

지형 적응형 4륜 독립조향

UGV 설계 및 제어

Design and Control of a Terrain-Adaptive
UGV with Independent 4-Wheel Steering

2026 년

한성대학교 기계전자공학부

기계설계(기계시스템디자인)트랙

정 지 훈

이 주 영

박 정 훈

지형 적응형 4 륜 독립조향

UGV 설계 및 제어

Design and Control of a Terrain-Adaptive
UGV with Independent 4-Wheel Steering

지도교수 이 상 열

이 논문을 공학사 학위논문으로 제출함.

2026 년 6 월 19 일

한성대학교 기계전자공학부

기계설계(기계시스템디자인)트랙

정 지 훈

이 주 영

박 정 훈

공학사 학위논문으로 인준함.

2026 년 6 월 19 일

위원장 이 상 열 (인)

위 원 이 상 열 (인)

종합설계 결과보고 요약서

종합설계 제목	지형 적응형 4륜 독립조향 UGV 설계 및 제어
종합설계 주제의 상세정의	본 연구는 비정형 지형 대응을 위한 지상고 조절 및 독립 4륜조향(4WS) 시스템의 설계와 안정성 검증을 목적으로 한다. 연구 초기 단계의 기술 검증을 위해 Half-Car 프로토타입을 제작하며 UI 제어 기반 액추에이터 변위 조절 및 조향 성능을 실험 검증한다. 특히 시뮬레이션의 정밀도를 높이기 위해 실제 모터 파라미터를 Simscape 에 반영하여 분석의 신뢰성을 확보한다. 이를 통해 지상고 제어 시 Rolling, Pitching 저감 효과를 정량화하고 Zero-turn 및 경사도 극복 등 고기동 성능을 이론적으로 입증한다. 결과적으로 본 연구는 하드웨어적 타당성과 정밀 해석을 결합하여 차세대 고기동 UGV 를 위한 신뢰성있는 설계 방법론을 제시한다.
설 계 구 성 요 소	
구성요소	내 용
1.목표설정	목표 설정 및 설계 활동 범위 본 연구는 전장 1,800 mm, 전폭 1,500 mm 급 소형 UGV 의 지형 적응성을 극대화하기 위한 지상고 제어 및 독립 4WS 플랫폼 설계를 목표로 한다. 기구학적 임계치를 고려하여 접지력 상실을 최소화하는 150~250 mm 범위의 지상고 가변 성능을 확보하며 이를 기반으로 시나리오별 지상고 제어를 수행한다. 고속 주행 및 탑재체 발사 시에는 저지상고(150 mm)로 전복 안정성(SSF) 및 피칭 모멘트를 제어하고 험로 주행 시에는 고지상고(250 mm)를 통해 램프각(Breakover Angle)을 최대로 확보한다. 특히 험로 함몰 시 나머지 액추에이터를 활용한 무게중심(CG) 이동 제어로 탈출 기동성을 확보하는 것을 핵심 기술 목표로 설정한다. 기대효과 및 활용방안 실험 모터 파라미터를 이식한 고충실도(High-fidelity) 시뮬레이션을 통해 물리적 제작 전 시스템 거동을 정밀하게 예측하고 램프각(Breakover Angle) 및 전복 안정성(SSF) 간의 상관관계를 분석하여 소형 UGV 설계의 정량적 가이드라인을 제시한다. 기술적으로 검증된 지상고 제어 알고리즘은 특수 목적(미사일 발사, 험지 돌파) 플랫폼 및 극한 환경용 UGV 의 생존성 향상에 기여한다. 본 연구의 Half-Car 기반 데이터와 Simscape 모델은 향후 Full-Scale UGV 제작을 위한 신뢰성 높은 설계 자산이 되며 나아가 AI 기반 노면 인식 시스템과 결합하여 지능형 자율주행 모빌리티의 표준 테스트베드로 활용될 것이다.
2. 분 석	본 프로젝트는 산업체 요구 규격과 차량 동역학적 지표(Scrub radius, Roll moment arm 등)를 종합적으로 반영한 지오메트리 설계를 바탕으로 수행되었다. Siemens NX 를 활용한 3D 모델링 과정에서 내부 패키징 및 부품 간 간섭을 검토하였으며 특히 액추에이터의 선형 운동을 지상고 변화로 전환하는 푸시로드 및 로커암 메커니즘을 정밀하게 설계하였다. 기구 특성상 하중이 집중되는 로커암과 너클

	부품은 Altair 를 통한 구조 해석 및 위상 최적화를 거쳐 강성 확보와 경량화를 동시에 달성하였으며 이를 기반으로 실제 부품을 주문 제작하여 하드웨어의 신뢰성을 확보하였다. 수학적 모델링 단계에서는 Matlab 을 활용해 지상고 변화에 따른 Breakover, Rollover, Pitchover Angle 의 상관관계를 분석하여 주행 안정성 가이드라인을 수립하였다. 최종적으로 실제 사용 모터의 파라미터를 이식한 Simscape 주행 시뮬레이션을 통해 비정형 지형에서의 지상고 제어 성능을 정량적으로 검증하였다. 이러한 ‘설계-해석-제작-시뮬레이션’ 의 통합 프로세스는 Half-Car 프로토타입의 기술적 타당성을 뒷받침하는 핵심 분석 근거가 된다.
3. 합 성	본 프로젝트의 개념설계 단계에서는 산업체의 요구 사양을 충족하기 위해 전장 1,800 mm, 전폭 1,500 mm 급 소형 플랫폼을 기반으로, 지형 대응력을 극대화할 수 있는 푸시로드(Push-rod) 및 로커암(Rocker-arm) 기반의 지상고 제어 메커니즘을 도출하였다. 초기 설계 지오메트리는 스크럽 반경과 롤 모멘트 암을 최적화하여 조향 응답성과 주행 안정성을 동시에 확보하도록 설정하였으며 이를 통해 단순 주행을 넘어선 특수 임무 수행이 가능한 고기동 모빌리티의 기구학적 기틀을 마련하였다. 이어진 상세설계 단계에서는 Siemens NX 를 활용하여 부품 간 간섭과 패키징을 고려한 3D 디지털 mockup 을 완성하였다. 특히 액추에이터의 선형 운동을 수직 변위로 변환하는 핵심 기구부인 로커암과 너클은 하중 집중을 고려하여 Altair 구조 해석 및 위상 최적화를 거쳐 최종 형상을 확정하였다. 설계의 정밀도를 높이기 위해 실제 구동 모터의 파라미터를 Simscape 에 이식하여 디지털 트윈 기반의 시뮬레이션 환경을 구축하였으며 최종적으로 도출된 상세 설계안을 바탕으로 Half-Car 프로토타입을 제작하여 설계의 물리적 실현 가능성을 입증하였다.
4. 제 작	본 프로젝트의 제작 공정은 개념설계의 타당성을 검토하는 디지털 mockup (Digital Mock-up) 단계와 상세설계안을 실물로 구현하는 시작품(Prototype) 제작 단계로 진행되었다. 먼저 mockup 과정에서는 Siemens NX 를 통해 가상 조립을 수행하여 푸시로드 기구부의 가동 범위와 부품 간 간섭을 정밀하게 점검하였다. 이를 통해 로커암의 회전 중심과 액추에이터 배치 공간을 최적화함으로써 실물 제작의 시행착오를 최소화하였다. 이어진 시작품 제작 과정에서는 부품별 기능과 하중 특성에 최적화된 소재를 채택하였다. 푸시로드 구조상 큰 하중과 응력이 집중되는 로커암(Rocker-arm) 및 너클(Knuckle) 부품은 구조적 신뢰성을 확보하기 위해 SS400(구조용 탄소강)을 소재로 선정하여 정밀 가공 및 주문 제작하였다. 반면 현가장치 하부의 하중(Unsprung mass)을 줄여야 하는 휠 허브(Hub) 부품은 경량화와 가공성이 우수한 AL6061(알루미늄 합금)을 사용하여 구동 효율을 극대화하였다. 최종적으로 제작된 Half-Car 시작품에 실제 모터와 제어 시스템을 통합하여 설계 사양인 지상고 가변 메커니즘의 물리적 구동 성능과 소재의 타당성을 최종 검증하였다.
5. 시 험	본 프로젝트의 성능 검증은 가상 환경에서의 Simscape 주행 시뮬레이션과 실물 Half-Car 시작품의 하드웨어 시험을 병행하여 수행하였다. 먼저 시작품의 시험 작동 단계에서는 제작된 Half-Car 플랫폼을 활용하여 지상고 제어 및 독립 조향 기능을 하드웨어 수준에서 검증하였다. UI 제어를 통해 액추에이터의 선형 스트로크에 따른 너클의 수직 변위(150~250 mm)를 측정하였으며 설계치와 실측치 사이의 오차를 보정하여 기구학적 정밀도를 확인하였다. 또한 독립 조향 시험을 통해 $\pm 45^\circ$ 범위의 조향각 구현 및 개별 휠의 응답 특성을 평가하였다. 내구성 및 안정성 시험 측면에서는 두 가지 접근 방식을 취하였다.

	첫째, 하드웨어 안정성 검증을 위해 SS400 소재로 제작된 로커암과 너클 부품에 최대 설계 하중을 인가하고 반복 구동 시 기구부의 변형이나 유격 발생 여부를 확인하였다. 특히 푸시로드 구조의 특성상 발생하는 집중 하중 조건에서 메커니즘의 구조적 건전성을 입증하였다. 둘째, 주행 안정성 분석을 위해 실제 모터 파라미터가 이식된 Simscape 시뮬레이션을 수행하였다. 비정형 지형 시나리오를 입력하여 주행 중 발생하는 Rolling 및 Pitching 모멘트의 저감 수치를 정량화하였으며, 이를 통해 고지상고 모드에서의 램프각 극복 성능과 저지상고 모드에서의 전복 안정성(SSF) 향상 효과를 이론적으로 입증하였다. 이러한 가상 및 실물 시험의 교차 검증은 개발된 UGV 플랫폼의 기술적 완성도와 향후 Full-Scale 제작 시의 신뢰성을 보증하는 핵심 근거가 된다.
6. 평 가	본 프로젝트는 설계 사양과 실물 프로토타입 간의 비교 분석을 통해 지형 적응형 UGV 플랫폼의 유효성을 최종 평가하였다. 성능 측정 결과 지상고 가변 범위(150~250 mm) 및 독립 조향각($\pm 45^\circ$) 목표를 100% 달성하였으며, 실제 모터 파라미터가 반영된 Simscape 시뮬레이션을 통해 지상고 제어 시 차체의 롤링 및 피칭 각도(peak to peak)가 지상고 고정 상태 대비 각각 47%, 20% 정량적으로 저감됨을 확인하였다. 또한 하중이 집중되는 SS400 소재의 로커암과 너클 부품은 반복 시험 후에도 영구 변형이 발생하지 않아 구조적 건전성을 입증하였다. 다만 한계 측정 과정에서 지상고를 목표 범위 이상으로 조정할 경우 기구학적 특성에 따른 캠버 게인(Camber Gain)의 급격한 증가로 타이어 접지 성능이 저하되는 물리적 임계점을 확인하였다. 또한 액추에이터의 선형 속도 제한으로 인한 고주파 진동 대응의 한계가 식별되었으나 이는 향후 고성능 구동기 채택을 통해 개선 가능한 요소로 판단된다. 종합적으로 본 연구는 실제 제작과 정밀 해석을 결합하여 소형 UGV의 지형 적응 메커니즘을 성공적으로 실증하였으며 확보된 데이터는 향후 Full-Scale 지능형 UGV 개발을 위한 신뢰성 있는 기초 자산으로 활용될 것이다.

현 실 적 제 한 요 소			
제한요소	내용	고려 여부	구체적 고려 내용
1.산업표준	결과물의 설계에 있어 산업표준(KS 등)을 고려하였는가?	예	본 프로젝트는 부품 호환성과 설계 신뢰성 확보를 위해 국내외 표준을 준수하였다. 로커암과 너클에는 KS D 3503(SS400), 휠 허브에는 KS D 6759(AL6061) 규격 소재를 채택하여 표준 물성치 기반의 해석 신뢰도를 확보하였다. 또한, KS B

			0001(기계제도) 및 ISO 표준에 의거한 공차 설계를 수행하여 기성 부품과의 정밀 조립 및 가공 호환성을 보장하였다.
2. 경제성	I. 원가에 대한 고려가 되었는가? II. 결과물이 경제성이 있는가? III. 경제성을 고려한 부품 선정으로 결과물의 경제성을 향상시켰는가?	예	한정된 예산 내 성능 최적화를 위해 전략적 소재 혼용과 설계 최적화를 단행하였다. 하중 집중 부위(SS400)와 경량화 부위(AL6061)를 이원화하여 재료비를 절감하였으며 Altair 위상 최적화를 통해 가공 영역과 소재 소요량을 최소화하였다. 특히 Simscape 시뮬레이션을 통한 사전 간섭 검토로 설계 오류에 따른 재제작 비용 발생 리스크를 근본적으로 차단하였다.
3. 윤리성	결과물이 윤리성을 만족하는가? (ex. 프로젝트에 윤리 및 사회 통념에 반하는 내용이 포함되어 있는가?)	예	연구 전 과정에서 공학적 안전과 연구 진실성을 최우선하였다. Simscape 기반의 안정성 분석을 통해 전복 사고 및 기계적 결함에 의한 인적·물적 피해 가능성을 최소화하였다. 탑재체 발사 시의 정밀 자세 제어 기술은 오작동 방지 및 부수적 피해 최소화라는 공학적 책임 의식을 바탕으로 설계되었으며, 독자적인 지오메트리 설계를 통해 타인의 지식재산권을 존중하고 연구 데이터의 투명성을 유지하였다.
4. 안전성	결과물이 사람이나 동/식물에 적용 될 경우 안전에 대한 고려를 하였는가?	예	본 플랫폼은 운용 중 발생할 수 있는 사고 방지를 위해 구조적 강성과 동적 안정성을 이중으로 설계하였다. Altair 구조 해석을 통해 핵심 부품의 안전율을 확보하여 기계적 파손 위험을 제거하였으며, Simscape 시뮬레이션 기반의 전복 안정성 지수(SSF) 관리를 통해 비정형 지형에서의 전복 사고를 예방하였다.
5. 내구성	결과물의 내구성을 고려하였는가?	예	장기 운용 신뢰성을 위해 소재 선정과 최적화에 주력하였다. 반복적인 충격과 하중이 발생하는 로커암과 너클에는 항복

			강도가 우수한 SS400 소재를 적용하였고, 위상 최적화를 통해 응력 집중 부위를 분산시켜 피로 파괴 가능성을 낮췄다. 또한 로커암과 액츄에이터 간의 기구적 연결부에 대한 하중 시뮬레이션을 수행하여, 가혹 지형 반복 주행 시에도 주요 프레임의 강성이 유지되도록 설계하였다.
6. 환경에 미치는 영향	I. 결과물이 기존제품 혹은 방법과 비교하여 환경 친화적인가? II. 환경 개선에 활용될 수 있는가?	예	본 UGV 는 전동식 액츄에이터와 모터를 사용하는 내연기관 프리 (Zero-emission) 시스템으로, 기존 유압식 혹은 엔진 기반 플랫폼 대비 탄소 배출과 소음 공해를 근본적으로 차단하였다. 특히 지상고 제어를 통한 지형 적응력은 불필요한 토크 낭비를 줄여 에너지 효율을 극대화하며, 이러한 고기동 성능은 산불 감시나 오염 지대 정찰 등 환경 보호 및 복원을 위한 임무 수행에 효과적으로 활용될 수 있다.
7. 사회에 미치는 영향	결과물이 사회 계층 간의 갈등을 조장하거나 특정 정치집단의 이해를 반영하지 않는가?	예	본 결과물은 특정 계층의 이익이나 정치적 이해관계를 배제한 순수 공학적 범용 플랫폼으로 설계되었다. 재난 구조, 물자 수송, 위험지 정찰 등 공공의 안전과 복지 향상을 목적으로 하며, 기술의 보편적 가치를 지향한다. 또한 오픈 아키텍처 기반의 Half-Car 검증 데이터를 제공함으로써, 국내 자율주행 모빌리티 생태계의 기술적 격차를 해소하고 공익적 연구 자산으로 활용되는 사회적 선순환을 목표로 한다.

목 차

- 1 서 론(Introduction)
 - 1.1 연구 배경 및 필요성
 - 1.2 연구 목적 및 차별성
 - 1.3 논문의 구성
 - 2 지오메트리 설계 및 이론적 분석(Geometry Design & Theoretical Analysis)
 - 2.1 UGV 시스템 사양 및 목표 설정
 - 2.2 서스펜션 지오메트리 초기 설계
 - 2.3 지상고 가변에 따른 기하학적 돌파 성능 분석
 - 2.4 정적 안정성 분석 및 트레이드오프(Trade-off) 규명
 - 3 CAE 구조 해석 및 형상 최적화(CAE Structural Analysis & Optimization)
 - 3.1 핵심 기구부 하중 조건 설정
 - 3.2 Altair Inspire 위상 최적화 및 형상 개선
 - 3.3 최종 모델 구조 해석 및 안정성 검증
 - 4 제작 및 시험 평가(Manufacturing & Experimental Evaluation)
 - 4.1 부품별 소재 선정 및 주문 제작 공정
 - 4.2 Simscape Multibody 기반 고충실도 동역학 시뮬레이션 모델 구축
 - 4.3 시뮬레이션 동기화 검증 및 Breakover Angle 극복 시뮬레이션
 - 4.4 성능 평가 및 현실적 제한요소 분석
 - 5 결론(Conclusions)
 - 5.1 연구 성과 요약
 - 5.2 향후 연구 과제 및 발전 방향
- 참고문헌

1 서론

1.1 연구배경 및 필요성

최근 무인화, 자율주행 및 로봇 공학 기술이 급격히 발전함에 따라 다양한 산업적, 군사적 임무를 수행하는 무인 지상 차량(UGV, Unmanned Ground Vehicle)의 활용도가 전 세계적으로 증대되고 있다. UGV는 사람이 접근하기 어려운 위험 지역의 정찰, 극한 지형에서의 물자 수송, 재난 구조 현장에서의 인명 검색 등 다목적 임무를 수행하며 그 가치를 입증하고 있다. 특히 대한민국과 같이 산악 임도가 많고 바위, 연석, 요철 등 비정형 노면이 산재한 거친 지형 환경에서는 UGV가 장애물에 걸리지 않고 안정적으로 기동할 수 있는 지형 적응 능력이 시스템의 임무 성공 및 생존성을 결정짓는 핵심 요소로 작용한다.

그러나 기존의 일반적인 차량에 적용되는 수동형(Passive) 서스펜션 시스템은 스프링과 댐퍼의 감쇄 특성이 고정되어 있어, 주행 안정성과 험로 극복 성능이라는 상충된 요구 조건을 동시에 만족할 수 없다는 근본적인 기구학적 한계를 지닌다. 오프로드나 험지 돌파를 위해 지상고(Ride Height)를 항상 높게 유지하도록 설계할 경우, 차량의 무게중심(CG, Center of Gravity)이 상향 이동하여 고속 주행이나 경사로 선회 시 차량이 뒤집히는 횡전복(Rollover) 위험성이 급격히 증가한다. 반대로, 주행 안정성을 위해 지상고를 낮게 고정하면 험지 주행 시 차량의 하부가 높은 요철이나 장애물에 걸려 구동력을 상실하는 '배걸림(Center high-centering)' 현상이 발생하게 된다.

이러한 수동형 시스템의 한계를 극복하기 위해 주행 환경 및 임무 시나리오에 맞추어 차체 높이를 제어하는 지상고 제어(Ground Clearance Control) 시스템에 대한 연구가 강하게 요구되고 있다. 지상고 제어 기능을 탑재한 UGV는 평탄한 노면이나 고속 주행 시에는 지상고를 낮춰 무게중심을 하향함으로써 전복 안정성을 확보하고, 장애물이나 경사가 심한 험지를 돌파할 때는 지상고를 높여 배걸림 현상을 회피할 수 있다. 여기에 개별 바퀴의 조향각을 독자적으로 제어하는 독립 4WS(Four-Wheel Steering) 기술이 결합되면, 극도로 협소한 험지 환경에서도 최소 회전 반경으로 기동하거나 크랩 주행(Crab Steering)을 통해 장애물을 효율적으로 회피할 수 있는 고기동 성능을 확보할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 험지 극복과 주행 안정성이라는 두 가지 목적을 동시에 달성하기 위해, 전동식 액추에이터와 푸시로드(Push-rod) 및 로커암(Rocker-arm) 메커니즘을 연동한 새로운 형태의 지형 적응형 지상고 가변 서스펜션 시스템을 제안하고, 이에 대한 기구학적 설계와 해석 및 실물 검증을 수행하고자 한다. 특히 현재 고가의 외산 부품에 크게 의존하고 있는 기존 액티브 서스펜션 시스템의 한계를 극복하고자 국내 중소기업의 유통 부품 및 일반 제조 공정과 연계하여 향후 실제 양산 및 시제품 제작이 가능한지 그 타진을 위한 Prototype을 설계·제작을 목표로 한다.

1.2 연구 목적 및 차별성

본 연구의 핵심 목적은 전장 1,800 mm, 전폭 1,500 mm, 축거 1,100 mm, 윤거 1,196.8 mm 사양의 소형 다목적 UGV 플랫폼을 대상으로, 다양한 험지 환경에서 차체 자세를 제어하고 조향 성능을 극대화할 수 있는 푸시로드(Push-rod) 및 로커암(Rocker-arm) 기반의 지상고 가변 서스펜션과 독립 4WS 시스템을 개발하고 공학적으로 실증하는 데 있다. 이를 달성하기 위해 기구학적 설계, 유한요소 기반의 구조 해석 및 위상 최적화, 고충실도 동역학 시뮬레이션, 그리고 하드웨어 프로토타입 제작 및 시험 평가로 이어지는 전주기적 엔지니어링 프로세스를 수행하였다. 본 연구가 기존 UGV 플랫폼 개발 연구들과 차별화되는 고유의 학술적·공학적 가치는 다음과 같이 세 가지로 요약된다.

