

대한기계학회 주최

제11회 전국학생설계경진대회(2021년)

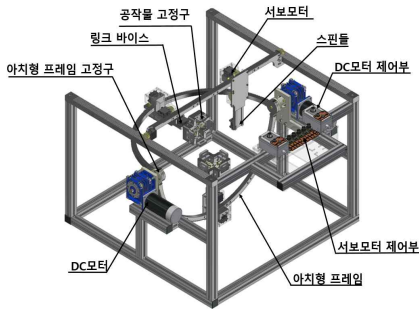
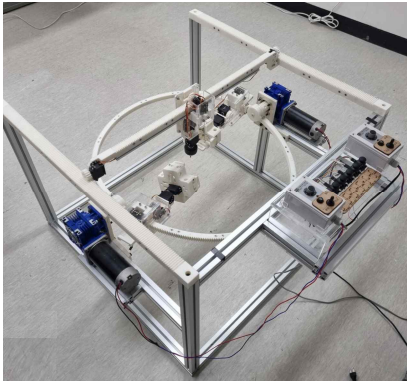
설계 최종 보고서

참가부	대학부 (O)				
참가분야	공모주제 () / 자유주제 (O)				
참가팀명	Baltan				
설계제목	자동 회전 링크 바이스 로봇				
지도교수/교사	(소속) 한국폴리텍VII대학 창원캠퍼스 컴퓨터응용기계설계과 (성명) 유대원				
대표자 (신청인)	성명	소속	연락처 (휴대폰)	E-mail	주소
	김승용	한국폴리텍VII대학(창원) 컴퓨터응용기계설계과			

참가팀원 인적사항

NO	성명	소속 / 학년	E-MAIL
1	김승용	한국폴리텍VII대학(창원) 컴퓨터응용기계설계과 / 2학년	
2	오동현	한국폴리텍VII대학(창원) 컴퓨터응용기계설계과 / 2학년	
3	김준현	한국폴리텍VII대학(창원) 컴퓨터응용기계설계과 / 2학년	
4	박찬익	한국폴리텍VII대학(창원) 컴퓨터응용기계설계과 / 1학년	
5	이민혁	한국폴리텍VII대학(창원) 컴퓨터응용기계설계과 / 1학년	

설계 요약문

참가분야	공모주제 () / 자유주제 (O)
참가팀명	Baltan
설계제목	자동 회전 링크 바이스 로봇
대표자명	김 승 용
요약문	가공 현장에서는 바이스에 공작물을 세팅할 때 작업자가 수작업으로 세팅을 한다. 이 경우 작업자가 설비 문을 열고 몸을 숙이며, 스피들의 이동 반경에 들어가야 하므로 예상치 못한 위험이 있다. 또한 가공 공정의 자동화가 불가능하므로 인적 실수가 발생할 수 있는 위험요인이 있다. 이것의 해결방안은 수동으로 공작물을 재세팅하는 방식이 아닌 <u>링크 바이스가 자동으로 공작물을 고정하고, 세팅해 공작물의 전체 작업 범위의 가공이 가능한 방식으로 설계·제작하였다. 공작물을 고정하고 있는 링크 바이스가 아치형 프레임을 따라 움직이면서, 공작물을 가공한다. 이후, 반대쪽 링크 바이스가 공작물의 가공면을 고정하고, 가공되지 않은 면을 가공하는 방식</u>이다. 여기서, 스피들은 x, y, z 축으로 이동하면서 가공을 할 수 있다. 기존 설비에서 사용하는 수동적인 방식의 바이스를 링크 바이스로 변경하여, 발생할 수 있는 위험을 사전에 방지하고, 가공 공정을 단축하여 전체적인 생산량의 증가와 불량률을 감축시키는 것을 목적으로 한다.  [3D Modeling view]  [Prototype geometry]

- 본 설계보고서가 최종 입상할 경우 대한기계학회 논문집C권에 투고됨을 동의함
- ※ 투고된 논문의 심사 및 출판은 본 경진대회 심사와는 별개로 진행됨.
- ※ 설계 요약문은 공개될 예정이며, 제출 시 이에 동의하는 것으로 간주함.
- ※ 제공된 개인정보는 심사과정에만 사용되며, 제출 시 이에 동의하는 것으로 간주함.

자동 회전 링크 바이스 로봇의 구조적 매커니즘 개발

김승용* · 오동현* · 김준현* · 박찬익* · 이민혁* · 유대원**

*한국폴리텍VII대학 창원캠퍼스 컴퓨터응용기계설계과

Development of structural mechanism of automatic rotating link vise robot

Seung Yong Kim*, Dong Hyeon Oh*, Jun Hyeon Kim*, Chan Ik Park*, Min Yeok Lee*
and Dae Won Yoo**

* Department of Computer Aided Mechanical Design, Changwon Campus of Korea Polytechnic VII Colleges
(Received January 1, 2013 ; Revised January 2, 2013 ; Accepted January 3, 2013)

Key Words: Arched Frame(아치형 프레임), Rack & Pinion Gear(랙 & 피니언 기어), Working Range(작업 범위), Automation Equipment(자동화 설비), Link Vise(링크 바이스)

초록: 국내뿐만 아니라 국외에서도 스마트 팩토리 구축을 위한 발전은 계속되고 있다. 자동화된 생산 라인을 위해 다양한 기계가 개발되어 있지만, 대부분의 기계는 각각의 공정들이 연결되어 있지 않아 본질적인 문제를 해결하지 못하고 있다. 본 개발품은 링크 바이스가 아치형 프레임에 고정되어 랙 & 피니언 기어와 서보모터를 통해 360° 회전 운동이 가능하며, 링크 바이스끼리 공작물을 주고받아 공작물 전체 면적의 가공이 가능해 넓은 작업 범위를 얻을 수 있다. 이는 작업자의 공작물 교체 시간을 제거해 생산에 불필요하게 소요 시간을 단축하며, 공작물의 고정부터 다음 공정까지의 모든 과정의 자동화가 가능해 현재 제조 로봇 시장에 새로운 패러다임을 제시할 것으로 판단된다.

Abstract: Developments for smart factory construction are continuing not only in Korea but also abroad. Various machines have been developed for automated production lines, but most machines do not solve the essential problem because each process is not connected. In this developed product, the link vise is fixed to the arcuate frame, and 360 rotational motion is possible through the rack & pinion gear and servo motor. It is expected to present a new paradigm in the current manufacturing robot market as it eliminates the time required to replace the workpiece by workers, shortens the production time unnecessarily, and enables automation of all processes from fixing the workpiece to the next process.

1. 서 론

로봇이란 용어는 1921년 카렐 차펙(Karel Capek)이 쓴 희곡에서 유래하여, 반복 노동을 대체하는 자동화 기계로 인식되어왔다. 현재 시대에 이르러 로봇 기술은 고도화된 발전을 이루어 각종 산업 분야에서 비약적인 발전 및 생산량의 증대를 이끌어왔다. 한국 로봇산업진흥원에서 2021년에 발행한 로봇산업 실태 조사 결과 보고서⁽¹⁾에 따르면 국내 사업체의 22.3%(498개사)가 로봇산업과 관련한 설비 투자 경험이었음을 보고했으며, 이 중 생산 설비에 투자액이 가장 큰 것으로 확인되었다.

* Corresponding Author, yoodw14@kopo.ac.kr

□ 2021 The Korean Society of Mechanical Engineers

이는 2019년에 발행한 로봇산업 실태 조사 결과 보고서에서 보고된 설비 투자 경험 18.2%(397개사)보다 증가했으며, 이를 통해 국내 사업체의 로봇산업에 대한 관심도가 증가하고 있음을 확인할 수 있다.

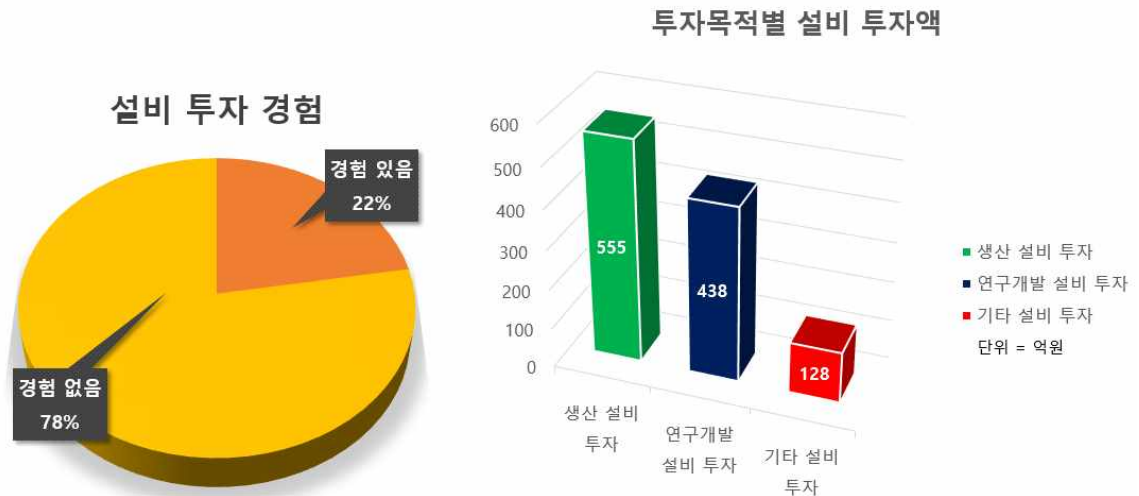


Fig. 1 Facility investment by investment purpose in the robot industry

관심이 증가하고 있는 산업용 로봇 시장에서 경쟁력을 확보하기 위해서는 기존에 개발된 공작기계보다 넓은 작업 범위의 구축과 전체적인 공정의 자동화를 구축할 필요성이 있다. 본 개발품은 Fig. 2와 같이 기계적인 요소와 구조적 메커니즘의 개발을 통해 기존 공작기계의 좁고 한정된 작업 범위의 한계점을 극복하고 단점을 보완하여 국가 기술 경쟁력을 증가시켜, 스마트팩토리 구축에 이바지하는 것을 목적으로 한다.

