대한기계학회 주최

제14회 전국학생설계경진대회(2024년)

설계 최종 보고서

참가부	대학부				
참가분야	공모주제 (O) / 자유주제 ( )				
참가팀명	운전만해				
설계제목	단순화된 washout 필터를 이용한 운전자 경험 향상 6 자유도 모션 시뮬레이터				
지도교수/교사	(소속) 강원대학교 (성명) 강신유 (연락처) (이메일)				
대표자 (신청인)	성명	소속	연락처 (휴대폰)	E-mail	주소
	최경서	강원대학교 메카트로닉스공학과			

참가팀원 인적사항

NO	성명	소속 / 학년	E-MAIL
1	김찬기	강원대학교 메카트로닉스공학과 / 4학년	
2	정상현	강원대학교 메카트로닉스공학과 / 4학년	
3	조상혁	강원대학교 메카트로닉스공학과 / 4학년	
4	박윤진	강원대학교 메카트로닉스공학과 / 4학년	
5	최경서	강원대학교 메카트로닉스공학과 / 4학년	

설계 요약문

참가분야	공모주제 (O) / 자유주제 ( )
참가팀명	운전만해
설계제목	단순화된 washout 필터를 이용한 운전자 경험 향상 6 자유도 모션 시뮬레이터
대표자명	최경서
요약문	국내 자동차 등록대수는 꾸준히 증가하고 있다. 차량 대수의 증가와 함께 자연스레 교통사고의 발생 빈도 또한 높아지고 있으며, 그 중에서도 운전자 과실로 인한 인명사고가 특히 우려되고 있다. 이러한 사고는 급발진 의심 사례나 노령 운전자의 운전 미숙 등 다양한 원인으로 발생하며, 근래의 큰 사회적 문제로 부상하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 사용자 운전 경험 향상을 위한 단순하면서도 정밀한 모션 시뮬레이터의 필요성을 느꼈다. 기존 모션 시뮬레이터는 복잡하고 고가의 시스템을 이유로 일반 대중이나 소규모 교육 기관에 적용되기엔 어려움이 많았다. 그러나 단순화된 washout 필터 및 알고리즘을 이용한 6자유도 모션 시뮬레이터를 설계하여 다양한 운전자를 대상으로 한 모션 시뮬레이터를 쉽게 제공할 수 있으며, 이는 궁극적으로 운전 능력의 향상과 사고 예방에 큰 도움을 줄 것으로 예상된다. 특히 운전자의 운전 습관을 분석하거나, 위험 상황에서의 반응을 미리 연습할 수 있게 하는 등의 방법을 통해 실질적인 운전 능력을 향상시키는 데 큰 기여가 될 것이라 보인다.
설계프로젝트의 입상 이력	

단순화된 Washout 필터를 이용한 운전자 경험 향상 6 자유도 모션 시뮬레이터

최경서*† · 김찬기* · 정상현* · 조상혁* · 박윤진* · 강신유*
* 강원대학교 기계의용·메카트로닉스공학과

Simplified Washout Filter Implementation for Enhanced Driver Experience in 6-DOF Motion Simulators

Gyung-Seo Choi*† , Chan-gi Kim*, Sang-Hyeon Jung*,
Sang-Hyeog Jo*, Yun-Jin Park* and Shin-yu Kang*
* Department of Mechanical and Biomedical, Mechatronics Engineering, Kangwon National University

Key Words: Motion Simulator(모션 시뮬레이터), 6-DOF(6 자유도), Washout Filter(Washout 필터), Inverse Kinematics(역 운동학), Driver Experience(운전자 경험), Motion Cueing(모션 큐잉), Real-time Simulation(실시간 시뮬레이션), Human-Centered Design(사람 중심 설계), Virtual Reality(가상 현실), Feedback Control(피드백 제어)

초록: 차량 운행에 있어 운전자의 경력과 숙련도는 운행 및 사고 대응에 매우 중요한 요소로 작용된다. 특히, 사회 초년생은 운전 경험을 쌓을 기회가 상대적으로 적고, 노령 운전자의 경우 지속적인 도로 연수에 어려움이 많다. 이를 해결하기 위해 본 설계에서는 가상의 어느 프로그램에서도 실제와 유사한 운전 경험이 가능하도록 6 자유도의 안정적인 모션 시뮬레이터 알고리즘을 개발하는 것을 목표로 한다. 단순화된 washout 필터를 설계하여 가상의 프로그램에서 주어진 6 자유도의 데이터를 가공하고, 기계적 equation을 통해 움직임을 구현한다. 본 시스템은 향후 운전자들의 운전 경험 향상과 더불어 차량 관련 사고를 줄이는 데 큰 전망을 가지고 있다.

Abstract: Driver experience is crucial for safety, especially for novice and elderly drivers who often have limited opportunities for practice and face significant challenges in road training. To address these issues, this project aims to develop a simplified 6-DOF motion simulator algorithm designed to provide a realistic driving experience in virtual environments. A simplified washout filter will be employed to process 6-DOF data accurately in any virtual program, and mechanical equations will be used to implement precise movement. By enhancing the driving experience for a broader range of drivers, this project seeks to contribute to a reduction in vehicle-related accidents and improve overall road safety.

† Corresponding Author, gomdore1000@naver.com
Ⓒ 2024 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서 론

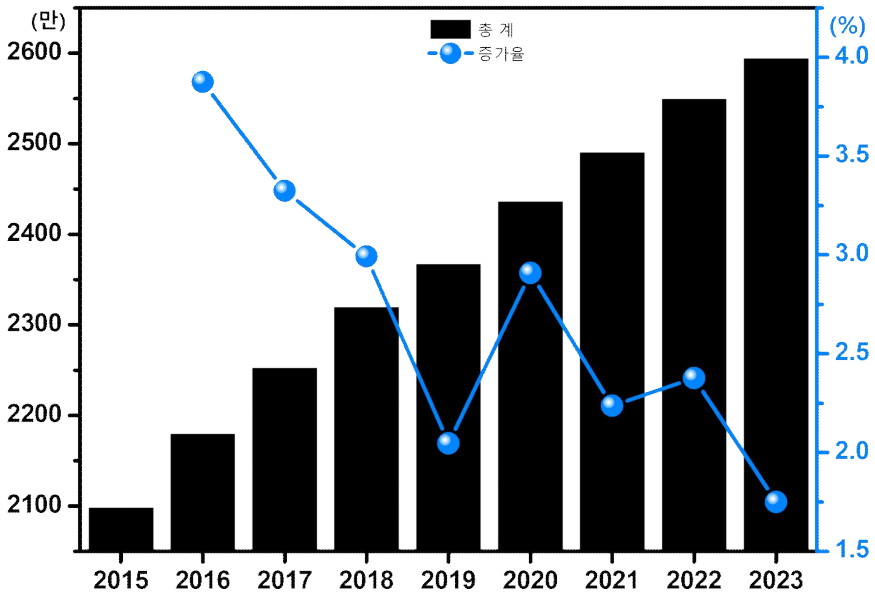


Fig. 1 Registered number of cars by Ministry of Land, Infrastructure and Transport.[1]

대한민국의 자동차 등록 대수는 꾸준한 증가 추세를 보인다. 국토교통부의 자료에 따르면 2023년 기준 국내 자동차 등록 대수는 약 2,600만대에 이르렀다.[1] 이와 같은 증가 추세에 비해 사고 대응이나 안전 예방책은 턱없이 부족한 실상이다. 특히 근래엔 운전미숙으로 인한 운전자 과실 사고가 사회적으로 큰 문제로 부각되고 있다. 차량 운행 시 운전자의 경력과 숙련도는 운행과 사고 대응에 중요한 영향을 미친다. 특히, 사회 초년생이나 노령 운전자의 경우, 도로에서의 운전 경험이 부족하거나 급박한 상황에서의 대응이 미흡해 사고 위험이 높아질 수 있다. 그러나 실제 도로에서 충분한 경험을 쌓는 것은 차량이 있어야 한다는 점, 사고시 리스크가 크다는 점에서 현실적으로 어려움이 많다.

이러한 문제를 해결하기 위해, 가상 환경에서 실제와 유사한 운전 경험을 제공할 수 있는 모션 시뮬레이터 알고리즘을 개발하였다. 이는 실 세계의 모든 움직임을 표현할 수 있는 최소 자유도인 6개의 자유도를 가진다.[2] 6 자유도 모션 시뮬레이터는 구조적 특성상 6개의 개별 모터를 사용하므로, 가격적 접근성이 떨어지고, 복잡한 알고리즘 및 데이터 처리 방식으로 인해 개발비용 또한 높아 많은 사람들에게 체험할 기회가 제한되는 것이 현실이다. 본 설계에서는 단순화된 washout 필터 및 hardware를 설계하여 어떤 가상 환경 데이터라도 효과적으로 데이터를 가공하고, 이를 바탕으로 기계적 equation을 통해 시뮬레이터의 움직임을 구현한다. 이러한 시스템을 통해 더 많은 운전자들이 안전하게 운전 경험을 쌓을 수 있으며, 궁극적으로 차량 관련 사고를 줄이는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 설계핵심내용

2.1 문제 정의

현재 시중에 보급된 운전 시뮬레이터의 종류와 개수는 매우 한정적이다. 이는 모션 플랫폼의 응용 분야에서 경제성보다 정밀성이 과도하게 중시되기 때문이다. 모션 플랫폼의 정밀도와 동작 자유도(DOF: Degrees of Freedom)를 높이는 것은 경제성과 공간 효율성을 저해하는 결과를 초래하며, 이는 실제와 유사한 체험을 제공하려는 시뮬레이터의 본래 목적과는 일치하나, 보급에 어려움을 만든다.[3]

따라서 본 설계에서는 실세계의 모든 움직임을 표현할 수 있는 최소 자유도인 6 자유도를 바탕으로, 경제성과 정밀성 사이에서 균형을 맞추어 보급과 제작이 용이하도록 단순하면서도 우수한 추종성을 갖춘 6 자유도 모션 시뮬레이터를 설계하고자 한다.

