



RO:BIT
ROBOT SPORT GAME TEAM

JWM
Team. RO : BIT | **매니플레이터 입문**
지능형 로봇팀 16기 백종욱

들어가는 말

이 바이블은 2022년 1월 개발을 시작한 JWM(JongWook Manipulator)에 대해 정리한 것이다.

그동안 로봇에서 많은 매니퓰레이터들이 개발되었지만, JWM만의 장점은 모든 모터가 스마트 액추에이터로 이루어졌기 때문에, 제어가 매우 간편하다는 점이 있다. 또한 중력보상 구조를 통해 모터 토크 증대로 더 많은 페이로드를 확보하였다. 정단원이 되어 나에게 맡겨진 첫 프로젝트라 그런지 애착이 많이 가는 작품이기도 하다. JWM은 3학년이 되어 다른 업무를 맡으면서도 틈틈히 업그레이드했고, 기간으로 따지면 거의 2년의 시간이 걸렸다. 그 기간동안 정말 할 수 있는 것은 다 해봤고, 수많은 실패를 겪었다.

그렇기에 현재 로봇의 기자재(DXL PRO3개)와 가공환경(CNC)에서 나올 수 있는
최선의 매니퓰레이터라고 자신할 수 있다.

필자는 매니퓰레이터 바이블이 없어 초반 설계할 때 매우 애를 먹었던 경험이 있어,
매니퓰레이터를 개발하는 다음 기수 후배를 위해 나의 2년간 경험을 공유한다.
1학년 수준에서도 알아들을 수 있도록 최대한 쉽게 풀어 쓰려고 노력했다.

질문사항 있으면 부담없이 010 6888 7035 16기 백종욱

| 목차

1. 축, 링크, 모터

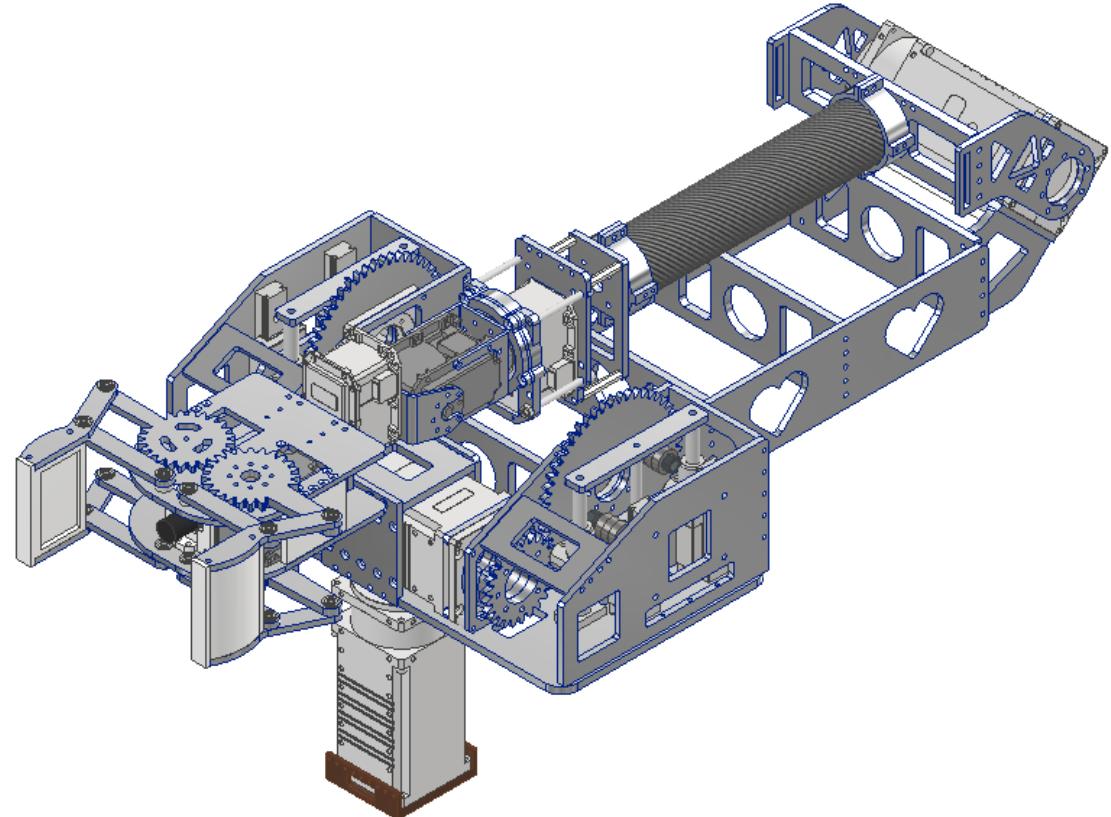
2. 토크 계산법

3. 감속 구조

└ 사이클로이드

└ 중력보상장치

4. 그리퍼





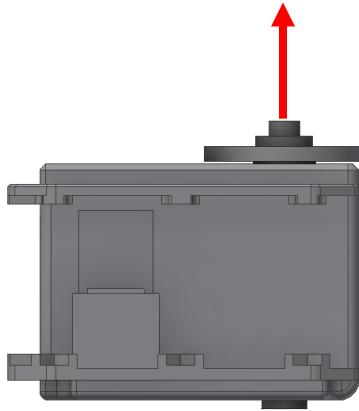
RO:BIT
ROBOT SPORT GAME TEAM

Team. RO : BIT | 축, 링크, 모터
16기 백종욱

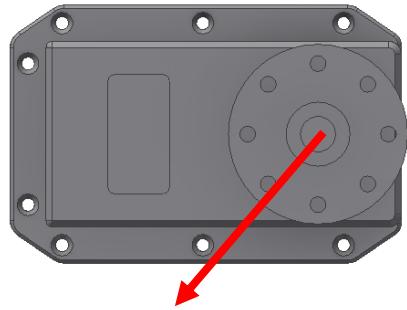
| 축 배치

롤(Roll) 피치(Pitch) 요(Yaw)

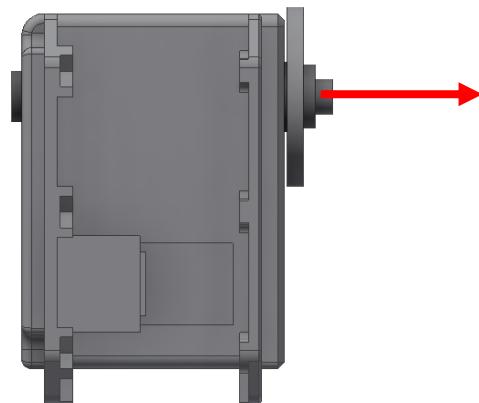
매니퓰레이터를 설계하기 위해 가장 먼저 알아야 할 개념은, 모터의 방향 개념이다. 축 방향을 기준으로 3가지 종류로 나뉜다.



**Yaw - Z축 기준 회전
(옆에서 봤을 때)**



**Pitch - Y축 기준 회전
(옆에서 봤을 때)**



**Roll - X축 기준 회전
(옆에서 봤을 때)**

| 축 배치



그 다음, DOF(자유도)를 설정한다. 자유도란, 쉽게 말해서 모터의 개수를 말한다고 생각하면 된다. (우리가 쓰는 매니퓰레이터는 프리즘 관절이 없으므로)

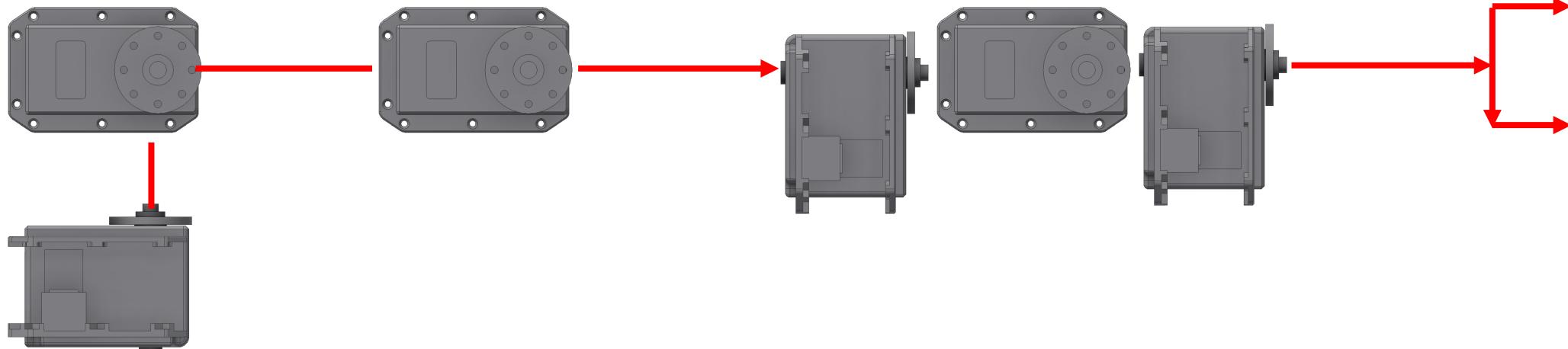
일단 우리는 3가지 경우를 선택할 수 있다.

3DOF, 4DOF, 6DOF 중에 하나를 선택해라. 근데 그냥 웬만하면 6DOF해라.

이 바이블도 6DOF를 기준으로 설명한다. 왜냐하면 6DOF가 제일 좋기 때문이다.

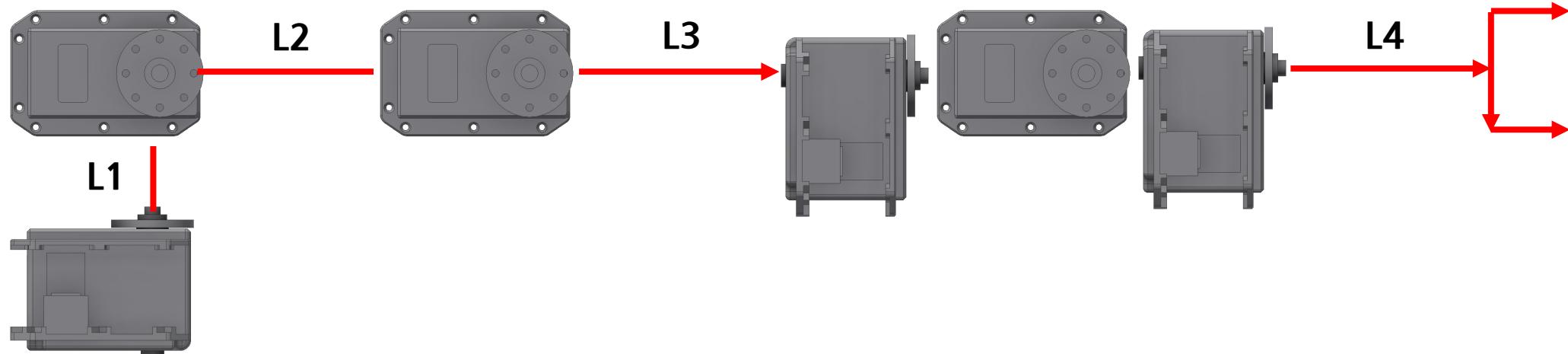
축 배치는 다음과 똑같이 해라. 안그럼 축 못풀어서 제어가 안된다.

(요-피치-피치-롤-피치-롤)



| 링크 길이 선정

축 배치를 완료했으면, 다음은 링크 길이를 정해야 한다.

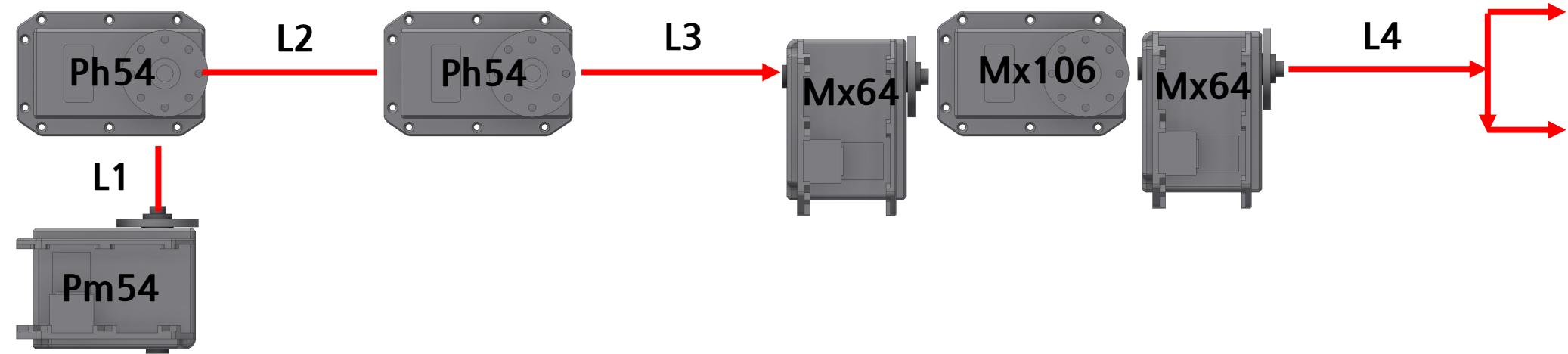


링크의 길이는 매니퓰레이터가 수행해야 하는 미션에 따라 정해야 한다,
기본적으로 룰북을 많이 읽고 결정하길 바란다.

(최대로 펴울 때 길이가 얼마까지 나올 수 있는지 고려)

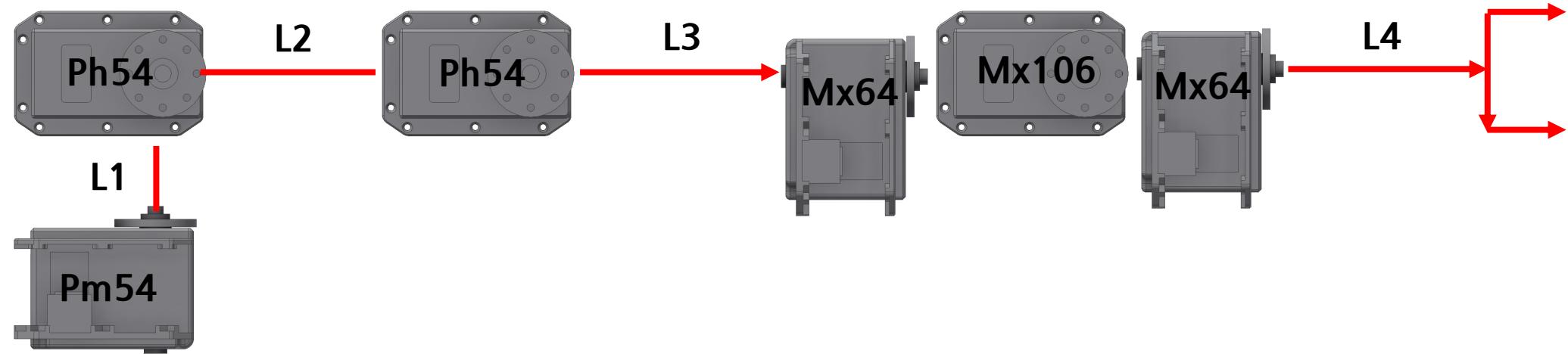
나중에 토크계산을 해보면 알겠지만, 링크의 길이가 길어질수록 모터에
무리가 간다. 따라서 미션 수행이 가능한 정도로 딱 맞추면 좋다.

모터 선정



다음으로 모터를 정해야 하는데, 이건 그냥 쓰던대로 써라. 이미 다 토크계산상
 현재 로봇이 보유한 모터들 중에서 최선의 배치이다.
 만약, 너의 선배들이 다이나믹셀 프로를 사준다면, 456축 모터에 적용해라.

모터 선정



다음으로 모터를 정해야 하는데, 이건 그냥 쓰던대로 써라. 이미 다 토크계산상
 현재 로봇이 보유한 모터들 중에서 최선의 배치이다.
 만약, 너의 선배들이 다이나믹셀 프로를 사준다면, 456축 모터에 적용해라.



RO:BIT
ROBOT SPORT GAME TEAM

Team. RO : BIT | 토크계산

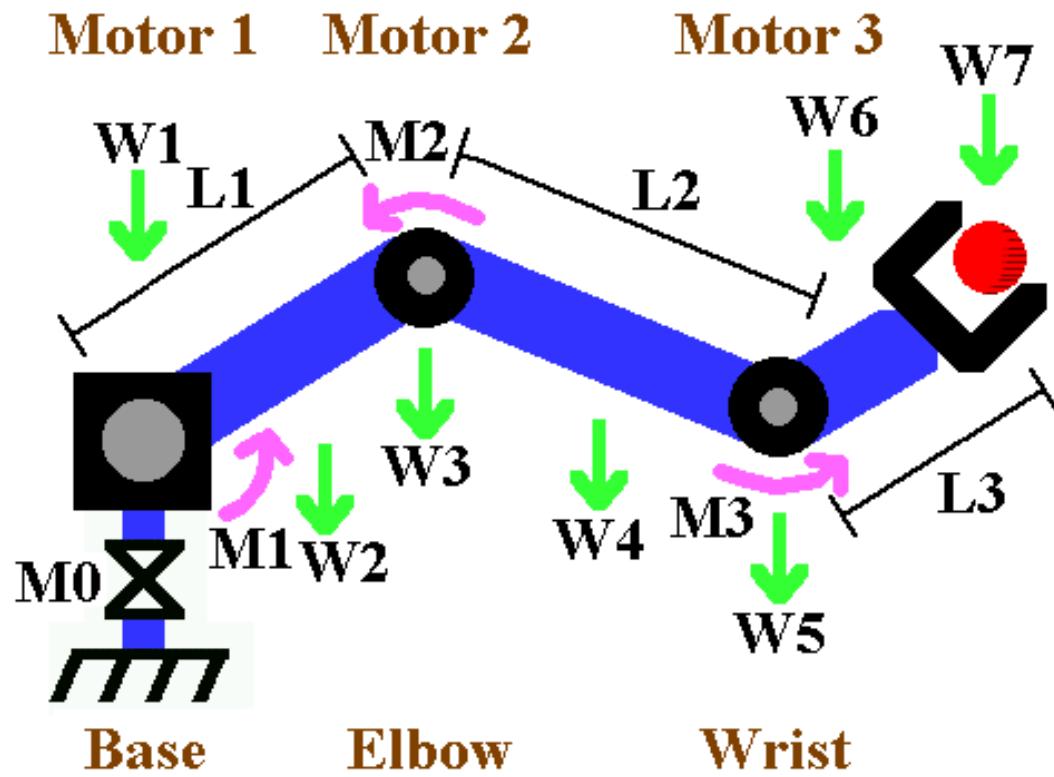
14기 김동환, 16기 백종욱

| 1. 토크계산

전 슬라이드의 표처럼 전년도 매니퓰레이터의 문제점을 분석하거나, 새로운 매니퓰레이터를 만들 때는 꼭 각 모터가 받는 토크를 먼저 계산해보기를 바란다. 그래야 모터선정이 용이하며, 감속비를 설정할 수 있고, 매니퓰레이터의 효율성을 높일 수 있다. 토크를 공식을 이용하여 구할 수도 있지만, 우리는 편리하게 자동으로 토크를 계산해주는 사이트를 이용할 것이다. 먼저, 아래의 링크에 접속한다.

토크계산 사이트:

https://www.societyofrobots.com/robot_arm_calculator.shtml



Enter in values for your robot arm.

Arm Lengths

Between each motor joint is an arm linkage L. Enter the length of each linkage. If a linkage does not exist in your design, set L to zero.

Select inches or meters	inches <input type="button" value="▼"/>
L1	5 <input type="text"/>
L2	5 <input type="text"/>
L3	5 <input type="text"/>

각 ARM의 길이를 입력

6DOF의 경우 L3는 M3에서부터 그립퍼 까지의 길이를 이용 한다.

Arm Weight

Now enter the weight of each arm linkage. The center of mass is assumed to be 1/2 of L. If a linkage does not exist, set the weight to zero.

Select pounds or kilograms	pounds		
W2	1	W4	1
W6	1	W7 (object weight)	1

모터를 제외한 ARM의 무게

무게가 없을 경우 0을 입력하며,
W6에는 그리퍼 까지의 무게를 입력
한다.

Motor Weight

Enter in the weight of each motor. Motor 1 is the base motor,
Motor 2 is the middle joint, and Motor 3 is the wrist motor.

Select pounds or kilograms	pounds
Base Motor M1	1
Joint Motor M2	1
Wrist Motor M3	1

모터 무게

모터의 무게를 입력한다.

Joint Rotational Acceleration

note: For some reason the result when adding in acceleration looks astronomically high, but I can't figure out for the life of me where my equation mistake is. Just leave these at 0 if you don't trust the result. Sorry! Look at my source if you think you can figure it out . .

For each joint to **rotate at a specific acceleration**, you need to add additional torque to what you need just for **static lifting**. Fill in the acceleration you want for each joint.

V0	30	degrees/s ²
V1	30	degrees/s ²
V2	30	degrees/s ²
V3	30	degrees/s ²

가속도

가속도에 따라 결과 값이 매우 달라
진다.
값에 0을 넣어 이용한다.

Motor Efficiencies

Motors and gearing are never 100% efficient. Enter expected efficiency. If you are unsure about efficiency, check out my [gearing efficiency tutorial](#).

M1	90	%	M2	90	%	M3	90	%
----	----	---	----	----	---	----	----	---

모터 효율

최대 90%를 입력해서 사용한다.
베벨 기어의 경우 70%를 이용한다.

Torque Results

These are the finished results. This is the maximum torque that each motor requires to lift both the arm and the given object weight at full extension at required velocity. Shorter arms and lower weights reduce required torque.

Select Units	pound*inch
Motor 0 Torque M0	298
Motor 1 Torque M1	356
Motor 2 Torque M2	137
Motor 3 Torque M3	26.5

결과

출력 된 결과값에 1.5배를 가지는 모터를 이용해서 사용해야한다.

Misc Results

Useful information to help you with other parts of your robot design. For the [encoder](#) calculation, this will tell you the expected typical positioning error due to the base motor encoder. If you are using a servo for the base motor, enter 360. Shorter arms and higher resolutions decrease error.

Total Weight	7.00	lb
Enter Base Motor Encoder Res.	360	Ouput Arm Accuracy (inches)

1. 토크계산

- 2022 국방로봇대회
매니퓰레이터의 최종 토크

Arm Lengths

Between each motor joint is an arm linkage L. Enter the length of each linkage. If a linkage does not exist in your design, set L to zero.

Select inches or meters	meters ▾
L1	0.46
L2	0.2
L3	0.26

1. 토크계산

- 2022 국방로봇대회
매니퓰레이터의 최종 토크

Arm Weight

Now enter the weight of each arm linkage. The center of mass is assumed to be 1/2 of L. If a linkage does not exist, set the weight to zero.

Select pounds or kilograms			kilograms ▾
W2	0.96	W4	1.03
W6	0.8	W7 (object weight)	0

Motor Weight

Enter in the weight of each motor. Motor 1 is the base motor, Motor 2 is the middle joint, and Motor 3 is the wrist motor.

Select pounds or kilograms	kilograms ▾
Base Motor M1	0.86
Joint Motor M2	0.86
Wrist Motor M3	0.16

1. 토크계산

- 2022 국방로봇대회
매니퓰레이터의 최종 토크

Joint Rotational Acceleration

note: For some reason the result when adding in acceleration looks astronomically high, but I can't figure out for the life of me where my equation mistake is. Just leave these at 0 if you don't trust the result. Sorry! Look at my source if you think you can figure it out . . .

For each joint to **rotate at a specific acceleration**, you need to add additional torque to what you need just for **static lifting**. Fill in the acceleration you want for each joint.

V0	0	degrees/s ²
V1	0	degrees/s ²
V2	0	degrees/s ²
V3	0	degrees/s ²

Motor Efficiencies

Motors and gearing are never 100% efficient. Enter expected efficiency. If you are unsure about efficiency, check out my **gearing efficiency tutorial**.

M1	90	%	M2	90	%	M3	90	%
----	----	---	----	----	---	----	----	---

1. 토크계산

2022 국방로봇대회 매니퓰레이터의 최종 토크
(아무것도 잡지 않은 상태일 때 && 매니퓰레이터를 최대로 펼쳤을 때)

Select Units	newton*meter ▾
Motor 0 Torque M0	0.00
Motor 1 Torque M1	21.0
Motor 2 Torque M2	4.35
Motor 3 Torque M3	1.13



RO:BIT
ROBOT SPORT GAME TEAM

Team. RO : BIT | 감속기 선정
16기 백종욱

| 2022 국방로봇대회 서류 심사 코멘트

- 실외환경에서의 낙오자 인식 시 적군과의 구분에 대한 방안 보완 필요

→ 딥러닝을 활용하여 군복 차이를 통한 적군과 아군의 구분

- SLAM 기능 구현 매우 우수
통신거리가 2km로 매우 뛰어난데 본선에서 구체적으로 설명을 요함

- Manipulator의 Payload가 너무 작음(2.5kg)
→ payload 증가 방법 모색

| 감속 구조 선정

고찰

Manipulator 하드웨어 :

1. 기본적으로 축을 풀기에 불리한 하드웨어. 4번째 축을 yaw축 방향으로 회전하게 하는 것이 일반적.
2. 모든 미션을 수행하기에 토크가 약했음. 이는 다이나믹셀의 한계 -> 한계 보완할 방법 생각해야함.
3. 배선 및 선 길이 문제, 선들이 너무 팽팽하여 중간에 선이 뽑히는 문제 발견. 좀더 여유롭게 하기.
4. Gripper의 크기. 너무 크다. 더 단순하면서 작게 만들어야 미션 수행에 유리.

| 주제선정동기

**2022 국방로봇대회 매니퓰레이터의 최종 토크
 (0kg물체 파지시 && 매니퓰레이터를 최대로 펼쳤을 때)**

Select Units	newton*meter ▾
Motor 0 Torque M0	0.00
Motor 1 Torque M1	21.0
Motor 2 Torque M2	4.35
Motor 3 Torque M3	1.13

PH54 정격 : 약 44.1 Nm

PH54 정격 : 약 44.1 Nm

MX106최대출력 : 약 8.0 Nm

| 주제선정동기

2022 국방로봇대회 매니퓰레이터의 최종 토크 (2.5kg물체 파지시 && 매니퓰레이터를 최대로 펼쳤을 때)

weights reduce required torque.