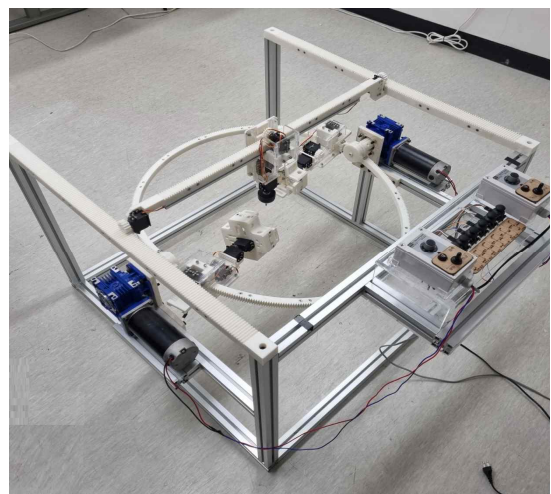
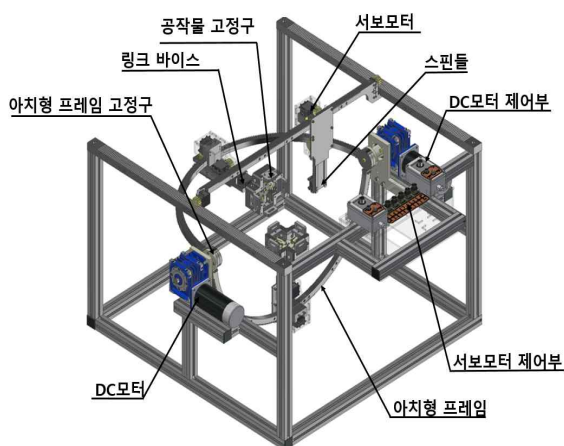


Fig. 2 Modeling and prototyping of developed product

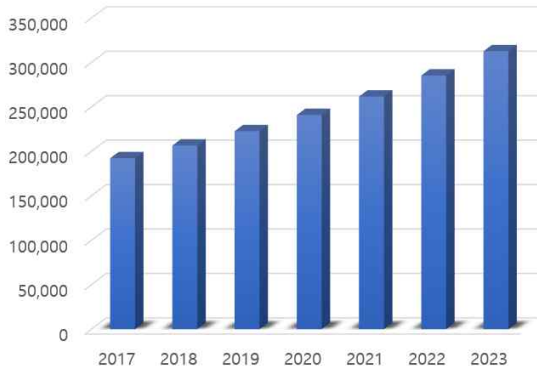
2. 설계핵심내용

2.1 설계 주제의 시장조사 및 타당성

2.1.1 시장조사

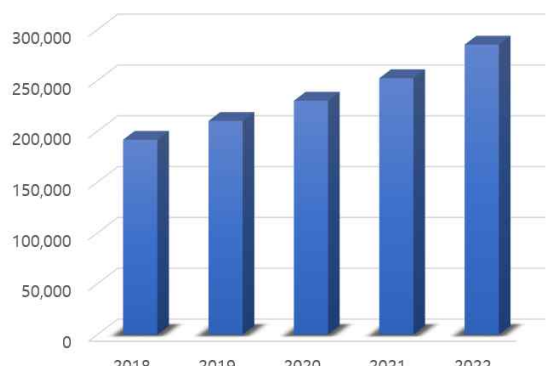
중소벤처기업부의 중소기업 전략 로드맵⁽²⁾에 따르면 세계 정밀기계시장은 2017년 1,921억 달러에서 연 평균 7.3%의 성장률을 기록하며, 2023년 3,126억 달러 수준으로 증가할 것으로 확인되었다. 국내 정밀기계산업 시장의 경우, 2018년 약 17.5조 원에서 연평균 9.46%의 성장률을 기록하며 2022년에는 약 25조 원에 이를 것으로 전망하였다.

세계 정밀기계 시장규모 및 전망



단위 = 백만 달러

국내정밀기계 시장규모 및 전망



단위 = 억 원

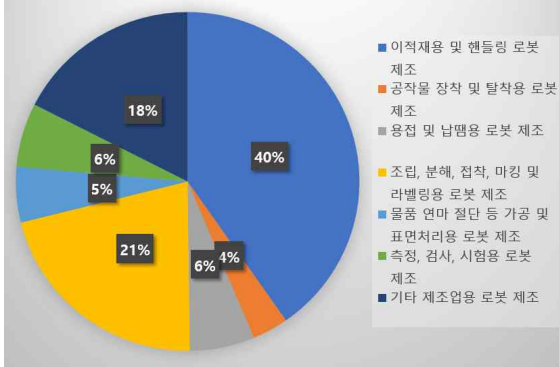
(a) Forecast of precision machine tools in the world market

(b) Forecast of precision processing system in Korea

Fig. 3 Prospects for the growth of precision processing in the global and domestic markets

한국 로봇산업 진흥원에서 2021년에 발행한 로봇산업 실태 조사 결과 보고서⁽¹⁾에 따르면 국내 제조업용 로봇 생산 현황에 따르면 물품연마, 절단 등 가공 및 표면처리용 로봇 제조율이 5.3%로 상당수 저조하게 나왔다.

제조업용 로봇 생산 현황



제조업용 로봇 생산 현황

단위 = 억 원

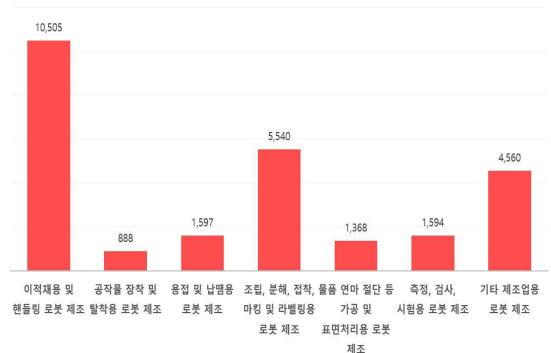


Fig. 4 Status of domestic manufacturing robots

ServiceNow에서 발행한 Workflow Quarterly⁽³⁾에서 보고한 바에 따르면 고도로 자동화된 기업은 동종 업체보다 연간 매출 성장률이 9%이상이며, 경쟁사보다 이익이 6% 높게 조사되었다. 재무 목표 초과율 또한 8% 높은 것으로 보고했다.

고도로 자동화된 기업과 동종 업체와의 차이점

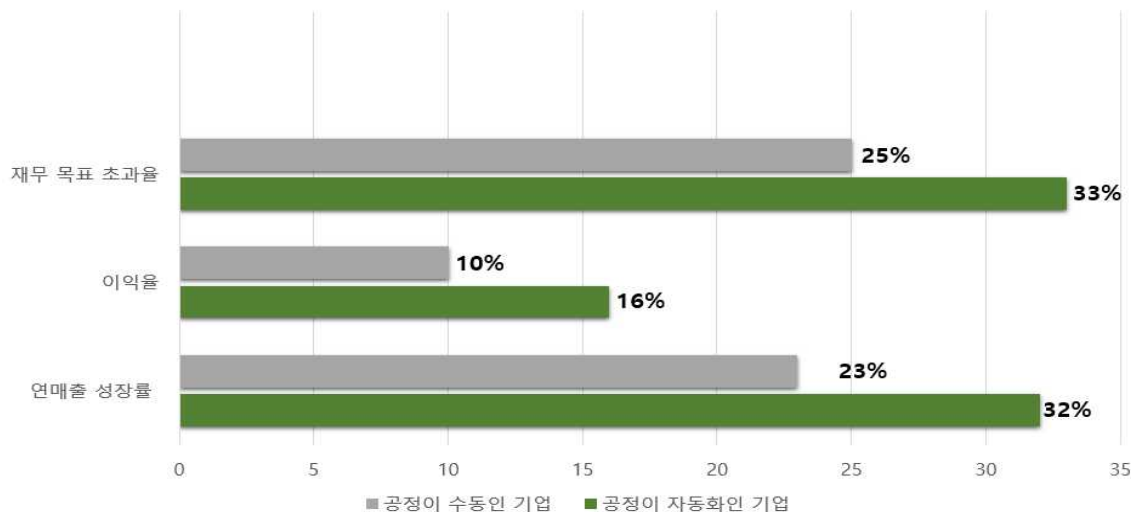


Fig. 5 The difference between a highly automated company and its peers

WorkMarket의 2020In(Sight) 보고서⁽⁴⁾에 따르면 직원의 53%가 공정의 자동화를 통해 하루 최대 2시간(연간 240시간)을 절약할 수 있다고 밝혔고, 비즈니스 리더의 78%는 자동화를 통해 하루 최대 3시간을 절약할 수 있다고 조사되었다. 주당 근무 시간이 40시간으로 가정하면 자동화를 통해 직원은 연간 6주, 비즈니스 리더는 9주를 절약할 수 있는 수치이다.

자동화로 인한 시간 절약 조사

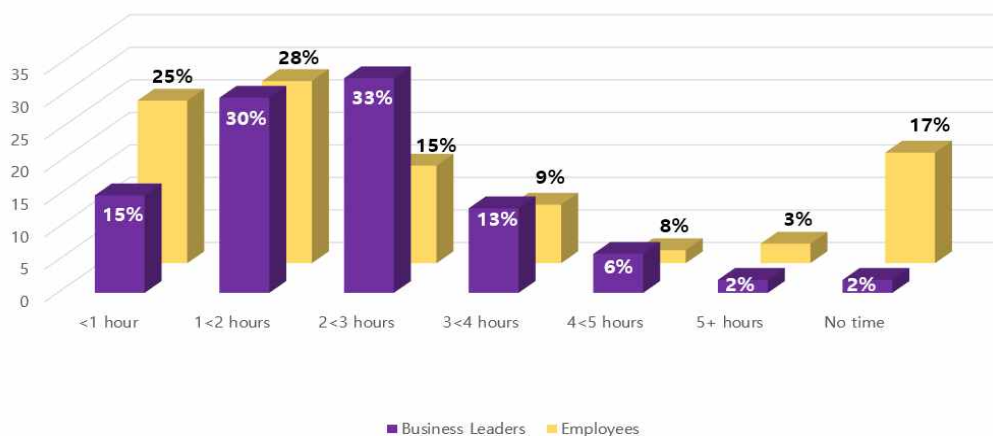


Fig. 6 Save time with automation

세계 및 국내의 정밀 기계 시장은 매년 꾸준히 증가하고 있다. 하지만 국내 물품연마, 절단 등 가공 및 표면처리용 로봇의 제조율은 5.3% 상당히 저조하다. 본 제안서의 메커니즘을 가공 산업에 도입한다면 앞서 언급했던 공작물의 고정부터 다음 공정까지의 모든 과정의 자동화가 가능하며, 작업자의 공작물 교체 시간을 제거해 생산에 불필요하게 소요 시간을 단축해 현재 제조 로봇 시장에 새로운 패러다임을 제시할 것으로 판단된다.