2.2 선행연구 분석

2.2.1 Stewart Platform

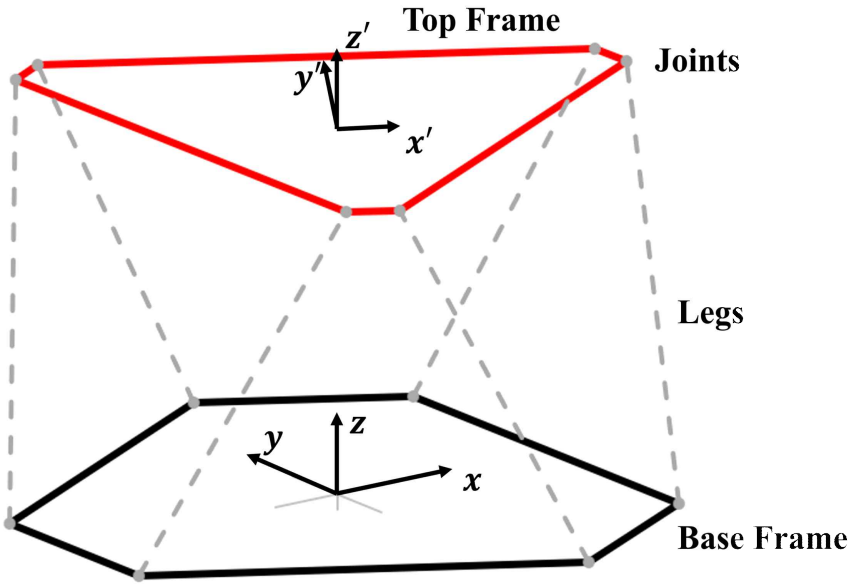


Fig. 2 Schematic of Stewart Platform

Stewart platform이라고 알려진 6 자유도 플랫폼은 1965년에 처음 제안되어 꾸준히 개선되고 연구된 기계구조이다. Stewart platform은 6 자유도 병렬 구동 메커니즘으로, 두 개의 강체인 top frame과 base frame이 여섯 개의 leg로 연결된 구조를 가진다. 각 leg는 양 끝에 universal joint, 혹은 spherical joint 등을 사용하여 top frame 및 base Frame과 결합 된다. 이 플랫폼은 closed-loop 형태로 구동되며, 각 leg의 움직임을 제어하는 방식으로 top frame의 위치와 자세를 제어할 수 있다.[4]

현재 Stewart platform의 kinematics는 위치 및 각도 제어에 더해 가속도, 각속도 제어까지 가능하며, μm 단위 오차 모델이나,[5] wave 형태의 motion cueing을 주는 것 역시 가능한 형태까지 발전했다.[6] 또한 사람 관점(human-perception)의 제어 모델 역시 제시됐는데, vestibular system 기반의 semicircular cannals 모델, otolith 모델 등으로 발전돼왔다.[7]

2.2.2 Washout Filter

Washout 필터는 Stewart platform과 같은 구동 범위가 제한된 시스템에서 현실의 움직임을 모방하기 위해 사용되는 데이터 가공 방식으로, pre-processing 단계에서 적용된다.[2] 주로 classical, optimal, adaptive 세 가지 모델이 사용되며, 그 중에서도 각 축에 독립적인 gain 튜닝이 가능하고 마이크로컨트롤러의 요구 사양이 낮다는 장점 덕분에 classical washout 필터가 널리 사용되는 추세이다.

그러나 구조가 가장 단순한 classical washout 필터조차도 실제 구현에는 상당한 연구와 개발이 필요하다. adaptive, optimal, vestibular 모델의 경우 기본 구조가 복잡하며, 연산 과정이 길어져 마이크로컨트롤러의 요구 사양이 높아지는 문제가 있다. 이러한 이유로 인해 경제성이 떨어지고, 실용화에 어려움이 따르게 된다.

2.2.3 차이점

본 연구에서는 플랫폼의 위치 및 자세 제어를 위해 inverse kinematics 벡터 연산을 활용하여 x, y, z 변위와 pitch, roll, yaw 각도를 제어한다. Washout 필터의 설계는 기존의 classical, optimal, adaptive 필터보다 단순화된 형태로, 주어진 시스템에 맞춰 새롭게 개발되었다. 이 필터는 x, y, z 방향의 병진 가속도와 각축 회전 각도 및 각속도를 처리하며, low-pass 필터만을 적용한 pre-processing 단계로 기능한다. 결과적으로 데이터가 부드럽게 가공되어 추출되는데, 이로 인해 모터 구동부는 PID 제어 대신 위치 제어(Position Control)를 사용하는 것이 가능해졌으며, 시스템의 안정성과 효율성을 향상시킬 수 있었다.

설계된 시스템의 성능을 입증하기 위해 실제 시뮬레이터를 제작하고, 작동 실험을 진행하여 데이터를 수집한다. 이를 통해 단순화된 washout 필터와 위치 제어의 조합이 유효함을 증명하며, 실질적인 구현에 있어 중요한 시사점을 제공한다.

2.3 Washout Filter 설계

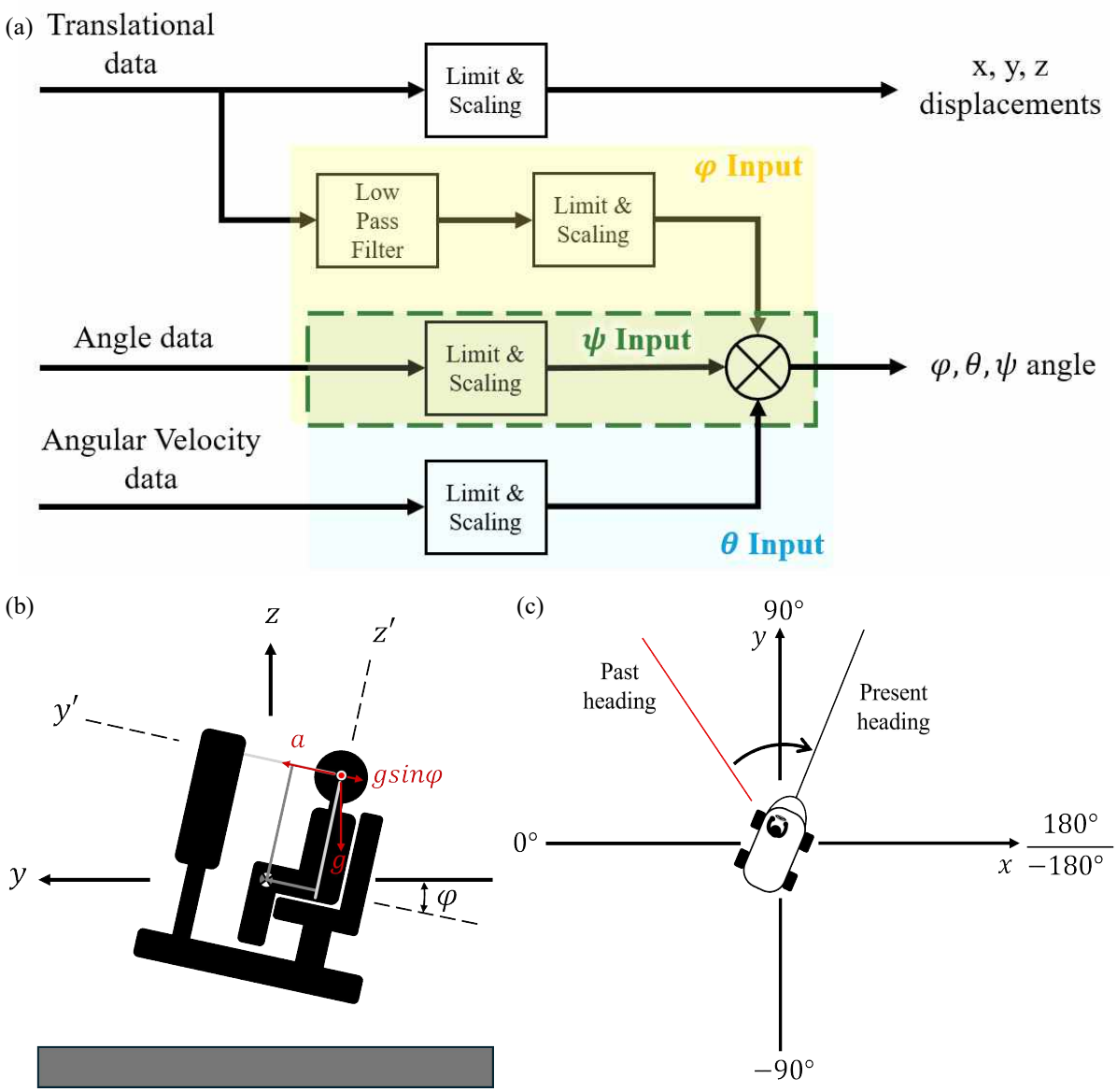


Fig. 3 (a) Schematic diagram of the simplified washout filter, (b) Algorithm for processing phi data, and (c) Algorithm for processing yaw data

Fig. 3(a)에서는 단순화된 washout 필터의 개략도를 확인할 수 있다. 이 필터는 차체의 데이터만을 제공하는 가상 프로그램에서 사용하기 위해 설계되었다. 플랫폼의 x, y, z 변위는 각각의 병진 가속도를 limit 및 scaling 처리한 후 input 값으로 사용한다. 각도 변위의 경우, 축마다 다른 방법으로 처리된다. 기본적으로 차체의 자세를 표현하기 위해 angle data를 사용하는 점은 동일하지만, 추가되는 데이터의 종류에 따라 처리 방식이 달라진다. 예를 들어, X축 회전(phi)에서는 Y 방향 병진 가속도를 가공하여 추가적으로 사용한다. 이때 병진 가속도와 low-pass 필터를 함께 사용하여 부드러운 움직임을 구현한다. 각속도 대신 병진 가속도를 사용하는 이유는 두가지이다. 첫번째로 Fig. 3(b)에서 확인할 수 있듯 지속적인 병진 가속도 $\vec{a}$를 $-\vec{g}\sin\phi$로서 표현할 수 있기 때문이다. 두 번째는, 각속도 데이터의 고주파 대역 노이즈가 심하기 때문이다. 디지털 프로그램 특성상 순간 가속도로서 추출되기 때문에, low-pass 필터를 사용하더라도 +,-대로 진동하는 데이터의 특성으로 인한 문제점이 존재한다. 이를 해결하고자 병진 가속도와 low-pass 필터를 사용하여 문제점을 해결한다. Y축 회전(theta)의 경우에는 각속도 변화가 주로 차체의 회전에 의해서만 발생하기 때문에, 기본 자세의 angle data에 angular velocity data를 추가하여 사용하는 것이 가능하다. 반면, Z 축 회전(psi)에서는 각도 데이터만을 가공하여 사용한다. 각도 변위를 이용해 평균 각속도를 이용하는 것으로, Fig. 3(c)에서 확인할 수 있다.