첫째, 지상고 가변에 따른 기하학적 돌과 성능과 차량 정적 안정성 간의 상충 관계(Trade-off)를 수학적·정량적으로 규명하였다. 단순히 지상고를 가변하는 메커니즘의 구현에 그치지 않고, 지상고를 150 mm(Low mode)에서 250 mm(High mode)로 상향함에 따라 램프각(Break-over angle)이 30.5° 에서 48.8° 로 약 60% 향상되는 이점을 도출하는 동시에, 무게중심(CG) 상승으로 인한 종/횡전복각(Pitch-over/Rollover angle)의 감소 한계를 정밀하게 분석하였다. 특히 MATLAB 파라미터 해석을 통해 지상고 약 292.05 mm 지점에서 종전복 한계선(55.94°)과 램프각이 교차하는 차량 고유의 물리적 임계점을 도출해냄으로써, 안전 주행 마진 내에서 지상고 구동 범위(150~250 mm)를 엄격히 통제할 수 있는 설계 근거를 마련하였다.

둘째, 초기 기구학적 지오메트리 설계 단계에서 차량 동역학적 안정성을 극대화하기 위한 정밀 최적화를 선행하였다. 선회 시 조향 선형성을 확보하고 조향 모터의 부하를 최소화하기 위해 킹핀 오프셋을 조절하여 스크립 반경(Scrub Radius)을 2 mm 수준으로 극소화하였다. 또한, 지상고 가변 과정에서 차체 롤링 현상을 효과적으로 억제할 수 있도록 초기 롤 모멘트 암(Roll Moment Arm)을 전폭의 5% 수준인 75 mm로 콤팩트하게 설정하여 하드웨어 설계의 완성도를 높였다.

셋째, 가상 시뮬레이션 모델과 실제 제작된 Half-Car 프로토타입 간의 상호 교차 검증을 수행하였다. 핵심 부품인 너클과 로커암에 대해 가혹한 복합 하중 조건을 인가한 Altair 구조 해석을 수행하여 안전계수 2 이상을 확보하였으며, SS400 판금 레이저 커팅 및 AL6061 CNC 선반 가공을 통해 기성 규격품과 완벽히 호환되는 시제품을 주문 제작하였다. 여기에 실제 모터의 동특성 파라미터를 이식한 Simscape Multibody 동역학 해석 결과를 하드웨어 구동 시험 데이터와 비교·분석함으로써 설계의 신뢰성과 물리적 타당성을 다각도로 검증하였다.

1.3 논문의 구성

본 논문은 총 5개의 장으로 구성되어 있다. 제1장 서론에 이어, 제2장에서는 UGV 플랫폼의 주요 제원 설정과 MATLAB 을 활용한 지상고 가변 성능 및 정적 전복 안정성 사이의 트레이드오프(Trade-off) 기구학 분석을 기술한다. 제 3 장에서는 Altair 를 활용하여 하중이 집중되는 핵심 기구부인 너클과 로커암의 구조 해석 및 위상 최적화 과정을 다룬다. 제 4 장에서는 상세 설계 공차를 반영한 주문 제작 공정 및 Simscape Multibody 를 이용한 가상·실물 통합 시험 평가 결과를 제시하며 성능 한계점을 분석한다. 마지막으로 제 5 장에서는 본 연구의 성과를 요약하고 향후 발전 방향에 대해 논한다.

2 지오메트리 설계 및 이론적 분석

2.1 UGV 시스템 사양 및 목표 설정

본 연구에서 제안하는 지형 적응형 다목적 무인 지상 차량(UGV)은 산악 임도 및 험지 정찰, 물자 수송 등의 임무 시나리오를 전제로 설계되었다. 플랫폼의 전체적인 크기와 중량 사양은 산업체 요구 조건 및 표준 수송 체계와의 상호운용성을 고려하여 콤팩트한 사양으로 정의되었다. 시스템의 주요 기하학적 제원은 Table 2.1 과 같다.

제원 항목 (Specification Items)	설계 사양치 (Design Values)
전장 (Overall Length)	1,800 mm
전폭 (Overall Width)	1,500 mm
축거 (Wheelbase, L)	1,100 mm
윤거 (Track Width, W)	1,196.8 mm
지상고 가변 범위 (Ride Height Range)	150 mm (Low) ~ 250 mm (High)
독립 4WS 최대 조향각 (Max Steering Angle)	$\pm 45^\circ$
차 중량	공차 중량 100 kg+ 탑재 모듈 200 kg
지상고 100mm 조절 시간	10s 이내

Table 2.1 산업체 요구를 충족하는 설계 제원

각 부품에 필요한 하중, 구동력, 구조 조건 등을 이론적으로 계산해 액츄에이터 및 모터의 필요 출력을 계산하였다.

■ 액츄에이터

Fig1 은 지면으로부터 차체의 최대 자중에 의해 지면으로부터 발생하는 수직하중 F_w 에 대해 로커암에 기구적으로 연결되어 있는 쇼크업소버와 액츄에이터는 Fig 2.1 와 같다. 본 UGV 플랫폼은 공차 중량 100 kg 및 상부 탑재 모듈 200 kg 을 포함한 최대 중량 300 kg 을 초기 목표로 설정하였으나, 서스펜션의 경량 운용 시 동적 주행 특성 저하를 방지하기 위해 상충

관계를 가변 고려하여 최대 중량의 70% 수준인 210 kg 을 최종 설계 기준 중량으로 정의하였다. 식 2.1 의 토크 방정식을 통해 정적 상황에서 액추에이터에 필요한 힘을 계산하면 쇼크업소버(F_s)의 각도(θ)에 따른 액추에이터의 힘(F_a)을 계산할 수 있고 Fig 2.2 와 같이 지상고가 High mode(250 mm)일 때 906.25 N 으로 최대 하중이 발생함을 알 수 있다. 이를 바탕으로 동적 상황을 고려해 4000~6000 N 의 힘이 필요할 것으로 판단했다. 이때 동력은 식 2-2,3 과 같이 구할 수 있고 40~60 W 의 출력을 도출했다.

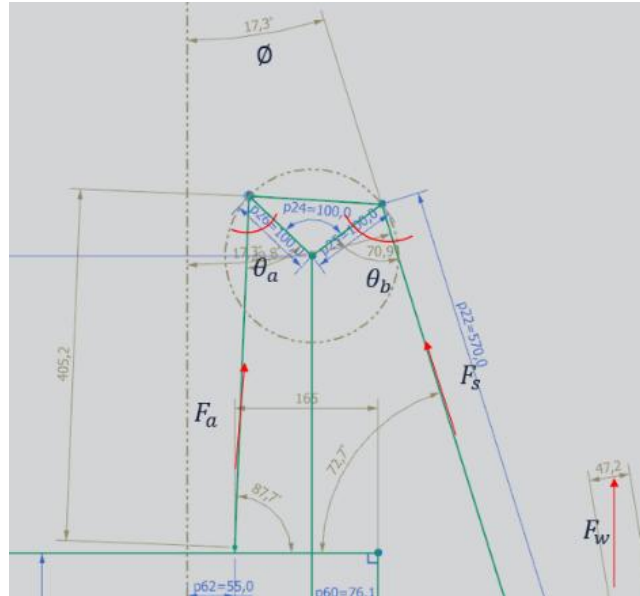


Fig 2.1 액추에이터 필요 토크

$$F_a \times \sin(\theta_a) = F_s \times \sin(\theta_b), \quad F_s = \frac{F_w \times 0.7}{\cos(\theta)} \quad (\text{식 2-1})$$

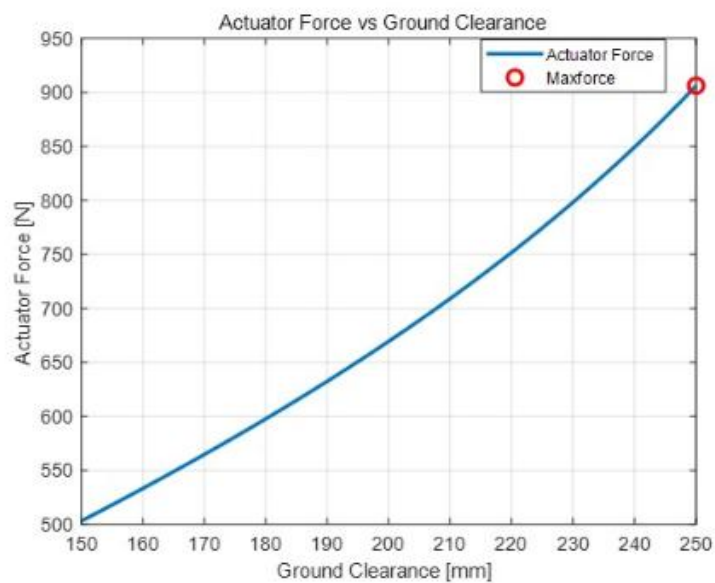


Fig 2.2. 액추에이터 요구되는 힘

$$P = F \times v = 4000 \times 0.01 = 40 \text{ W} \quad (\text{식 2-2})$$

$$v = \frac{\text{거리(m)}}{\text{시간(s)}} = \frac{0.1}{10} = 0.01 \text{ m/s} \quad (\text{식 2-3})$$

■ 조향모터

설계 기준 경사각은 실제 무인 지상차량(UGV)의 등판 성능 및 횡경사 주행 성능 범위를 참고하여 설정하였다. 일반적인 상용 및 군용 UGV의 경우 최대 종경사 주행 가능 범위는 약 31° 수준이며, 최대 횡경사 성능은 약 16.7° ~ 21.8° 범위로 보고되고 있다. 특히 횡경사 조건은 차량의 전복 안정성과 직접적으로 연관되므로, 종경사 조건 대비 보다 보수적인 기준 설정이 요구된다. 이에 따라 본 연구에서는 실제 운용 환경에서의 안정성과 지형 대응 능력을 동시에 고려하여 종경사 30° 및 횡경사 20°를 기본 설계 기준으로 선정하였다. 또한 해당 기준은 향후 액티브 서스펜션 적용 시 차체 자세 제어 성능과 장애물 극복 능력을 평가하기 위한 핵심 설계 조건으로 활용하였다. 설계 기준 경사각은 실제 무인 지상차량의 등판능력 및 횡경사 성능 범위를 참고하여 설정하였다. 상용/군용 UGV의 경우 최대 종경사는 약 31° 수준, 최대 횡경사는 약 16.7° ~ 21.8° 수준이 제시되며, 측경사는 전복 안정성과 직접 연관되어 종경사보다 보수적으로 설정하는 것이 합리적이다. 이에 따라 본 설계에서는 종경사 30, 횡경사 20°를 기본 설계 기준으로 한다. 수직 반력 및 토크를 구하기 위한 설계 변수는 다음과 같다.

차량무게(W):300 kg, 무게중심(h):326.08 mm, 윤거(t):1196.8 mm, 축거(L):1100 mm, 종경사 (θ):30°, 횡경사 (ϕ):20°, 타이어 폭(b):203.2 mm, 스크럽 반경(e):0.002 m, 마찰계수(μ):0.8

$$N_{\text{max,uphill}} = \frac{W}{4} \cos \theta + \frac{Wh}{2L} \sin \theta = 816.06 \text{ N} \quad (\text{식 2-4})$$

$$N_{\text{max,sideslope}} = \frac{W}{4} \cos \phi + \frac{Wh}{2t} \sin \phi = 828.50 \text{ N} \quad (\text{식 2-5})$$

$$T_s = \frac{1}{3} \times \mu \times N_i \times \sqrt{\frac{b^2}{4} + e^2} = 22.45 \text{ N.m} \quad (\text{식 2-6})$$

종경사 시 바퀴 1 개에 작용하는 수직반력은 식 2-4, 횡경사 시 바퀴 1 개에 작용하는 수직반력은 식 2-5 과 같다. 둘 중 더 큰 횡경사 수직반력 828.5 N 과 안전계수 2, 그리고 0~45° 조향을 0.5 s 안에 수행한다고 가정했을 때의 각속도(ω) 1.57 rad/s 를 고려해 필요한 동력을 계산한 것은 식 2-7 에서와 같이 70.49 W 이다. 실제 차량 운용 환경에서는 노면 상태 변화에 따른 마찰력 증가, 링크 및 베어링의 마찰 손실, 조립 오차, 배터리 전압 변동, 급격한 조향 입력에 의한 동적 하중 등 설계 단계에서 정량적으로 반영하기 어려운 요소들이 존재한다. 따라서 이러한 불확실성을 고려하여 산출된 요구 출력에 추가적으로 30%의 설계 여유를 적용하였으며 계산된 요구 출력에 대해 모터가 정격 출력의 70% 이하에서 운용되도록 설계 여유를 적용해 요구 출력을 100.7 W 로 산정하였고 이를 식 2-8 에 나타냈다.

$$P = F \times v = 23.28 \times 2 \times 1.57 = 70.49 \text{ W} \quad (\text{식 2-7})$$

$$P_{allow} = \frac{P}{0.7} = \frac{70.49}{0.7} = 100.70 \text{ W} \quad (\text{식 2-8})$$

■ 구동모터

UGV 플랫폼의 구동 모터 사양을 결정하기 위해 차량 목표 성능인 포장도로 최대 속도 60 km/h 및 비정형 험지 최대 속도 30 km/h($v=8.3 \text{ m/s}$) 그리고 최대 설계 중량 300 kg 조건을 기준으로 주행 저항 해석을 수행하였다. 차량이 극한의 오프로드 환경에서 최대 종경사($\theta = 30^\circ$)의 비탈길을 등판하는 최악 조건을 가정하였으며 차량에 작용하는 총 주행 저항력(F_{total})은 구름저항(F_r), 공기저항(F_c), 경사하중(F_e)의 합으로 식 2-9 과 같이 정의된다.

$$F_{total} = F_r + F_c + F_e \quad (\text{식 2-9})$$

첫째, 비정형 험지 노면 조건을 고려하여 구름저항 계수 $C_r = 0.1$ 을 적용하였으며 이에 따른 구름 저항력은 식 2-10 과 같이 294.3 N 으로 산출되었다. 둘째, 주행 중 공기 밀도와 전면 투영 면적을 고려한 공기 저항력(F_c)는 표준적인 날씨(15°C , 1atm)에서의 공기밀도 $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$, 각진 박스형 외관 형상과 상부 탑재 모듈 및 외부에 노출된 4 른 독립 서스펜션 기구부 주변의 와류 발생 특성을 고려한 항력계수 $C_d = 0.503$, 험지 최고 속도 기준 $v = 8.3 \text{ m/s}$ 을 고려해 식 2-11 과 같이 21.22 N 으로 계산되었다. 셋째, 최대 등판 능력 확보를 위한 경사하중은 식 2-12 과 같이 1471.5 N 으로 도출되었다.

$$F_r = mgC_r = 300 \times 9.81 \times 0.1 = 294.3 \text{ N} \quad (\text{식 2-10})$$

$$F_c = \frac{1}{2} \rho C_d A v^2 = \frac{1}{2} \times 1.225 \times 0.503 \times 8.3^2 = 21.22 \text{ N} \quad (\text{식 2-11})$$

$$F_e = mg \sin \theta = 300 \times 9.81 \times \sin 30^\circ = 1471.5 \text{ N} \quad (\text{식 2-12})$$

이에 따라 UGV 가 험지 경사로를 극복하기 위해 요구되는 총 견인력 F_{total} 은 각 저항력의 합산인 1787.02 N 으로 정의된다. 최종적으로 차량의 주행 동력(P)을 산출하기 위해 총 견인력에 험지 목표 속도 변환 값(8.3 m/s)을 연산하는 동력 방정식을 식 2-13 에 나타내었다. 이를 식 2-14 과 같이 4 른 독립 구동 모터 시스템으로 분배하여 모터 1 기당 최소 3708.1 W 이상의 정격 출력을 만족하는 스펙으로 최종 선정하였다.

$$P = F_{total} \times v = 1787.02 \times 8.3 = 14832.3 \text{ W} \quad (\text{식 2-13})$$

$$P_{solo} = \frac{P}{4} = \frac{14832.3}{4} = 3708.1 \text{ W} \quad (\text{식 2-14})$$

2.2 서스펜션 지오메트리 초기 설계

사용자가 Fig2.3 에 나타낸 UI(User Interface)를 통해 노면 조건에 따라 특정 지상고 모드를 명령하면, 전동식 액추에이터가 선형 변위를 발생시켜 차고를 추종 제어하는 메커니즘을 구현하기 위해 본 연구에서는 레이스카 등에서 고부하 대응력과 기구학적 정밀도가 검증된 푸시로드(Push-rod) 및 로커암(Rocker-arm) 연동형 독립 현가 서스펜션 구조를 설계 도메인으로 채택하였다. UI 기반의 불연속적인 지상고 가변 과정 및 조향 기동 시 발생할 수 있는 구동 부하와 자세 불안정성을 최소화하기 위해, 초기 지오메트리 설계 단계에서 차량 동역학적 파라미터 최적화를 선행하였고 최종 지오메트리는 Fig 2.4 와 같다.

첫째, UI 명령에 의한 조향 메커니즘 구동 시 조향 모터에 인가되는 부하 토크(Steering torque)를 줄이고 정밀한 조향 선형성을 확보하기 위해 타이어 접지면에서의 스크립 반경(Scrub Radius)을 2 mm 로 최소화하였다. 스크립 반경이 과도하게 크게 설계될 경우, 타이어가 제자리 선회할 때 물리적인 회전 중심이 접지면 중심에서 벗어나 킹핀 오프셋에 비례하는 무거운 '스크립 토크'가 발생하게 된다. 이는 결과적으로 UI 조향 명령에 대한 서보 액추에이터의 응답성을 저하시키고 전력 소모를 가중시키는 원인이 되므로, 본 설계에서는 너클과 휠 허브의 기구학적 배치를 정밀 제어하여 타이어 중심선과 킹핀 축선이 노면과 만나는 오프셋 거리를 2 mm 이내로 엄격히 통제하였다.

둘째, UI 조작을 통해 지상고를 가변하는 과정 및 험로 주행 시 발생하기 쉬운 횡방향 자세 불안정성(롤링 현상)을 억제하기 위해 초기 롤 모멘트 암(Roll Moment Arm)의 길이를 차폭의 5% 수준인 75 mm 로 콤팩트하게 설정하였다. 차량 프레임의 기하학적 롤 센터(Roll Center)와 차량 무게중심(CG) 사이의 수직 거리를 뜻하는 롤 모멘트 암은 선회 원심력에 의해 차체가 기울어지는 모멘트 크기와 직결된다. 이 암의 길이가 길어질수록 서스펜션에 부과되는 복원력 부하가 커지며 급격한 롤링 거동을 유발하므로, 초기 설계 단계에서 기구학적 링크 중심점들을 최적 배치하여 안정적인 롤 강성(Roll stiffness) 마진을 확보하였다.