2.2 특허 조사 및 분석

Table 1 Related Patent Search Results

Search formula	MCT = 4,274 cases	4,483 total searches (6 valid patents)
	Milling Vise = 48 cases	
	밀링 바이스 = 161 cases	

2.2.1 기존 특허의 문제점

- 1) 가공 종료 후 공작물의 후면을 가공하기 위해 작업자 또는 로봇이 재세팅 과정을 거치므로 사이클 타임에 큰 영향을 준다.
- 2) 작업자가 설비 문을 열고 몸을 숙이며 스핀들의 이동 반경에 들어가야 하므로 예상치 못한 위험이 있다.

2.2.2 문제점 해결방안

- 1) 아치형 프레임, 링크 바이스, 서보모터를 통해 공작물의 전체 면적을 가공할 수 있는 메커니즘을 설계하며 최소한의 인력으로 전체 공정의 제어가 가능하다.
- 2) 공작물 재세팅으로 인한 사이클 타임의 단축으로 생산량이 증대하며, 한 번의 사이클로 가공이 완료되기 때문에 작업자 안전이 보장된다.



Fig. 7 Domestic and foreign patents

2.3 제품의 설계구조

자동 회전 링크 바이스 로봇은 Fig. 8과 같이 아치형 프레임에 랙&피니언 기어를 이용해 기존의 공작 기계의 제한적인 범위의 작업 반경을 공작물의 전체 범위의 가공이 가능하게 한 제품이다. 본 제품은 13개의 서보모터로 시제품의 움직임을 제어했으며, 각각 운동 부위의 필요한 모터를 선정하여 설계를 진행하였다. Fig. 8과 Fig. 9는 설계도면이다.

아치형 프레임 헤드부

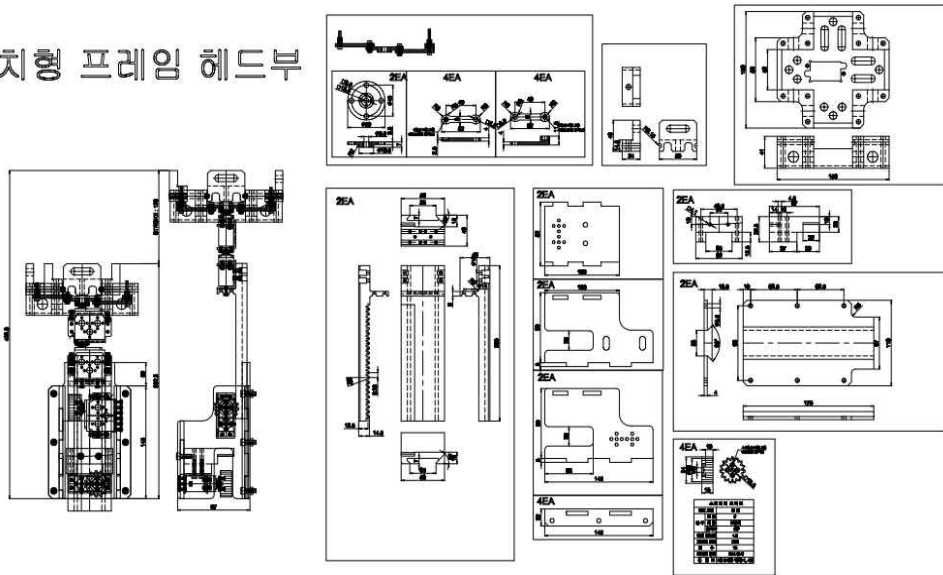


Fig. 8 Auto rotating link vise robot drawing

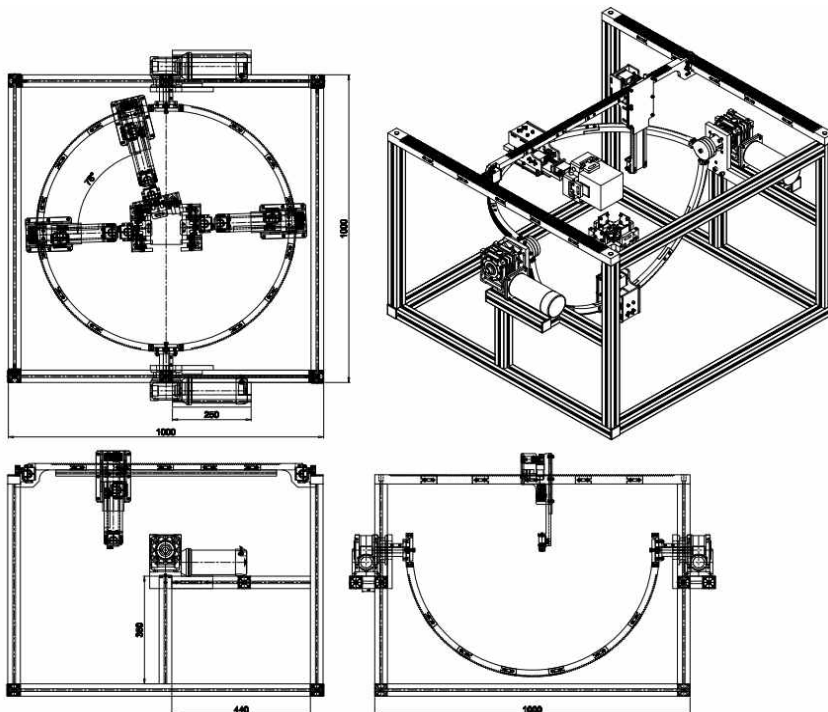


Fig. 9 Arched frame drawing

2.3.1 링크 바이스 설계

하나의 서보모터로 공작물의 고정을 구현하기 위해 Fig. 10과 같이 링크를 이용한 바이스를 구상했다. 서보모터에 입력 신호를 주었을 때 링크 고정구를 회전시키며, 링크에 연결된 공작물 고정구를 직선 운동시켜 공작물을 고정하는 방향으로 링크 바이스의 설계를 진행했다.

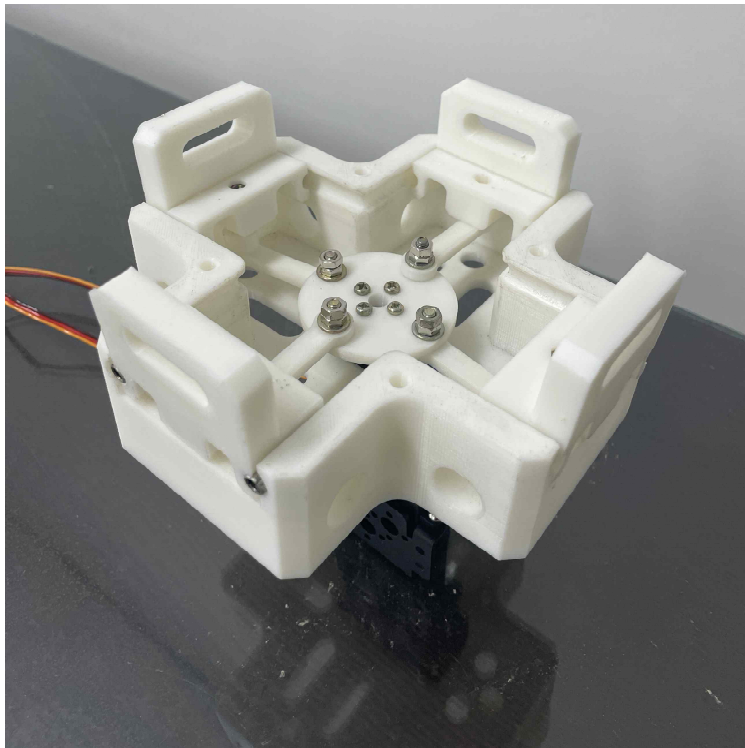
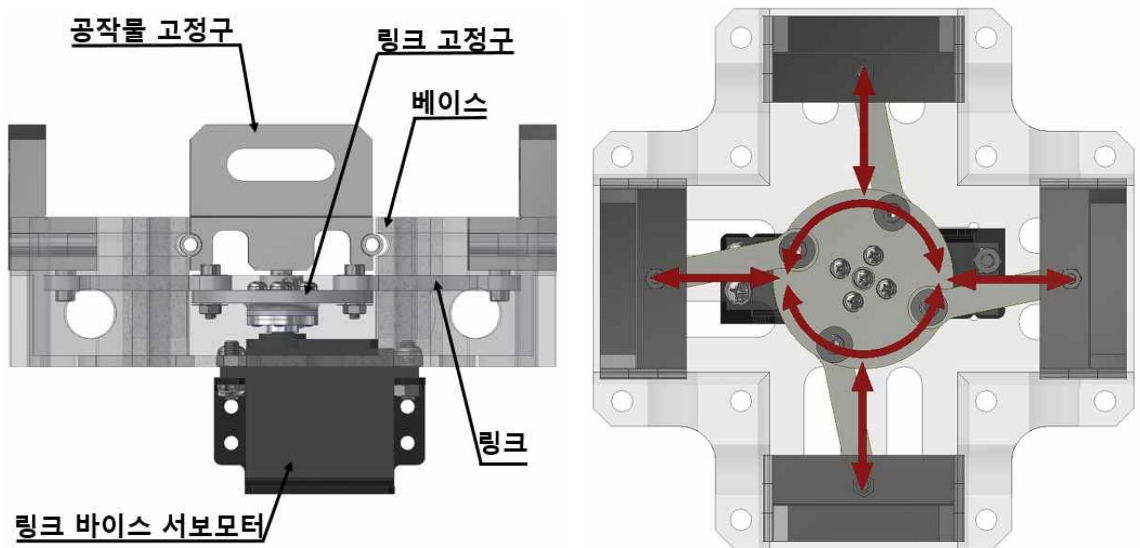


Fig. 10 Link vise robot mechanism

2.3.2 랙 & 피니언 설계

공작물의 위치 조정 및 전달을 위해 Fig. 11과 같이 랙&피니언 기어를 이용한 메커니즘을 구상했다. 서보모터는 아크릴판으로 제작한 헤드부 프레임에 체결하고 서보모터에 고정된 피니언 기어가 회전해 랙 기어는 직선 운동한다.

