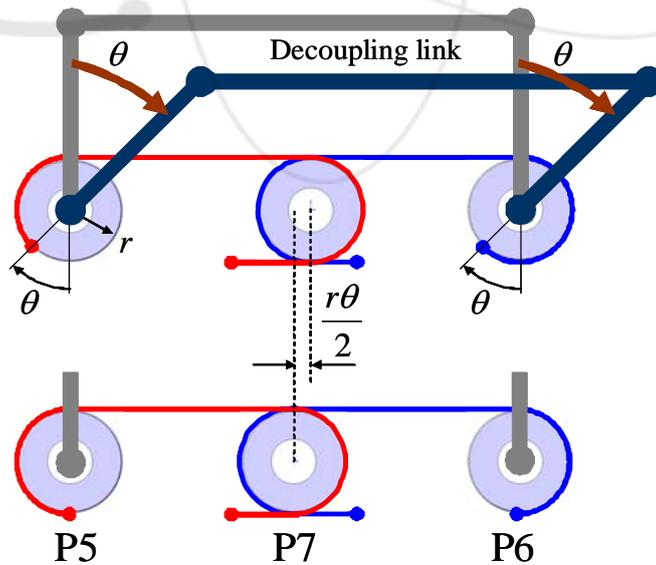


그림 4-5. 풀리 선형이동 개념도.

그림 4-6에는 엘보우 조인트 피치 운동에 대해 완전한 모션 디커플링 효과를 얻을 수 있는 다양한 케이블-풀리 배치 예를 보여준다. 그림에서 (a)와 (b)는 아이들 풀리가 하나인 경우이고, (c)와 (d)는 아이들 풀리가 두 개인 경우이다.

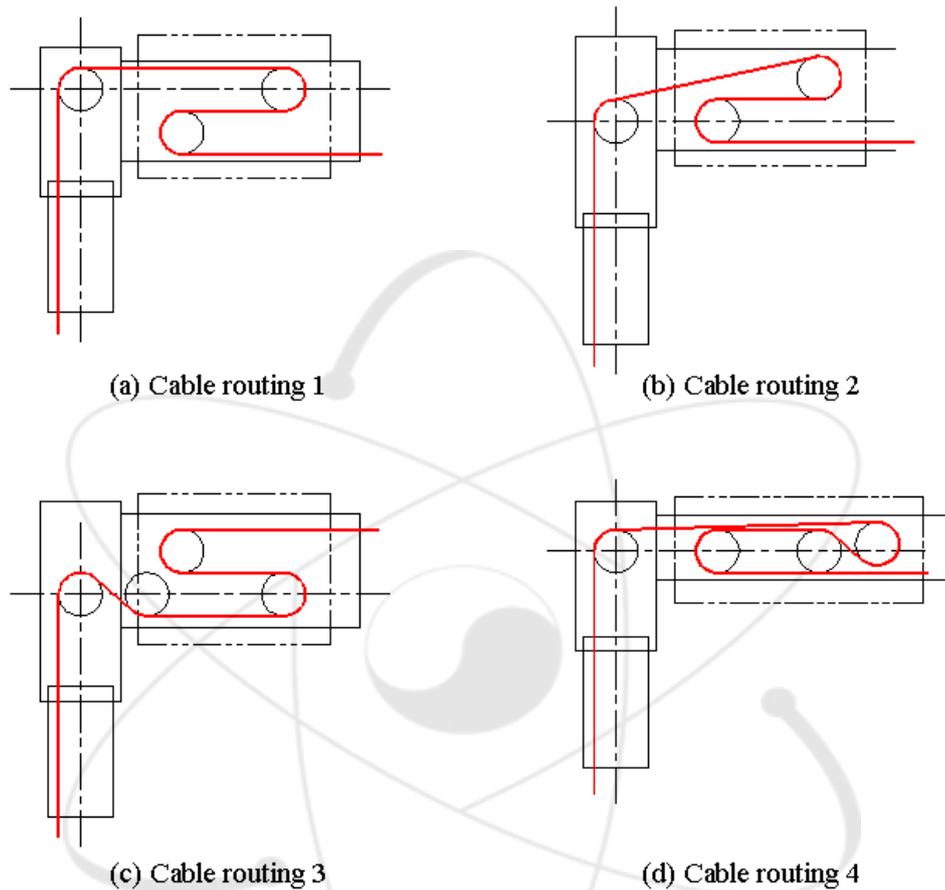


그림 4-6. 모션 비간섭 구조의 풀리-케이블 배치안.

이러한 배치들 외에도 다음 두 가지 조건을 만족하도록 케이블-풀리가 배치된다면, 아이들 풀리의 수나 위치, 그리고 케이블의 경로에 상관없이 엘보우 조인트의 피치 방향 회전에 대한 동일한 모션 비간섭 효과를 얻을 수 있다.

[조건 1] 디커플 링크에 결합된 두 풀리(P5, P6)의 회전중심을 지나는 가상선상에 풀리(P7)가 이동한다. (그림 4-5 참조)

[조건 2] 이동 풀리에 감기는 케이블 양단이 두 풀리(P5, P6)의 회전중심을 연결

한 가상선과 평행하다. 이때 케이블은 이동폴리(P7)에 $n\pm 1/2$ 회전(여기서, n 은 자연수)만큼 감긴다. 즉 케이블은 이동 폴리에 감긴 후 그 운동 방향이 180° 바뀌어야 한다.