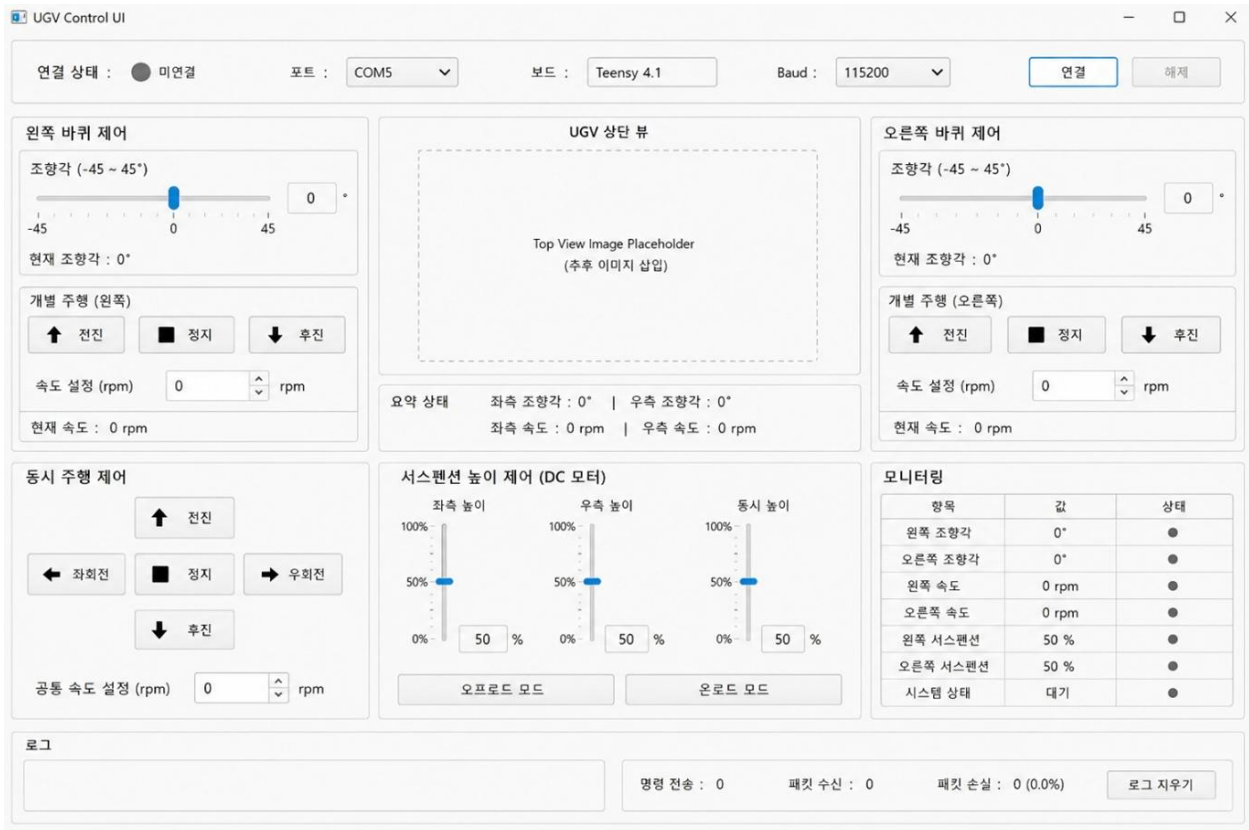


Fig2.3 UGV Control UI(User Interface)

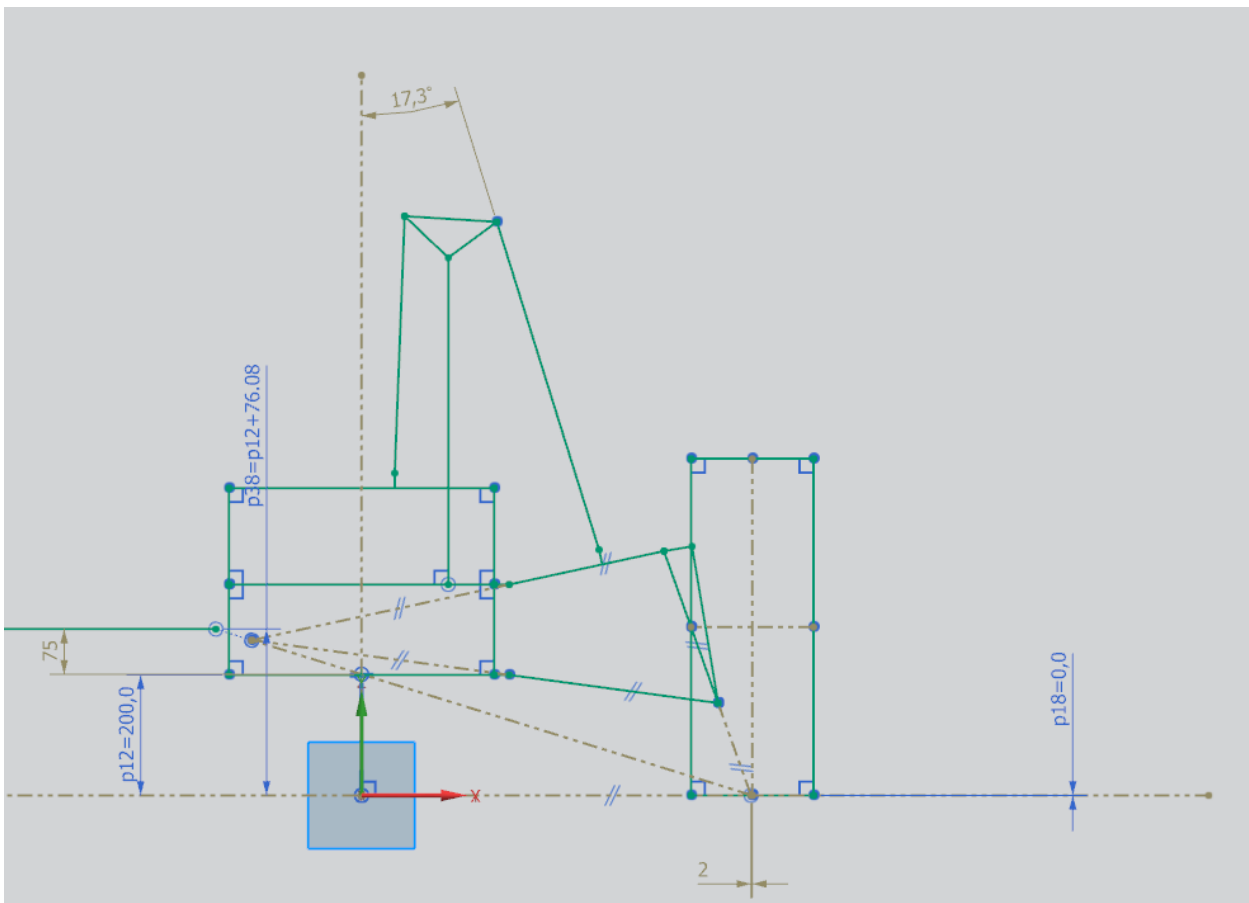


Fig 2.4 지오메트리 설계

2.3 지상고 가변에 따른 기하학적 돌파 성능 분석

본 연구에서 제안하는 지상고 가변 서스펜션 시스템은 자동 제어 방식의 하드웨어 복잡성을 배정하고, 운전자가 UI(User Interface)를 통해 현재 노면 상황에 적합한 목표 지상고 모드를 명령하면 구동 액추에이터가 이를 정확히 추종하여 차고를 변위시키는 구동 제어 구조를 취한다. 차량의 축거($L=1,100$ mm)와 윤거($W=1,196.8$ mm)를 기준으로, UI 상에서 설정 가능한 지상고 제어 모드별 기하학적 험로 돌파 성능 변동 수치를 정량적으로 산출하였다. 차량 하부 프레임이 바위나 언덕 등 돌출된 장애물을 통과할 때 발생하는 '배걸림(Center high-centering)' 현상을 회피하기 위한 핵심 기하학적 지표인 램프각(Break-over angle)과 접근각(Approach angle)을 기준으로 모드별 성능을 대조 분석하였다.

첫째, Fig2.5 와 같이 평탄 노면 및 고속 주행을 위한 Low mode(지상고 150 mm) 설정 시, UGV 의 램프각은 30.5° 로 산출되었다. 이는 일반적인 도심형 차량의 주행 안정성을 확보하기에 적합한 지오메트리 수치이다.

둘째, 암반 지형이나 급격한 요철이 존재하는 산악 임도 환경을 위해 UI 명령을 통해 High mode(지상고 250 mm)로 차고를 상승시켰을 때의 지오메트리 변화를 Fig2.6 에 나타냈다. 램프각은 48.8° 로 측정되어 Low mode 대비 약 60%의 획기적인 기하학적 성능 향상을 달성하였다. 이때의 접근각(Approach angle) 역시 38.4° 로 확장되어, 일반적인 양산형 오프로드 SUV 차량의 한계 제원을 크게 상회하는 독보적인 진입 능력을 확보할 수 있음을 이론적으로 입증하였다.

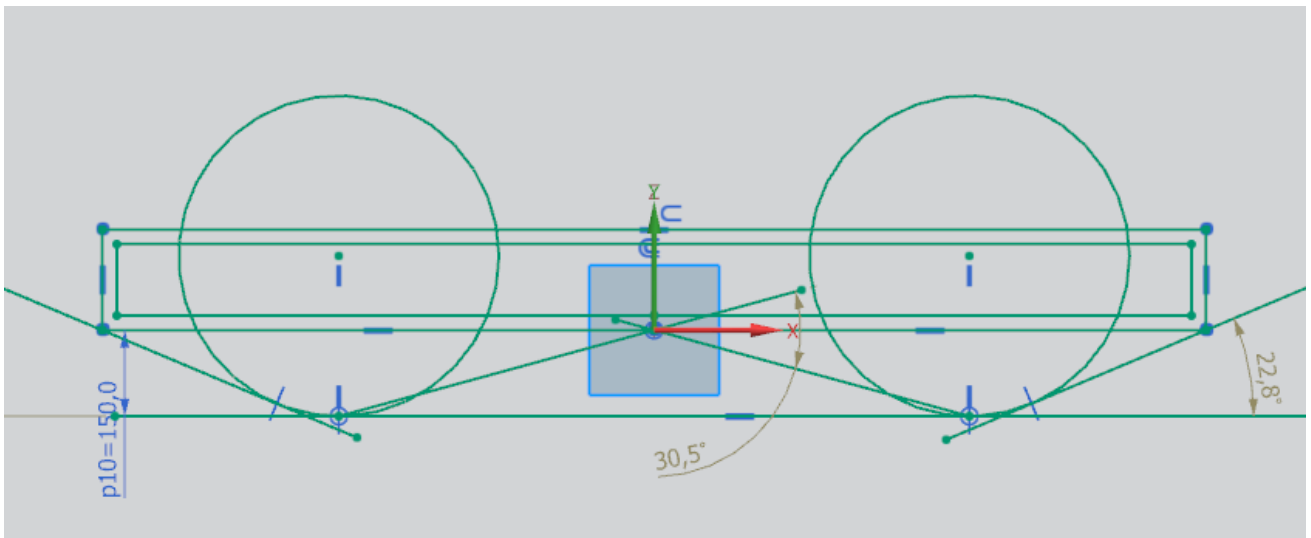


Fig2.5 Low mode(지상고 150 mm) 램프각, 접근각

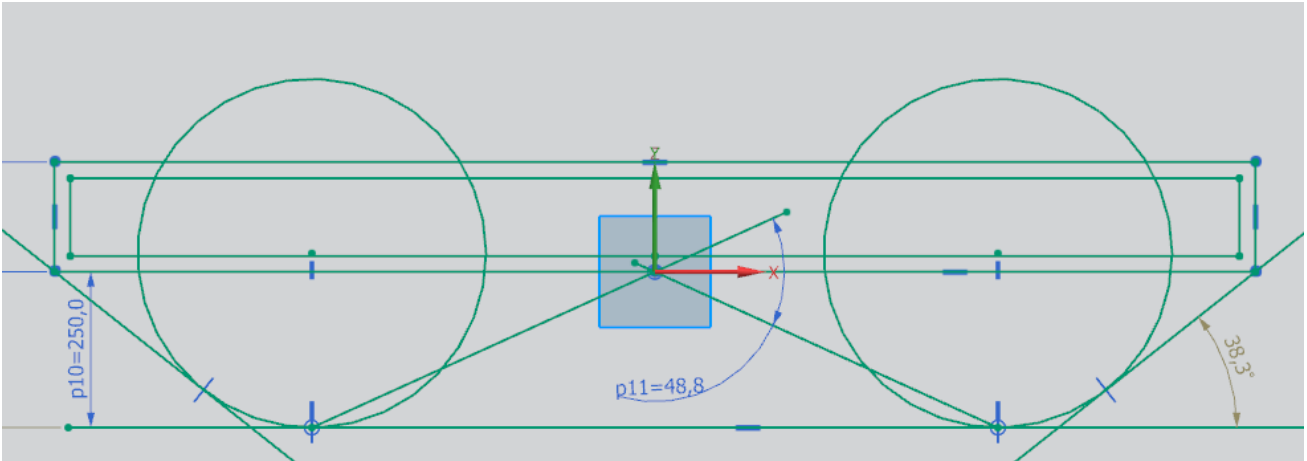


Fig2.6 High mode(지상고 250 mm) 램프각, 접근각

2.4 정적 안정성 분석 및 트레이드오프(Trade-off) 규명

사용자의 UI 조작을 통해 지상고를 가변하는 시스템은 차량 하부와 지면 사이의 기하학적 여유를 극대화하여 험지 극복 능력을 비약적으로 향상시키지만 차고 상승에 따른 무게중심(CG, Center of Gravity)의 상향 이동으로 인해 차량의 정적 안정성이 필연적으로 저하되는 명확한 상충 관계(Trade-off)를 형성한다. 본 절에서는 차량의 축거(Wheelbase, $L=1,100$ mm)와 윤거(Track width, $W=1,196.8$ mm) 제원을 기반으로 MATLAB 환경에서 정적 안정성 해석을 수행하여 지상고 변위에 따른 종전복각(Pitchover angle) 및 횡전복각(Rollover angle)의 정량적 한계선 변화 추이를 규명하였다.

차량의 지상고를 Low mode(150 mm)에서 High mode(250 mm)로 상향함에 따라 오프로드 돌과 성능의 핵심 지표인 램프각(Breakover angle)은 기존 30.5° 에서 48.8° 로 약 60%가량 향상되는 결과가 도출되었다. 이와 동시에 접근각(Approach angle) 역시 22.8° 에서 38.4° 수준으로 확장되어 종경사나 암반 지형 통과 시 차량 하부 프레임이 중심 요철에 걸리는 '배걸림(Center high-centering)' 현상을 효과적으로 회피할 수 있음을 확인하였다. 그러나 지상고가 가변하여 높아질수록 질량 중심 고도가 수직 상승하게 되며 이는 경사로나 비탈길 주행 시 전복을 유도하는 중력 모멘트 암을 확장시키고 복원력 모멘트 암을 감소시켜 전복 임계각도를 선형적으로 떨어뜨리는 경향을 나타낸다. MATLAB 파라미터 해석을 통해 기하학적 돌과 성능 성능과 정적 안정성 한계선이 교차하는 명확한 물리적 임계점(Critical Point)을 다음과 같이 두 가지로 도출하였다.

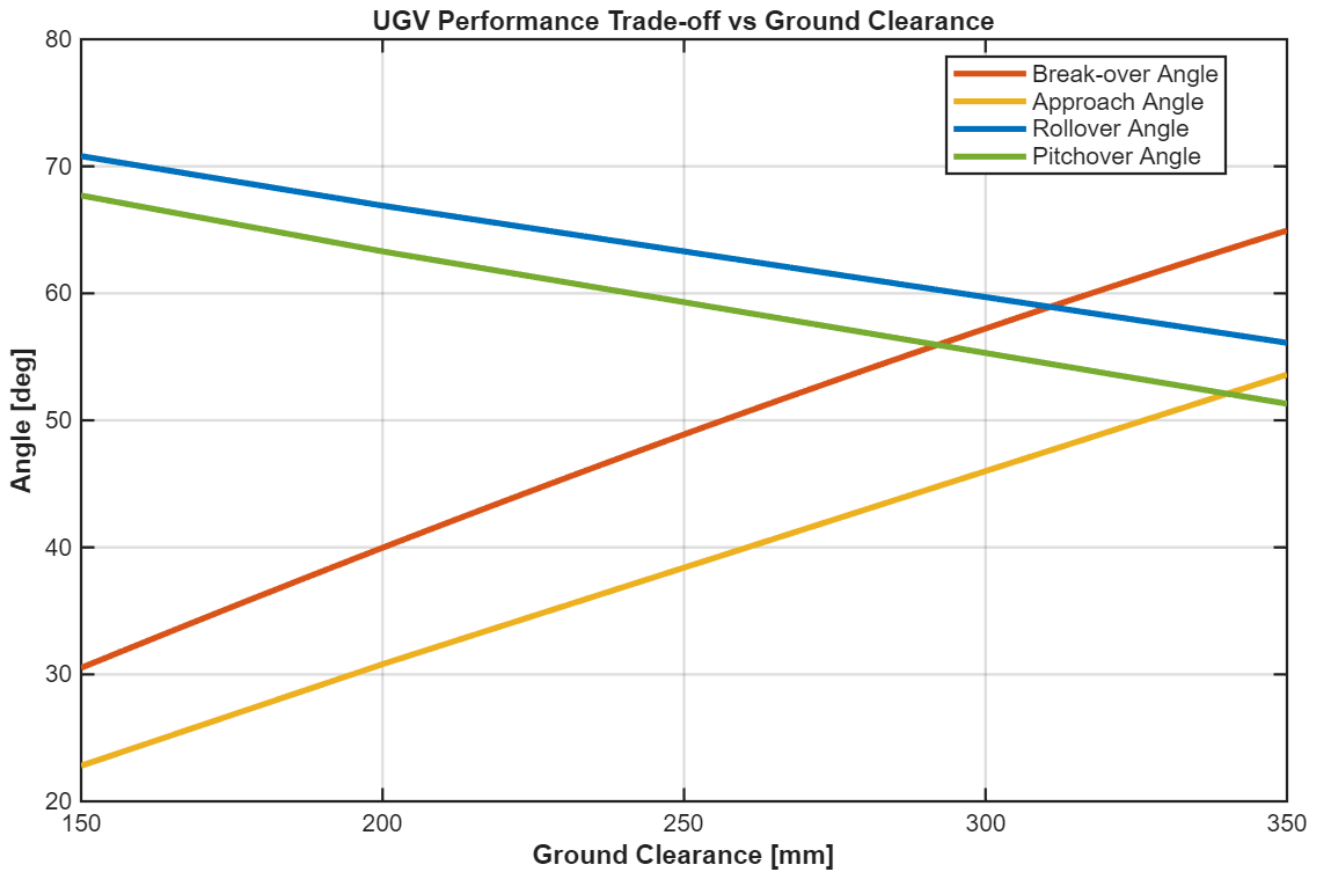


Fig2.7 Breakover Angle, Approach Angle 과 Rollover Angle, Pitchover Angle 의 Trade-off

Fig 2.7은 램프각(Breakover Angle), 접근각(Approach Angle)과 횡전복각(Rollover Angle), 종전복각(Pitchover Angle)의 Trade-off 관계를 나타낸 것이다. 구체적인 설계 지오메트리 분석 결과, 지상고가 Low Mode(150 mm)에서 Middle Mode(200mm), High Mode(250 mm)로 높아짐에 따라 하부 간섭과 관련된 램프각은 30.5°에서 각각 40.0°, 48.8°로 증가하고 접근각 또한 22.8°에서 30.8°, 38.4°로 선형적으로 증가함을 확인하였다. 반면, 차체 무게중심(CG) 상승으로 인해 자세 안정성을 나타내는 횡전복각은 70.8°에서 66.9°, 63.3°(High Mode 기준)로 감소하며, 종전복각 역시 67.7°에서 63.3°, 59.3°로 감소하는 상충 관계를 보였다.

이러한 특성을 바탕으로 플랫폼의 정적 한계 제원을 정량적으로 분석하고자 축거(L) 1,100 mm, 윤거(t) 1,198.6 mm 사양을 기준으로 MATLAB을 이용한 수치 해석을 수행하였다. 특히 실제 서스펜션 기구학 및 무게중심 변동 특성이 반영된 설계 데이터를 정밀하게 추적하고자, Low/Middle/High Mode의 실측 노드 포인트를 기준으로 지상고(h) 범위를 150 mm부터 350 mm 까지 200 개의 격자 구간으로 분할(linspace(150, 350, 200))한 뒤 선형 보간 및 외삽법(interp1, extrapol)을 적용하여 각 제원의 물리적 경향성을 수학적으로 추적하고 그래프의 교차점을 도출하였다.

분석 결과, 지상고를 확장하여 310.72 mm에 이르면 횡방향 안전 한계 기준선인 횡전복각 그래프와 기하학적 돌파 성능을 나타내는 램프각 그래프가 58.93°의 값으로 교차하는 시스템 한계선이 규정된다. 마찬가지로 차량의 지상고가 292.05 mm에 도달하는 시점에서 종방향 안전 한계 기준선인 종전복각 그래프와 램프각 그래프가 55.94°의 값으로 일치하며 교차하는 임계점이 형성된다. 이러한 수치 해석 결과는 지상고를 기구학적 임계점인 292.05 mm 이상으로 과도하게 설정할 경우, 하부 간섭 회피로 얻는 기하학적 이점보다 무게중심 상승에

따라서 본 연구에서는 상충하는 두 지표 사이의 최적화된 설계 마진을 확보하고 시스템 안정성을 결속하기 위해 정적 전복 한계 최하 한계선인 중방향 임계점(292.05 mm)으로부터 충분한 안전 마진을 부여했다. 이를 기반으로 UI 제어 시스템 상의 최대 가변 범위를 250 mm 로 제어하도록 설계하였다. 이론적 전복 한계가 High Mode 기준 63.3°(횡전복) 및 59.3°(종전복) 이상으로 산출되었음에도 불구하고, 실제 험지 노면의 마찰계수(0.5~0.7) 및 주행 중 발생하는 동적 하중 이동을 고려한 실질적 주행 한계 경사는 약 25° 수준으로 설정하는 것이 타당하다.

본 연구에서 도출한 UGV 플랫폼의 기구학적·동역학적 설계 사양이 실제 군용 차량의 운용 환경을 만족하는지 검증하기 위해 국방과학연구소(ADD) 기동시험장 및 야전 시험평가 지역(비포장도로)의 실측 지형 데이터와 상호 대조 분석을 수행하였다. 식2-14는 경사도를 각도로 변환하는 식이며 Table2.2에 국방 표준 기동시험장 및 야전 비포장로 제원을 나타냈다.

$$\text{각도(deg)} = \tan^{-1} \left(\frac{\text{경사도(\%)}}{100} \right) \quad (\text{식 2-15})$$

주행로 구분 (Terrain Type)	세부 시험 지역 (Location)	최대/최소 고도 (고도차)	최대 경사도(%) / 각도(deg)
국방과학연구소 기동시험장	비포장 도로	146 / 95 m (51 m)	28.6 / 16.0
	야지(Cross-Country)	168 / 113 m (55 m)	32.4 / 18.0
	G1 지역	155 / 96 m (59 m)	17.5 / 9.9
	G2 지역	183 / 96 m (87 m)	22.7 / 12.8
	G3 지역	176 / 97 m (79 m)	28.5 / 15.9
	G4 지역	187 / 96 m (91 m)	32.5 / 18.0
야전 시험평가 지역 (비포장)	F 지역	470 / 104 m (366 m)	38.9 / 21.3
	I 지역-1	1085 / 526 m (559 m)	33.5 / 18.5

Table2.2 국방 표준 기동시험장 및 야전 비포장로 제원과 UGV 설계 사양 비교 (단위 수정본)

첫째, 구동 모터 용량 산정 시 최악 조건으로 가정한 최대 주행 경사각 30° 조건은 실측 대상 지형 중 가장 가혹한 종경사를 가진 야전 시험평가 F 지역의 최대 경사각 21.3° (경사도 38.9%)와 국방과학연구소 기동시험장의 최대 험지인 G4 지역의 경사각 18° (경사도 32.5%)를 모두 여유롭게 상회하는 보수적인 설계 수치임을 확인하였다. 비포장 흙·자갈 노면의 가혹한 환경적 외란을 고려하여 구름저항 계수를 최악 조건인 강한 험지

기준($\mu_r = 0.1$)으로 설정하고 모터 1 기당 3708.1 W의 출력을 확보하였기 때문에 종방향 고도 상승 구간(야지 및 G1~G4 시험로) 전 구간에서 휠 슬립(Slip)을 효과적으로 억제하며 안정적인 기동 및 등판 성능을 발휘할 수 있다.