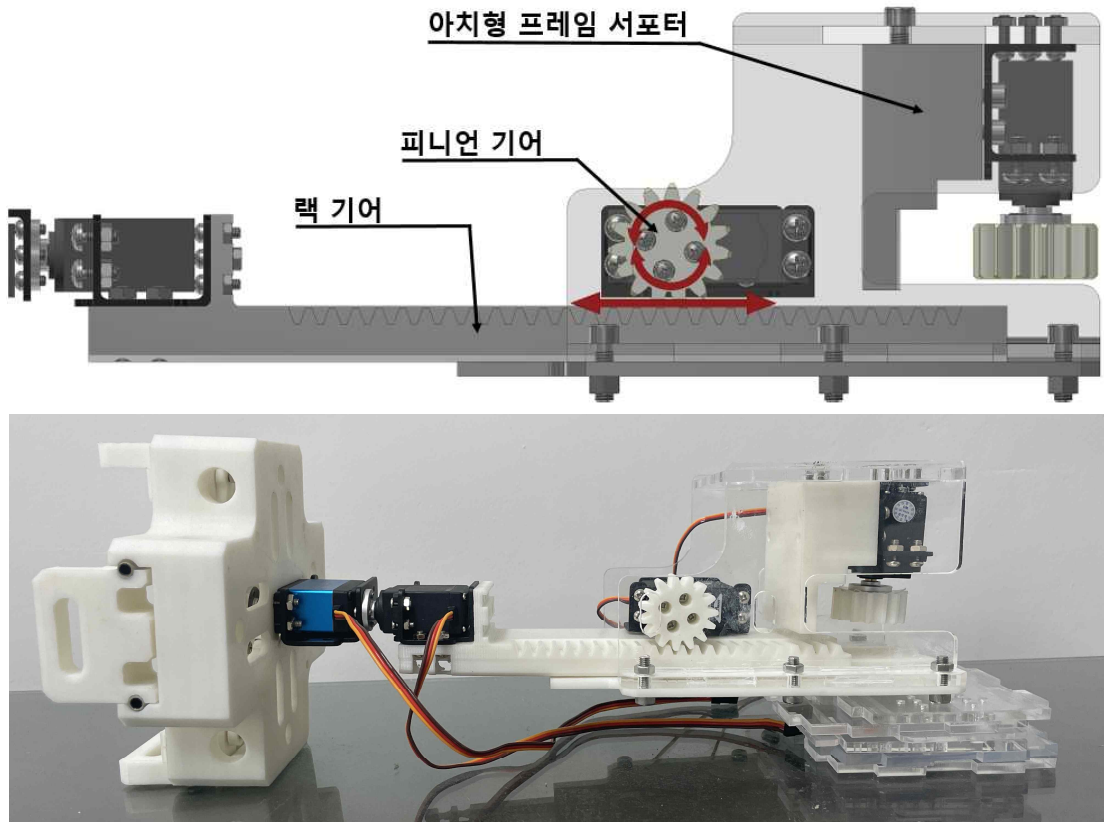


Fig. 11 Rack and pinion gear mechanism

2.3.3 떨림 방지 고정구 설계

가공작업 중의 아치형 프레임의 좌우 흔들림 및 떨림을 방지하기 위하여 Fig. 12와 같이 떨림 방지 고정구를 구상하여 제작하였다. 프레임의 접합부에 고정구를 설치하여 하나의 고정구로 2개의 프레임을 모두 고정시킬 수 있도록 설계하였다. 경험과 같은 원리로 조립하여 동작이 편리하도록 제작하였다.

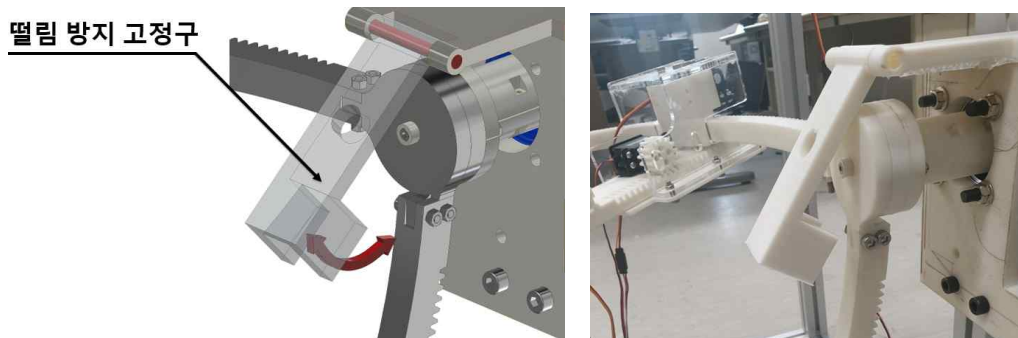


Fig. 12 Anti-shake fixture design

2.3.4 아치형 프레임 설계

링크 바이스 조립체를 회전시키기 위해 Fig. 13과 같이 랙 기어로 구성된 아치형 프레임과 서보모터에 고정된 피니언 기어를 통해 링크 바이스 조립체 회전이 가능하도록 구상했다. 서보모터는 아크릴판으로 제작한 헤드부 프레임에 체결하고 서보모터에 고정된 피니언 기어가 회전해 아치형 프레임을 타고 회전한다.

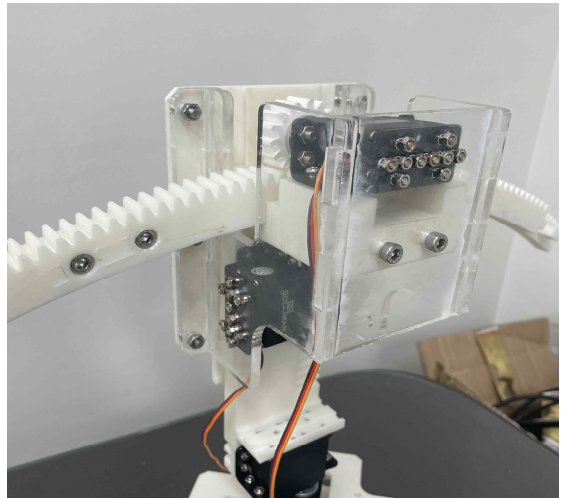
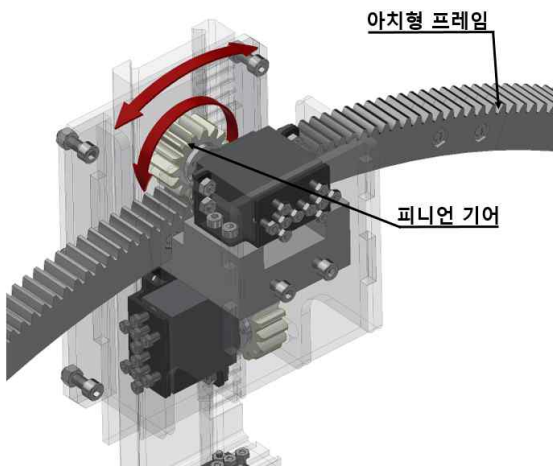


Fig. 13 Arched frame mechanism

2.3.5 제어 박스 설계

앞서 언급한 것처럼 본 메커니즘을 구동하기 위해선 총 13개의 서보모터와 2개의 DC 모터가 필요하다. 서보모터의 컨트롤러인 조이스틱과 DC 모터 컨트롤러를 구동시키기 위해 Fig. 14와 같이 설계해 아크릴판을 레이저 절단기를 사용해 제작했다.

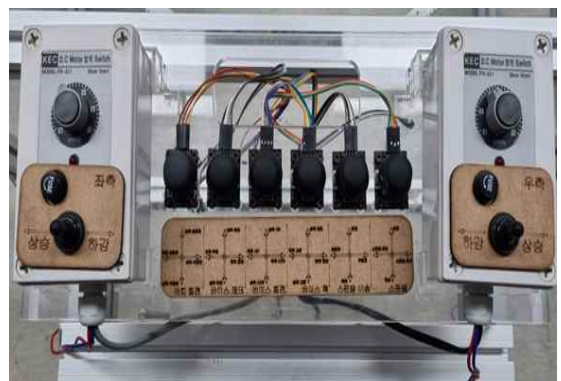
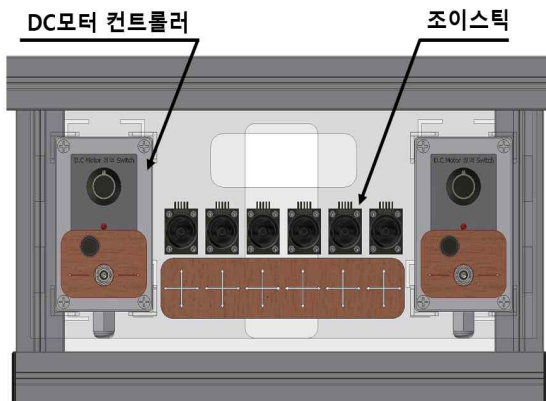


Fig. 14 Control box mechanism

2.4 상세 설계

2.4.1 모터 출력 설계

1) 링크 바이스 조립체를 회전하기 위한 토크 및 동력 계산

링크 바이스 조립체에 서보모터를 구별해 0~180° 회전이 가능한 서보모터와 0~360° 회전이 가능한 서보모터를 선정하였으며, 가장 많은 하중을 받는 곳인 아치형 프레임에 고정되어 링크 바이스를 회전하

는 모터의 토크를 계산했다. 식(1)을 이용하여 원주 속도를 계산하였고, 0.094m/s의 결과를 나타내었다.