제 2 절 모션 비간섭화 최적 설계

1. Wrist 조인트 설계

그림 4-7은 그리퍼와 하부팔과 연결하는 손목(wrist) 조인트의 구성을 보여준다. 세 개의 폴리가 그리퍼 죠(jaw)를 동작시키기 위한 동력을 전달하는 케이블을 지지한다. 폴리 P3는 손목 조인트에 고정되어 있으며, 폴리 P1과 P2는 손목이 회전함에 따라 같이 회전하게 된다. 그림 4-8을 참조하면, 이러한 구조에서도 엘보우 조인트에서 논의된 것과 같이 손목 조인트의 회전량에 비례하여 케이블이 폴리에 접촉하는 각도가 달라져 전체 케이블의 길이가 변화하게 된다.

만약 그림 4-9 (a)와 같이 케이블이 폴리에 지지됨이 없이 손목 조인트 축상에서 꺾일 수 있다면 케이블 길이변화는 발생되지 않는다. 하지만 이러한 방식은 동력전달 요소들의 마찰이 커져 쉽게 손상되는 결과를 초래한다. 따라서 그림 4-9 (b)와 같이 케이블이 아이들 폴리에 지지되어 회전하도록 설계하는 것이 일반적이다.

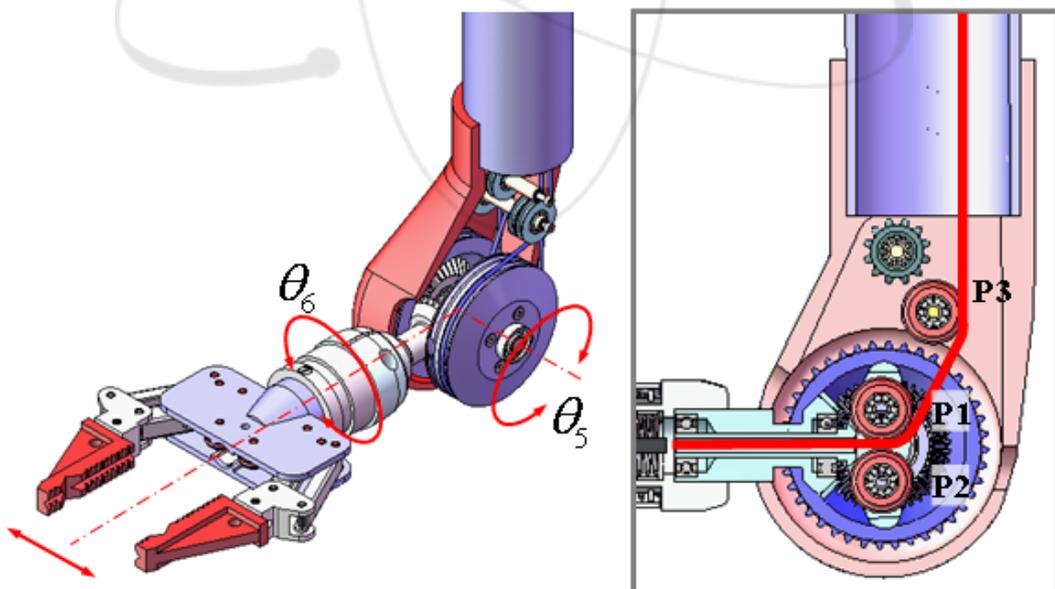


그림 4-7. 그리퍼 동력전달용 폴리-케이블 배치.

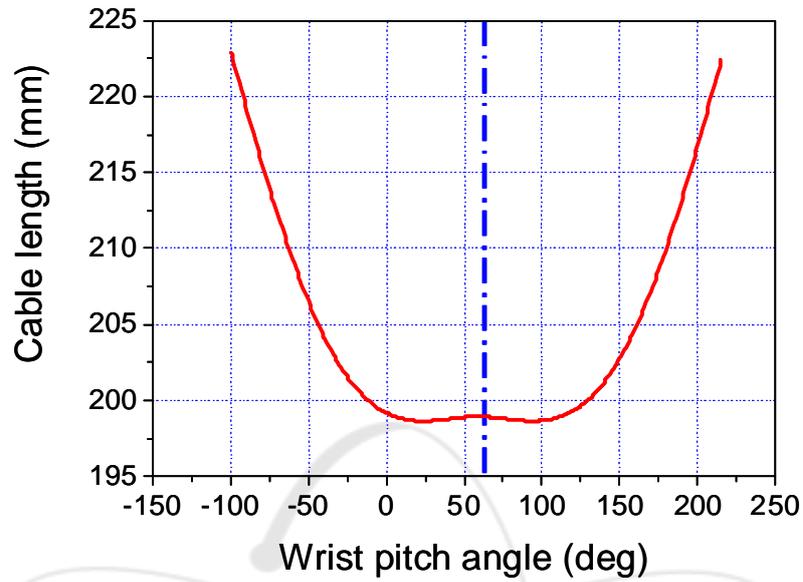


그림 4-8. 손목 조인트 운동에 따른 케이블 길이 변화.