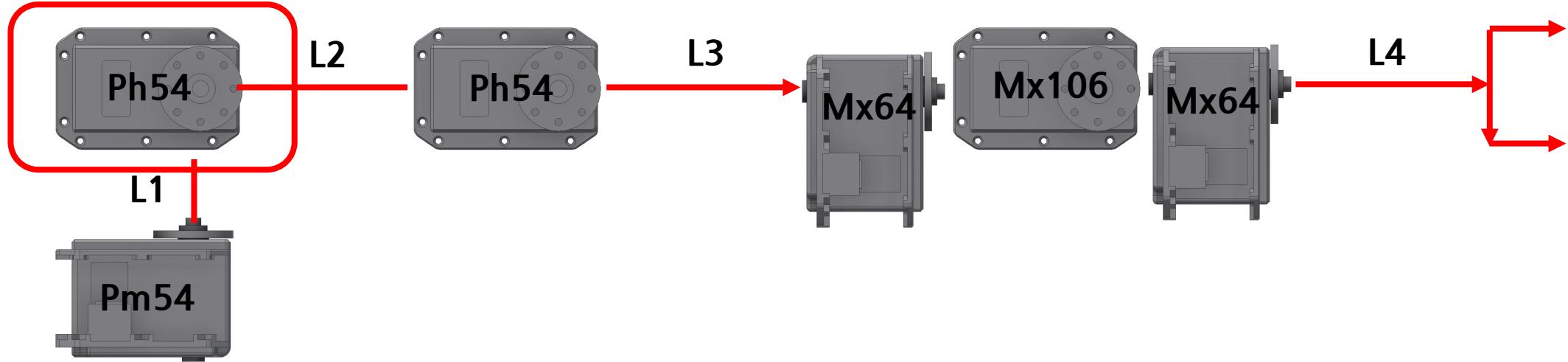
Select Units	newton*meter ▾
Motor 0 Torque M0	0.00
Motor 1 Torque M1	46.1
Motor 2 Torque M2	16.9
Motor 3 Torque M3	8.22

PH54 정격 : 약 44.1 Nm

PH54 정격 : 약 44.1 Nm

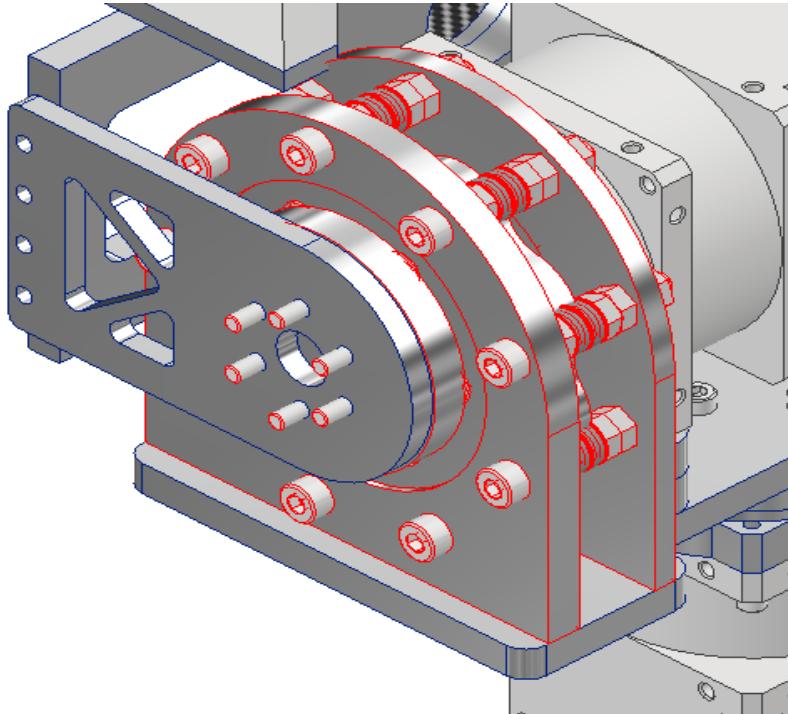
MX106 최대출력 : 약 8.0 Nm

감속 구조 선정

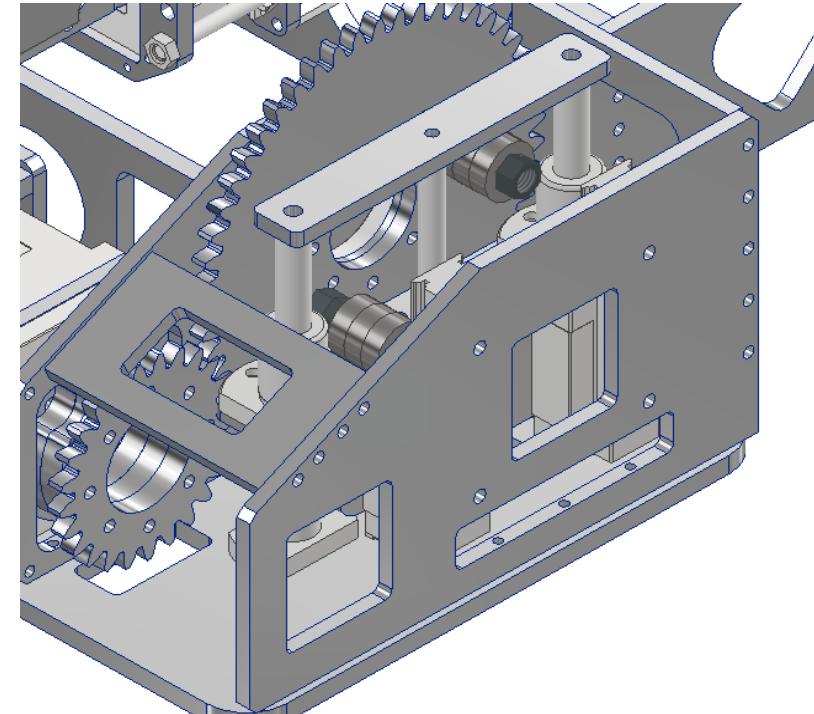


매니퓰레이터 2번 조인트에 대한 토크 문제는 예전부터 지속되었던 문제다.
 피치축에 중력 토크가 발생함에 따라, 모터에 걸리는 토크가 6개의 모터들 중 가장 크다.
 따라서 작업 중 모터가 죽는 경우가 많이 발생하였다.
 그로 인해 감속 구조가 필수적으로 필요한데, 감속 구조로는 크게 3가지가 있다.
 내가 써본 2가지 방법에 대해 소개한다.

| 감속 구조 선정



사이클로이드 감속기



중력 보상 장치



RO:BIT
ROBOT SPORT GAME TEAM

Team. RO : BIT | Cycloid Gear Design
14기 엄일영, 16기 백종욱

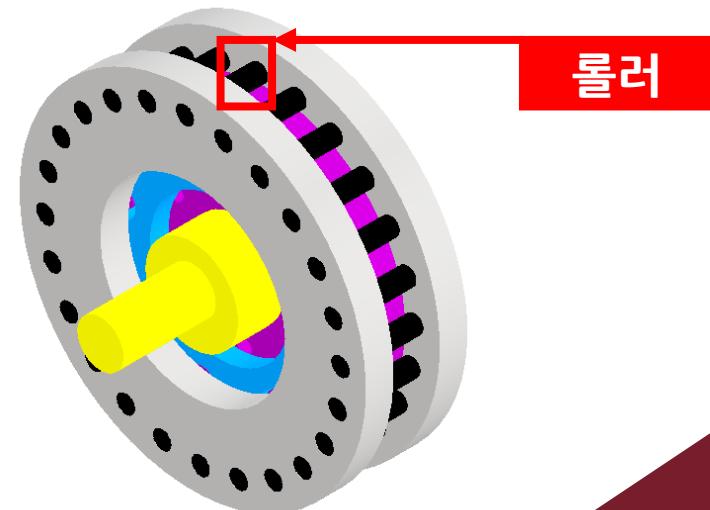
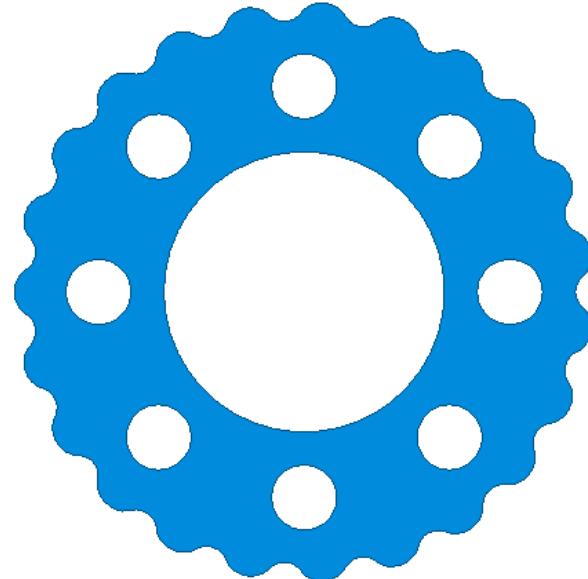
| 1. 사이클로이드 디스크 설계

사이클로이드 디스크에는 총 4개의 파라미터가 존재

1. R = 입력축에서 롤러 중심까지의 거리
2. E = 편심 (사이클로이드가 그리는 궤적의 반지름)
3. N = 감속비
4. R_r = 롤러의 반지름

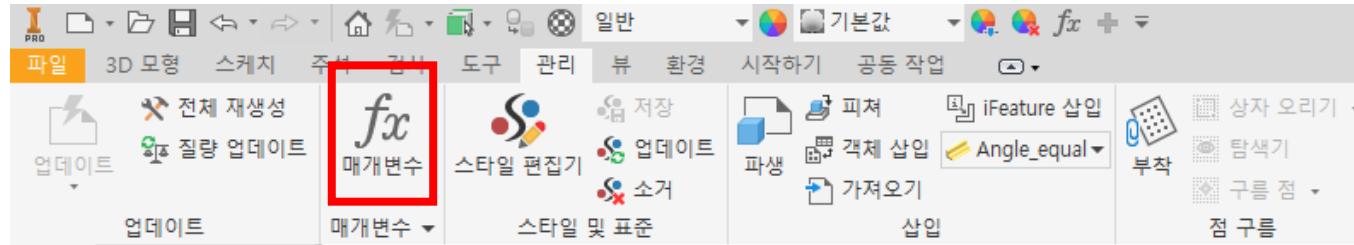
롤러란?

사이클로이드 디스크의 돌출부와 직접 접촉하는 부분. 감속비와 개수가 동일하다. 주로 베어링 등을 사용한다.



1. 사이클로이드 디스크 설계

먼저 인벤터 상에서 4개의 파라미터값을 지정해주어야 한다.

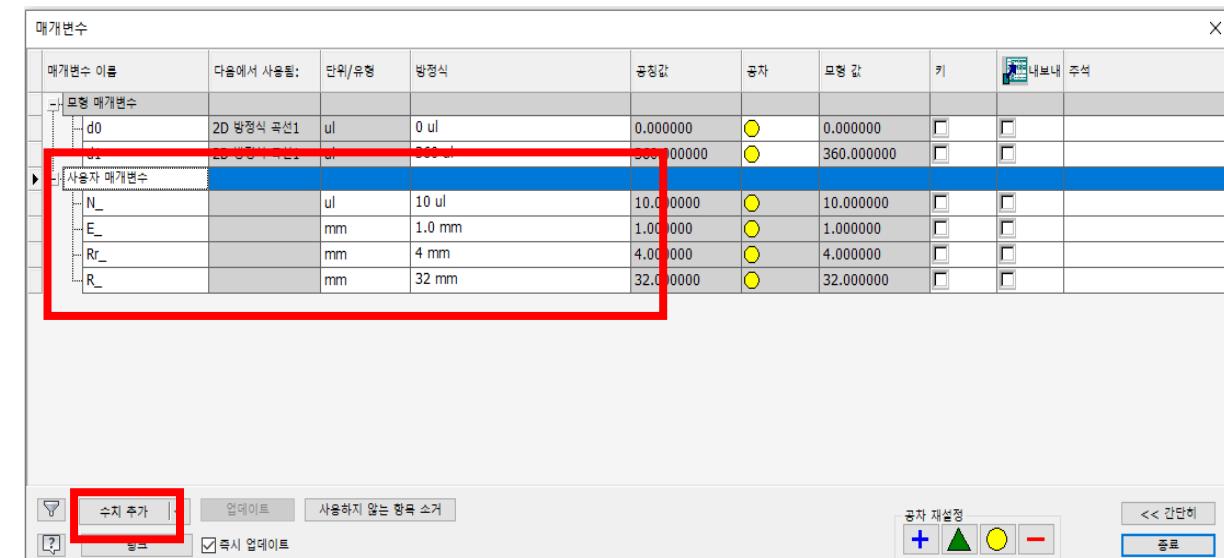


관리 탭에서 매개변수 클릭!

사용자 매개변수 클릭 후

수치 추가 버튼 눌러 4개의 파라미터값 입력(단, 알파벳만으로 이름 지정이 되지 않으니 이름 끝에 _를 붙인다. 시범 제작을 해보고 싶다면 아래 표대로 기입하자. (N의 단위가 ul인 것에 주의)

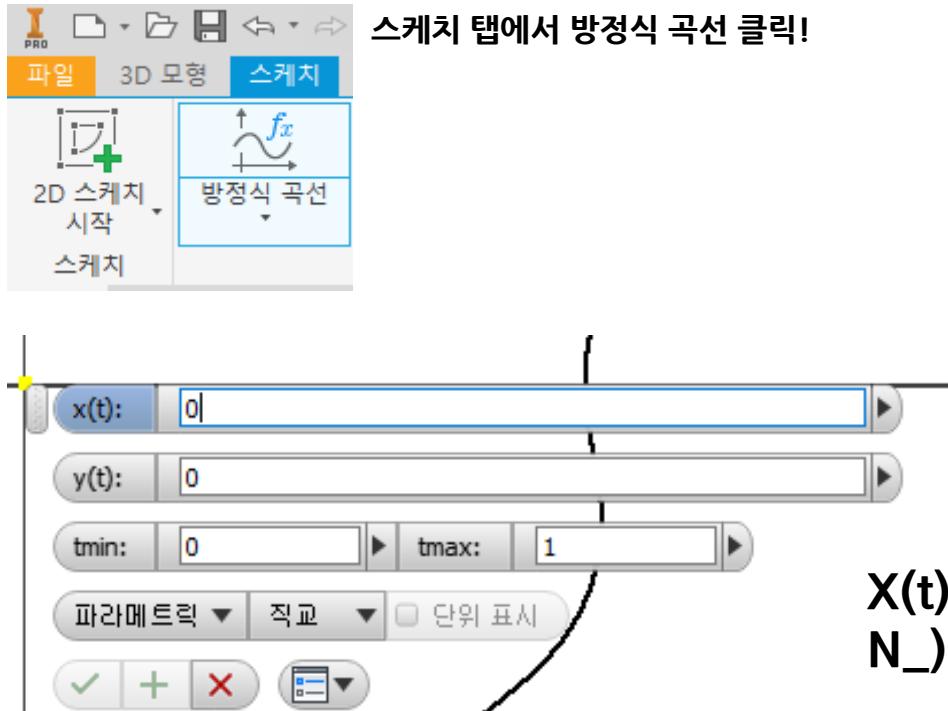
	A	B	C	D
1	N_	24	ul	Reduction Ratio
2	E_	1	mm	Eccentric Radius
3	Rr_	2	mm	Radius fo Outer Rollers
4	R_	32	mm	Distance to Outer Rollers



출처: 엄일영 선배님 로봇게임세미나 발표자료

1. 사이클로이드 디스크 설계

INVENTOR 상에서 사이클로이드 디스크의 궤적을 그리기 위해서는 앞서 설명한 4개의 파라미터를 이용한 방정식을 사용한다.



스케치 탭에서 방정식 곡선 클릭!

이러한 창이 뜰 것이다. 여기의 x, y에 아래의 식을 복붙한다.
그다음 Tmin = 0, Tmax = 360을 입력한다.

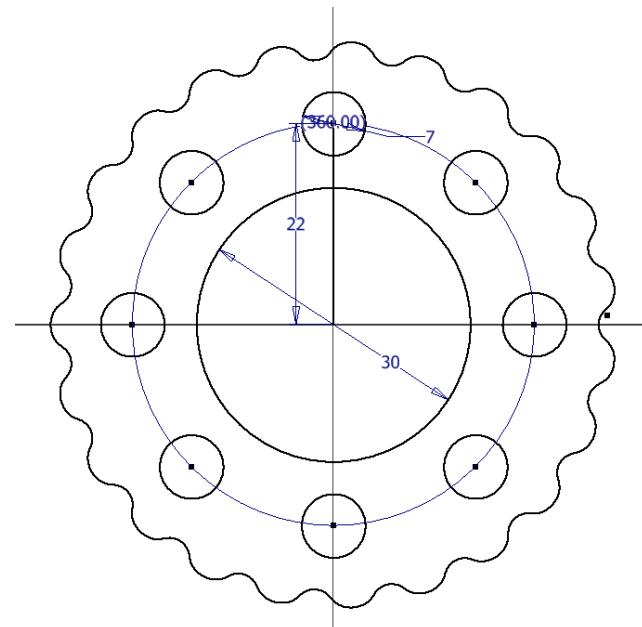
$$X(t) : \left(R_* \cos(t) - \left(Rr_* \cos(t + \arctan(\sin((1-N_*)t) / ((R_*/(E_*N_*) - \cos((1-N_*)t)))) \right) - (E_* \cos(N_*t)) \right)$$

$$Y(t) : \left(-R_* \sin(t) + \left(Rr_* \sin(t + \arctan(\sin((1-N_*)t) / ((R_*/(E_*N_*) - \cos((1-N_*)t)))) \right) + (E_* \sin(N_*t)) \right)$$

1. 사이클로이드 디스크 설계

그러면 다음과 같이 사이클로이드 디스크의 궤적이 그려지게 된다.

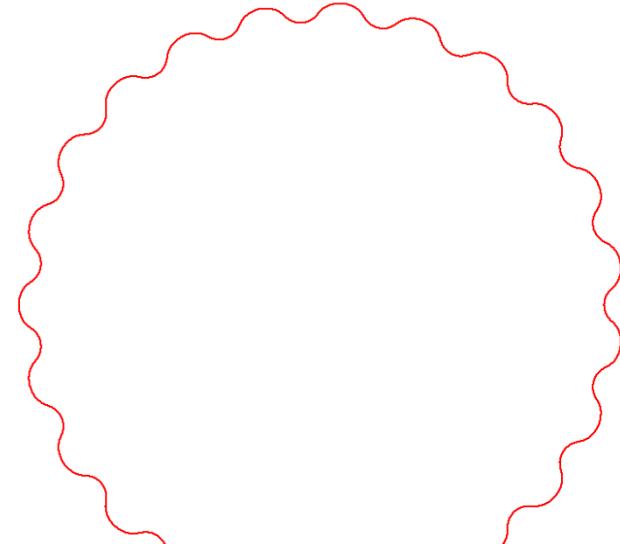
다음으로, 원형 패턴을 이용하여 출력 디스크의 돌출부와 맞물려 출력 디스크가 돌아가도록 하는 구멍을 뚫어 주어야 한다. 구멍은 6개 혹은 8개 정도를 추천한다.
(이 부분은 뒤에 출력 디스크를 제작하다보면 이해가 될 것이다.)



적당한 지름의 원 8개를 중심점 기준으로 뚫었다.

또한, 크랭크축과 직결되는 베어링이 들어갈 구멍을 가운데
크게 뚫어준다.
(이 부분은 크랭크 축을 제작하다보면 알 수 있을 것이다.)

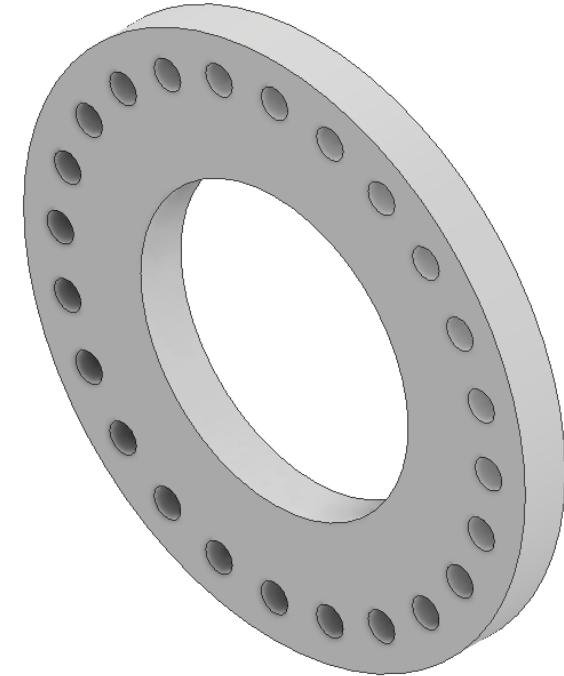
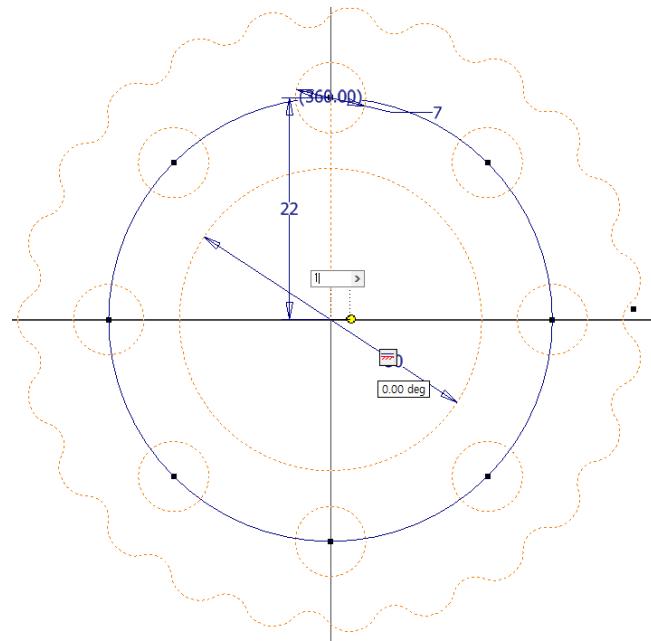
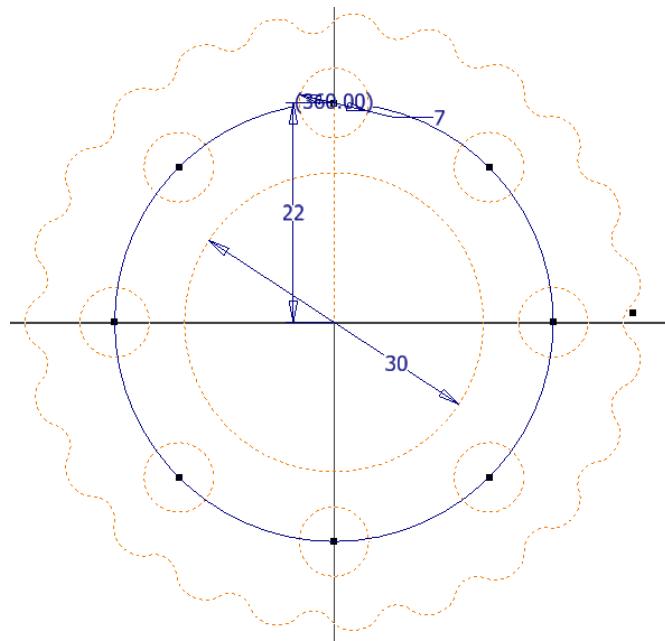
이 과정까지 완료했다면, 사이클로이드 디스크 설계를 완료한 것이다!



| 2. 롤러 하우징 설계

롤러 하우징은 사이클로이드 감속기의 맨 바깥쪽에 위치하는 부품으로, 롤러들을 체결하는 부품임과 동시에 사이클로이드 디스크를 보호하는 역할을 한다.

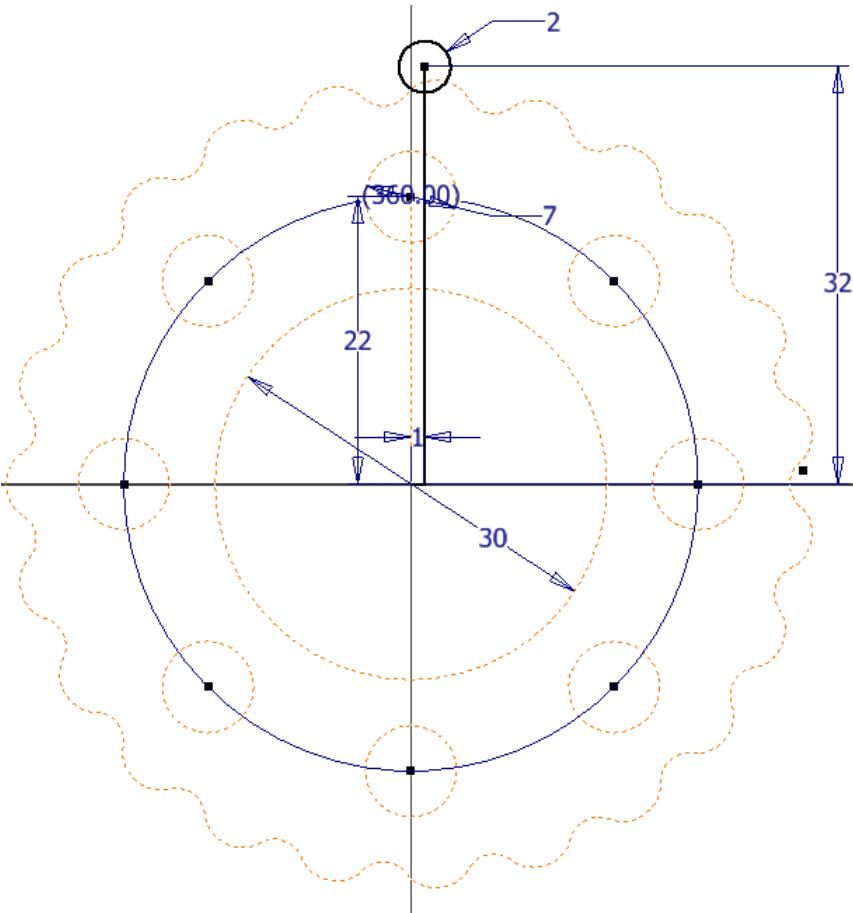
먼저, 새 스케치에 아까 설계한 사이클로이드 디스크를 복붙하여 구상선처리한다,



그리고 중심점으로부터 아까 전 매개변수로 설정한 편심(E)만큼 직선을 그린다.

| 2. 롤러 하우징 설계

사이클로이드의 중심점으로부터 편심만큼 이동한 이 지점이, 롤러 하우징의 중심점 이자 입력축이 된다.