여기서 v 는 원주 속도, r 은 아치형 프레임 반지름 N 은 모터의 회전수이다. 모터의 회전수는 조립체의 아치형 프레임 왕복 시간을 예상하여 15초에 1회 왕복할 수 있는 60rpm으로 선정했다.

$$v(m/s) = r(m) \times \frac{2\pi(rad \cdot min)}{60(rev \cdot sec)} \times N\left(\frac{rev}{min}\right) \dots\dots\dots (1)$$

$$v(m/s) = 0.015m \times \frac{2\pi(rad \cdot min)}{60(rev \cdot sec)} \times 60\left(\frac{rev}{min}\right) \cong 0.094m/s$$

모터에 필요한 동력은 식(2)를 이용하여 계산하였고, 필요한 동력은 1.41watt이다.

$$H = F(N) \times v(m/s) \dots\dots\dots (2)$$

$$H = 15N \times 0.094m/s \cong 1.41watt$$

요구하는 출력과 회전수 등 계산값보다 높은 모터를 선정했다. Fig. 15는 0~360° 서보모터이며, Fig. 16은 0~180° 서보모터이다. 0~360° 회전이 가능한 서보모터 사양은 Table 2, 0~180° 회전이 가능한 서보모터 사양은 Table 3과 같다

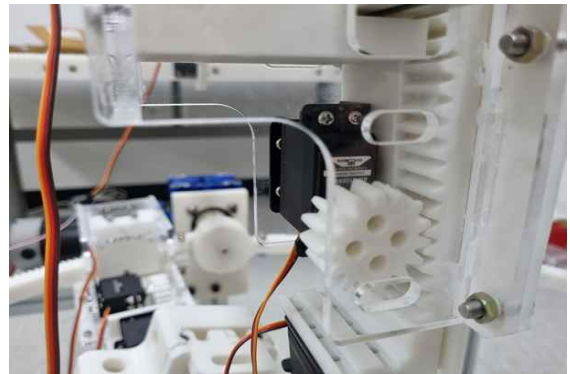


Fig. 15 0~360° degree servo motor

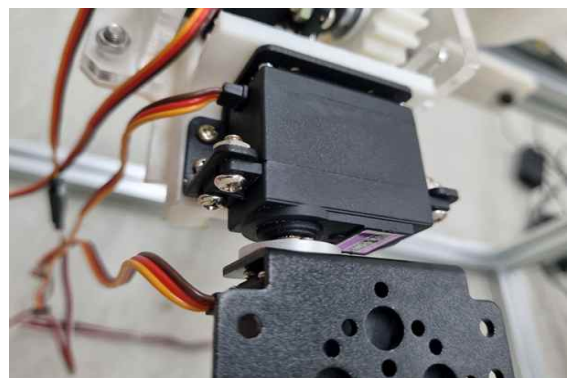


Fig. 16 0~180° degree servo motor

Table 2 0~360 ° degree rotation motor specification (DM-S1306MD)⁽⁵⁾

Parameter	Units	MR37-24V-199RPM
Operating Voltage	<i>V</i>	4.8~7.4
Minimum Speed	sec/deg	0.16/60
Maximum Speed	sec/deg	0.14/60
Minimum Torque	<i>kg_f • cm</i>	13.5
Maximum Torque	<i>kg_f • cm</i>	14.8

Table 3 0~180 ° degree rotation motor specification (MG996R)⁽⁶⁾

Parameter	Units	MR37-24V-199RPM
Operating Voltage	<i>V</i>	4.8~7.2
Minimum Speed	sec/deg	0.17/60
Maximum Speed	sec/deg	0.14/60
Minimum Torque	<i>kg_f • cm</i>	9.4
Maximum Torque	<i>kg_f • cm</i>	11

2) 아치형 프레임을 회전시키기 위한 토크 및 동력 계산

아치형 프레임을 모터로 회전시킬 때 관성이 발생하기 때문에 플라이 휠 효과^{(7),(8)}를 통해 모터의 토크를 계산하였다. 식(3)을 이용해 계산하였으며, 식(4)를 이용해 토크를 계산해 $129.877kg_f \cdot cm^2$ 의 결과를 도출했다. 모터의 회전수는 $40rpm$ 으로 선정했다.

$$GD^2 = \frac{1}{2} \cdot W \cdot (D^2 + d^2) \dots\dots\dots (3)$$

$$GD^2 = \frac{1}{2} \cdot 1.5kg_f \cdot ([0.8m]^2 + [0.76m]^2) \doteq 0.91kg_f \cdot m^2$$

$$T = \frac{GD^2}{375} \times \frac{N}{t} \dots\dots\dots (4)$$

$$T = \frac{0.91kg_f \cdot m^2}{375} \times \frac{40rpm}{0.1sec} \doteq 0.97kg_f \cdot m$$

$$T = 0.97kg_f \cdot m = 97kg_f \cdot cm$$

- 여기서, T : 토크($kg_f \cdot m$)
 GD^2 : 플라이 휠 효과($kg \cdot LSUBfm^2$)
 N : 회전수(rev/min)
 t : 기동 시간(sec)
 W : 질량(kg_f)
 D : 외경(m)
 d : 내경(m)

회전력을 산출하기 위해 식(5)를 이용해 계산하였으며, 원주 속도는 식(1) 모터에 필요한 동력은 식(2)

를 통해 계산하였고, 필요한 동력은 40.41 watt이다. 요구하는 출력과 회전수 등의 값이 계산 값보다 높은 모터를 선정했고 사양은 Table 3과 같다.

$$F = \frac{T}{r} \dots\dots\dots (5)$$

$$F = \frac{97kgf \cdot cm^2}{40cm} \simeq 2.42kgf (24.2N)$$

$$v(m/s) = 0.4m \times \frac{2\pi(rad \cdot min)}{60(rev \cdot sec)} \times 40\left(\frac{rev}{min}\right) \simeq 1.67m/s$$

$$H = 24.2(N) \times 1.67(m/s) = 40.41 watt$$

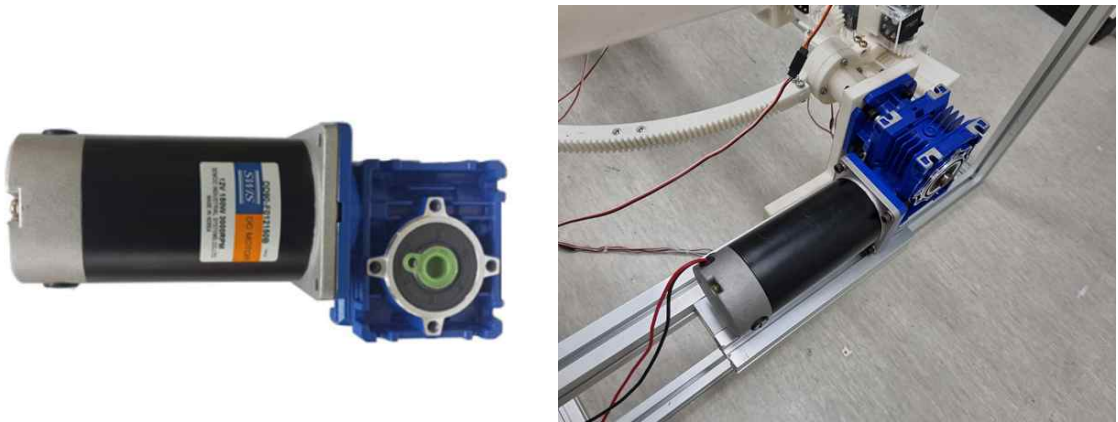


Fig. 17 The difference between a highly automated company and its peers

Table 4 0~180 ° degree rotation motor specification (DD90-F180250A+NMRV040-1/50)⁽⁹⁾

Parameter	Units	MR37-24V-199RPM
Operating Voltage	V	180
Speed	<i>rpm</i>	36
Output Torque	<i>kg_f • cm</i>	338.1
Weight	<i>kg</i>	3.4

2.4.2 기어 강도 설계

1) 굽힘 강도(Bending strength)⁽¹⁰⁾ 계산

P_1 은 굽힘 강도, f_w 는 하중 계수, f_v 는 속도 계수, b 는 기어의 폭, P 는 기어의 피치, y 는 치형 계수, F_t 는 기어에 가해지는 하중이다. 굽힘 강도를 구하는 계산식은 식(6)과 같다.

$$P_1 = \frac{F_t}{f_w \cdot f_v \cdot b \cdot P \cdot y} \dots\dots\dots (6)$$

Table 5는 하중 작용 방식에 따른 하중 계수 값 표다. 시제품의 경우 하중이 변동하기 때문에 하중 계수 값을 0.74로 선정했다.

Table 5 Weight coefficient of Buckingham⁽¹⁰⁾

Action of weight	Weight coefficient figure(f_w)
A condition in which the weight is relatively static	0.80
If the weight fluctuates	0.74
If accompanied by an impact	0.67

Table 6은 기계요소의 계수 값을 정리해놓은 표다. 기어의 재질을 3D프린터를 통해 PLA 재질로 제작했기 때문에 Table 6의 비철금속 재료의 경우를 선정했으며, 식(1)에 대입하여 속도 계수를 구했다.

$$v = 0.015(m) \times \frac{2\pi(\text{rad} \cdot \text{min})}{60(\text{rev} \cdot \text{sec})} \times 60\left(\frac{\text{rev}}{\text{min}}\right) \approx 0.094m/s$$

$$f_v = \frac{0.75}{1 + 0.094} + 0.25 \approx 0.94$$

Table 6 Velocity coefficient of Bath⁽¹⁰⁾

(단위 : m/s)

Peripheral velocity(v)	Velocity coefficient (f_v)	Remark
$v = 0.5 \sim 1.0[m/s]$ (Low-speed use)	$\frac{3.05}{30.5 + v}$	Rough surface
$v = 10 \sim 20[m/s]$ (Medium-speed use)	$\frac{6.1}{6.1 + v}$	Machine rimming
$v = 20 \sim 50[m/s]$ (High-speed use)	$\frac{3.56}{3.56 + \sqrt{v}}$	Precision rimming
$v < 20[m/s]$ (For nonferrous metals)	$\frac{0.75}{1 + v} + 0.25$	

Table 7은 PLA와 ABS의 재료특성을 나타내고 있는 표다. 허용 굽힘 응력은 PLA의 표준 강도 값인 61.8MPa로 설정했다.

Table 7 Material properties of PLA and ABS⁽¹¹⁾

Markerbot Material Properties	PLA		ABS	
	Standard	High Resolution	Standard	High Resolution
Impact Strength(Un-notched)IZOD(J/M)	96.1	219	304	331
Compressive Strength(peak)(MPa)	17.9	93.8	7.6	49
Tensile Strength(peak)(MPa)	46.8	65.7	34	38.1
Flexural Strength(peak)(MPa)	61.8	94.7	36.8	59.6

Table 8은 기어의 잇수에 따른 치형 계수 근사식을 모아둔 표다. 치형 계수는 압력 각 20°을 기준으로

로 했다. 잇수(Z)가 15개이므로 치형 계수는 0.330이 된다.