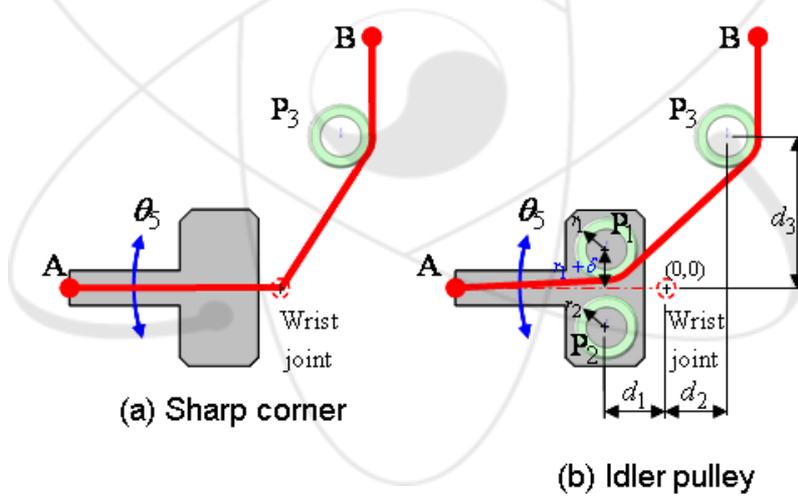


그림 4-9. 손목 조인트 내부의 풀리-케이블 배치.

비록 엘보우 조인트에 적용된 비간섭 메커니즘을 손목 조인트의 피치 운동에 따른 케이블 변화를 보상하는데 적용할 수 있지만, 이 경우 손목의 크기가 커지므로 바람직하지 않은 설계 방향이다. 이러한 이유로 손목 조인트에 설치된 풀리의 반경과 설치 위치 등의 기하학적 파라미터들을 최적화하여 케이블 간섭을 최소화하였다. 최적화 알고리즘의 구성 및 적용에 대해서는 다음 절에서 다룬다.

2. 최적화 알고리즘

그림 4-10은 그리퍼로의 동력전달을 위한 케이블을 지지하기 위한 손목 조인트 내부의 케이블-풀리 배치 모델을 보여준다. 케이블 길이 변화에 영향을 미치는 파라미터들로 세 풀리들의 반경과 위치를 선정하였다: $r_1, r_2, r_3, d_1, d_2, d_3$. 최적화된 파라미터들은 손목 조인트의 회전에 대한 케이블 길이 변화량이 최소가 되도록 선정될 수 있으므로, 이는 최소화 문제이다. 최적의 파라미터를 찾기 위해 Particle Swarm Optimization(PSO) 기법을 적용하였다[19].

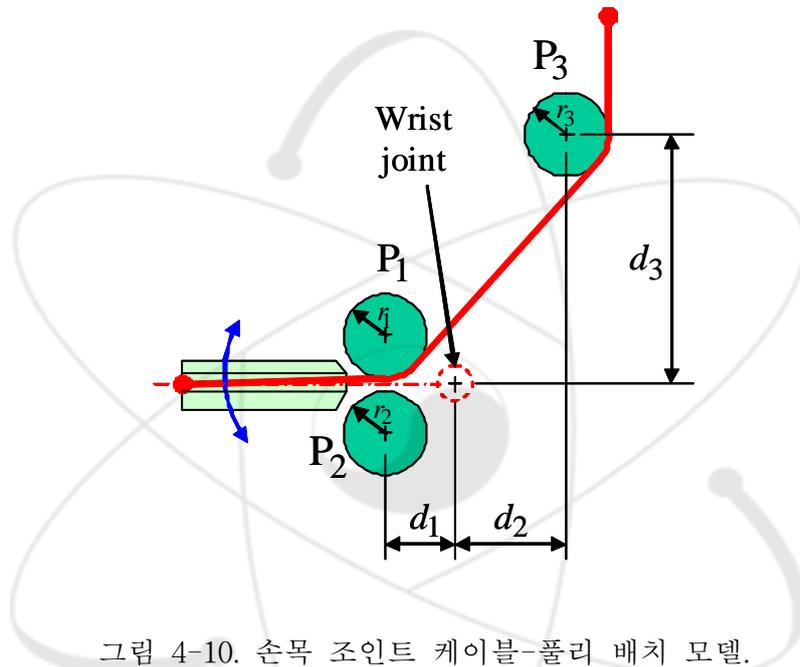


그림 4-10. 손목 조인트 케이블-풀리 배치 모델.

PSO는 경험적 탐색 방법 중의 하나로써 조류나 어류 등의 생물 무리가 각각의 개체가 가지고 있는 정보를 공유해가며 먹이를 찾아가는 과정을 모사한 것이다. 이 알고리즘에서 새나 물고기는 particle이라 표현되며, 최상의 지역을 탐색하는데 있어 무리의 지능을 사용한다. PSO에서 particle의 위치는 현재의 해를 나타낸다. 탐색하는 동안 모든 particle들은 각자가 현재까지 찾은 최상의 위치와, 집단에서 현재까지 찾은 최상의 위치를 향해 이동한다. 이는 각 particle의 새로운 속도 (v_i^{t+1})를 다음의 세 가지 관찰의 결과들을 이용하여 계산함으로써 달성된다: (1) 각 particle의 현재의 속도(v_i^t) (2) 각 particle의 현재의 위치(q_i^t)와 과거의 최상의 위치(p_i^t) 사이의 거리 (3) 각 particle의 현재 위치와 집단에서 찾은 최상의 위치