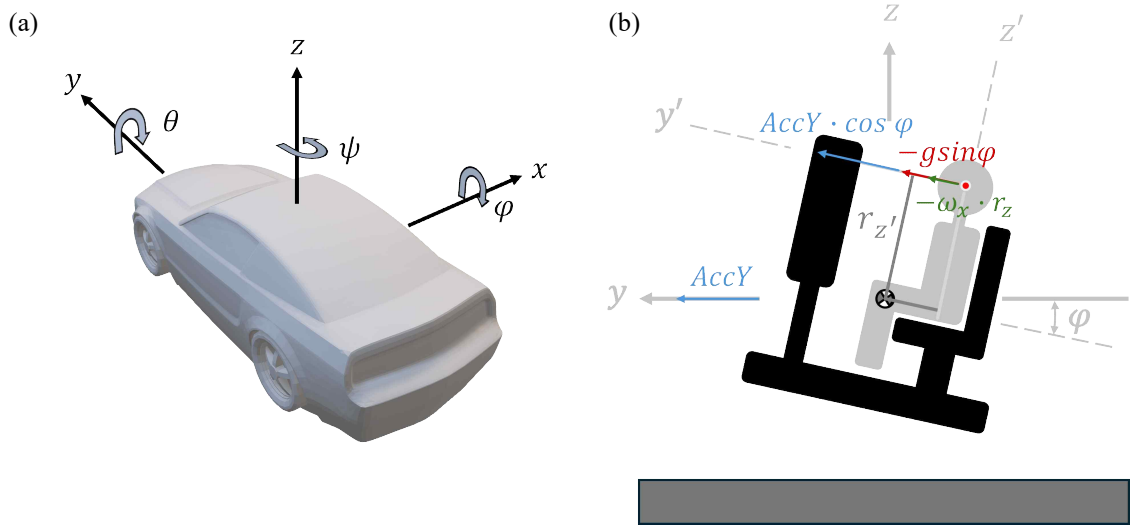


Fig. 4 (a) 3D Vehicle coordinate system, (b) Acceleration detail algorithm

Fig. 4(a)와 같이 좌표계를 설정할 때, X축 회전(phi)에 관한 개략도가 Fig. 4(b)에 제시되어 있다. 차량 움직임에 따라 사람이 느끼는 가속도를 순간 가속도와 중력 가속도를 이용한 지속적인 가속도가 합쳐진 복합적 가속도로 제공한다.

지면에 의한 차량의 각도 데이터를 $-gsin\phi$로써 범위 및 배율을 지정하고, 순간 가속도 데이터를 $AccY \cdot cos\phi$ 및 $-\omega_x \cdot r_z$로써 범위 및 배율을 지정하여 총 [-10, 10]의 범위에서 모션 큐잉을 제공한다. 결과적으로 y 축 가속도 모델은 $AccY' = AccY \cdot cos\phi - gsin\phi - \omega_x \cdot r_z$가 된다.

위의 X축 회전(phi)과 마찬가지로, Y축, Z축 회전 역시 동일하게 적용된다. Filter 적용 과정에서 추가 데이터 구성이 다를 뿐, 알고리즘은 세 축 회전 모두 동일하다. 주 축만 다를 뿐, $AccY'$과 마찬가지로 $AccX'$, $AccZ'$를 구할 수 있다. 결과적으로 X축 가속도 $AccX' = AccX \cdot cos\theta + gcos\theta + \omega_y \cdot r_{z'}$, Z축 가속도 $AccZ' = AccZ \cdot cos\phi - gcos\phi - \omega_x \cdot r_{y'}$의 수식을 구할 수 있다.

2.4 Platform 설계

2.4.1 Inverse Kinematics 설계

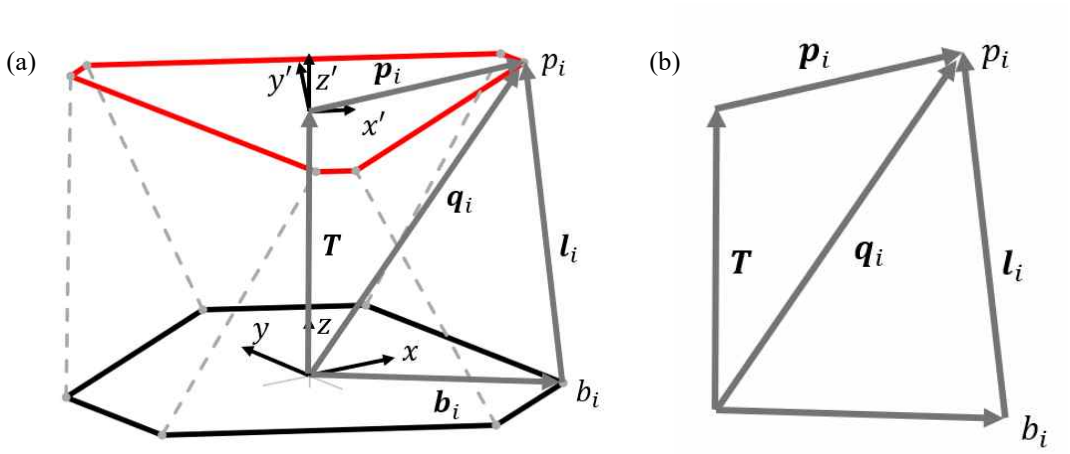


Fig. 5 (a) Schematic of Stewart Platform with vector, (b) Extracted vector

Top frame의 변위를 변수로 시스템을 제어하기 위해 inverse kniematics를 적용하여 equation을 구한다. Fig. 5(a)에서 확인할 수 있듯 임의의 상판 절점을 p_i, 그에 대응하는 하판 절점을 b_i로 둘 때 각각의 벡터들은 Fig. 5(b)와 같이 나타낼 수 있다. 상판의 상대 좌표계를 하판의 고정 좌표계로 변환하기 위해 회전 행렬 및 벡터 연산을 이용한다.

$$C=\begin{pmatrix}\cos\psi & -\sin\psi & 0\\ \sin\psi & -\cos\psi & 0\\ 0 & 0 & 1\end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix}\cos\theta & 0 & \sin\theta\\ 0 & 1 & 0\\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta\end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi\\ 0 & \sin\phi & \cos\phi\end{pmatrix}$$

$$C=\begin{pmatrix}\cos\psi cos\theta & -\sin\psi cos\phi+\cos\psi sin\theta sin\phi & \sin\psi sin\phi+\cos\psi sin\theta cos\phi\\ \sin\psi cos\theta & \cos\psi cos\phi+\sin\psi sin\theta sin\phi & -\cos\psi sin\phi+\sin\psi sin\theta cos\phi\\ -\sin\theta & \cos\theta sin\phi & \cos\theta cos\phi\end{pmatrix} \text{----------(1)}$$

$$\vec{T}=[x\ \ y\ \ z+h] \text{----------(2)}$$

$$\vec{q}_i=\vec{T}+\vec{C}\cdot\vec{p}_i \text{----------(3)}$$

$$\vec{l}_i=\vec{T}+\vec{C}\cdot\vec{p}_i-\vec{b}_i \text{----------(4)}$$

식 (1)은 오일러각을 이용한 회전 행렬을 나타내며, Z축, Y축, X축 순서로 각각의 회전 행렬을 곱하여 변환 행렬을 구한 것이다.[8] 식 (2)는 base frame 원점에서 top frame 원점까지의 벡터를 나타낸다. Top frame 상대변위 x, y, z에 높이 h 값을 더해 원점 위치를 결정한다. 이를 기반으로 leg 벡터 $\vec{l}_i$를 구하기 위해 $\vec{q}_i$를 구한다. 식 (3)에서 볼 수 있듯이, 상대 좌표계에서 정의된 $\vec{p}_i$를 변환행렬 C를 곱해 base frame의 고정 좌표계로 변환하고, 이를 $\vec{T}$와 더함으로써 $\vec{q}_i$를 구할 수 있다. 이제 간단히 $\vec{l}_i=\vec{q}_i-\vec{b}_i$의 벡터 연산을 통해 leg 벡터 $\vec{l}_i$를 구할 수 있다. Leg 벡터 절댓값 $|\vec{l}_i|$를 통해 각각의 상판 자세에 따른 leg 길이를 구할 수 있다.[7] 결과적으로 식 (2)의 x, y, z 요소와 식 (1)의 ψ,θ,ϕ 요소를 이용하여 상판의 위치와 자세를 제어할 수 있다.

2.3.2 상판, 하판 설계

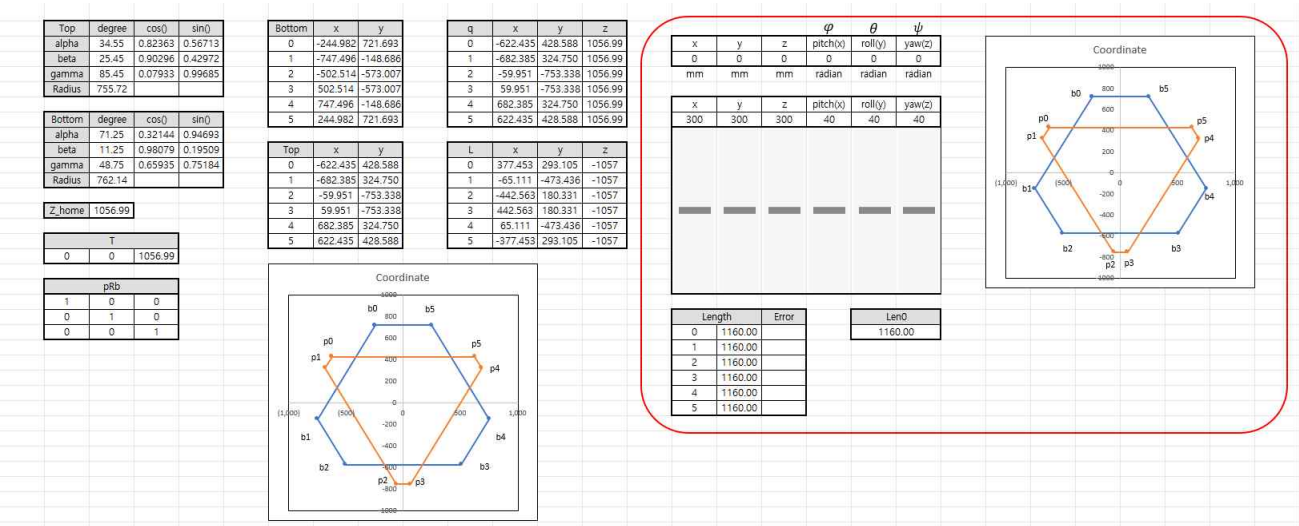


Fig. 6 Hardware Design Assistant Program

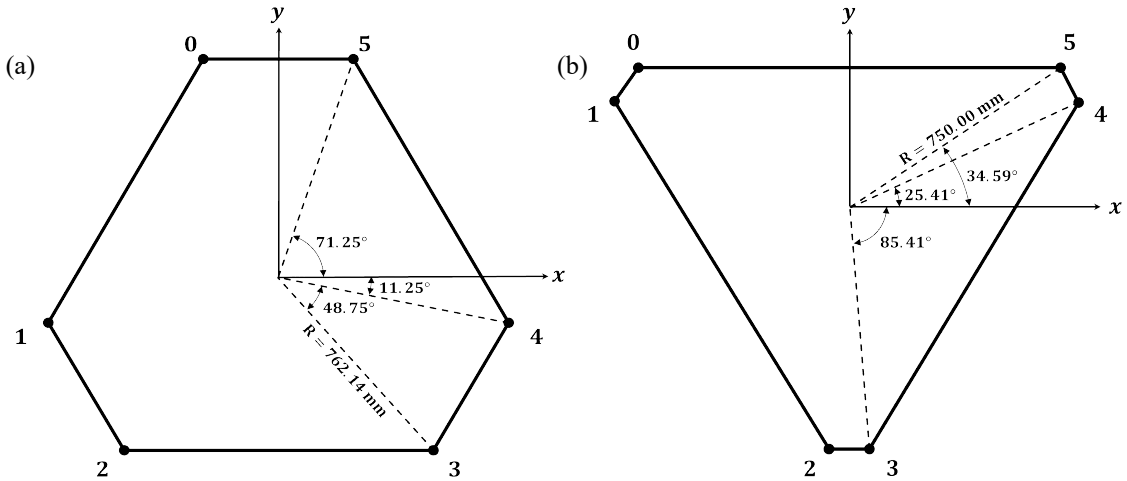


Fig. 7 (a) Base frame node position, (b) Top frame node position

Inverse kinematics를 활용하여 플랫폼의 움직임과 한계를 파악할 수 있다. 자체 제작한 프로그램의 예시를 Fig. 6에서 확인할 수 있으며, 이 프로그램을 통해 상판과 하판의 절점 위치를 설계하였다. 해당 절점 위치는 Fig. 7에서 확인할 수 있다. 설계 과정에서 보급성과 효율성을 중시하며 플랫폼의 크기가 지나치게 커지지 않도록 주의하며 절점 위치를 목적에 맞게 최적화하였다.