Table 8 Tooth form factor⁽¹⁰⁾

Number of teeth(Z)	Small gear of planetary gear(y)
12	0.327
13	0.327
14	0.330
15	0.330
16	0.333
17	0.342

앞서 정리한 계수 값을 종합하여 식(6)에 대입하면 다음과 같은 굽힘 강도의 값이 도출된다.

$$P_1 = \frac{1.5kg_f}{0.74 \times 0.94 \times 15mm \times 6.28mm \times 0.33} \approx 0.069kg_f/mm^2 \approx 0.69MPa$$

굽힘 강도를 식(6)에 대입해 기어에 작용하는 하중을 계산했다.

$$F_t = 0.74 \cdot 0.94 \cdot 0.69N/mm^2 \cdot 15mm \cdot 6.28mm \cdot 0.33 \approx 14.92N$$

2) 면압 강도(Contact stress)⁽¹²⁾ 계산

P_2 는 면압 강도, f_v 는 속도 계수, k 는 접촉면 응력 계수, b 는 기어의 폭, D_P 은 모듈, Z_1 은 큰 기어의 잇수, Z_2 는 작은 기어의 잇수이다. 이때 Z 의 값은 동일하다고 설정하였다.

$$P_2 = f_v \times k \times b \times D_P \times \frac{2 \times Z_1 \times Z_2}{Z_1 + Z_2} \dots\dots\dots(7)$$

식(7)은 각각 다른 정도의 강도를 가진 재료의 기어가 맞물려 회전할 때 발생하는 응력 값인 접촉면 응력 계수(k)의 공식이다. σ_c 는 허용 압축 응력, v 는 속도 계수, α 는 압력 각을 나타낸다. 여기서 E 의 값은 v 와 동일하게 설정하였다.

$$k = \frac{\pi}{8} \cdot \sigma_c^2 \cdot \sin(2\alpha) \left(\frac{1+v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2} \right) \dots\dots\dots(8)$$

기어의 재질이 PLA 재질이므로 속도 계수는 Table 6의 비철금속 재료의 경우를 선정해 식(1)에 대입해 계산했다.

$$v = 0.015(m) \times \frac{2\pi(rad \cdot min)}{60(rev \cdot sec)} \times 60 \left(\frac{rev}{min} \right) \approx 0.094m/s$$

$$f_v = \frac{0.75}{1+0.094} + 0.25 \approx 0.94$$

허용 압축 응력인 σ_c 는 Table 6의 표를 참고하여 17.9MPa를 사용했다. 앞서 정리한 계수 값을 종합하여 식(8)에 대입하면 다음과 같은 접촉면 응력 계수의 값이 도출된다.

$$k = \frac{\pi}{8} \times (17.9MPa)^2 \times \sin(2 \times 20^\circ) \left(\frac{1+0.36^2}{3,500MPa} + \frac{1-0.36^2}{3,500MPa} \right) \approx 0.046MPa$$

여기서 구한 k 의 값을 이용하여 식(7)에 대입하면 다음과 같은 기어의 면압 강도 값이 도출된다.

$$P_2 = 0.94 \times 0.046N/mm^2 \times 20mm \times 30mm \times \frac{2 \times 15 \times 15}{15 + 15} \approx 389.16N$$

2.5 서보모터 제어를 위한 아두이노 코딩 설계

본 메커니즘을 구동하기 위해선 총 13개의 서보모터를 사용한다. 0~180° 회전이 가능한 서보모터 5개, 360° 회전이 가능한 서보모터 8개가 사용된다. 180° 회전 명령 프로그램을 사용하였을 때 입력 신호를 주게 되면 0~180° 서보모터는 정지하는 반면, 360° 서보모터는 정지하지 않고 계속 회전하는 것을 확인하였다. 이를 이용하여 각 부분의 필요한 움직임을 주는 프로그램을 제작하였다.

```
#include <Servo.h>

const int a=6;
const int servoPin[a] = {2,3,6,7,10,11};
Servo myservo[a];
int const potPin[6] = {A0,A1,A2,A3,A4,A5};
int potVal[a];
int angle[a];

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  for(int i=0; i<a; i++){
    myservo[i].attach(servoPin[i]);
  }
}

void loop() {
  for(int i=0; i<a; i++){
    potVal[i] = analogRead(potPin[i]);
    angle[i] = map(potVal[i], 0, 1023, 0, 180);
  }
  for(int i=0; i<a; i++){
    if(angle[i] >= 160){
      myservo[i].write(180);
      delay(15);
    }
    else if(angle[i] <= 20){
      myservo[i].write(0);
      delay(15);
    }
    else {
      myservo[i].write(90);
      delay(15);
    }
  }
}
```

(a) Program first page for servo motor control

```
#include <Servo.h>

const int a=7;
const int servoPin[a] = {2,3,5,6,7,10,11};
Servo myservo[a];
int const potPin[6] = {A0,A1,A2,A3,A4,A5};
int potVal[6];
int angle[6];

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  for(int i=0; i<a; i++){
    myservo[i].attach(servoPin[i]);
    myservo[i].write(90);
  }
}

void loop() {
  for(int i=0; i<6; i++){
    potVal[i] = analogRead(potPin[i]); //포텐셔미터 저항 값(각도) 저장
    angle[i] = map(potVal[i], 0, 1023, 0, 180); // 입력 최대 값 변경(1024->180)
  }
  for(int i=0; i<2; i++){
    if(angle[i] >= 160){
      myservo[i].write(0);
      delay(15);
    }
    else if(angle[i] <= 20){
      myservo[i].write(90);
      delay(15);
    }
  }
  for(int i=3; i<5; i++){
    if(angle[i] >= 160){
      myservo[i+1].write(0);
      delay(15);
    }
    else if(angle[i] <= 20){
      myservo[i+1].write(180);
      delay(15);
    }
    else {
      myservo[i+1].write(90);
      delay(15);
    }
  }
}
```

(b) Program second page for servo motor control

Fig. 18 Prospects for the growth of precision processing in the global and domestic markets

제작한 제품에서 사용할 서보모터들을 조작 및 제어하기 위하여 조이스틱형 가변저항을 사용하였다. 조이스틱형 가변저항은 X, Y의 두 개의 축을 가지며, 직선 운동을 통해 총 4개의 입력 신호를 전달할 수 있어 하나의 가변저항으로 두 개의 모터를 제어 및 조작할 수 있도록 제작했다.

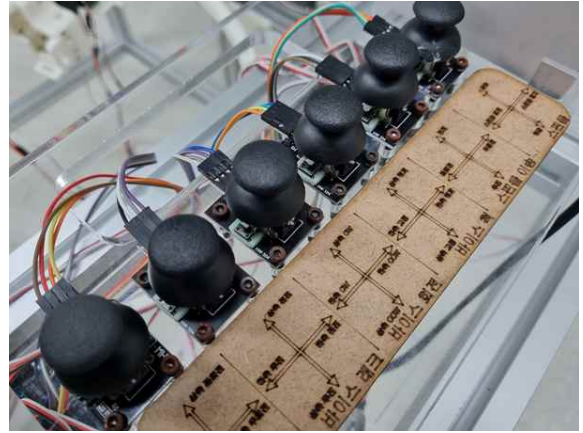
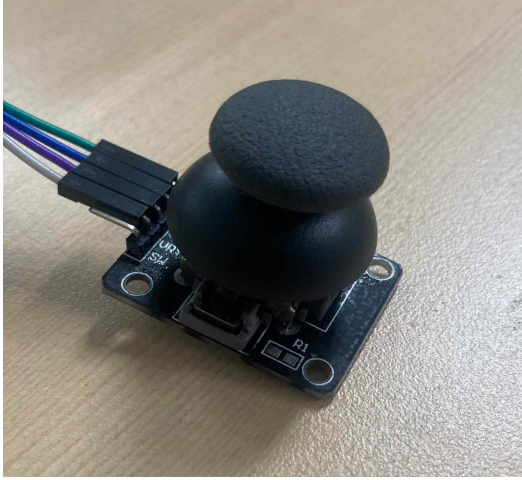


Fig. 19 Joystick variable resistor

공작물 고정구 부분 프로그램의 경우 한 번의 입력으로 해제 신호를 주기 전까지 동작을 유지하는 명령이 필요하다. 입력 신호를 주면 서보모터가 90°로 회전하고 입력 신호 전까지 해당 각도를 유지하는 프로그램을 개별 제작하였다. 스핀들 이송구간의 경우 2개의 모터가 엇갈려 고정되어있다. 구동하기 위해 두 개의 모터가 동시에 서로 다른 방향으로 회전해야 한다. 이를 위해 동작 하나에 두 개의 모터를 사용하는 프로그램을 개별 제작하였으며, 두 개의 모터를 동시에 서로 다른 방향으로 회전할 수 있도록 프로그램을 수정하였다.

2.6 CAE 프로그램을 이용한 구조해석 결과 도출

2.6.1 링크 구조해석

CAE 프로그램을 사용하여 링크의 구조해석을 진행한 결과 서보모터의 최대 토크인 $14.8 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$ 일 때 최대 응력이 0.4868 MPa 이며, 최대 변형량은 0.00014 mm 로 나타났다. IREM의 Comparison of 3D printing materials⁽¹¹⁾에 따르면 PLA의 극한 인장강도는 35 MPa 이며, ELSEVIER의 International Journal of Fatigue⁽¹³⁾에 따르면 PLA의 피로 강도는 극한 인장강도의 10%라 보고했다. 링크에 작용하는 최대응력이 PLA의 피로 강도를 3.5 MPa 보다 낮아 링크는 안전한 것으로 판단된다. Fig. 22는 링크에 Mesh를 적용한 모습이며, Mesh의 크기는 Table 9에 정리했다.

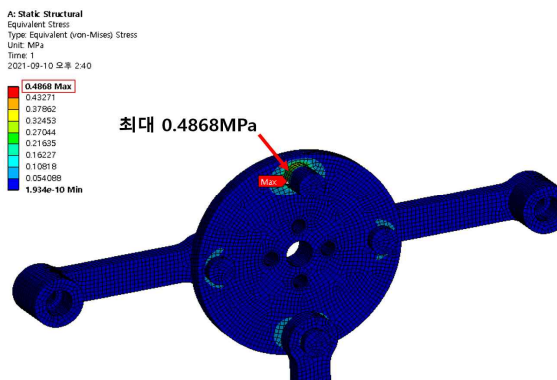


Fig. 20 Max. von mises stress

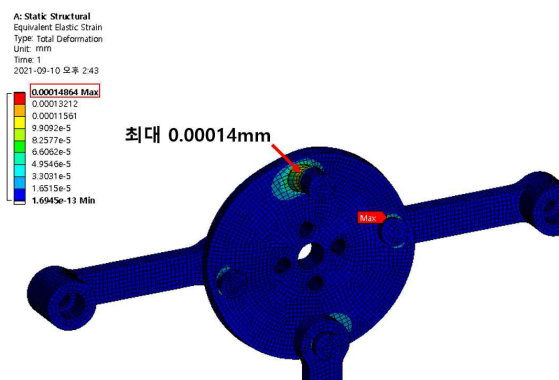


Fig. 21 Max. deformation

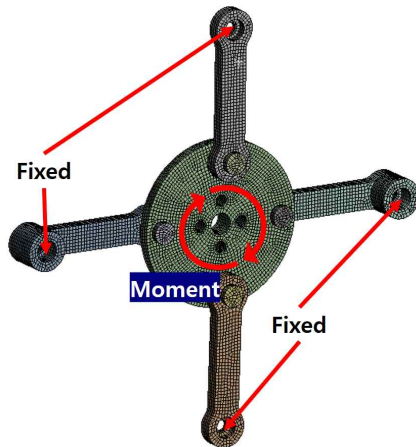


Fig. 22 Links with meshes applied

Table 9 Link mesh size

Mesh size	1mm
Nodes	143,406
Elements	38,148
Mesh Method	Hexa Dominant

2.6.2 랙 & 피니언 기어 구조해석.