이제 롤러가 들어갈 구멍을 만들어 준다. 우리는 아까 4개의 파라미터 중 R (입력축에서 롤러 중심까지의 거리)를 기억할 것이다.

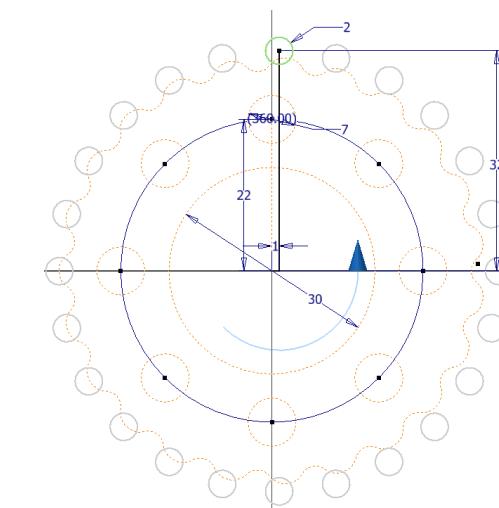
입력축은 알아냈으니, 그 점에서부터 R 만큼의 거리에 롤러의 중심이 있을 것이다.

입력축에서 R 만큼 직선을 그리고, 그 점에서 롤러(반지름: Rr) 혹은 롤러와 직결되는 축을 그려준다.

그리고 이 원을 입력축을 기준으로 N 개(감속비)만큼 패턴을 그려준다.

그다음 입력축을 기준으로 크랭크 축의 입력축과 직결되는 베어링의 직경만큼 구멍을 뚫어준다.

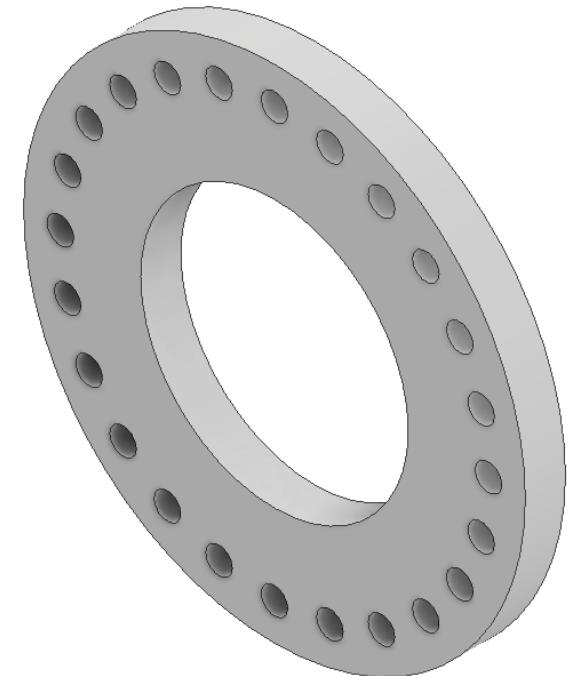
이 과정까지 마쳤다면 완성!!



| 3. 캡 하우징 설계

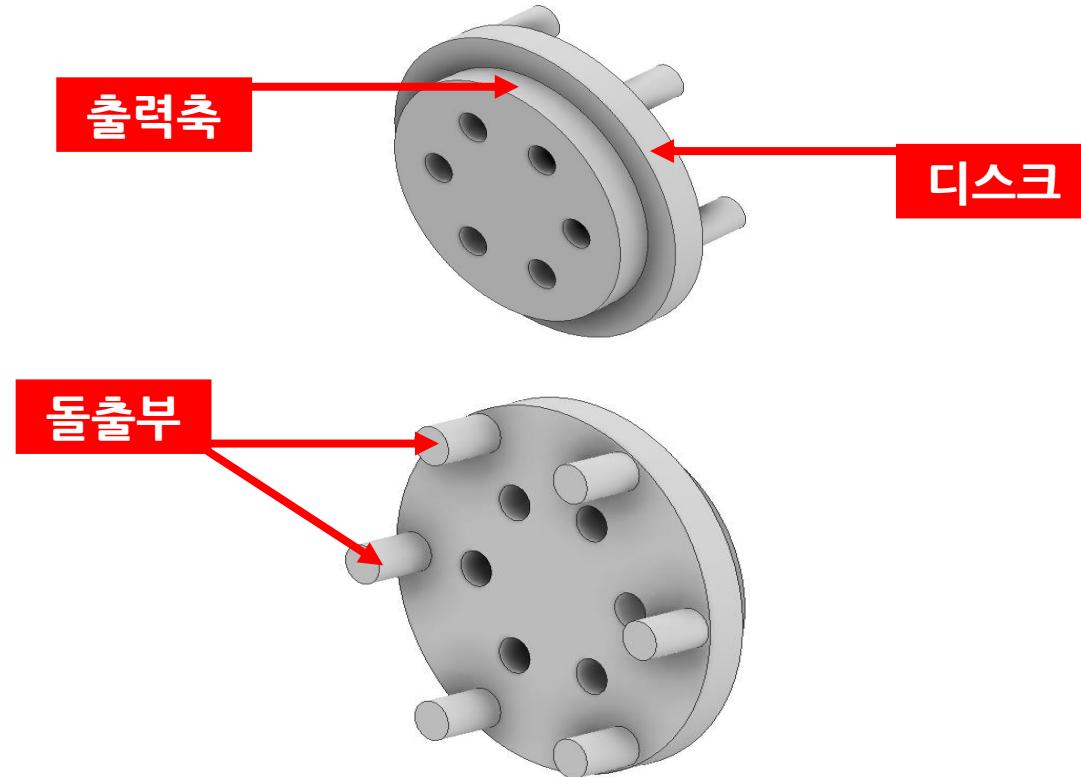
캡 하우징은 롤러 하우징과 그 역할과 설계법이 동일하다. 차이점이 있다면, 롤러 하우징은 입력축이 결합되는 부품이라면, 캡 하우징은 출력 디스크가 결합되는 부품이다.

롤러 하우징을 복붙한 후, 가운데 구멍만 출력 디스크의
출력축에 맞추어 구멍의 크기를 조정하면 완성!!



| 4. 출력 디스크 설계

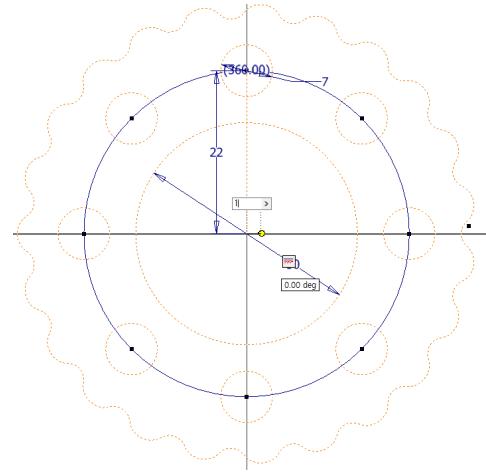
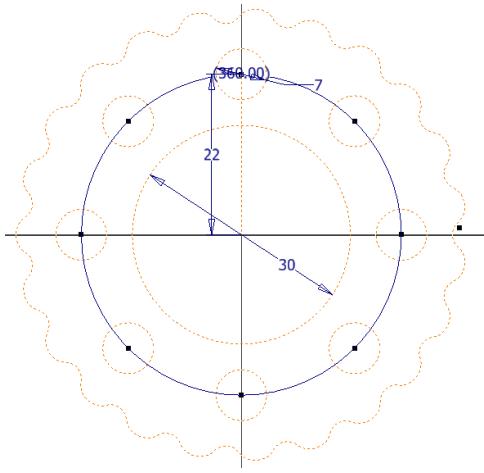
출력 디스크는 사이클로이드 디스크와 직접적으로 마찰되며 최종적으로 기어비가 적용되는 부품이다. 출력 디스크는 크게 3부분으로 나눌 수 있다. 각각 출력축, 디스크, 그리고 돌출부이다.



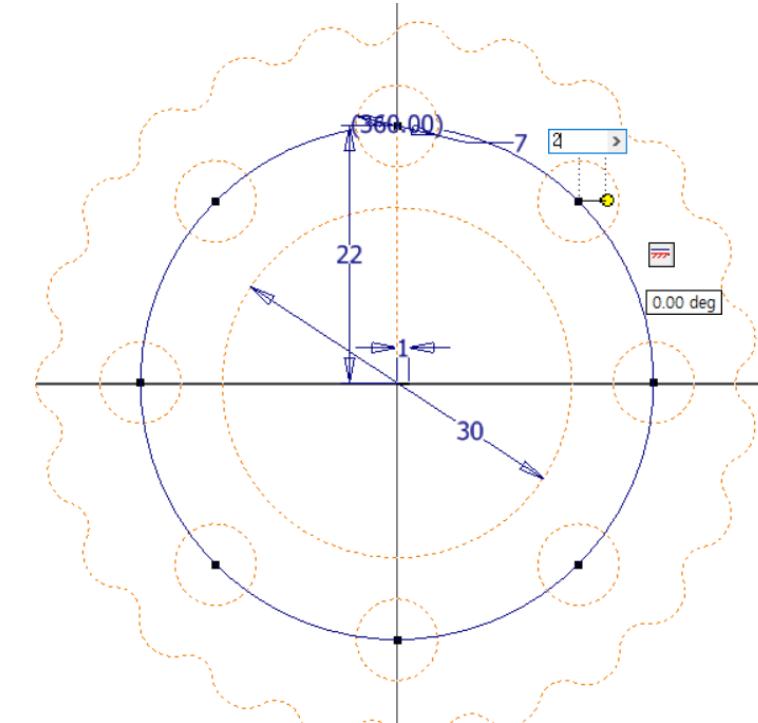
| 4. 출력 디스크 설계

먼저, 하우징을 만들 때처럼 새 스케치에 아까 설계한 사이클로이드 디스크를 복붙하여 구상선처리한다,

그리고 중심점으로부터 아까 전 매개변수로 설정한 편심(E)만큼 직선을 그린다.

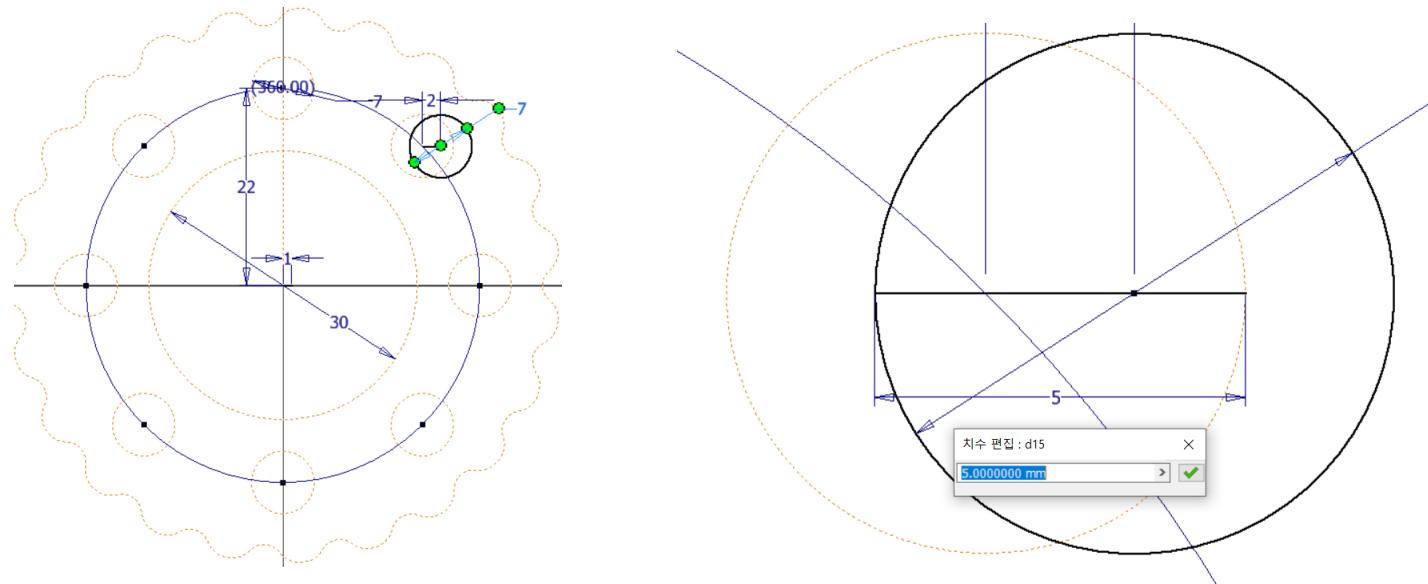


그리고, 아까 사이클로이드 디스크에서 구멍을 6개 혹은 8개 뚫었던 것을 기억할 것이다. 그 구멍중 하나의 중심점에서, 편심을 그린 방향과 동일한 방향으로 편심*2의 직선을 그린다. (옆 그림 참고)



| 4. 출력 디스크 설계

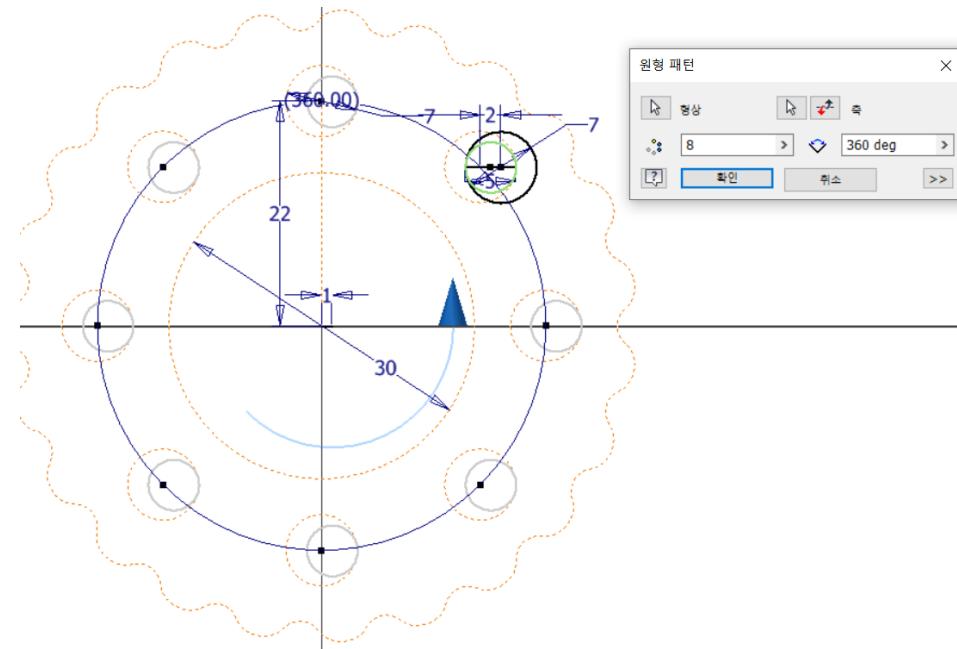
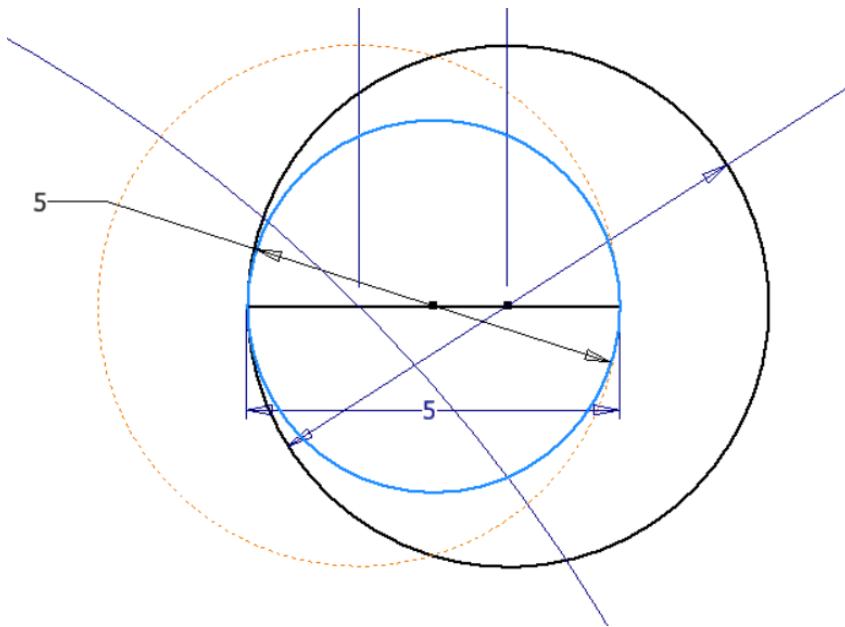
그리고 그 점에서, 사이클로이드 디스크 구멍과 동일한 직경의 원을 하나 그린다, (아래 그림에서는 7mm)



그러면 위 그림과 같이 사이클로이드 디스크 구멍과 새로 그린 원이 교집합을 이루는 것을 확인할 수 있다. 그 교집합의 최대 지름으로 직선을 그려준다. (위 그림에서는 5mm)

4. 출력 디스크 설계

그 직선의 중심점에서, 그 직선의 길이를 지름으로 하는 원을 하나 그린다. 그려보면 아래 그림과 같이 교집합에 꽉 차는 원이 그려지게 될 것이다.

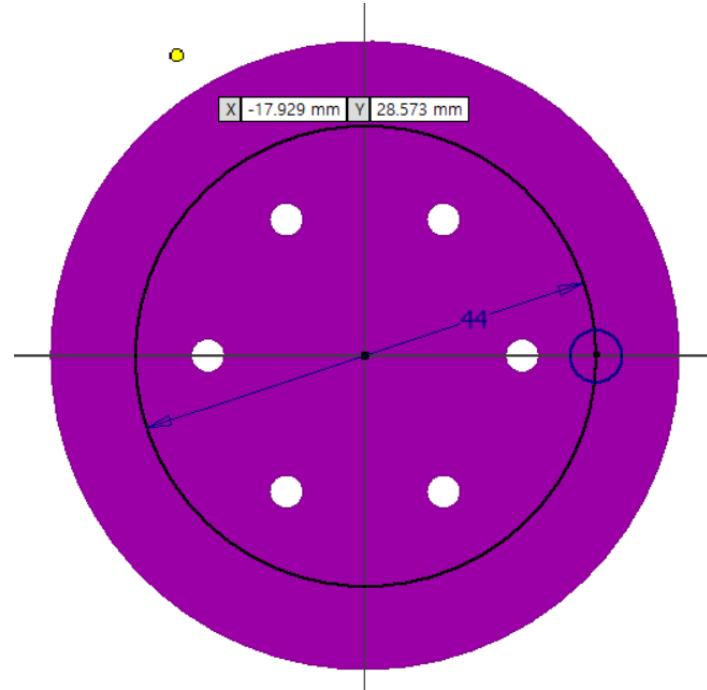


그리고 그 원을 **출력축을 중심으로**(사이클로이드 디스크 중심점X) 사이클로이드 디스크에 낸 구멍의 수만큼 패턴을 그려준다. 그러면 위 그림처럼 모든 원들이 사이클로이드 구멍에 동일한 방향으로 접해 있는 것을 확인할 수 있다. (만약 동일한 방향으로 접해 있지 않다면, 중심축을 잘못 설정한 것이다.)

이 원들이 바로 출력 디스크의 돌출부가 된다.

4. 출력 디스크 설계

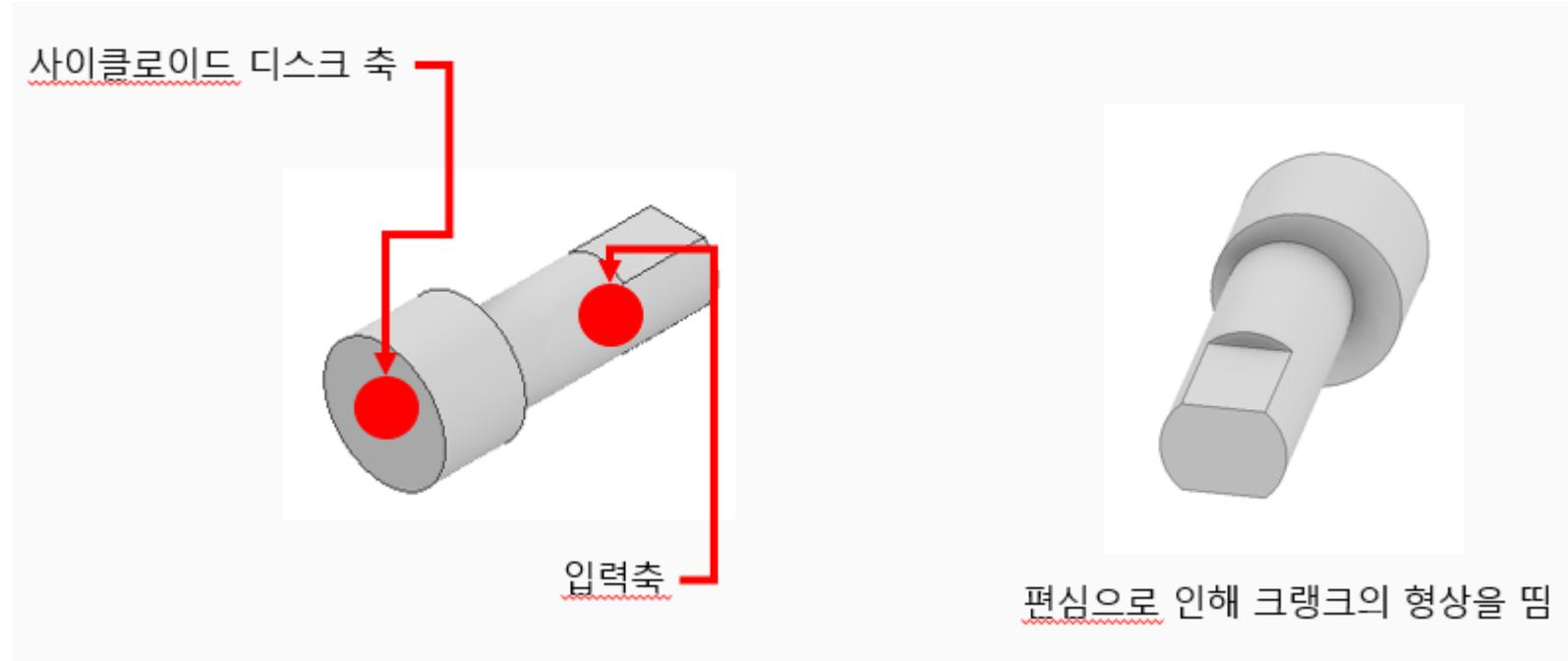
출력 디스크의 직경을 적당히 정한 후, 돌출부를 아래 그림처럼 돌출시킨다. (실제로는 이 돌출부들을 CNC가공하기 어려우므로, 볼트나 베어링, 측 등으로 교체해야 한다.)



그리고 적당한 크기로 출력축을 그린다. 이때, 출력축의 중심점은 출력 디스크의 중심점과 같다.
이제 이 원을 적당한 높이로 돌출시켜주면 출력 디스크 완성!!

| 5. 크랭크 축

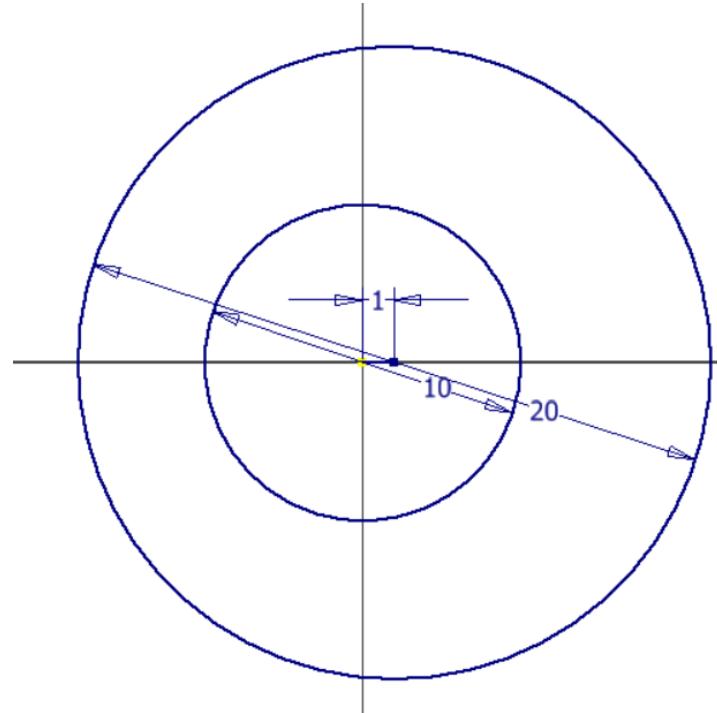
크랭크 축은 입력축과, 사이클로이드 디스크의 편심이 적용된 출력축을 모두 포함하는 부품으로, 편심으로 인해 크랭크의 형상을 띠는 부품이다. 마찬가지로 CNC 가공이 어려우므로, 외주를 맡기거나 두 축을 따로 가공하여 합쳐야 한다.