(p_i^g) 사이의 거리.

$$v_i^{t+1} = \omega v_i^t + c_1 r_1 (p_i^t - q_i^t) + c_2 r_2 (p_g^t - q_i^t) \quad (4-2)$$

여기서 i 는 particle의 인덱스를 나타내며, ω 는 관성질량(inertia weight), c_1 과 c_2 는 각 particle들을 과거 자신이 찾은 최상의 위치와 집단에서 찾은 최상의 위치로 끌어당기는 가중 요소(weighting factor), r_1 과 r_2 는 각각 [0,1]에서 랜덤하게 선택되는 균일분포 난수이다.

관성질량은 전역탐색과 국부탐색 간에 균형을 잡아주는 중요한 역할을 하는데, 큰 관성질량은 전역 탐색을 촉진하며, 작은 관성질량은 국부 탐색을 촉진한다. 관성질량은 탐색이 진행되는 동안 다음과 같이 선형적으로 감소하는 형태가 선호된다.

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{T} t \quad (4-3)$$

여기서, ω_{\max} 는 초기 가중치, ω_{\min} 은 최종적인 가중치, T 는 최대 탐색수(iteration number), t 는 현재의 탐색수를 나타낸다.

(23)을 통해 각 particle의 새로운 속도가 계산되면, particle들은 다음 식을 사용해 새로운 위치(q_i^{t+1})로 이동한다.

$$q_i^{t+1} = q_i^t + v_i^{t+1} \quad (4-4)$$

이러한 탐색 과정을 반복하면서 PSO 알고리즘은 주어진 문제의 전역해로 수렴하게 된다. 탐색은 적합도 값이 미리 설정된 값에 도달하거나 최대 탐색수에 도달할 때까지 지속된다.

Step 1: Particle들이 랜덤한 위치와 속도로 초기화된다.

Step 2: 각 particle의 현재 위치에서 목적함수를 평가한다.

Step 3: 각 particle이 찾은 최상의 위치와 집단에서 찾은 최상의 위치를 계산하고 저장한다.

Step 4: 각 particle의 속도와 위치를 (4-2)와 (4-4)를 사용해 수정한다.

Step 5: 종료조건이 만족될 때까지 Step 2에서 Step 4를 반복한다.

초기값으로 사용되는 후보해(initial candidate solution)들은 특정한 범위 내에서 랜덤하게 선택된다. 초기값의 선택 범위를 조정하기 위해 다음과 같이 제어 파라미터 s 를 사용하였다.

$$q_i = q_{i0} \times [1 + (\text{rand}() - 0.5) \times s] \quad (4-4)$$

여기서 $\text{rand}()$ 는 $[0,1]$ 범위에서 균일분포 난수를 발생시키는 함수이며, q_{i0} 는 손목 조인트의 크기를 고려하여 결정되는 i 번째 공칭 파라미터를 나타낸다.

PSO를 구성하는 particle의 수를 50, 최대 관성질량 0.9, 최소 관성질량 0.4, 최대 속도 0.1, 그리고 최대 탐색수를 1000으로 설정하였다. 스케일 상수 s 는 0.5로 선정되었는데, 이는 초기 후보해가 공칭 파라미터의 $\pm 50\%$ 범위 내에서 선정됨을 의미한다.

그림 4-11은 파라미터 최적화 결과를 보여준다. 그래프에서 가는 선은 초기 후보해들로부터의 케이블 길이 변화량을 나타내며, 굵은 선은 최적화가 완료된 상태에서의 케이블 길이 변화량을 나타낸다. 최적화가 진행되면서 최대 케이블 길이 변화량이 0.8 mm 이내로 감소함을 볼 수 있다.

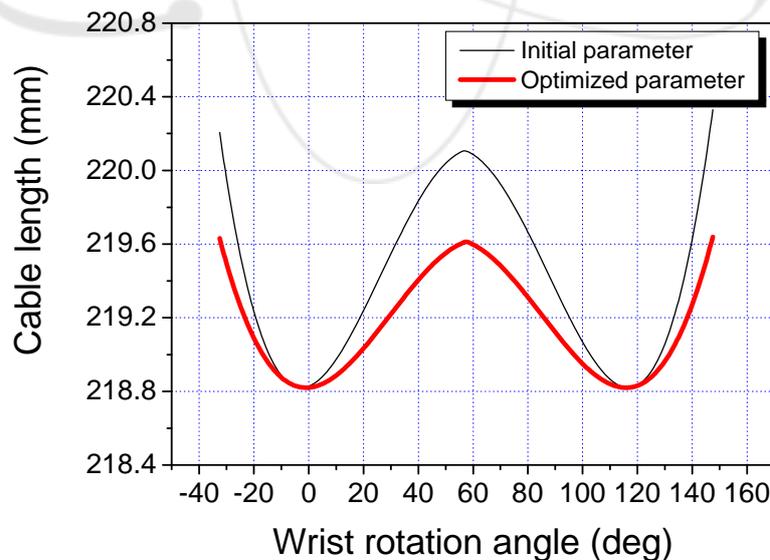


그림 4-11. 파라미터 최적화 결과.