랙&피니언 기어의 구조해석⁽¹⁴⁾을 진행한 결과 조립체를 구동하기 위한 무게가 15N 일 때 최대응력이 2.805MPa이며, 최대변형량은 0.0065mm로 나타났다. PLA의 피로강도는 3.5MPa이므로 기어는 안전한 것으로 판단된다. Fig. 25는 링크에 Mesh를 적용한 모습이며, Mesh의 크기는 Table 10에 정리했다.

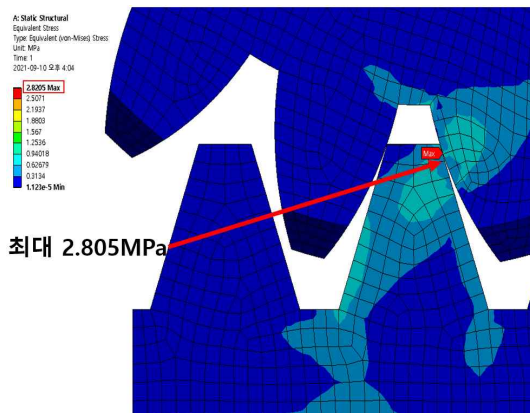


Fig. 23 Max. von mises stress of the rack and pinion gear

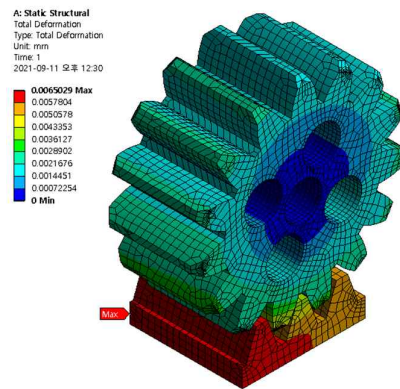


Fig. 24 Max. deformation of rack and pinion gear

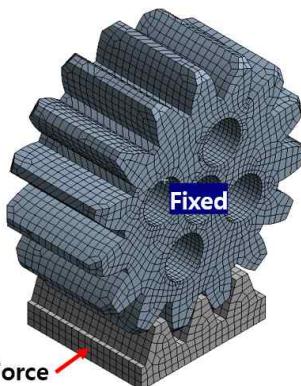


Fig. 25 Gears with meshes applied

Table 10 Gear mesh size

Mesh size	0.5mm
Nodes	419,268
Elements	114,583
Mesh Method	Hexa Dominant

2.6.3 아치형 프레임 구조해석

아치형 프레임 고정구의 구조해석을 진행한 결과 아치형 프레임과 조립체의 무게는 20N이며, 아치형 프레임 고정구에 작용하는 최대 하중은 15.786MPa이다. PLA의 피로 강도 3.5MPa를 초과하는 값이며, 실제 시제품에서 고정구가 파손하는 현상이 발생해 Fig. 29와 같이 설계 변경을 진행하였다.

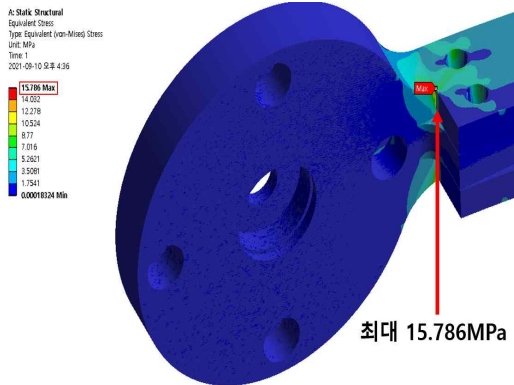


Fig. 26 Max. von mises stress of the arched frame

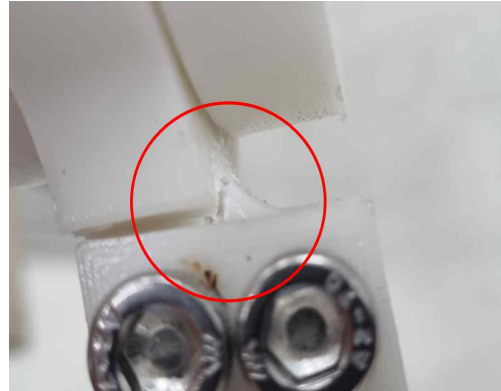


Fig. 27 Broken prototype

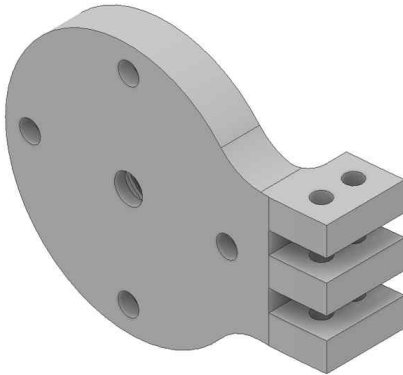


Fig. 28 3D Modeling

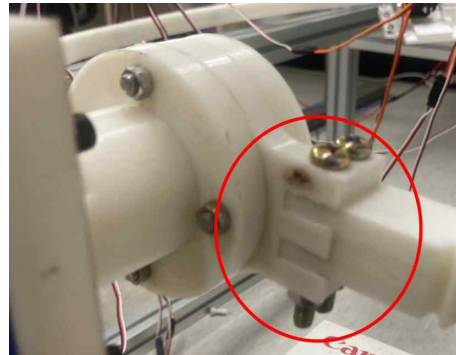


Fig. 29 Prototype with design changes

설계 변경한 아치형 프레임 고정구의 구조해석을 진행한 결과 작용하는 최대 하중은 3.49MPa이며, 변형량은 4.3789mm이다. PLA의 피로 강도는 3.5MPa이므로 아치형 프레임 고정구는 안전한 것으로 판단된다. Fig. 32는 아치형 프레임에 Mash를 적용한 모습이며, Mash의 크기는 Table 11에 정리했다.

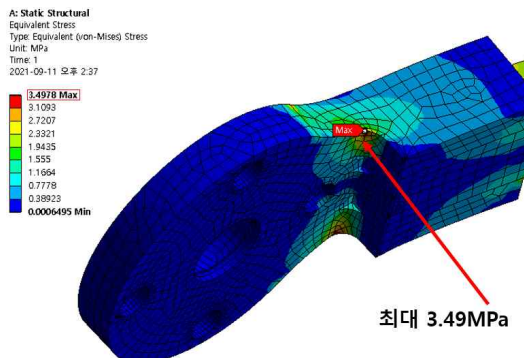


Fig. 30 Max. von mises stress of the arched frame

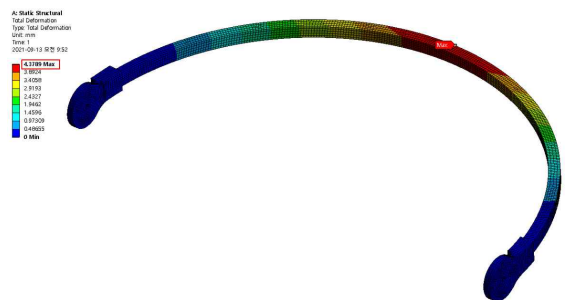


Fig. 31 Max. deformation of arched frame

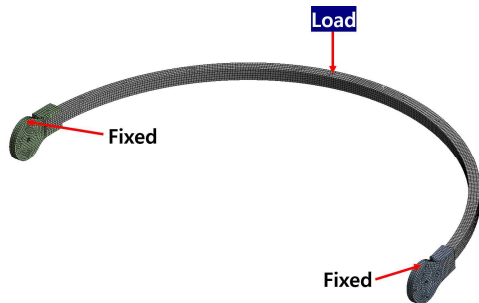


Table 11 Gear mesh size

Mesh size	4mm
Nodes	96,051
Elements	25,929
Mesh Method	Hexa Dominant

Fig. 32 Arched frame with meshes applied

2.7 제약조건 및 해결방안

2.7.1 제약조건

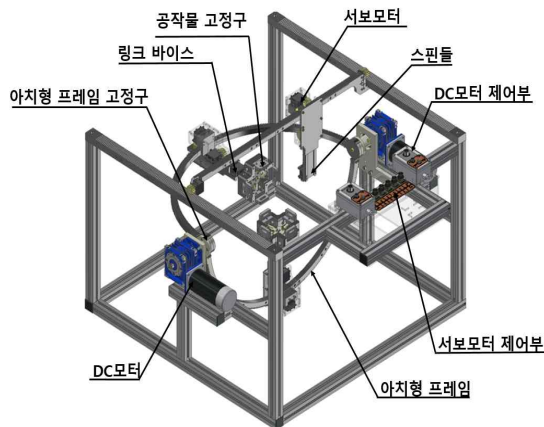
- 1) 서보모터 13개 및 2개의 DC 모터 구동을 위한 케이블 선이 시제품 구동으로 인해 끊김 사고 발생이 우려됨.
- 2) 공작물 교환을 위한 랙 기어의 길이 부족과 랙 기어의 빠짐 현상이 발생하여 구동에 문제가 생김.
- 3) 공작물 고정구가 바이스보다 돌출되어 바닥 면의 높낮이가 달라 공작물을 일정하게 물리지 못하는 현상이 발생함.

2.7.2 해결방안

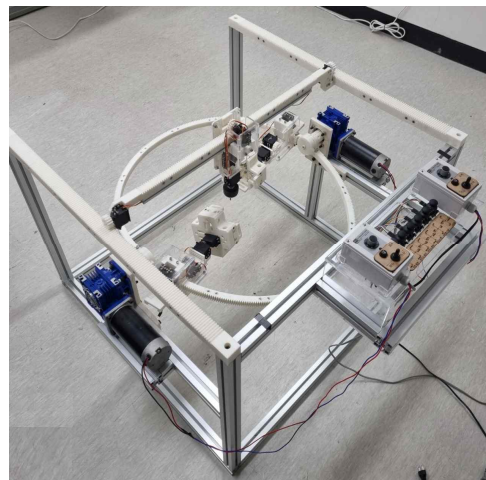
- 1) 모든 케이블 선을 구동에 방해되지 않는 방향으로 조정하여 여러 갈래의 선들을 조립체 별로 케이블 타이를 이용하여 정리함.
- 2) 랙 기어를 재설계하여 길이를 증가시키고 안전장치를 추가 설계하여 랙 기어의 빠짐을 방지함.
- 3) 공작물 고정구의 돌출을 방지하기 위한 부속품을 부착하여 공작물이 바이스의 바닥 면에 일정하게 닿도록 재설계함.