출처: 엄일영 선배님 로봇게임세미나 발표자료

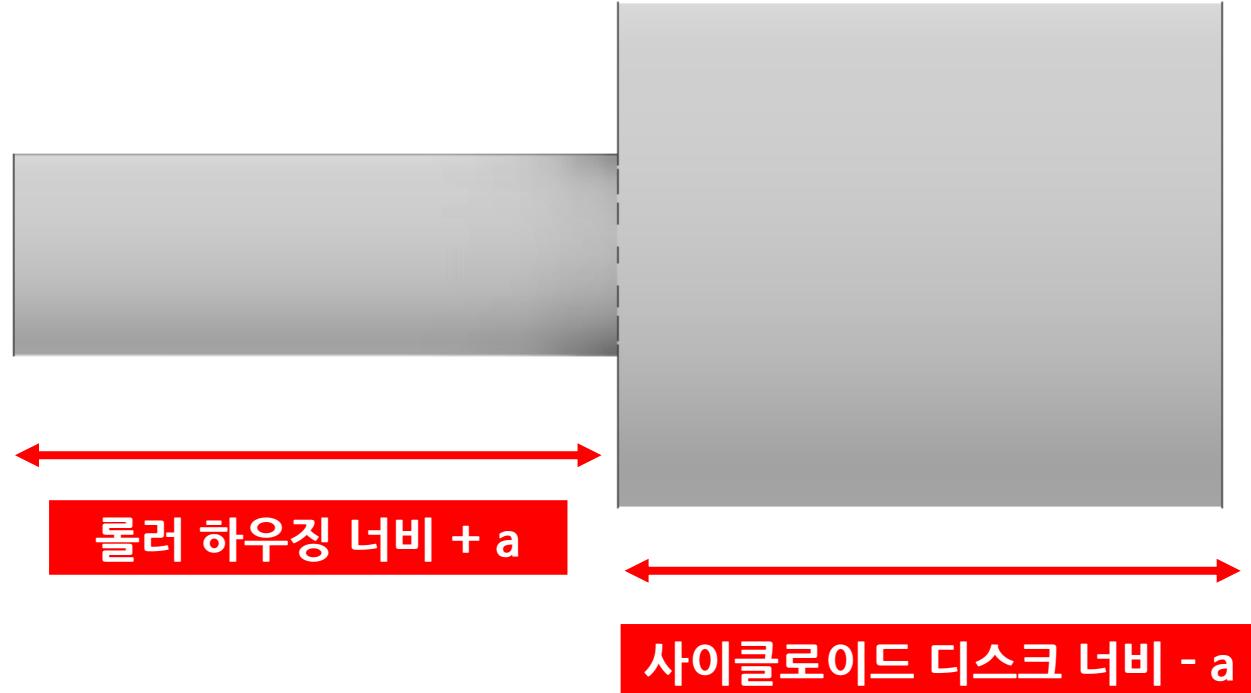
| 5. 크랭크 축

크랭크 축의 설계법은 매우 간단하다. 롤러 하우징과 결합될 베어링의 내경에 맞추어 입력축을 그린 후, 편심을 적용하여 사이클로이드 디스크와 결합될 베어링의 내경에 맞추어 출력축을 그려 주면 된다.



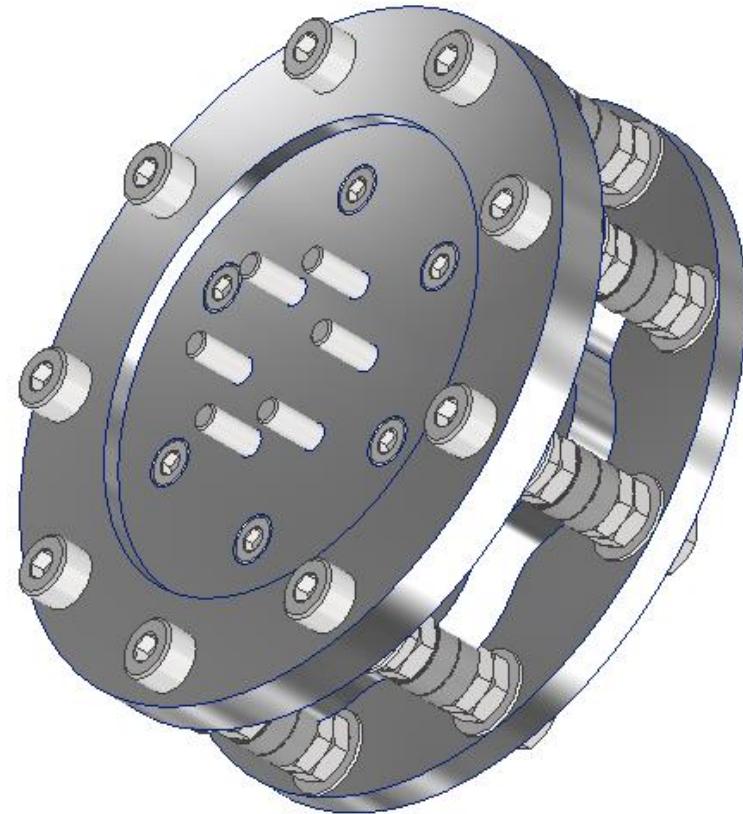
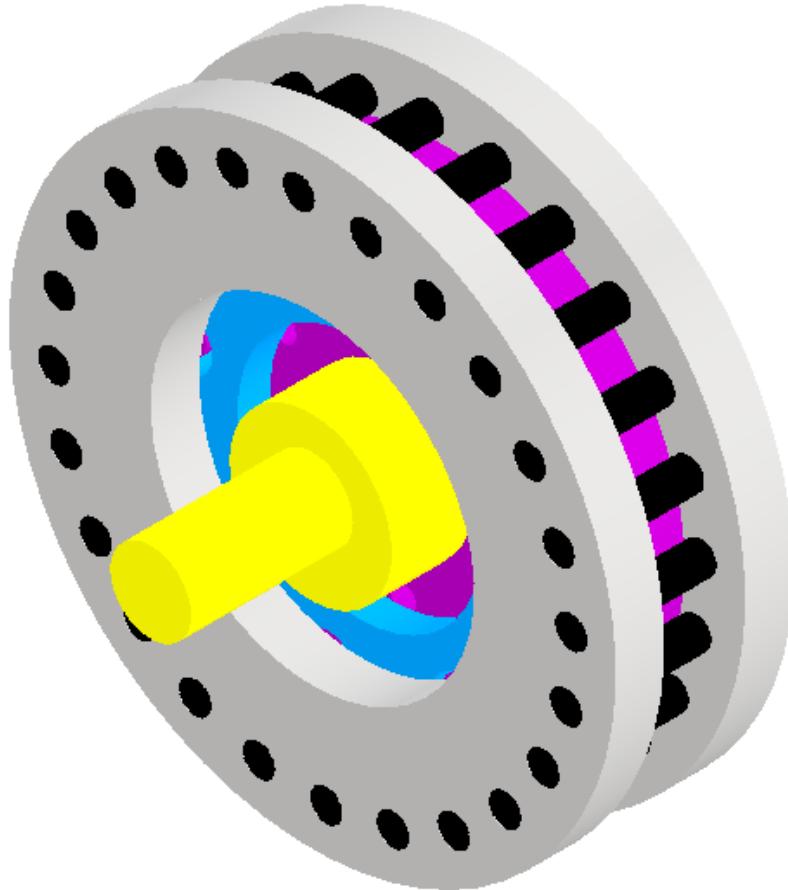
| 5. 크랭크 축

크랭크 축의 돌출 수치는 다음과 같다.



| 6. 조립

설계된 모든 부품들을 어셈블하여 쓰임새에 맞게 크기와 너비 등을 조절한다.



| 7. 도면

사이클로이드 디스크를 오토캐드로 가져왔을 때, 풀리선으로 인식되지 않고 스플라인 선으로 인식되어 CNC에서 인식이 되지 않는 문제점이 있다. 이것을 해결하려면 오토캐드에서 SPLINEDIT 명령어를 이용해 스플라인 선을 풀리선으로 바꾼다.
(정확도는 10정도)

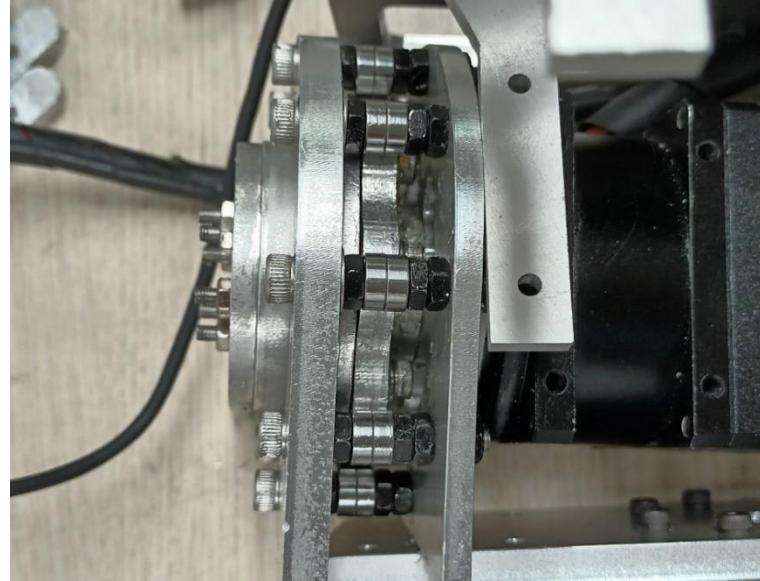
감속기를 통한 토크 향상 계획 = 부적합

<문제점>

1. 재질의 한계로 인한 감속기 자체의 유격 문제
2. 조인트2번인 다이나믹셀의 위치제어 어려움 문제

| 재질의 한계로 인한 감속기 자체의 유격 문제

실제 조립 단계 - CNC가공



감속기 외부재질 - 알루미늄6061 → 마찰에 무름
감속기의 롤러로 쓰이는 베어링 - 스테인리스 → 1대9감속비 하중 견디지 못함

- ⇒ 감속기를 사용하면 할수록 알루미늄이 닳아 유격 심화
- ⇒ 계속해서 높은 토크를 받다 보면 베어링이 깨지는 문제 발생

| 조인트2번인 다이나믹셀의 위치제어 어려움 문제

확장 제어 모드는 일반 관절 모드와 다르게, 각도에 제한이 없으면서 위치제어가 가능하다는 장점이 있다. 그러므로 위치 제어가 필요하지만 기본각(0~360)을 넘는 각도가 필요한 경우(감속기)에 사용하는 제어모드이다.

확장 제어 모드에서 모터 전원 종료 시, 현재 위치값이 어떤 값이든 간에 처음 1바퀴 값(0~4096)으로 초기화된다.

예를 들어, 확장제어 모터의 마지막 동작이 모터를 두 바퀴를 돌린 상태일 때, 제어값은 8,192이다. 하지만, 그 상태로 모터를 껐다 키면 제어값은 다른 값인 4096 으로 바뀐다.

따라서 가제보 시뮬레이션과 역기구학에 영향을 준다.

해결법으로는 출력축에 절대 엔코더를 부착하는 방법이 있지만, 그렇게 되면 제어가 어렵게 된다.



RO:BIT
ROBOT SPORT GAME TEAM

Team. RO : BIT | Gravity Compensation Module
16기 백종욱

중력 보상 시스템

| 중력 보상 시스템

〈개념〉

로봇팔의 자중으로부터 인가되는 중력 토크를 보상함으로써 로봇 운용에 필요한 토크를 효과적으로 낮추는 구조적 시스템.

〈필요성〉

각 관절의 모터 스펙 증가에 따라 로봇팔은 가반하중에 비해 매우 큰 자중을 가지게 되며 이는 구조적 불안정성 증가와 충돌 안전 저해의 원인이 된다. 이에 중력 보상 구조를 적용하여 모터 및 감속기의 용량을 최소화하고 안전하고 성능 높은 로봇팔을 만들 수 있음.

〈구조〉

- 와이어 기반
- 링크 / 캠 / 크랭크 기반
- 기어 기반

구조 선정 과정

중력 보상 시스템의 보편적 구조는 와이어와 용수철을 연결한 와이어 기반 구조.

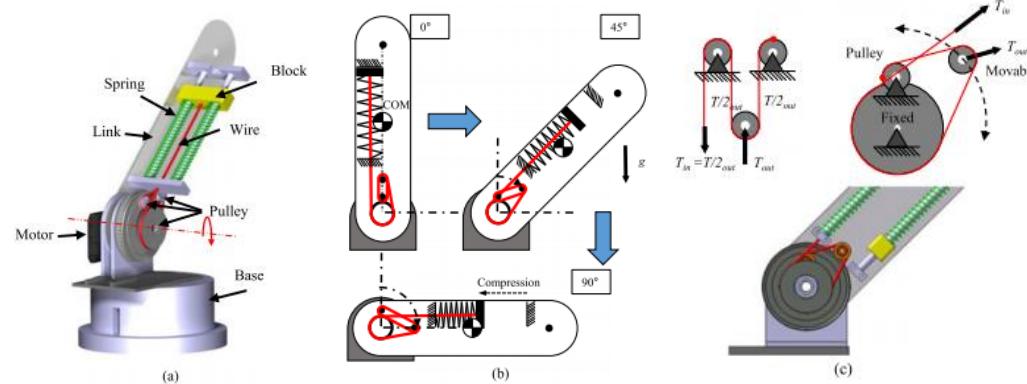
1308

IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, VOL. 22, NO. 3, JUNE 2017



Lightweight Multi-DOF Manipulator With Wire-Driven Gravity Compensation Mechanism

DongGyu Lee and TaeWon Seo, Member, IEEE



II. WIRE-DRIVEN GRAVITY COMPENSATION MECHANISM

A. Mechanism Configuration

The configuration of the proposed mechanism is shown in Fig. 1(a). The mechanism was composed of a spring, wire, pulley, and block. The spring-wire mechanism has the advantage of having low weight. A link with springs compensated for the gravity torque at the joint. In order to extend the multi-DOF manipulator, the spring was positioned at the top of the link. Pulleys were fixed on a timing pulley and the link. The pulleys formed the multiwinding system. The wire was connected by the end of the pulley and block, as shown in Fig. 1(b). The spring was compressed by the block connected to the wire when the robot moved downward. The actuator to move the robot was installed at the base.

장점 :
경량화 구조 설계 가능

〈 이동구, 서태원. (2017). 경량 다중 관절 로봇팔과 와이어 기반의 중력 보상 구조 〉

구조 선정 과정

단, 기존의 와이어 기반 구조는 내구성과 파손, 영구변형 등의 문제점이 존재.

스프링 및 슬라이더-크랭크 기반의 가변 중력보상장치

민재경[†] · 김휘수^{*} · 송재복^{**}

Adjustable Counterbalance Mechanism Based on Spring and Slider-Crank Mechanism

Jae-Kyung Min, Hwi-Su Kim, and Jae-Bok Song

1. 서 론

근래에 인간-로봇 협업 등 다양한 분야에서 로봇팔에 대한 수요가 증가하고 있다. 그러나 기존 로봇팔의 경우, 높은 성능을 위한 충분한 토크를 제공하기 위해서 고사양의 모터가 필수로 사용되었으므로, 인간-로봇 협업 시에 충돌 위험성을 증가시키고, 제작단가가 매우 높다는 단점이 있었다. [1] 그러므로, 안전하고 성능 높은 로봇팔을 저렴한 가격에 개발하기 위해서는 로봇팔에 인가되는 토크를 현저히 낮출 수 있는 전략이 필요하다.

이를 위하여, 로봇팔의 자중으로부터 인가되는 중력토크를 보상함으로써, 로봇 운용에 필요한 토크를 효과적으로 낮출 수 있는 다양한 형태의 중력보상장치가 개발되었다. [2-3] 그러나 기존의 와

이어 기반의 중력보상장치의 경우, 과도한 힘이 인가되었을 때, 와이어가 끊어지거나 영구 변형될 위험성이 있으므로 상용화에는 한계가 있었다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하고자, 슬라이더-크랭크 기반의 신뢰성 및 내구성이 높은 중력보상장치를 제시한다. 또한 각종 설계변수의 조절을 통해서, 로봇의 자중을 효과적으로 보상할 수 있게 함으로써, 저사양의 모터로 높은 성능의 로봇팔을 개발할 수 있게 한다.

본 논문에서는 중력보상장치의 구성 및 작동 원리에 대해 살펴본다. 그리고 로봇의 자중으로부터 인가되는 중력토크의 적절한 보상을 위한 설계변수 선정방법에 대하여 설명한다. 또한, 시뮬레이션을 통해 설계된 중력보상장치의 성능을 검증한다.

기어를 이용한 캠 형식 중력보상기구의 개발

송승우^{*†} · 송재복^{*}

*고려대학교 기계공학부

Cam-type Counterbalance Mechanism using Gears

Seung-Woo Song^{*†} and Jae-Bok Song^{*}

* School of Mechanical Engineering, Korea Univ.

1. 서 론

본 연구에서는 설계 공간의 효율성을 유지함과 동시에 기어와 룰러 등의 기구요소에 기반한 중력보상능력을 구현하기 위해 기어비 없이 캠 형식으로 보상토크를 전달하는 중력 보상 메커니즘을 개발하였다. 또한 시뮬레이션을 통하여 제안한 중력보상 장치의 성능을 검증함으로써, 로봇팔 등의 실제 기구로의 적용 가능여부를 확인하였다.

링크와 관절로 이루어진 대부분의 로봇팔은 모터토크의 대부분을 기구 자중에 할당한다. 이는 가반중량을 제외한 기구 자중의 중력 토크를 모터 용량으로 상쇄하기 때문이며, 작업성능을 확보하기 위해서는 고가의 고성능 모터 및 감속기를 사용하게 된다. 이에 따라 자중에 의한 중력 토크를 기구적으로 상쇄시켜 필요한 모터용량을 낮추고자 여러 형태의 중력보상장치들이 고안되어왔다. 기존의 중력보상 장치들은 와이어를 이용한 형태가 주를 이루고 있었으나⁽¹⁾. 장치의 내구성과 안정성이 낮아 실제 기구로 적용하기에는 제한적이다. 따라서 기존 와이어 타입의 단점을 해결하고자 여러 중력보상 모델들이 제안되었다^(2,3). 그러나 이 경우에도 설계상 필요한 공간으로 인한 부피증가, 자중의 증가 등의 단점이 발생한다.

ex. 기어, 링크, 크랭크 등

최종 구조 선정

이에 와이어가 아닌 여러 구조 중에서, 가공과 조립이 용이하고 유지/보수가 간편한 **기어 기반**의 중력 보상 구조를 선택.

구조와 작동원리를 연구할 때 참고할 논문을 다음으로 선정함.

Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 38, No. 3, pp. 289~294, 2014

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2014.38.3.289>

289

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

기어유닛 기반 중력보상장치를 갖는 머니플레이터

강인호* · 김휘수* · 송재복** · 이현수** · 장인성**

* 고려대학교 기계공학부, ** 현대자동차 그룹

Manipulator Equipped with Counterbalance Mechanism Based on Gear Unit

In Ho Kang*, Hwi Su Kim*, Jae-Bok Song*†, Hyun Soo Lee** and In Sung Chang**

* School of Mechanical Engineering, Korea Univ.

** Hyundai motor Group.

(Received October 15, 2013 ; Revised December 10, 2013 ; Accepted December 11, 2013)

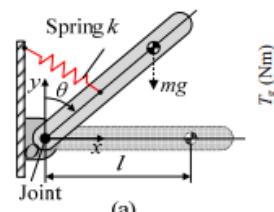


Fig. 2 Gravitational torque of 1-DOF link: (a) simplified model, and (b) torque as a function of θ

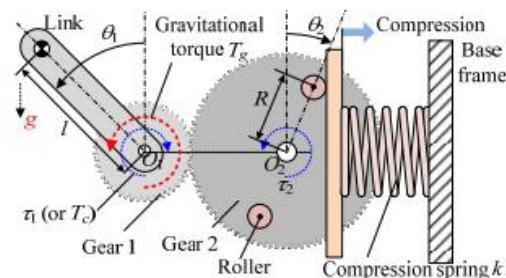


Fig. 3 Counterbalance mechanism based on gears and rollers

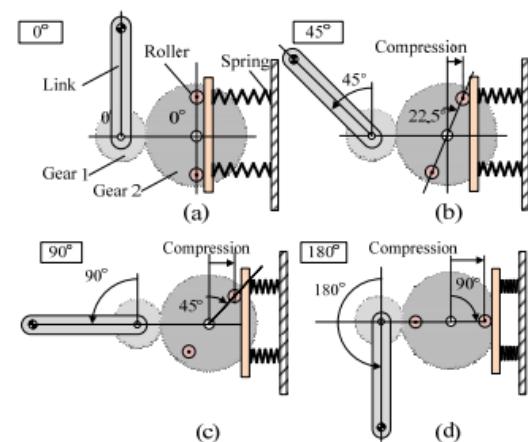


Fig. 4 Operation of counterbalance mechanism based on gear and roller when θ = (a) 0°, (b) 45°, (c) 90°, and (d) 180°

| 기대효과

- 로봇이 자세를 유지하거나 동작할 때 필요한 토크를 현저히 낮출 수 있다.
- 각 관절의 모터 혹은 감속기의 사양을 최소화 혹은 같은 사양으로도 성능 향상이 가능하다.
- 로봇의 자중뿐만 아니라 가반하중*으로부터 인가되는 중력 토크까지 보상할 수 있다.
- 중력 보상에 따른 joint의 유격 감소로 보다 정밀한 제어가 가능하다.

* 가반하중 : 로봇이 들어올릴 수 있는 최대 무게

기어 유닛 기반 구조

지난 발표

중력 보상 시스
(계획)로봇팔

Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A,

<학술논문>

DOI

기어유닛 기

강인호

Manipulator Equipped

In Ho Kang*, Hwi Su

(Received October 1

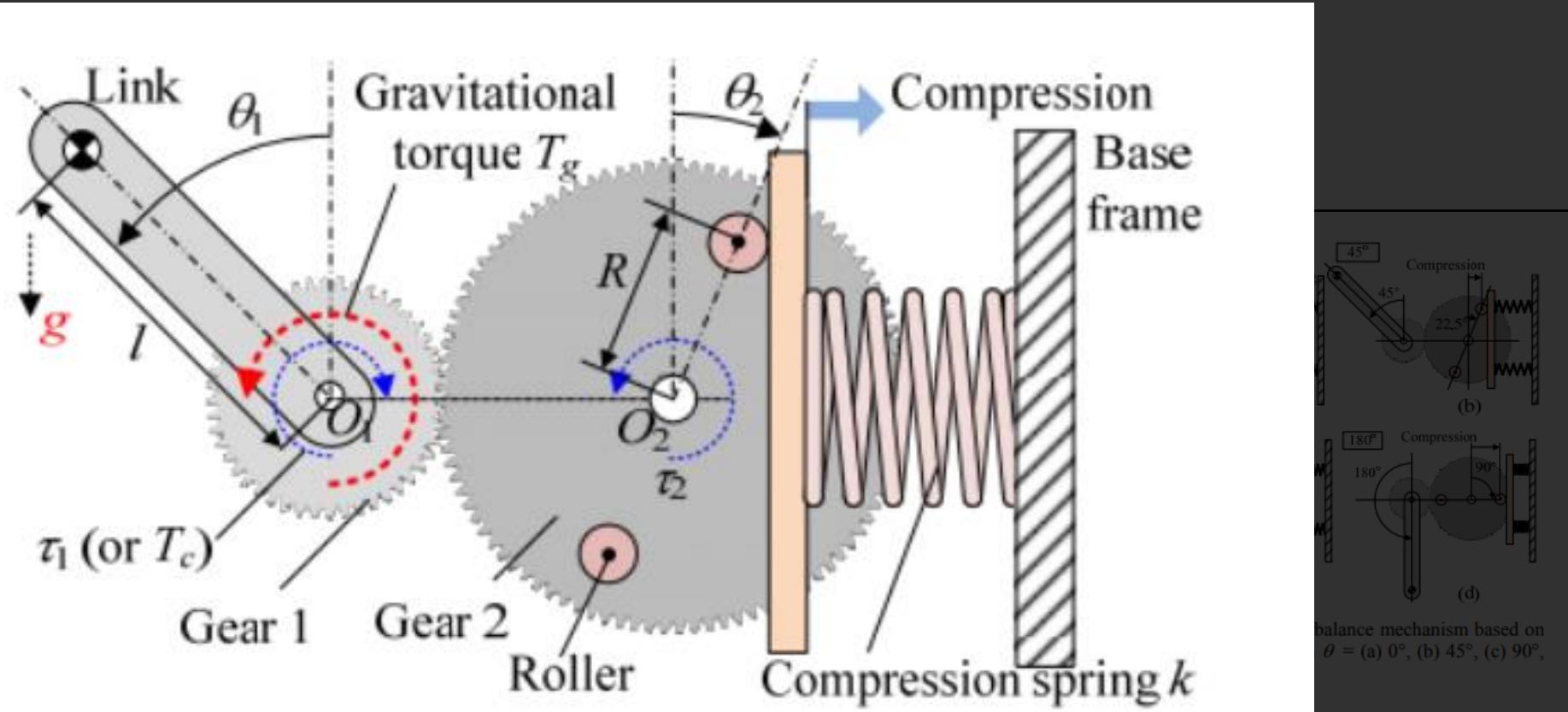


Fig. 3 Counterbalance mechanism based on gears and rollers

토크 계산

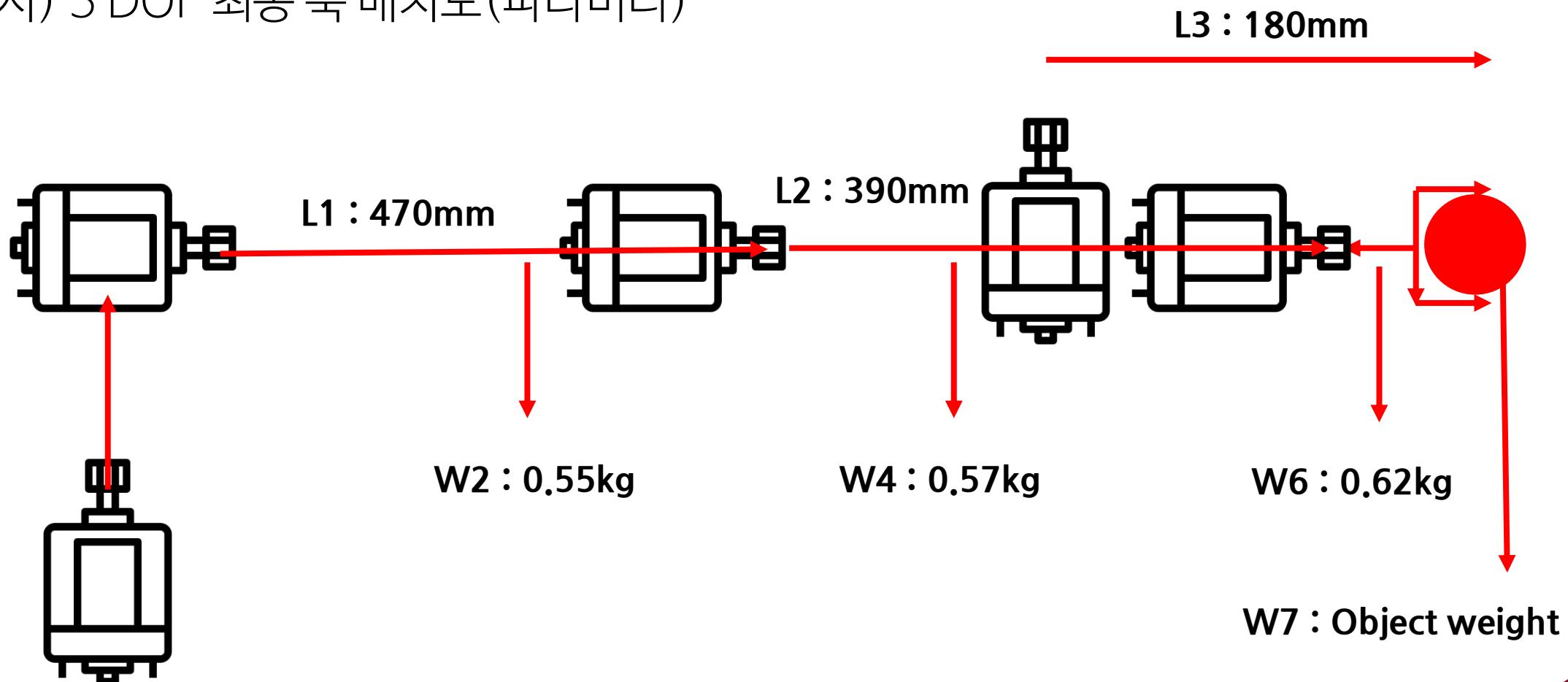
| 감속 구조 선정

중력 보상 장치로는 중력 토크를 보상할 수 있다.
토크 계산기를 이용하여 모터에 가해지는 최종 관절 토크를 구한 후,
중력 토크 계산식을 통해 중력 토크를 구해
최종 관절 토크에서 중력 토크를 뺀 값이 보상된 토크이다.