그림 4-12는 기하학적 텐던-폴리부의 기하학적 파라미터들을 최적화하기 위해 이전 절들에서 설명한 최적화 알고리즘을 코드화한 프로그램의 실행 화면으로, GUI 구성 및 인터페이스 화면을 보여준다. 개발된 프로그램은 다음의 기능들이 포함되어 있다.

- o 풀리와 와이어의 기하학적 관계를 계산하는 모듈 제공
- o 최소화 문제(minimization problem)에 대한 최적의 해를 계산하는 인공지능 모듈 제공(particle swarm optimization 기법)
- o 텐던 폴리부의 기하학적 조건 및 최적화 알고리즘의 설정 파라미터를 사용자가 정의할 수 있는 인터페이스 제공
- o 링크 회전에 따른 전체 와이어 길이 변화량을 최소화시킬 수 있는 텐던-폴리부의 특성값 최적화

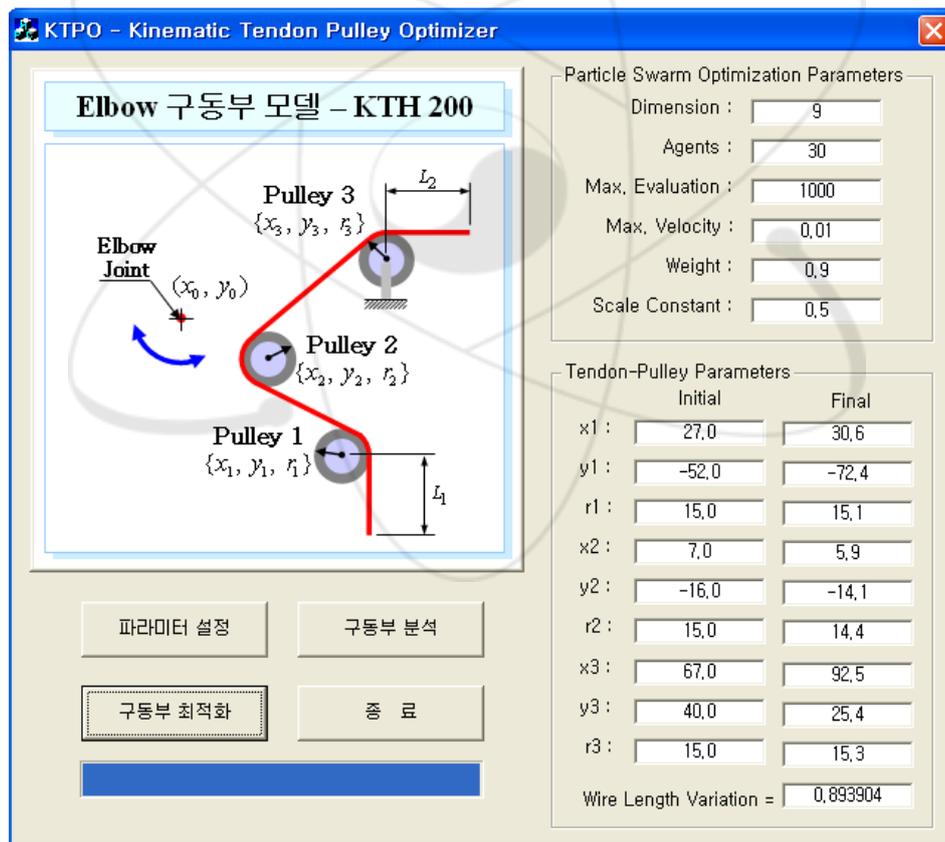


그림 4-12. 기하학적 텐던-폴리부 최적화 프로그램 실행 화면.

제 3 절 모션 간섭량 평가

1. 실험 장치

고안된 구조에 대한 평가를 위해 그림 4-13과 같은 장치를 제작하였다. 또한 각 조인트의 모션 간섭을 측정하기 위해 그림 4-14와 같은 고정도 측정 장치를 구성하였다. 측정기로 internal square wave interpolation 방식을 통해 36000 P/R의 분해능을 갖는 광학식 엔코더(Gurley Precision Instrument, model R137)를 사용하였다. 분해능을 더욱 높이기 위해 4채배(4X quadrature decode) 회로를 사용하였으며, 40:1의 감속기와 연결하였다. 최종적인 분해능은 5,760,000 P/R이며, 이는 한 펄스당 1.875 μm 의 길이변화로 환산될 수 있다. 노이즈 영향을 줄이기 위해 라인 드라이브 방식을 통해 인터페이스 하였다.