3. 결과 및 토의

3.1 모델링과 시제품



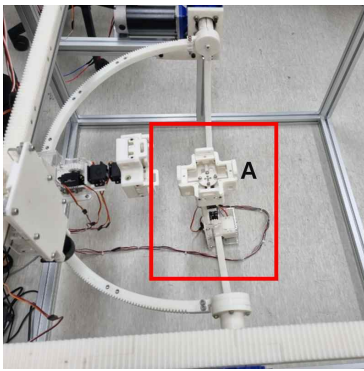
(a) 3D Modeling view



(b) Prototype

Fig. 33 Program modification and production

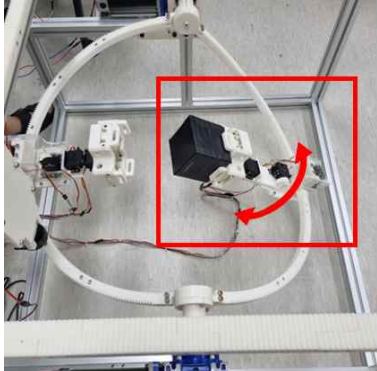
3.2 시제품 구동 과정



A link vise origin movement

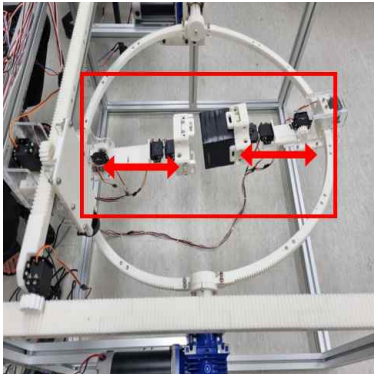


Fixing the workpiece

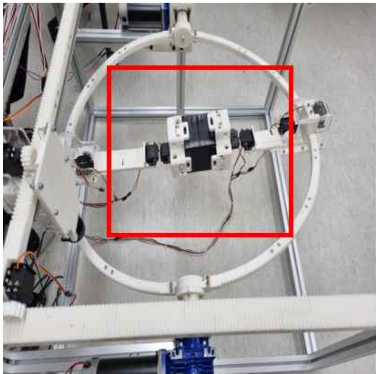


Moving the arched frame after machining

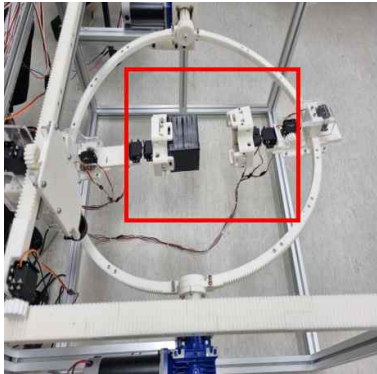
Fig. 34 Program modification and production



Arched frame leveling

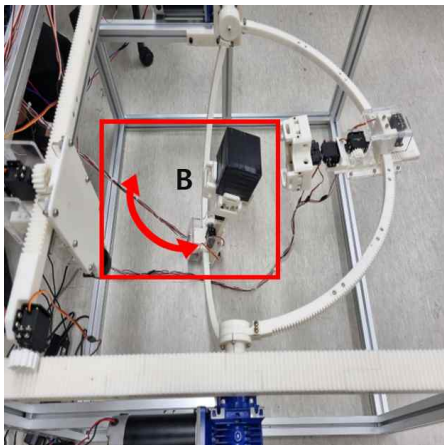


Workpiece transfer

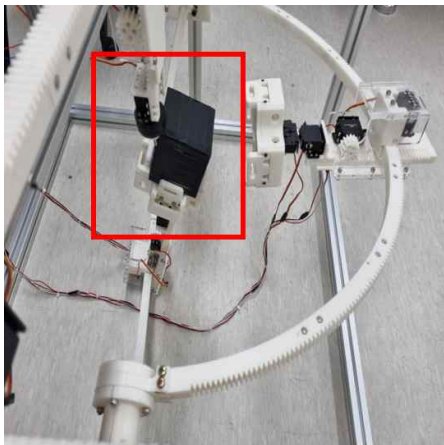


A link vise origin return

Fig. 35 Program modification and production



B link vise origin movement



Opposite side machining in progress

Fig. 36 Program modification and production

3.3 기대효과

현재 활용되고 있는 가공설비로 생산할 수 없는 난해한 형상을 제약조건 없이 가공할 수 있으며, 제품이송, 품질 검사 등의 최종 단계까지의 모든 공정의 자동화 시스템을 구축하는 것을 목표로한다.

제품 도입을 통해 생산성 향상, 인력 절감, 품질 안정 및 향상 등의 효과를 통해 국내 기업 경쟁력 제고에 이바지하는 바가 클 것으로 판단되며, 국·내외 특허권 확보를 통해 중소기업기술개발사업 R&D 과제도출, 중소벤처기업진흥공단 등을 이용하여, 기업 및 국가기술력 확보와 국내 고용 창출에도 크게 이바지할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 결과 보고서는 기존의 가공 현장에서 수동으로 공작물을 세팅하는 순간에 생기는 안전사고와 공작물의 교환 시간으로 인한 생산량 저하의 문제점을 해결하기 위해 연구 개발을 하였다. 앞선 수동 세팅 과정을 없애기 위해 한 번의 세팅으로 공작물의 반대면 가공이 가능한 메커니즘의 제품을 개발하였다. 제품의 개발과 시제품 제작을 통해 다음과 같은 결론을 내렸다.

- 1) 세계의 로봇 시장의 경우 해마다 성장하고 있지만, 한국 로봇 시장의 경우 기술 경쟁력이 떨어져 해외의 로봇을 수입하여 사용하고 있기에 수출현황은 계속해서 줄어들고 있다. 이러한 상황에서 하나의 공정으로 공작물을 주고받을 수 있으며, 공작물의 모든 면을 가공할 수 있는 메커니즘을 구현하여 가공 공정의 안전성과 생산량을 증대시킬 수 있게 설계·개발하였다.
- 2) 개발된 자동 회전 링크 바이스 로봇의 바이스는 난해한 형상도 제약조건 없이 가공이 가능한 특징이 있다. 이를 활용하여 가공뿐만 아니라 3D프린터, 용접, 조립 등의 분야에도 도입이 가능할 것으로 판단된다.
- 3) 향후 실제 가공 공정에 사용할 제품을 생산하기 위해선 대부분의 부품에 사용한 PLA 재질을 각 공정에 맞는 재질로 교체하여 정밀도와 내구성을 개선하고, 공작물의 크기와 형상에 따라 수월한 교체를 위해 바이스의 개별 제작이 필요할 것으로 판단된다.

후 기

대한기계학회에 감사의 말씀을 전하고 싶습니다. 이번 “제11회 전국학생설계경진대회”는 구상해왔던 아이디어와 배워왔던 이론을 실현할 수 있는 훌륭한 무대였습니다. 이번 대회를 통해 “설계”라는 하나의 단어에 많은 노력과 고민들이 섞여 있었다는 것을 배웠습니다.

시제품 제작을 실현하기 위해 발품을 팔아 재료 구매도 해보고, 여러 조건을 고려해 설계를 진행했습니다. 코로나19 사태로 인해 많은 제약조건이 따랐지만, 저희의 열정과 노력이 모여 시제품을 완성하였을 때의 쾌감은 이루 말할 수 없었습니다. 제품을 만드는데 같이 고민해 주시고 많은 도움을 주신 유대원 교수님께 진심으로 감사의 말씀을 전하고 싶습니다. 사소한 아이디어를 바탕으로 만들어진 저희의 제품이 미래에 새로운 로봇들의 본보기가 될 수 있길 바랍니다.

참고문헌

- (1) Korea Robot Industry Promotion Agency, 2019, "Robot Industry Status Survey Results Report," pp. 131~132

- (2) Ministry of SMEs and Startups(MSS), 2021, "Technology Roadmap for SME," precision machine, pp. 7~12.
- (3) ServiceNow, 2019, "Workflow Quarterly," The Business Value Issue, pp. 8~9.
- (4) Workmarket, 2020, "2020In(Sight) Report," What AI & Automation Really Mean For Work, pp. 15.
- (5) Devicemart, "디지털 서보모터(DM-S1306MD)" <https://www.devicemart.co.kr/goods/view?no=1324838>
- (6) Devicemart, "TowerPro 호환 서보모터 MG996R" <https://www.devicemart.co.kr/goods/view?no=1313388>
- (7) Nissei, "Technic article" https://korea.nissei-gtr.co.jp/data/catalog/gtr/mini_midi/mid_technote_k.pdf, pp. 5.
- (8) Korean Fire Protection Association, 1999, "Standard for protection of motors, motor circuits and controllers," pp. 19.
- (9) Shinyong Motor Web Market, "NMRV030,040웜기어박스 + DC모터" http://sym.or.kr/product/detail.html?product_no=1692&cate_no=120&display_group=1
- (10) Jeong, H. G., Choi, B. H. and Lee, S. G., 2011, "Mechanical Element Design Korea Pollytechs," pp. 158~193.
- (11) International Genetically Engineered Machine(iGEM), 2015, "Comparison of 3D printing materials," pp. 1~2.
- (12) Hwang, S. U., Kim, J. S., Kang, D. H., Hwang, T. Y. and Yoo, D. W., 2021, "Development of Structural Mechanism of Free-rotation Parallel Robot," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng.(C)*, Vol 9, No. 1, pp. 23~29.
- (13) Ezech, O. H. and Susmel, L., 2019, "Fatigue strength of additively manufactured polylactide (PLA): effect of raster angle and non-zero mean stresses," *International Journal of Fatigue* Vol 120, pp. 319~326.
- (14) Yanjun, X., Lihu, H., Jiayu, Z. and Yanchun, X., 2014, "Dynamic Analysis of Gear and Rack Transmission System," *The Open Mechanical Engineering Journal*, pp. 662~667.