

Kinematics

Term project - Matlab Simscape Multibody

For Geared spherical wrist mechanism

Team 1

Leader : 진호경

Members : 김한나 , 박성환 , 박효빈

Kinematics

For Geared spherical wrist mechanism

Content

01 Mechanism 선정

선정 배경 및 간략 소개

02 Mechanism 기능 정의

Input → Output 기능 설명

03 Simscape Multibody 구현

부품 간 구속 설정 설명

04 Mechanism 분석

특징 및 설계 설명

05 결론

-

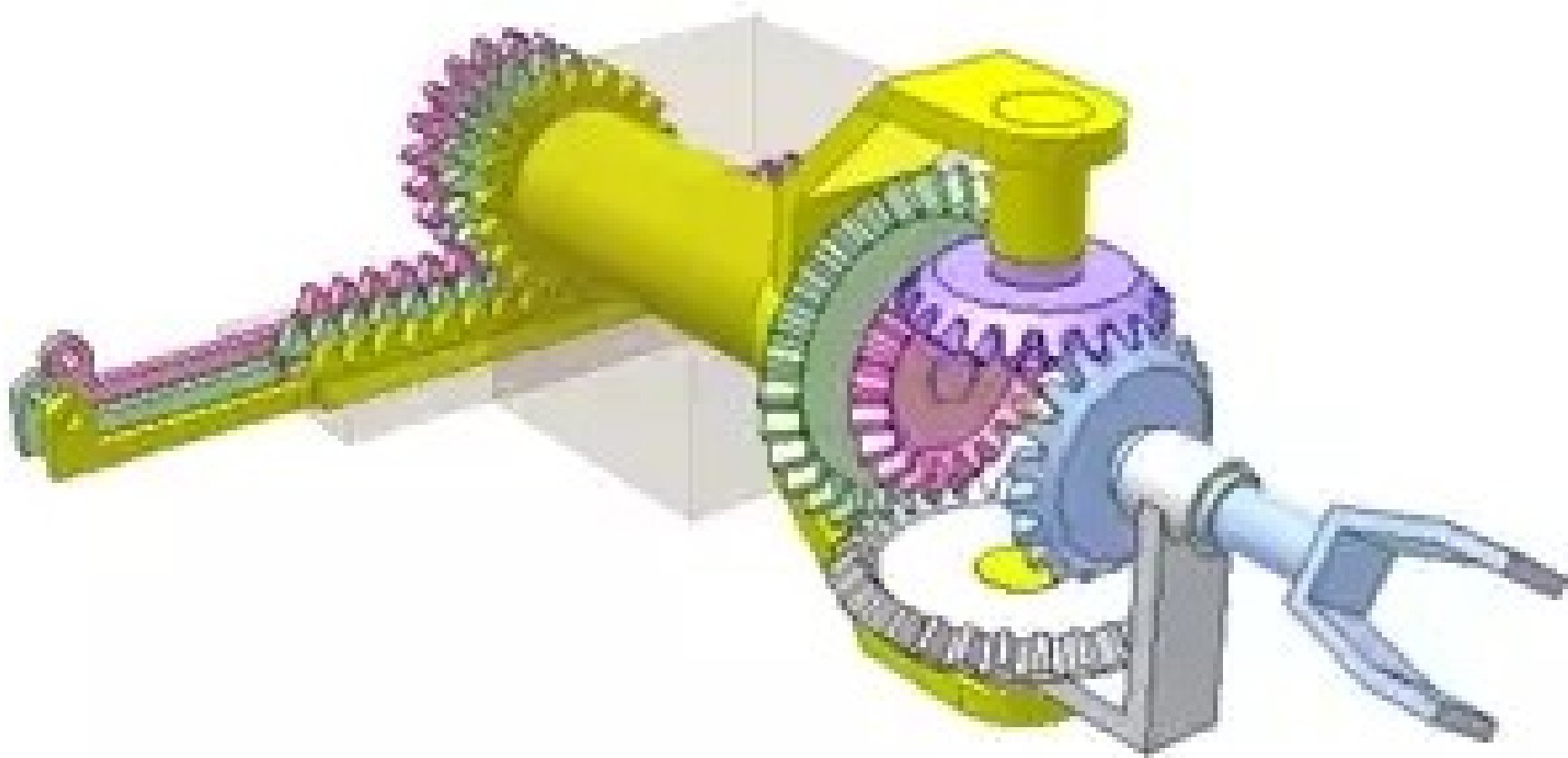
01 Mechanism 선정

기어 구동식 구형 손목 메커니즘

Geared spherical wrist mechanism

선정 배경

직선 운동의 다중 입력 값 복합적으로 작용하여
Robot 손목의 구면 운동 생성 과정을
Matlab Simscape Multibody 로 구현해보고자 함

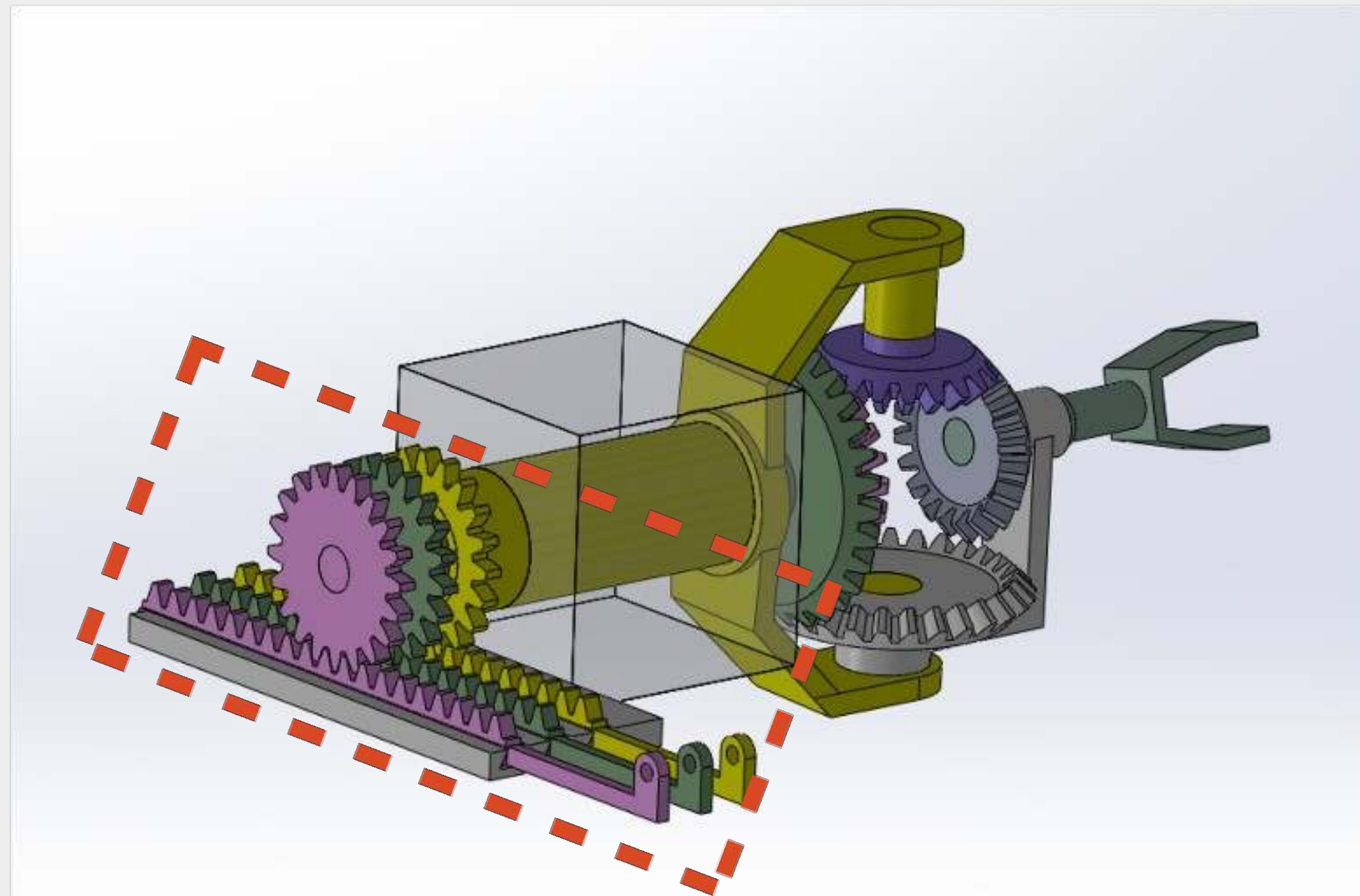


02 Mechanism 기능 정의

Mechanism 목표

3 개의 직선 운동 (랙) 을 통해 복합적으로 연결된 베벨기어부 이용
End Effector(손목) 의 3 차원 회전 운동 출력

Input 3 개의 독립적인 동력 전달



구동원

3 개의 독립된 직선 운동 (랙)