둘째, UI 제어를 통해 구현된 High mode(지상고 250 mm)에서의 기하학적 험로 극복 능력을 평가한 결과, 실제 험지 노면의 마찰계수(0.5~0.7) 및 동적 하중 이동을 고려한 실질적 주행 한계 경사(25°)와 대조 시 약 2.4 배의 충분한 정적 전복 안전율(Safety Factor)을 확보하게 된다. 특히 오르막과 내리막이 종방향으로 급격하게 교차하여 합산 경사가 발생하는 야전 시험평가 I 지역-1(최대 경사도 33.5%, 각도 18°) 등의 복합 능선 구간을 통과할 때도 본 UGV의 48.8° 램프각(경사각 약 24.4°)은 지형 요구 경사각인 21.3° 대비 약 +14.6% 수준의 명확한 기하학적 마진을 보유하게 되므로 차체 하부 프레임이 단차에 걸리는 배걸림 현상을 회피할 수 있다.

셋째, 대상 지형의 모든 노면 중경사 각도가 본 UGV의 실질적 주행 한계 경사인 25° 이내에 포함되므로 수치 해석상 국과연 기동시험장(비포장, 야지, G1~G4) 및 야전 비포장 전 지역에 대한 안정적인 정적 주행이 가능하다는 결론을 도출하였다. 다만 고도차가 급격히 변하는 비포장 지형 특성상 발생하는 불규칙한 요철 외란과 고주파 진동에 대응하기 위해 상위 UI 제어 시스템을 통한 지상고 변위 제한을 유지하는 동시에 4WS 독립 조향 시스템을 적절히 연동하여 선회 반경을 최소화하는 하이브리드 기동 전략을 수립함으로써 야전 운용 신뢰성을 향상시킬 수 있다.

3 CAE 구조 해석 및 위상 최적화

본 연구에서는 차량 현가장치의 핵심 부품인 너클(Knuckle)과 로커암(Rocker Arm)의 경량화를 위해 Altair Inspire 를 활용한 구조 해석 및 위상 최적화를 수행하였다. 초기 설계 모델에 대해 구조 해석과 위상 최적화를 수행하여 하중 전달 경로 및 응력 집중 구간을 분석하였으며, 이를 기반으로 구조적으로 불필요한 영역을 제거하였다. 이후 위상 최적화 결과를 참고하여 실제 제작이 가능한 형상으로 재모델링을 진행하였다. 또한 수정된 모델에 대해 반복적인 구조 해석 및 위상 최적화를 수행함으로써 질량 감소와 구조 강성을 동시에 만족하는 형상을 도출하였다. 최종적으로 완성된 모델에 대해 구조 안정성 검증을 수행하여 충분한 안전계수를 확보하였다.

3.1 핵심 기구부 하중 조건 설정

위상최적화 및 구조 해석은 Altair Inspire 환경에서 수행하였으며, 실제 차량 주행 시 발생 가능한 하중 조건과 부품의 운동 특성을 고려하여 경계조건을 설정하였다. 너클 초기 모델은 2.2 서스펜션 지오메트리 설계에서 설계한 현가장치 형상을 기반으로 제작하였다. 어퍼암 체결 포인트 로어암 체결 포인트 및 허브 베어링 체결 포인트의 위치를 먼저 고정한 후 이를 연결하는 가장 기본적인 형상으로 초기 모델링을 진행하였다. 이후 해당 모델을 기반으로 위상 최적화를 수행하며 형상을 개선하였다. 초기 형상은 Fig3.1 과 같다.

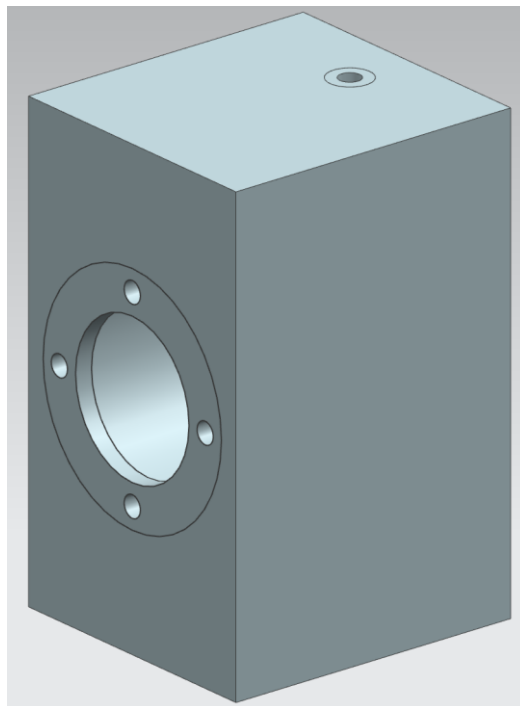


Fig3.1 형상 최적화 전 너클 형상

너클의 구속조건은 실제 차량 조립 상태와 유사하도록 설정하였다. 허브 베어링 체결부는 타이어나 직접 연결되어있는 허브랑 연결되기 때문에 하중이 발생하는 곳이다. 위상최적화 수행 시 계산된 정하중만 적용할 경우 응력 수준이 낮아 형상 변화가 충분히 나타나지 않았다. 따라서 구조물의 취약부를 보다 명확하게 도출하고 설계 여유도를 확보하기 위해 정하중보다 큰 보수적 설계하중인 10 kN 을 적용하여 수행하였다. 해당 하중은 실제 운용하중을 직접 의미하는 것이 아닌 위상최적화 과정에서 응력 분포를 명확히 확인하기 위한 설계하중으로 사용하였다. 또한 하중을 단계적으로 증가시키며 검토한 결과 10 kN 수준에서 위상최적화 형상 변화가 명확하게 도출되어 최종 위상최적화 설계 하중으로 선정하였고 Fig3.2 와 같이 4 개의 휠 체결 포인트에 각각 2.5 kN 씩 45° 각도로 적용하였다. Fig3.3 어퍼암 체결부(너클 상부)는 서스펜션 운동 특성을 반영하기 위해 회전 자유도만 허용하였으며 Fig3.4 로어암 체결부(너클 하부)는 회전 및 상하 방향 운동이 가능하도록 설정하였다.

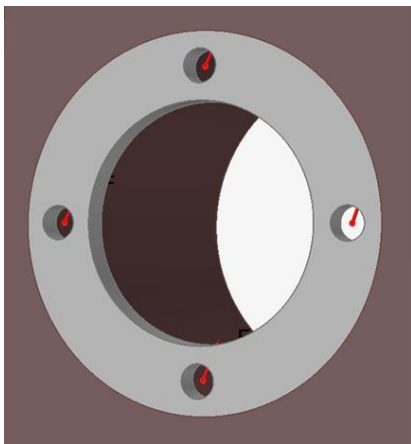


Fig3.2 약 10 kN 의 복합하중

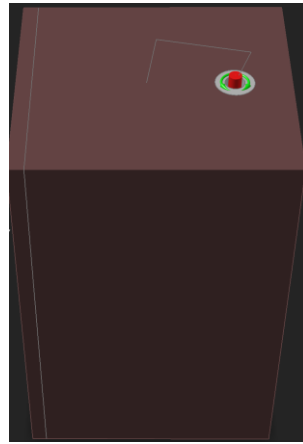


Fig3.3 너클 상부 구속

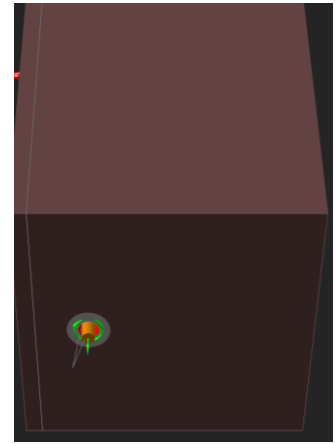


Fig3.4 너클 하부 구속

로커암 초기 형상(Fig3.5) 또한 서스펜션 연결 구조를 기반으로 가장 기본적인 형상으로 모델링하였다. 이후 구조 해석과 위상 최적화를 반복 수행하며 경량화 및 강성 확보를 동시에 만족하도록 형상을 개선하였다. 위상최적화에서 로커암의 구속조건(Fig3.6)은 롤케이지 체결부, 액추에이터 연결부, 서스펜션 연결부 모두 회전 자유도만 허용하도록 설정하였으며 서스펜션 연결부에는 너클과 마찬가지로 응력 분포를 명확히 확인하기 위해 45° 각도로 한 쪽 구멍 당 5 kN 씩 총 10 kN 의 하중을 적용하였다.

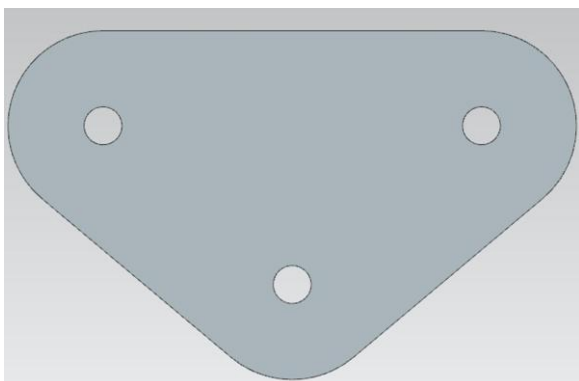


Fig3.5 로커암 초기 모델

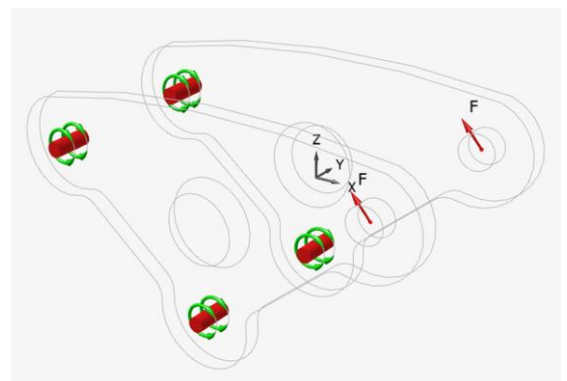


Fig3.6 로커암 구조해석 경계조건

식 3-1 은 정하중으로 차량의 최대하중 300 kg 에 대한 하중을 4 개의 바퀴로 나누어 주었다. 실제 주행 환경에서는 노면 충격, 점프 착지, 코너링 및 제동 하중 등이 동시에 발생하므로 이를 고려한 동하중 계수를 적용하였다. 오프로드 차량 특성상 순간적인 충격 하중이 크게 작용할 수 있으므로 식 3-2 와 같이 약 3 배의 충격 계수를 반영하여 복합하중 조건을 설정하였고 Fig3.2 와 같다.

$$F = \frac{300 \times 9.81}{4} = 735.75 \text{ N} \quad (\text{식3-1})$$

$$F_{dynamic} = 735.75 \times 3 = 2207.25 \text{ N} \quad (\text{식3-2})$$

이를 통해 너클과 로커암은 복합하중을 적용하여 2207.25 N 의 하중 조건과 위상 최적화에서와 동일한 구속 조건으로 구조해석을 진행하였다. 또한 해석에 사용된 재료는 실제 제작을 고려하여 SS400 구조용 강재로 설정하였다. SS400 은 충분한 강도와 우수한 용접성을 가지며 시중에서 쉽게 구할 수 있어 제작성과 경제성을 동시에 확보할 수 있다는 장점이 있다.

3.2 Altair inspire 위상 최적화 및 형상 개선

3.1 절에서 설정한 경계조건과 하중 조건을 기반으로 Altair Inspire 의 Topology Optimization 기능을 활용하여 위상 최적화를 수행하였다. 위상 최적화 과정에서는 구조 강성을 유지하면서 하중 전달에 크게 기여하지 않는 영역의 재료를 제거하여 경량화를 유도하였다. Fig3.7/Fig3.8 에서 너클의 경우 초기 모델에 대해 위상 최적화를 수행한 결과 허브 베어링 체결부와 암 체결포인트를 중심으로 그 주변 재료가 유지되는 경향을 확인할 수 있었다. 반면 응력이 상대적으로 낮은 영역에서는 재료 제거가 이루어졌으며, 이를 통해 구조적으로 불필요한 부분을 확인할 수 있었다.

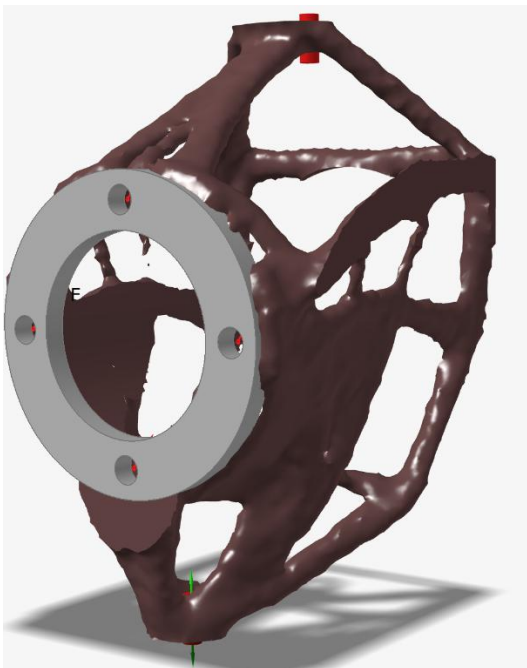


Fig3.7 너클 위상 최적화 Isometric View

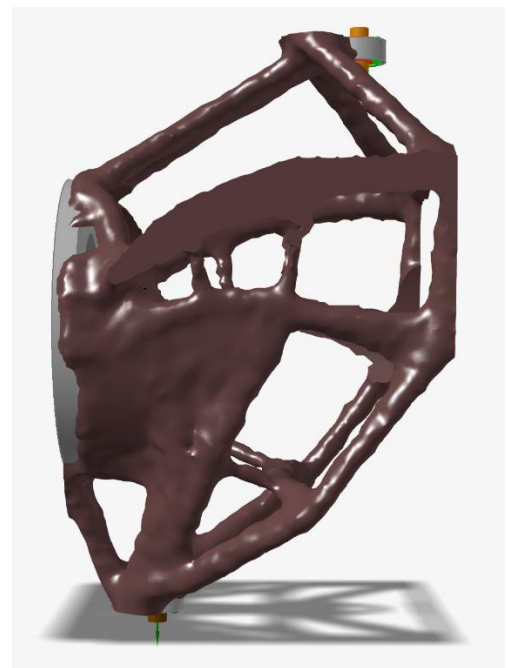


Fig3.8 너클 위상 최적화 Side View

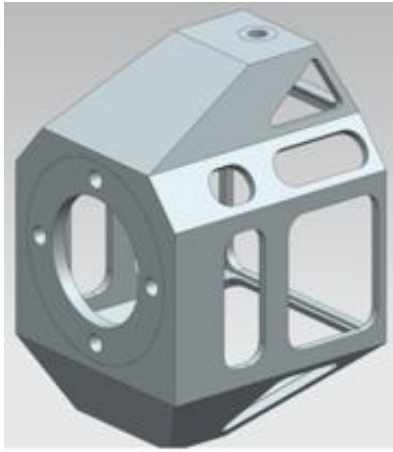


Fig3.9 너클 1

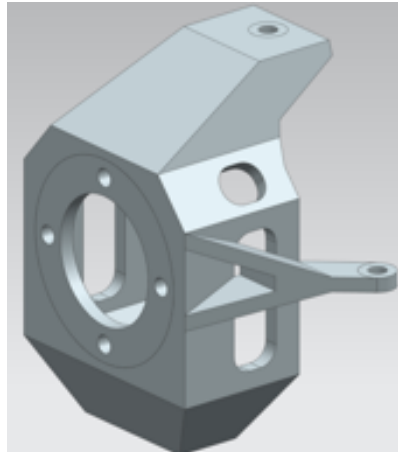


Fig3.10 너클 2

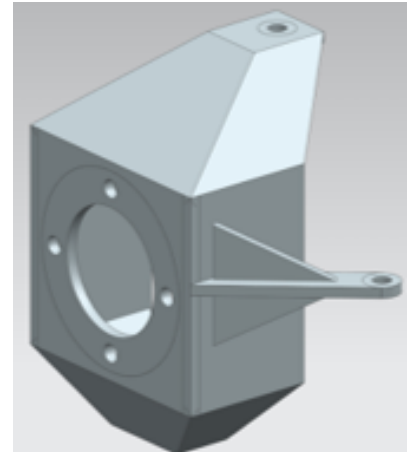


Fig3.11 최종 너클

단순히 위상 최적화 결과를 한 번 반영하는 것이 아니라, 수정 모델에 대해 다시 위상 최적화를 수행하고 이를 기반으로 재모델링하는 과정을 반복적으로 수행하였다. 이를 통해 불필요한 재료를 점진적으로 제거하면서도 구조 강성과 경량성을 동시에 만족할 수 있도록 너클 1에서 너클 2로 형상을 개선하였다. Fig3.10의 너클 2는 구조적으로 우수하였으나 형상이 지나치게 복잡하여 실제 가공 및 제작이 어려운 문제가 있었다. 이에 따라 제작 가능성을 외주 가공 업체와 협의를 진행하였으며 가공 공정과 공구 접근성, 체결 구조 등을 고려하여 판재 두께는 6 mm로 통일하며 제작 가능한 형상으로 설계를 수정하였다. 그 결과 최종적으로 Fig3.11과 같은 형상이 도출되었다. 반복 설계 과정 이후 최종적으로 도출된 형상은 초기 모델 대비 경량화가 이루어졌으며, 실제 제작이 가능한 구조를 가지도록 개선되었다.

로커암 또한 하중 전달 경로를 중심으로 재료가 유지되었으며, 연결부 사이의 하중 전달 방향에 따라 구조 형상이 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 강성을 유지하면서도 질량을 감소시킬 수 있는 형상을 도출하였다. Fig3.12는 체결부를 따로 나누지 않고 위상최적화를 진행한 형상이며 Fig3.13은 위상최적화를 바탕으로 체결부를 확보한 뒤에 재차 위상 최적화를 진행한 결과이다.



Fig3.12 로커암 위상 최적화

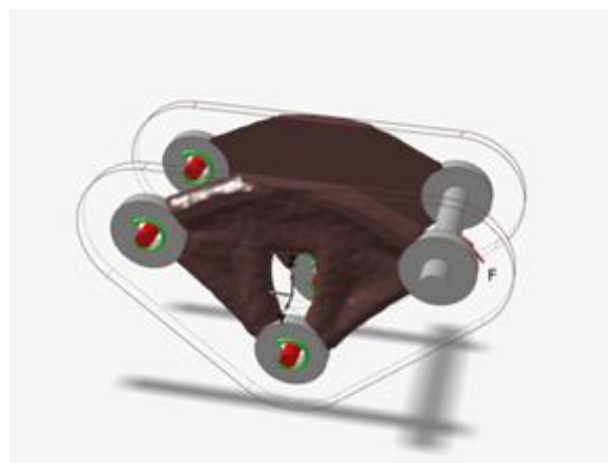


Fig3.13 로커암 위상최적화(체결부 확보)

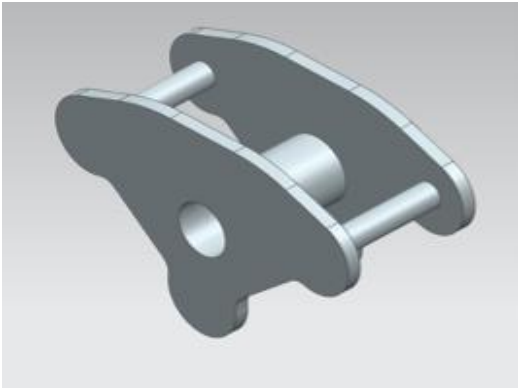


Fig3.14 최종 로커암 Isomertic View



Fig3.15 최종 로커암 Side View

너클과 마찬가지로 반복적인 위상 최적화 및 형상 개선 과정을 통해 도출된 최종 모델에 대해 구조 해석을 재수행하여 구조 안정성을 검증하여 최종 로커암 형상을 모델링 하였다. 해석은 Altair Inspire 환경에서 수행하였으며 초기 모델과 동일한 하중 및 경계조건을 적용하여 비교 분석을 진행하였다.

3.3 최종 모델 구조 해석 및 안정성 검증

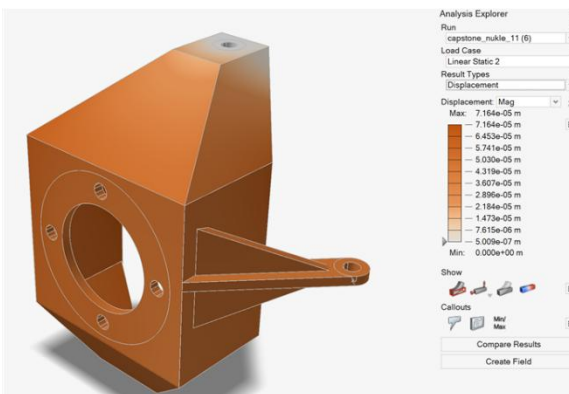


Fig3.16 너클 변형

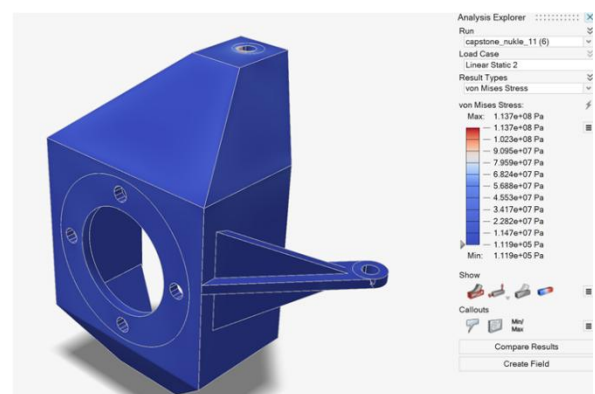


Fig3.17 너클 von Mises

Fig16, Fig17 은 3.1 절의 3 배의 충격 계수를 반영한 복합하중 2207.25 N 발생시 나타나는 변위와 Von-Misses 응력을 표시한 결과이다. SS400 의 항복강도는 245 MPa 로 해석 결과 너클은 113.7MPa 로 2.15 이상의 안전계수를 확보하고 있음을 볼 수 있다.