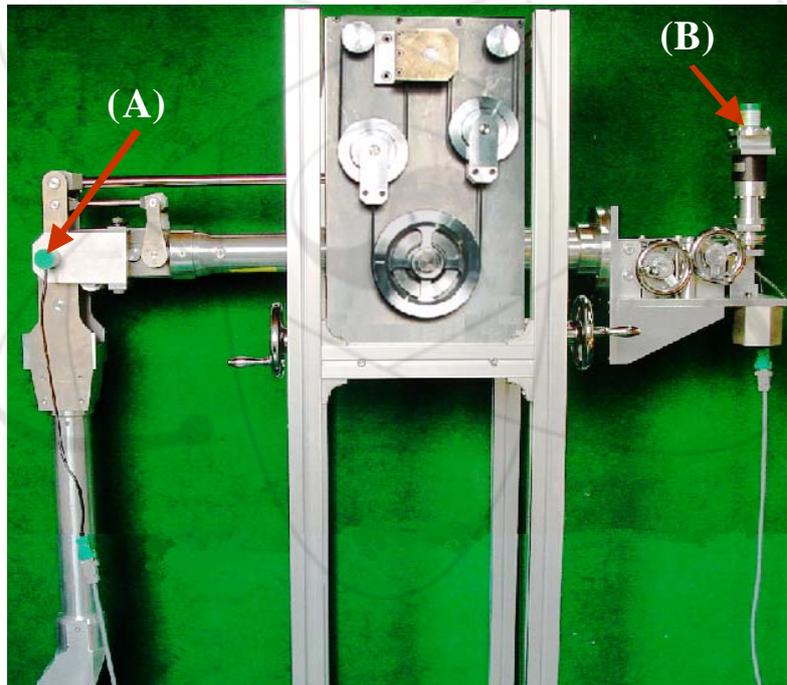


그림 4-13. 평가장치 및 측정부

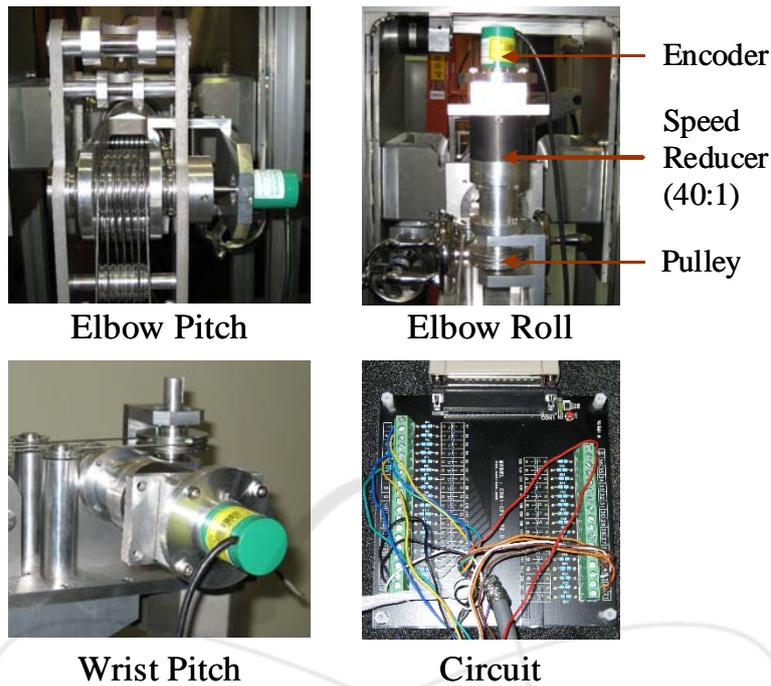


그림 4-14. 모션 간섭량 측정 시스템.

2. 평가 결과

제작된 장치를 사용하여 하부팔 피치 운동시 케이블 모션 간섭량을 평가하였다. 고안된 장치의 평가 결과가 와이어 안내 장치 및 기계식 원격조종기 KTH 200에서의 모션 간섭량과 같이 그림 4-15에 제시된다. 와이어 안내장치의 최대 케이블 길이 변화량은 6.75 mm이며, KTH 200의 경우 1.75 mm이다. 이에 비해 고안된 장치의 모션 간섭량은 0.01 mm 이하로 측정되었으며, 엘보우 조인트의 기구적 모션 간섭량은 무시 가능하다고 판단된다.

손목 조인트의 경우 KTH 200 원격조종기와 동일한 구조를 채택하고, 폴리의 반경과 설치 위치와 같은 기하학적 파라미터들을 최적화 하였다. 그림 4-16의 결과와 같이 KTH 200의 조인트 모션 간섭량이 1.07인 반면에, 최적화된 경우 0.01 mm 이하로 줄어들음을 확인하였다. 이는 기하학적 최적화를 통해 모션 간섭량을 크게 줄일 수 있으며, 이는 손목 조인트의 모션 비간섭을 보장할 수 있을 것이다.

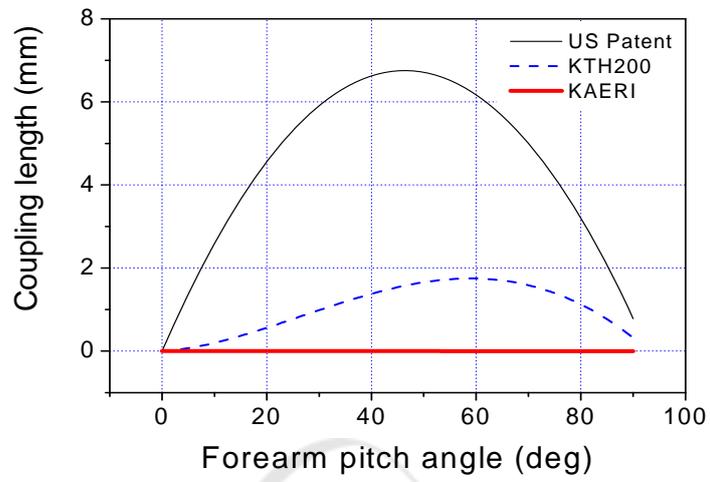


그림 4-15. 엘보우 조인트에서의 모션 간섭량 평가 결과.