즉, 이상적인 중력보상장치는 **중력 토크 = 보상 토크** 인 것이다.

| 중력 토크 계산

예시) 5 DOF 최종 축 배치도(파라미터)



중력 토크 계산

중력 토크 계산식 :

$$\tau_g = W_2 g \frac{L_1}{2} \sin \theta + W_4 g \sin \theta \left(L_1 + \frac{L_2}{2} \right) + W_6 g \sin \theta \left(L_1 + L_2 + \frac{L_3}{2} \right) + W_7 g (L_1 + L_2 + L_3)$$

$\theta = \pi/2$	$W_2 = 0.55kg$
$L_1 = 470mm$	$W_4 = 0.57kg$
$L_2 = 390mm$	$W_6 = 0.62kg$
$L_3 = 180mm$	$W_7 = (\text{object weight})$

Input parameter

(10.19 + 10.4W₇) N · m = *Gravitational torque*

최종 보상된 토크 계산

Arm Weight

Now enter the weight of each arm linkage. The center of mass is assumed to be 1/2 of L. If a linkage does not exist, set the weight to zero.

Select pounds or kilograms		kilograms 
W2	0.55	W4 0.57
W6	0.62	W7 (object weight) 4

오브젝트의 무게가 4kg일 때,

Torque Results

These are the finished results. This is the maximum torque that each motor requires to lift both the arm and the given object weight at full extension at required velocity. Shorter arms and lower weights reduce required torque.

Select Units	newton*meter 
Motor 0 Torque M0	0.00
Motor 1 Torque M1	64.1
Motor 2 Torque M2	30.1
Motor 3 Torque M3	8.45

$$W_7 = 4$$

$$\therefore (10.19 + 10.4 \times 4) N \cdot m = \mathbf{51.79 N \cdot m}$$

64.1(관절토크) - 51.79(중력토크)

= 12.31 Nm(이상적인 보상된 토크)

PH54정격 : 약 44.1 Nm

→ 기존 모터의 토크로도 충분히 감당 가능
중력 보상 장치로 최대 51.79만큼 보상 가능.

스프링 강성 계산

스프링 강성 유도

Gravitational torque
 $= mgl \sin \theta_1$

Compensation torque
 $= \frac{kR^2}{2n} \sin 2\theta_2$

$$mgl \sin \theta_1 = \frac{kR^2}{2n} \sin 2\theta_2$$

if $\theta_1 = 2\theta_2$ ($n = 2$) $\rightarrow \sin \theta$
 $\therefore mgl = kR^2/2n$

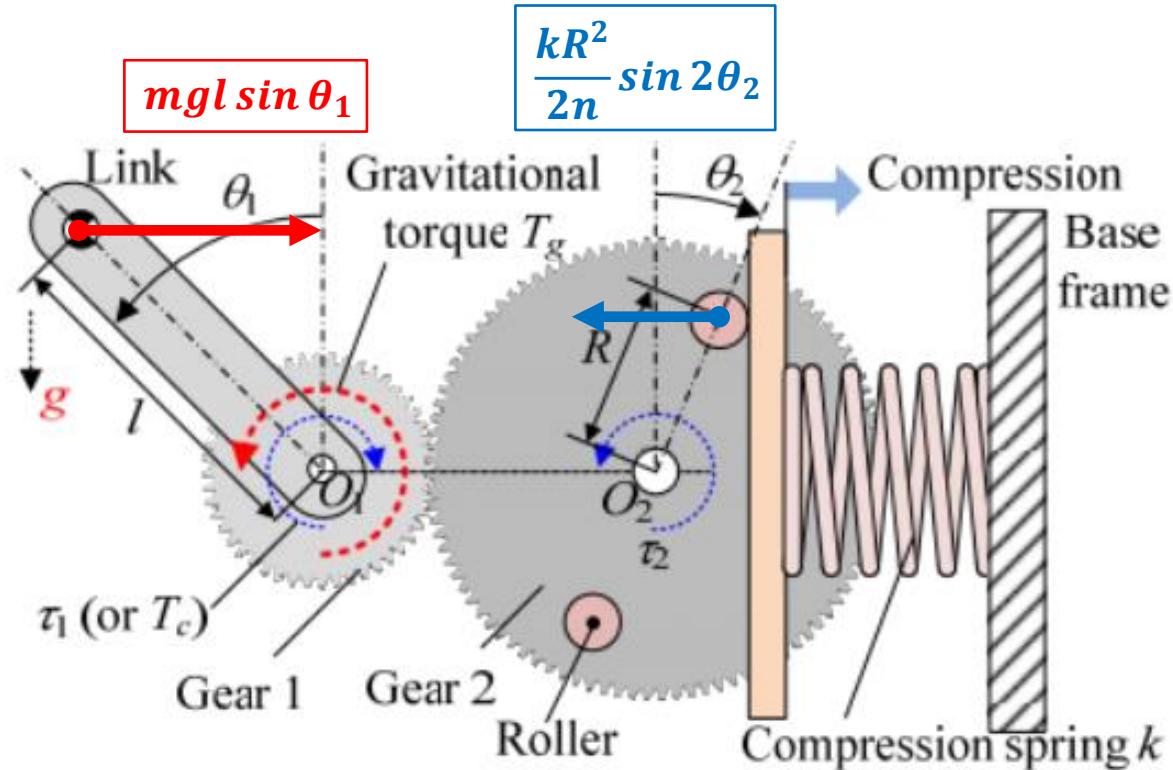


Fig. 3 Counterbalance mechanism based on gears and rollers

스프링 강성 계산

앞서 구한 k 에 대한 관계식을 k 로 정리 :

$$k = 4mgl/R^2$$

$$mgl = 10.2 \text{ N} \cdot \text{m}$$
$$R = 23\text{mm}$$

$$77.12 \text{ N} \cdot \text{mm} = \textit{Spring constant}$$

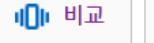
스프링 선정 (1)

스프링 상수 $k = 65.28 \text{ N/mm}$

한국 미스미(MiSUMi)에서 적정 사양의 스프링 선정.

평각선 스프링

리뷰		지정한 사양/치수 정보	
	★★★★☆ 리뷰작성	재질	오일 텁퍼선
브랜드	사미니 (SAMINI) ▾	출하일	최대 하중(범위 지정)(N)
설명	플랫 와이어 코일 스프링. 【특징】 ·취급에 편리한 식별 표시. ※선 직경이 가는 것에는 대응하지 않는 경우가 있습니다. 【용도】 ·산업 기계용·프레스 금형용·플라스틱 금형용 스프링에 최적. 【재질】 ·실리콘 크롬 강선(SWOSC상당) 【롤방향】 ·오른쪽 【종류】 ·황색...경소하중용 ·청색...경하중용 ·적색...중하중용 ·녹색...중하중용 ·갈색...극중하중용	최대 하중(N)	허용 하중 시 높이 H2(mm)
		자유 길이(mm)	외경(Φ)
		코일 내경 ID(Φ)	스프링 정수 (N/mm)
		전체 휠(mm)	-

 비교
 My 부품표
 유사품검색

다운로드
 CAD
 상품상세정보
 카탈로그PDF

스프링 선정 (2)

가동 범위 계산 :

자유 길이 H1(mm) = 150mm

허용 하중 시 높이 H2(mm) = 102mm

변위 양 : $150 - 102 = 48\text{mm}$ (32%) $\rightarrow R = 25\text{mm}$ (롤러 위치 반경)

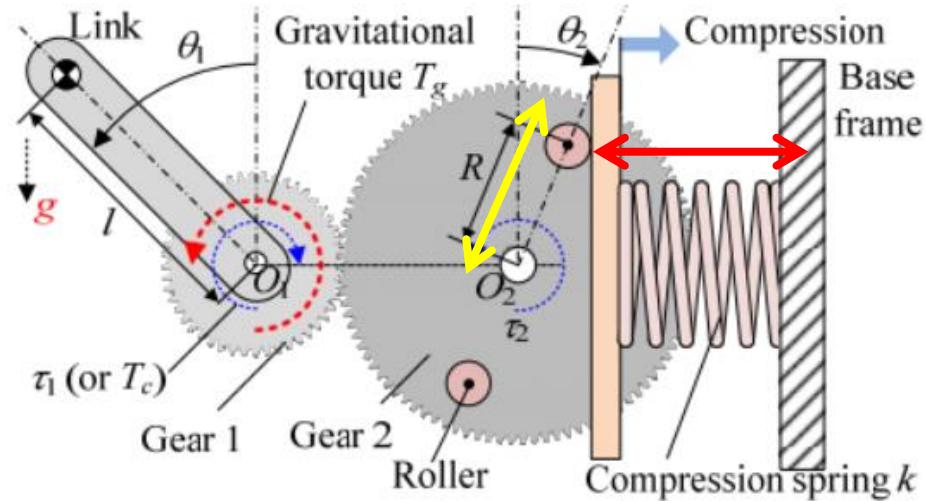


Fig. 3 Counterbalance mechanism based on gears and rollers

설계

기어비 선정

$$mgl \sin \theta_1 = \frac{kR^2}{2n} \sin(2\theta_2) \quad (6)$$

따라서 $\theta_1 = 2\theta_2$ (즉, $n=2$)라 가정하면, 양변의 sine 항이 모두 소거되어 중력토크를 완전히 보상할 수 있는 적절한 스프링은 다음과 같이 구할 수 있다.

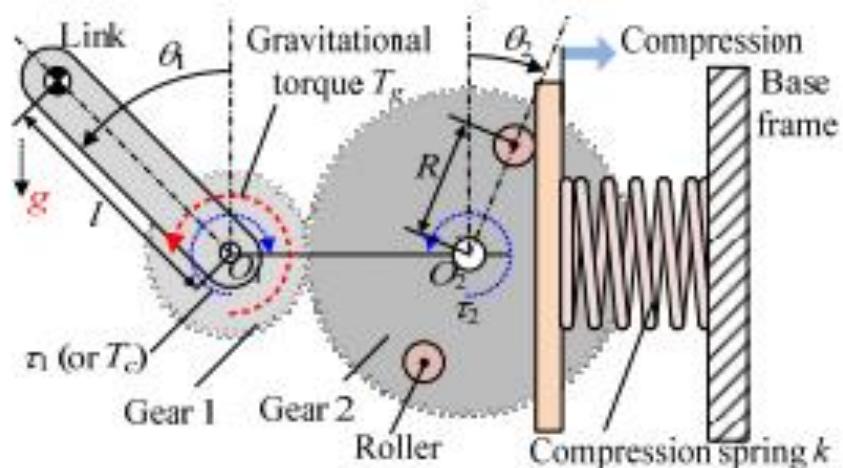


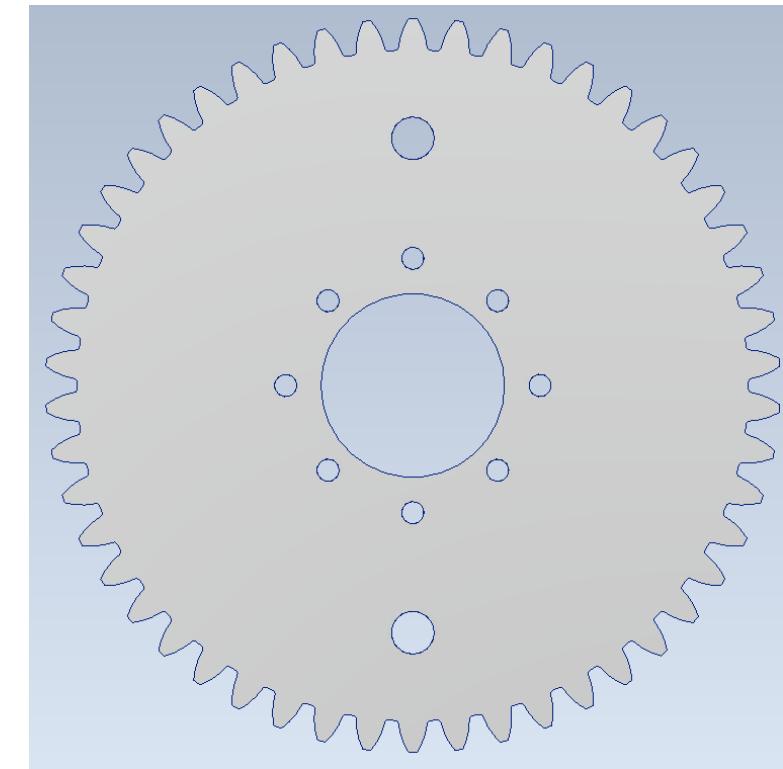
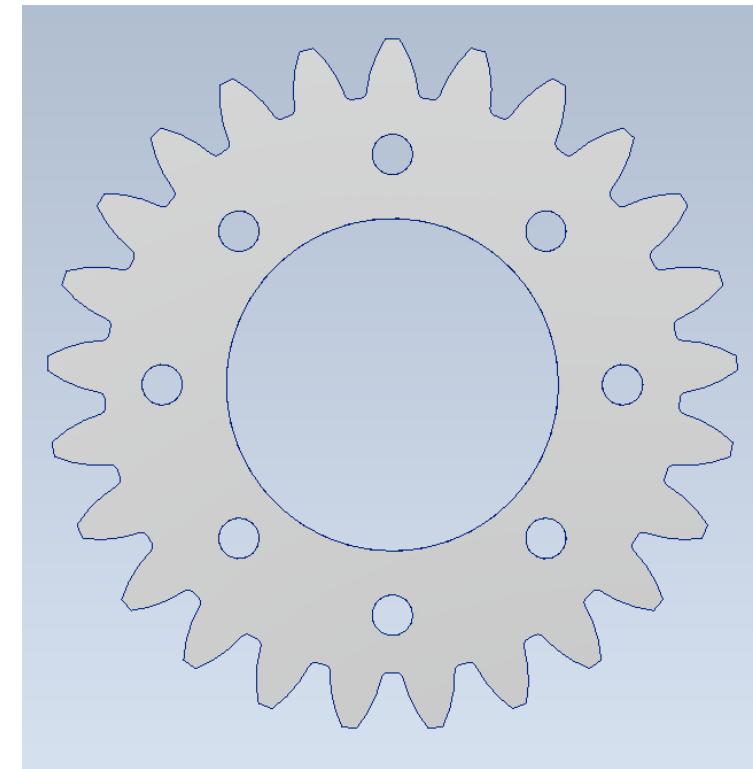
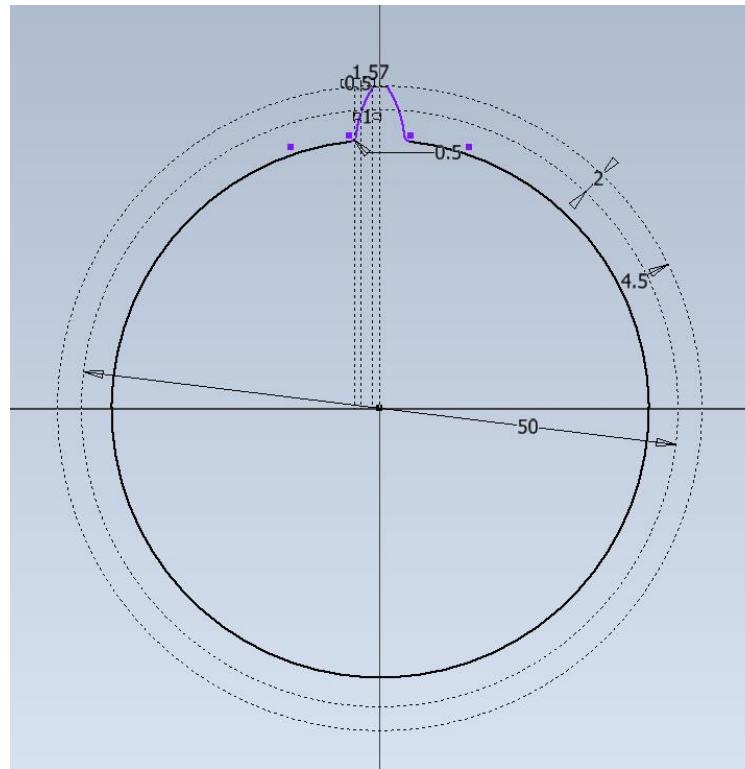
Fig. 3 Counterbalance mechanism based on gears and rollers

최대 보상 토크를
제공할 수 있는 기어비

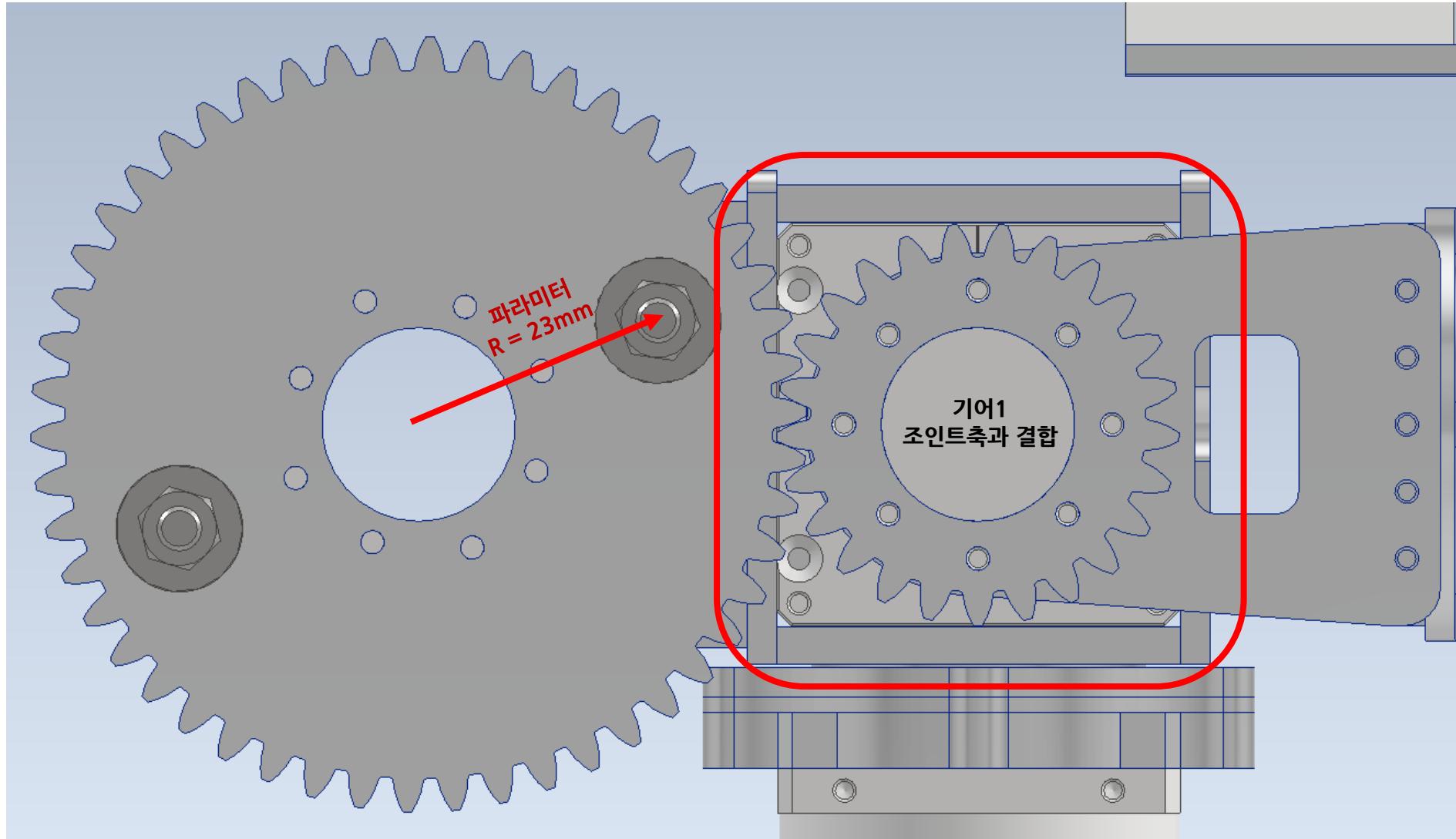
1:2

평기어 설계

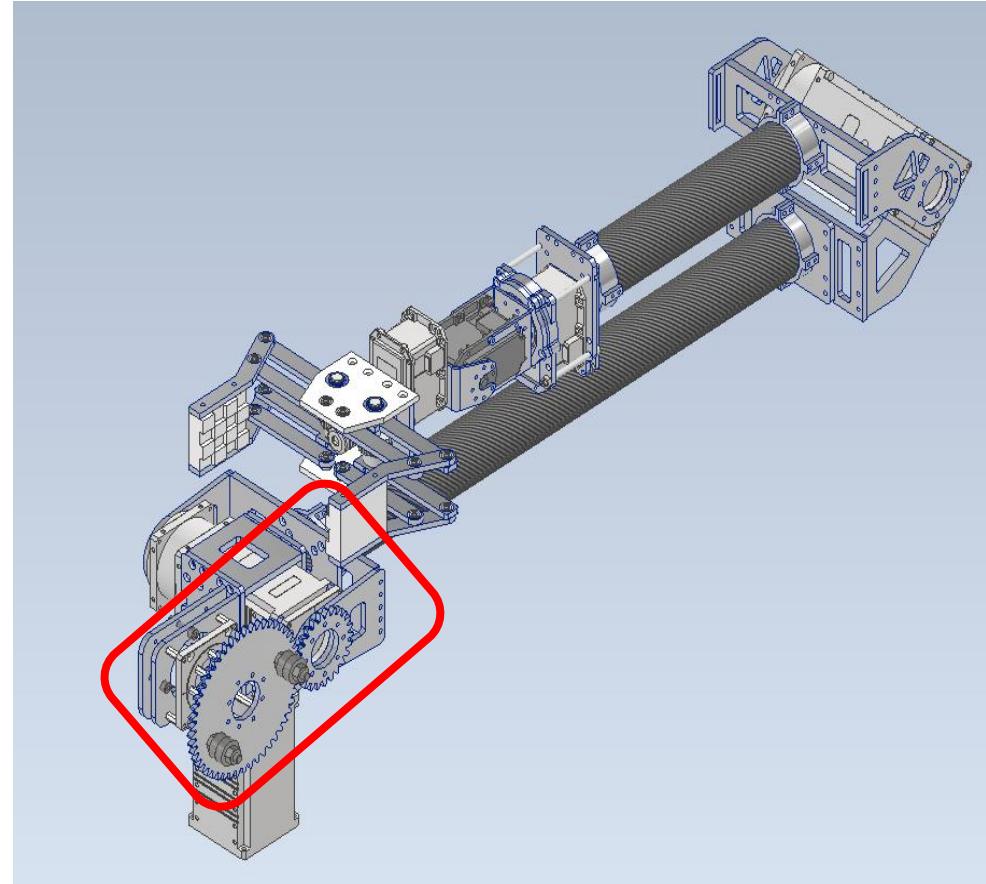
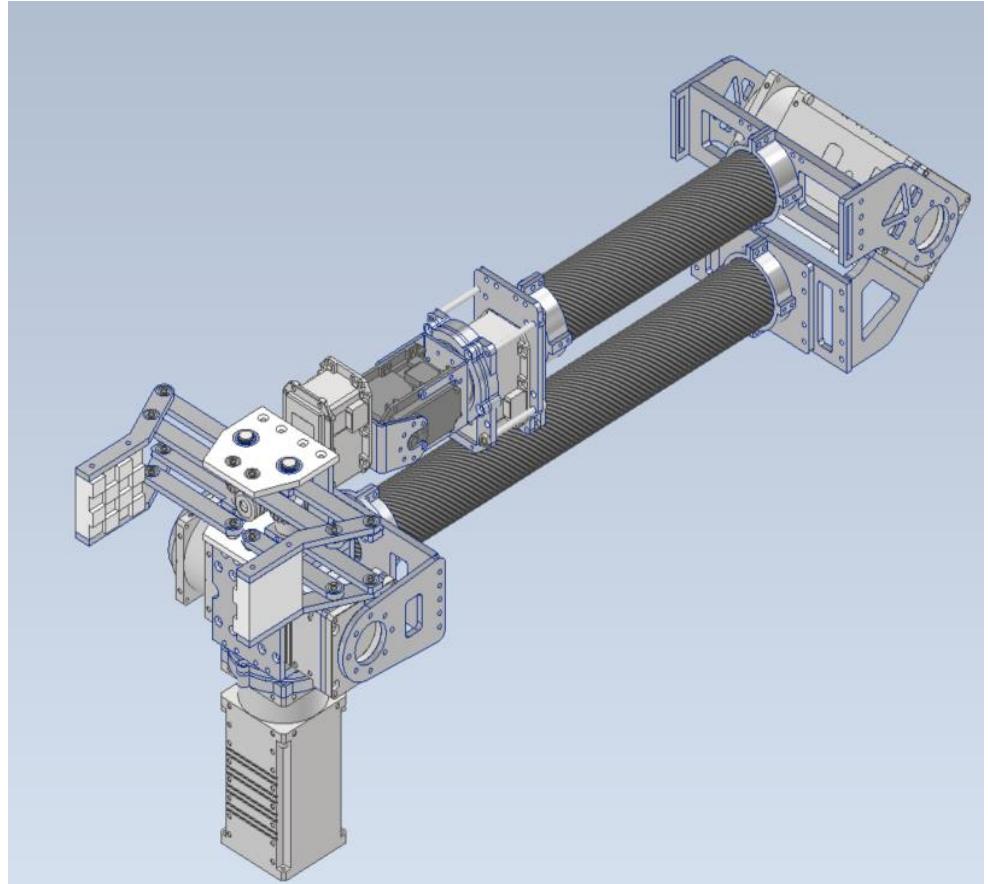
스퍼기어 설계법을 이용한 평기어 설계
모듈2,
피치원지름이 각각 50. 100으로 1대 2의 기어비를 갖는 평기어 2개 설계