전달 방식

동축 샤프트 구조 및 중앙 베벨 기어부 이용 동력 방향 결정

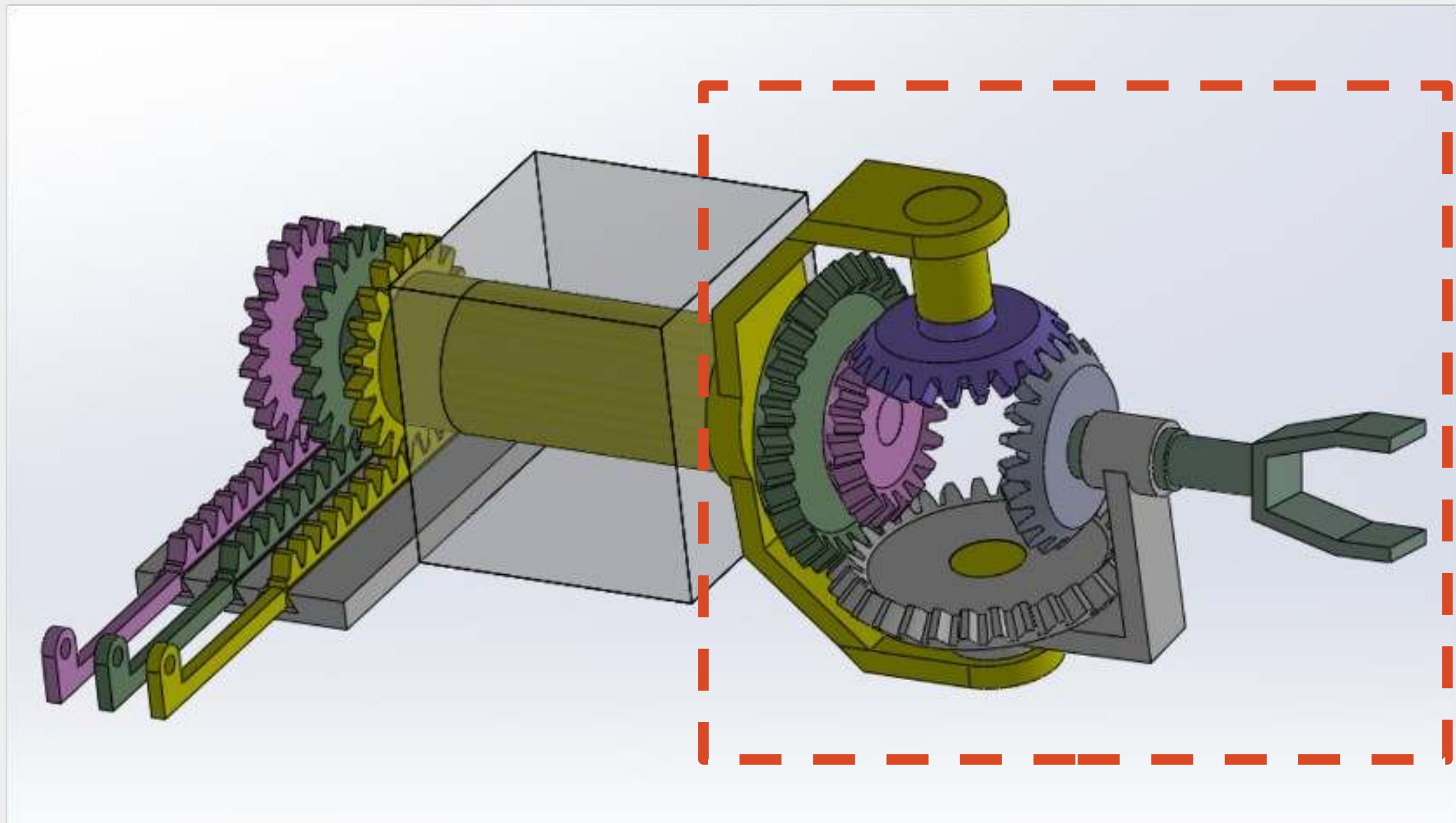
- 입력 특징

내측, 중간, 외측 3 개의 축 독립적 회전

→ 중앙 베벨 기어부 동력 전달

02 Mechanism 기능 정의

Output End Effector 3-DOF 공간 동작 출력



최종 형태

고정된 가상 중심점 기준 구면 운동

구현 방향

3 차원 공간에서의 Pitch, Yaw, Roll

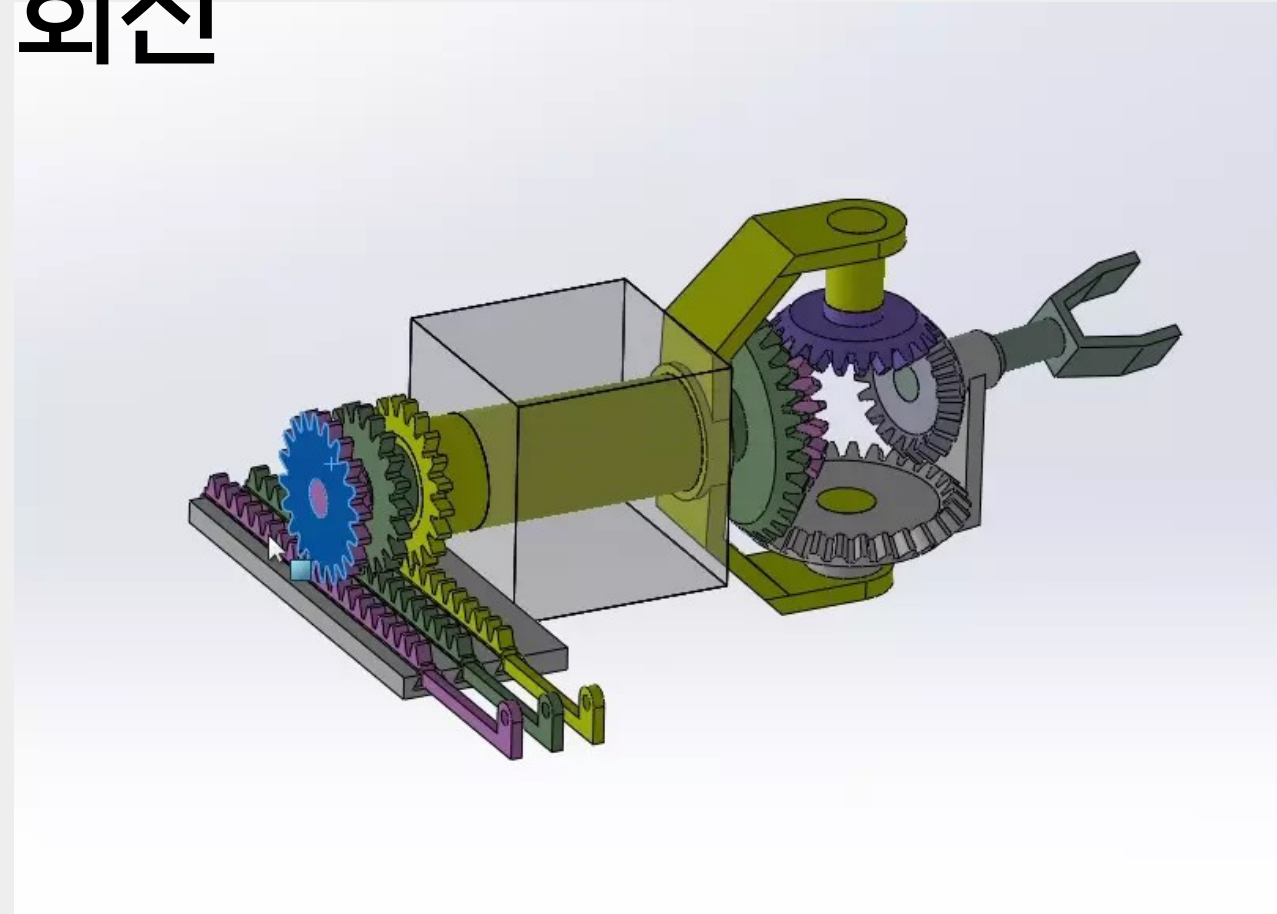
- 출력 목적

3 차원 공간에서 사용자가 원하는 방향으로 출력부
정렬

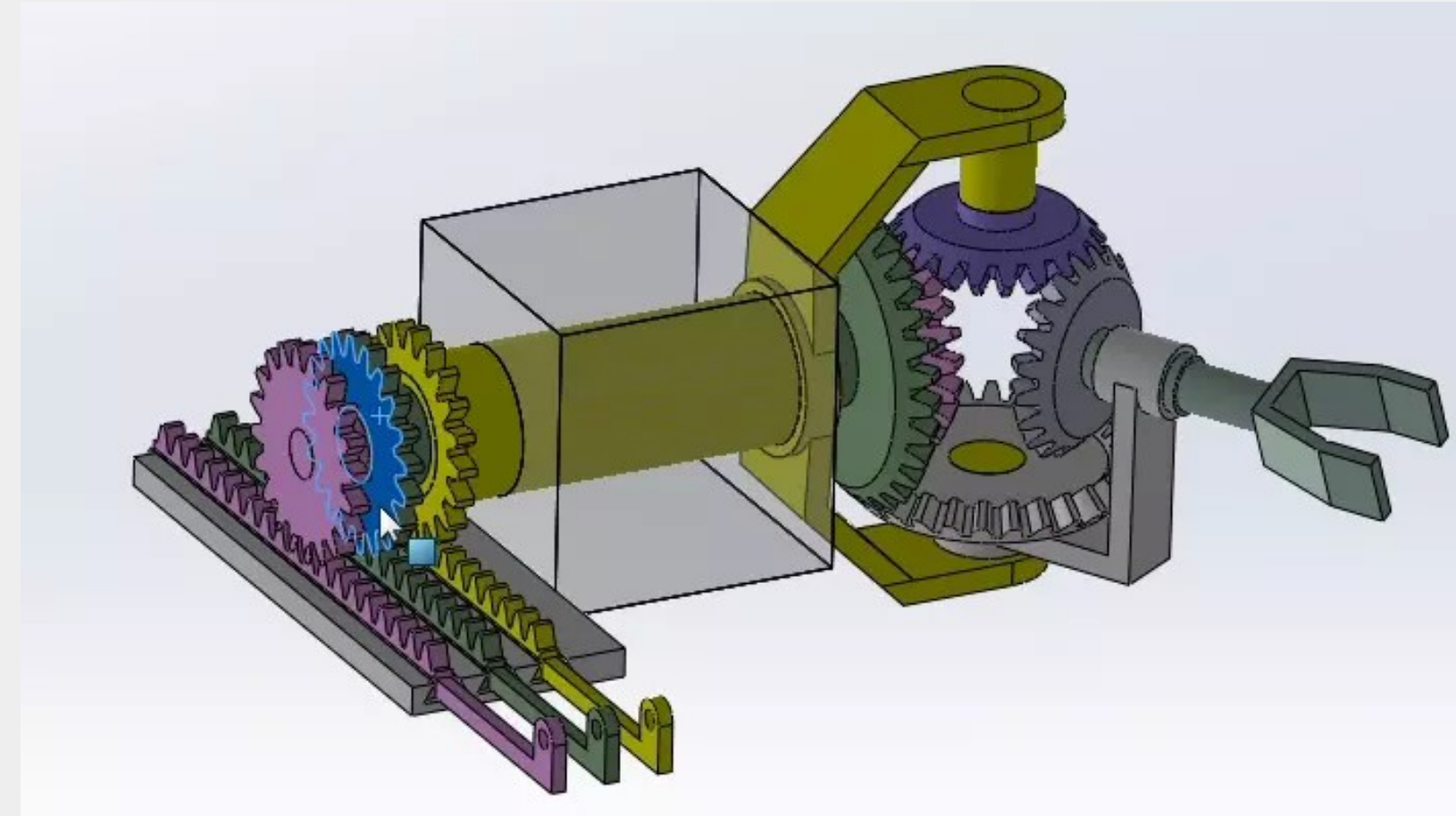
02 Mechanism 기능 정의

Roll, Pitch, Yaw 제어

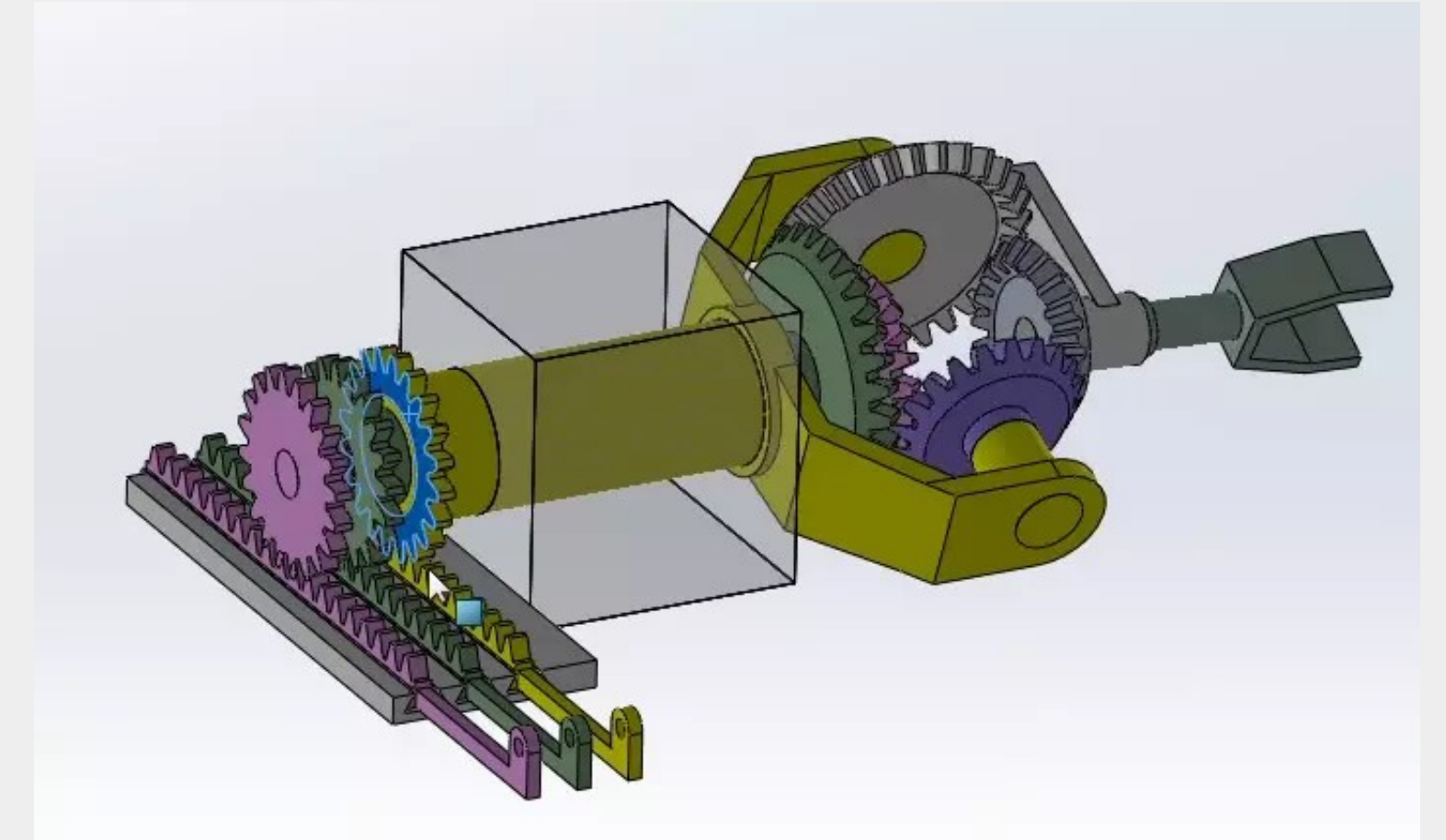
Roll 길이 방향 회전 / Pitch 폭 방향 회전 / Yaw 높이 방향 회전