상판의 무게를 줄이기 위해 금속 소재 대신 알루미늄 합금을 사용하고자 했다. 그 중에서도 6063-T5 알루미늄 파이프가 구조적 성능이 우수할 뿐만 아니라, 해당 소재에 맞는 볼트, 너트 및 체결용 부품이 다양하게 제공되고 있다. 따라서 체결 및 조립 과정에서의 편의성과 효율성을 고려하여 본 연구에서는 6063-T5 알루미늄 프로파일을 채택하였다.

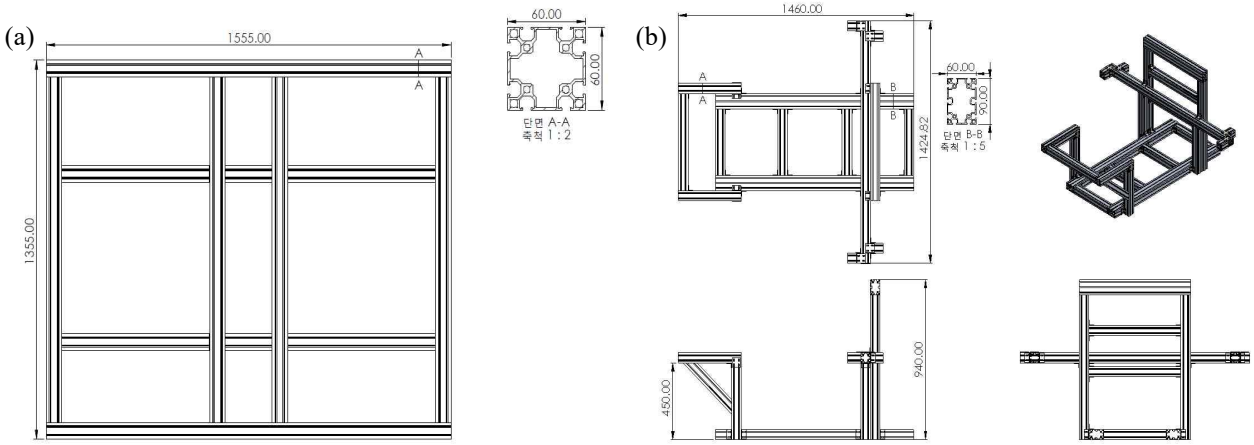


Fig. 8 (a) Base frame design, (b) Top frame design

하판 및 상판의 구조 설계는 Fig. 8에서 확인할 수 있으며, Fig. 7에서 정의된 절점 좌표를 기반으로 설계를 진행했다. 상판은 운전 시뮬레이션에서 필수적인 seat, steering wheel, pedal, tv 등, 기성품과의 호환성을 고려해 설계되었다. 또한, 설계 단계에서 물리적 공간 제약을 감안해 양쪽 여닫이문의 최대 폭인 1800 mm를 넘지 않도록 크기를 제한하였다. 하판은 상판의 동작을 안정적으로 지지할 수 있도록 견고하게 설계되었으며, 6개 구동부의 동작으로 인한 하판의 좌굴을 방지하기 위해 구조적 보강이 이루어졌다.

2.4.3 구동부 설계

Table 1 Total weight of the applied 6063-T5 profiles

프로파일 치수	길이 (mm)	개수	계 (kg)
6060	1425	1	3.8731
	850	2	4.6206
	570	3	4.6477
	450	4	4.8924
	424	2	2.3048
	390	6	6.3601
	80	4	0.8697
6090	1230	2	8.3271
	690	1	2.3356
총 무게			38.23

하중 계산을 위해 먼저 상판에 사용된 프로파일의 총 무게를 계산한다. Table 1에 따르면, 프로파일의 총 무게는 38.23 kg으로 확인된다. 여기에 사용자의 평균 무게를 120 kg으로 가정할 경우, tv 등의 기성품 60 kg을 포함하여 구동부는 대략 218.23 kg의 하중을 견디며, 이 하중을 지탱하고 볼 너트를 통해 밀어내야 한다. 이때 안전을 위해 최적 설계 대신 구동부 각각이 총 하중을 견딜 수 있도록 과도 설계를 진행했다.

가. 전제 조건

시뮬레이터 $m_1 = 98.23\,kg$

사람 $m_2 = 120\,kg$

안전계수 $S = 1.5$

중력 가속도 $g = 10\,m/s^2$

총 하중 $F = (m_1 + m_2) \cdot S \times g = 3273.45\,N$

나. Lead가 4 mm인 SFU 1204 C5 정밀 ball screw를 사용한다 했을 때의 검증

Ball screw 고정구(FK10)의 최대 속도 $v = 250\,mm/s$

감속비 $R = 1$(타이밍 풀리 동일 잇수 사용)

모터 최대 회전수 $N = \dfrac{60v}{LR} = \dfrac{60 \cdot 250}{4 \cdot 1} = 3750\,rpm$

최대 하중에 따른 구동토크 $T = \dfrac{F \cdot l}{2\pi\eta} = \dfrac{3273.45 \cdot 4}{2\pi(0.9)} = 2.32\,N \cdot m$

볼 스크류 좌굴 하중

$P = \dfrac{\eta \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I}{l^2} = \dfrac{(4.0) \cdot \pi^2 \cdot 2.1 \times 10^4 \cdot \pi/64 \cdot 10^4}{550^2} = 13.5\,kN$ [$\eta = 4.0$(고정-고정 지지단)]

볼 스크류 위험속도

$$N_c = \frac{60\lambda^2}{2\pi l^2}\sqrt{\frac{EIg}{\gamma A}} = \frac{60(3.927)^2}{2\pi \cdot 550^2}\sqrt{\frac{2.1 \times 10^4 \cdot \pi/64 \cdot 10^4 \cdot 10 \times 10^3}{7.85 \times 10^{-4} \cdot \pi/4 \cdot 10^2}} = 4941.42\,rpm$$

알루미늄 프로파일 9090 프레임 내부에 설계 가능한 ball screw SFU 1204 C5를 사용하기 위한 검증식이 제시됐다. 결과적으로 ball screw를 사용하는 것이 합당함을 알 수 있다. 동력부는 요구 조건을 충족하기 위해 토크 2.4 N·m, 최대 속도 3000 rpm의 AC 서보 모터를 채택하였다. 이 모터는 750 W의 고출력 산업용 모터로, 주파수 제어가 필요하여 Teensy 4.1 보드를 micro-controller로 사용하여 주파수 출력으로 구동부를 제어한다.

구동부 설계에 필요한 연결 부품들은 3D 프린팅으로 제작되었으며, Zortax사의 Z-PLA 재료가 사용되었다. 이 재료는 인장 강도 47.95 MPa, 파단 응력 46.53 MPa, 굽힘 응력 56.80 MPa의 특성을 가지고 있다.[9] 본 설계에서는 재료의 특성 값을 보수적으로 적용하여 70% 수준에서 하중 테스트를 수행하였다. 각 연결부의 설계는 Fig. 8에서 확인할 수 있으며, 이들은 알루미늄 파이프 또는 프로파일과 결합되기 때문에, 볼트 결합을 위한 구멍들이 함께 설계되었다. 하중 해석은 Fig. 10에 제시된 바와 같이 Solidworks를 사용해 간단히 진행되었으며, 하중을 직접적으로 받는 연결부들에 대해서만 진행했다. 모두 안전율 6~8의 해석 결과를 얻어, 3D 프린터로 제작해도 구조적 문제가 없음을 확인하였다.