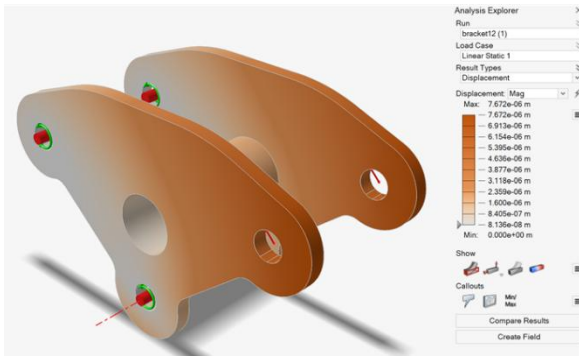


Fig3.18 로커암 변형

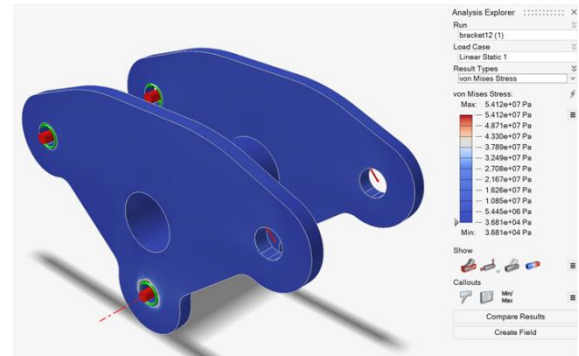


Fig3.19 로커암 von Mises

Fig18, Fig3.19 에서 로커암은 로커암은 54.12 MPa 의 최대 응력이 발생하며 4.5 이상의 안전계수를 확보하고 있음을 보여준다. 위 결과를 바탕으로 설계된 너클과 로커암은 강건성 측면에서 보수적인 강성을 확보하고 있으며 더 높은 하중 조건에서도 안정적인 구조 성능을 가질 것으로 판단된다.

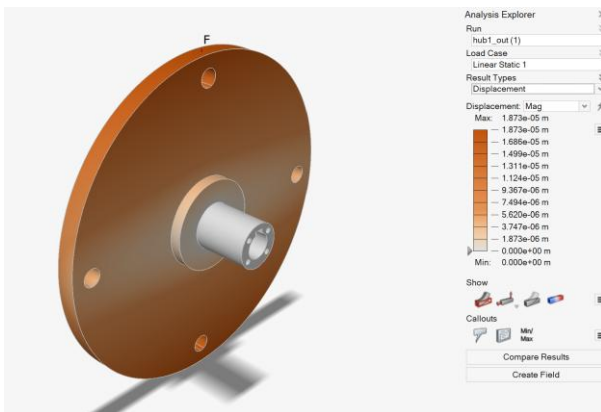


Fig20 Hub Out 변형

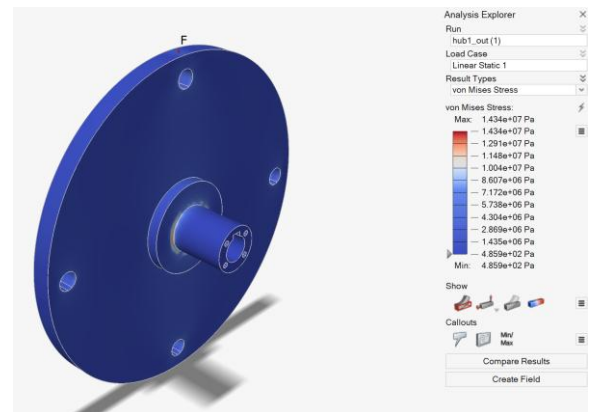


Fig21 Hub Out von Mises

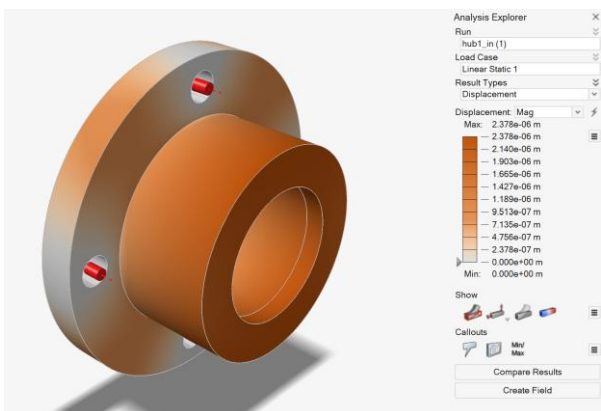


Fig22 Hub In 변형

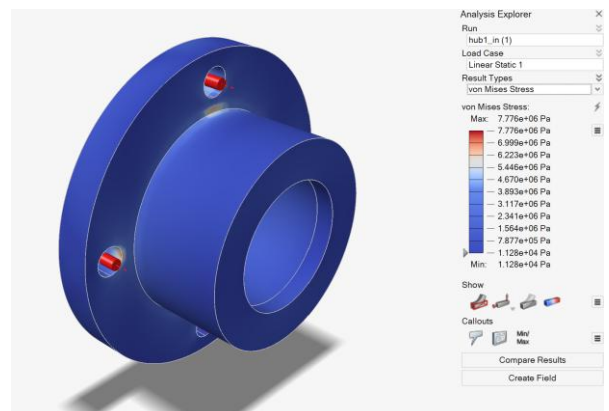


Fig23 Hub In von Mises

허브는 차량의 비현가 질량(Unsprung Mass)을 구성하는 핵심 부품으로, 동적 응답성과 주행 성능을 결정짓는 핵심 인자이므로 설계 시 경량화가 요구된다. 본 연구에서는 중량 저감 및 관성 모멘트 최소화를 목적으로 비강도가 우수한 알루미늄 합금(Al6061-T6, 항복강도 276 MPa)을 적용하였다. 허브 모듈은 구동 모터, 베어링 및 너클(Knuckle) 등 주변 구성품과의 물리적 간섭과 동력 전달 경로를 고려해야 하므로 기하학적 형상 제약 조건을 반영하여 UGV 인허브(In-hub) 모터 구동계 구조에 최적화된 형태로 설계하였다.

Hub Out 파트(Fig21)의 해석을 위해 내측 베어링 하우징 축 접촉면을 완전 고정(Fixed) 조건으로 구속하였다. 하중 조건으로는 휠 체결용 4 개 볼트 홀에 총 차량 동적 하중을 모사한 복합 하중 2207.25 N을 균등 분배하여 Z축 방향으로 인가하였다. 유한요소해석 결과 최대 von Mises 응력은 축 단차부의 응력 집중 구간에서 14.3 MPa 로 관측되었다. 이는 Al6061-T6 의 항복강도(276 MPa) 대비 약 19.3 의 매우 높은 안전율을 확보한 수치로, 극한 하중 상태에서도 구조적 건전성이 완전히 보장됨을 확인하였다.

Hub In 파트(Fig23)의 해석에서는 너클과 체결되는 4 개의 볼트 결합부를 고정 경계조건으로 설정하였다. 하중은 내부 베어링 레이스로부터 전달되는 복합 하중 2207.25 N 을 Z 축 방향의 등분포 압력 형태로 변환하여 부여하였다. 해석 결과 최대 von Mises 응력은 볼트 체결공 부근에서 7.78 MPa 로 나타났으며 이는 재료의 허용 응력 한도 내에 충분히 안착하는 수준이다. 결과적으로 Hub In/Out 모듈 모두 알루미늄 합금 적용을 통한 경량화를 달성함과 동시에 외부 입력 하중 및 모터 구동 토크 반력 하에서도 항복 강도 대비 충분한 안전 마진을 확보함으로써 동적 내구 신뢰성을 입증하였다. 다만, 이처럼 높은 안전율에도 불구하고 주변 구성품과의 조립을 위한 단차 유지, 엔드밀 공구의 진입 반경 확보, 그리고 절삭 가공 시 파손을 방지하기 위한 최소 살두께 제한 등 구조적 가공 제약 조건을 고려하여 현재의 형상을 최종 확정하였다. 다음 Table 3.1 에 부품별 von Mises, 항복강도, 안전계수를 나타냈다.

구분	Von Mises(MPa)	항복강도(MPa)	안전계수(SF)
너클(Knuckle)	113.7	245.0	2.15
로커암(Rocker-arm)	54.12	245.0	4.50
Hub Out	14.3	276	19.3
Hub In	7.78	276	35.5

Table 3.1 부품별 해석 결과

4 제작 및 시험 평가

4.1 부품별 소재 선정 및 주문 제작 공정

3장에서 수행한 구조 해석 및 위상 최적화 결과를 바탕으로 최종 형상을 확정하였으며 제작 단계에서는 소재 선정과 제작 공정 최적화에 중점을 두었다. 또한 한정된 제작 예산 내에서 차량의 구조적 안전성과 경량화를 동시에 달성하기 위해 부품별 역할에 따라 재료를 차등 적용하는 전략적 소재 혼용 설계를 적용하였다. 특히 설계 단계에서 Simscape 기반 차량 동역학 시뮬레이션을 수행하여 현가장치 및 조향장치의 운동 과정에서 발생 가능한 부품 간 간섭 여부를 사전에 검토하였다. 이를 통해 설계 오류로 인한 재설계 및 재제작 가능성을 최소화하여 개발 비용 증가 요인을 제거하였다.

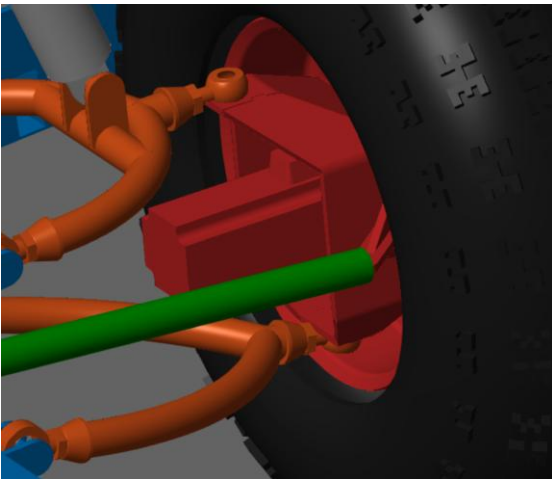


Fig4.1 암, 모터, 타이로드 간섭 확인

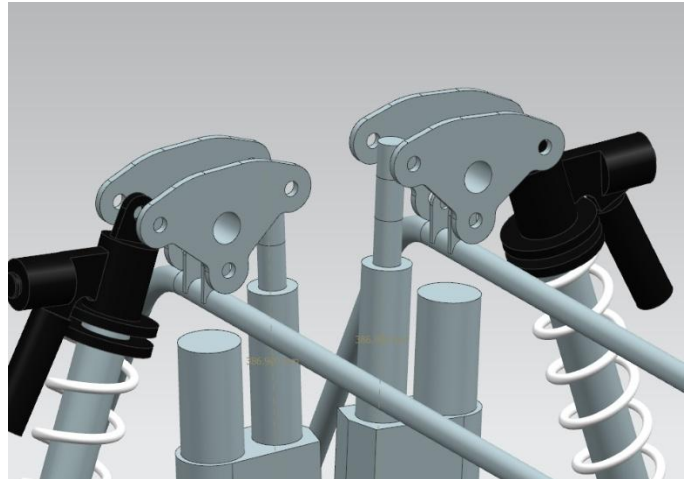


Fig4.2 쇼크업소버, 롤케이지, 액츄에이터 간섭 확인

차량의 주요 구조물인 차체, 어퍼암 및 로어암, 너클, 로커암, 허브는 모두 자체 설계 및 제작을 진행하였다. 이 중 너클, 로커암 및 허브는 차량의 성능과 경량화에 직접적인 영향을 미치는 핵심 부품으로 선정하여 설계를 수행하였다. 특히 너클과 로커암은 3장에서 수행한 구조 해석 및 위상 최적화 결과를 기반으로 최종 형상을 확정하였다. 하중이 집중되는 너클과 로커암에는 충분한 강도와 용접성을 확보할 수 있는 SS400 강재를 적용하였으며 경량화가 중요한 허브에는 알루미늄 합금을 적용하였다. 이를 통해 구조적 안전성을 확보함과 동시에 차량 중량을 감소시키고 제작 비용을 효과적으로 관리할 수 있었다.

■ 너클 제작

너클은 차량의 조향 및 현가 하중이 집중되는 핵심 부품으로 3 절에서 이를 유의하여 위상 최적화 결과를 바탕으로 실제 제작이 가능한 형상으로 재설계하였다. 제작 비용 절감을 위해 대형 절삭 가공 방식 대신 판재 조립 구조를 채택하였으며 높은 구조 강도가 요구되므로 SS400 6T 판재를 적용하였다. 너클은 제작성을 고려해 Fig4.3 에서 Fig4.4 와 같이 전면판, 후면판, 좌측판, 우측판, 상부판, 하부판 및 타이로드 체결 브라켓으로 분할 설계하였으며 각 부품은 레이저 절단 및 절곡 공정을 통해 제작하였다. 또한 조립 정밀도 확보와 용접 작업 편의성 향상을 위해 각 판재가 서로 맞물리는 구조를 적용하였다. 이를 통해 별도의 치공구 사용을 최소화하면서도 조립 오차를 줄일 수 있었으며 용접 작업 또한 용이하게 수행할 수 있었다. 판금 제작에 활용한 도면은 다음 Fig4.5, Fig4.6, Fig4.7, Fig4.8, Fig4.9, Fig4.10 에 나타났다.

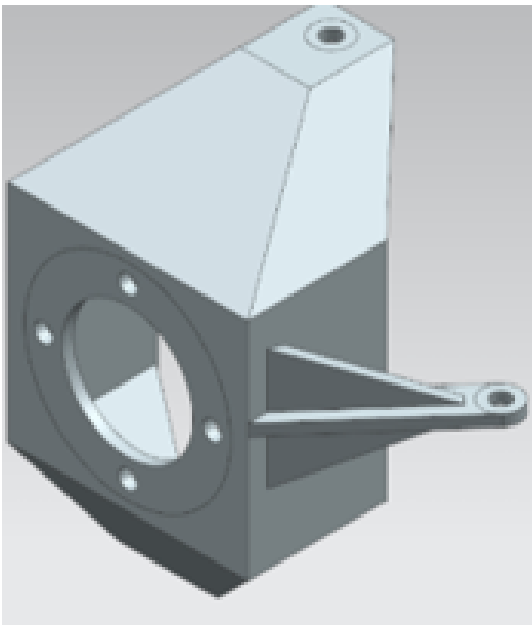


Fig4.3 최종 너클 형상

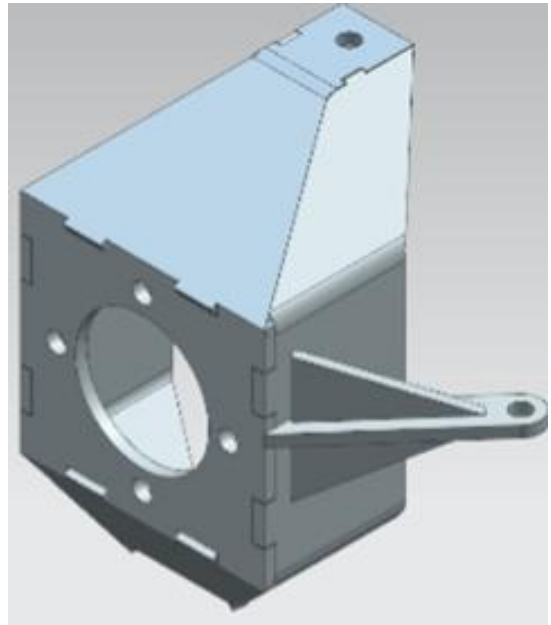


Fig4.4 너클 분할 설계

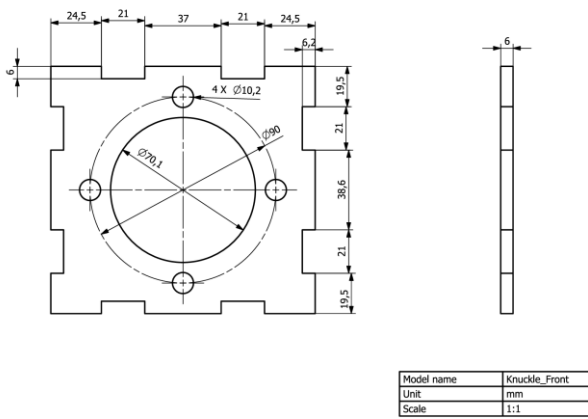


Fig4.5 너클 전면관 도면

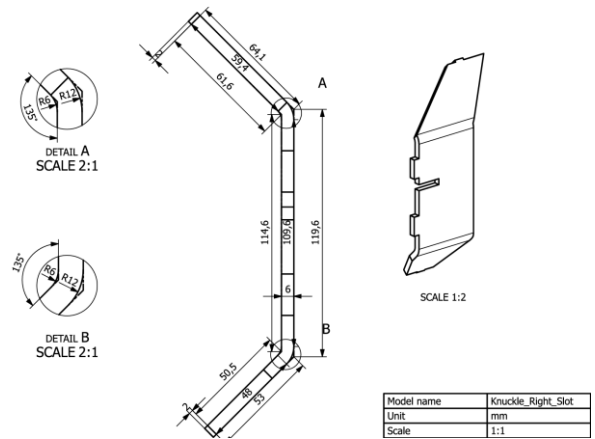


Fig4.6 너클 측면관 도면

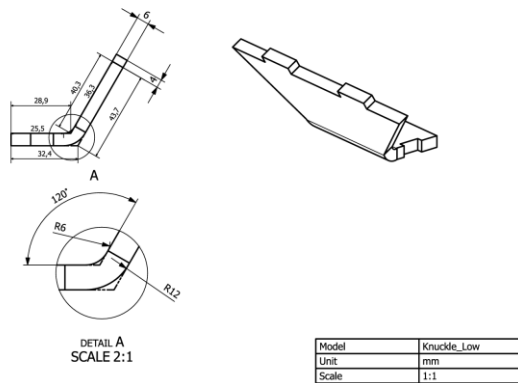


Fig4.7 너클 하부관 도면

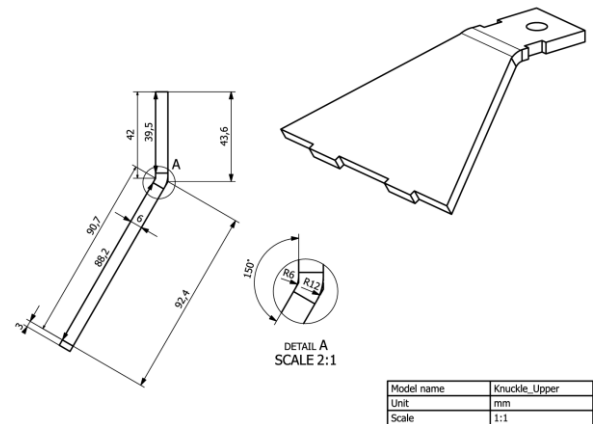


Fig4.8 너클 상부관 도면

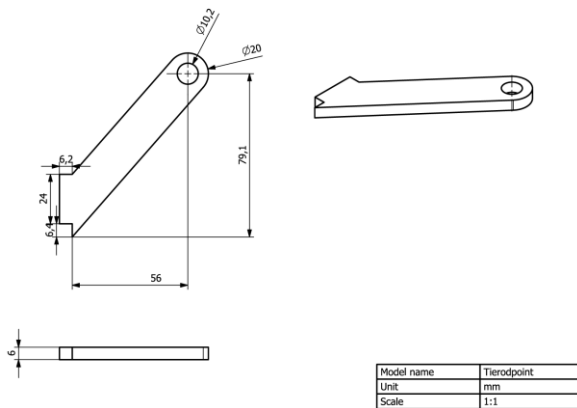


Fig4.9 너클 하부관 도면

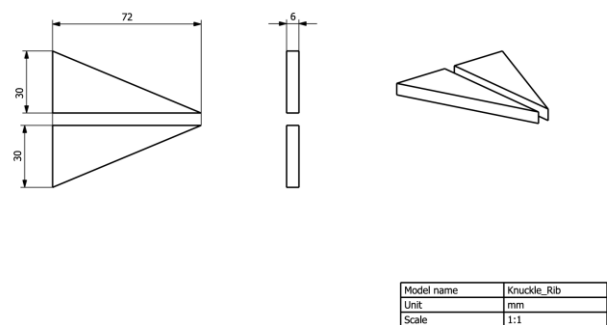


Fig4.10 너클 상부관 도면

■ 로커암 제작

로커암은 액추에이터의 선형 운동을 기구적으로 연결된 쇼크업소버에 회전 운동으로 전달하는 역할과 노면으로부터의 충격이 전달되는 부품으로 충분한 구조 강성이 요구된다. 이에 따라 SS400 6T 판재를 적용하여 제작하였다. 로커암은 동일 형상의 측면 판재 두 장과 중앙에 파이프가 들어가도록 구성하였으며 양측 판재 사이에 파이프를 삽입한 후 용접하여 제작하였다. 중앙 연결부에는 외경 25.4 mm, 두께 1.8 mm 규격의 강관을 적용하였다. 해당 규격은 시중에서 쉽게 조달 가능한 범용 규격으로 재료 수급이 용이하며 경제성이 우수하다는 장점이 있다. 또한 3 장에서 수행한 구조 해석 결과를 만족하는 범위 내에서 제작성과 조달성을 고려하여 선정하였다. 판금 제작에 사용한 도면은 Fig4.10 과 같다.