End Effector 회전



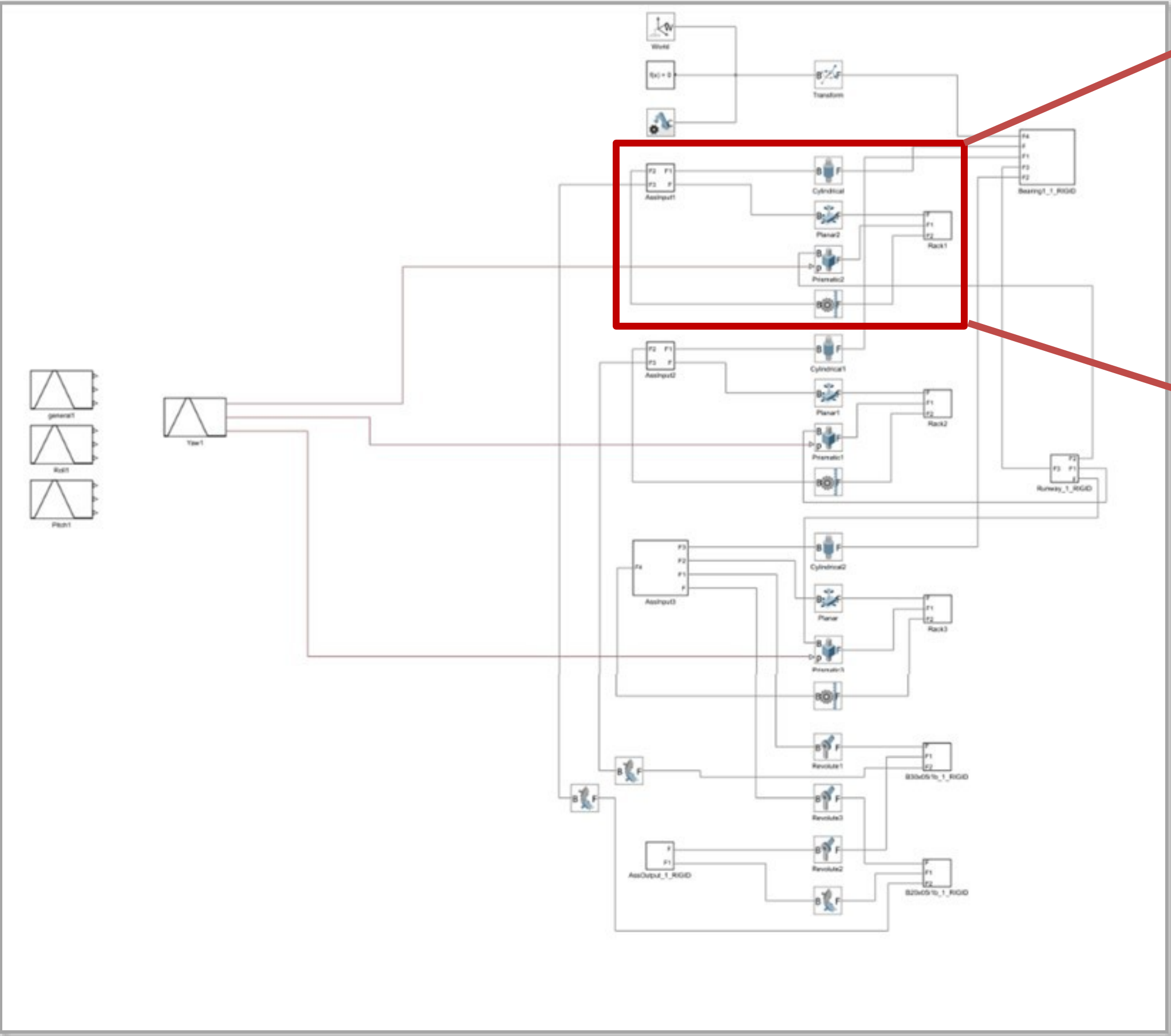
손목 좌우 회전



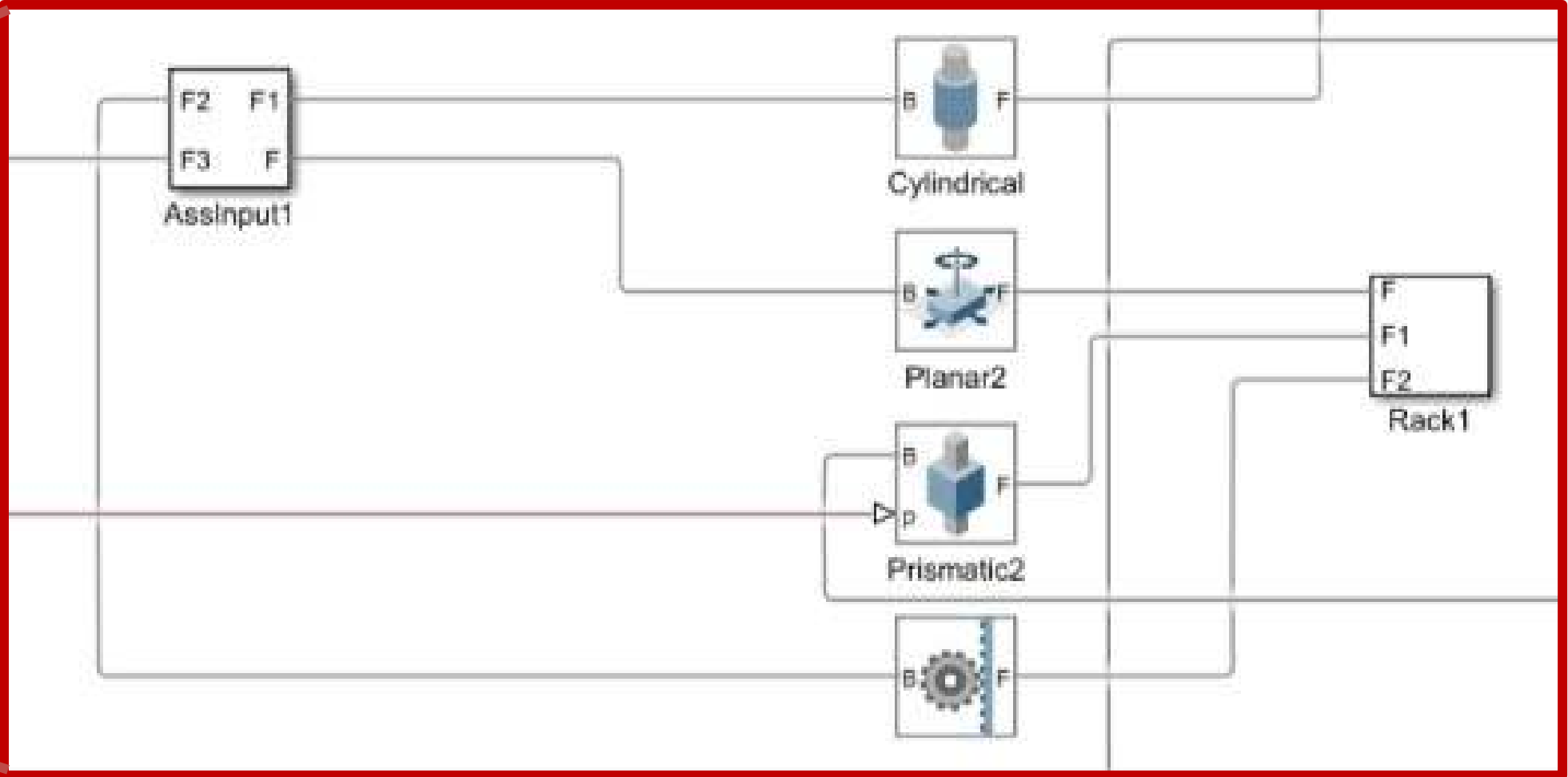
손목 비틀림 회전

위 3 개의 회전 동작을 통해서 3 차원 공간상의 Roll, Pitch, Yaw 제어를 통해 구면 운동 가능

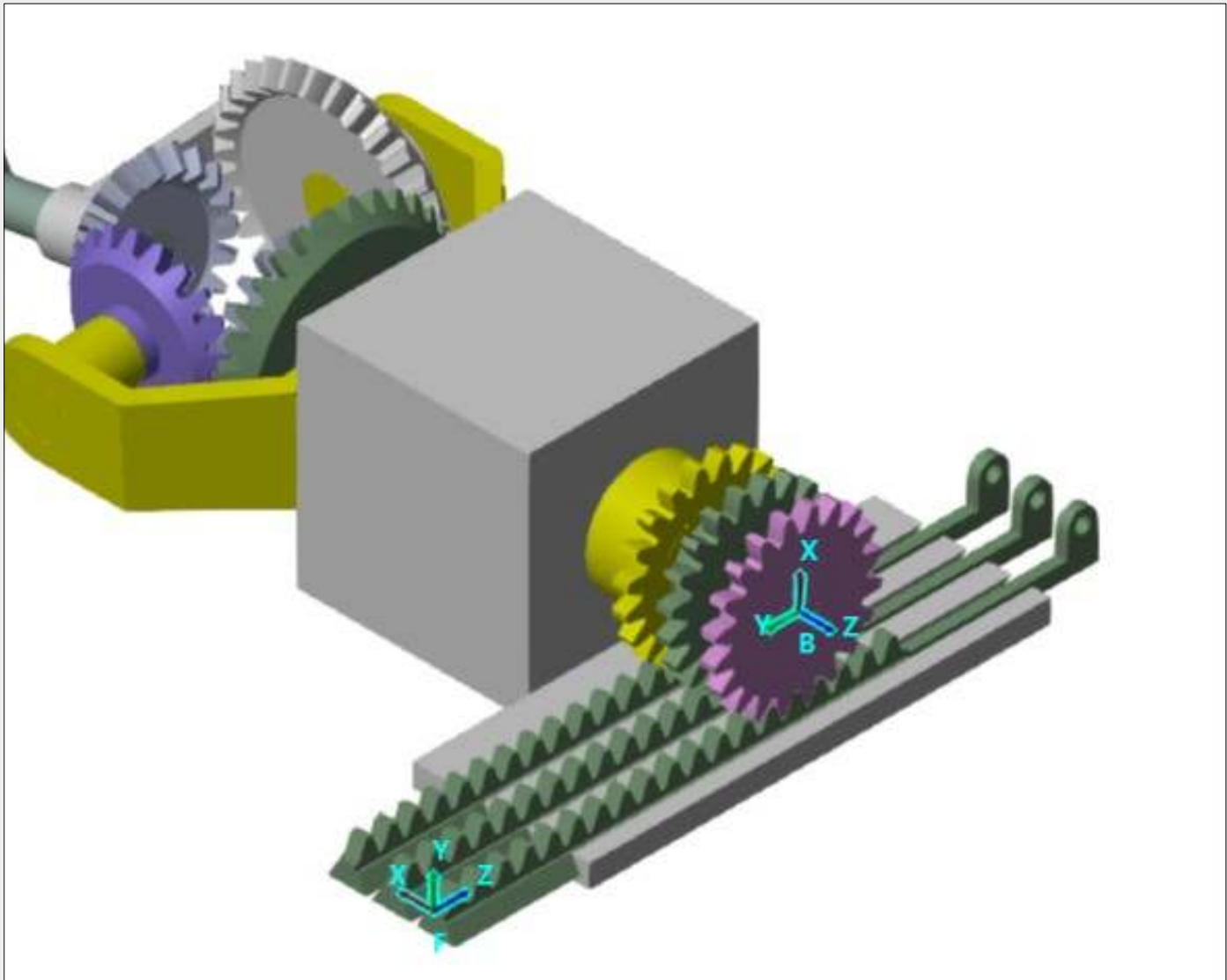
03 Simscape Multibody 구현 - 랙과 피니언



〈 전체 블록 구성 〉



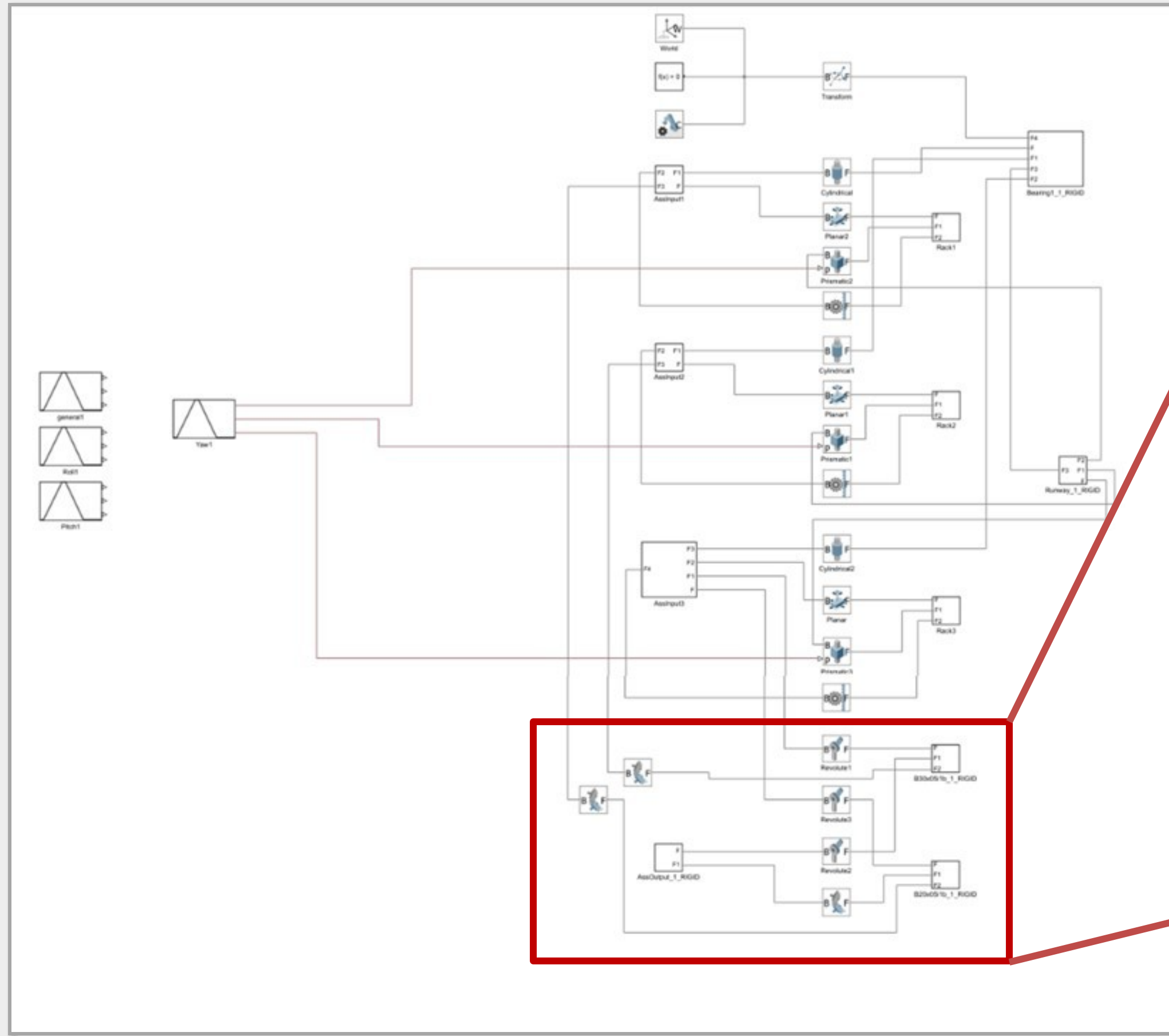
〈 랙과 피니언 블록 구성 〉



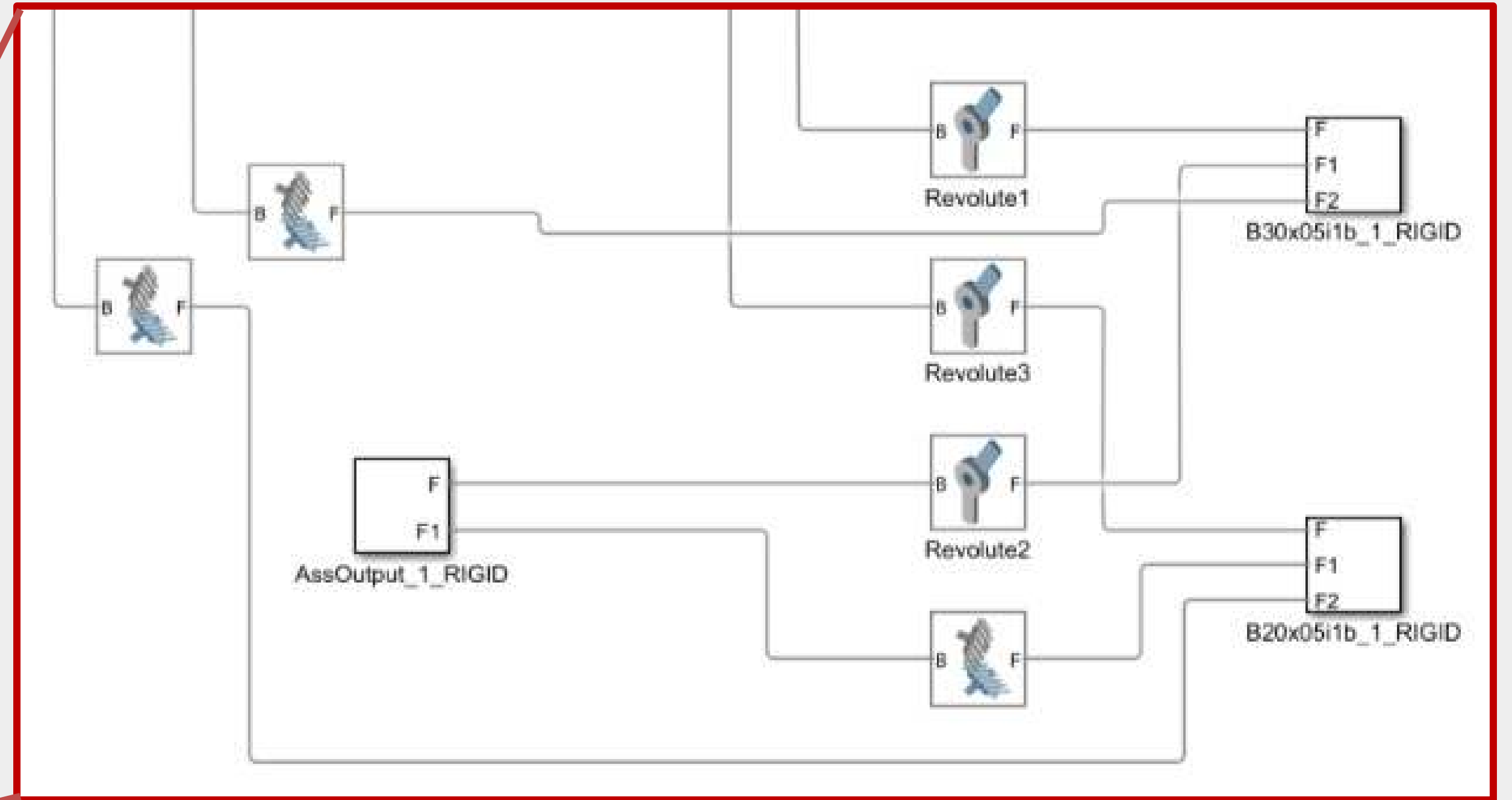
〈 좌표계 설정 〉

Z 축
랙 - 이동 방향
피니언 - 회전축

03 Simscape Multibody 구현 - 베벨 기어

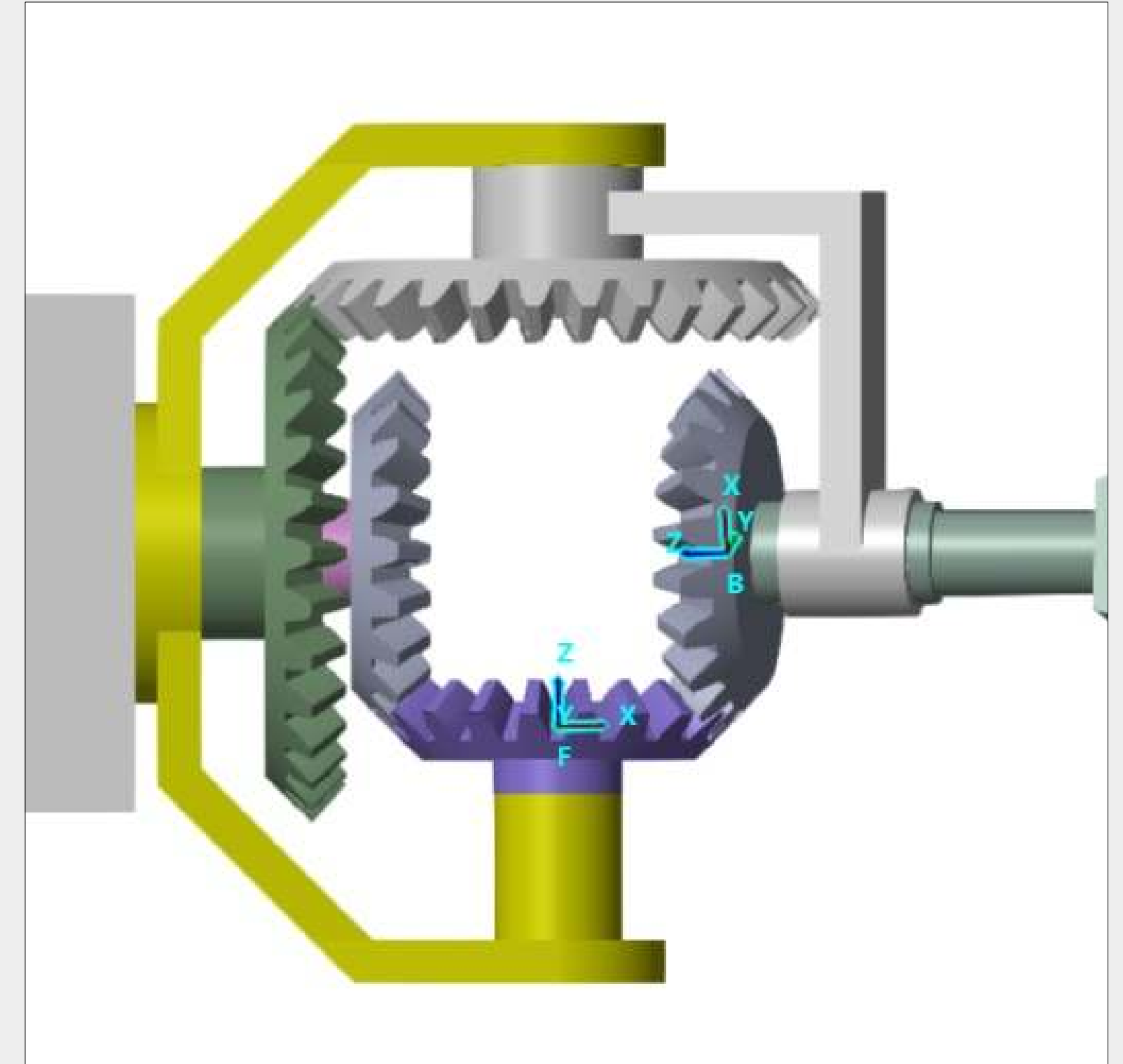
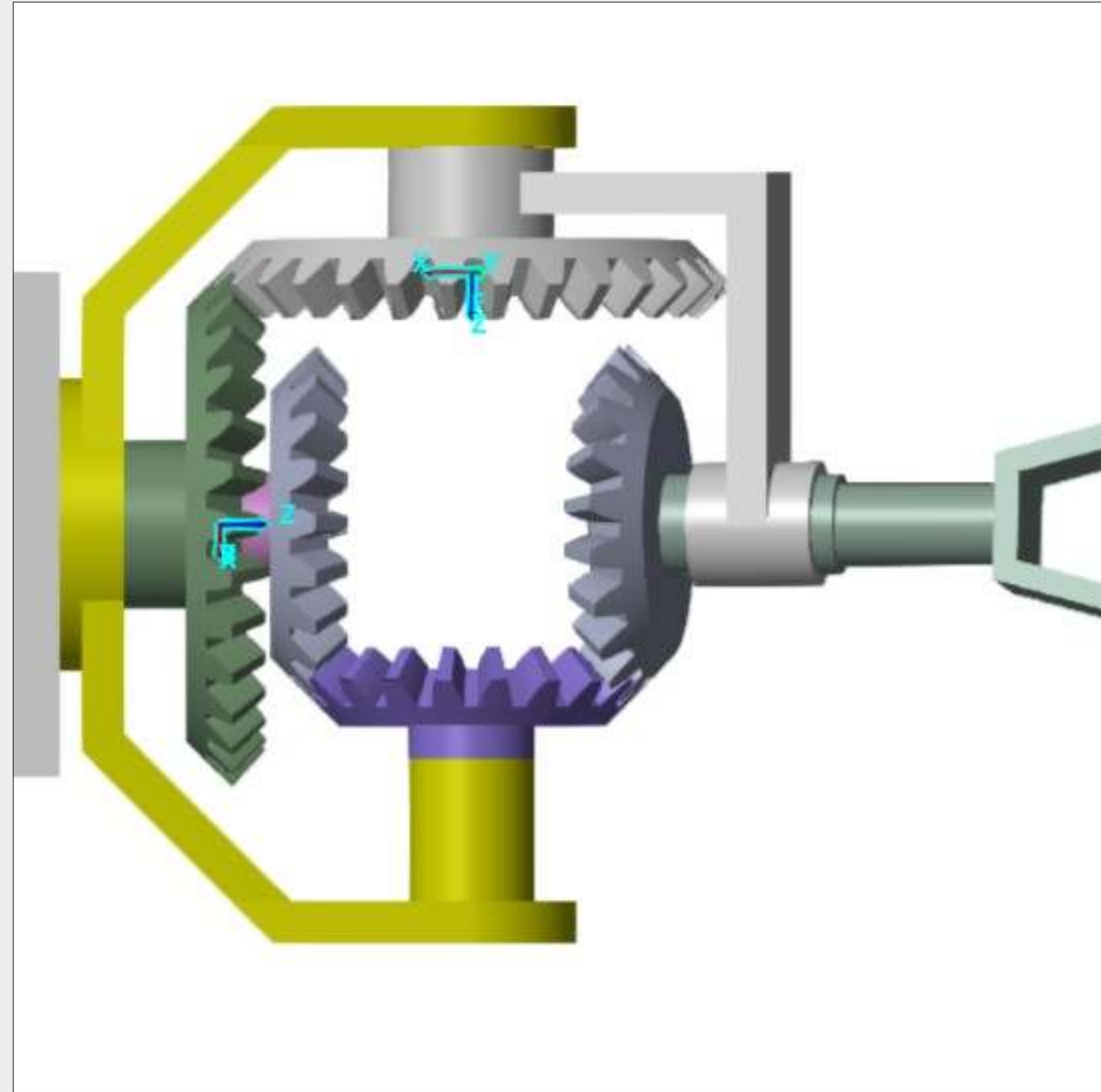
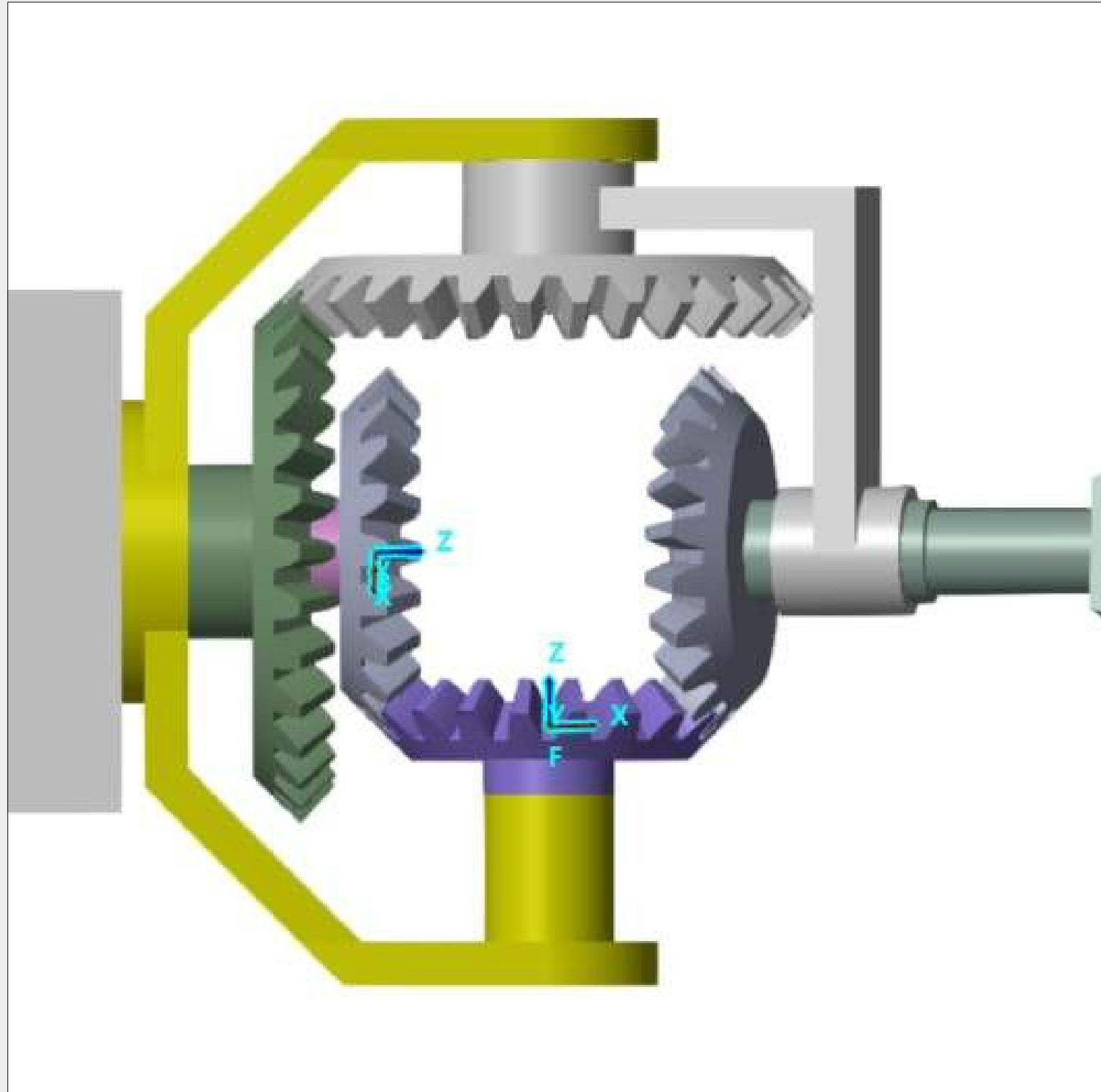