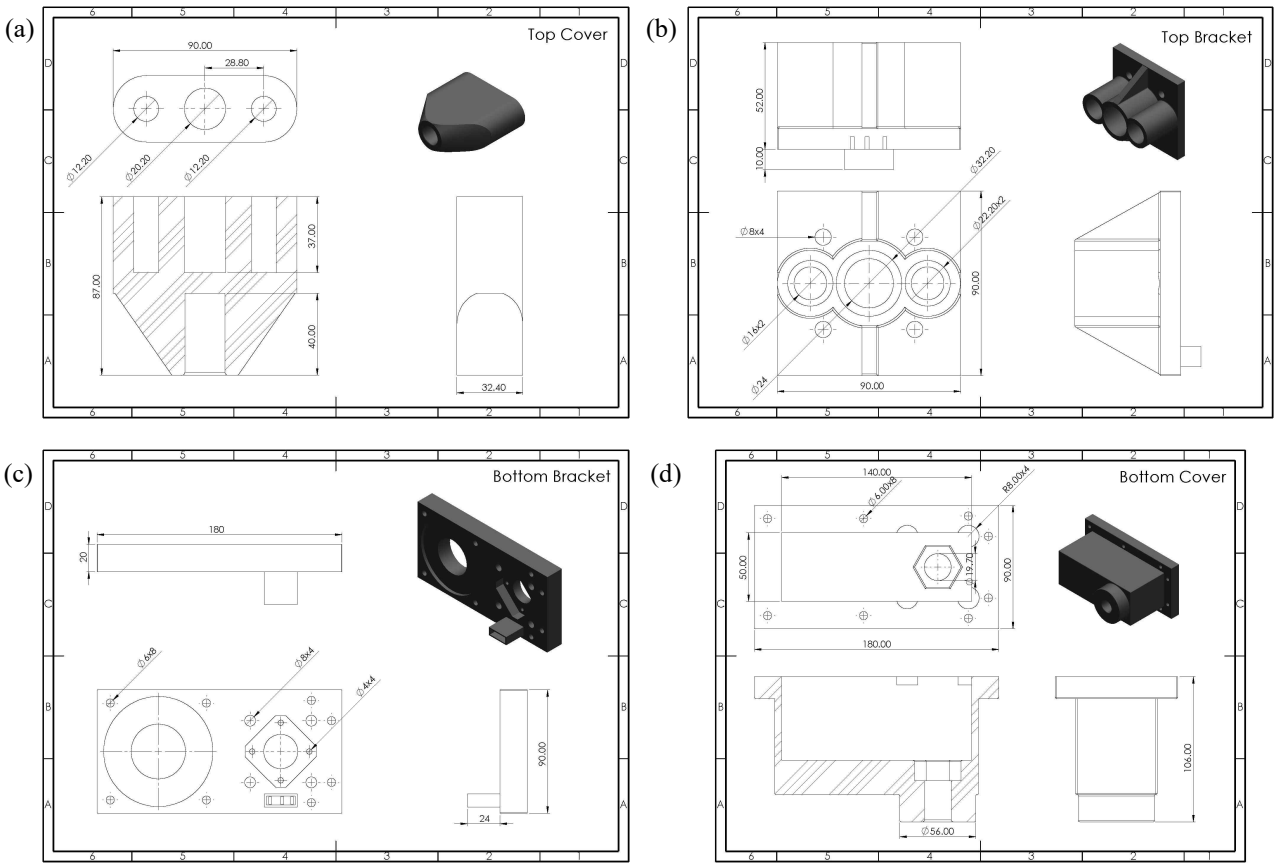


Fig. 9 Design of the 3D printed parts: (a) Top Cover, (b) Top Bracket, (c) Bottom Bracket, and (d) Bottom Cover

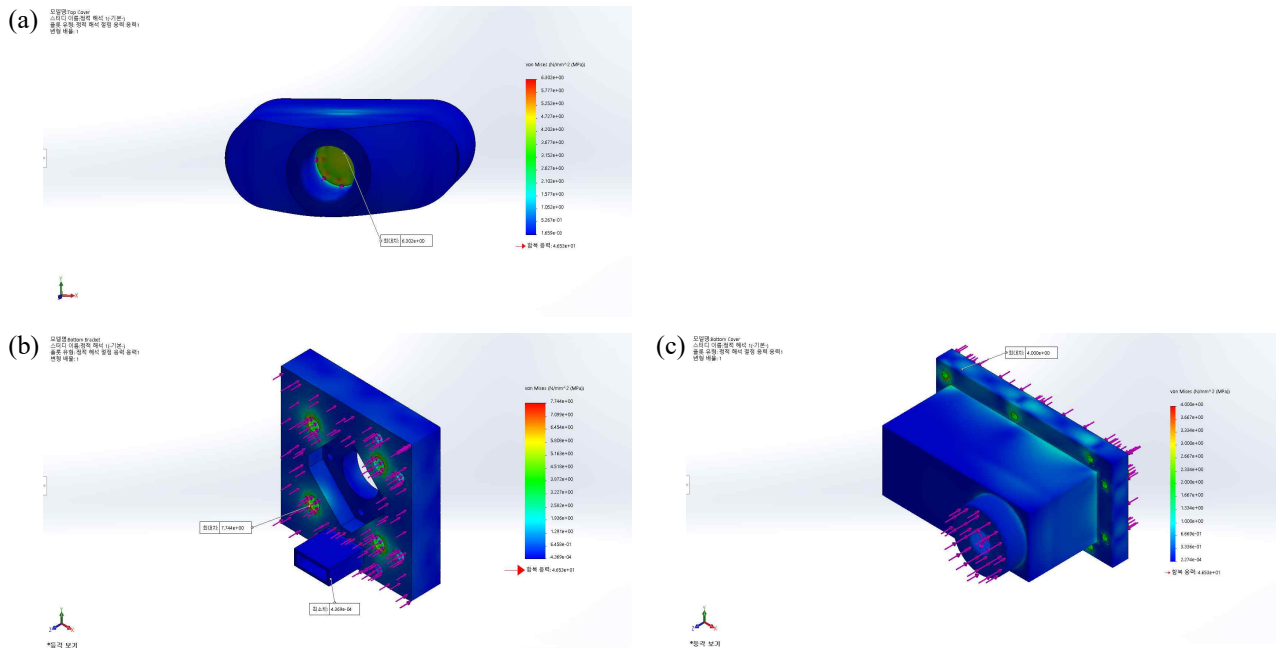
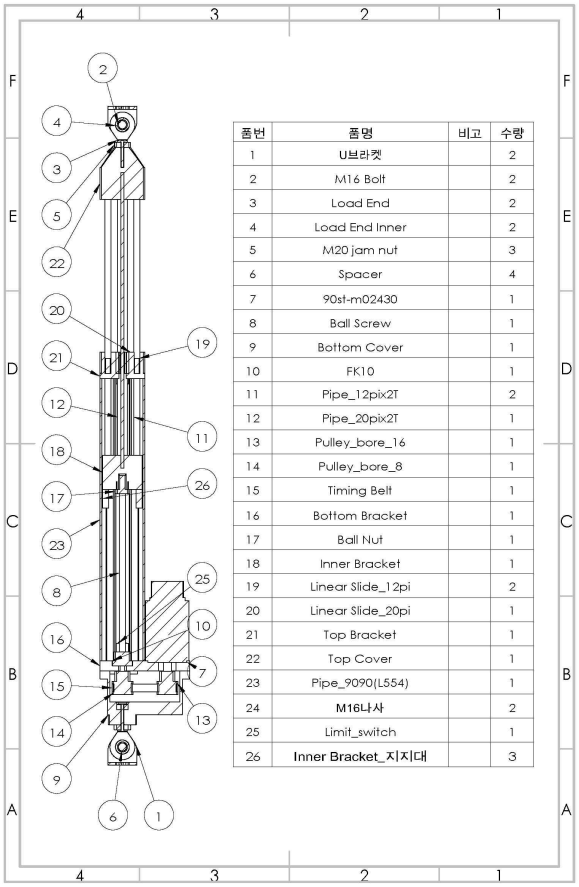


Fig. 10 Finite Element Analysis: (a) Top Cover, (b) Bottom Bracket, and (c) Bottom Cover

(a)



품번	품명	비고	수량
1	U브라켓		2
2	M16 Bolt		2
3	Load End		2
4	Load End Inner		2
5	M20 jam nut		3
6	Spacer		4
7	90st-m02430		1
8	Ball Screw		1
9	Bottom Cover		1
10	FK10		1
11	Pipe_12pix2T		2
12	Pipe_20pix2T		1
13	Pulley_bore_16		1
14	Pulley_bore_8		1
15	Timing Belt		1
16	Bottom Bracket		1
17	Ball Nut		1
18	Inner Bracket		1
19	Linear Slide_12pi		2
20	Linear Slide_20pi		1
21	Top Bracket		1
22	Top Cover		1
23	Pipe_9090(L554)		1
24	M16나사		2
25	Limit_switch		1
26	Inner Bracket_지지대		3

(b)

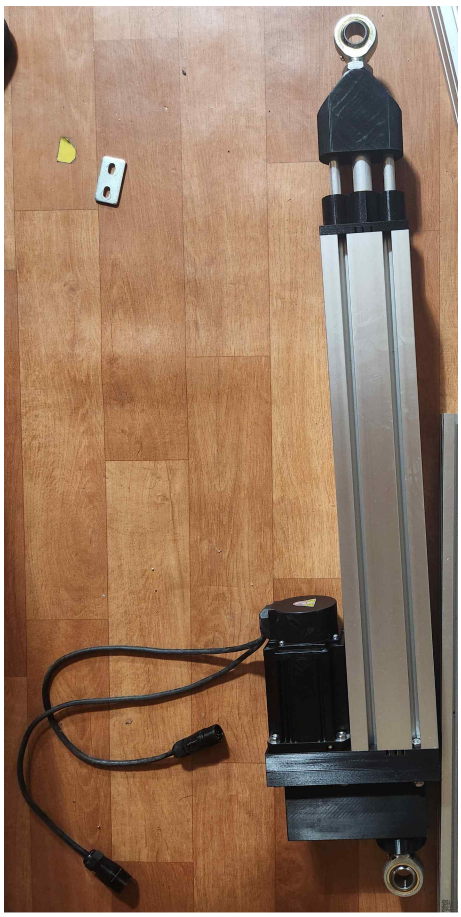


Fig. 11 (a) Design of actuator, (b) Assembled actuator unit based on the design

구동부의 외부 프레임은 9090 알루미늄 프로파일을 사용하여 설계되었으며, 관련 설계를 Fig. 11(a)에서 확인할 수 있다. Fig. 10(b)에서는 이 설계를 기반으로 제작된 실물을 확인할 수 있다.

직선 움직임을 제어할 때는 절대위치 센서를 사용하면 정밀도를 향상시킬 수 있지만[10], 이번 설계에서는 예산과 경제성, 정밀도 간의 균형을 맞추는 것을 목표로 했기 때문에 LVDT(Linear Variable Differential Transformer) 절대위치 센서를 사용하지 않았다. 대신, 정밀도를 개선하기 위해 limit switch와 모터 엔코더를 이용한 초기화 방법을 채택하였다. 구동부 내부 하단에 limit switch를 장착하고, 구동부가 가장 짧은 위치에 도달하면 이 스위치를 통해 모터 엔코더 값이 초기화되어 원점으로 설정되도록 알고리즘을 설계하였다. 이를 통해 정밀도를 유지하면서도 경제성을 확보할 수 있었다.

2.4.4 Hardware Assembly

상판, 하판, 그리고 구동부의 제작을 완료하였으므로 이들을 설계된 위치에 정확하게 결합해야 한다. 구동부의 결합부에는 universal joint나 spherical joint 대신 rod end bearing을 사용했기 때문에 이를 위한 별도의 joint 부품이 필요하다. 이를 위해 joint 부품으로 사용할 U bracket을 직접 설계하였으며, 그 설계가 Fig. 12(a)에 제시되어 있다. 각 구동부에 인가되는 하중이 U bracket에 집중되므로 6 T의 두께로 안정하게 제작하였다. Rod end bearing과 U bracket 사이의 축 정렬을 위해 spacer 부품도 함께 사용하였다. 이 U bracket은 6063-T5 알루미늄 프로파일과 호환되도록 설계되었으며, U bracket과 rod end bearing의 체결 방식은 Fig. 12(b)에서 확인할 수 있다.