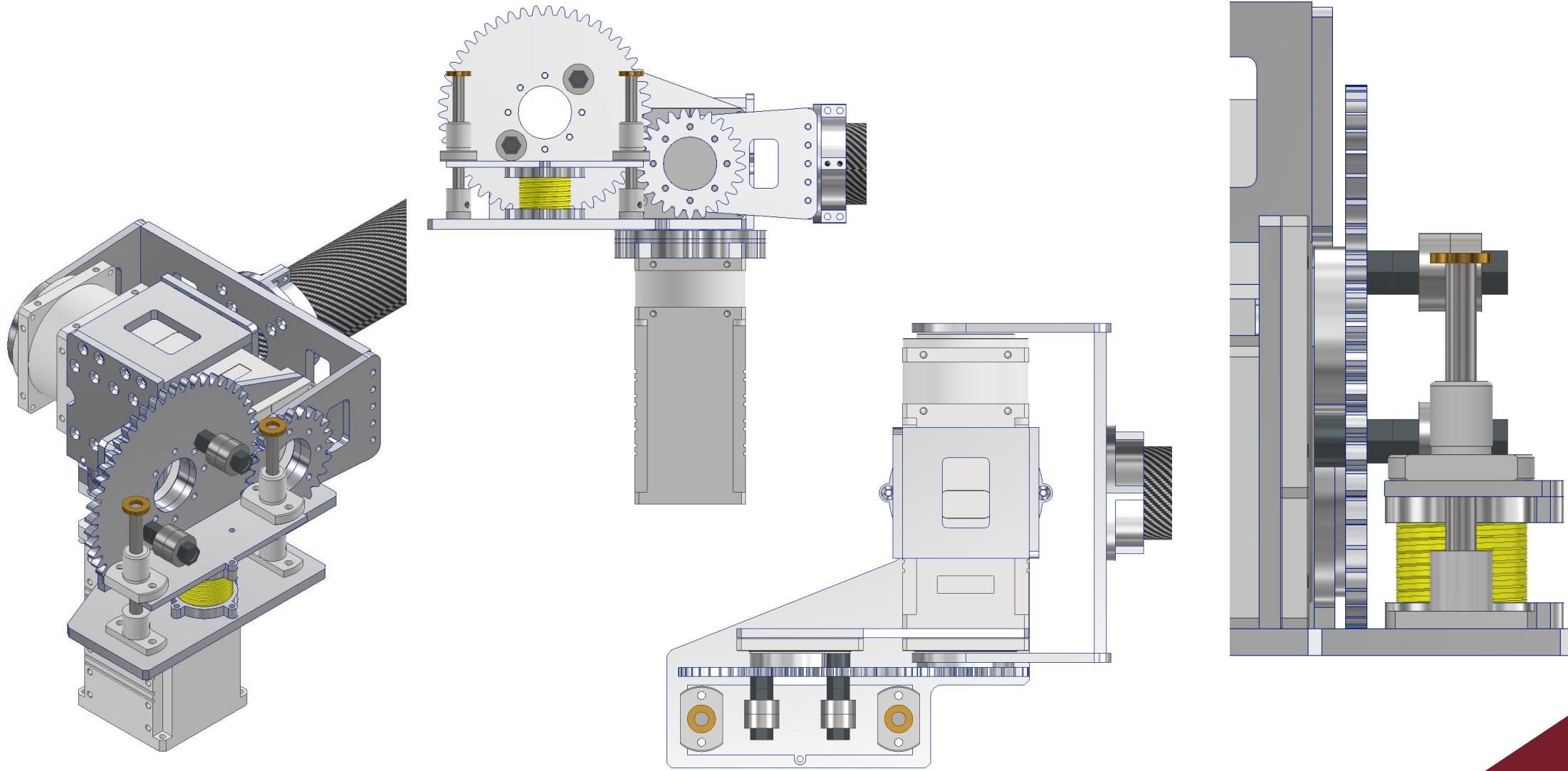
R파라미터 변경



| 조인트축 결합 및 R파라미터 선정

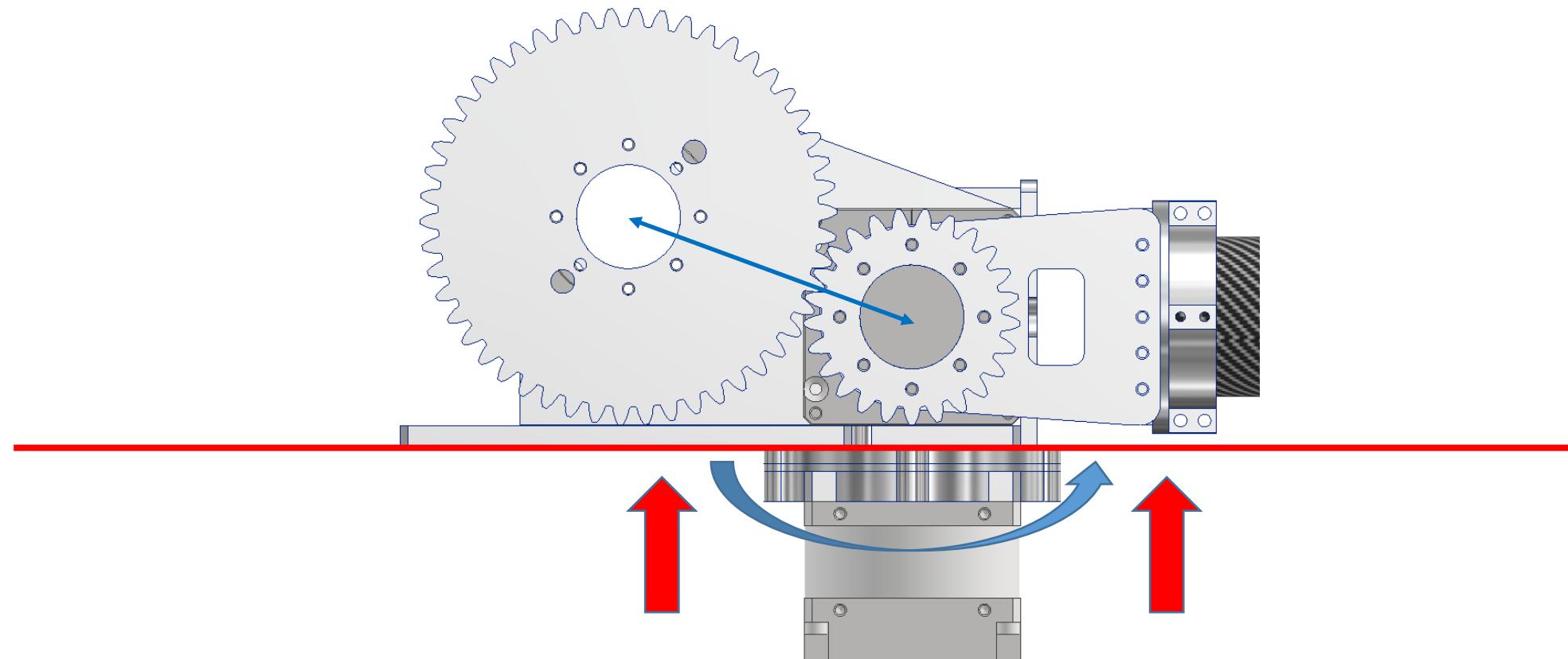


프로토타입 모습



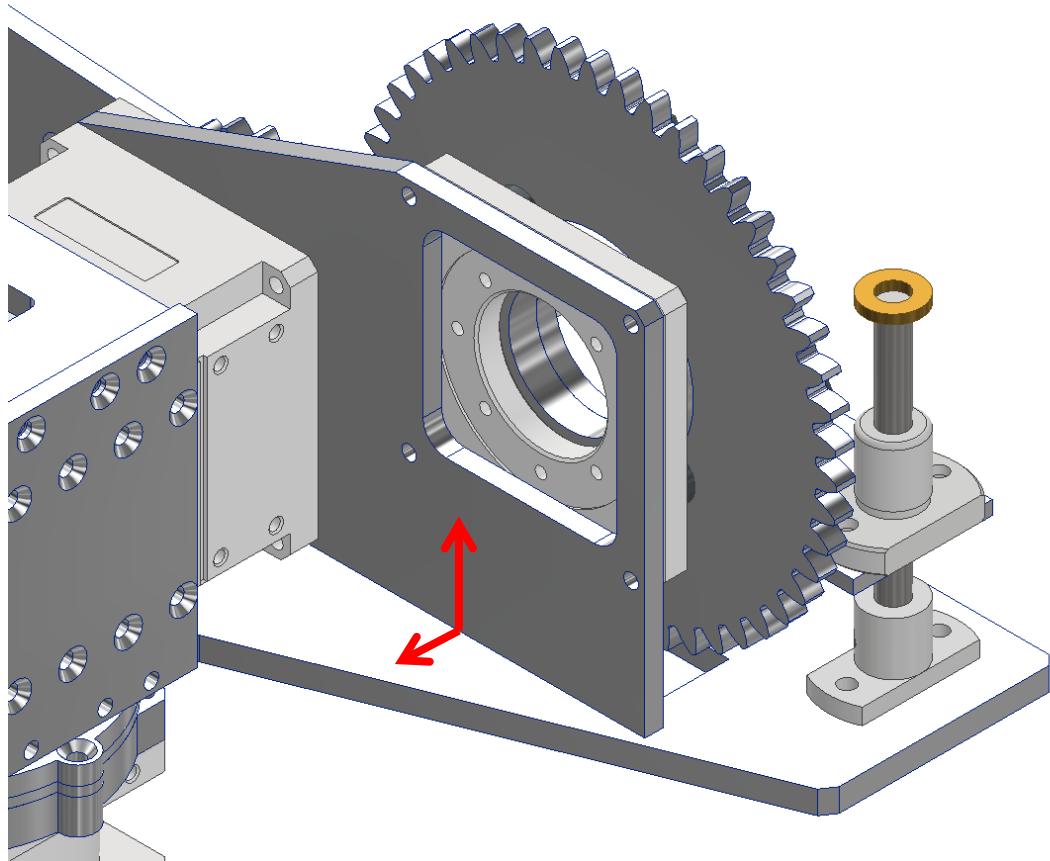
| 기어 배치

조인트 1번 (요축) 가동 범위에 영향을 없애기 위해
기어를 사선 배치하였다.



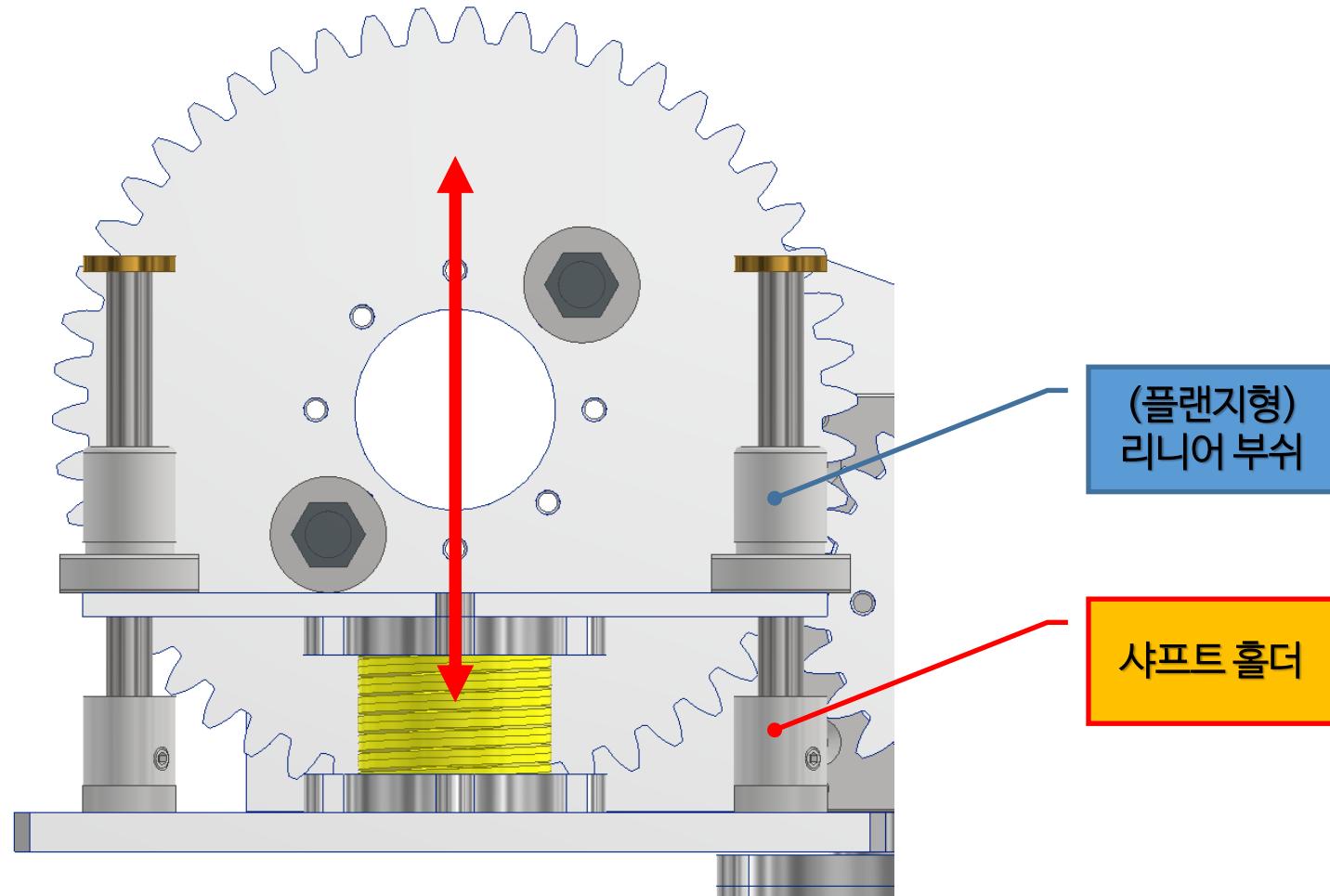
| 기어 / 스프링 받침

스프링 가이드 받침과 기어 가이드 받침을 수직 고정 설계하여
스프링으로 인한 틀어짐 및 벌어짐을 방지하였다.



| 스프링 블록의 상하 이동

매니퓰레이터 본체에 샤프트 홀더, 스프링 블록에 플랜지형 리니어 부쉬를 양쪽에 설치하여 한쪽 방향으로 틀어짐을 방지하였다.



논문 설계 비교

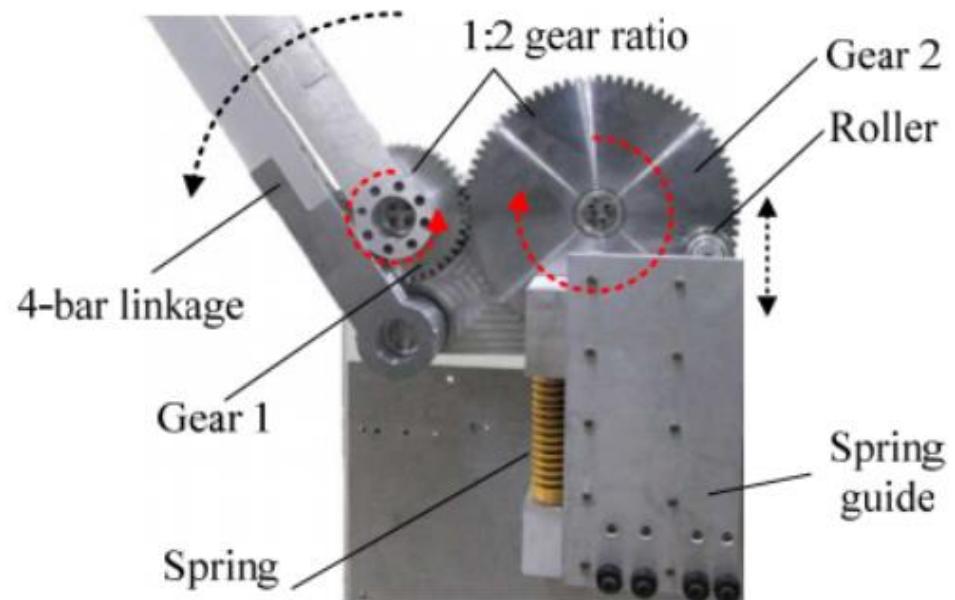
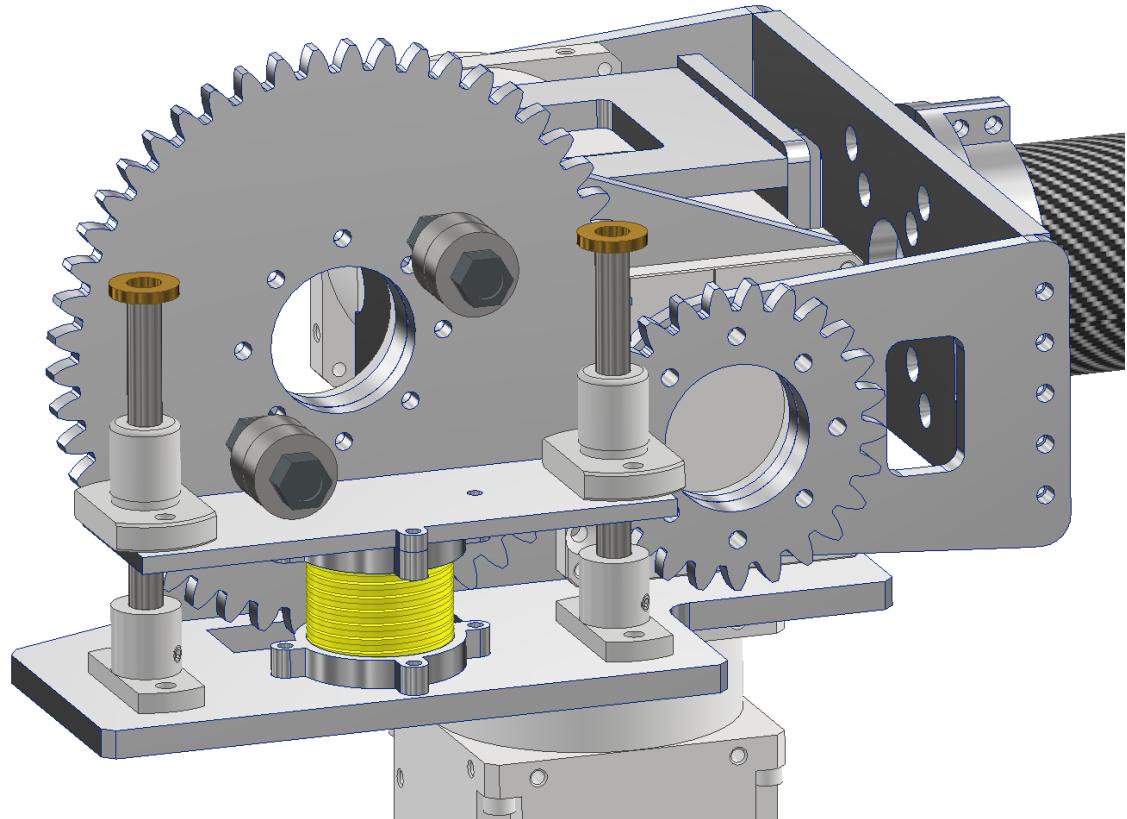
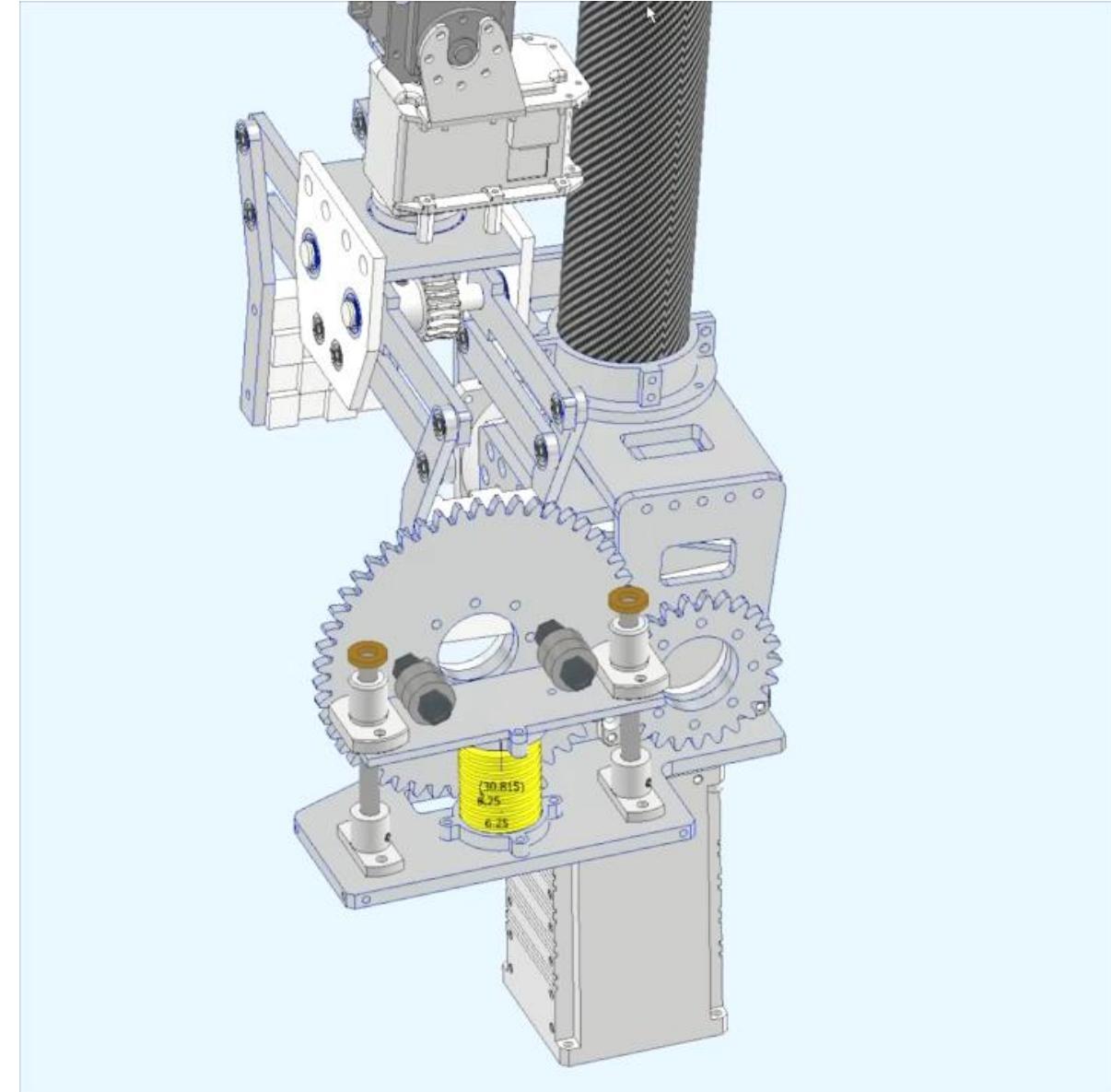
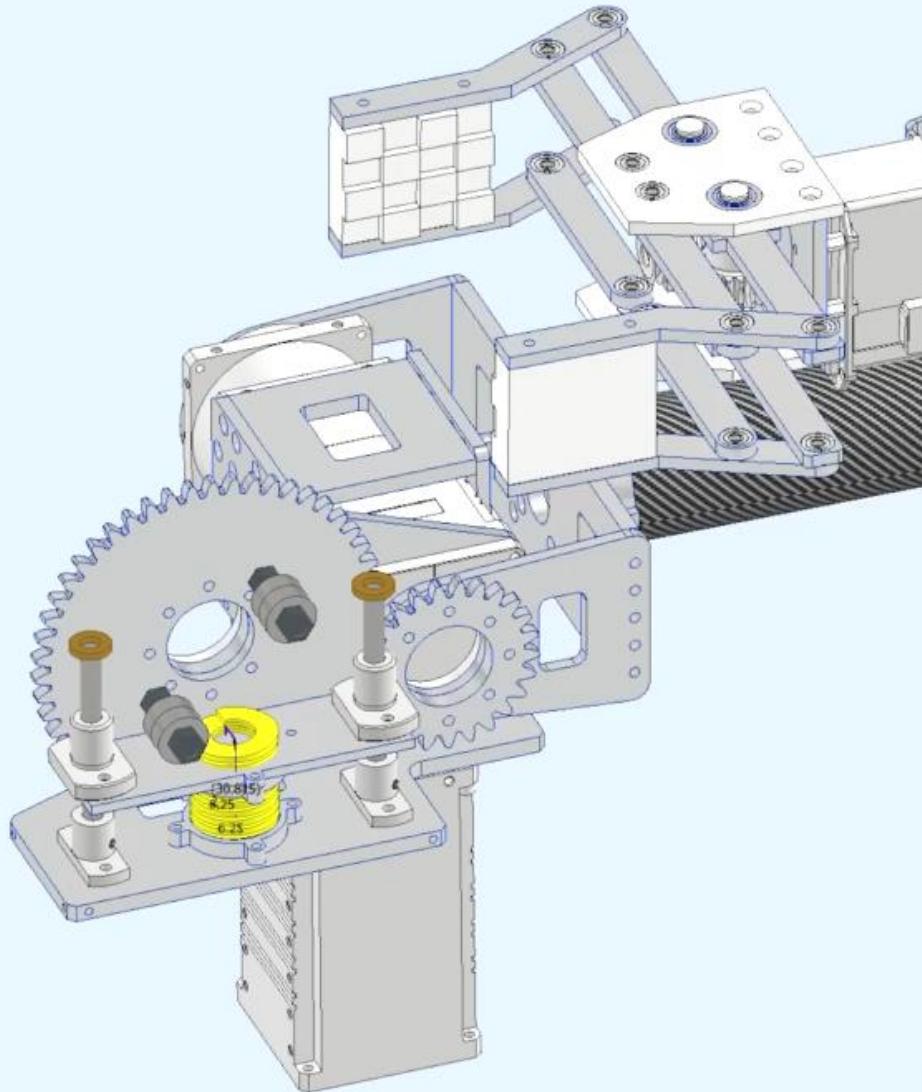