〈 전체 블록 구성 〉



〈 베벨 기어 블록 구성 〉

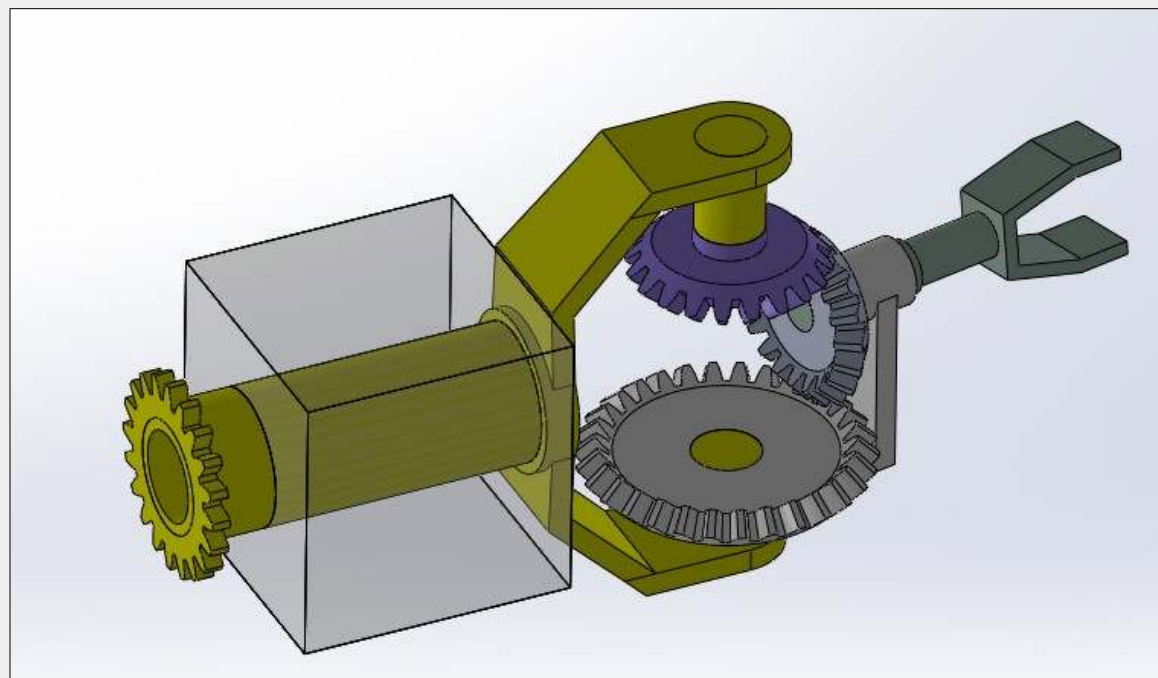
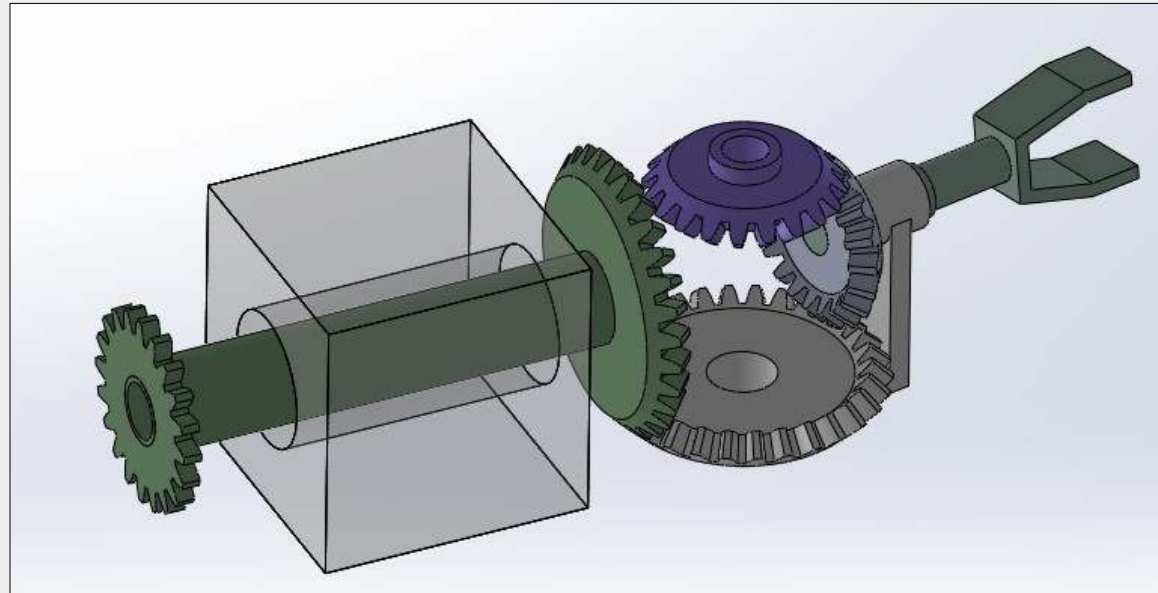
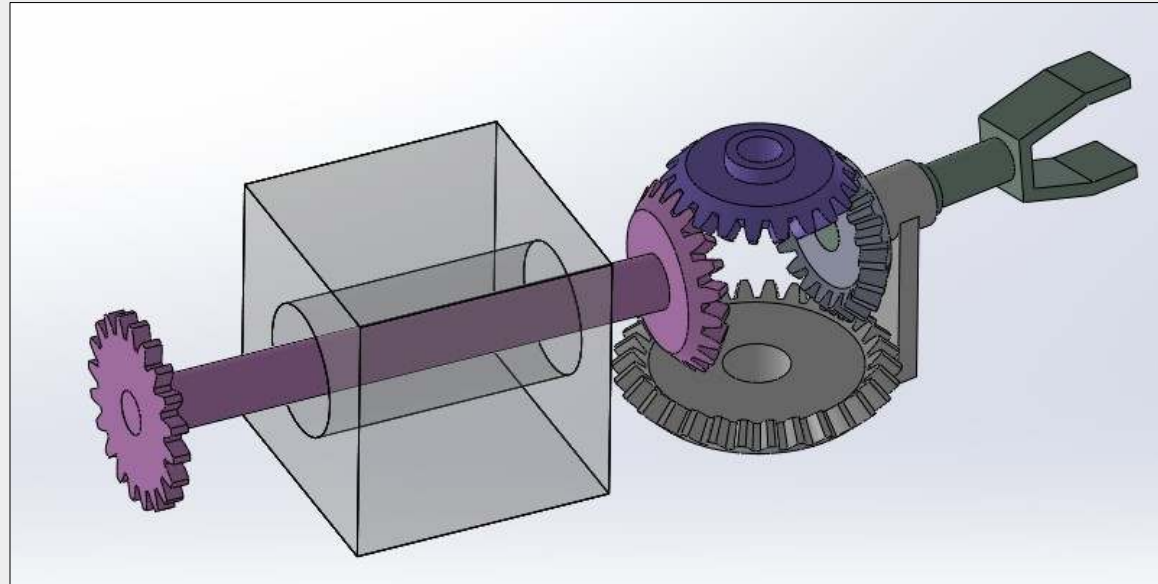
03 Simscape Multibody 구현 - 베벨 기어



〈 베벨 기어 좌표계 설정 〉

03 Simscape Multibody 구현

운동 순서



- 랙의 직선 운동



- 피니언 회전 운동



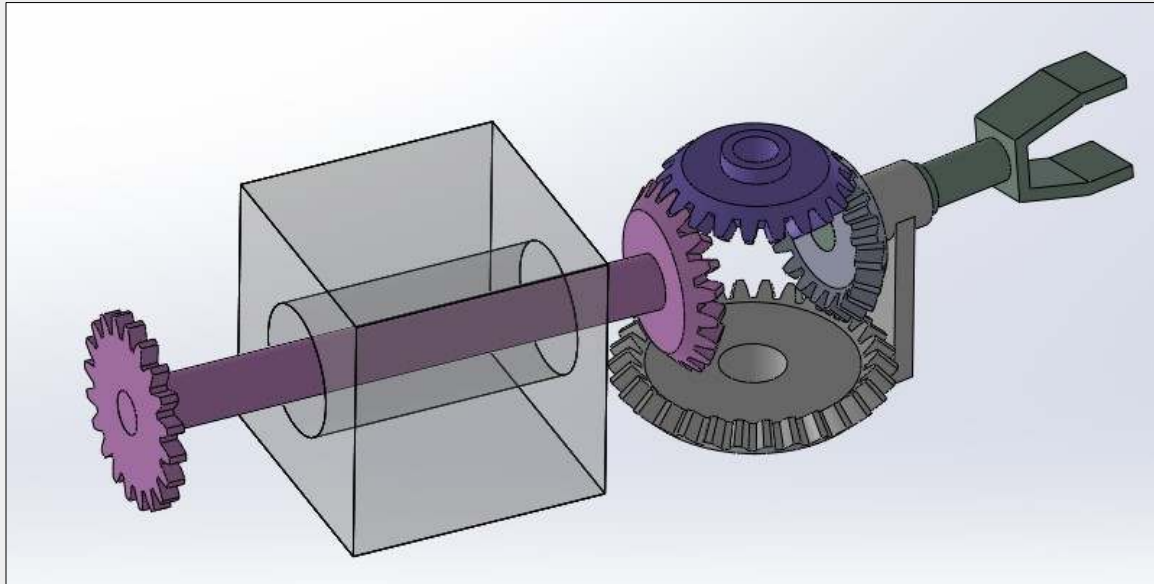
- 각 피니언과 각속도를 공유하는 베벨기어 및 하우징 회전 운동



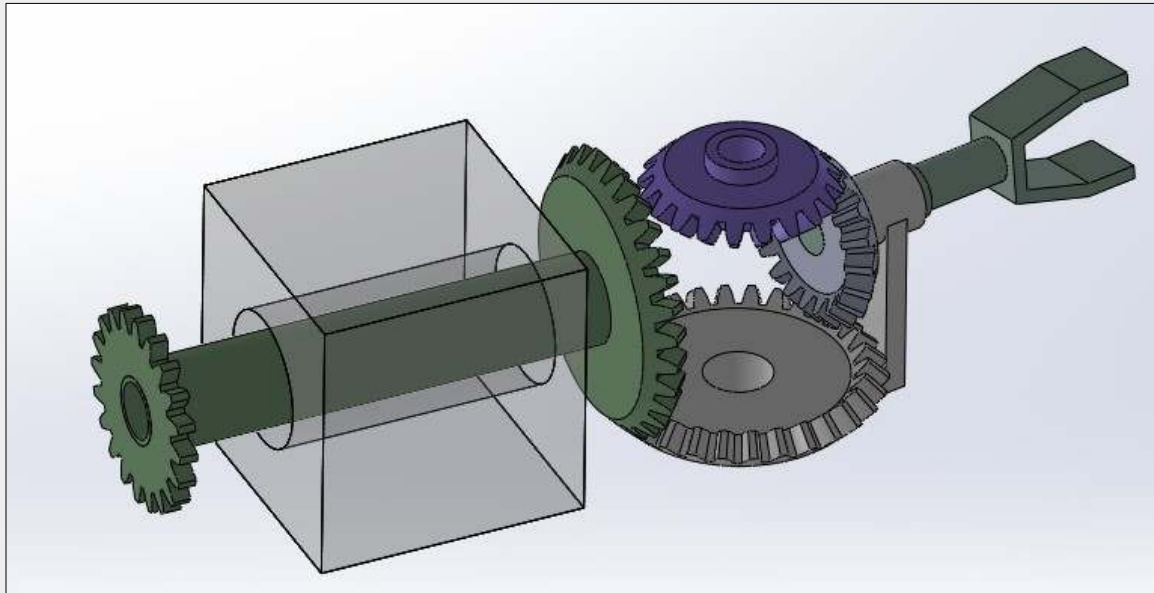
- 중앙 베벨기어부에서 베벨기어끼리 복합적으로 운동 이루어짐

03 Simscape Multibody 구현

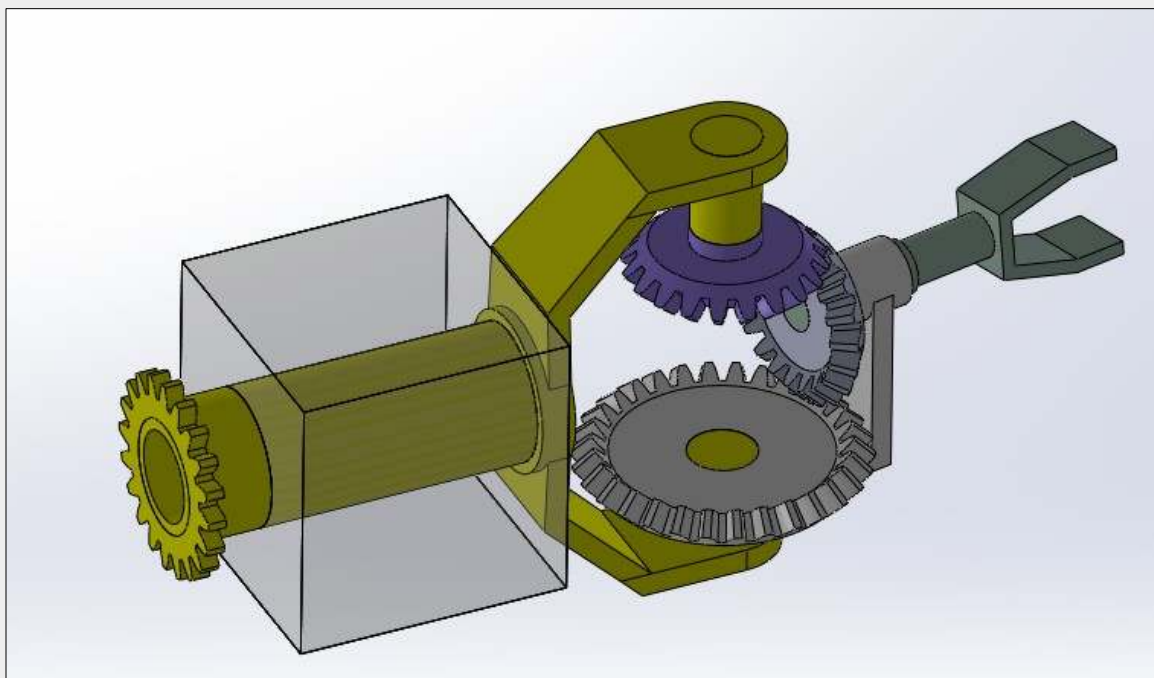
운동 순서



- 분홍색 피니언 회전 → 보라색 베벨기어 회전으로 동력 90 ° 회전
→ 회색 베벨기어 (small) 회전으로 동력 90 ° 회전

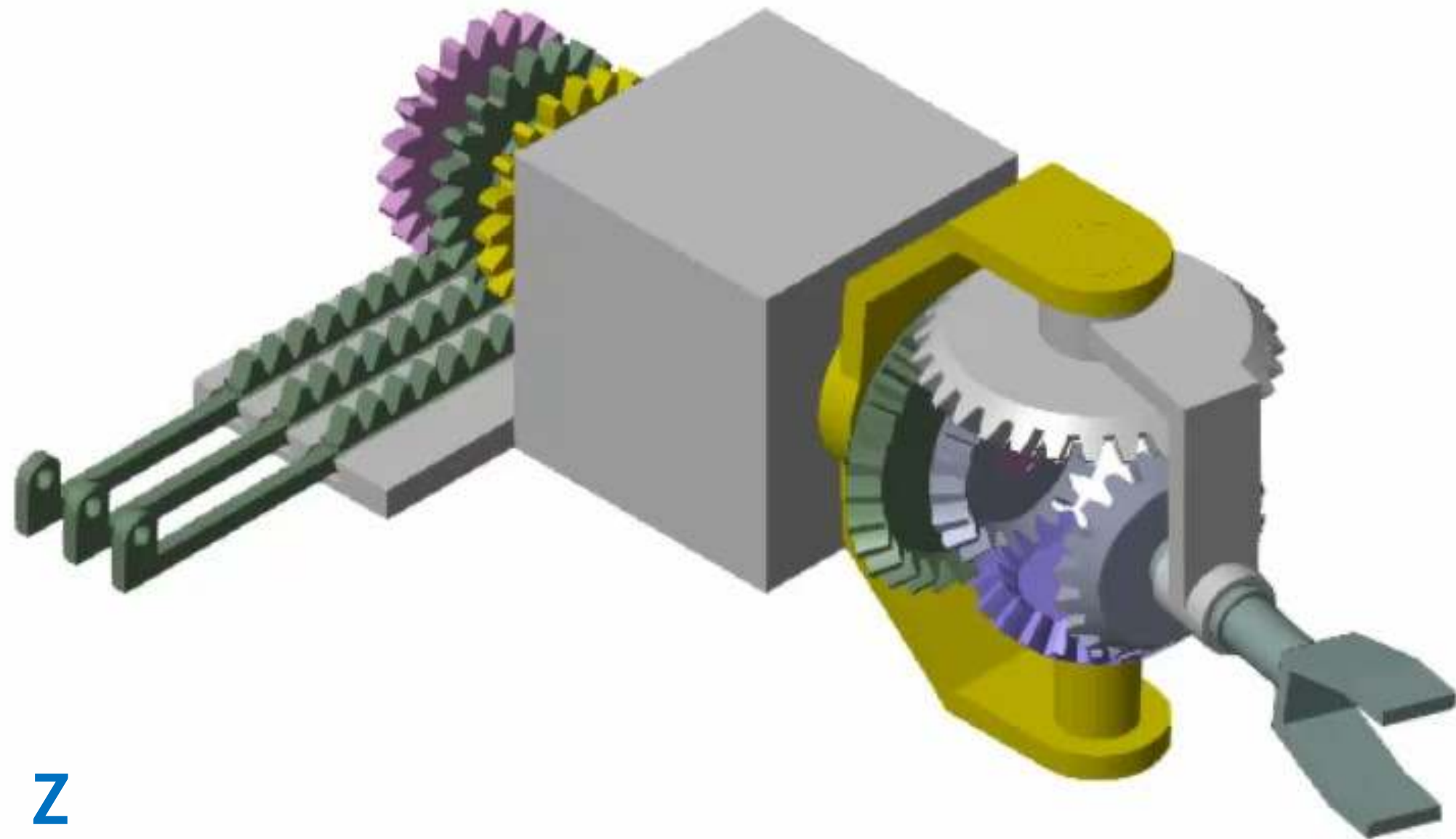


- 초록색 피니언 회전 → 회색 베벨기어 (big) 회전으로 동력 90 ° 회전

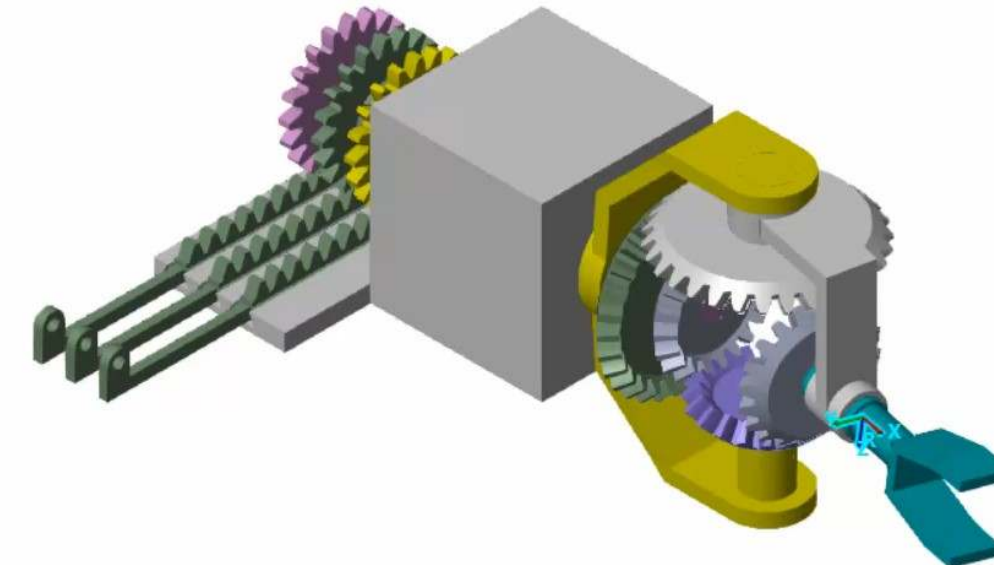


- 노란색 피니언 회전 → 노란색 외부 하우징 회전으로 보라색 베벨기어, 회색 베벨기어 (big) 원호 궤적으로 위치 이동 → 분홍색 피니언 회전, 초록색 피니언 회전에 의한 동력 방향 변경 효과