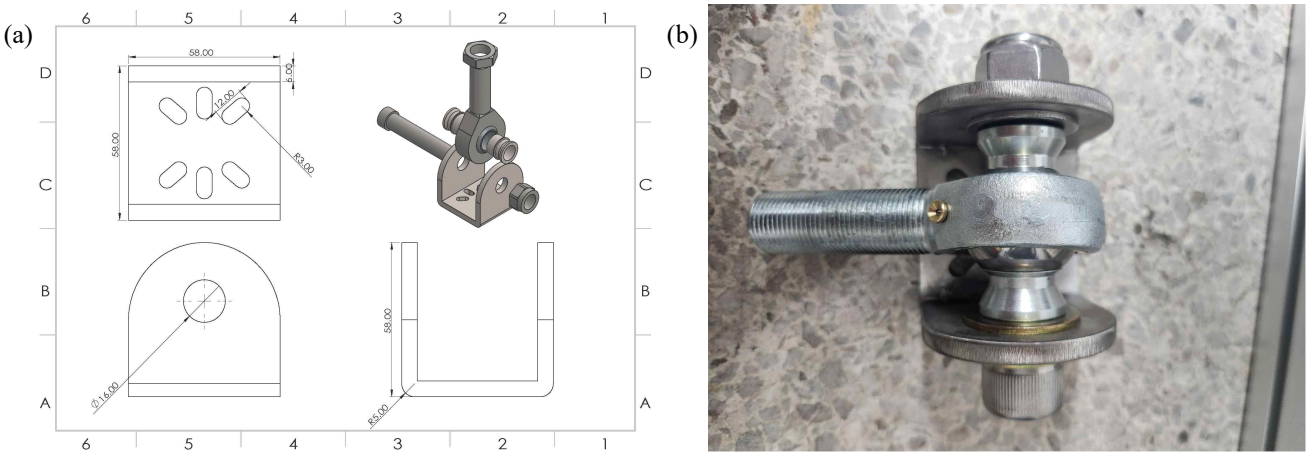


Fig. 12 (a) Design of U bracket, (b) Assembled bracket unit based on the design

2.5 분전반 설계

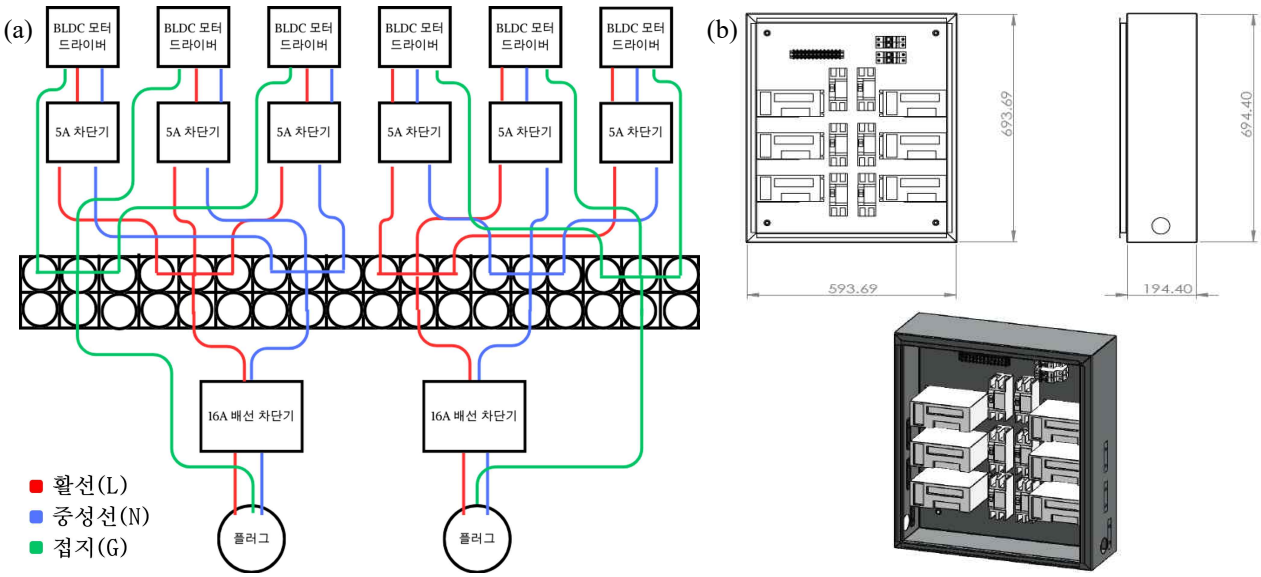


Fig. 13 (a) Power wiring diagram, (b) Distribution panel hardware design.

원활한 전원 공급을 위한 분전반 전원부 역시 직접 설계했다. 이번 설계에서 사용하는 모터 드라이버 및 모터 세트의 사용 전력은 750W로, 3개를 병렬로 연결 시 총 2250W, 10.23A의 전력이 요구된다. 이를 안정하게 운영하기 위해 최대 2500W/11.36A로 여유를 두어 설계했다.

전력 배분을 위해 11.36A를 고려하여 단자대에는 허용전류가 26A인 HIV 2.5SQmm 단선을 사용했다. 또한 16A 산업 주택용 배선 차단기를 선정하여 실제 전력이 허용전류의 80%를 넘지 않도록 했다. 모터 드라이버로 들어가는 각각의 전원에도 5A 배선 차단기를 설계하여 과전류로 인한 사고를 예방하고 안정성을 높였다. Fig. 13(a)에서 전원 배선도를 확인할 수 있으며, 이를 반영한 분전반 설계를 Fig. 13(b)에서 확인할 수 있다.

2.6 경제성

Table 2 Total material costs

물품	수량	가격	비고
로드앤드 숫나사	12개	₩ 223,080	구동부 체결용
알루미늄 파이프	21개	₩ 71,980	구동부 구성요소
90st-m02430 서보모터	6개	₩ 1,973,400	동력원
스텔 나일론 너트	12개	₩ 18,350	구동부 체결용
직동 슬라이드 베어링	21개	₩ 266,222	구동부 부품
분전반	1개	₩ 84,000	전기 부품
볼트, 너트 세트	0개	₩ 317,480	체결용 부품
전기 관련 부품	0개	₩ 53,200	분전반 부품
프로파일	0개	₩ 849,250	플랫폼
스페이서	6개	₩ 220,000	구동부 체결용
logitech g29 wheel	1개	₩ 270,000	기성품
hdmi, usb 선 등	0개	₩ 65,000	기기 연결용
Teensy 4.1	0개	₩ 120,000	
컨트롤러 관련 부품	0개	₩ 53,000	
U 브라켓 제작품	12개	₩ 250,000	
	총합	**₩ 4,834,962**	**₩ -**

현재 중국의 일부 저가 플랫폼에서도 6축 시뮬레이터는 대략 1,800만 원에서 2,800만 원대에 형성되어 있다. 그러나 Table 2에서 확인할 수 있듯, 순수 재료비만 480만 원대로, 탁월한 경제성을 지닌다. 고정 지출비용 및 임금 등을 감안하고 30%의 이윤을 반영해도 약 1,138만 원대로 판매할 수 있어 상업적 경쟁력 또한 확보된다. 특히, 구동부 절점 위치와 상판 크기를 사용자 맞춤형으로 설계할 수 있어 유연한 공급이 가능하다는 점이 강점이다. 이는 관공서 및 기업을 대상으로 한 B2G, B2B 거래 확장에도 유리하게 작용한다. 또한, 직접 설계한 simplified washout filter를 이용하기 때문에 별도의 라이센스나 개발 비용 없이 즉시 납품이 가능하여 시중의 어떤 시뮬레이터보다도 뛰어난 경쟁력을 가질 것으로 전망된다.

3. 결과

3.1 완성품 모습

Fig. 14 (a) Assembled platform, (b) Simple demonstration of the platform in operation

완성된 모션 시뮬레이터의 모습은 Fig. 14(a)에서 확인할 수 있다. 설계대로 조립된 모습을 확인할 수 있으며, 상판에 TV, wheel, pedal, seat, belt 등의 기성품을 원활히 체결할 수 있었다. 간단한 시연 일부 모습을 Fig. 14(b)에서 확인할 수 있으며, 상판이 모든 자세에서 안정적으로 거치됨을 확인했다. 분전반 역시 설계대로 제작된 모습을 Fig. 15에서 확인할 수 있다.

Fig. 15 Actual distribution panel.

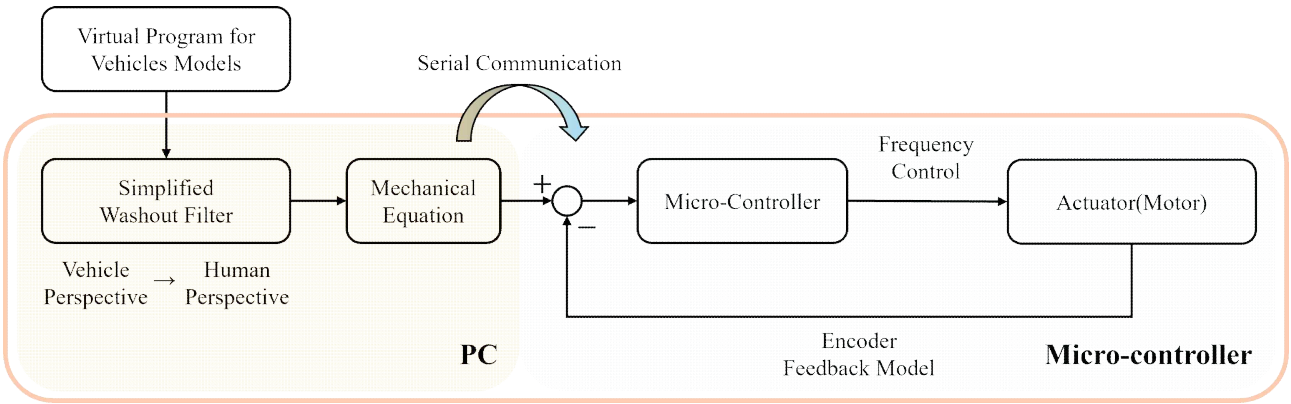


Fig. 16 Platform algorithm diagram

모션 시뮬레이터의 작동 방식은 Fig. 16와 같다. 테두리 내부 시스템이 이번 설계에 해당된다. 시스템은 가상의 프로그램에서 차체 데이터를 수신한다. 이 데이터는 이번 설계의 주요 내용인 simplified washout filter를 거쳐 차량 관점의 데이터를 사람 관점의 가속도 모델로 변환된다. 변환된 $x, y, z, \phi, \theta, \psi$ 데이터(상판의 상대 변위 입력값)는 기계 방정식을 적용하여 각 구동부의 길이 데이터로 변환된다. 이 길이 데이터는 PC에서 micro-controller로 직렬 통신을 통해 전달된다. 전달된 데이터를 기반으로 micro-controller는 주파수 제어를 통해 서보 모터를 제어한다. 서보 모터 내 엔코더에서 발생한 펄스 값을 바탕으로 데이터를 micro-controller로 송신하여 피드백 제어가 가능해지며, 이를 통해 position 제어가 수행된다.