Fig. 10 Prototype of counterbalance mechanism



| 시뮬레이션

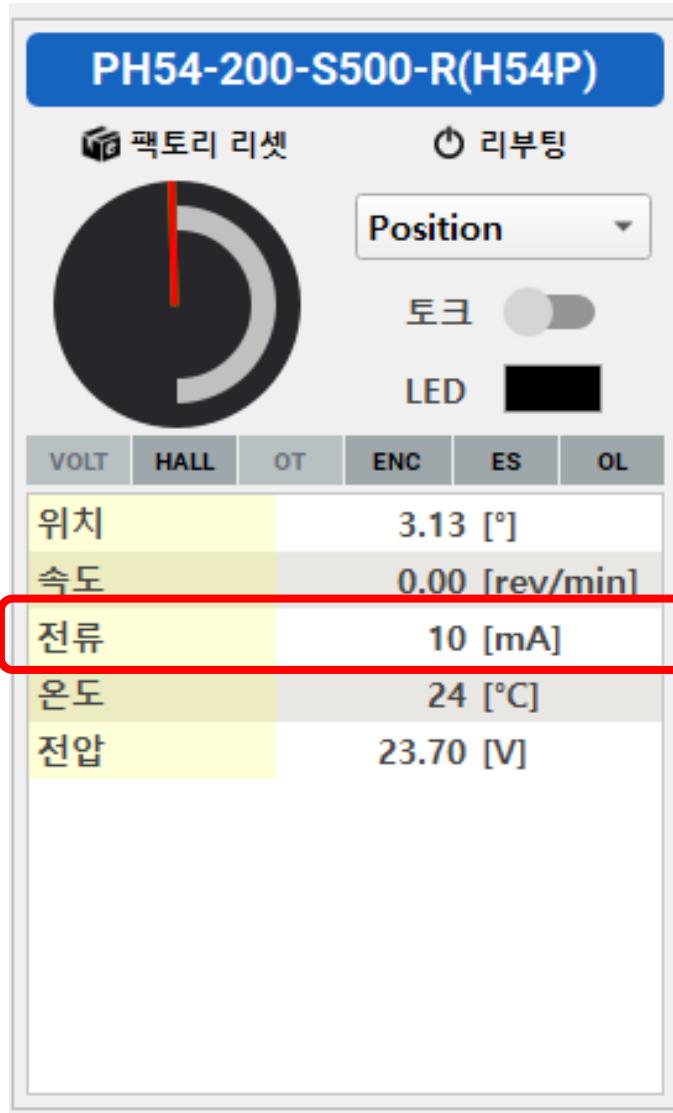


| 최종 설계 변경점



결론 도출

결론 도출 방법



전류 - 토크 관계

$$P = EI$$

$$P = \omega\tau$$

$$\tau = \frac{EI}{\omega} = \frac{\left(\frac{P_z \phi N}{60a}\right)I}{2\pi N} = \frac{P_z}{2\pi a} \phi I$$

= 전류는 토크에 비례한다.

결론 도출 방법

중력 토크 계산식 :

$$\tau_g = W_2 g \frac{L_1}{2} \sin \theta + W_4 g \sin \theta \left(L_1 + \frac{L_2}{2} \right) + W_6 g \sin \theta \left(L_1 + L_2 + \frac{L_3}{2} \right) + W_7 g (L_1 + L_2 + L_3)$$

$\theta = \pi/2$	$W_2 = 0.55kg$
$L_1 = 470mm$	$W_4 = 0.57kg$
$L_2 = 390mm$	$W_6 = 0.62kg$
$L_3 = 180mm$	$W_7 = (\text{object weight})$

Input parameter

(10.19 + 10.4W₇) N · m = *Gravitational torque*

결론 도출 방법

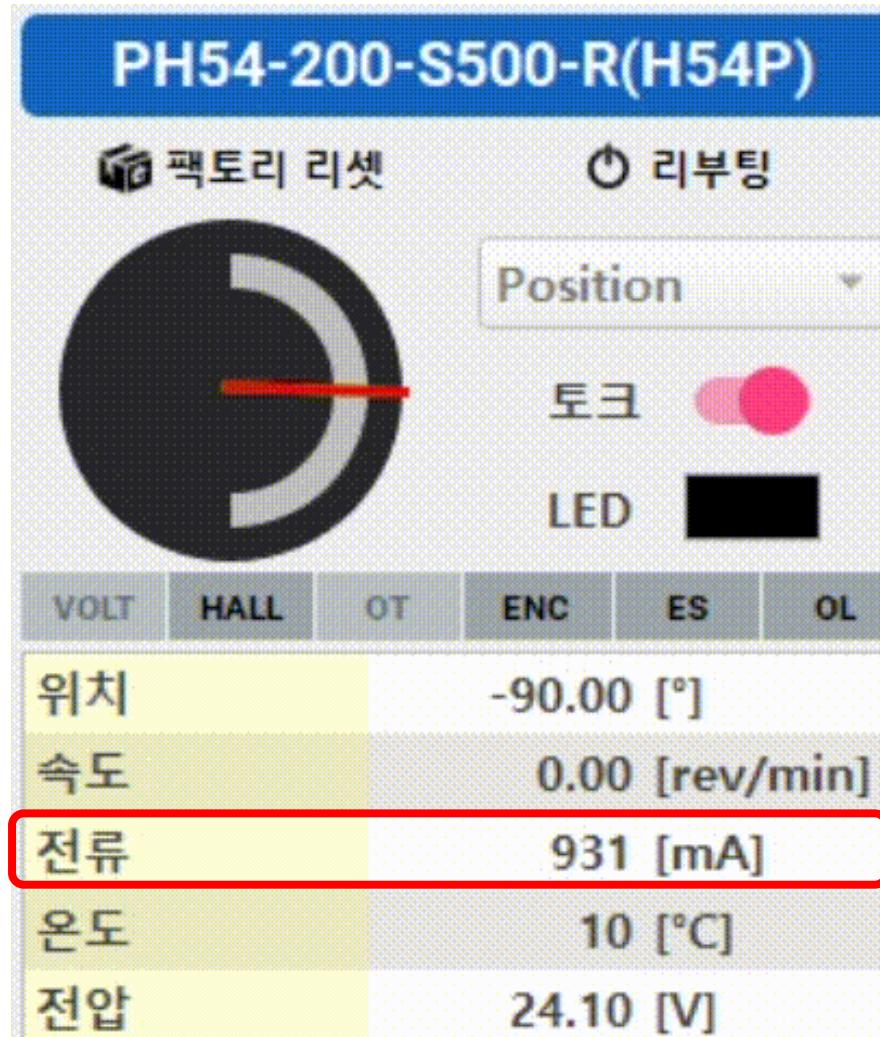
실제 보상 토크 계산식 :

$$\tau_g = 10.19 - (10.19 * \frac{\text{장치적용}I}{\text{장치미적용}I})$$

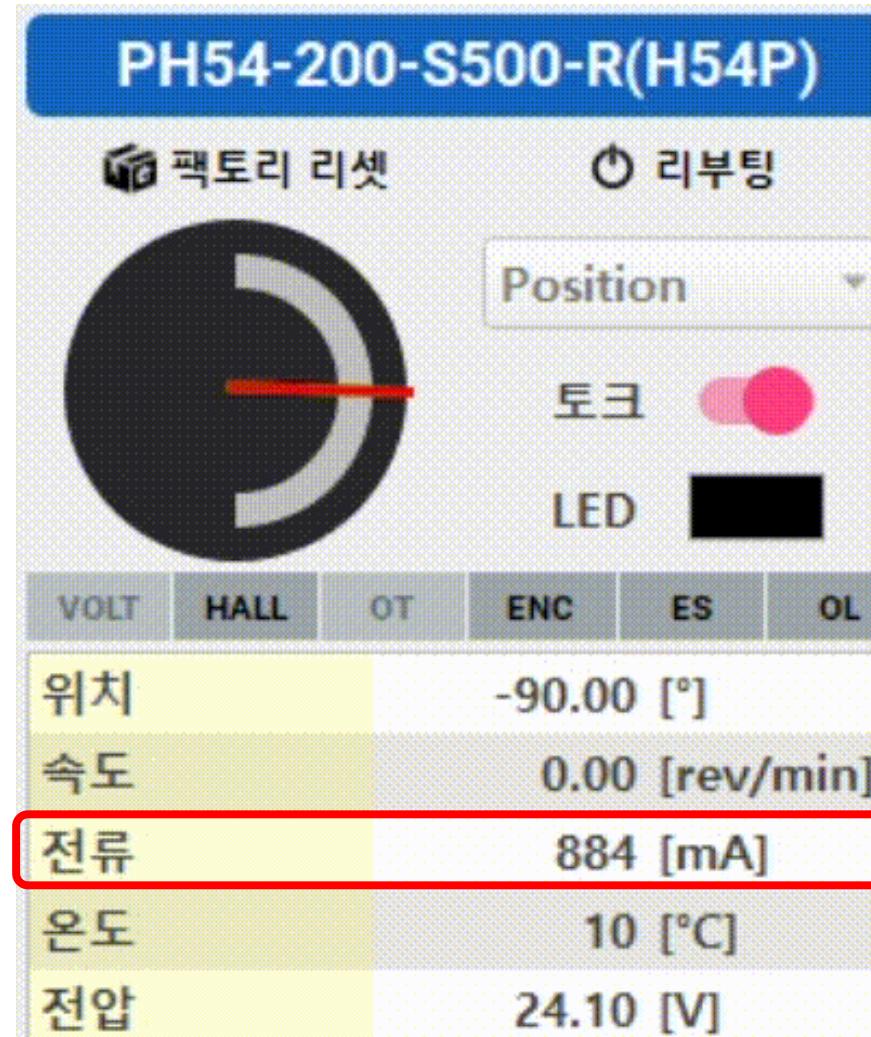
장치 미적용 평균 $I = 3600mA$
장치 미적용 순간 $I = 7000mA$

기대효과 = 이상적인 보상토크의 50%정도

결론 도출 방법



중력보상미적용



중력보상적용

결론 도출 방법

전류비 계산식 :

$$I = \frac{\text{장치적용} I}{\text{장치미적용} I}$$

장치 미적용 평균 $I = 1300mA$
장치 적용 평균 $I = 500mA$

$$I = 0.384 \text{ (원토크 62% 보상 가능)}$$

시뮬레이션

Arm Weight

Now enter the weight of each arm linkage. The center of mass is assumed to be 1/2 of L. If a linkage does not exist, set the weight to zero.

Select pounds or kilograms	kilograms
W2 0.55	W4 0.57
W6 0.62	W7 (object weight) 8

오브젝트의 무게가 8kg일 때,

Torque Results

These are the finished results. This is the maximum torque that each motor requires to lift both the arm and the given object weight at full extension at required velocity. Shorter arms and lower weights reduce required torque.

Select Units	newton*meter
Motor 0 Torque M0	0.00
Motor 1 Torque M1	109
Motor 2 Torque M2	55.0
Motor 3 Torque M3	16.3

$$109 * 0.38 = 41.42 \text{ Nm}$$

PH54 정격 : 약 44.1 Nm

→ 기존 모터의 토크로도 감당 가능

중력보상 장치의 부서짐 고려,
=최대 페이로드: 5Kg

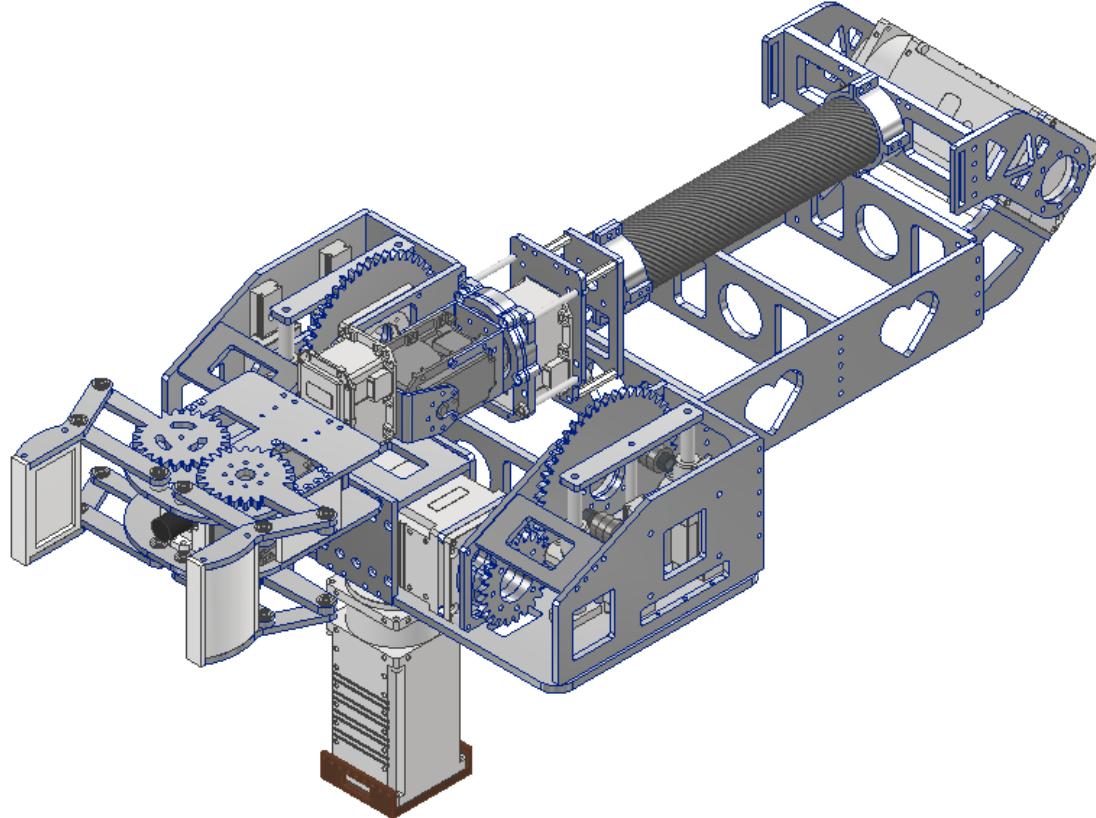
| 개선 사항

- ① 중력보상 기어를 지탱하는 프레임이 1개라서 프레임이 휘는 문제 발생
→ 프레임 수를 늘려 프레임간 결합

- ① 스프링 블록이 한쪽으로 휘는 문제 발생
→ 중력보상장치를 양 쪽으로 설치하여 한 쪽에 걸리는 스프링 강성을 0.5 배로 낮춤.

개선 사항

피드백 적용 후 최종 설계본



중력보상장치 토크 향상 계획 = 적합

<장점>

1. 스프링 강성을 병렬로 분리하니 알루미늄으로도 충분히 버팀
2. 감속비가 없기 때문에, 다이나믹셀 확장제어 안해도 됨
3. 별도의 감속 장치가 아니기에, 추가 유격이 존재하지 않음.

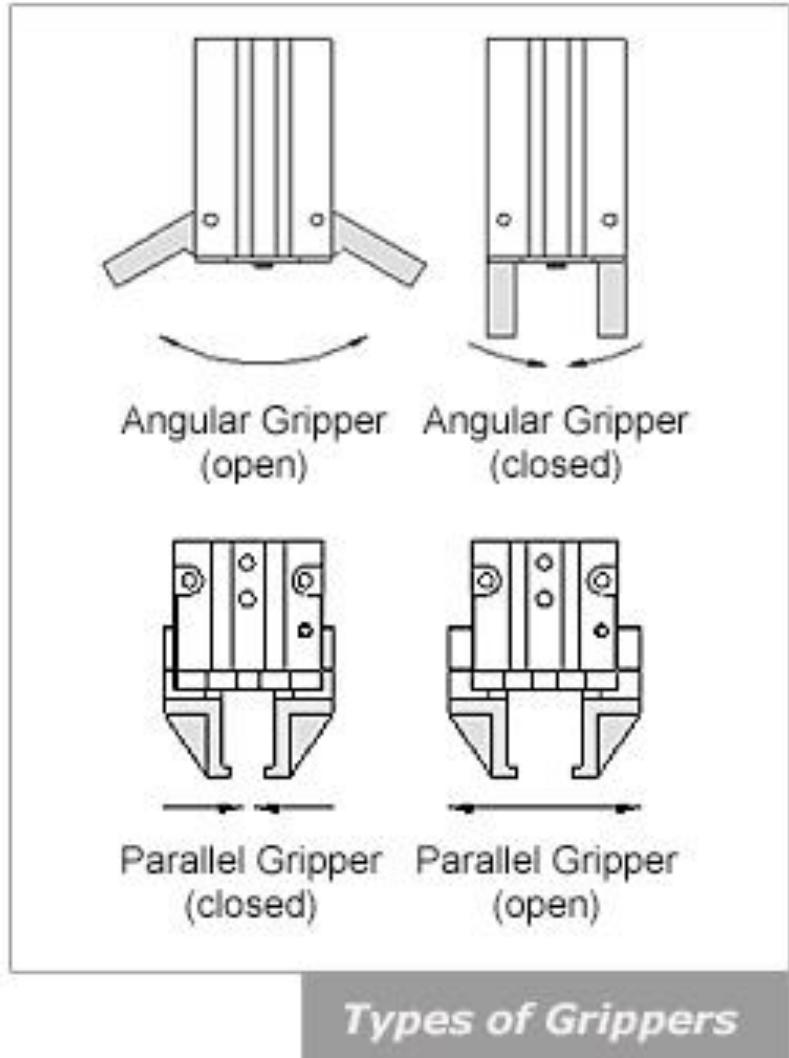


RO:BIT
ROBOT SPORT GAME TEAM

Team. RO : BIT | 그리퍼 설계

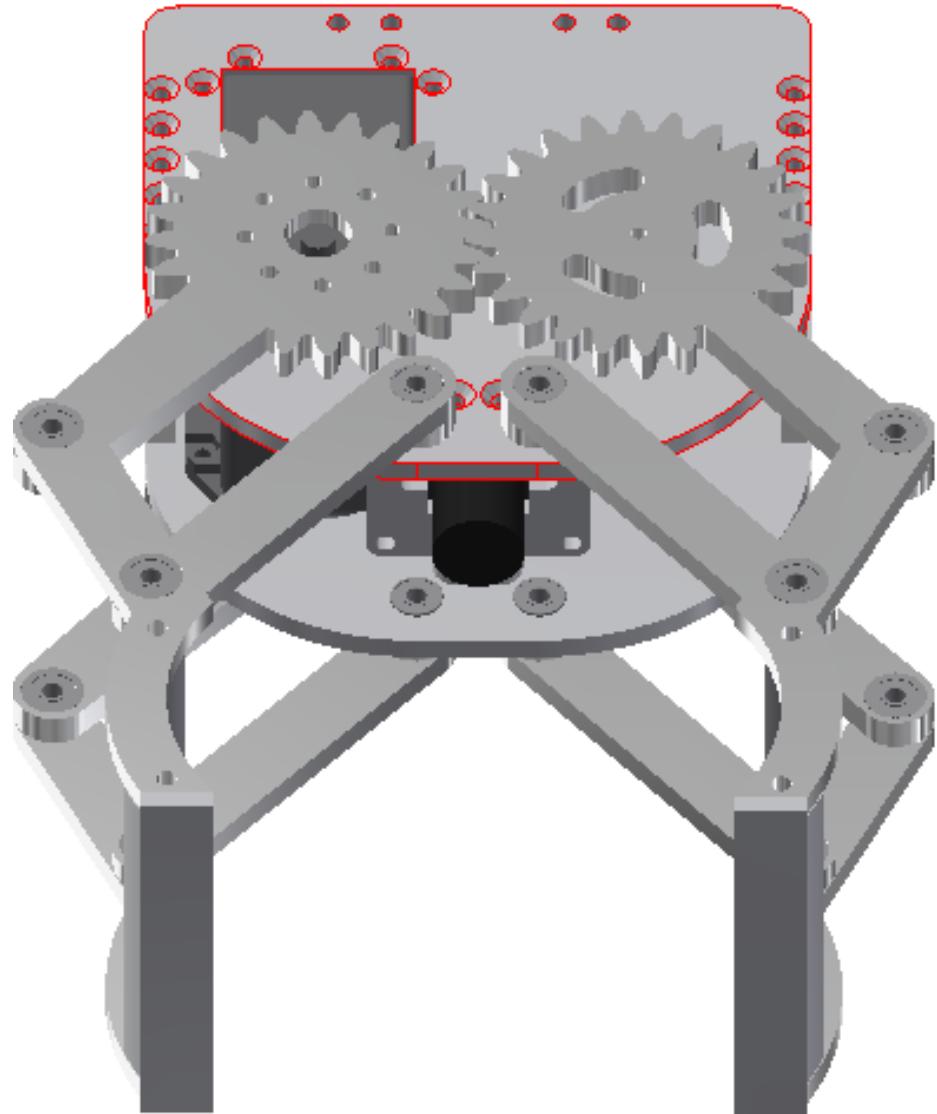
지능형 로봇팀 16기 백종욱

| 설계 목표



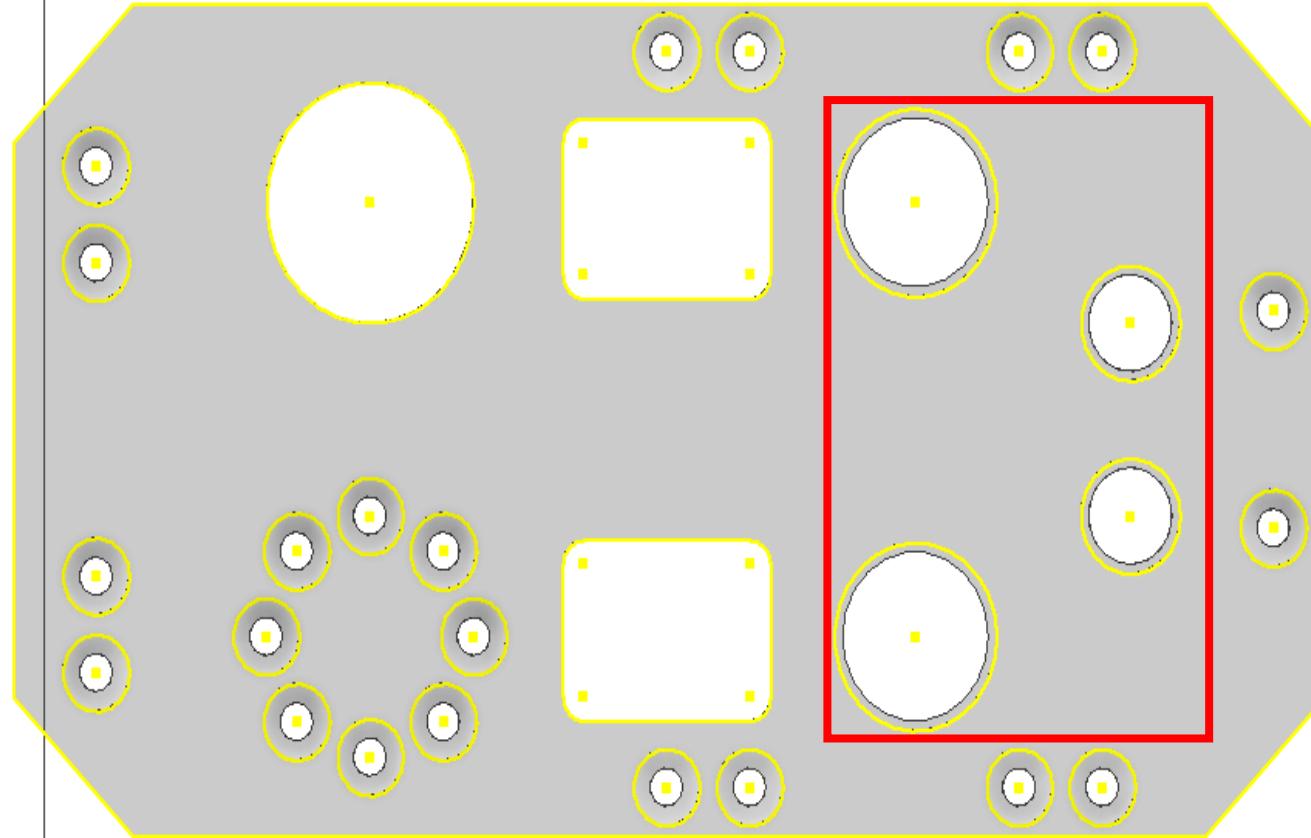
우리는 페러렐 그리퍼로 설계한다.

| 그리퍼



- 1. 스퍼기어 구조 적용**
- 2. 파지 토크 상대적으로 약함**
- 3. 유격이 덜하고 무게가 가벼움**

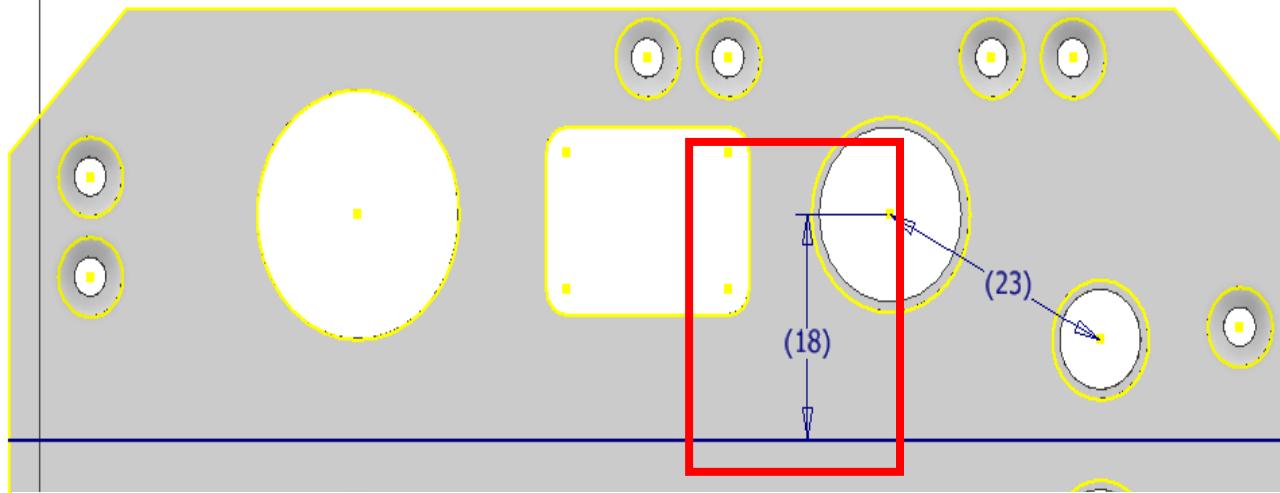
| 상판/하판 설계



상판과 하판에는 그리퍼 막대를 연결할 베어링 구멍 4개를 뚫어주어야 한다.