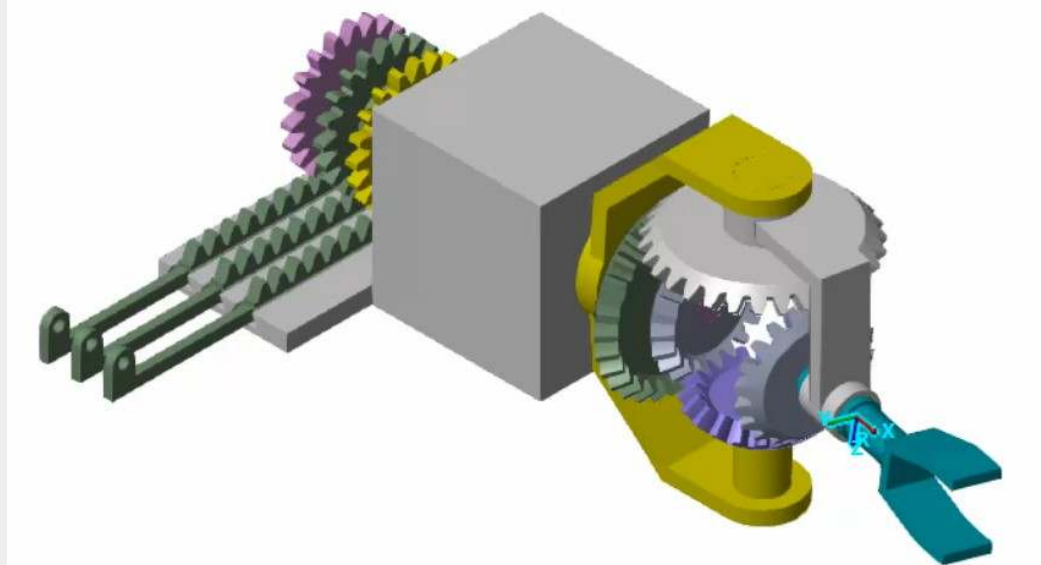
03 Simscape Multibody 구현



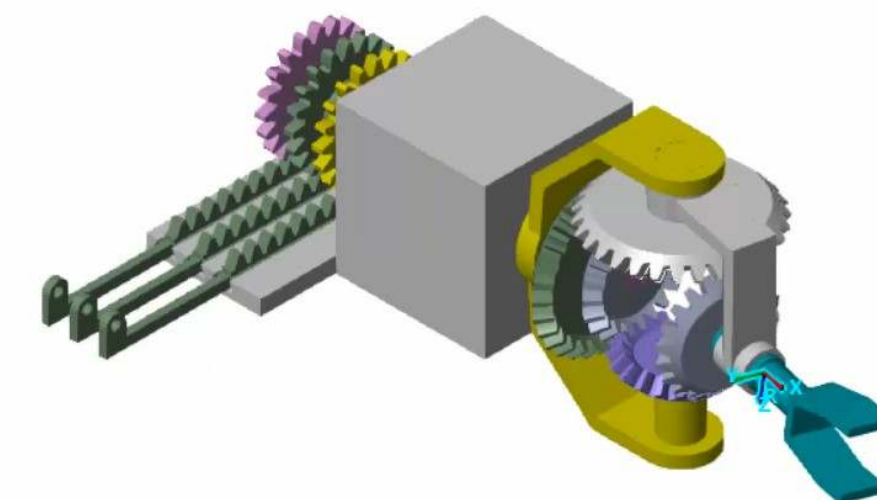
〈 최종 구현 〉



〈Roll〉



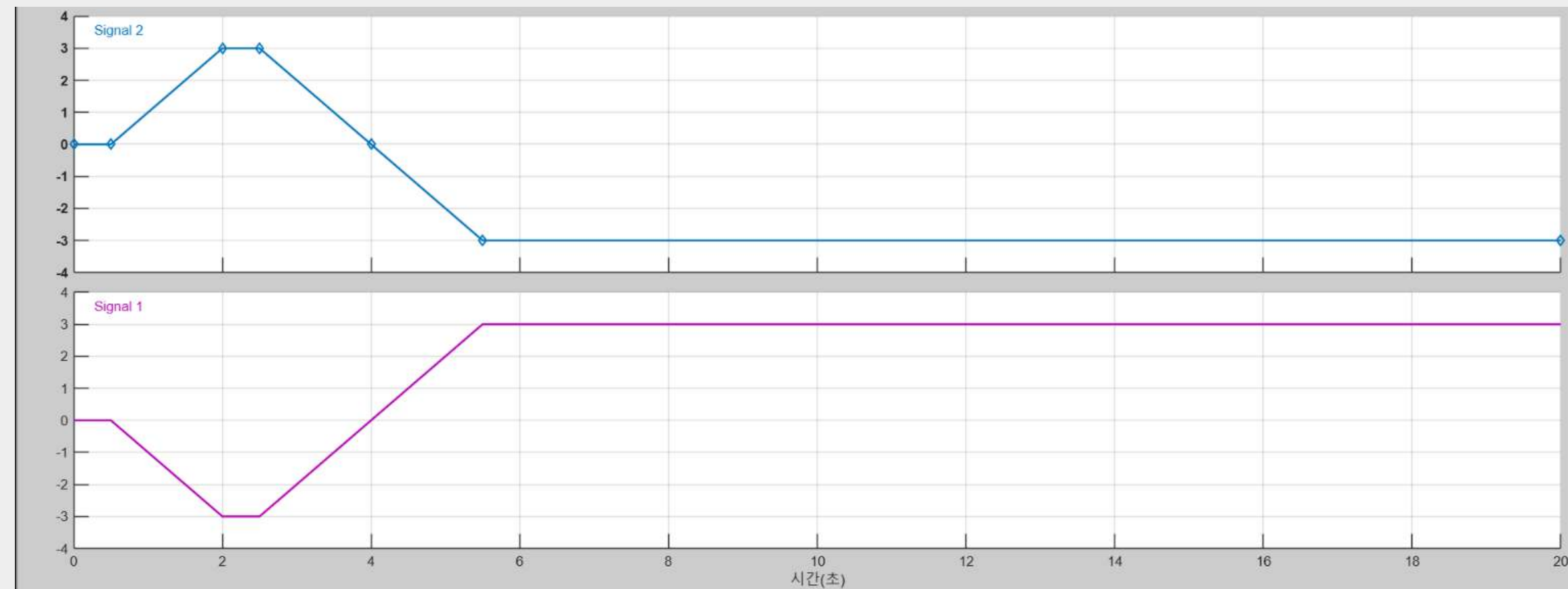
〈Pitch〉



〈Yaw〉

04 Mechanism 분석

Example Input



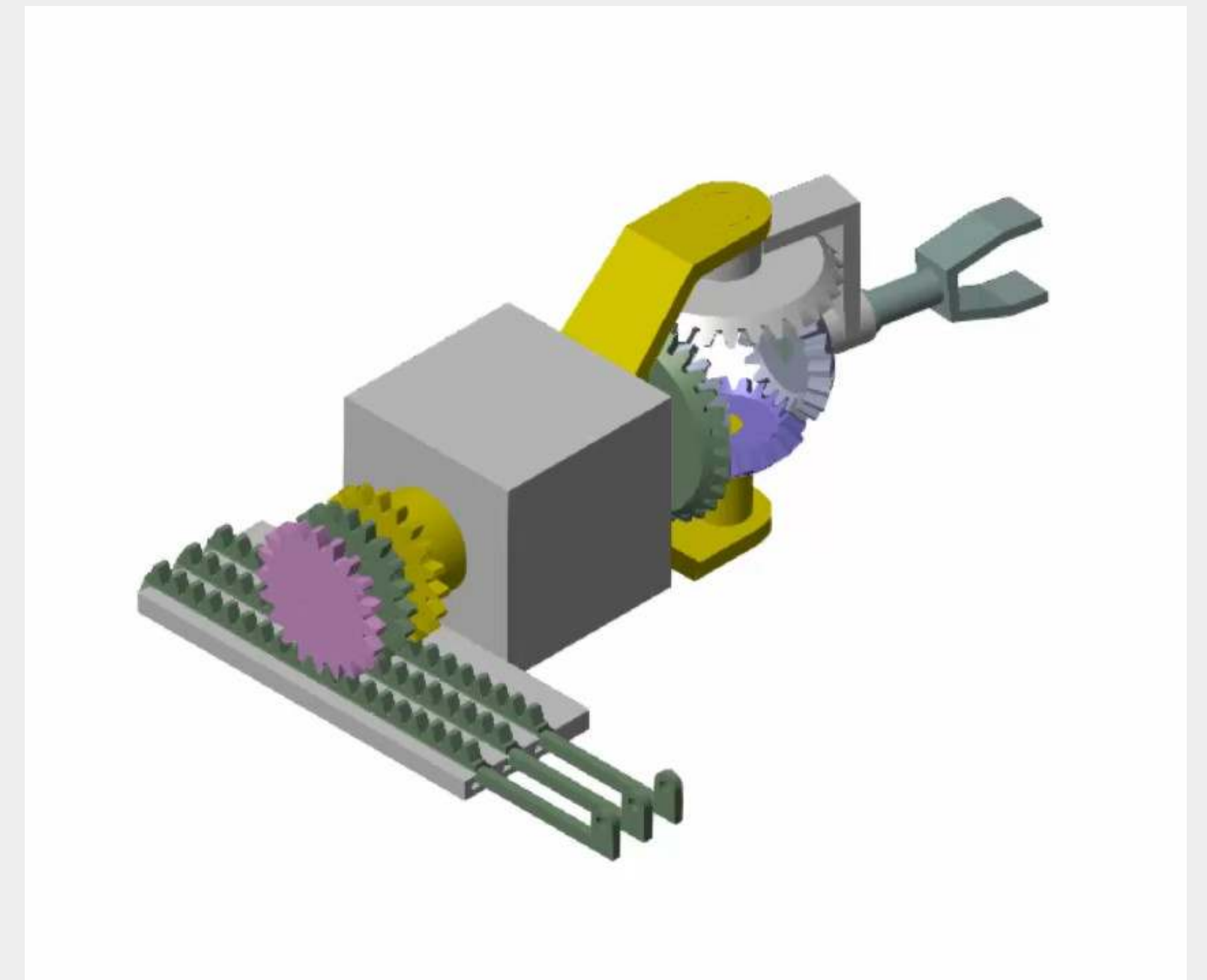
랙의 선속도 크기 $|v| = 2$ [mm/s]

피니언의 각속도 크기 $|\omega_{pinion}| = \frac{|v|}{r} = 1$ [rad/s]

메커니즘의 자유도 ?

출력단의 각속도 $\omega_{yaw} = ?$

Example Output



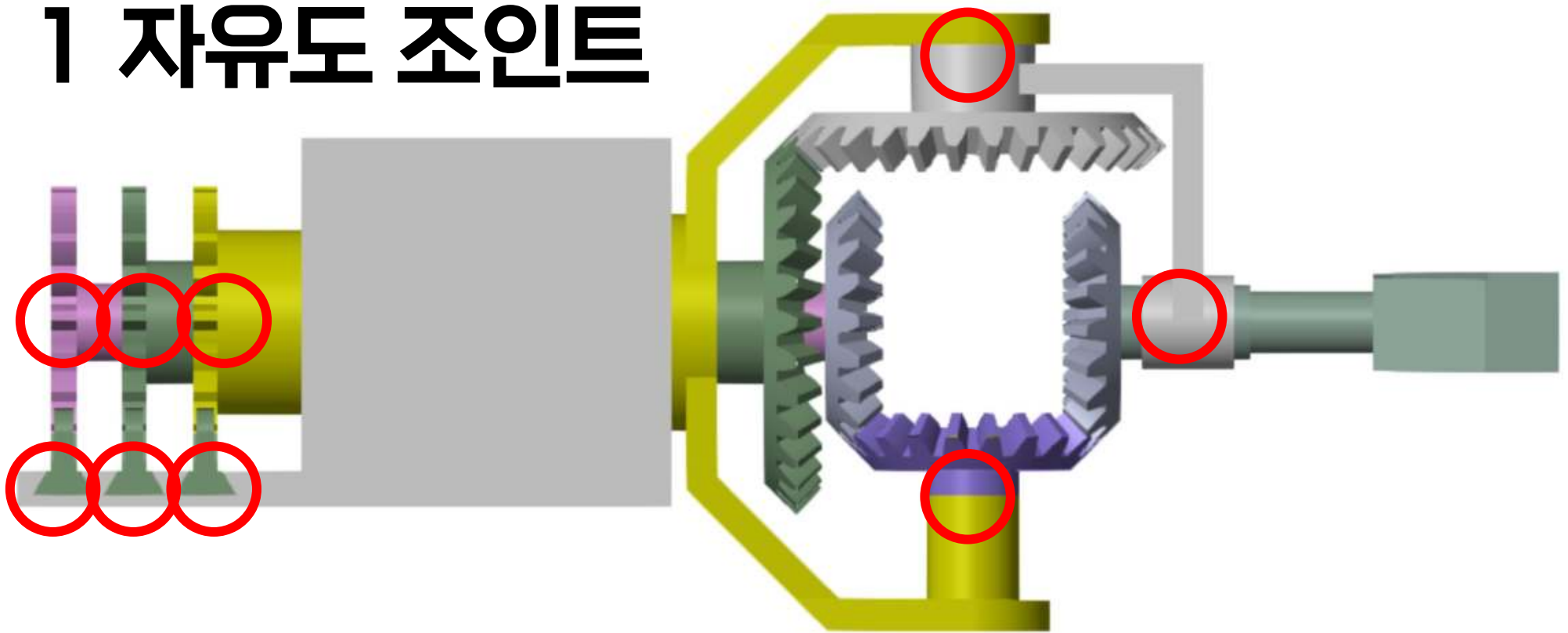
04 Mechanism 분석

자유도 분석

$$F = 6 \times (n - 1) - \sum L - c$$
$$= 6 \times (10 - 1) - 5 \times 9 - 6 = 3$$

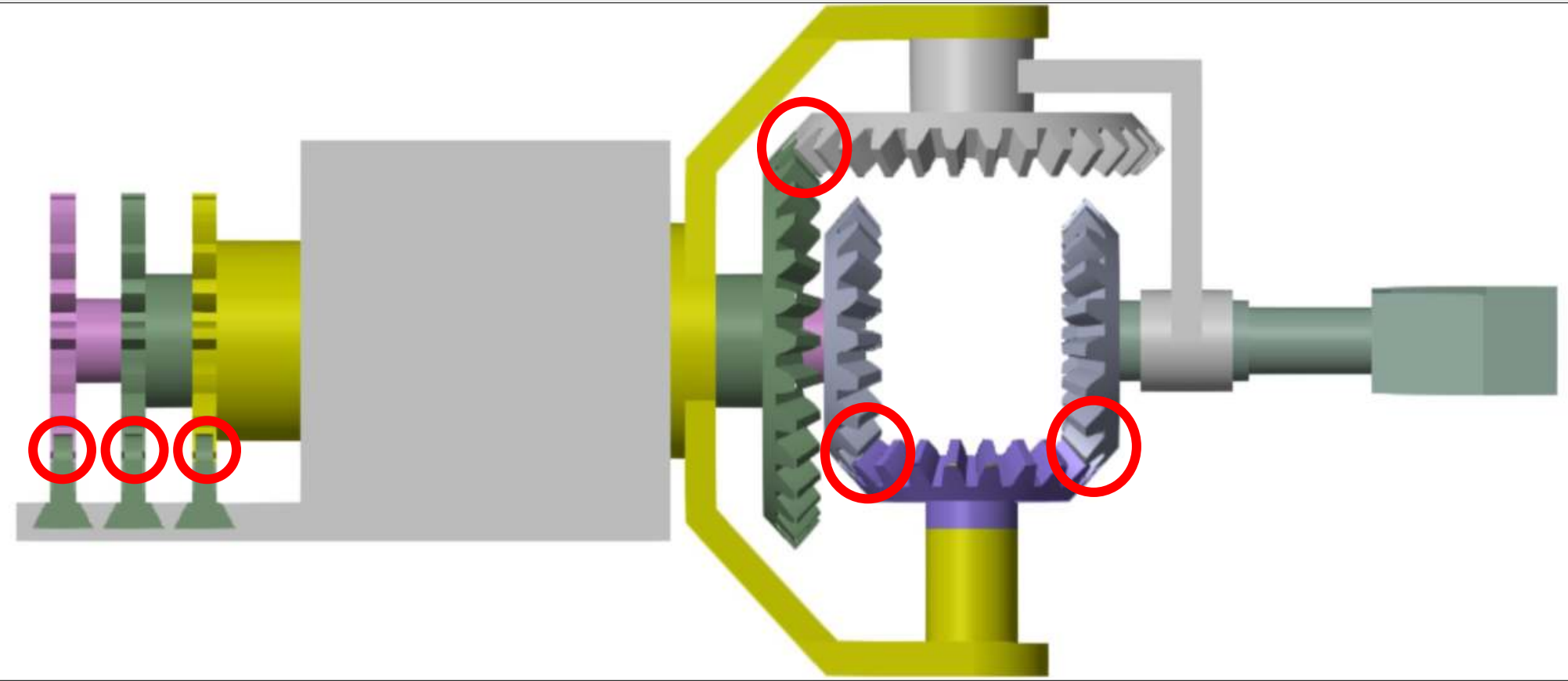
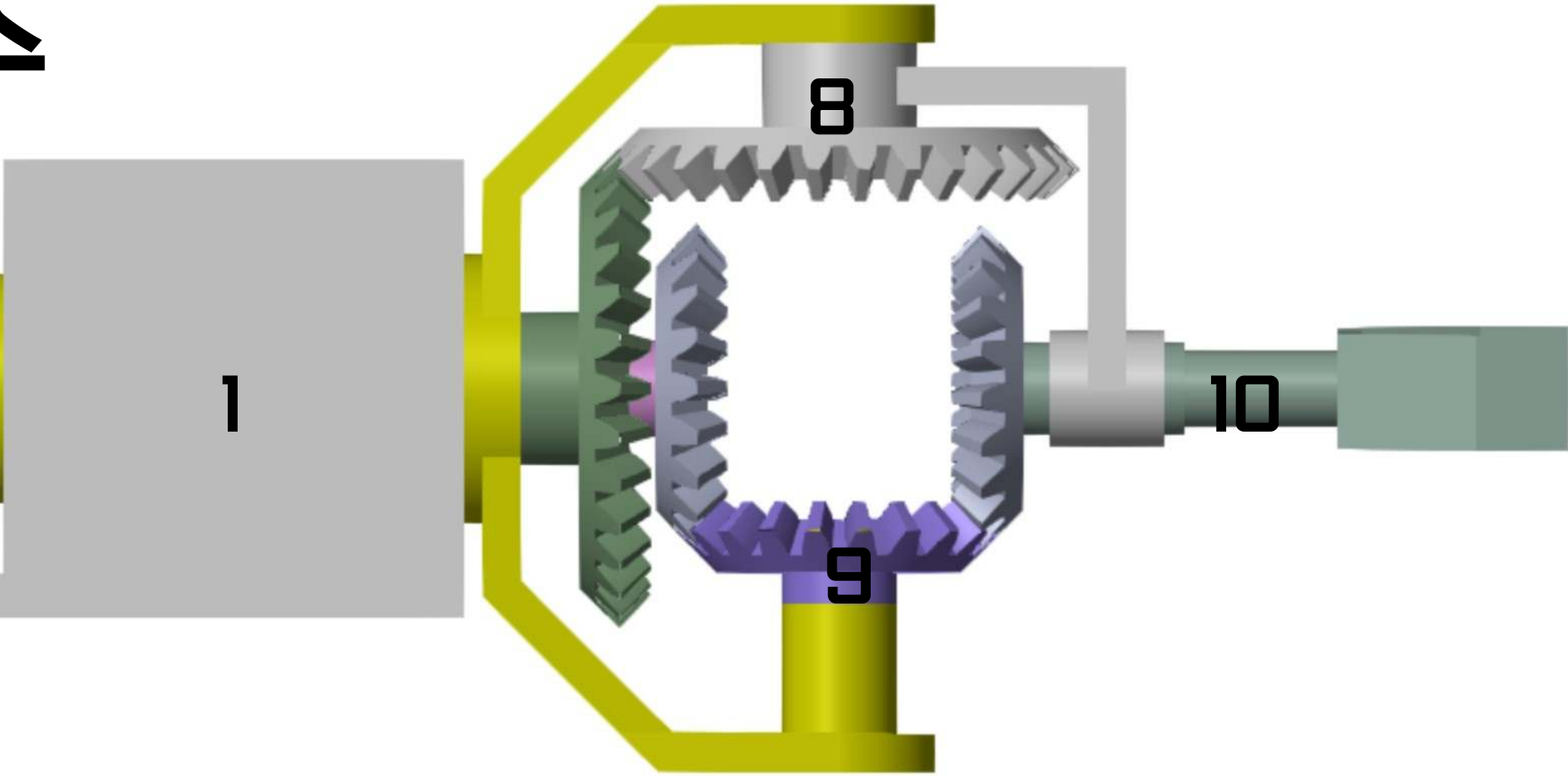
n : 링크수 L : 조인트 구속수 c :기어 구속