3.2 플랫폼 성능

플랫폼 성능을 평가하기 위해 6개 구동부 각각의 encoder 센서를 사용할 예정이다. 이후 그래프들은 각 encoder의 pulse 값을 시리얼 통신을 통해 실시간으로 데이터를 수집하여 작성된 것이다.

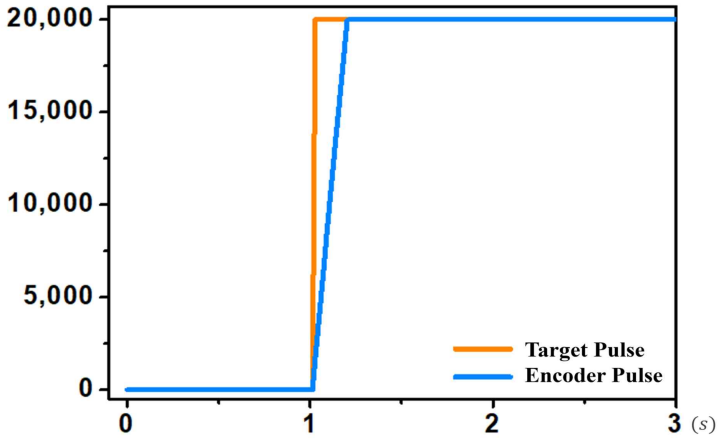


Fig. 17 Encoder pulse response in motor position control

Fig. 17에서 구동부 모터의 명령 추종 모습을 확인할 수 있다. 보통 부드러운 시작과 끝을 위해 PID 제어를 수행하지만, 이번 설계에서는 simplified washout filter의 성능을 확인하기 위해 position 제어만을 이용한다. 이로 인해 인위적인 명령의 경우, 명령 추종의 모습이 보편적인 구동 모습과는 다르게 나타나며, 연속적인 움직임의 real-time simulation을 통해 성능을 평가하는 것이 목표이다.

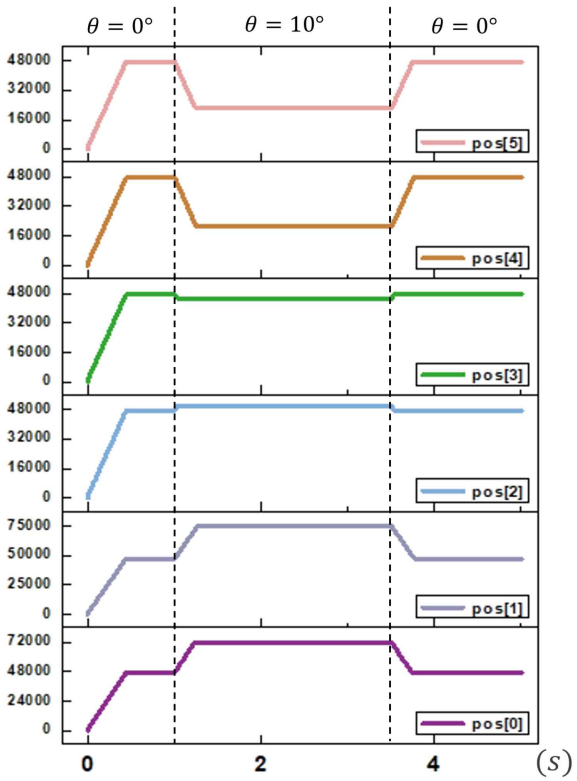


Fig. 18 Actuator movements for specific command execution

Fig. 18은 position 제어를 이용한 6개 구동부 encoder pulse 값을 그래프로 나타낸 것이다. 1초 시점에 $\theta = 10^{\circ}$ step input을 인가한 뒤, 2.5초 뒤에 다시 원점 복귀 명령을 준 상황이다. Fig. 17에서 확인했던 직선적인 구동 모습을 각각의 구동부에서 마찬가지로 확인할 수 있다.

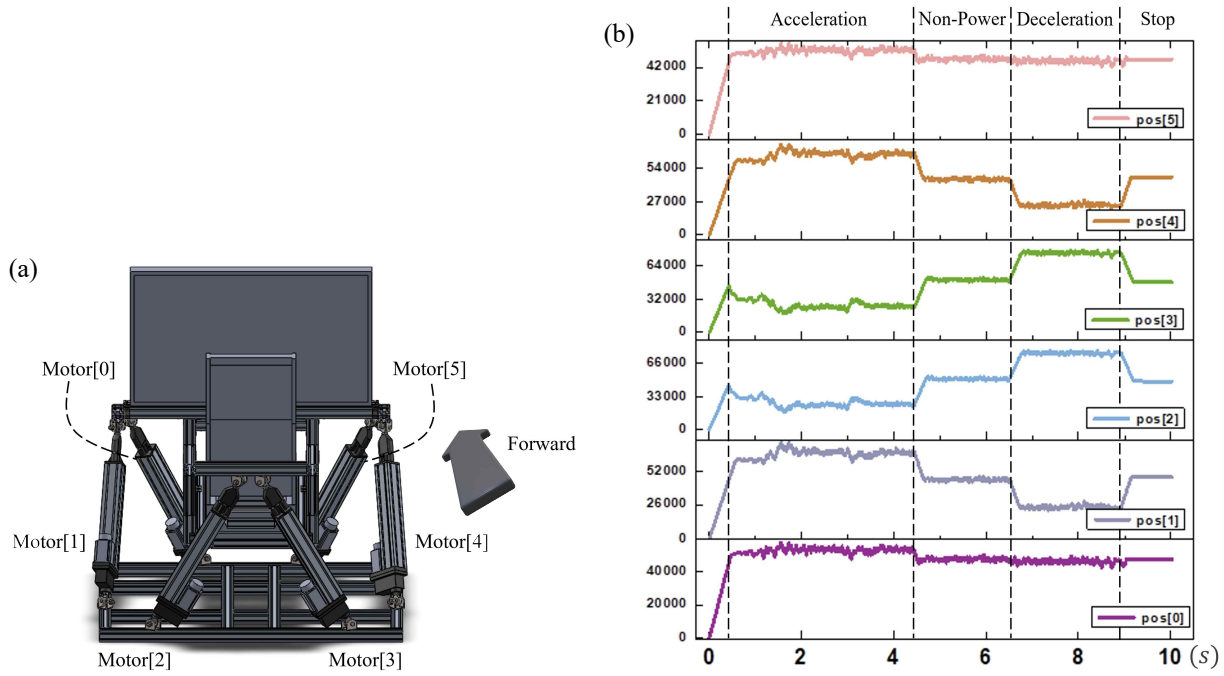


Fig. 19 (a) Position of Each Actuator, (b) Movement of each actuator in an arbitrary specific scenario

제작한 모션 시뮬레이터를 가상의 차량 프로그램을 이용해 시뮬레이션한 결과값이 Fig. 19(b)에 제시되어 있으며 가상 프로그램은 “Assetto Corsa(2010)”[11]를 이용했다.

Fig. 19(b)는 평지에서 가속과 감속을 차례로 진행한 특정상황에서의 데이터값들이다. 각각의 구동부들은 갑작스러운 움직임 없이 부드러운 움직임을 보이며 큰 노이즈 없이 명령을 잘 추종하는 것으로 보인다. 각각의 pos[n] 값들은 Fig. 19(a)에서 Motor[n]의 encoder pulse 값을 의미한다. 평지에서 가속 및 감속을 통해 pitch 변위를 가장 크게 만든 상황이기에 pos[0]과 pos[5]가, pos[1]과 pos[4]가, pos[2]와 pos[3]이 서로 유사한, 즉 대칭형 움직임을 보이는 것을 알 수 있다. 가속 상황에서 pos[2]와 pos[3]의 값이 줄어들고 pos[0], pos[1], pos[4], pos[5] 값이 증가하며 직관적으로 top frame이 뒤로 기운다는 것을 알 수 있다. 반대의 상황인 감속 상황에서는 pos[2]와 pos[3], 그리고 pos[0], pos[1], pos[4], pos[5] 값들이 가속 상황과 반대 양상으로 변화하는 것을 보아 simplified washout filter를 통해 입력된 명령이 잘 수행되는 것을 확인할 수 있고, 마지막 stop의 경우에도 원활히 원점 복귀하는 것을 확인할 수 있다.

Table 3 Simulator Specifications

	x	y	z	ϕ	θ	ψ
속도	$320\,mm/s$	$310\,mm/s$	$140\,mm/s$	–	–	–
가속도	$3.2\,m/s^2$	$3.1\,m/s^2$	$1.4\,m/s^2$	–	–	–
각속도	–	–	–	$10\,^\circ/s$	$11\,^\circ/s$	$15\,^\circ/s$
각가속도	–	–	–	$1.745\,rad/s^2$	$1.919\,rad/s^2$	$2.617\,rad/s^2$

구동부 사양에 따른 시뮬레이터 성능은 Table 3에서 확인할 수 있다. 각 가속도 및 각속도 값을 simplified washout filter의 가속도 모델에 대입하면, 최대 가속도 값 $4.803\,m/s^2$을 계산할 수 있다.

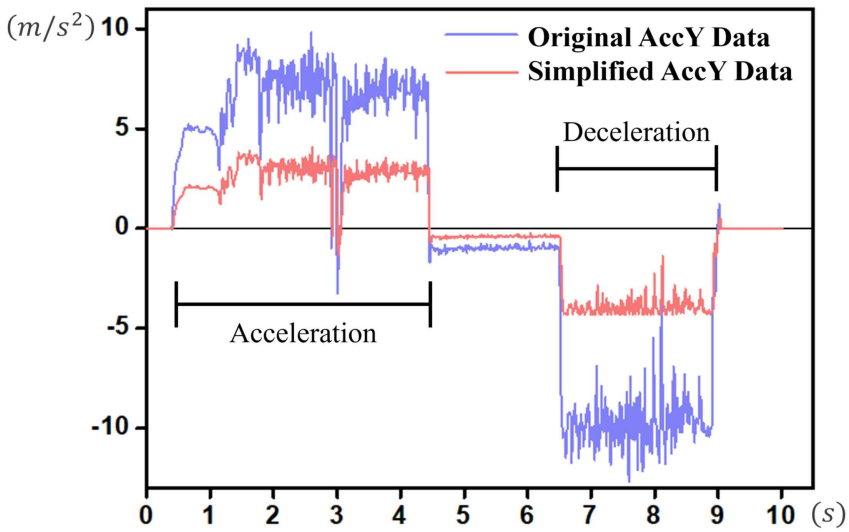


Fig. 20 Comparison of original and processed AccY data.

Fig. 20은 Fig. 19(b)와 동일한 시뮬레이션 조건에서 Y 방향 가속도를 추출한 그래프이다. 가상의 프로그램에서 original data와 simplified washout filter로 처리된 data를 비교한 결과, 가공된 data가 original data와 거의 유사한 패턴을 보이며 추종함을 확인할 수 있다. 유사한 패턴을 유지하면서도, 노이즈는 줄고, 시뮬레이터의 최대 가속도에 맞춰 조정된 가속도가 제공됨을 확인할 수 있다. 또한, 시뮬레이터의 한계 가속도인 $4.803\,m/s^2$까지 가속도가 도달하는 것을 확인할 수 있다.