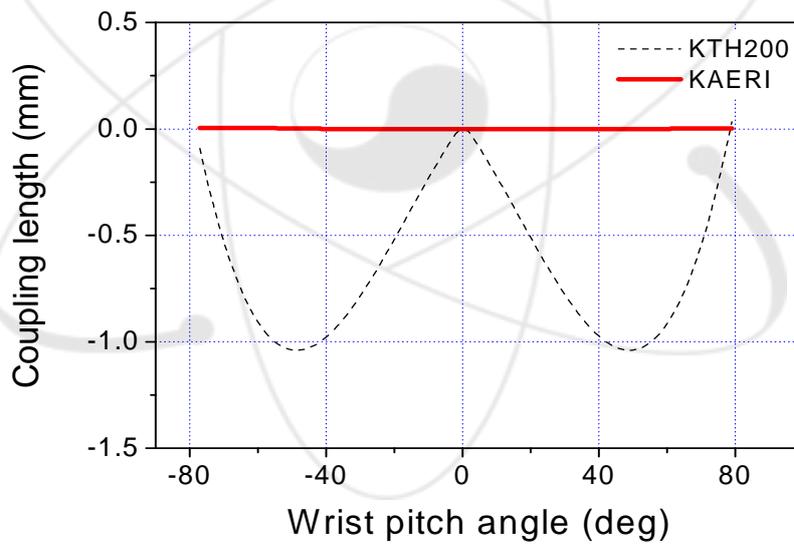


그림 4-16. 손목 조인트에서의 모션 간섭량 평가 결과.

제 5 장 결론

케이블 구동 매니퓰레이터에서 케이블-폴리의 기하학적 특성에 의해 한 축의 운동이 다른 축의 운동에 영향을 미치는 모션 간섭(motion coupling) 현상에 대해 살펴보았으며, 이를 보상하기 위한 종래의 기술들을 분석하였다. 분석 결과 기존의 구조들에서는 케이블-폴리 파라미터들이 최적화되더라도 케이블 길이변화를 완전히 제거하지 못하였다.

본 연구에서는 조작기 링크의 회전에 관계없이 케이블 길이를 일정하게 유지하기 위한 메커니즘을 고안하였으며 이를 실험을 통해 검증하였다. 엘보우 조인트의 경우 모션 간섭을 기구적으로 보상하기 위해 하부팔의 회전에 따른 케이블 길이변화를 하부팔의 회전에 동기하여 수평 이동하는 폴리를 추가함으로써 보상하는 새로운 메커니즘을 적용하였다. 손목 조인트의 경우 케이블-폴리 구조와 관련된 기하학적 파라미터들을 최적화함으로써 전체 케이블 길이 변화량을 최소화하도록 하였다. 쇼울더 조인트의 경우 모션 간섭이 발생되지 않는 구조를 채택하였다. 설계된 모션 비간섭 케이블 구동 서보조작기는 케이블 길이 변화에 따른 부정확한 운동을 방지할 수 있으며, 케이블 길이변화에 따른 과도한 장력의 변화를 줄임으로써 동력전달요소의 내구성을 높이고 조작기의 안전성 향상시킬 수 있으리라 판단된다.

참고문헌

1. P. Fischer, R. Daniel, K. V. Siva, "Specification and design of input devices for teleoperation," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 540-545, 1990.
2. J. Vertut and P. Coiffet, *Teleoperation and Robotics Evolution and Development*, Kogan Page, 1985.
3. S. Colombi, T. Raimondi, G. Costi, "Improvements of actuators in teleoperators," *Conf. on Telerobotics in Hostile Environment*, 1991.
4. R. L. Kress, J. F. Jansen, M. W. Noakes, and J. N. Herndon, "The evolution of teleoperated manipulators at ORNL," *Proc. of the 6th ANS Topical Meeting on Robotics and Remote Systems*, pp.623-631, 1997.
5. J. N. Herndon, H. L. Martin, P. E. Satterlee, "The state-of-the-art model M-2 maintenance system," *Proc. of the National Topical Meeting on Robotics and Remote Handling in Hostile Environments*, pp. 147-154, 1984.
6. D. P. Kuban, N. Busko, "A remote in-vessel & ex-vessel force-reflecting telerobotic system for the burning plasma experiment," *Proc. of 14thIEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering*, pp. 1099-1101, 1991.
7. M. J. Rennich, T. W. Burgess, "Remote handling in the spallation neutron source target facility," *Nuclear News*, 49(2), pp. 32-36, 2006.
8. http://www.americancrane.com/Telerob/force_reflecting_manipulators.htm.
9. J.-P. Brossard, "Ten years of life for the servo manipulator MA23M," *Proc. of 39th Conf. on Remote Systems Technology*, pp. 112-115, 1991.
10. L. Galbiati, T. Raimondi, P. Garetti, G. Costi, "Control and operational aspects of the MASCOT 4 force feedback servomanipulator of JET," *14th IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering*, pp. 563-566, 1991.
11. A. C. Rolfe, "Remote handling - JET experience," *Nuclear Energy*, 38, pp. 277-287, 1999.
12. P. Garrec, J. P. Friconneau, F. Louveau, "VIRTUOSE 6D: a new