1 자유도 조인트



링크 수

5 6 7
2 3 4

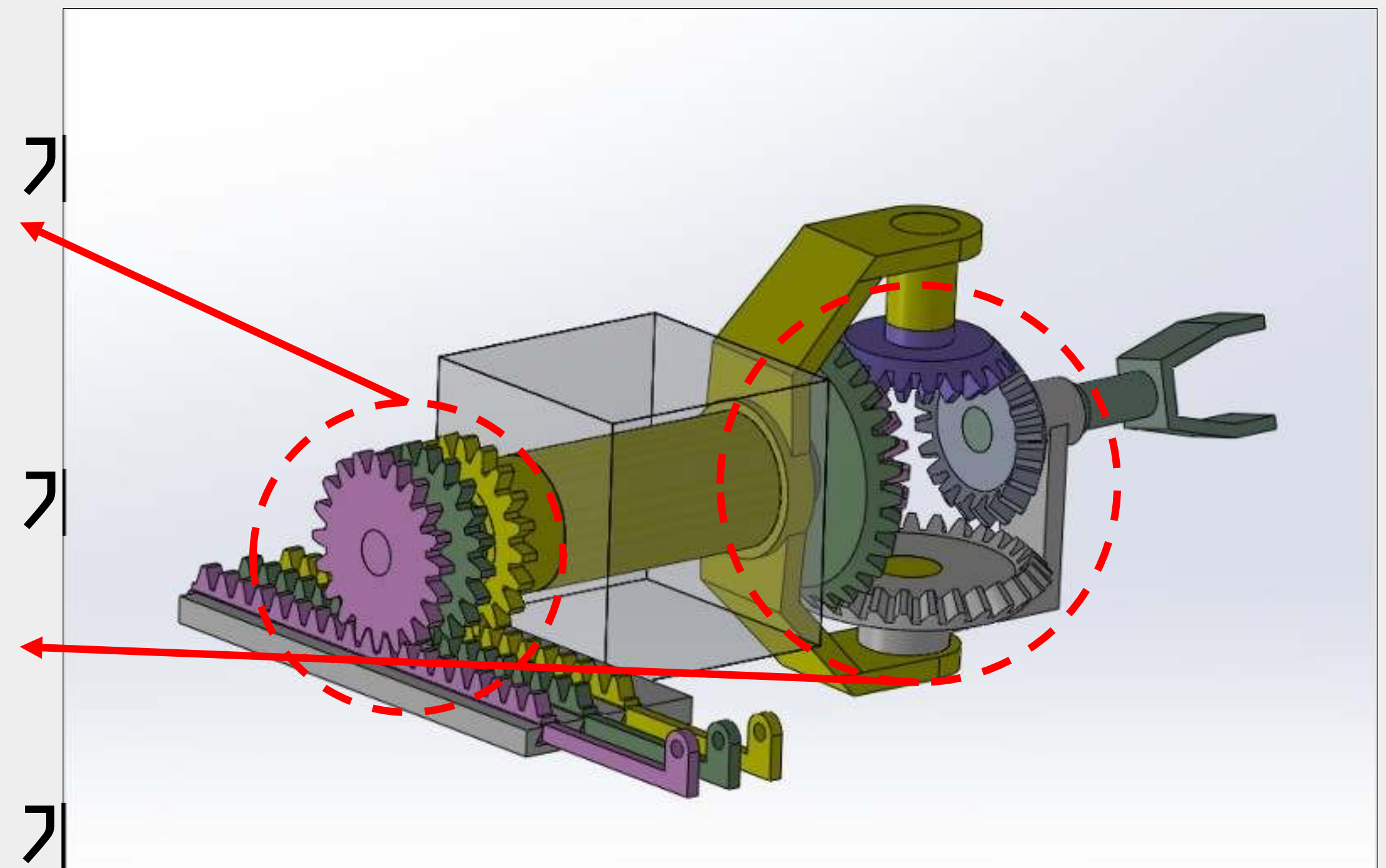


04 Mechanism 분석

속도비 분석

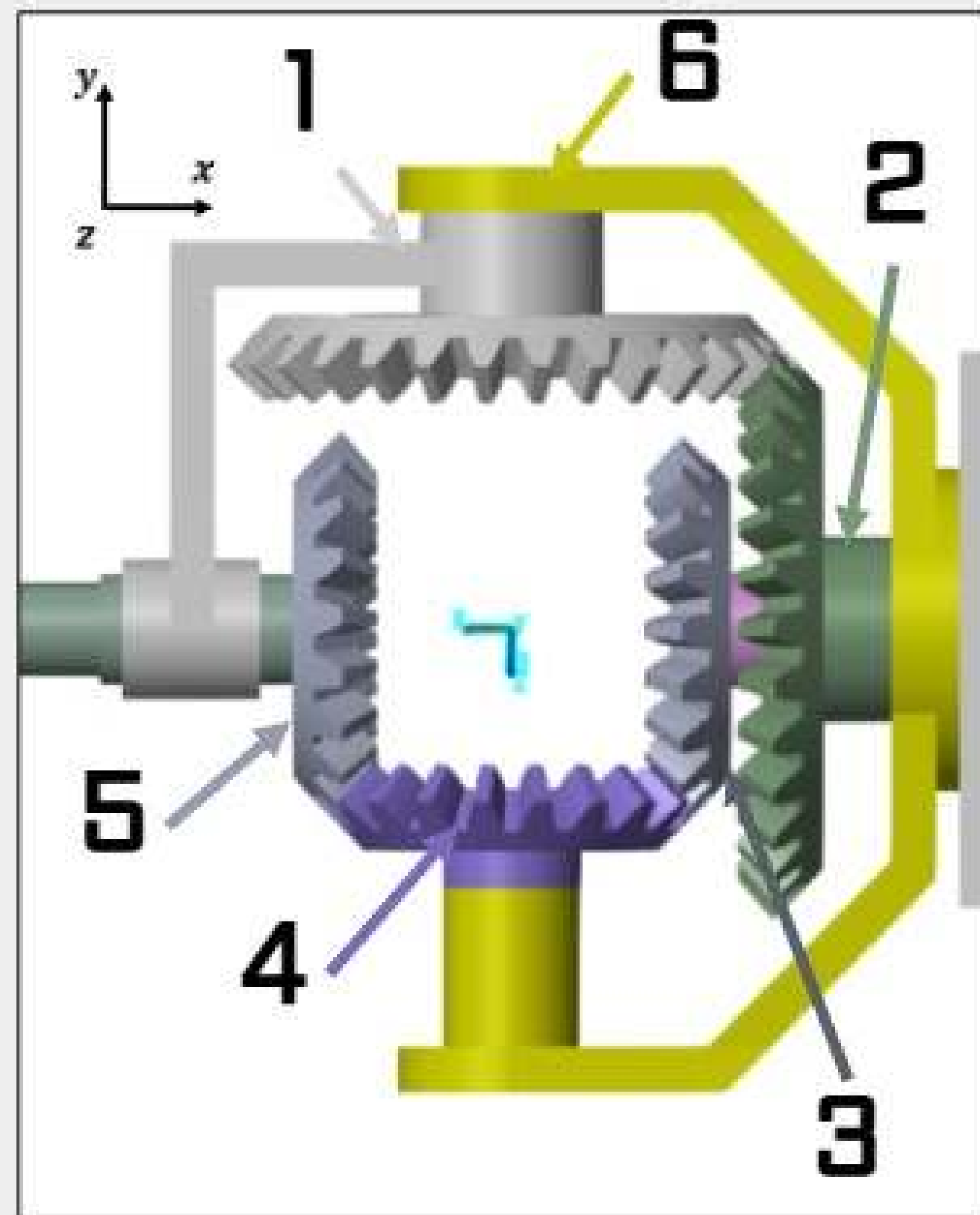
기어 구동식 구형 손목 메커니즘 파트 설계 단계에서 아래와 같이 설계한 상태

- 랙앤피니언
모듈 0.2, 피치원 반지름 2mm, 기어잇수 20 개
- 베벨기어 (small)
모듈 0.2, 피치원 반지름 2mm, 기어잇수 20 개
- 베벨기어 (big)
모듈 0.2, 피치원 반지름 3mm, 기어잇수 30 개



04 Mechanism 분석

속도비 분석



3 번축, 핑크색 피니언만 회전시킬경우

$$\omega_4 = -\frac{N_3}{N_4}\omega_3 \quad \text{3 번기어가 4 번기어를 돌림}$$

$$\omega_5 = \frac{N_4}{N_5}\omega_4 \quad \text{3 번기어가 4 번기어를 돌림}$$

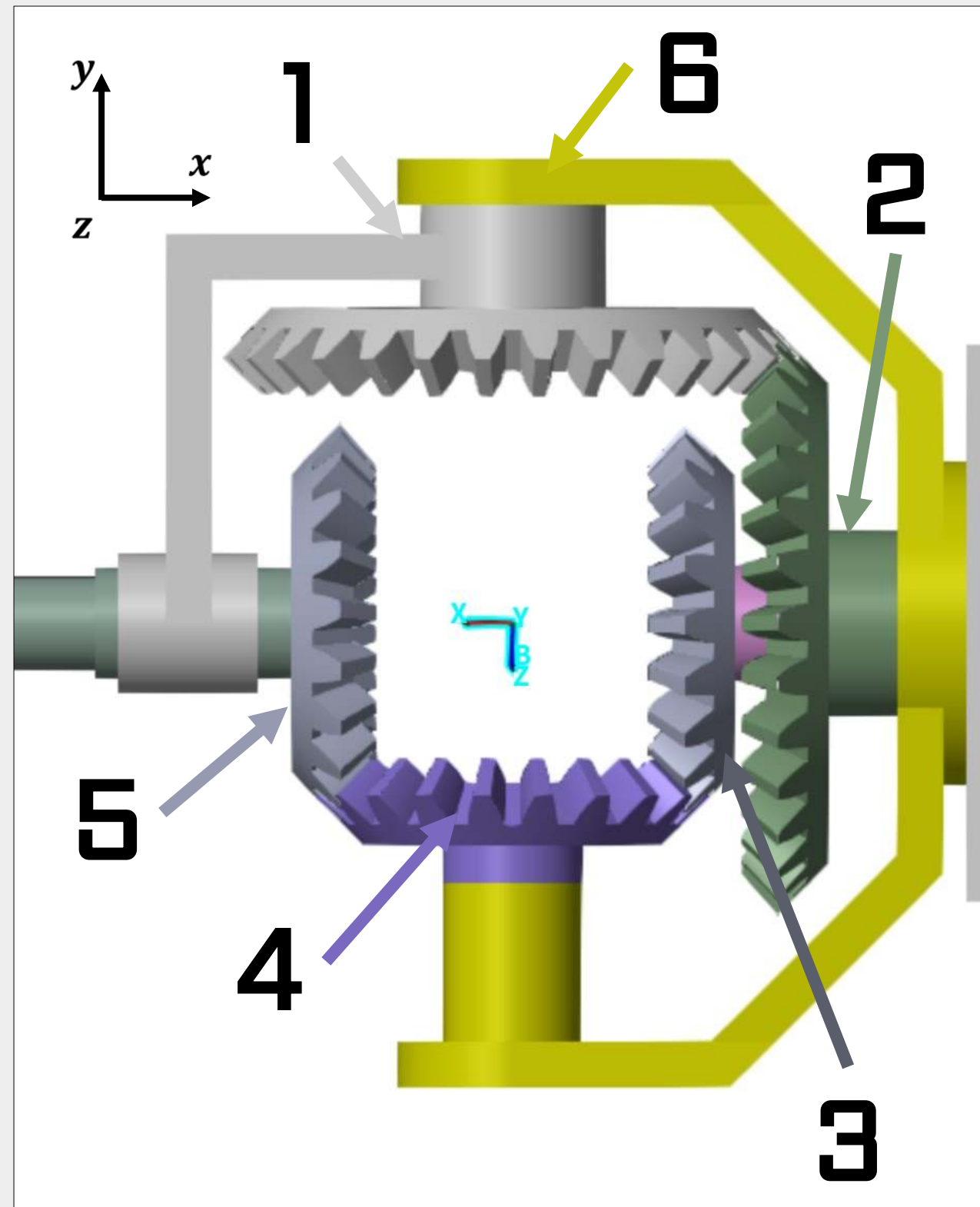
$$\omega_5 = \left(\frac{N_4}{N_5}\right) \times \left(\frac{N_3}{N_4}\right) \omega_3$$

$$\omega_5 = \frac{N_3}{N_5}\omega_3 \quad \begin{array}{l} \text{3 번기어와 5 번기어의 잇수가 같음} \\ \omega_5 = \omega_3 \end{array}$$

04 Mechanism 분석

속도비 분석

3 번축, 핑크색 피니언만 회전시킬경우



1번, 2번, 6번

$$\begin{aligned} N_1(\omega_1 - \omega_6) + N_2(\omega_2 - \omega_6) &= 0 \\ \omega_1 &= 0 \end{aligned}$$

3번, 4번, 6번

$$\begin{aligned} N_4(\omega_4 - \omega_6) + N_3(\omega_3 - \omega_6) &= 0 \\ N_4\omega_4 + N_3\omega_3 &= 0 \end{aligned}$$

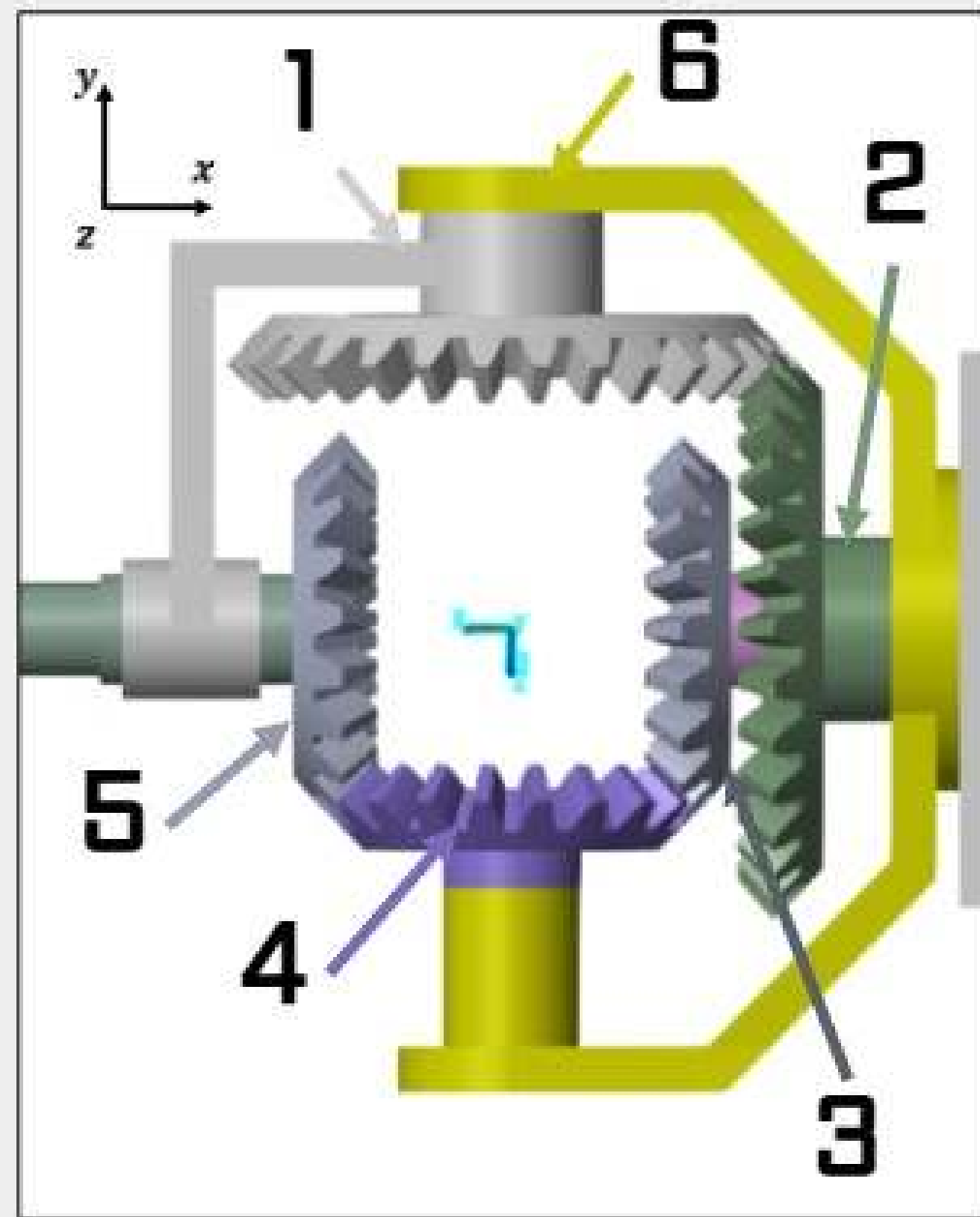
1번, 4번, 5번

$$\begin{aligned} N_4(\omega_4 - \omega_1) + N_5(\omega_5 - \omega_1) &= 0 \\ N_4\omega_4 \cdot \vec{j} + N_5\omega_5 \cdot \vec{i} &= 0 \end{aligned}$$

► $|\omega_3| = |\omega_4| = |\omega_5|$

04 Mechanism 분석

속도비 분석



2 번축, 녹색 피니언만 회전시킬경우

$$\omega_1 = -\omega_2 \times \frac{N_2}{N_1}$$

$$\omega_1 \times N_4 = \omega_5 \times N_5$$

$$\omega_5 = \omega_1 \times \frac{N_4}{N_5}$$

$$\omega_5 = \omega_2 \times \left(\frac{N_2}{N_1} \right) \times \left(\frac{N_4}{N_5} \right)$$

기어 잇수비 1 번 2 번, 4 번 5 번이 같으므로,

$$\omega_1 = \omega_2 = \omega_5$$

2 번기어가 1 번기어를 돌림

접촉점 5,4 의 절대속도는 0
그러나, 5 번기어의 계에선 p 점의
속도는 2 가지임. 공전, 선속도, 자전
선속도의 합. 반지름 r 의 비율은 잇수의
비율과 같다.