지금부터 원휠을 고정하는 베어링 구멍을 베어링구멍A, 그 앞쪽에 있는 작은 구멍을 베어링구멍B라고 하겠다.

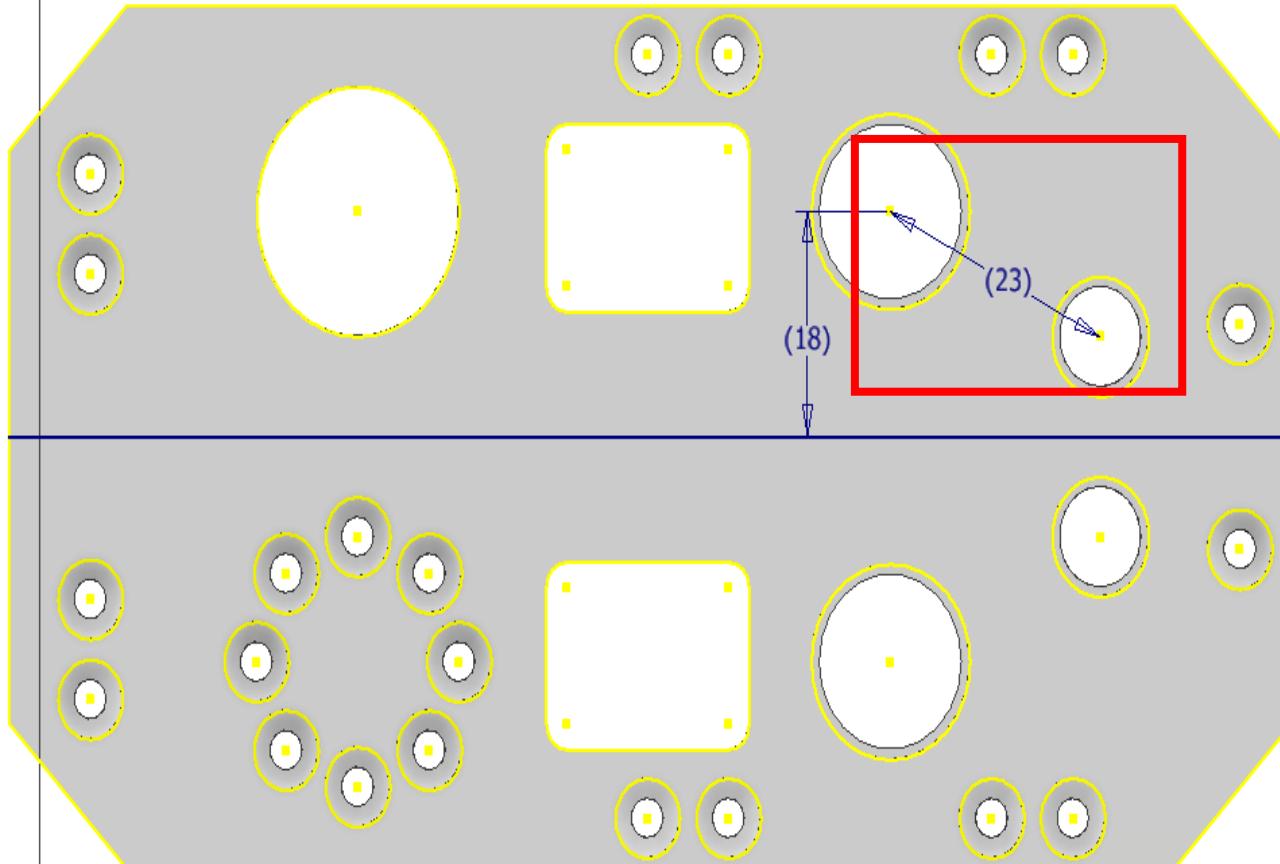
| 상판/하판 설계



먼저, 베어링 구멍A의 경우, 상판의 중심으로부터 조립거리만큼 거리에 둘는다. 조립 거리는 미스미 카탈로그를 보면서 선택한 형번에 맞는 조립거리를 찾는다. 내 원휠은 18이었다.

카탈로그 기호	보스 길이 F	전체 길이 G	웨이브 두께 (H)	림 직경 (I)	조립 거리 J	키 흠 폭	키 흠 깊이	나사 홀 사이즈	나사 홀 위치 L	허용 치면 강도 (kgf·m)	백 래시 하한 (mm)	백 래시 상한 (mm)	질량 (kg)
AG0.5-20R1	7	12	-	-	9.5	-	-	-	-	0.03	0.02	0.14	0.01
AG0.5-20R2	7	12	-	-	9.5	-	-	-	-	0.03	0.02	0.14	0.01
AG0.5-30R1	7	12	-	-	12	-	-	-	-	0.07	0.02	0.14	0.01
AG0.5-30R2	7	12	-	-	12	-	-	-	-	0.06	0.02	0.14	0.01

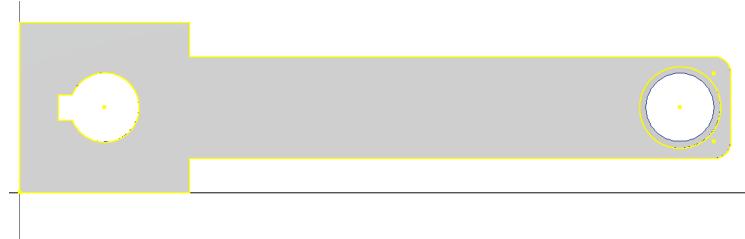
| 상판/하판 설계



그리고 베어링 구멍들 사이의 거리를 기억 한다. 지금부터 이 거리를 A라고 하겠다.
이 길이는 자기가 정해도 된다.

그리퍼막대 설계

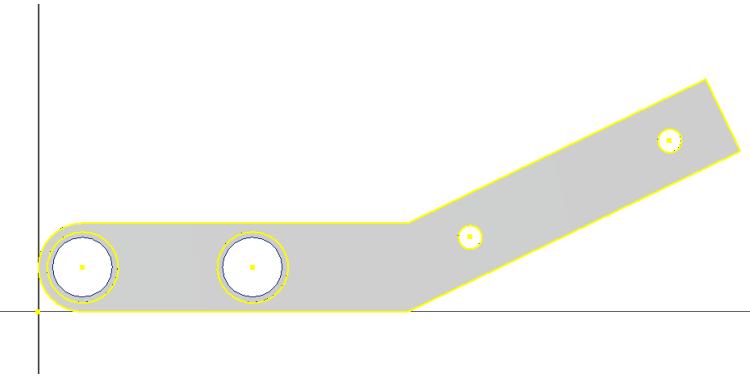
- 그리퍼막대들은 이렇게 3가지가 쓰인다.



그리퍼막대1

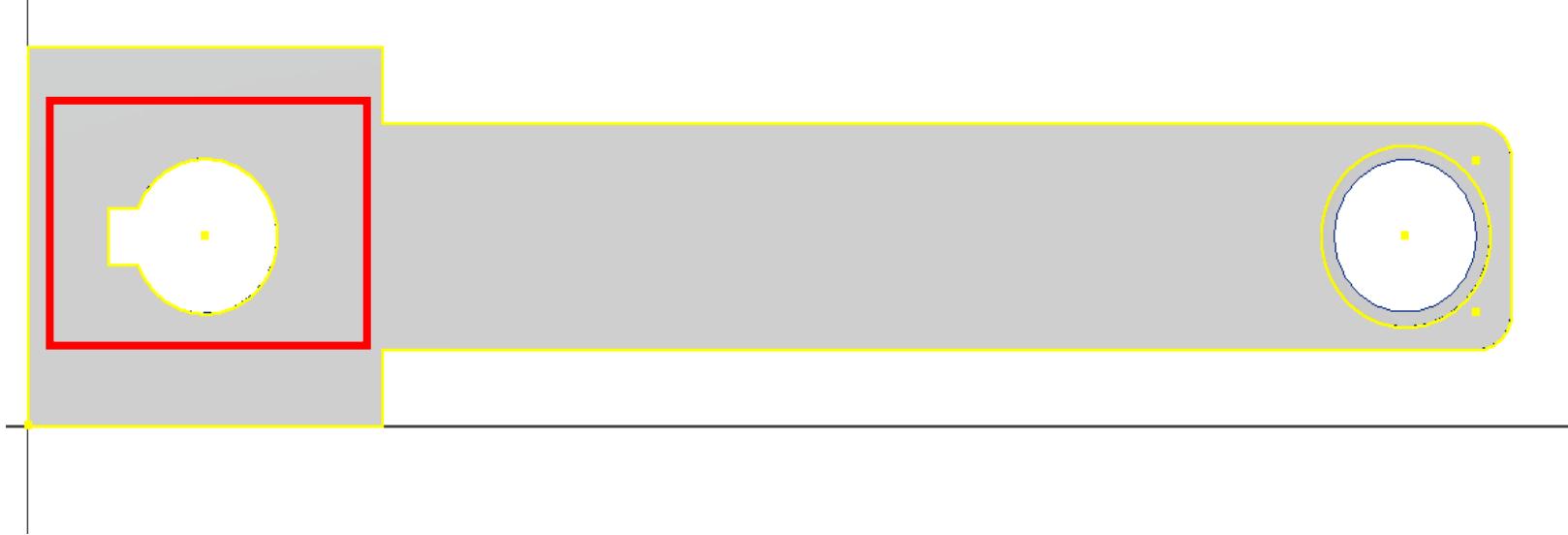


그리퍼막대2



그리퍼막대3

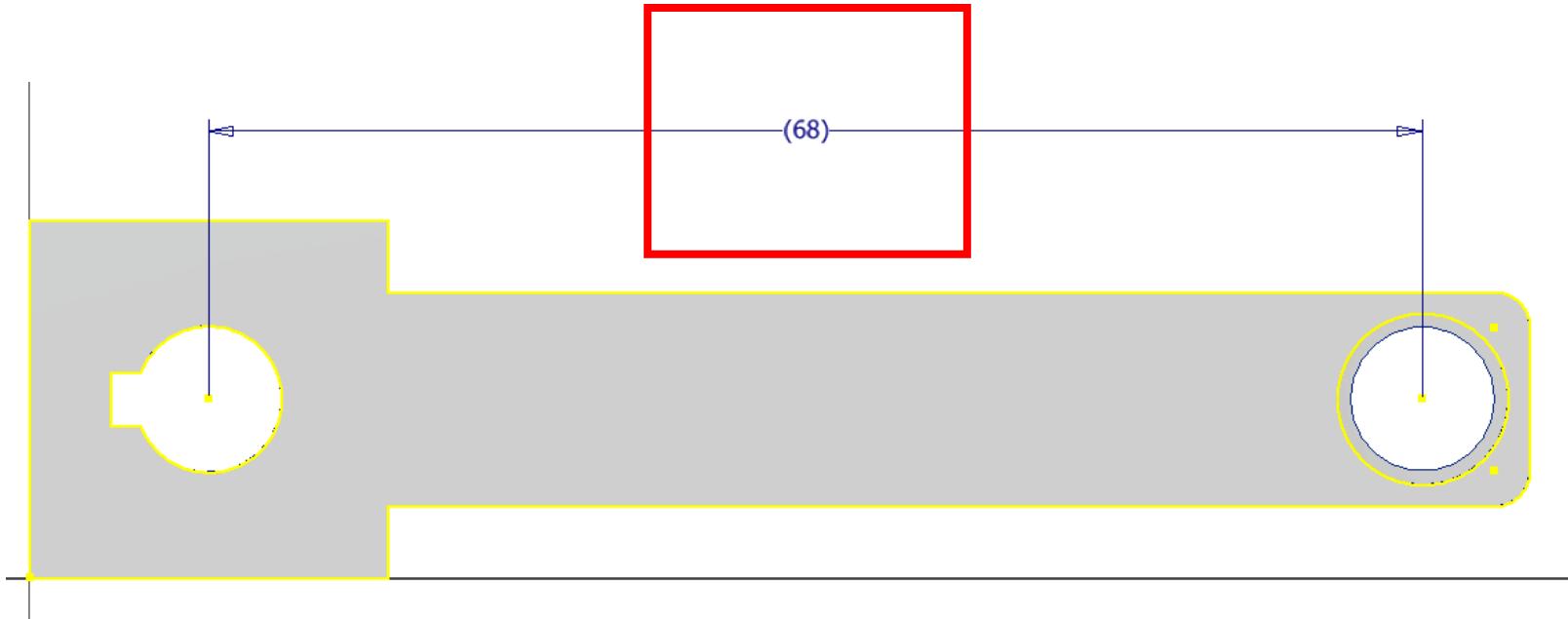
| 그리퍼막대1 설계



그리퍼막대1에서는 베어링구멍A와 같은 축을 공유하는 구멍과 그리퍼막대3과 연결되는 구멍 2개가 필요하다.

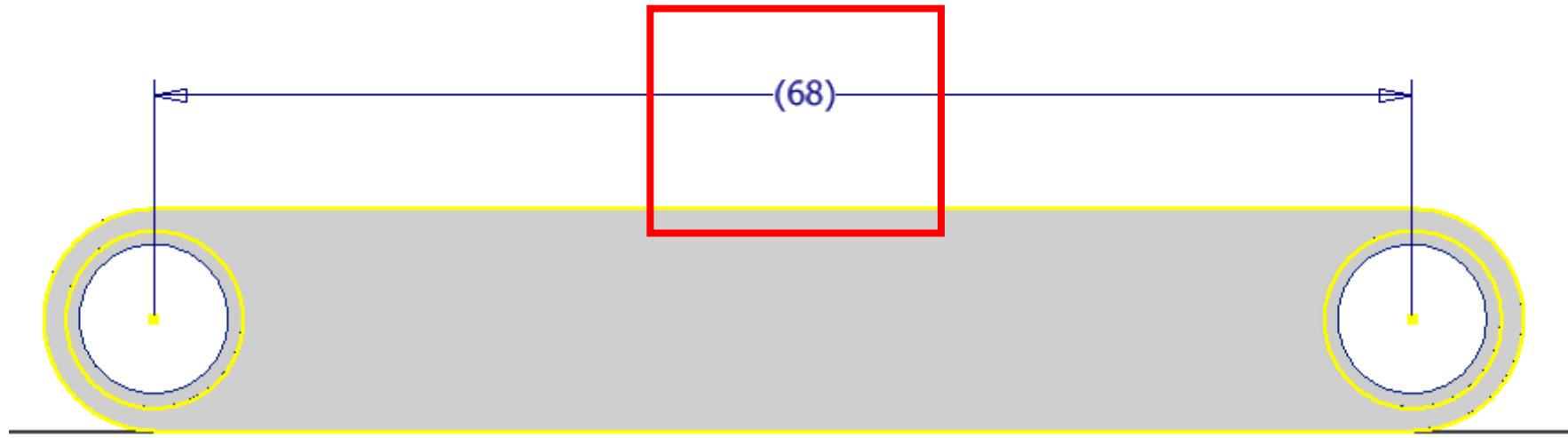
원휠축과 결합방식으로 탭과 키를 사용하였다.

| 그리퍼막대1 설계



이때 두 구멍 사이의 거리를 기억한다.
지금부터 이 거리를 B라고 하겠다.
이 길이는 자기가 정해도 된다.

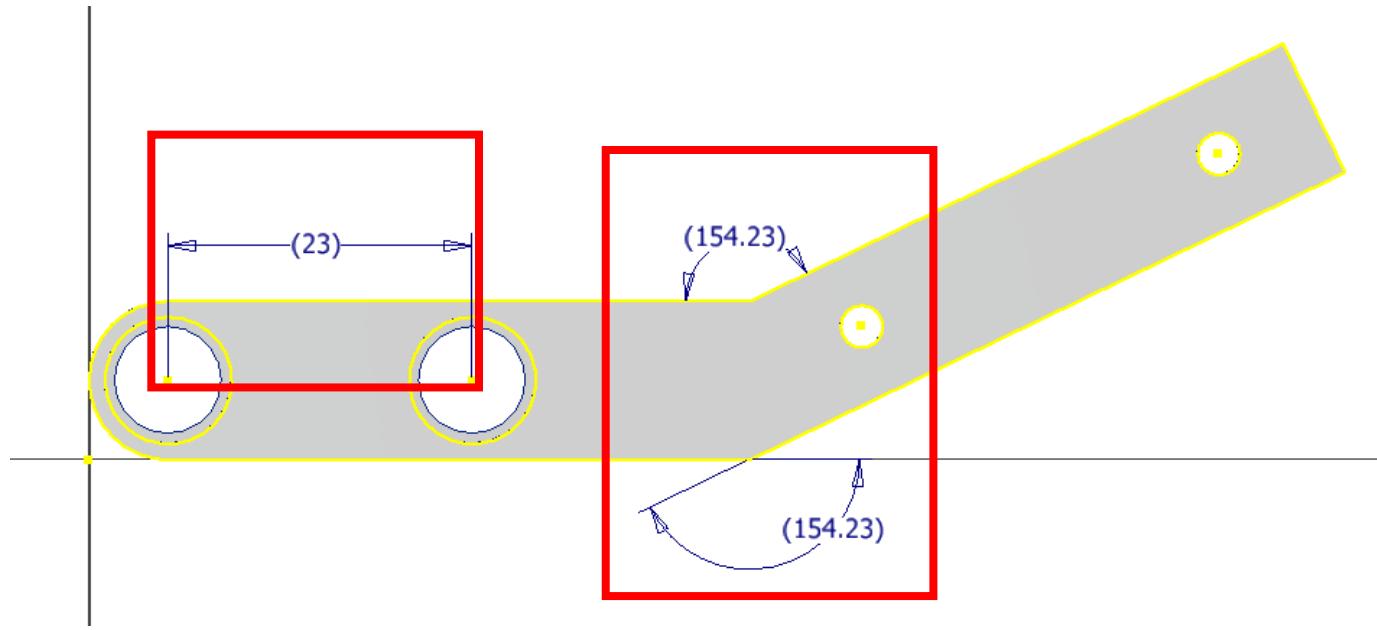
| 그리퍼막대2 설계



그리퍼막대2는 베어링구멍B와 같은 축을 공유하는 구멍 그리고 그리퍼막대3과 연결되는 구멍 총 2개가 필요하다.

이때 두 구멍 사이의 거리는 거리 B와 같게 한다.

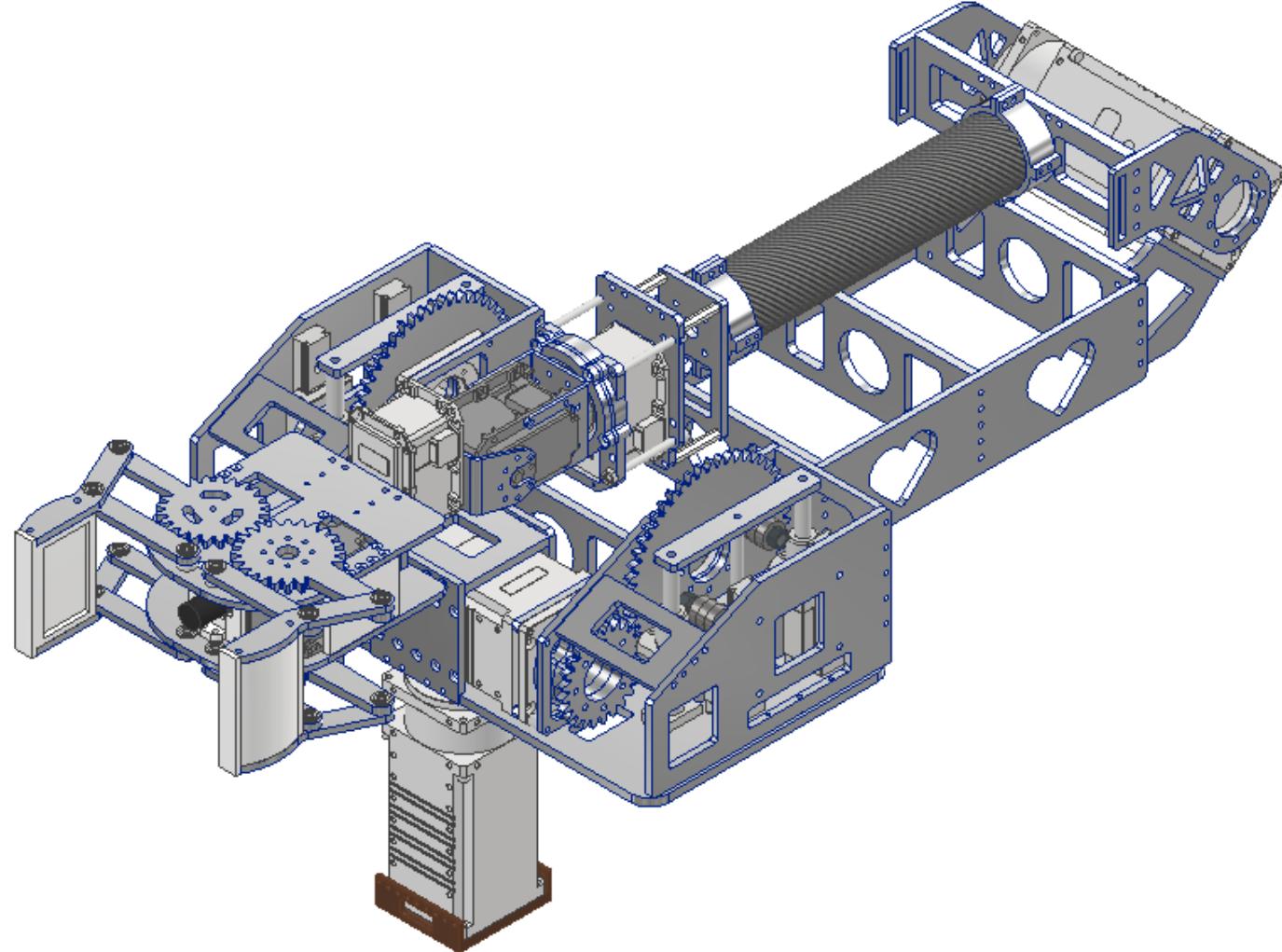
| 그리퍼막대3 설계



그리퍼막대3은 막대1,2와 연결되는 구멍 2개, 그리고 각도가 필요하다. 이때, 두 구멍사이의 거리는 거리A와 같게 한다.

또한, 그림에 보이는대로 두 각도를 일치시켜야 그리퍼가 물체를 수평으로 파지할 수 있다.

최종 설계본



Thank you