- force-control master arm using innovative ball-screw actuators," *Proc. of Int. Symposium on Robotics*, 2004.
13. W. T. Townsend, J. A. Guertin, "Teleoperator slave-WAM design methodology," *Industrial Robot*, vol. 26, no. 3, pp. 167-177, 1999.
 14. J. K. Lee, H. J. Lee, K. H. Yoon, B. S. Park, J. S. Yoon, "A servo manipulator for remote handling of ACP equipment," *Int. Conf. on Advanced Robotics*, 2007.
 15. C. Glachet, J-P. Guilbaud, and J. Vertut, Remote manipulator, United State Patent 3,817,403, 1974.
 16. Y. Maeda, Wire guide apparatus for wire-driven mechanism, United State Patent 5,020,388, 1991.
 17. P. Garrec, G. Piolain, S. Lamy-Perbal, J.-P. Friconneau, "The telerobotics system MT200-TAO replaces mechanical telemanipulators in Cogema/ Areva-La Hague hot cells," *ENC*, 2005.
 18. J. Kenneth Salisbury, William T. Townsend, David M. DiPietro, Brian S. Eberman, Compact cable transmission with cable differential, United State Patent 4,903,536, 1990.
 19. Y. Shi, R. C. Eberhart, "Empirical study of particle swarm optimization," *IEEE Proc. on Evolutionary Computaton*, pp. 1942-1950, 1999.

서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드
KAERI/TR-3708/2008			
제목 / 부제	케이블 구동 서보조작기의 모션 비간섭 설계 및 최적화		
연구책임자 및 부서명 (AR,TR 등의 경우 주저자)	이종광 해주시시스템공학기술개발부		
연구자 및 부서명	윤광호, 김기호, 박병석 해주시시스템공학기술개발부		
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구원
발행년	2008. 12		
페이지	36 p.	도표	있음(o), 없음()
크기	A4		
참고사항			
공개여부	공개(o), 비공개()	보고서종류	기술보고서
비밀여부	대외비(), — 급비밀		
연구위탁기관		계약번호	
초록 (15-20줄내외)	<p>본 기술보고서에서는 케이블 구동 매니퓰레이터에서 케이블-폴리의 기하학적 특성에 의해 발생하는 모션 간섭(motion coupling) 현상을 기존의 사례와 함께 분석하였다. 또한 조작기 링크의 회전에 관계없이 케이블 길이를 일정하게 유지하기 위한 메커니즘을 고안하였으며 이를 실험을 통해 검증하였다. 엘보우 조인트의 경우 모션 간섭을 기구적으로 완전히 보상하기 위한 새로운 메커니즘을 적용하였다. 손목 조인트의 경우 케이블-폴리 구조의 기하학적 파라미터들을 최적화함으로써 모션 간섭량을 최소화하였다. 쇼울더 조인트의 경우 모션 간섭이 발생되지 않는 구조를 채택하였다. 설계된 모션 비간섭 케이블 구동 서보조작기는 케이블 길이 변화에 따른 부정확한 운동을 방지할 수 있으며, 케이블 길이변화에 따른 과도한 장력의 변화를 줄임으로써 동력전달요소의 내구성을 높이고 조작기의 안전성 향상시킬 수 있으리라 판단된다.</p>		
주제명키워드 (10단어내외)	서보조작기, 모션 비간섭, 최적화		

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET							
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.		INIS Subject Code	
KAERI/TR-3708/2008							
Title / Subtitle		Design and optimization of cable-driven servo-manipulator for motion decoupling					
Project Manager and Department (or Main Author)		J. K. Lee Fuel Cycle System Engineering Technology Development Division					
Researcher and Department		K. H. Yoon, K. H. Kim, B. S. Park Fuel Cycle System Engineering Technology Development Division					
Publication Place	Daejeon	Publisher	KAERI		Publication Date	12/2008	
Page	36 p.	Ill. & Tab.	Yes(o), No ()		Size	A4	
Note							
Open	Open(o), Closed()		Report Type		Technical Report		
Classified	Restricted(), ___Class Document						
Sponsoring Org.				Contract No.			
Abstract (15-20 Lines)		<p>In this report, we investigated kinematic motion coupling problems where the length or tension of a cable is changed due to another link's motions and we also analyzed the conventional joint decoupling configurations for cable-driven manipulators. To maintain the cable length constant regardless of the rotation of the arm, we present a structural decoupling mechanism for a cable-driven manipulator. In case of an elbow joint design, we used a novel joint decoupling mechanism where a moving pulley which actively compensates for a motion interference. For a wrist joint design, we optimized the geometrical parameters of the cable-pulley configurations. As for a shoulder joint, we adopted motion decoupled structures where an upper arm a roll and forearm pitch motion are performed in a differential driving manner. Designed motion decoupled cable driven mechanism prevents an unintended malfunction of the manipulator, and it also increases the durability of the power transmission elements of the manipulator.</p>					
Subject Keywords (About 10 words)		servo-manipulator, motion decoupling, optimization					