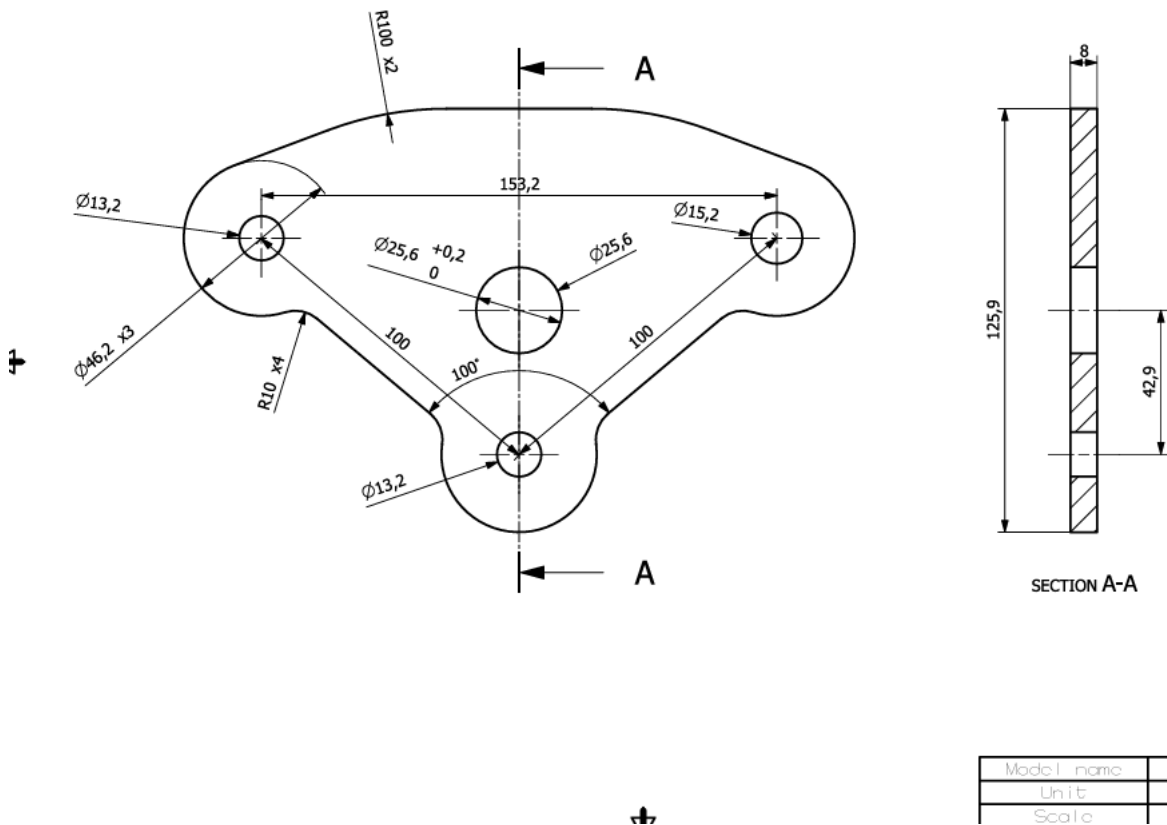


Fig4.10 로커암 판금 도면

■ 허브 제작

허브는 너클 형상 및 베어링 규격에 맞추어 설계하였다. 허브는 차량의 비현가 질량(Unsprung Mass)에 포함되는 부품으로 차량의 응답성과 주행 성능에 직접적인 영향을 미치므로 경량화가 중요하다. 이에 따라 중량 저감을 목적으로 알루미늄 합금을 적용하였다. 또한 허브는 너클 및 베어링과 결합되어 하중을 전달 및 분산하는 인터페이스 부품으로서 주요

구조 부재 대비 상대적으로 형상 제약이 큰 특성을 가진다. 따라서 UGV 인허브(IN-HUB) 모터 구조를 고려하여 베어링 규격, 휠 체결 방식 및 조립성을 중심으로 형상을 설계하였고 체결부에 표준 ISO 규격 나사선 가공을 통해 볼트로 허브에 모터와 리테이너를 체결할 수 있도록 설계하였다. 허브는 선반가공과 밀링가공으로 주문 제작하였다. 구조는 Fig11, Fig12 에 나타냈고 선반 가공에 활용한 도면은 Fig4.13, Fig4.14, Fig 4.15, Fig4.16 과 같다.

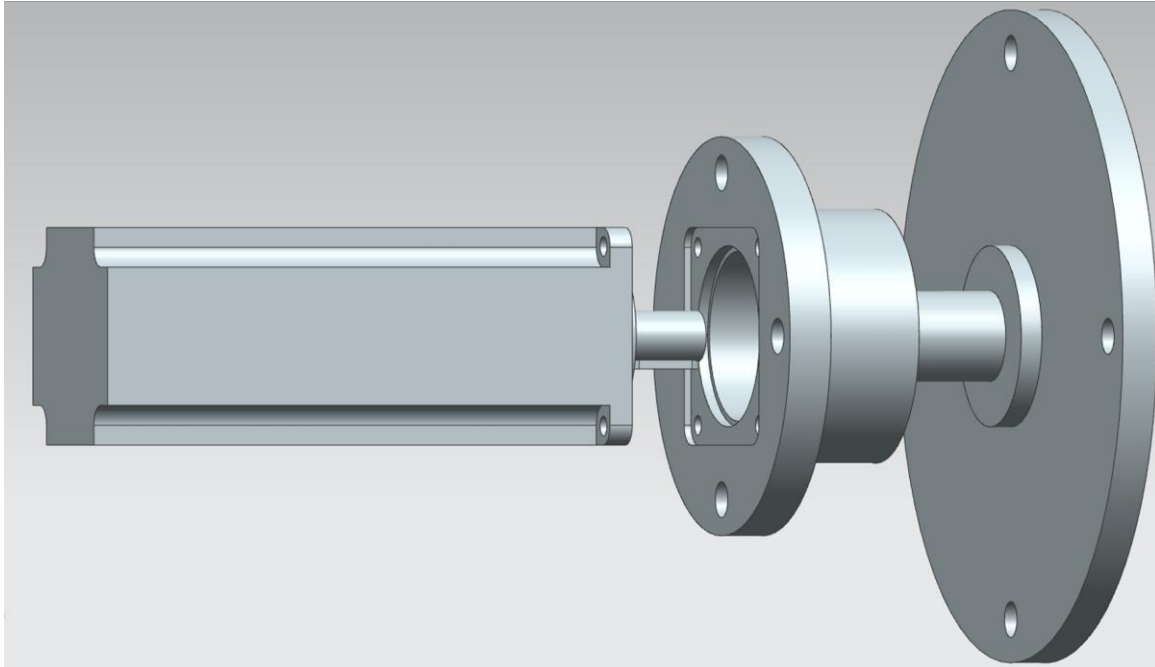


Fig4.11 인허브 패키징(좌측부터 구동모터, 허브인, 허브아웃)

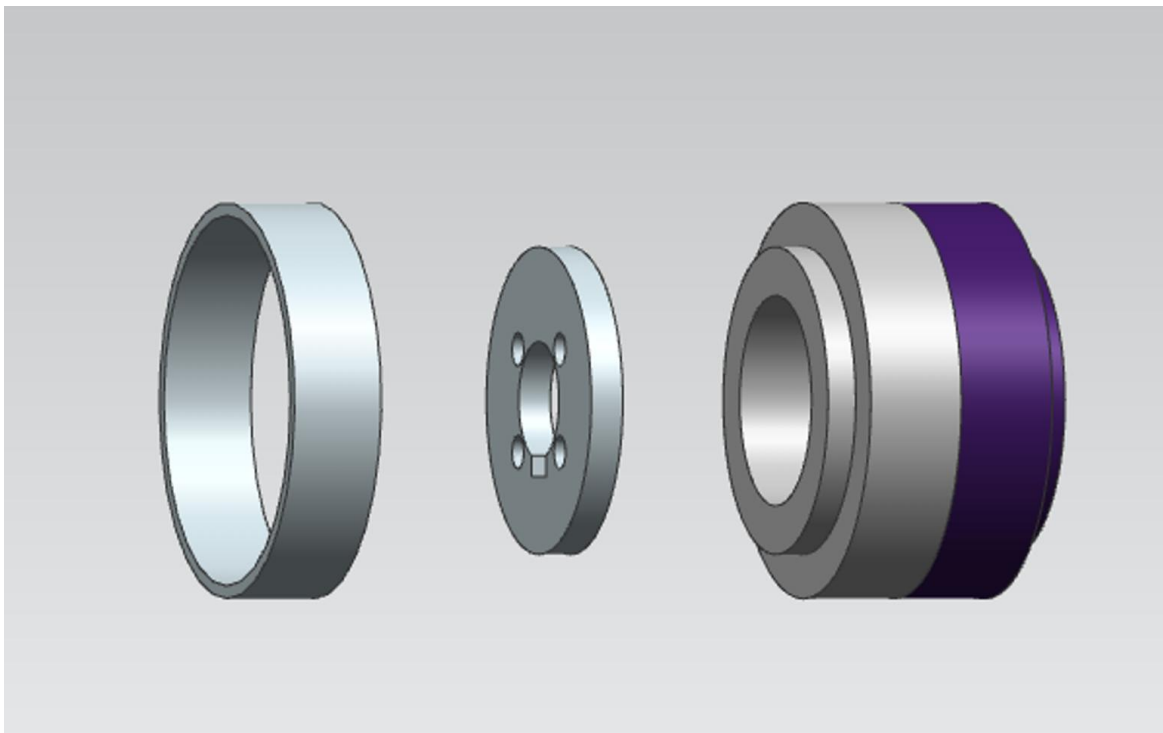


Fig4.12 허브인 내부구조(좌측부터 부싱, 리테이너, 베어링)

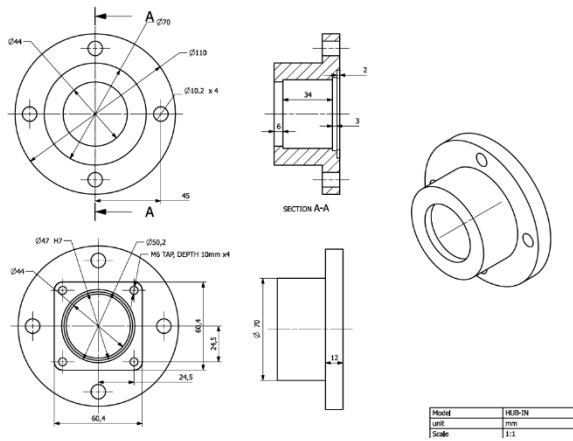


Fig4.13 HUB-IN 도면

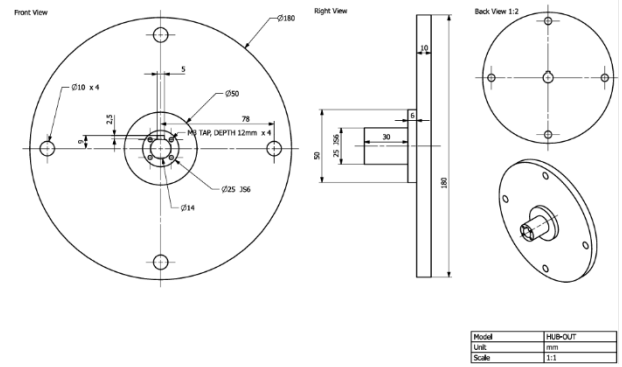


Fig4.14 HUB-OUT 도면

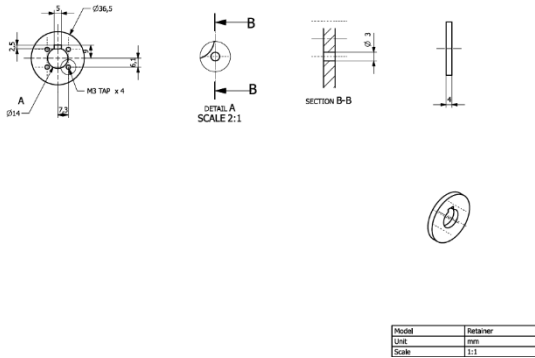


Fig4.15 Retainer 도면

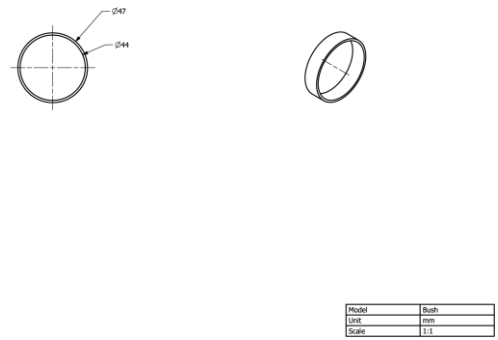


Fig4.16 Bush 도면

4.2 Simscape Multibody 기반 고충실도 동역학 시뮬레이션 모델 구축

본 연구에서는 기구학적 해석 결과의 신뢰성을 정밀하게 검증하고, 야전 비포장 도로 및 험지 환경에서의 동적 거동 특성을 평가하기 위해 MATLAB/Simulink 환경의 Simscape Multibody 를 기반으로 고충실도(High-fidelity) 3 차원 동역학 시뮬레이션 모델을 구축하였다. 플랫폼의 물리적 신뢰성을 확보하기 위해 설계 제원인 총 질량 300 kg, 축거(Wheelbase) 1,100 mm, 윤거(Track width) 1,196.8 mm 의 정밀 CAD 데이터를 각 바디 요소의 강체(Rigid Body) 파라미터와 관성 모멘트(Inertia Tensor)에 실물 매핑하였다. 지상고 가변 메커니즘은 시나리오 입력을 통한 부품의 변위 이동에 따라 주행 중 Low mode(150 mm)에서 High mode(250 mm)까지

서보 제어가 가능하도록 각 휠 링크 서스펜션에 Prismatic 및 Revolute Joint 조합의 가변 액추에이터 모델을 반영하였다. 가변 시스템의 기구학적 거동에 따른 램프각 ($30.5^{\circ} \rightarrow 48.8^{\circ}$) 및 접근각($22.8^{\circ} \rightarrow 38.4^{\circ}$)의 변화와 무게중심(CG)의 수직 이동에 의한 정적 전복 임계점 변화가 물리 플러그인 상에서 가상 동역학적으로 동기화되도록 환경을 조성하였다. Multibody 구성은 Fig4.17, Fig4.18 에 나타냈다.

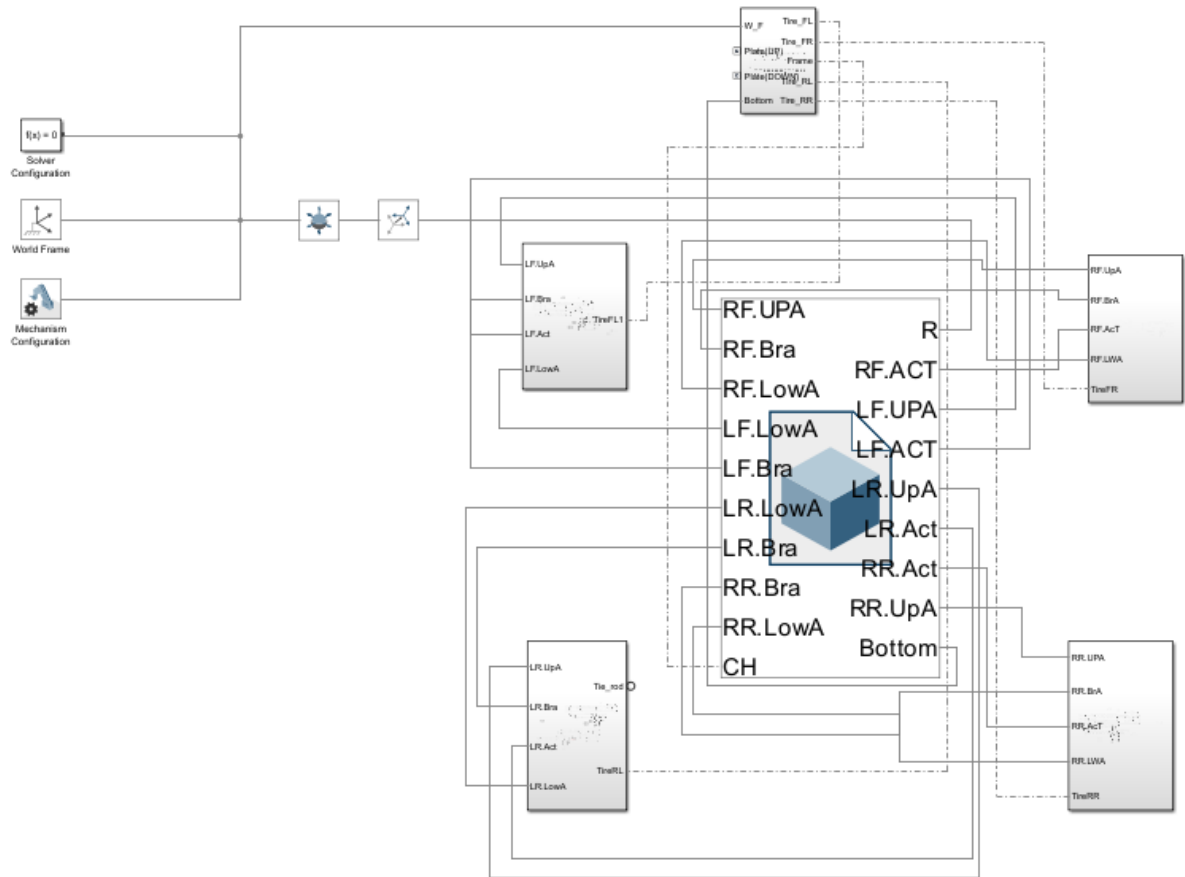


Fig4.17 MATLAB Simscape Multiboy 로 제작한 Model

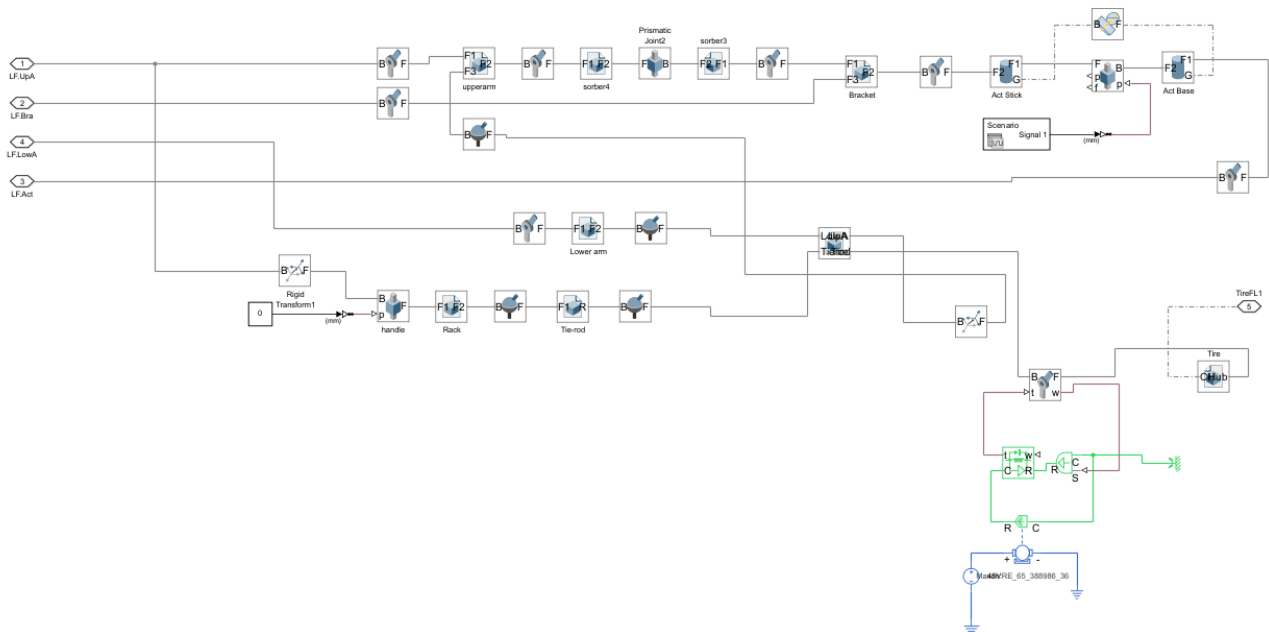


Fig 4.18 MATLAB Simscape Multiboy Right Front 구동부 Part

동역학 시뮬레이션 및 실제 테스트베드 플랫폼에 탑재될 구동 모터의 용량을 현실적으로 구체화하기 위해, 험지 주행 시 외란으로 작용하는 저항력을 기반으로 구동 성능 가이드라인을 재수립하였다. 전체 등판 성능을 포함한 가혹 조건 해석상으로는 모터 1 기당 약 3,700 W 급의 출력이 요구되나 본 연구에서는 테스트베드 운용 목적 및 하드웨어 가용성을 고려하여 경사저항을 배제한 상태에서 강한 험지의 구름저항력과 공기저항력만을 독립적으로 고려한 실효 소요 동력을 산정하였다. 휠 슬립 제어 마진을 포함하여 강한 험지 기준의 구름저항 계수 $\mu_r = 0.1$ 을 적용한 구름저항력 $F_r = 294.3\text{ N}$ 과 공기저항력 $F_c = 21.38\text{ N}$ 을 합산한 총 요구 구동력은 $F = 313.68\text{ N}$ 으로 도출된다. 이를 야전 험지 목표 속도인 30 km/h(8.33 m/s) 조건과 4 른 독립 구동 분배 조건에 대입하여 산출한 휠 1 기당 최소 소요 동력은 $P = 313.68 \times 8.33 \div 4 = 653.24\text{ W}$ 이다. 해당 수치적 근거와 오차 마진을 바탕으로 가상 모델 및 테스트베드용 구동원으로 600W 급 BLDC 서보 모터로 사양을 최종 선정하고 시뮬레이션 환경에 통합하였다. 물리 시뮬레이션의 충실도를 극대화하기 위해 실제 구매 및 실물 매핑에 사용된 600 W 급 모터(Model: PLSA60-E0406030)의 도면은 Fig4.19 와 같다.