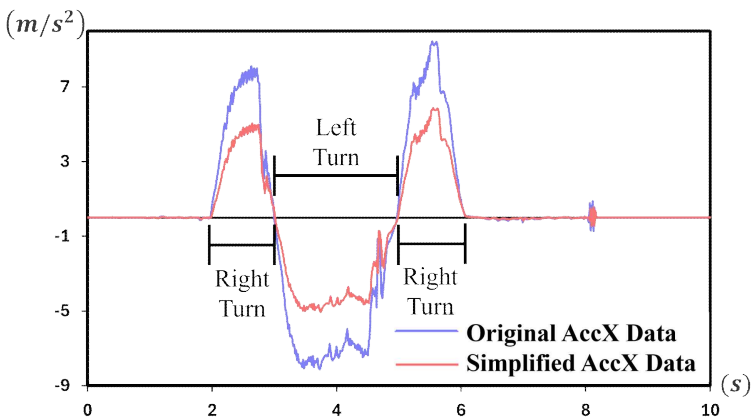


Fig. 21 Comparison of original and processed AccX data.

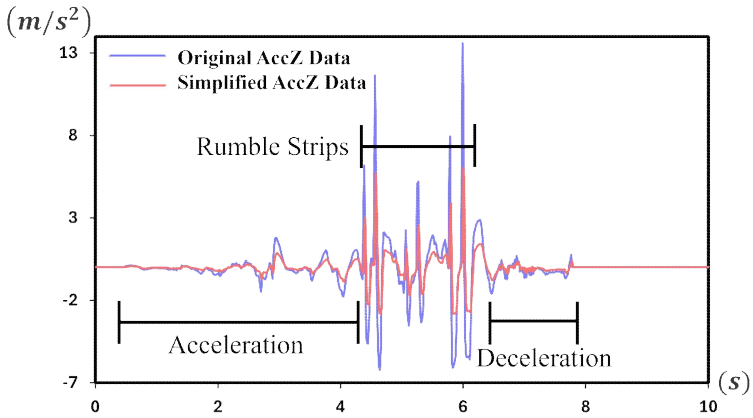


Fig. 22 Comparison of original and processed AccZ data

Fig. 21과 Fig. 22에서는 AccX와 AccZ의 가속도 데이터를 확인할 수 있다. Fig. 21은 우회전, 좌회전 후 다시 우회전으로 정렬하는 상황에서의 original data와 simplified washout filter로 가공한 data를 비교한 그래프이다. 이 그래프에서도 최대 가속도 값 4.803m/s^2를 한계로 하여 original data의 양상을 따라가며 가속도가 제공됨을 확인할 수 있다. Fig. 22에선 AccZ의 가속도 데이터를 확인할 수 있는데, 이는 초반 가속 후 3개의 노면 요철을 통과하는 상황을 시뮬레이션한 결과이다. 이 경우에도 최대 가속도 값을 한계로 original data와 비슷한 양상의 가속도 데이터를 확인할 수 있다.

3.3 장단점 및 의의

Simplified washout filter는 구조적으로 단순하면서도 높은 추종성을 자랑하는 알고리즘을 탑재하고 있다. 이는 필터를 통해 부드러운 데이터가 추출되므로 구동부에서 position 제어만을 사용하여 정확한 위치 제어가 가능하기 때문이다. 이로 인해 개발비용, 혹은 라이센스와 관련된 고정비용을 절감할 수 있어 상용화 가능성이 매우 높다. Simplified washout filter는 최대 4.803 m/s²의 가속도를 체감할 수 있도록 설계되었으며, 극한 상황에서도 현실감 있는 주행 경험을 제공한다. 지면에 의한 차체의 각도와 주행에 의한 가속도 gain 값을 각각 설정할 수 있는 특성은 다양한 환경에서의 시뮬레이션을 가능하게 하며, 이는 기존 필터와의 차별화된 경쟁력으로 평가될 수 있다.

여러 극한 상황을 가정할 수 있겠다만, 예시로 포트홀이나 강풍과 같은 외부 요인에 중점을 두어 시뮬레이션을 진행할 경우 지면에 의한 차체 각도의 gain 값을 증가시켜 특이점을 부각할 수 있으며, 눈길이나 빗길 등 주행 상황에 중점을 두어 시뮬레이션을 진행할 경우 주행에 의한 가속도 gain 값을 증가시켜 주행에 특이점을 두는 등 세밀한 제어가 가능하다. 이러한 유연한 filter 설정은 필터가 다양한 시뮬레이션 시나리오에서 적용될 수 있음을 의미하며, 사용자 맞춤형 경험을 제공할 수 있는 중요한 설계적 장점을 의미한다.

3.4 활용 방안 및 기대 효과

Simplified washout filter는 다양한 시뮬레이션 환경에서 현실감 있는 체험을 제공하는 중요한 도구다. 특히 눈길, 블랙 아이스와 같은 극한 주행 상황에서의 사고 대응뿐만 아니라, 지진, 해일, 고속도로 연속 추돌 등의 재난 대처 시뮬레이션도 가능하다는 장점이 있다. 이를 통해 자동차 운전 중 발생할 수 있는 사고와 재난 상황을 미리 경험하고 대처 능력을 키워, 실제 상황에서 사고를 줄이는 데 도움이 될 수 있다.

또한, 자체 설계된 필터와 저렴한 재료비 덕분에 시장 경쟁력이 매우 뛰어나다. 타 업체에 비해 가격 경쟁력이 우수하므로 기존에 한계가 있던 시뮬레이터 시장을 확장시키고 이목을 집중시킬 가능성이 크다. 더불어 중요시되지 않았던 운전 연수나 장롱면허 소지자의 재교육, 초보 운전자와 고령 운전자의 연

수도 가능하다. 또 다른 장점으로는 시뮬레이션을 통해 사고 시 운전자의 주행 데이터와 반응 데이터를 추출할 수 있다는 점이다. 예를 들어, 사람들이 어떤 상황에서 더 주의를 기울이며, 어떤 상황에서 집중력이 흐트러지는지 등을 파악할 수 있고, 이러한 데이터를 축적하여 실제 도로 환경에 적용해 사고 예방과 교통 안전을 개선하는 데 크게 기여할 수 있다.

4. 결 론

제안된 simplified washout filter는 단순하면서도 정밀도 높은 알고리즘으로, 기존의 복잡한 필터 구조를 대체할 수 있는 독창성을 지니고 있다. 이 필터는 다양한 주행 및 재난 시나리오에서의 현실감 있는 체험을 제공할 뿐만 아니라, 저비용 구조와 높은 시장 경쟁력으로 상용화 가능성 또한 매우 크다.

Filter의 가장 큰 강점은 사용자의 요구에 따라 각도와 가속도에 대한 gain 값을 손쉽게 조절할 수 있다는 점이다. 이를 통해 포트홀, 눈길, 강풍 등의 다양한 외부 상황에서의 주행을 세밀하게 재현할 수 있으며, 시뮬레이션 환경을 빠르게 설정하고 다양한 조건을 적용할 수 있다. 또한, 주행 데이터 및 반응 데이터를 추출하여 실제 도로 상황에서의 운전 패턴을 분석할 수 있는 능력은 사고 예방과 교통 안전 개선에 있어 중요한 역할을 할 수 있다.

결과적으로, simplified washout filter의 가장 큰 의의는 사고 상황이나 극한 상황을 리스크 없이 시뮬레이션할 수 있다는 점이다. 또한, 상용화에 적합한 기술적 혁신성과 가격 경쟁력을 갖추고 있어 다양한 시뮬레이션 환경에서 중요한 역할을 할 것으로 기대된다. 이 필터는 사용자 맞춤형 시뮬레이션을 가능하게 하며, 이를 통해 교육, 훈련, 재난 대응 시나리오에서의 활용도가 크게 높아질 것이다. 나아가 시뮬레이터 시장의 확장과 교통 안전성 향상에도 기여할 것으로 예상된다.

후 기

실제 스케일의 모션 시뮬레이터를 제작하는 것이기에 설계에 있어 수많은 시행착오와 어려움을 겪었습니다. 특히 인명피해가 발생하지 않도록 안전에 각별한 주의를 기울였고, 결과적으로 매우 안정적인 시뮬레이터를 완성할 수 있었습니다. 설계기간 반년간 수많은 벽을 마주하며 절망적인 순간도 많았습니다. 허나 매번 도움되는 조언을 주시고, 아낌없이 물자를 지원해주신 강신유 교수님께 진심으로 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

(1) Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2023, “Annual Vehicle Registration Statistics,” *Ministry of Land, Infrastructure and Transport*, Sejong.

(2) Sim, Hyeon-Bo, 2012, “체감형 게임 시뮬레이터를 위한 Pre-Processing 및 Washout 필터의 연구,” *Korea Multimedia Society*, Vol. 16, No. 1, pp. 27~35.

(3) H. Cho, H.K. Kim, W.J. Jeon, K.H. Kim, 2014, “Technology Tredns of Virtual Reality based Motion-Platforms,” *Electronics and Telecommunications Trends*, Vol. 29, No. 1, pp. 31~40.

(4) Bhaskar Dasgupta, T. S. Mruthyunjaya, 2000, “The Stewart platform manipulator: a review,” *Mechanism and Machine Theory*, Vol.35, No. 1, pp. 15~40.

(5) Y. X. Su, B.Y Duan, C. H. Zheng, Y. F. Zhang, G. D. Chen, and J. W. Mi, 2004, “Disturbance-Rejection High-Pression Motion Control of a Stewart Platform,” *IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY*, Vol. 12, No. 3, pp. 364~374.

(6) Diego Silva, Julio Garrido and Enrique Riveiro, 2022, “Stewart Platform Motion Control Automation with Industrial Resources to Perform Cycloidal and Oceanic Wave Trajectories,” *Machines*, Vol. 10, Article 711.

(7) Nikolce Murgovski, 2007, “Vehicle modelling and washout filter tuning for the Chalmers Vehicle Simulator,” Master’s Thesis, *CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY*, Sweden.

(8) RICHARD L. PIO, 1966, “Euler Angle Transformations,” *IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL*, Vol. AC-11, No. 4, pp. 707~715.

(9) Zortax, 2023, “Z-PLA TECHNICAL DATA SHEET”, Product Datasheet, *Zortax*.

(10) SURESH C. SAXENA AND S. B. LAL SEKSENA, 1989, “A Self-compensated Smart LVDT Transducer,” *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*, Vol. 38, No. 3, pp. 748~753.

(11) Kunos Simulazioni, 2014, “Assetto Corsa”, https://www.assettocorsa.net