04 Mechanism 분석

속도비 분석

2 번째, 녹색 피니언만 회전시킬 경우

1번, 2번, 6번

$$\begin{aligned} N_1(\omega_1 - \omega_6) + N_2(\omega_2 - \omega_6) &= 0 \\ N_1\omega_1 \cdot \vec{j} + N_2\omega_2 \cdot \vec{i} &= 0 \quad \text{크기만 고려할 경우 } \omega_1 = \omega_2 \end{aligned}$$

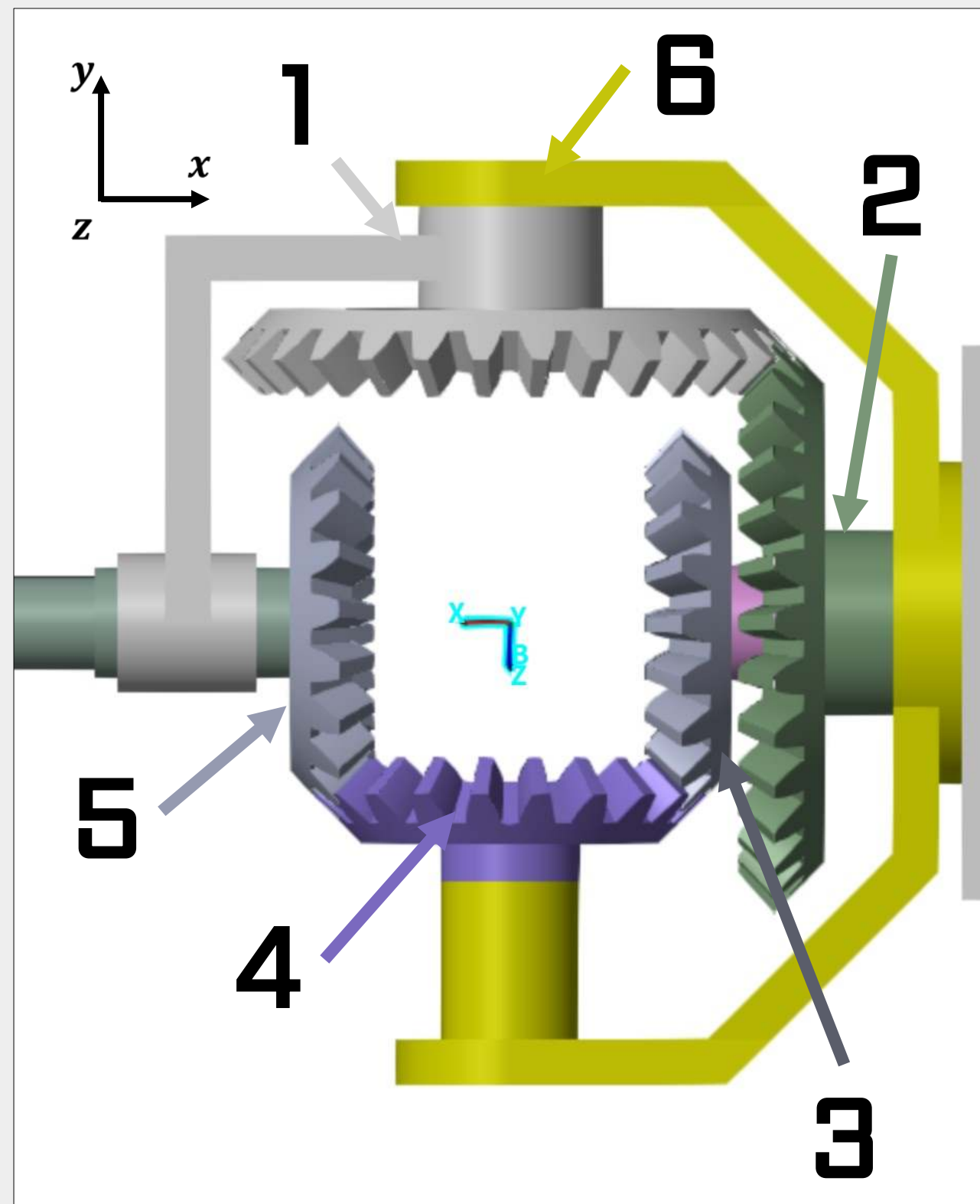
3번, 4번, 6번

$$\begin{aligned} N_4(\omega_4 - \omega_6) + N_3(\omega_3 - \omega_6) &= 0 \\ \omega_4 &= 0 \end{aligned}$$

1번, 4번, 5번

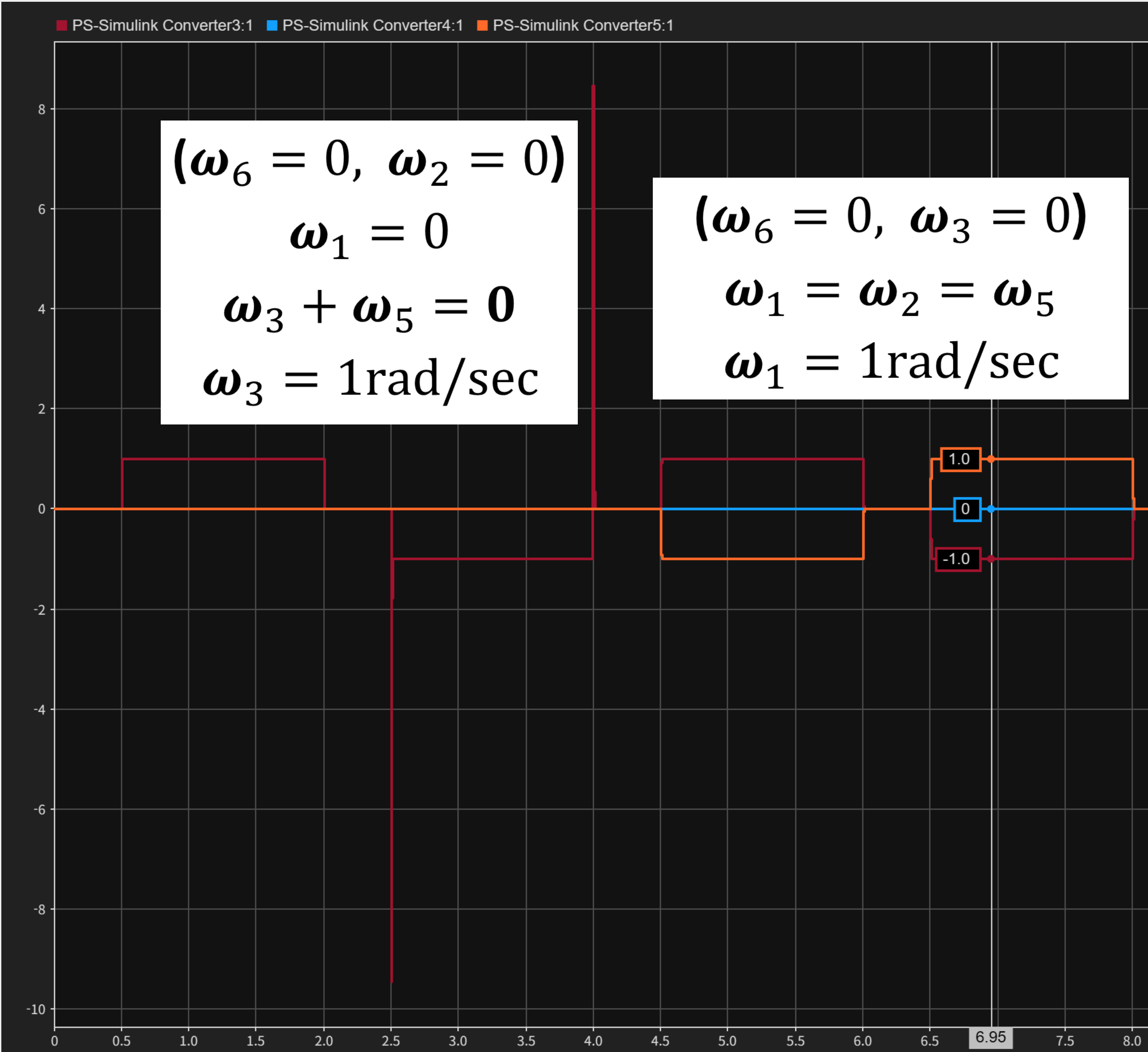
$$\begin{aligned} N_4(\omega_4 - \omega_1) + N_5(\omega_5 - \omega_1) &= 0 \\ -N_4\omega_1 + N_5\omega_5 &= 0 \end{aligned}$$

$$\triangleright |\omega_1| = |\omega_2| = |\omega_5|$$



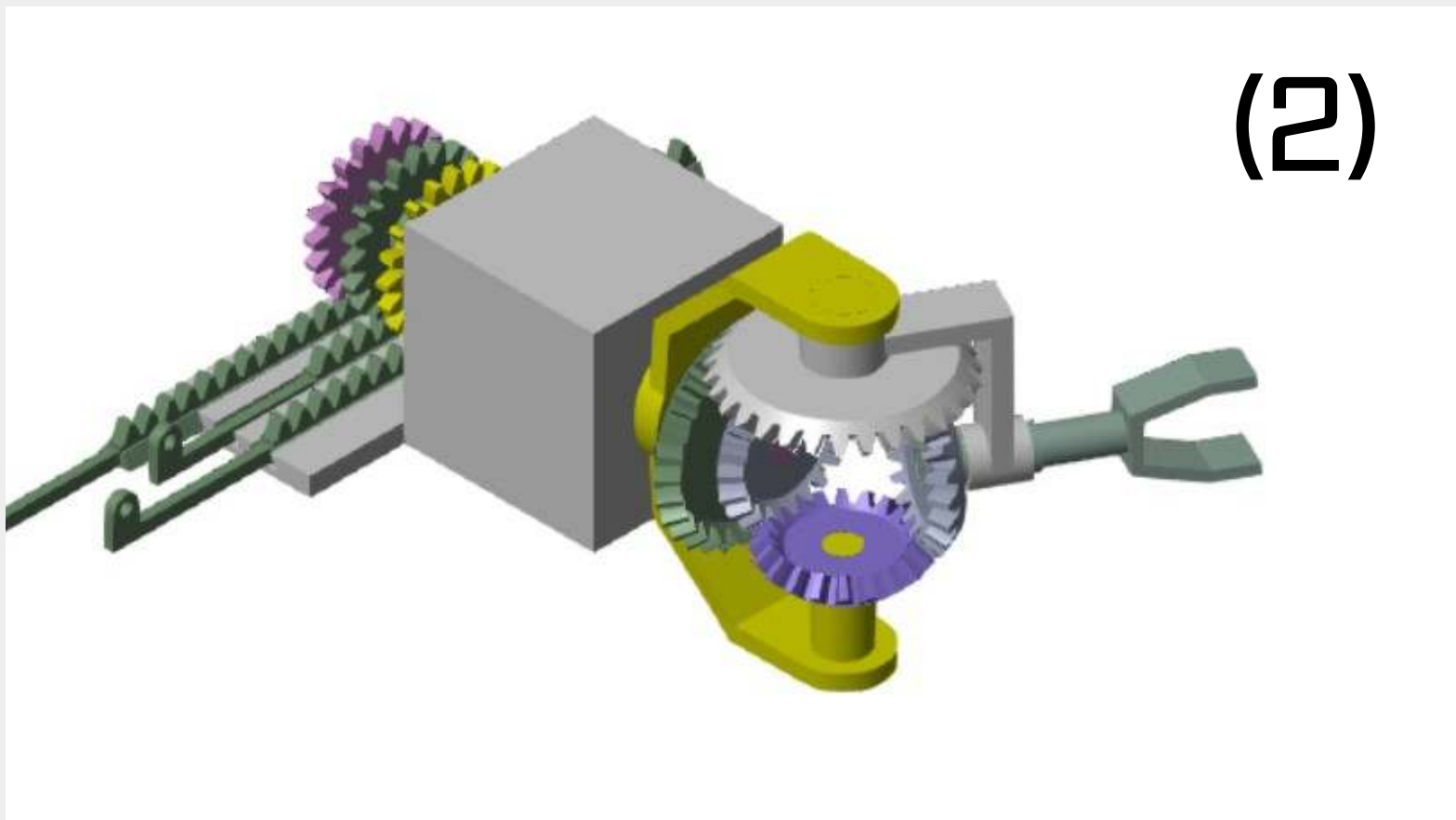
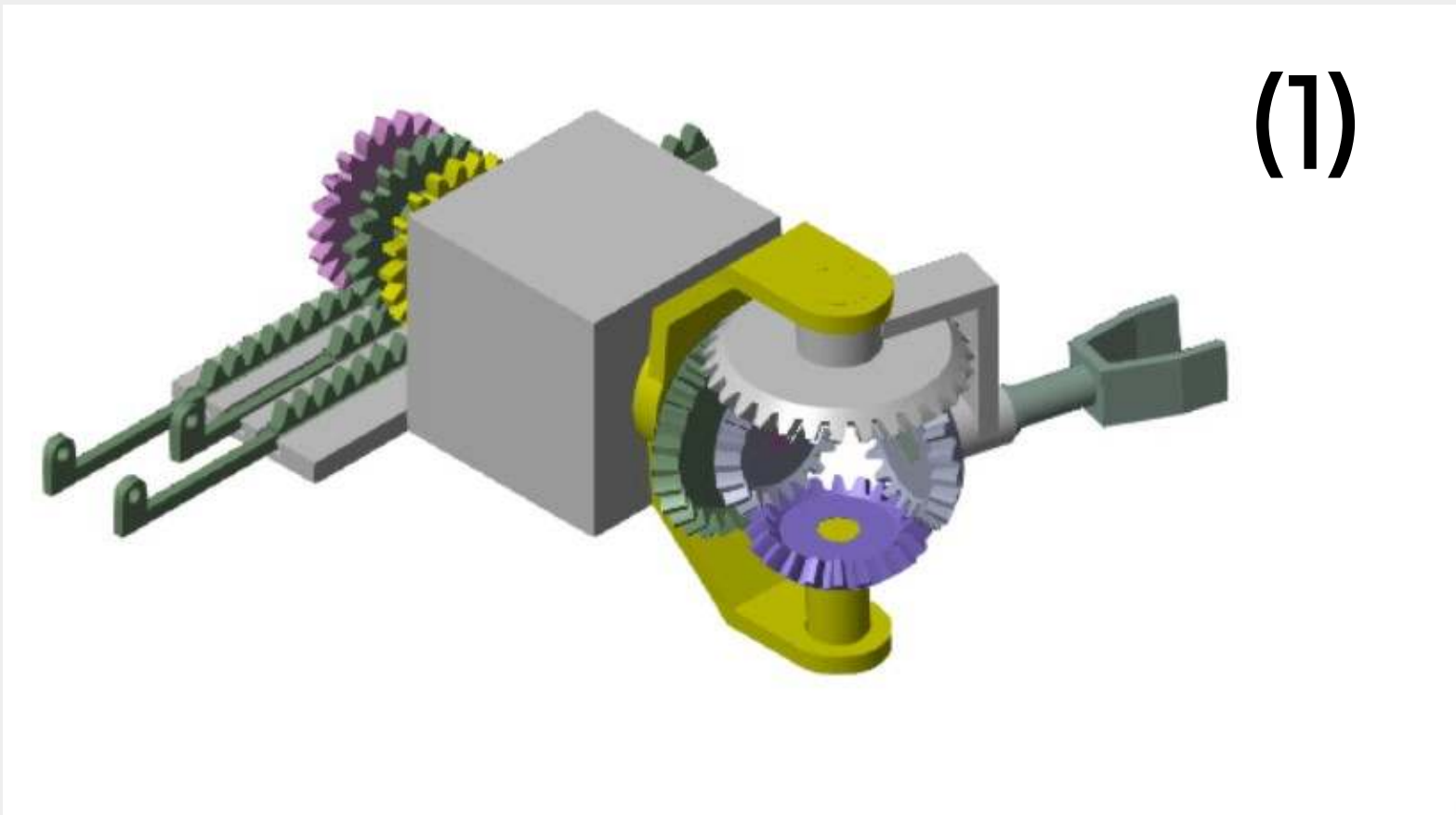
04 Mechanism 분석

속도비 분석



04 Mechanism 분석

속도비 분석



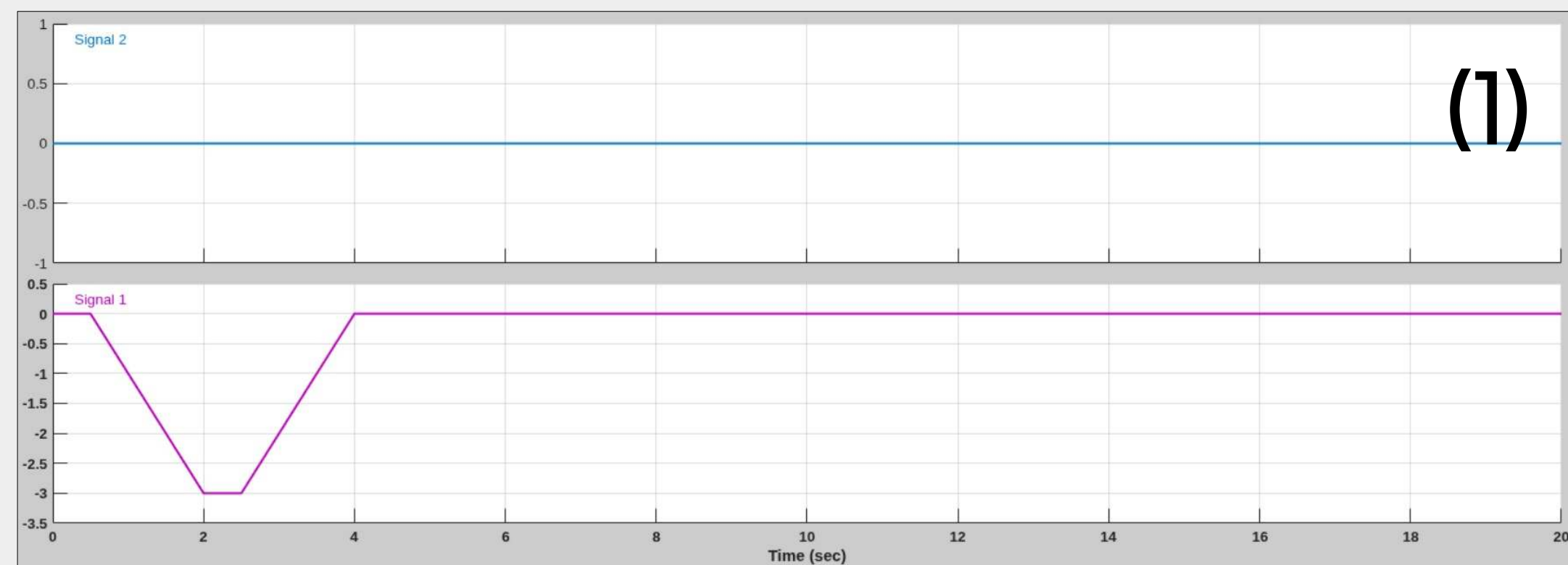
(1), (2) Output 차이점

- (1) - 초록색 피니언만 회전하는 경우
End Effector 몸체 회전하면서 이동
- (2) - 초록색 피니언과 분홍색 피니언 회전하는 경우
End Effector 몸체 고정된 상태로 이동