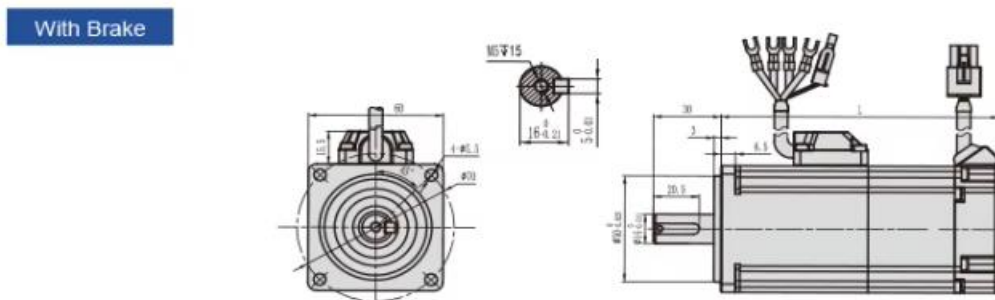


Fig4.19 구동 모터(Model: PLSA60-E0406030 With Brake)

상세 데이터시트 파라미터를 Simscape DC Motor 블록의 내부 전기적·기계적 사양으로 직접 정밀 입력하여 영구자석 등가회로를 파라미터화하였다. 구동 모터의 파라미터 값은 Fig4.20 에 나타냈고 Simscapae DC Motor 블록값은 Fig4.21 에 나타냈다.

Specifications																		
Model		PLSA60-E0402030					PLSA60-E0404030					PLSA60-E0406030						
Rated Power(W)		200					400					600						
Rated Voltage(V)		DC48					DC48					DC48						
Rated Current(A)		5					10					15						
Rated Torque(N.m)		0.64					1.27					1.91						
Rated Speed(r/min)		3000					3000					3000						
Peak Current(A)		16					32					48						
Peak Torque(N.m)		1.92					3.81					5.73						
Peak Speed(r/min)		3500					3500					3500						
Voltage Constant(V/1000r/min)		8.8					8.2					8.5						
Torque Coefficient(N.m/A)		0.13					0.13					0.13						
Line-line Resistance(Ω)		0.31					0.25					0.17						
Line-line Inductance(mH)		0.45					0.3					0.2						
Electrical Time-constant(ms)		1.5					1.2					1.17						
Rotor Inertia(kg.m²×10⁻⁴)		0.33					0.67					1.02						
Weight(kg)		1.1					1.5					1.9						
Number of Pole Pairs		4 (5 Pairs Of Poles Are Optional)																
Encoder Resolution (CPR)		2500CPR(Absolute encoder available)																
Insulation Class		Class F																
Protection Class		IP65 (IP67 Optional)																
Environment		Ambient Temperature:-20-50°C/Ambient Humidity-90%(No Frosting Condition)																
Winding Socket	Winding Wire	U					V					W					PE	
	Socket Number	1					2					3					4	
Encoder Socket (Absolute Type)	Signal Pin Definition	PE	5V	0V	SD+	SD-	VB+	VB-										
	Male Pin Number	1	2	3	4	5	6	7										
Encoder Socket (Incremental Type)	Signal Pin Definition	Shield	5V	0V	B+	Z-	U+	Z+	U-	A+	V+	W+	V-	A-	B-	W-		
	Male Pin Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		

Fig 4.20 구동모터 Specifications

전기 토크		
계자 유형	영구 자석	
모델 파라미터화	등가 회로 파라미터 기준	
> 전기자 저항	0.15	Ohm
전기자 인덕턴스	0.956	mH
역기전력 또는 토크 상수 ...	역기전력 상수 지정	
> 역기전력 상수	0.0078	V/rpm
회전자 감쇠 파라미터화	무부하 전류 기준	
무부하 전류	0.437 % Datasheet derived	0.437 A
> 무부하 전류 측정 시 DC ...	48	V
기계적		
회전자 관성	0.85e-4	kg*m^2
> 초기 회전자 속도	0 % Parameter not set	0 rpm

Fig.4.21 Simscapae DC Motor 파라미터

구체적으로는 정격 전압 DC 48 V, 정격 전류 15 A, 전기자 저항 0.15Ω , 전기자 인덕턴스 0.956mH 를 입력하여 전기적 시상수를 동기화하였으며 역기전력 상수를 0.0078 V/rpm, 무부하 전류 특성을 DC 48V 기준 0.437 A 로 매핑하여 모터 구동 시 발생하는 비선형 손실을 모사하였다. 아울러 기계적 거동 모사를 위해 회전자 관성 $0.85 \times 10^{-4} kg \cdot m^2$ 을 반영하고 오프로드 노면 마찰계수 범위(0.5~0.7) 및 비선형 접촉 메커니즘(Contact Force Law)을 타이어 모델에 부여함으로써 주행 중 동적 하중 이동(Dynamic Load Transfer) 현상이 실제 테스트베드와 동일하게 재현되도록 유도하였다. 노면 환경으로는 국방과학연구소(ADD) 기동시험장의 최대 험지인 G4 비포장 시험로(최대 경사도 32.5%) 및 야전 비포장로의 3 차원 그리드 맵 프로파일을 Simscape 공간 상에 수치적으로 매핑 적용하여, 지상고 가변 UI 제어 시스템과 4WS 독립 조향 메커니즘을 연동한 하이브리드 기동 전략의 실효성을 사전 검증할 수 있는 완결성 높은 해석 기반을 확보하였다.

4.3 시뮬레이션 동기화 검증 및 Breakover Angle 극복 시뮬레이션

Fig4.22 와 같이 액추에이터는 Act Stick(운동부)과 Act Base(고정부)로 구성되어 있으며 Prismatic Joint 를 통해 선형 직선 운동을 묘사하였다. 또한 Act Stick 은 로커암에 Act Base 는 어퍼암 브라켓에 각각 Revolute Joint 로 연결해 액추에이터 길이 변화간 회전 운동이 발생하는 것을 구현하였다. Spatial Contact Force 는 Act Stick 이 Act Base 의 바닥을 뚫고 지나가지 못하도록 접촉 경계조건을 부여하였다. 액추에이터 운동은 Fig4.23 에 나타낸 Signal Editor 의 Scenario 를 Simulink-PS Converter 를 통해 Prismatic Joint 의 변위를 변화시킴으로써 구현하였다.

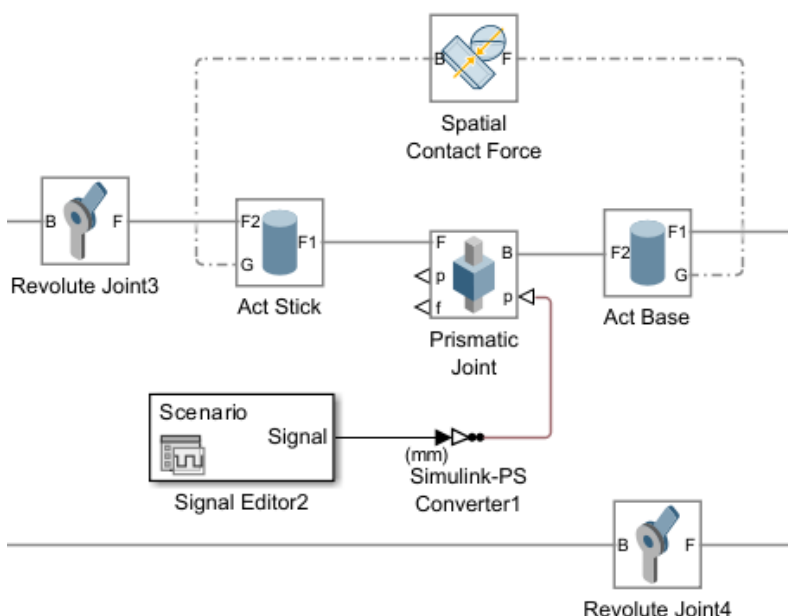


Fig 4.22 Simscape Multibody 액추에이터 구조

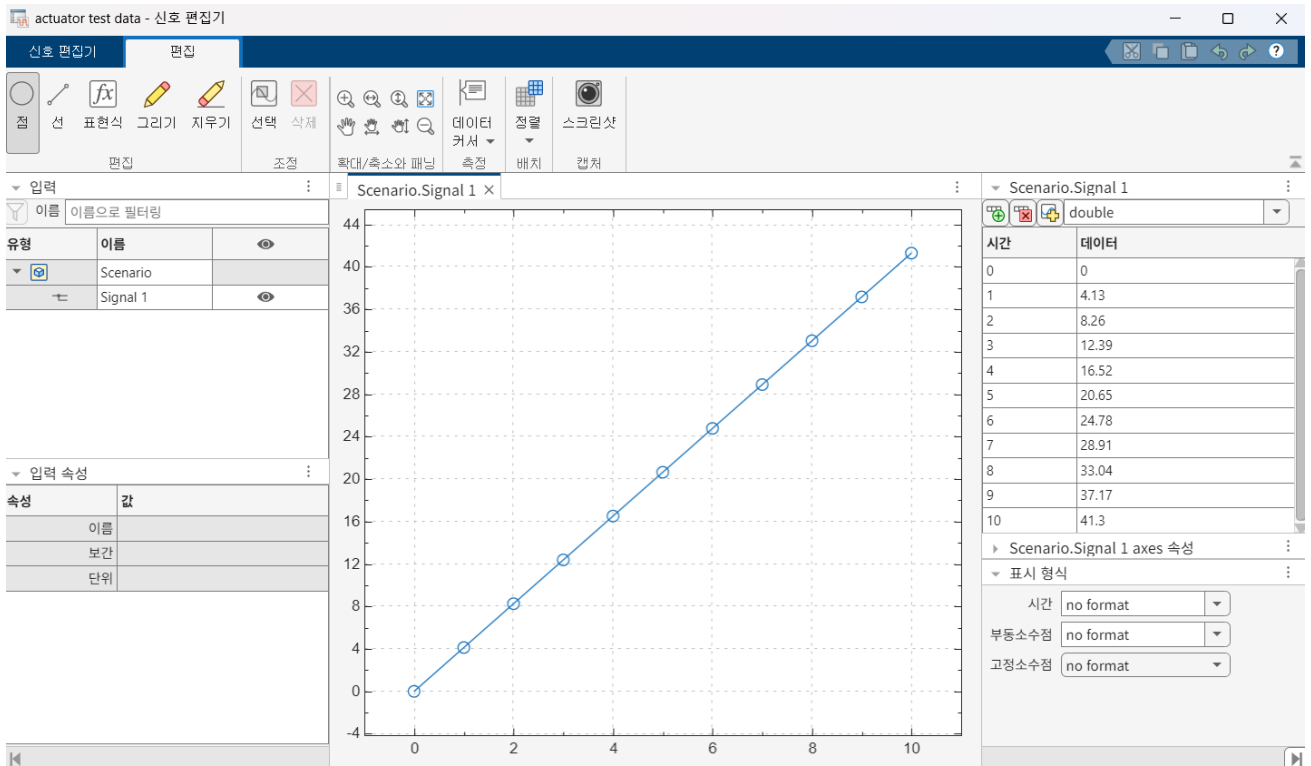


Fig 4.23 Signal Editor Scenario

Act Stick 과 Act Base 의 좌표 간 사이 상대거리가 0 일 때 Low Mode, 23.4 mm 일 때 Middle Mode, 41.3 mm 일 때 High Mode 가 되는 것을 2 절에서 확립한 Geometry 를 통해 확인했고 실제 Signal Editor 로 액츄에이터를 선형 직선운동 시켰을 때의 결과는 다음 Fig4.24, Fig4.25, Fig4.26 과 같다. 시뮬레이션에서 액츄에이터 스트로크를 0 mm, 23.4 mm, 41.3 mm 로 조절함에 따라 Infinite Plate 와 차체 사이의 거리 151 mm, 198 mm, 246 mm 가 나오는 것을 확인할 수 있고 이는 Fig 4.27 에서 Transform Sensor 를 통해 Z 값을 추출해 주행면 Infinite Plate 와 차체의 바닥 사이의 거리를 Scope 로 추출해 확인하였다. 따라서 설계에서 의도한 Low Mode(150 mm), Middle Mode(200 mm), High Mode(250 mm)에 대해서 Low Mode 의 경우 오차량 + 1 mm, 오차율 0.67%, 유사도 99.3%, Middle Mode 는 오차량 -2 mm, 오차율 1.00%, 유사도 99%, High Mode 는 오차량 -4 mm, 오차율 1.60% 유사도 98.4%를 보인다. 유사도는 다음 식 4.1 의 유사도 산출 공식에 따라 계산하였다.

$$Similarity(\%) = \left(1 - \frac{|x_{target} - x_{sim}|}{x_{target}}\right) \times 100 \quad (\text{식 4.1})$$

x_{target} : 설계목표치, x_{sim} : 시뮬레이션 결과

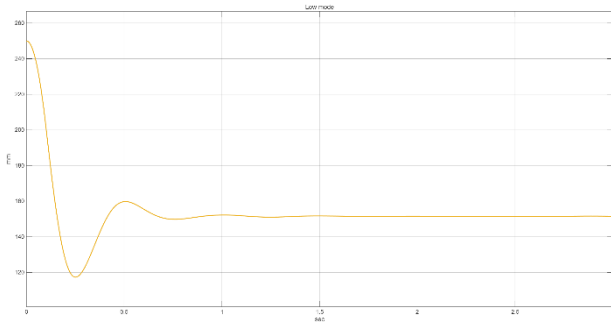


Fig 4.24 Low mode 지상고 151 mm

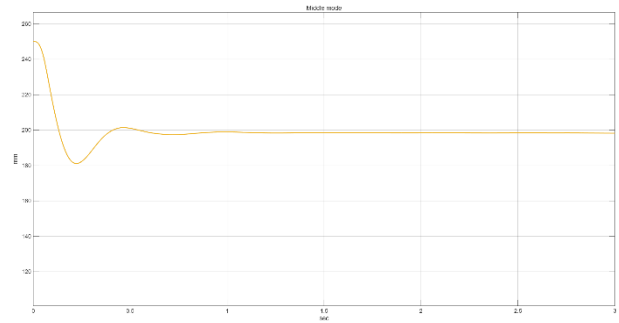


Fig 4.25 Middle mode 지상고 198 mm

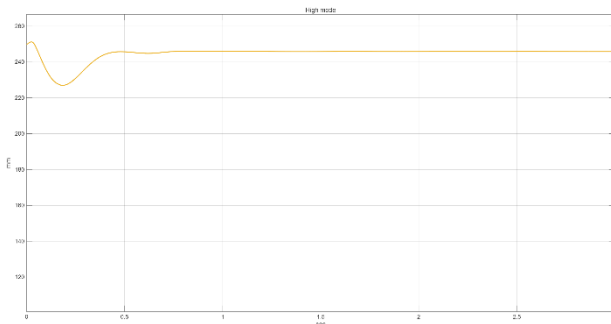


Fig 4.26 High Mode 지상고 246 mm

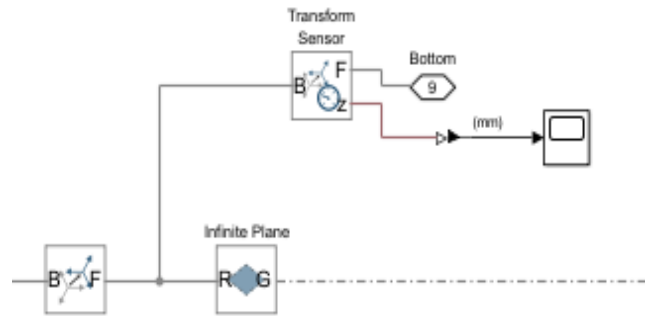


Fig 4.27 시뮬레이션 상 지상고 측정

시스템 가변 전 영역에 걸친 설계치 대비 시뮬레이션의 평균 유사도는 98.91% (평균 오차율 1.09%의 매우 높은 일치성을 보였다. 이는 Simscape Multibody 상에 모델링된 가변 액추에이터의 Prismatic Joint 변위 제어 및 서스펜션 링크의 기구학적 거동 메커니즘이 설계 의도를 매우 정밀하게 반영하고 있음을 정량적으로 증명한다. 오차가 발생한 단 1.09%의 미소 제원은 타이어 접촉력(Contact Force) 모델 및 차량 자중에 의한 동적 댐핑/처짐 현상이 반영된 결과로 판단되며 동역학 해석 모델로서 높은 수준의 유효성(Validity)과 충실도를 확보하였음을 확인하였다.

MATLAB Simscape Multibody 를 통해 지상고 조절을 통해 한계 Breakover Angle 로 인해 넘지 못하는 경사도를 넘는 시뮬레이션을 구현하였다. 언덕은 경사각 24° , Breakover Angle 48° 의 경사면으로 Low Mode 와 High Mode 로 주행하였고 Fig 4.28, Fig 4.29 에 나타냈다. Fig 4.30 을 보면 램프각이 30.5° 인 Low Mode(150 mm)로 주행 배결림 현상이 발생해 시간이 지나도 차가 나아가지 못하는 것을 확인할 수 있고 Fig 4.31 에서는 48.8° 의 램프각을 갖는 High Mode(250 mm)로 주행 시 경사면을 극복 후 다시 지면으로 내려온 것을 확인할 수 있다. MATLAB Simscape Multibody 를 통해 지상고 조절을 통해 Breakover Angle 향상시켜 경사도를 극복할 수 있음을 확인하였다. 본 시뮬레이션 결과는 수동 서스펜션 구조를 적용한 고정형 지상고 플랫폼의 주행 한계점을 명확히 보여주는 사례이며 기동 환경에 최적화된 가변 지상고 조절 메커니즘이 소형 가반형 UGV 의 야전 불규칙 험지 대응력 및 플랫폼의 생존성 확보에 있어 필수적인 설계 요소임을 정량적으로 입증한다.

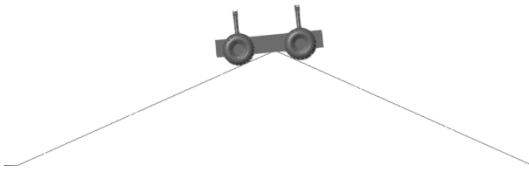


Fig 4.28 지상고 150 mm

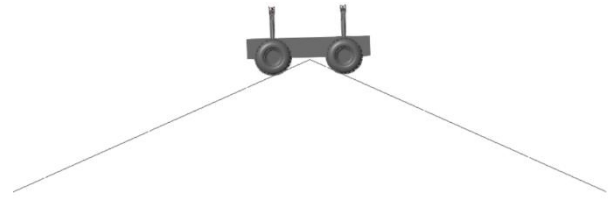


Fig 4.29 지상고 250 mm

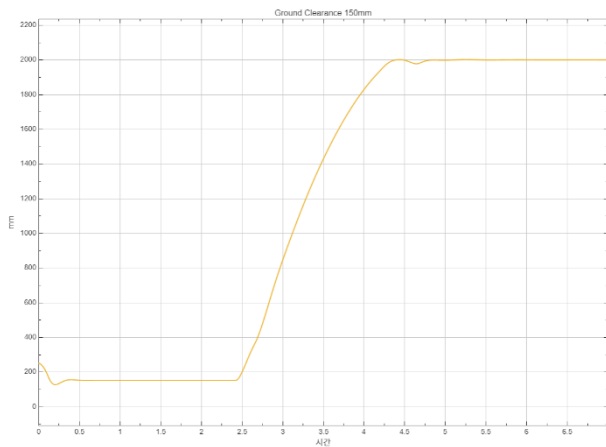


Fig 4.30 지상고 150 mm 배결림 발생

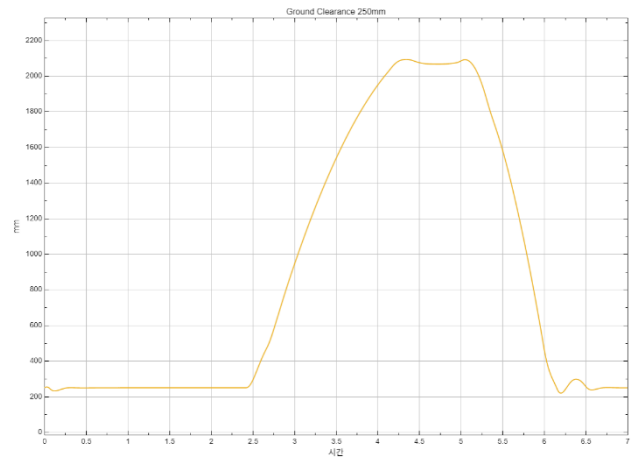


Fig 4.31 지상고 250 mm 경사도 통과

4.4 성능 평가 및 현실적 제한요소 분석

본 절에서는 반경 150 mm의 구체(Sphere) 장애물이 불규칙하게 배치된 오프로드 노면 조건을 Simscape 공간 상에 구현하고 시스템의 제어 방식에 따른 차량의 동적 거동 감쇄 성능을 정량적으로 평가하였다. 첫 번째 시나리오는 수동 서스펜션 차량을 모사하기 위해 지상고를 Mid mode(200 mm)로 완전히 고정한 Passive Suspension 상태에서 고속 주행을 수행하였으며 두 번째 시나리오는 액추에이터 Signal Editor의 개별 파라미터 값 조정을 통해 4륜의 가변 액추에이터 변위를 독립적으로 조절하는 개별 주행 간 지상고 제어(Ride Height Control) 시스템을 모사하였다. 모사 방식은 주행 노면의 고도 정보를 사전 인지하여 입력하는 피드포워드(Feedforward) 방식을 기반으로 Fig 4.32~4.35과 같이 변위 시나리오를 개별 액추에이터에 입력해 노면에 따라 지상고가 제어되는 것을 묘사하였다. Fig.4.37, Fig.4.38은 두 주행이 동일한 선형적인 속도증가 조건에서 주행을 하고 있음을 보이며 Passive Suspension 모사 주행 결과와 지상고 제어(Ride Height Control) 모사 주행 결과를 Overlay하여 Fig.39, Fig.40에 나타냈다. 시뮬레이션 해석 결과 수동 모드 고정 주행 시에는 대형 구체 외란이 타이어를 통해 차체 프레임으로 가감 없이 전달되어 롤링(Rolling)은 $-4.8^{\circ} \sim 6.8^{\circ}$, 피칭(Pitching)은 $-3.5^{\circ} \sim 4.9^{\circ}$ 가 발생하였다. 속도와 변위가 극심하게 발생하였으며 심한 하중 이동으로 인해 일부 구동륜에서 순간적인 슬립 현상이 관측되었다. 반면 개별 지상고 조절 시스템을 적용한 경우 수직 외란에

대응하여 각 휠 링크의 Prismatic Joint가 능동적으로 수축 및 이완 거동을 수행하였다. 롤링(Rolling)은 $-3.2^{\circ} \sim 2.9^{\circ}$, 피칭(Pitching)은 $-2.4^{\circ} \sim 4.3^{\circ}$ 로 차체의 수평 상태를 유지하는 댐핑 효과가 발휘되어 수동 고정 모드 대비 차체의 Peak-to-Peak 롤링 진동 폭은 약 47.4%, Peak-to-Peak 피칭 진동 폭은 약 20.2% 정량적으로 감소하는 비약적인 주행 안정성 향상 효과를 도출하였다.