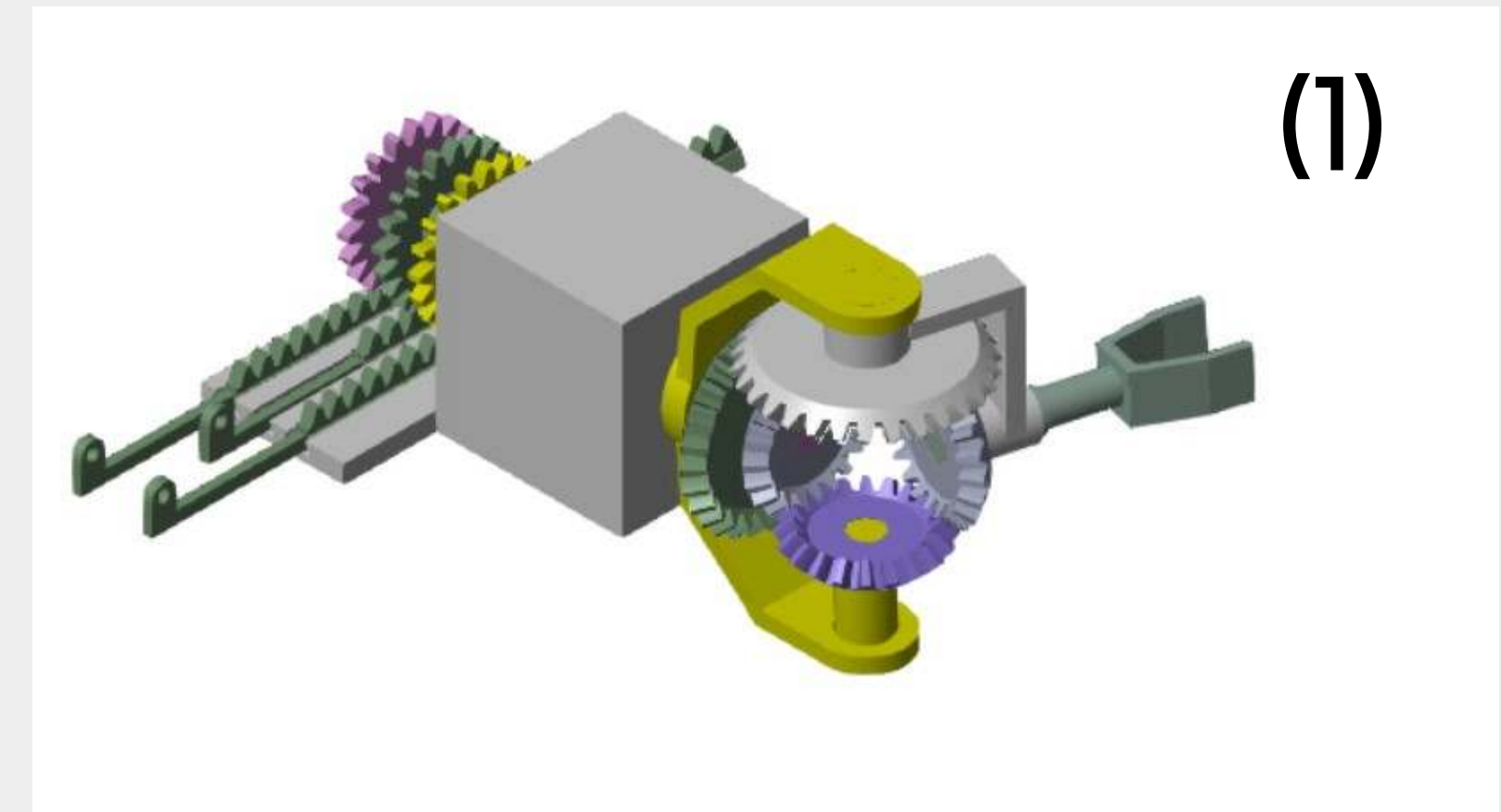
04 Mechanism 분석

속도비 분석

Input signal (Rack)



Output



분홍색 피니언 정지 → 회색 베벨기어 (small) 정지
초록색 피니언 회전 → 회색 베벨기어 (big) 회전

회색 베벨기어 (big) 회전에 따른 End Effector 위치 이동
이때 End Effector 의 베벨기어와 보라색 베벨기어 맞물림 → End Effector 베벨기어 회전축으로 회전 운동

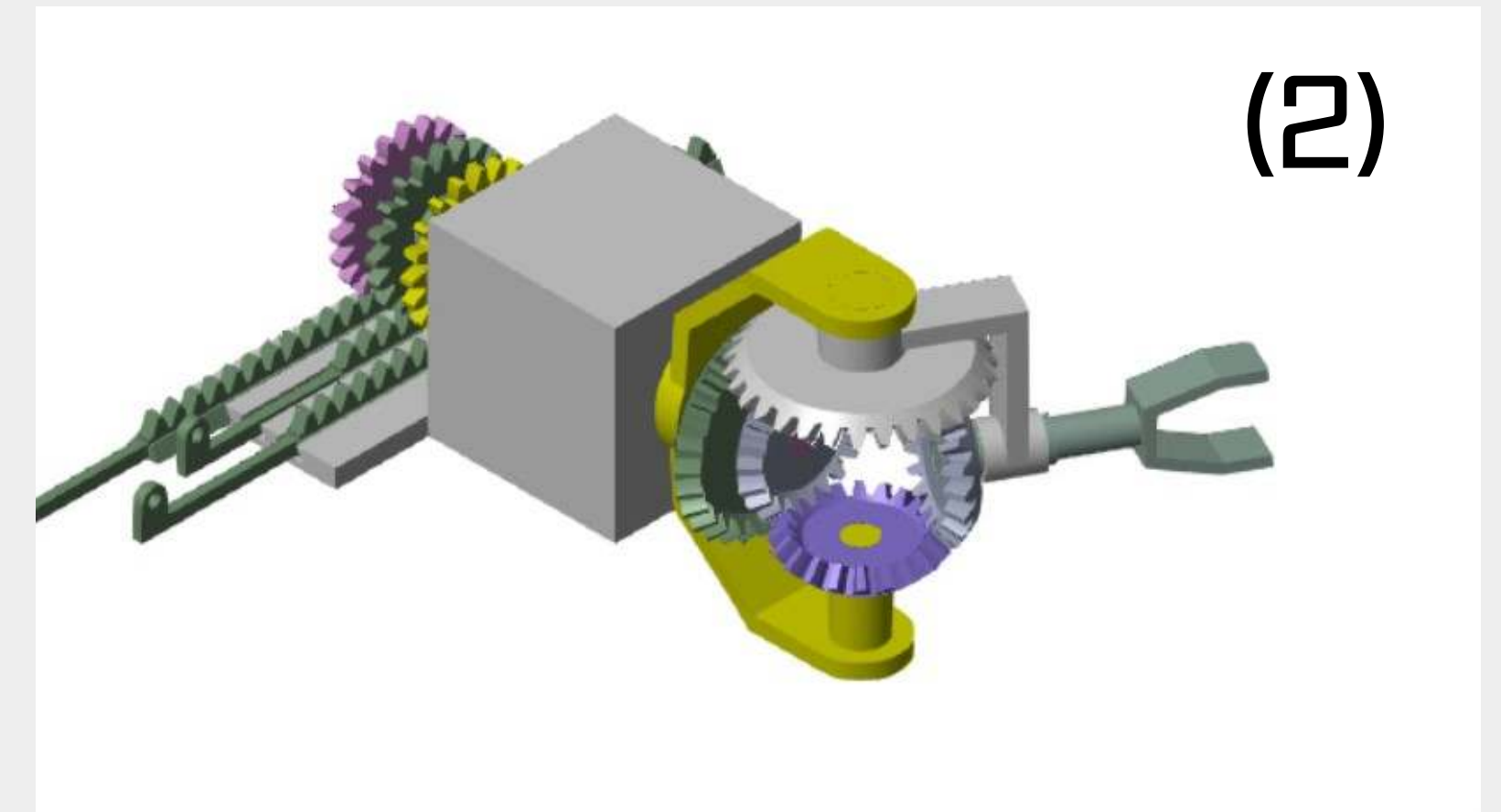
04 Mechanism 분석

속도비 분석

Input signal (Rack)



Output



분홍색 피니언 회전 → 회색 베벨기어 (small) 회전 (+)

초록색 피니언 회전 → 회색 베벨기어 (big) 회전 (-)

회색 베벨기어 (big) 회전에 따른 End Effector 위치 이동

이때 End Effector 의 베벨기어와 보라색 베벨기어 맞물림 → End Effector 베벨기어 회전축으로 회전 운동

04 Mechanism 분석

기구학적 설계

목표 거동 구현을 위한 입출력 설정

- 입출력 연동 : End Effector 가 원하는 타이밍에 3 축 회전을 수행하도록 관계 설정
- 초기 영점 동기화 : 구동 오차와 조인트 충격 방지를 위해 Prismatic 관절 초기 위치를 영점으로 맞춰 평형 상태 설정

정속 구동을 위한 정량적 입력 프로파일 도출

- 제어 방식 : Simscape 상의 입력단 신호 블록의 파라미터 기반 제어
- 프로파일 적용 : 피니언 반경 반영 → 랙의 선속도 입력으로 이에 따른 피니언 회전



〈Rack and Pinion Constraint: 피니언 반경 설정〉

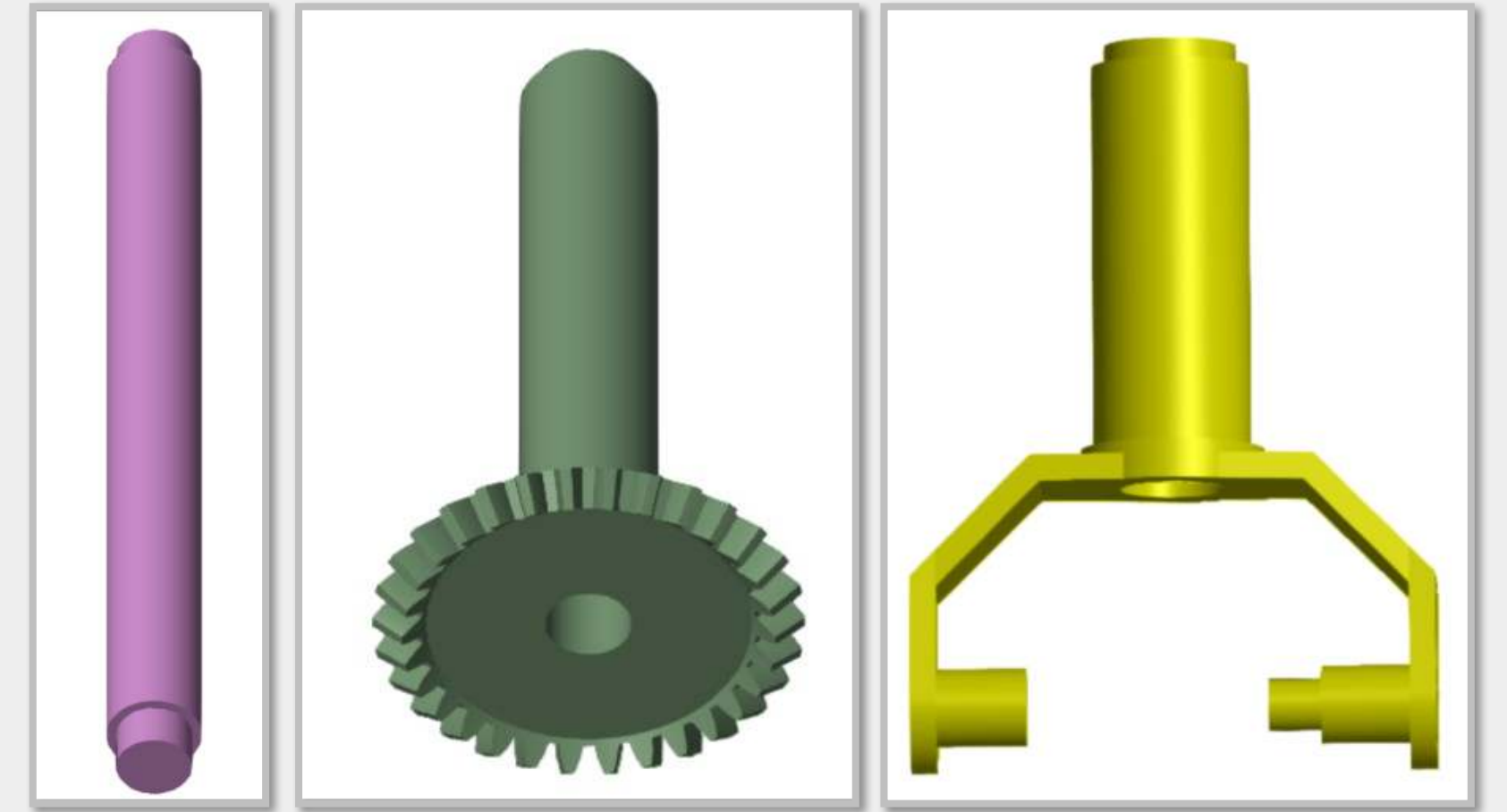
기어 구속 조건 설정

- 피니언 반경 구속을 기반으로 , 랙의 직선 구동력이 베벨 기어 체계의 조립 좌표축 (RigidTransform) 과 정밀하게 맞물려 연동되도록 조인트 제약 설정 .

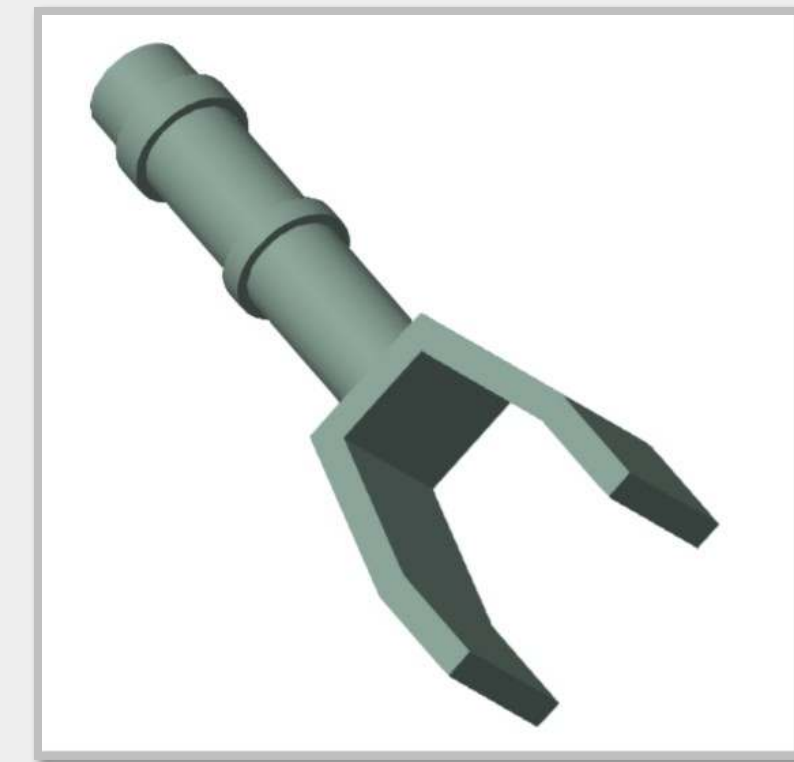
04 Mechanism 분석

특징

- 3 중 동축 링크 구조 : 내측, 중간, 외측 3 개의 파이프형 링크가 겹쳐진 독특한 직렬 구조
- 단일 원점 기반 공간 제어 : 3 축 기어 체계의 모든 회전 중심 좌표가 한 점에서 교차 (구면 관절)



〈 내측, 중간, 외측 파이프형 링크 〉



〈 말단부 링크 〉

- **말단부 링크 길이 변경의 유연성** : 말단부 링크 길이 및 형태가 변
모델링을 통한 가동 영역 확장 가능
- **구조적 회전 각도 한계** : 베벨 기어 치형의 물리적 맞물림 제한과
입력 랙의 직선 스트로크 한계로 인한 최대 회전각 제약

장점 및 단점

05 결론

진호경 (조장)	메커니즘 영상에 대해서 분석을 통해 구동 계획을 수립했기에 Matlab Simscape Multibody 시뮬레이션에서의 메커니즘 구현이 순탄하게 진행될 것으로 예상했지만 막상 프로그램을 통해 블록 구성 및 좌표계 설정 등의 본격적인 설정을 시작해보니 원인 모를 변수 오류와 조인트 구속 에러가 계속 발생하였다. 이를 해결하고 원하는 메커니즘을 구현하기 위해 많은 시간을 들여야 했다. 특히 모델의 완성도를 높이기 위해 마지막까지 치수와 좌표계를 정밀하게 다듬으며 모델링 역시 실제 설계만큼이나 엄격한 디테일이 필요함을 깨달았다.
김한나	이번 과제 활동을 통해 기구학에서 가장 기본이라 여겨지는 기어 메커니즘이 실제 구현 단계에서는 가장 까다롭고 정밀함을 요구한다는 것을 배울 수 있었다. 단순한 정속 회전 하나를 만들기 위해서도 여러 개의 기어와 조인트 구속 조건들이 유기적으로 맞물려야 함을 보며 기어 구속과 동력 전달 설계의 중요성을 깊이 체감할 수 있었다. 특히 복잡한 메커니즘을 구현하기 위해 각 기계 요소 간의 구속 관계를 설정하면서, 이론적으로만 배웠던 내용과 시스템의 역학적 연동 원리에 대한 이해를 심화하는 계기가 되었다.
박성환	복잡한 링크 구조 및 기어 구동의 기구학적 특성을 분석하고, 다축 기어 체계의 구동 신호를 입력하여 말단부의 다자유도 거동을 제어하는 시뮬레이션을 진행했다. 메커니즘을 연구한 끝에 의도한 대로 완벽히 움직였을 때 공학적으로 큰 성취감을 느꼈고, 복잡한 다축 결합 구조를 직접 다뤄보면서 메커니즘을 분석하는 시야가 확실히 넓어졌다. 특히 입력 신호를 변경해가며 메커니즘의 최종 거동을 원하는 형태로 완성했던 과정은, 엔지니어로서의 자신감을 키우는 계기가 되었다.
박효빈	매트랩을 활용한 시뮬레이션 선행 검증을 통해 실제 기계 설계와 마찬가지로 철저한 조건 검증이 선행되어야 함을 깨달았다. 가상 환경 내부에서 정밀한 구현을 위한 구속 조건을 설정하는 과정에서 수많은 시행착오를 겪었지만, 마침내 메커니즘이 의도대로 완벽하게 작동하는 모습을 보며 포기하지 않는 엔지니어링 마인드의 중요성을 배웠다. 메커니즘을 직접 구동해 보며 향후 메커니즘 설계 시 제어의 편의성까지 함께 고려해야 한다는 공학적 측면의 넓은 시야가 생겼다.

THANK YOU

Team 1

Leader : 진호경

Members : 김한나, 박성환, 박효빈