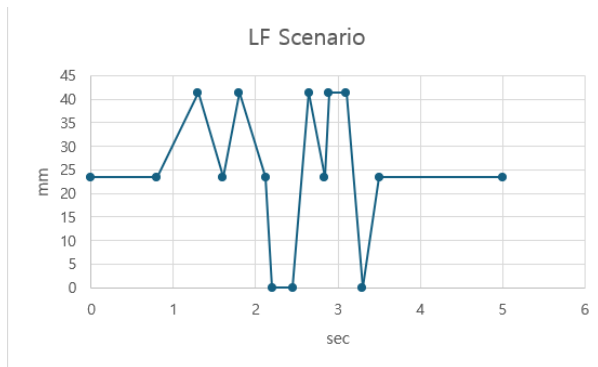


Fig 4.32 LF 액츄에이터 시나리오

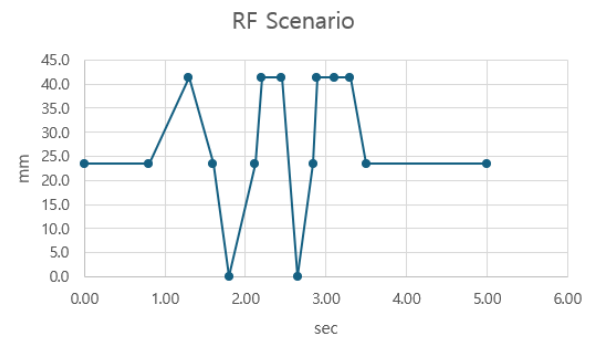


Fig 4.33 RF 액츄에이터 시나리오

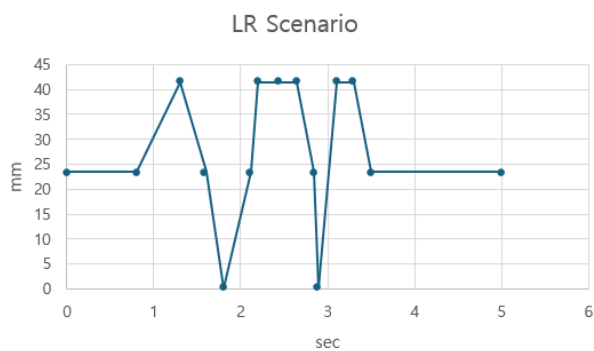


Fig 4.34 LR 액츄에이터 시나리오

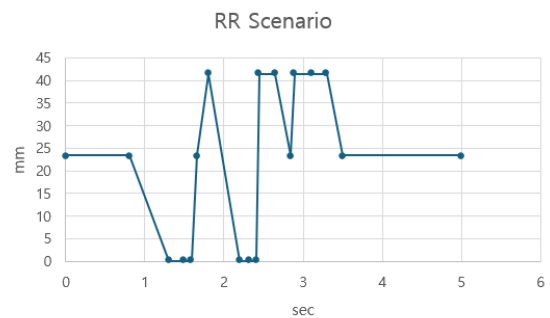


Fig 4.35 RR 액츄에이터 시나리오

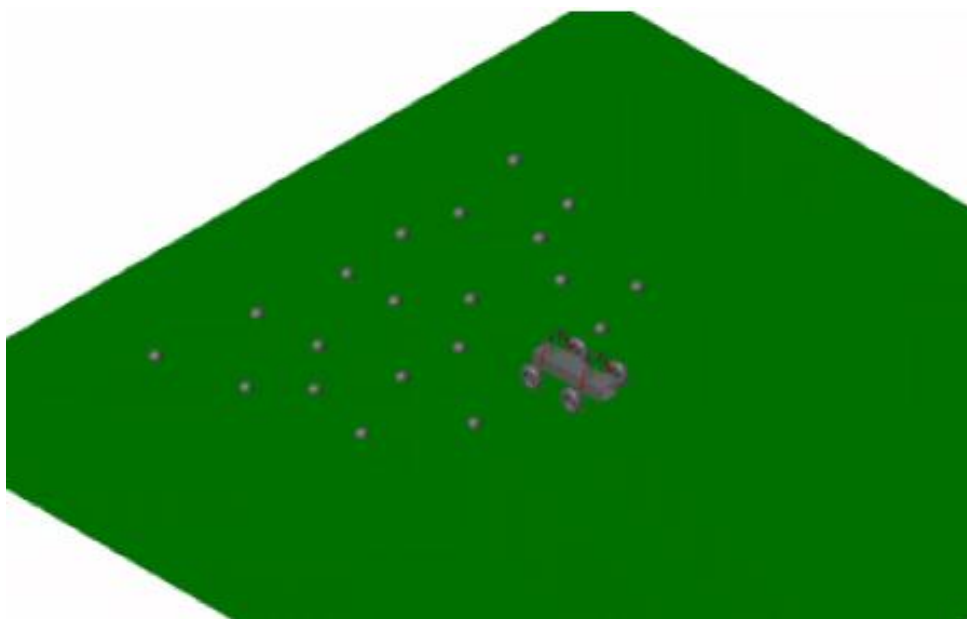


Fig 4.36 반경 150 mm 구체 장애물 노면 주행 시뮬레이션

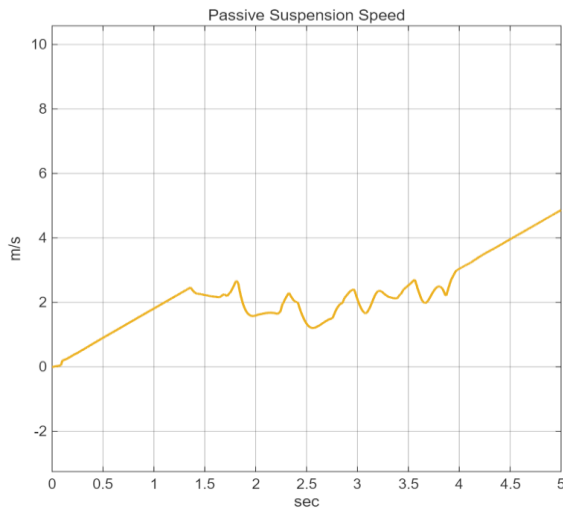


Fig 4.37 Passive Suspension Speed

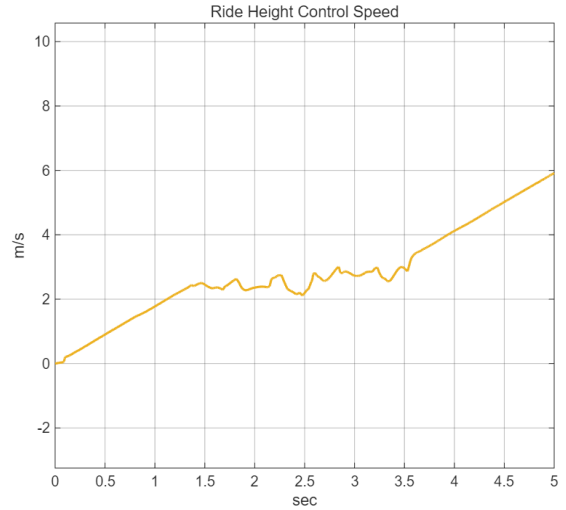


Fig4.38 Ride Height Control Speed

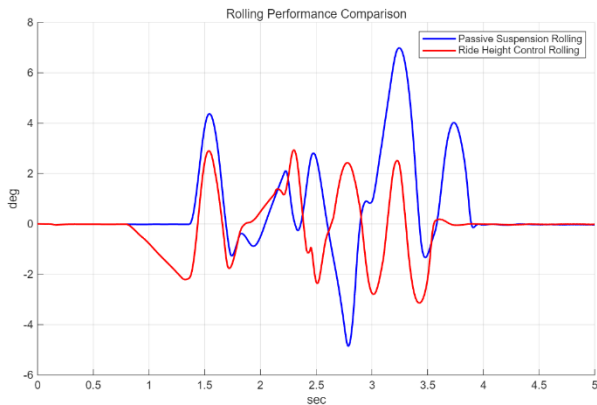


Fig 4.39 Rolling Performance Comparison

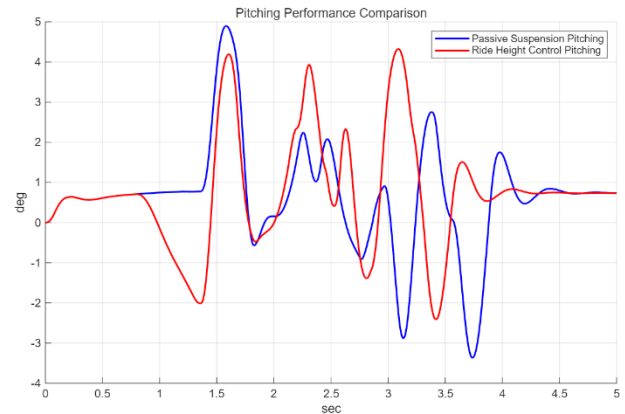


Fig 4.40 Pitching Performance Comparison

그러나 이러한 시뮬레이션 기반의 정량적 성능 향상에도 불구하고, 실제 테스트베드 플랫폼 구현 및 야전 운용을 위해서는 다음과 같은 현실적 제한요소(Realistic Constraints)에 대한 분석과 공학적 보완 전략이 요구된다.

첫째, 본 지상고 제어 모드는 주행 노면의 고도 정보를 사전 인지하여 입력하는 피드포워드(Feedforward) 방식을 기반으로 하므로 실시간 추종 성능에 명확한 한계를 지닌다. 본 연구의 시뮬레이션에 사용된 시나리오는 0.1 초 단위로 목표 변위가 급격히 변화하도록 설정되어 있다. 그러나 실제 600 W 급 구동 모터 및 서보 액추에이터의 물리적 가속 시간(Slew-rate limit)을 반영한 야전 시험 데이터에 따르면, 목표 지상고(100 mm 변위) 도달 시 상승 3.8 초, 하강 3.4 초의 선형 구동 시간(평균 26.3~29.4 mm/s)이 소요된다. 따라서 실제 시스템의 메커니즘 전개 속도로는 0.1 초 단위의 급격한 변위 입력을 실시간으로 추종하는 것이 원천적으로 불가능하다. 결국 본 시뮬레이션 결과는 별도의 변위 입력 제어 근거 없이 노면 형상을 미리에 완벽하게 알고 가정한 상태에서 도출된 '이론적 제어 성능의 이상적인 상한선(Ideal Upper Bound)'임을 명기한다. 불규칙한 야전 환경에서 실시간 센서 피드백 없이 이러한 저주파용 메커니즘으로 고주파 노면 외란을 실시간 상쇄하기에는 한계가 명확하며, 향후 제어 타임랙과 액추에이터 응답성 개선이 반드시 선행되어야 한다.

둘째, 시뮬레이션 환경에서는 수동 및 지상고 제어 모드의 정량적 대조를 위해 노면 프로파일, 주행 속도, 시간축을 완전히 동일하게 통제하였으나 이는 실제 야전 실증 시험에서 재현하기 까다로운 한계가 존재한다. 실제 비포장 주행 환경에서는 실시간으로 변화하는 노면 마찰력, 타이어 슬립, 운전자의 조향 입력 변화 등으로 인해 동일한 조건의 반복 주행 및 정밀한 대조군 형성이 극히 제한된다. 결과적으로 시뮬레이션 상의 동등 조건 비교 결과가 실제 야전 주행 시의 실증적 데이터 신뢰성 및 반복 재현성으로 직결되지 못할 수 있다는 한계를 지닌다.

5 결론

5.1 연구 성과 요약

본 연구에서는 험지 주행성 향상과 생존성 확보를 목적으로 상위 사용자 인터페이스(UI) 조작 및 지상고 제어를 통해 주행 중 지상고를 가변할 수 있는 소형 UGV(Unmanned Ground Vehicle) 플랫폼을 설계하고 이에 대한 공학적 타당성을 수치 해석 및 동역학 시뮬레이션을 통해 성공적으로 검증하였다. 우선 기구학적 파라미터 해석을 기반으로 지상고 변위에 따른 오프로드 돌과 성능과 정적 전복 안정성 사이의 명확한 상충 관계(Trade-off)를 규명하였다. 수치 해석 결과 지상고 292.05 mm 및 310.72 mm 에서 각각 종방향 안전 한계선(55.94°)과 횡방향 안전 한계선(58.93°)이 램프각 그래프와 교차하는 물리적 임계점(Critical Point)을 도출하였으며 이를 기반으로 플랫폼의 생존성을 결속하기 정적 최하 한계선인 종방향 임계점(292.05 mm)으로부터 충분한 여유 마진을 확보하여 최대 가변 제어 범위를 250 mm 로 제한하는 안전 마진 설계 전략을 확립하였다. 위의 설계 제원을 국방과학연구소(ADD) 기동시험장(비포장, 야지, G1~G4) 및 가혹한 야전 비포장으로 실측 지형 데이터와 상호 대조 분석함으로써 본 UGV 가 최대 경사각 21.3° (경사도 38.9%)에 달하는 극한의 종경사 지형에서도 하부 배결림 현상을 완벽히 회피하고 약 +14.6%의 충분한 기하학적 마진을 보유하여 전 구간 안정적 주행이 가능함을 이론적으로 입증하였다.

또한 구동 성능의 현실적 구체화를 위해 강한 험지 기준의 구름저항 계수($\mu_r = 0.1$)와 공기저항을 독립적으로 고려하여 휠 1 기당 600 W 의 소요 동력을 역산해냈으며 이를 바탕으로 테스트베드용 600 W 급 BLDC 서보 모터 사양을 최종 선정하고 실제 데이터시트 파라미터를 Simscape DC Motor 블록에 정밀 매핑하였다. 이와 같이 구축된 고충실도(High-fidelity) 3 차원 동역학 시뮬레이션 모델은 설계 목표치(Low, Mid, High 모드) 대비 가상 거동 결과가 전 영역 평균 유사도 98.91%라는 극도로 높은 정합성을 나타내어 해석 모델의 유효성을 정량적으로 증명하였다. 나아가 복합 능선 사면 시뮬레이션을 통해 고정형 수동 서스펜션 차량이 배결림으로 인해 기동 불능 상태에 직면하는 한계를 명확히 제시한 반면 가변 지상고 플랫폼은 이를 원활히 돌파하는 거동을 확인하였다. 특히 반경 150 mm 의 불규칙 구체 외란 노면을 주행하는 가혹 시나리오 하에서 4 른 개별 지상고 조절 시스템을 적용한 결과 수동 고정 모드 대비 차체의 롤링 진동 폭은 47.4% 피칭 진동 폭은 20.2% 감소하는 정량적 거동 감쇄 성능을 도출하였다. 결론적으로 본 연구는 기구학적 한계 해석과 동역학 시뮬레이션을 유기적으로 연계하여 가변 지상고 서스펜션 메커니즘이 경량 UGV 플랫폼의 야전 운용 신뢰성 및 주행 안정성 확보에 있어 핵심적인 필수 요소임을 공학적 근거에 기반하여 완벽히 규명하는 성과를 거두었다.

5.2 향후 연구 과제 및 발전 방향

본 연구에서 도출한 가변 지상고 기반 소형 UGV 플랫폼의 설계 사양과 시뮬레이션 검증 성과를 바탕으로, 향후 야전 실전 배치 및 운용 신뢰성 극대화를 위해 추진해야 할 연구 과제 및 발전 방향은 다음과 같다.

첫째, 본 연구의 한계로 지적된 피드포워드(Feedforward) 제어의 실차 재현 불가능성과 액추에이터의 물리적 응답 지연(Time-lag) 문제를 해결하기 위해 환경 인지 센서와 연동된 '예측 제어(Preview Control) 및 실시간 피드백(Feedback) 보상 알고리즘'의 도입이 필수적이다. 차재 LiDAR 또는 비전 센서를 활용하여 전방 노면 프로파일을 실시간으로 3 차원 매핑하고 차량이 해당 요철에 도달하기 전 각 휠 가변 링크의 목표 변위를 선제적으로 계산·인가하는 방식이다. 이러한 예측 제어 메커니즘이 확립된다면 액추에이터의 물리적 가속 시간(Slew-rate limit)에 따른 제어 지연을 근본적으로 상쇄할 수 있으며 본 해석 환경에서는 보장하지 못했던 주행 중 실시간 고주파 노면 외란에 대한 능동적 피드백 제어 성능을 실증할 수 있을 것으로 기대된다.

둘째, 에너지 효율성 제고와 구조 해석 설계 사양의 실물 검증을 포함한 고도화 연구가 수행되어야 한다. 4 른 독립 가변 서스펜션을 연속적으로 구동할 때 발생하는 배터리 전력 소모를 최소화하기 위해 노면의 주파수 특성을 분석하여 제어 활성화 여부를 능동적으로 결정하는 '에너지 효율적 스위칭 제어 전략' 개발이 요구된다. 이와 더불어, 본 연구에서 이미 구조해석 및 형상최적화를 거쳐 안전계수 2 이상을 확보하도록 설계한 로커암과 너클 부품의 정적·동적 내구성을 실증적으로 검증할 필요가 있다. 이를 위해 본 연구에서 심스케이프 파라미터 매핑에 활용한 600 W 급과 계산을 통해 도출한 3700 W 급 구동 모터 기반의 하드웨어 테스트베드를 최종 구축하고 국방과학연구소 기동시험장의 수준의 비포장 사면 요철 지형에서 실제 주행 시험을 수행할 계획이다. 이를 통해 설계 단계의 안전율과 시뮬레이션 상에서 도출된 롤링(47.4%) 및 피칭(20.2%) 저감 효과가 실제 물리 플랫폼 상에서도 정합성 있게 구현되는지 최종 실증하는 것을 목표로 한다.

참고문헌

- 무인지상차량(UGV) 및 험지 주행 환경

- [1] 김주희, 이종우, 유삼현, 박지일, 신현승, 권영진, 최현호. (2019). 소형전술차량 기동조건 및 운용환경 분석을 통한 대표주행경로 선정. *한국군사과학기술학회지*, 22(3), 341-352.
- [2] 신동빈, “험지/재난 상황에 적합한 독립구동형 주행 메커니즘,” 고려대학교 대학원 석사학위논문, 2017.
- [3] 이대경, 정지수, 고영호, 손정현, “험지주행 자율주행차량 동적거동 분석을 위한 스마트 테스트 베드 개발,” 한국정밀공학회 학술발표대회 논문집, pp. 411-412, 2021.

- Trade-OFF 관련

- [4] 한승규. (2024). Robust performance improvement of active suspension via H infinity control for track uncertainty [석사학위논문, 한양대학교].

- 가변 지상고 및 능동 서스펜션 시스템 (현가장치 설계)

- [5] 박영근, 이수엽, 윤철수, “능동 현가장치를 이용한 차량의 지상고 및 자세제어,” 한국자동차공학회 논문집, 제 8 권, 제 1 호, pp. 222-229, 2000.
- [6] 김도현, 윤동신, 이선민, “지형 적응형 무인 로봇을 위한 4 절 기구 기반 가변 서스펜션 메커니즘 설계,” 한국로봇학회 학술대회 논문집, pp. 185-187, 2022.

- 독립 구동(4WID) 및 독립 조향(4WS) 제어 (구동/조향 시스템)

- [7] 이재영, 이주영, 박장현, “독립 구동 및 독립 조향 차량의 고기동 제어 알고리즘 개발,” 한국자동차공학회 논문집, 제 28 권, 제 5 호, pp. 311-318, 2020.
- [8] 김한조, 최웅세, 임명섭, “독립 전륜 조향 및 4 륜 구동 전기 차량을 이용한 요 모션 향상에 관한 연구,” 한국자동차공학회 논문집, 제 22 권, 제 6 호, pp. 115-122, 2014.

- Altair 유한요소 구조 해석 및 위상 최적화 (너클/로커암 제작)

- [9] 임영우, 김규원, 박근, “SLM 3D 프린터를 이용한 자작 자동차 너클의 위상 최적화,” 한국정밀공학회지, 제 40 권, 제 9 호, pp. 715-722, 2023.
- [10] 최효서, 이종선, 권양선, “위상최적화를 이용한 자동차 프론트 너클의 경량화 설계에 관한 연구,” 한국소음진동공학회 학술대회논문집, pp. 325-329, 2018.

- Simscape Multibody 동역학 해석 (해석 및 시뮬레이션 검증)

- [11] 최현준, 김민성, 이종한, “Simscape Multibody 를 이용한 독립 구동형 모바일 로봇의 다물체 동역학 시뮬레이션 및 검증,” 제어·로봇·시스템학회 논문지, 제 27 권, 제 8 호, pp. 612-619, 2021.
- [12] 장익준, 한창수, “다물체 동역학 해석 모델 기반 능동 서스펜션 차량의 주행 안정성 및 거동 성능 분석,” 대한기계학회 논문집 A 권, 제 45 권, 제 3 호, pp. 201-208, 2021.

Appendix

MATLAB Add-on: Simscape, Simscape Multibody, Simscape Electrical

MATLAB SIMSCAPE MODEL: DSpace@HANSUNG

Assembly Model File: DSpace@HANSUNG

UGV Geometry File: DSpace@HANSUNG